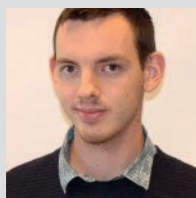


Grâce aux technologies, les objets en trois dimensions (3D) que l'on retrouve dans l'espace physique peuvent être simulés au sein d'environnements virtuels au travers de représentations offrant, par leur caractère dynamique, une impression de tridimensionnalité. Pour autant, les enfants et adolescents arrivent-ils à se représenter mentalement les objets 3D au départ de telles représentations et arrivent-ils à agir mentalement sur ces dernières? Cette thèse, située dans le domaine de la psychologie cognitive et développementale, a pour objectif de répondre à ces questions en évaluant, de manière exploratoire, le niveau de maîtrise de deux processus cognitifs en environnement virtuel auprès d'enfants et d'adolescents âgés de 6 à 15 ans: l'habileté de perception visuelle de la 3D et l'habileté de visualisation spatiale.

Pour atteindre cet objectif, deux études expérimentales, chacune réalisée auprès de plus de six cents enfants et adolescents, ont été menées dans une perspective comparative, c'est-à-dire en comparant le niveau de maîtrise des habiletés lorsque les objets 3D sont présentés dans différentes modalités (représentations virtuelles, matériel physique, représentations planes,...).

Les résultats obtenus indiquent que la perception visuelle des objets 3D, évaluée au travers d'une tâche de reconnaissance, n'est pas systématique quand ces derniers sont présentés au sein d'un environnement virtuel. Elle pose des difficultés pour certains enfants et adolescents, même à l'âge de 15 ans et même pour des objets 3D simples (ex. cube, cône). Elle diffère de la perception dans l'espace physique et se rapproche même, du moins chez les plus jeunes enfants, de la perception de représentations 2D. L'habileté de visualisation, évaluée par une tâche d'imagination de la forme de l'empreinte et de plusieurs coupes des objets 3D, semble quant à elle plus proche entre les différentes modalités même si des divergences peuvent apparaître pour certains exercices.

Puisque les habiletés spatiales étudiées sont impliquées dans les apprentissages scolaires, en particulier dans le domaine de la géométrie 3D, cette recherche s'inscrit au service de la réflexion sur l'enseignement-apprentissage de ce domaine et notamment sur le caractère adapté ou non des solides virtuels au fonctionnement cognitif des élèves. Ils invitent à éviter d'utiliser ce type de matériel en remplacement du matériel physique au moment de la découverte des objets 3D, et à prendre des précautions lorsqu'ils sont envisagés.



Aspirant F.R.S.-FNRS puis assistant sous mandat au sein du Service d'Éducation et des Sciences de l'Apprentissage (Ecole de Formation des Enseignants), dirigé par le Professeur Natacha Duroisin, Romain Beauset mène des travaux de recherche portant sur l'étude de processus cognitifs en lien avec la spatialité impliqués dans les apprentissages scolaires. Plus largement, depuis 2018, il s'intéresse à la validation d'outils et de dispositifs d'apprentissage et de différenciation notamment dans le domaine des mathématiques. Au travers de ses travaux, il considère qu'une meilleure connaissance du développement cognitif des élèves ainsi que de leur conception peut guider les pratiques enseignantes.

Romain Beauset

Études des habiletés de perception visuelle de la 3D et de visualisation spatiale en environnement virtuel chez les enfants et les adolescents âgés de 6 à 15 ans

2024

Vol. 1

Thèse de Doctorat

2024

Études des habiletés de perception visuelle de la 3D et de visualisation spatiale en environnement virtuel chez les enfants et les adolescents âgés de 6 à 15 ans

Apports pour une meilleure compréhension des mécanismes cognitifs impliqués dans les apprentissages scolaires

Volume 1

Romain Beauset



Université de Mons

Ecole de Formation des Enseignants



**Études des habiletés de perception visuelle de la 3D
et de visualisation spatiale en environnement virtuel
chez les enfants et les adolescents âgés de 6 à 15 ans**

Apports pour une meilleure compréhension des mécanismes
cognitifs impliqués dans les apprentissages scolaires

Volume 1

Beauset Romain

Thèse défendue pour l'obtention du diplôme de Docteur en Sciences de
l'éducation et Enseignement

Jury

Natacha Duroisin (Promotrice), Université de Mons
Marc Demeuse (Co-promoteur), Université de Mons
Stéphanie Bridoux, Université de Mons
Isabelle Deshaies, Université du Québec à Trois-Rivières
Annick Fagnant, Université de Liège
Isabelle Simoes Loureiro, Université de Mons

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	3
LISTE DES TABLEAUX	9
LISTE DES FIGURES	11
Remerciements.....	13
INTRODUCTION GÉNÉRALE	17
PARTIE I : FONDEMENTS THÉORIQUES	25
Introduction de la partie I.....	27
Chapitre 1. L'espace sensible : définition et construction chez l'enfant et l'adolescent.....	31
1.1. L'espace sensible (3D) : définition et représentations externes	32
1.1.1. L'espace sensible et ses différentes décompositions	32
1.1.2. Des objets de l'espace sensible à leurs représentations externes	34
1.1.2.1. Les représentations externes planes (2D) d'objets 3D.....	34
a. Les perspectives cavalières	35
b. Les projections axonométriques.....	38
c. Les perspectives linéaires	40
d. Les vues multiples (vues coordonnées).....	41
e. L'invisible rendu potentiellement visible	42
1.1.2.2. Les représentations externes virtuelles (2 ½ D).....	43
a. Des interfaces, des modalités d'interaction et des types d'environnement différents	44
b. Des modes de représentation différents	47
1.2. La construction du rapport à l'espace sensible chez l'enfant et l'adolescent	49
1.2.1. Les théories piagétienne.....	49
1.2.2. Limites des théories piagétienne.....	54
1.3. De la cognition spatiale aux habiletés spatiales.....	57
1.3.1. La cognition spatiale : définition et concepts dérivés	57
1.3.2. Les habiletés spatiales	59
1.3.2.1. Définition des habiletés spatiales	59
1.3.2.2. Importance des habiletés et enjeux de leur évaluation.....	59
1.3.2.3. Lien entre capacités spatiales et activité visuelle	65
1.3.2.4. Propriétés des habiletés spatiales.....	65
a. Les habiletés spatiales sont pluridimensionnelles.....	65
b. Les habiletés spatiales sont modérément malléables	66
c. Les habiletés sont potentiellement transférables	67
Chapitre 2. Les habiletés visuo-perceptives et le cas de la perception visuelle de la 3D.....	71
2.1. Les habiletés visuo-perceptives : définition et étapes	71
2.1.1. L'étape initiale de la perception visuelle	72
2.1.2. De la perception à la reconnaissance et à la représentation mentale	73
2.1.2.1. Quelques précautions de vocabulaire.....	73
a. Distinction entre perception et représentation.....	73
b. Distinction entre représentation mentale et représentation externe	73
2.1.2.2. Le déroulement des étapes de reconnaissance et de représentation	74
2.2. Le cas de la perception visuelle de la 3D	75
2.2.1. La perception visuelle d'objets 3D dans l'espace sensible et au départ de représentations externes.....	76

2.2.1.1.	La perception visuelle d'objets 3D dans l'espace sensible	76
2.2.1.2.	La perception visuelle d'objets 3D au départ de représentations 2D	79
a.	Complexité de perception des représentations 2D d'objets 3D en perspective	80
b.	La perception directe de certaines représentations 2D en perspective	86
c.	Le cas particulier de la perception au départ de vues multiples	88
2.2.1.3.	La perception visuelle d'objets 3D au départ de représentations 2½D	89
2.2.2.	Maitrise et développement de la perception visuelle de la 3D chez l'enfant et l'adolescent.....	95
2.2.3.	Facteurs d'influence de l'habileté de perception visuelle de la 3D.....	96
2.2.3.1.	Facteurs intrinsèques	97
a.	L'expérience et les connaissances antérieures de l'individu.....	97
b.	Les processus perceptifs de base et la présence de certains troubles	97
c.	Le niveau de rotation mentale.....	98
2.2.3.2.	Facteurs extrinsèques	98
a.	La distance : les différents espaces de Cutting (1997)	98
b.	Les objets à percevoir	98
c.	La possibilité d'exercer la perception haptique	99
Chapitre 3.	Les habiletés visuo-spatiales et le cas de la visualisation spatiale.....	105
3.1.	Les habiletés visuo-spatiales : définition et typologies.....	105
3.2.	Le cas de la visualisation spatiale.....	108
3.2.1.	La visualisation spatiale sur les objets 3D dans l'espace sensible et au départ de représentations externes.....	110
3.2.1.1.	La visualisation spatiale dans l'espace sensible	112
3.2.1.2.	La visualisation spatiale au départ de représentations 2D	113
3.2.1.3.	La visualisation spatiale au départ des représentations 2 ½ D	116
3.2.2.	Maitrise et développement de la visualisation spatiale sur les objets 3D chez l'enfant et l'adolescent	120
3.2.3.	Facteurs d'influence de l'habileté de visualisation spatiale	123
3.2.3.1.	Facteurs intrinsèques	123
a.	Le genre	123
b.	Les capacités motrices.....	125
c.	Les capacités de mémoire	125
d.	Les stratégies exploitées	126
e.	La présence de certains troubles ou déficits	127
f.	Le niveau socio-économique	127
g.	L'expérience et les connaissances antérieures de l'individu.....	127
3.2.3.2.	Facteurs extrinsèques	131
a.	Les objets sur lesquels l'habileté est exercée	131
b.	Les manipulations mentales exigées	132
c.	Les conditions dans lesquelles la tâche est proposée	133
Chapitre 4.	Les habiletés de perception et de visualisation spatiale à l'école.....	137
4.1.	L'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D	138
4.1.1.	Définitions de la géométrie	138
4.1.2.	La géométrie et son lien avec l'espace/les espaces	140
4.1.3.	Objectifs assignés et importance de la géométrie	141
4.1.4.	Les connaissances sollicitées en géométrie	145
4.1.5.	Lien avec les habiletés visuo-perceptives et visuo-spatiales.....	146
4.1.6.	Les niveaux de pensée en géométrie 3D en lien avec les habiletés spatiales.....	149
4.1.7.	Contenus relatifs à l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D en Belgique francophone	152
4.1.7.1.	Le contenu des Socles de compétences.....	153

4.1.7.2.	Le contenu des référentiels du tronc commun	155
4.1.8.	Les supports d'apprentissage en géométrie 3D	160
4.1.8.1.	Ce qu'en dit la recherche	161
a.	L'utilisation de matériel physique (3D)	162
b.	L'utilisation de représentations 2D	163
c.	L'utilisation de représentations 2 ½ D.....	165
d.	La comparaison des supports	176
e.	L'utilisation combinée de supports.....	178
f.	Manipulation ou non du matériel par l'élève	179
g.	L'orientation des supports	181
4.1.8.2.	Ce que font les enseignants	181
4.1.9.	Défis relatifs à l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D	184
4.2.	Les habiletés de perception de la 3D et de visualisation spatiale au-delà de l'apprentissage de la géométrie 3D	189
4.2.1.	L'apprentissage de la géographie	190
4.2.2.	L'apprentissage des sciences	190
	Conclusion de la partie I	195
	PARTIE II : ÉTUDES EXPÉRIMENTALES – MÉTHODOLOGIES	197
	Introduction de la partie II.....	199
	Chapitre 5. Problématique, objectif général, questions de recherche et hypothèses associées.....	203
5.1.	Problématique.....	203
5.2.	Objectif général, questions de recherche principales et spécifiques et hypothèses associées.	209
5.2.1.	Objectif général et questions de recherche principales.....	209
5.2.2.	Questions de recherche spécifiques et hypothèses relatives à l'habileté de perception visuelle des objets 3D.....	210
5.2.3.	Questions de recherche spécifiques et hypothèses relatives à l'habileté de visualisation spatiale.....	213
5.2.4.	Mise en place des études expérimentales pour apporter des réponses aux questions de recherche investiguées	214
	Chapitre 6. Création et validation de l'environnement 2 ½ D utilisé dans les études	219
6.1.	Justification du choix de l'environnement et de l'interface	219
6.2.	Justification du choix de logiciel.....	221
6.3.	Description du logiciel et de l'environnement 2 ½ D créé	223
6.4.	Apparence des éléments intégrés dans l'environnement virtuel	227
6.5.	Validation de l'environnement 2 ½ D créé	228
6.5.1.	Déroulement de la validation de l'environnement 2 ½ D créé.....	229
6.5.1.1.	Questionnaire a priori.....	229
6.5.1.2.	Introduction de l'environnement, manipulation libre et questionnaire intermédiaire	230
6.5.1.3.	Réalisation de trois tâches de manipulation	231
a.	Premier exercice : exploration partiellement libre	231
b.	Deuxième exercice : exploration en suivant des consignes verbales	232
c.	Troisième exercice : exploration en répliquant des manipulations réalisées sur un objet physique	232
6.5.1.4.	Questionnaire a posteriori	232
6.5.2.	Échantillon de la validation	233
6.5.3.	Résultats de la validation.....	234
6.5.3.1.	Résultats relatifs à la manipulation libre et au questionnaire intermédiaire.....	234
6.5.3.2.	Résultats relatifs à la réalisation des trois tâches de manipulation	236

a.	Premier exercice : exploration partiellement libre	236
b.	Deuxième exercice : exploration en suivant des consignes verbales	236
c.	Troisième exercice : exploration en répliquant des manipulations réalisées sur un objet physique	237
6.5.3.3.	Résultats relatifs au questionnaire a posteriori	238
6.6.	Conclusion de la validation	240
Chapitre 7. Première étude : étude de la perception visuelle de la 3D au départ de représentations 2 ½ D et 2D		
7.1.	Objectif général et questions de recherche	243
7.2.	Variables étudiées	244
7.2.1.	Variable dépendante	244
7.2.2.	Variables indépendantes	244
7.2.2.1.	Variables principales	245
a.	La modalité de présentation des objets 3D	245
b.	L'âge des enfants et des adolescents	246
c.	L'objet 3D sur lequel la perception visuelle est évaluée	247
7.2.2.2.	Variables secondaires	248
7.3.	Déroulement et matériel	248
7.3.1.	Appel à participation auprès de directions, d'enseignants et des parents	249
7.3.2.	Récolte d'informations préalables auprès des parents et enseignants	250
7.3.2.1.	Questionnaire destiné aux parents	250
a.	Présence avérée ou suspectée de troubles de l'apprentissage et de troubles visuels	250
b.	Risque de trouble développemental de la coordination	251
c.	Habitudes des enfants et des adolescents	252
7.3.2.2.	Questionnaire destiné aux enseignants	252
a.	Présence avérée ou suspectée de troubles de l'apprentissage	252
b.	Apprentissages antérieurs en géométrie 3D	253
7.3.3.	Création des groupes	253
7.3.4.	Entretien individuel	254
7.3.4.1.	Récolte d'informations a priori auprès de l'enfant ou de l'adolescent	254
a.	Évaluation des processus perceptifs de base	254
b.	Évaluation de la capacité de distinction des teintes de couleurs	256
7.3.4.2.	Évaluation de la perception visuelle des objets 3D	257
a.	Description détaillée de la modalité de présentation des objets 3D selon le groupe d'appartenance	257
b.	Description de la tâche de perception visuelle	260
c.	Analyse a priori de la tâche au regard d'éléments théoriques	267
7.3.4.3.	Récolte d'informations a posteriori	270
7.4.	Échantillon	271
7.4.1.	Taille des groupes	271
7.4.2.	Description de l'échantillon	271
7.4.3.	Équivalence des groupes quant aux variables investiguées	272
7.5.	Analyses	274
7.5.1.	Analyse des réponses sélectionnées à la tâche de perception	274
7.5.1.1.	Différents cas de figure par exercice	274
7.5.1.2.	Absence de compilation de scores totaux (tous exercices confondus)	275
7.5.2.	Analyse des verbatims	277
7.6.	Manquements et prolongements	279

Chapitre 8. Seconde étude : étude de la perception visuelle de la 3D et de la visualisation spatiale au départ de représentations 2 ½ D, de représentations 2D et de matériel physique	285
8.1. Objectifs généraux et questions de recherche	285
8.2. Variables étudiées	286
8.2.1. Variables dépendantes	286
8.2.2. Variables indépendantes	287
8.2.2.1. Variables indépendantes principales	288
a. La modalité de présentation des objets 3D	288
b. L'âge des enfants et des adolescents	290
c. L'objet 3D sur lequel les habiletés sont mises en œuvre	290
d. Le type de manipulation mentale / type d'exercice	291
8.2.2.2. Variables indépendantes secondaires.....	292
8.3. Déroulement et matériel	293
8.3.1. Appel à participation auprès de directions, d'enseignants et des parents	294
8.3.2. Récolte d'informations préalables auprès des parents et enseignants	295
8.3.2.1. Questionnaire destiné aux parents	295
8.3.2.2. Questionnaire destiné aux enseignants.....	295
8.3.3. Création des groupes.....	296
8.3.4. Entretien individuel	296
8.3.4.1. Récolte d'informations préalables auprès de l'enfant ou de l'adolescent : évaluation de la rotation mentale.....	296
8.3.4.2. Évaluation de la perception visuelle de la 3D	297
a. Description détaillée de la modalité de présentation des objets 3D selon le groupe d'appartenance	298
b. Description de la tâche de perception visuelle.....	300
8.3.4.3. Récolte d'informations a posteriori	304
8.3.5. Séance collective	304
8.3.5.1. Évaluation de la visualisation spatiale.....	304
a. Description détaillée des modalités de présentation selon les groupes	305
b. Description de la tâche de visualisation spatiale.....	309
c. Analyse a priori de la tâche au regard d'éléments théoriques	312
8.3.5.2. Récolte d'informations a posteriori	317
8.4. Présentation de l'échantillon	317
8.4.1. Taille des groupes	317
8.4.2. Description de l'échantillon.....	318
8.4.3. Équivalence des groupes quant aux variables investiguées	319
8.4.3.1. Équivalence entre les groupes pour l'habileté de perception visuelle	320
8.4.3.2. Équivalence entre les groupes pour la visualisation spatiale.....	321
8.5. Analyses	322
8.5.1. Analyse des réponses sélectionnées à la tâche de perception visuelle : différents taux calculés et analyses statistiques	322
8.5.1.1. Différents cas de figure par exercice	322
8.5.1.2. Absence de compilation de scores totaux (tous exercices confondus).....	323
8.5.2. Analyse des verbatims utilisés lors de la tâche de perception visuelle.....	325
8.5.3. Analyse des réponses à la tâche de visualisation spatiale	326
8.6. Complémentarité entre les deux études	329
Conclusion de la partie II	333
Liste des annexes.....	337

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Modèle des niveaux de pensées en géométrie 3D développé par Pegg (1997)</i>	<i>150</i>
<i>Tableau 2 : Modèle développé par Kondo et al. (2014) complété par Fujita et al. (2017).....</i>	<i>151</i>
<i>Tableau 3 : Contenu de la partie « Les solides et figures » des Socles de compétences (partie « Formation mathématique ») relatif à l'étude des solides (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2022)</i>	<i>153</i>
<i>Tableau 4 : Contenu de la partie « Des objets de l'espace à la géométrie » du référentiel du tronc commun relatif à la géométrie 3D (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2022).....</i>	<i>157</i>
<i>Tableau 5 : Répartition de l'utilisation des supports d'apprentissage de la géométrie 3D au primaire et au secondaire inférieur (tiré de Beauset et al., 2024b)</i>	<i>182</i>
<i>Tableau 6 : Questions de recherche et expérimentations associées.....</i>	<i>216</i>
<i>Tableau 7 : Usage des appareils tactiles pour les enfants et les adolescents participant à la validation – Nombre de participants par âge et par fréquence d'usage.....</i>	<i>234</i>
<i>Tableau 8 : Résultats au questionnaire de perception intermédiaire utilisé pour valider l'environnement– Nombre de participants par possibilité de réponse pour chaque affirmation.....</i>	<i>236</i>
<i>Tableau 9 : Résultats du deuxième exercice de validation de l'environnement – Nombre de participants par cas de figure pour chaque item</i>	<i>237</i>
<i>Tableau 10 : Résultats du troisième exercice de validation de l'environnement – Nombre de participants par cas de figure pour chaque item</i>	<i>237</i>
<i>Tableau 11 : Résultats du questionnaire a posteriori utilisé pour valider l'environnement – Nombre de participants par choix de réponse pour chaque item</i>	<i>239</i>
<i>Tableau 12 : Variables indépendantes principales et secondaires étudiées (1^{ère} étude)</i>	<i>244</i>
<i>Tableau 13 : Liste et illustration des objets 3D investigués (1^{ère} étude).....</i>	<i>247</i>
<i>Tableau 14 : Illustrations du matériel pour évaluer la perception visuelle des objets 3D (1^{ère} étude).....</i>	<i>259</i>
<i>Tableau 15 : Liste des propositions par exercice à la tâche de perception visuelle des objets 3D</i>	<i>266</i>
<i>Tableau 16 : Taille de l'échantillon (nombre de participants) par groupe et par tranche d'âge (1^{ère} étude)</i>	<i>271</i>
<i>Tableau 17 : Descriptif des établissements participants (1^{ère} étude).....</i>	<i>272</i>
<i>Tableau 18 : Calcul de la consistance interne pour les scores totaux de perception adéquate, de perception inadéquate et de non-perception : alpha de Cronbach (α)</i>	<i>277</i>
<i>Tableau 19 : Grille de codage des verbatims</i>	<i>278</i>
<i>Tableau 20 : Indice de la fiabilité inter-codeurs pour le codage des verbatims relatifs aux choix 2D (1^{ère} étude).....</i>	<i>279</i>
<i>Tableau 21 : Variables indépendantes principales et secondaires investiguées (2^e étude)</i>	<i>287</i>
<i>Tableau 22 : Illustrations du matériel pour évaluer la perception visuelle des objets 3D (2^e étude).....</i>	<i>300</i>
<i>Tableau 23 : Illustrations du matériel pour évaluer la visualisation spatiale (2^e étude).....</i>	<i>308</i>
<i>Tableau 24 : Illustration des exercices de visualisation spatiale proposés (issu de Beauset et al., 2024a).....</i>	<i>311</i>
<i>Tableau 25 : Taille de l'échantillon (nombre de participants) par groupe et par tranche d'âge (2^e étude)</i>	<i>318</i>
<i>Tableau 26 : Descriptif des établissements participants (2^e étude).....</i>	<i>319</i>
<i>Tableau 27 : Calcul de la consistance interne pour les scores totaux de perception adéquate, de perception inadéquate et de non-perception : alpha de Cronbach (α) (2^e étude).....</i>	<i>324</i>
<i>Tableau 28 : Indice de la fiabilité inter-codeurs pour le codage des verbatims relatifs aux choix 2D (2^e étude) .</i>	<i>325</i>
<i>Tableau 29 : Indice de la fiabilité inter-codeurs pour le codage des dessins d'empreinte et de coupe (N = 529)</i>	<i>327</i>
<i>Tableau 30 : Calcul de la consistance interne pour les scores totaux de visualisation spatiale : alpha de Cronbach (α).....</i>	<i>328</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Description du principe des perspectives cavalières.....	36
Figure 2 : Exemples de représentations d'un cube en perspective cavalière.....	37
Figure 3 : Description du principe des projections axonométriques.....	38
Figure 4 : Exemples de représentations d'un cube en projection axonométrique.....	39
Figure 5 : Description du principe des projections linéaires.....	40
Figure 6 : Exemples de représentations d'un cube en perspective linéaire.....	41
Figure 7 : Exemple d'une représentation d'un objet 3D en vues multiples.....	42
Figure 8 : Arêtes cachées invisibles (a), visibles sans convention (b) ou visibles avec convention (c).....	42
Figure 9 : Accès à l'information dynamique par modification du point de vue ou par modification de l'objet (exemple du logiciel TinkerCAD).....	47
Figure 10 : Exemple d'un environnement 2 ½ D en projection orthographique et perspective linéaire (TinkerCAD).....	48
Figure 11 : Exemple de logiciel permettant de combiner différentes vues de l'objet 3D (Rhino 8).....	49
Figure 12 : Construction de l'espace chez l'enfant et l'adolescent : stades du développement de la pensée, rapport à l'espace et espace construit selon Piaget.....	50
Figure 13 : Schématisation d'une approche linéaire (A) du développement (à l'instar de ce que proposent les théories piagétienne) et d'une approche non linéaire (B) du développement telle qu'envisagée par Siegler (tiré de Lubin et al., 2012).....	55
Figure 14 : Modèle de perception de la 3D de Marr (1982).....	78
Figure 15 : Illustration d'un comportement « bidimensionnel ».....	81
Figure 16 : Aberration des représentations en perspective liée à la présence d'intersections inexistantes.....	84
Figure 17 : Aberration des représentations 2D liée à la présence de faux alignements.....	84
Figure 18 : Exemple de représentation 2D d'un cube susceptible de confronter à davantage d'obstacles visuels (tiré de Widder et al., 2014).....	85
Figure 19 : L'orientation des représentations 2D en tant que facteur d'influence (tiré de Widder et al., 2014)....	88
Figure 20 : Exemples de tâches impliquant l'habileté de visualisation spatiale.....	111
Figure 21 : Illustration du matériel physique utilisé lors de l'évaluation de la visualisation spatiale par Ratliff et al. (2010).....	113
Figure 22 : Illustration du matériel virtuel utilisé par Sanandaji et al. (2017) pour évaluer la visualisation spatiale.....	117
Figure 23 : Exemples d'items d'évaluations externes nationales en Fédération Wallonie-Bruxelles pouvant faire intervenir l'habileté de visualisation spatiale au départ de représentations 2D.....	154
Figure 24 : Illustration du logiciel de géométrie dynamique Geogebra 3D.....	168
Figure 25 : De l'outil de manipulation physique à l'outil de manipulation virtuel : l'exemple du Géoplan.....	169
Figure 26 : Illustration de l'application Shapes 3D.....	171
Figure 27 : Illustration du Merge Cube.....	221
Figure 28 : Environnement virtuel créé et utilisé.....	223
Figure 29 : Rotations possibles au sein de l'environnement virtuel.....	224
Figure 30 : Exemple de widgets (Cohé et al., 2011, p.3005).....	226
Figure 31 : Comparatif entre espace physique et environnement virtuel.....	228
Figure 32 : Étape de la validation de l'environnement 2 ½ D.....	229
Figure 33 : Questionnaire intermédiaire utilisé lors de la validation de l'environnement.....	231
Figure 34 : Exemple de questions du questionnaire a posteriori utilisé lors de la validation de l'environnement.....	233
Figure 35 : Description des modalités de présentation des objets 3D investiguées et lien avec les questions de recherche (1 ^{ère} étude).....	246
Figure 36 : Grandes étapes de l'étude menée (1 ^{ère} étude).....	249
Figure 37 : Extrait du questionnaire destiné aux enseignants (1 ^{ère} étude).....	253
Figure 38 : Teintes de couleurs présentes au sein des objets 3D.....	257

<i>Figure 39 : Propositions fournies pour l'exercice du cube à la tâche de perception visuelle</i>	<i>262</i>
<i>Figure 40 : Résumé de la 1^{ère} étude expérimentale</i>	<i>281</i>
<i>Figure 41 : Description des modalités de présentation des objets 3D investiguées et lien avec les questions de recherche (2^e étude).....</i>	<i>289</i>
<i>Figure 42 : Liste et illustration des objets 3D investigués (2^e étude)</i>	<i>291</i>
<i>Figure 43 : Grandes étapes de l'étude menée (2^e étude).....</i>	<i>294</i>
<i>Figure 44 : Illustration d'un item de la 3D-MRBT.....</i>	<i>297</i>
<i>Figure 45 : Propositions fournies pour l'exercice du cylindre à la tâche de perception visuelle des objets 3D</i>	<i>303</i>
<i>Figure 46 : Exemple de connaissance géométrique pouvant être utilisée</i>	<i>313</i>
<i>Figure 47 : Exemples d'autres tâches de coupe</i>	<i>314</i>
<i>Figure 48 : Extrait du questionnaire de perception a posteriori associé à la tâche de visualisation spatiale.....</i>	<i>317</i>
<i>Figure 49 : Extrait de la grille de codage (exemple de la coupe transversale du cube)</i>	<i>326</i>
<i>Figure 50 : Résumé de la 2^e étude expérimentale (1^{ère} partie : évaluation de la perception visuelle).....</i>	<i>331</i>
<i>Figure 51 : Résumé de la 2^e étude expérimentale (2^e partie : évaluation de la visualisation spatiale)</i>	<i>332</i>

Remerciements

Au terme de cette aventure académique et personnelle qu'a été la réalisation de cette thèse, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Mes premiers remerciements se destinent à mes directeurs de thèse, les professeurs Natacha Duroisin et Marc Demeuse, sans qui l'idée même de « mettre un pied » dans le domaine de la recherche n'aurait jamais émergé. Merci à tous les deux pour la confiance, le temps et les nombreux conseils que vous avez témoignés à mon égard, déjà même avant d'entamer cette thèse. Merci en particulier, Natacha, en plus de m'accorder ta confiance, d'avoir développé la mienne malgré les nombreux doutes qui m'ont animé durant cette période. Merci aussi aux membres de vos services respectifs et plus largement à tous les collègues, anciens et actuels, que ce soit pour leur soutien et leurs bons mots tout au long de ces années. Merci d'ailleurs plus largement à toutes celles et tous ceux qui m'ont offert une aide technique et de leur temps, que ce soit dans la création du matériel expérimental, dans la récolte de données, dans leur codage ou dans la relecture de ce travail.

Merci également aux membres du comité d'accompagnement, dont les conseils avisés et la bienveillance ont permis de mener à bien ce travail. J'adresse également, par avance, mes remerciements aux membres du Jury pour l'intérêt porté à ce dernier.

Mes remerciements s'adressent évidemment au Fonds de la Recherche Scientifique – FNRS pour l'octroi d'un mandat d'Aspirant. Ce dernier m'a offert l'opportunité de développer les travaux de recherche dans de bonnes conditions et m'a notamment permis de disposer de temps pour me rendre sur le terrain, ce qui me tenait particulièrement à cœur. La transition est toute trouvée puisque mes prochains remerciements s'adressent à l'ensemble des acteurs de terrain sans qui ce projet de recherche n'aurait pas été possible. Merci aux directions d'établissements et surtout aux enseignants, pour leur intérêt à l'égard de mes travaux, leur disponibilité et leur flexibilité. Merci évidemment aussi aux enfants et aux adolescents pour leur participation active.

Enfin, et c'est sans doute le plus important pour moi, mes remerciements vont naturellement à mes proches : ma famille et mes amis. Je ne vous énumérerai pas un par un mais je suis certain que vous vous reconnaîtrez en lisant ces quelques lignes. Merci pour vos encouragements, votre bienveillance, votre patience et votre présence dans les moments plus difficiles ainsi que dans les moments de répit aux combien importants. Vous m'avez permis de dompter ce stress qui a animé ces quatre années. Je suis très chanceux et fier de pouvoir compter sur des personnes aussi solides dans ma vie. Ce travail est le mien mais c'est à vous que je le dois et ces quelques lignes ne seront jamais à la hauteur de tout ce que vous m'avez apporté avant et pendant cette épreuve. Merci en particulier à ma maman pour les nombreuses heures consacrées, que ce soit pour l'aide apportée ou le soutien moral. Cela aurait été impossible sans toi ! Merci aussi pour tout marraine !

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au quotidien, les enfants et les adolescents, tout comme les adultes d'ailleurs, sont constamment en interaction avec l'espace dans lequel ils vivent, appelé espace sensible. S'ils sont évidemment confrontés directement aux objets physiques de cet espace en trois dimensions (3D), les enfants et les adolescents sont aussi amenés à faire face à des représentations planes de ces objets, par exemple des photographies ou des dessins en perspective. En outre, avec le développement des technologies, ils sont de plus en plus confrontés à des environnements virtuels simulant cet espace et les objets qu'il contient, que ce soit en contexte scolaire ou de loisirs. Ces environnements virtuels appartiennent, pour reprendre les propos de Bertolo (2014), à un monde « 2 ½ D » situé à l'intermédiaire du monde réel physique en trois dimensions et du monde graphique en deux dimensions. Ils proposent des représentations dynamiques des objets 3D offrant une impression de tridimensionnalité.

Face aux objets physiques mais aussi à leurs représentations, qu'elles soient virtuelles ou non, les enfants et les adolescents sont amenés à solliciter des processus cognitifs, appelés habiletés spatiales, notamment pour percevoir les objets 3D, c'est-à-dire se les représenter mentalement, ou encore pour mener des opérations mentales sur ces derniers. L'étude approfondie de ces processus cognitifs spatiaux constitue un objet de recherche issu des champs de la psychologie cognitive, de la psychologie du développement ou encore de la psychologie des apprentissages. Cet objet de recherche est essentiel étant donné l'impact de tels mécanismes sur le développement des compétences académiques et professionnelles mais également sur la résolution de tâches dans la vie courante.

Pour autant, les enfants et les adolescents arrivent-ils à mettre en place de tels processus au départ de représentations virtuelles d'objets 3D ? C'est à cette large question que cette recherche tente d'apporter des éléments de réponse. Même si l'environnement virtuel permet de fournir des indices relatifs à la troisième dimension, il ne propose qu'une représentation de l'espace et nécessite que celui qui l'observe se reconstruise mentalement cette troisième dimension.

De nombreuses recherches ont étudié la capacité des individus, surtout des adultes, à naviguer et à se repérer dans un environnement virtuel simulant l'espace 3D (simulations virtuelles de villes ou d'autres espaces). Néanmoins, à notre connaissance,

peu d'études ont été menées sur les capacités des enfants et des adolescents à percevoir visuellement les objets 3D représentés virtuellement et à mener des opérations mentales sur ces derniers. Nous ne possédons finalement encore aujourd'hui que peu d'informations sur le rapport entretenu par ce public avec ces simulations de l'espace sensible, sur le niveau de maîtrise de ces habiletés spatiales dans cet espace ou sur les facteurs susceptibles d'influencer ce niveau de maîtrise (place accordée à la manipulation¹ du matériel par l'enfant ou l'adolescent, objets 3D sur lesquels les habiletés sont exercées, âge de l'individu...).

Plus encore, même si Rose et Foreman (1999) relevaient déjà l'hypothèse selon laquelle les processus cognitifs, et notamment les comportements perceptifs, mis en œuvre dans les environnements virtuels pourraient différer de ceux mis en œuvre dans l'espace sensible, rares sont les études à avoir objectivé cela en comparant les capacités spatiales d'individus lorsque celles-ci sont évaluées au départ de représentations virtuelles ou de matériel physique, les considérant peut-être à tort comme semblables. Pourtant, les objets représentés virtuellement diffèrent des objets de l'espace sensible du point de vue de leurs caractéristiques propres (Krylova & Vodyakha, 2022). De plus, la manipulation du matériel physique permet une perception haptique des objets 3D, ce qui n'est pas le cas dans l'environnement virtuel. De la même façon, les études comparant les capacités spatiales au départ de représentations virtuelles et planes sont également peu nombreuses, même si, par nature, les représentations planes fournissent moins d'informations relatives à la troisième dimension. Néanmoins, ces différentes comparaisons pourraient aider à affiner la compréhension du fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents en environnement virtuel.

Cette recherche traite, de façon exploratoire compte tenu du peu de recherches antérieures à ce sujet, la manière dont les enfants et les adolescents appréhendent les représentations virtuelles d'objets en trois dimensions. Elle porte en particulier sur l'étude de deux habiletés spatiales que sont l'habileté de perception visuelle des objets 3D et l'habileté de visualisation spatiale. L'objectif général de cette recherche est d'évaluer, dans une perspective développementale, la maîtrise de ces deux habiletés

¹ Dans ce manuscrit, le terme « manipulation » est utilisé pour évoquer la manipulation « physique » du matériel par l'individu, que ce soit la prise en main du matériel, ou la réalisation d'actions par l'enfant dans l'environnement virtuel. Cela revient à lui laisser le contrôle des mouvements appliqués à l'objet 3D. Cela s'inscrit alors en opposition des cas où les objets sont observés uniquement, quand l'individu n'a pas le contrôle sur les manipulations appliquées. Lorsque l'auteur abordera le cas de manipulations qui seraient exclusivement mentales, il y fera écho explicitement.

en environnement virtuel auprès d'enfants et d'adolescents âgés de 6 à 15 ans. En d'autres mots, il s'agit d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir adéquatement les objets 3D lorsqu'ils sont proposés virtuellement ? Sont-ils en mesure de mettre en œuvre des opérations mentales sur ces objets dans cette modalité de représentation ?

Pour ce faire, au travers de deux études expérimentales, les performances d'enfants et d'adolescents à des tâches faisant appel à ces deux habiletés sont évaluées lorsque les objets 3D sont représentés virtuellement, dans différentes conditions (ex. en laissant ou non à l'individu le contrôle de la manipulation de l'objet virtuel), mais également lorsque d'autres modalités de présentation des objets 3D sont utilisées (représentations planes, matériel physique, successions de représentations planes).

C'est donc dans une approche *comparative*², visant à identifier si des différences de performance sont observées entre des groupes indépendants d'enfants et d'adolescents confrontés à différentes modalités de présentation des objets 3D, que ce travail de recherche en psychologie cognitive est ici mené. Il s'agit ainsi, par exemple, d'identifier si les enfants et les adolescents sont capables de percevoir visuellement les objets 3D et d'agir mentalement sur ces derniers au départ de leur représentation virtuelle manipulable, d'identifier si la manipulation de telles représentations virtuelles (2 ½ D) par les enfants ou les adolescents impacte leur capacité à percevoir ces objets et à agir mentalement sur ces derniers, ou encore de voir si les enfants et adolescents arrivent à percevoir et à agir mentalement sur ces objets au départ de représentations virtuelles comme ils le font au départ de matériel physique ou de représentations planes.

La première étude se focalise sur l'habileté de perception visuelle des objets 3D dans certaines modalités alors que la seconde évalue l'habileté de perception visuelle ainsi que, chez un même panel d'enfants et d'adolescents, l'habileté de visualisation spatiale au départ de différentes modalités, certaines étant communes à la première étude et d'autres non. Les différents résultats obtenus devraient ainsi permettre d'améliorer la compréhension du fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents en environnement virtuel et donc de mieux appréhender les rapports qu'ils entretiennent avec ces simulations de l'espace sensible.

²Au sens de Baki *et al.*, (2011), Demitriadou *et al.* (2020), Katsioloudis *et al.* (2014) ou encore Wang *et al.* (2007), qui utilisent ce terme en référence à des études comparant les performances d'individus confrontés à différents types de support.

Si ce travail s'inscrit pleinement dans les domaines de la psychologie cognitive et développementale, la volonté que les résultats obtenus se mettent au service de la réflexion sur le développement des apprentissages scolaires est ici d'ores et déjà revendiquée. Cette volonté prend appui sur le postulat selon lequel l'étude du fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents peut guider la réflexion sur les enseignements et les apprentissages. Ce postulat apparaît d'autant plus légitime en géométrie 3D compte tenu de l'impact que peuvent avoir les deux habiletés investiguées sur la compréhension des concepts dans ce domaine.

Bien qu'essentielle notamment pour le développement des apprentissages spatiaux, la géométrie 3D est un domaine peu étudié au sein de la recherche en didactique des mathématiques et en sciences de l'éducation. On ne retrouve que peu de recommandations basées sur des données probantes en ce qui concerne les choix pédagogiques et didactiques à réaliser pour proposer un enseignement efficace et adapté au fonctionnement cognitif des élèves des différents niveaux scolaires. Peu de recherches ont par exemple porté sur la comparaison des supports utilisés en géométrie 3D (Claisse, 2020).

Pourtant, à l'heure où les technologies occupent parfois une place importante dans les classes, les représentations virtuelles des solides peuvent constituer des alternatives au matériel physique et aux représentations planes pour représenter les objets géométriques 3D qui sont étudiés. Se pose cependant la question de la pertinence de l'usage de telles représentations dans l'enseignement primaire et au début de l'enseignement secondaire, lorsque les objets géométriques 3D doivent notamment être découverts et caractérisés. Ainsi, les enseignants amenés à présenter des solides géométriques aux élèves peuvent légitimement se demander si remplacer le matériel physique par des représentations virtuelles est adapté aux élèves, ou encore si la manipulation de telles représentations par les élèves les aide à s'en faire une bonne image mentale.

Cette recherche n'a ni l'intention, ni la prétention, de revendiquer l'usage des environnements virtuels de la géométrie 3D, au détriment d'autres types de matériel. Il ne s'agit pas de remettre en question la parole des nombreux auteurs décrivant la phase de manipulation d'objets concrets comme une phase essentielle, voire obligatoire, pour l'apprentissage de la géométrie 3D (Bakó, 2003 ; CREM, 2002 ; Douaire *et al.*, 2009 ; Grenier & Tanguay, 2008 ; Mithalal, 2014 ; Parzysz, 1988). Néanmoins, en apportant une meilleure connaissance de la maîtrise des habiletés

spatiales intervenant dans les apprentissages lorsque celles-ci sont mises en œuvre au départ de représentations virtuelles, en comparaison aux autres modalités, les études expérimentales devraient enrichir la réflexion sur la pertinence ou non de l'utilisation de représentations virtuelles de solides avec les enfants et les adolescents, ainsi que sur les conditions d'utilisation de ces représentations.

Dans le contexte belge francophone actuel marqué par une double réforme, à la fois une réforme de l'enseignement obligatoire (Pacte pour un Enseignement d'Excellence) occasionnant notamment la réécriture des programmes scolaires (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2017) et une Réforme de la Formation Initiale des Enseignants (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2019), une telle réflexion apparaît essentielle pour accompagner les (futurs) enseignants du primaire et secondaire. Elle peut permettre de déboucher sur des pistes et recommandations, sans doute encore trop peu présentes actuellement, concernant les supports à utiliser avec les enfants et les adolescents des différents niveaux scolaires. Notons toutefois que le lecteur ne doit pas s'attendre à ici trouver une recherche visant à évaluer l'effet d'un support d'apprentissage sur l'amélioration des performances, ni même sur le rôle de l'enseignant lors des apprentissages impliquant ce type de support. Il s'agit d'une évaluation, à un moment donné, du niveau de maîtrise de deux processus cognitifs impliqués dans les apprentissages du domaine et dont les résultats peuvent venir appuyer la réflexion à l'égard de supports d'apprentissage et l'identification de points d'attention.

Les deux études expérimentales menées dans ce travail ont fait l'objet de publications présentant et discutant la manière dont l'évaluation des habiletés est ici envisagée, ou décrivant les résultats obtenus. Néanmoins, compte tenu de l'ampleur des études expérimentales et des contraintes associées aux publications, ces dernières ne les présentent que partiellement en se focalisant uniquement sur certaines variables étudiées ou certains niveaux de ces variables (ex. focalisation sur certains groupes expérimentaux, certains publics cibles...) :

- la publication « L'évaluation des habiletés spatiales au service de l'enseignement-apprentissage de la géométrie tridimensionnelle : qu'en est-il des environnements virtuels 2 ½ D ? » (Beuset & Duroisin, 2024) porte sur la première étude expérimentale mais évoque des résultats partiels et se focalise sur certains groupes expérimentaux de cette étude. De plus, la publication ne décrit pas les résultats relatifs aux variables secondaires investiguées ;

- la publication « Children Perception of 3D Usual Shapes in Virtual Environments » (Beuset & Duroisin, 2023a) se focalise quant à elle sur la seconde étude expérimentale et en particulier sur la partie de cette étude relative à l'habileté de perception de la 3D. Cet article n'aborde que quatre des six groupes expérimentaux et se centre sur les enfants âgés de 6 à 10 ans ;
- la publication « Évaluation du processus cognitif de visualisation impliqué dans l'apprentissage de la géométrie » (Beuset *et al.*, 2024a) décrit la manière dont l'habileté de visualisation spatiale est évaluée lors de la seconde étude expérimentale. La publication ne présente pas les résultats obtenus mais pose un regard réflexif sur cette évaluation en prenant appui sur certaines productions d'enfants et d'adolescents et en la mettant en relation avec d'autres outils évaluant l'habileté de visualisation des figures planes ;
- la publication « Les fonctions exécutives dans l'apprentissage de la géométrie : Illustration de deux problèmes en géométrie plane et géométrie 3D » (Beuset *et al.*, 2025) a analysé également la tâche choisie pour évaluer l'habileté de visualisation spatiale, sous l'angle des fonctions exécutives sollicitées ;

Bien qu'elles soient complémentaires, leur présentation successive ne permettrait pas au lecteur de prendre connaissance de l'ensemble des variables investiguées et des résultats associés à ces différentes variables.

Compte tenu de cette situation et en vue d'accompagner le lecteur dans la compréhension des études expérimentales dans leur entièreté, ce manuscrit suit un plan classique, tout en faisant référence explicitement aux publications auxquelles le contenu des parties se rapporte. Le plan complet de cette thèse est composé de douze chapitres au total répartis dans quatre parties.

Ce premier volume présente les deux premières parties de ce travail de thèse. Dans celui-ci, la première partie, composée de quatre chapitres, porte sur la présentation des fondements théoriques nécessaires à la compréhension des études expérimentales menées. Un premier chapitre plus général porte sur l'espace 3D. Les deux chapitres suivants décrivent respectivement deux grandes catégories d'habiletés spatiales, à savoir les habiletés visuo-perceptives et visuo-spatiales et permettent de se focaliser sur les deux habiletés investiguées : l'habileté de perception de la 3D et l'habileté de visualisation spatiale. Enfin, le dernier chapitre porte plutôt sur l'apprentissage de l'espace à l'école et se focalise particulièrement sur l'enseignement-

apprentissage de la géométrie 3D. Il permet ainsi d'identifier certains enjeux permettant de donner du sens aux études expérimentales menées.

La deuxième partie, présentée dans ce volume, porte sur la méthodologie relative aux deux études expérimentales menées. Pour ce faire, quatre chapitres sont proposés. Les deux premiers chapitres sont communs aux deux études expérimentales. Le premier d'entre eux (chapitre 5) présente, en prenant appui sur les éléments clés de la partie 1, la problématique associée à ce travail de recherche ainsi que les questions de recherche et hypothèses qui en découlent. Le chapitre 6 décrit l'environnement virtuel créé et utilisé dans le cadre des deux études. Enfin, les deux chapitres suivants (chapitres 7 et 8) présentent respectivement la méthodologie de chacune des deux études expérimentales.

Le second volume présente quant à lui les résultats des études menées et leur mise en perspective.

La troisième partie présente les résultats de ces études expérimentales. Celle-ci est décomposée en deux chapitres portant chacun sur une des deux habiletés investiguées. Ainsi, le chapitre 9 porte sur les résultats relatifs à la maîtrise de l'habileté de perception des objets 3D, en prenant appui sur les résultats de la première étude expérimentale et d'une partie de la seconde. Le chapitre 10 porte quant à lui sur l'habileté de visualisation spatiale et présente donc une partie des résultats de la seconde étude. Ces deux chapitres présentent et discutent les résultats permettant d'apporter des réponses à différentes questions de recherche présentées dans le chapitre 5.

Finalement, la quatrième et dernière partie de ce travail porte sur les apports des études expérimentales menées. Le chapitre 11 décrit les apports des études pour le domaine de la psychologie cognitivo-développementale tandis que le chapitre 12 permet de répondre à l'intention préalablement évoquée concernant l'apport pour l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D.

Notons que les éléments communs aux deux volumes, tels que la bibliographie, sont placés en fin de second volume.

PARTIE I : FONDEMENTS THÉORIQUES

Introduction de la partie I

Cette recherche étudie les rapports qu'entretiennent les enfants et les adolescents avec l'espace sensible et ses représentations. À travers cette première partie, les balises théoriques nécessaires à la compréhension de la recherche menée sont proposées. Étant donné le caractère multidisciplinaire de l'espace, ce cadrage théorique transcende les disciplines. Il a recours, quand c'est jugé pertinent, à des références provenant de plusieurs domaines, principalement ceux de la psychologie cognitive, de la psychologie des apprentissages, de la psychologie développementale, des sciences de l'éducation et de la didactique des disciplines scolaires. Ce sont des domaines, parmi de nombreux autres, qui s'intéressent aux rapports qu'entretient l'humain avec l'espace dans lequel il vit (Waller & Nadel, 2018).

Pour ce faire, cette première partie s'organise en quatre chapitres. Le premier chapitre porte sur le concept d'espace et plus particulièrement l'espace sensible. Il permet de décrire les représentations externes de l'espace sensible en se focalisant principalement sur les représentations planes et virtuelles. Il décrit ensuite la manière dont les rapports entretenus avec cet espace par l'enfant et l'adolescent se construisent et se développent avant d'aborder, dans une perspective cognitiviste, les concepts de cognition spatiale et d'habileté spatiale. Puisque la recherche ici menée investigate, en particulier, deux habiletés spatiales que sont la perception de la 3D et la visualisation spatiale, ces deux habiletés font respectivement l'objet des chapitres 2 et 3. Pour chacun de ces deux chapitres, le fonctionnement de l'habileté investiguée est décrit tout en veillant à mettre en avant les spécificités relatives à leur mise en œuvre au départ d'objets physiques de l'espace sensible mais aussi quand c'est possible au départ de représentations planes ou virtuelles. Chacun de ces deux chapitres s'intéresse ensuite à la maîtrise de l'habileté chez les enfants et les adolescents et décrit également les différents facteurs susceptibles d'influencer cette maîtrise. Enfin, le dernier chapitre s'intéresse davantage à la place qu'occupe l'espace à l'école en accordant une attention particulière à l'enseignement-apprentissage de la géométrie tridimensionnelle (3D) et notamment aux supports d'apprentissage utilisés. Ainsi, cette première partie permettra de mettre en évidence des éléments qui composent la problématique de la recherche menée et de comprendre les choix méthodologiques réalisés dans les deux études menées, décrits en deuxième partie. Ces éléments seront également exploités dans la troisième partie, notamment en vue de discuter les résultats obtenus.

Chapitre 1. L'espace sensible : définition et construction chez l'enfant et l'adolescent

Chapitre 1. L'espace sensible : définition et construction chez l'enfant et l'adolescent

L'espace est un concept complexe à définir et à appréhender (Duroisin, 2015). Plusieurs auteurs ont d'ailleurs tenté de le définir mais avec difficultés (Postma, 2017). C'est un concept utilisé dans de nombreux domaines (mathématiques, géographie, sciences, arts, sociologie...) et sa construction renvoie à différents champs disciplinaires (Berthelot & Salin, 1999-2000).

Dervillez-Bastuji (1982), linguiste, propose trois définitions au concept d'espace.

La première et principale définition décrit l'espace comme une surface -s'il est en deux dimensions- ou un volume -s'il est en trois dimensions- pouvant être perçu, occupé ou parcouru. Ainsi, une feuille de papier, une parcelle de terre ou encore une pièce de la maison peuvent être considérées comme des espaces. Cette définition se rapproche de celle, plus large et plus récente, proposée par Godart (2020), qui souligne le lien unissant l'espace et la perception en considérant l'espace comme « *une étendue, abstraite ou non, ou comme la perception de cette étendue* » (p.15). L'auteur le décrit comme une structure englobante qui, selon les disciplines, possède des contours variés et qui rassemble des objets, des personnes ou encore des lieux. Par exemple, en éducation, on peut parler de l'espace de la classe qui constitue un ensemble regroupant le lieu de la classe à proprement parler, mais aussi les objets (bancs, chaises...) et les personnes (enseignants, élèves...) qui s'y trouvent et les relations qu'ils entretiennent entre eux et avec l'extérieur de l'espace.

La deuxième définition proposée par Dervillez-Bastuji (1982) associe la notion d'espace à l'intervalle séparant deux éléments, qu'ils soient en deux ou en trois dimensions. On parle, par exemple, d'espace pour décrire ce qui sépare deux mots lorsqu'on écrit, ou pour évoquer la distance qui sépare deux objets. Ce deuxième sens attribué à la notion d'espace n'apparaît cependant pas incompatible avec la première définition apportée puisque cet intervalle séparant les éléments peut finalement être associé à une surface ou un volume pouvant être perçu, occupé ou parcouru.

Enfin, la troisième définition plus spécifique, associée notamment au domaine de la musique, définit l'espace comme un intervalle temporel. Ce lien qui unit espace et temps était, d'après Godart (2020), déjà présent dans l'Antiquité où le terme *spatium* se rapportait à la fois au lieu et à la durée.

En prenant appui sur la première définition apportée par Dervillez-Bastuji (1982), qui se rapporte au sens du mot utilisé dans ce travail, il est possible de considérer que l'être humain vit, au quotidien, dans un espace. Il s'agit d'un espace en trois dimensions, dans lequel il est situé et avec lequel il est constamment en interaction, par exemple, lorsqu'il s'y déplace ou lorsqu'il manipule physiquement ou mentalement des éléments qui s'y trouvent et qui le composent. Cet espace est qualifié d'espace « sensible ».

À travers ce premier chapitre, l'espace sensible est défini, ainsi que les différentes représentations externes de cet espace et en particulier des objets qu'il contient. Dans une perspective développementale, la manière dont les rapports avec cet espace se construisent chez l'enfant et l'adolescent est ensuite présentée. Pour cela, le chapitre prendra notamment appui sur les travaux piagétien, tout en prenant de la distance avec ces derniers. Enfin, dans une perspective davantage cognitiviste, l'étude d'une composante de la cognition spatiale, à savoir les habiletés spatiales, est abordée. En effet, l'étude de la manière dont l'humain agit dans, sur et avec cet espace qui l'entoure et auquel il appartient occupe une place privilégiée dans le domaine de la psychologie cognitive (Denis, 2012).

1.1. L'espace sensible (3D) : définition et représentations externes

1.1.1. L'espace sensible et ses différentes décompositions

L'espace sensible est aussi nommé « espace physique » (Laborde, 1990 ; Cantù, 2009). Il est l'espace dans lequel nous vivons et qui contient les objets physiques, en trois dimensions, auxquels nous pouvons accéder par le biais des sens (Chevallard, 1991). Il s'agit de l'espace qui se rapporte au monde réel, avec lequel nous interagissons constamment. Il est donc considéré comme un espace en trois dimensions (Cantù, 2009) et est résumé comme le « *monde des objets matériel* » (Perrin-Glorian & Godin, 2018, p.10). En plus d'être appréhendés grâce à notre corps, notamment grâce à la vision ou au toucher, cet espace et les objets qu'il contient peuvent être appréhendés grâce à des instruments (Laborde, 1990), notamment les instruments de mesure qui permettent d'obtenir des informations métriques sur ces derniers. Comme le soulignent Perrin-Glorian et Godin (2018), de tels instruments peuvent permettre d'outiller la perception et donnent des moyens plus précis et plus sûrs pour, par

exemple, décrire des formes et leurs propriétés, des positions ou encore des déplacements.

Brousseau (2000) propose une décomposition de l'espace sensible en trois parties, en fonction de la « taille » de l'espace avec lequel le sujet interagit. Ainsi, les auteurs distinguent le micro-espace, le méso-espace et le macro-espace. Le micro-espace est un espace proche mais extérieur au sujet, auquel il va pouvoir accéder via la manipulation et la vision d'objets. C'est donc l'espace dans lequel le sujet va interagir avec les petits objets. Le méso-espace est l'espace dans lequel le sujet effectue des déplacements. Contrairement au micro-espace, le sujet est situé à l'intérieur de cet espace et en fait partie intégrante. Le domaine de cet espace est contrôlé par sa vue. Le macro-espace possède une surface beaucoup plus importante, ce qui ne permet pas au sujet de l'appréhender de manière directe et instantanée. L'entièreté de cet espace est hors de portée de l'expérience perceptive et motrice. En effet, le sujet n'a accès qu'à certaines visions locales et il devra par conséquent faire appel à une conceptualisation de l'espace pour construire, de manière intellectuelle, sa vision globale.

D'autres typologies assez similaires sont également proposées pour décomposer l'espace. Cutting (1997) propose une typologie de trois types d'espace auxquels peuvent appartenir les objets de l'espace sensible, selon la distance qui les sépare de l'observateur. L'espace personnel (appelé aussi péri-personnel) constitue l'espace d'action directe du sujet sur l'objet, il s'étend de 0 à 2 mètres. L'espace d'action s'étend quant à lui de 2 à 50 mètres. Enfin, au-delà de 50 mètres, Cutting (1997) parle de l'espace perceptif.

Montello (1993, cité par Denis, 2016) propose quant à lui une décomposition assez proche, organisée aussi en fonction de la distance, mais découpant l'espace sensible en quatre niveaux. Le premier, nommé « espace figural », est l'espace rapproché qui peut être atteint et manipulé sans que le sujet ne se déplace. Ensuite, on retrouve l'espace « panoramique » qui est composé de tout ce qui est visible sans que le sujet ne se déplace. L'espace « environnemental » correspond à un espace plus étendu, construit par l'exploration et les déplacements de l'individu et appréhendable grâce à ces derniers. Enfin, l'espace est qualifié de « géographique » s'il n'est pas appréhendable par les déplacements. C'est donc uniquement par des représentations cartographiques qu'il le devient.

1.1.2. Des objets de l'espace sensible à leurs représentations externes

Si l'espace sensible est l'espace en trois dimensions qui contient les objets physiques, cet espace ainsi que les objets 3D qui lui appartiennent peuvent être également représentés. Hershkowitz (1990) relevait déjà que, dans le monde moderne, une grande partie des informations sur l'espace 3D sont représentées et diffusées à l'aide de média 2D et que l'intégration des technologies permet d'aller au-delà de ce média 2D en intégrant une composante dynamique. Différentes représentations externes d'objets 3D ou d'espace 3D existent, c'est-à-dire différents produits matériels utilisés pour les représenter. Chacun de ces moyens possède une syntaxe propre, permettant une représentation plus ou moins adaptée de ce qui est représenté (Baldy & Chatillon, 1992). Ces représentations externes peuvent être des objets matériels en trois dimensions, appartenant donc elles-mêmes à l'espace sensible. C'est le cas, par exemple, des maquettes ou des modèles miniatures. Néanmoins, comme le souligne Hershkowitz (1990), d'autres représentations externes, d'une dimension inférieure à la 3D, peuvent également être proposées, comme les représentations planes (2D) et les représentations virtuelles ($2 \frac{1}{2}$ D). Lowrie (2012) affirme que les représentations externes peuvent être des représentations graphiques, mais aussi des représentations exploitant des systèmes symboliques conventionnels des mathématiques.

1.1.2.1. Les représentations externes planes (2D) d'objets 3D

Au quotidien, nous sommes très souvent confrontés, et ce dès le plus jeune âge (Frick & Newcombe, 2015), à des représentations planes, c'est-à-dire des représentations en deux dimensions (2D), de l'espace sensible ou des objets de cet espace. C'est le cas, par exemple, lorsqu'on travaille sur des photographies, des dessins en perspective mais aussi des plans. Ces représentations planes impliquent, par définition, une perte d'informations puisqu'elles sont en deux dimensions et qu'elles représentent un élément ou un espace en trois dimensions. Elles peuvent donc être qualifiées de distantes car toutes les propriétés de ce qui est représenté ne peuvent en effet pas être traduites, sauf éventuellement en exploitant des codes et des conventions pouvant être artificielles (Chaachoua, 1997 ; Mesquita, 1998 ; Parzysz, 1988). Les représentations 2D ne permettent pas de rendre directement visibles certaines relations et pour d'autres relations, elles maintiennent une ambiguïté.

Spécifiquement, dans le cadre de la représentation 2D d'objets 3D, différents modes de représentation existent (Audibert, 1990). Chacun d'eux implique de faire appel à une

série de conventions et propose des représentations 2D plus ou moins distantes de l'objet de départ (Bakó, 2003). Elles impliquent également des charges cognitives différentes (Pillay, 1998). Quatre modes de représentation d'objets 3D, qui semblent être les plus couramment rencontrés, sont ci-dessous présentés : les perspectives cavalières, les projections axonométriques, les perspectives linéaires et les vues multiples. Par simplicité, ceux-ci sont illustrés ci-dessous au départ d'exemples d'objets géométriques simples, comme un objet de forme cubique, mais pourraient être utilisés pour représenter des objets plus complexes. En parallèle à ces quatre modes ici présentés, d'autres modes de représentation 2D coexistent et sont parfois utilisés de manière spécifique dans certains domaines académiques et professionnels, comme les épures géométriques, la projection cotée ou la projection sphérique (Audibert, 1990 ; Bertolo, 2014).

a. Les perspectives cavalières

Les perspectives cavalières peuvent être définies, comme l'illustre la Figure 1, telles des projections obliques faites « *sur un tableau vertical parallèle à l'une des trois faces principales de l'objet* » (Audibert, 1990, p.4). Autrement dit, les représentations en perspective cavalière sont obtenues par projection suivant une direction oblique (non perpendiculaire) d'un objet sur un plan parallèle à une face principale de l'objet.

Bien que son origine soit mal connue, la perspective cavalière est depuis fort longtemps liée à la géométrie tridimensionnelle (3D) et est le principal mode utilisé dans le cadre de l'apprentissage de ce domaine puisqu'il implique la permanence d'un certain nombre de propriétés qui le rend pertinent dans ce contexte (Audibert, 1990). Ce mode de représentation apparaît contraire à ce qui se passe dans la vision des objets puisque les segments apparaissent normalement de plus en plus petits lorsqu'ils s'éloignent de l'œil alors que leur taille ne varie pas dans le dessin en perspective cavalière. Même s'il n'est pas conforme à la vision des objets, le dessin en perspective cavalière permet de rendre compte de la troisième dimension à l'aide de procédés graphiques simples et est qualifié de conforme à la réalité des objets représentés (Audibert & Keita, 1987). Il permet de conserver plusieurs propriétés géométriques fondamentales de ces derniers. Il implique une conservation à l'identique, c'est-à-dire sans déformation, des éléments (angles et distances) parallèles au plan de projection. Par exemple, la face avant d'un cube, qui est un carré, est représentée par un carré, dans la représentation en perspective cavalière. Outre cela, la perspective implique la

conservation du parallélisme (deux segments parallèles sur l'objet 3D apparaissent parallèles dans la représentation 2D), la conservation des alignements (trois points qui sont alignés sur l'objet 3D apparaissent alignés dans la représentation 2D), la conservation du milieu de segments (un point situé au milieu de deux autres sur l'objet 3D apparaît également au milieu des deux autres sur la représentation 2D), ou encore la conservation des proportions dans chaque direction de l'espace (les rapports de longueurs qui unissent deux segments suivant la même direction sur l'objet 3D sont conservés dans la représentation 2D). En conséquence, deux figures égales situées dans deux plans parallèles différents sont représentées par deux figures égales. Par exemple, les faces latérales d'un cube, toutes deux de forme et de taille égales, sont représentées par deux formes égales. Grâce à ces différentes propriétés, la perspective cavalière constitue un compromis entre ce qui est vu et ce qui est su (Parzysz, 1991) de l'objet et offre donc un support de raisonnement idéal pour la résolution de problèmes en géométrie 3D. Par ailleurs, ce mode de représentation est proche des démarches spontanées, son codage est simple et les notions géométriques requises pour le maîtriser sont facilement accessibles par les jeunes élèves (Bonafé & Sauteur, 1998).

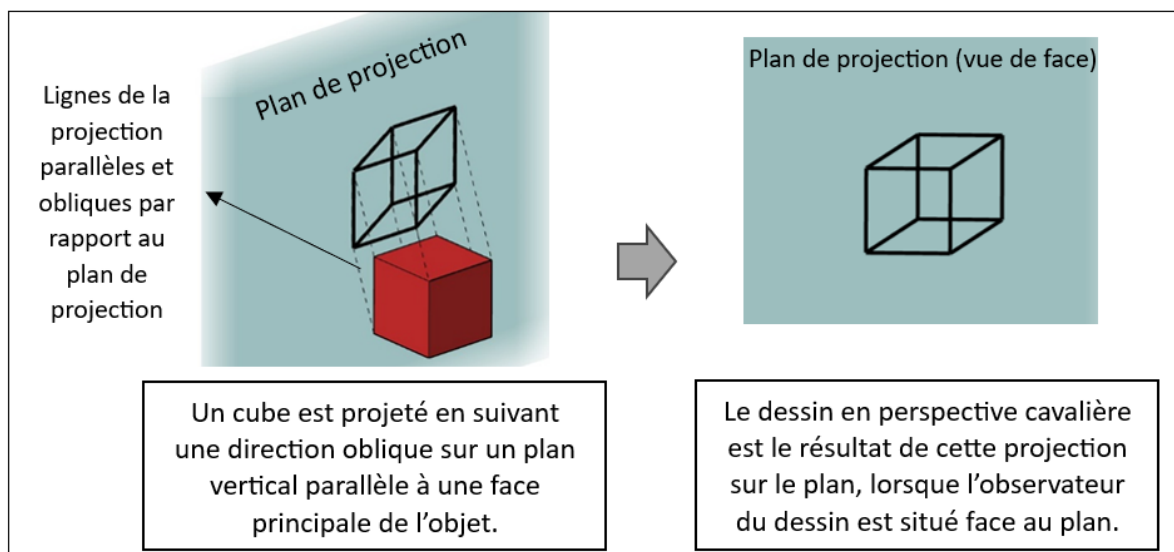


Figure 1 : Description du principe des perspectives cavalières

Dans les représentations en perspective cavalière d'objets 3D, deux variables sont à prendre en considération : d'une part, la direction des fuyantes, c'est-à-dire la direction qui sera donnée aux droites qui dans l'objet 3D sont perpendiculaires au plan de projection, et, d'autre part, le rapport suivant lequel les longueurs sont modifiées sur cette direction des fuyantes. Dès lors, comme l'illustre la Figure 2 au moyen de trois

exemples, il existe une infinité de représentations 2D d'un même objet en perspective cavalière, dépendantes de ces deux variables. D'après Audibert et Keita (1987), la perspective cavalière prenant pour variable une direction des fuyantes de 45° et un rapport des longueurs de $\frac{1}{2}$ est recommandée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), qui la nomme d'ailleurs « projection cavalière courante ». De son côté, Claisse (2020) évoque que certaines représentations sont davantage ressemblantes à l'objet 3D. Il recommande alors un angle des fuyantes variant entre 30° et 60° , sans quoi les perpendiculaires risquent d'apparaître trop horizontales/verticales, ainsi qu'un rapport variant entre 0,5 et 0,8 afin que l'objet représenté ne paraisse ni trop raccourci ni trop étiré.

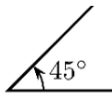
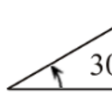
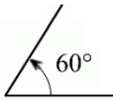
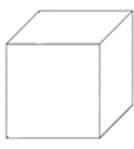
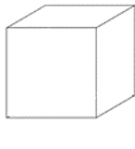
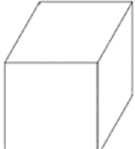
Angle des fuyantes			
Rapport selon lequel les longueurs sont modifiées sur la direction des fuyantes	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$
Exemples de représentation			
↓			
Perspective recommandée par l'AFNOR (Audibert & Keita, 1987)			

Figure 2 : Exemples de représentations d'un cube en perspective cavalière

Pour autant, le cas de la représentation de corps ronds, comme la sphère ou le cône, en perspective cavalière mérite une attention particulière. En effet, si la perspective cavalière apparaît idéale pour la représentation de polyèdres, cela ne semble pas être le cas pour les corps ronds puisque la représentation en perspective cavalière de ce type d'objets 3D soulève plusieurs difficultés de différentes natures. L'une d'elles est technique et concerne le tracé des ellipses qui interviennent dans le cas de la construction d'une représentation en perspective cavalière de ce type d'objets 3D. Une autre difficulté se rapporte aux contours apparents. En perspective cavalière, les dessins s'appuient exclusivement sur les arêtes des polyèdres puisque, pour ces objets 3D, les contours apparents sont formés exclusivement d'arêtes. Dans le cas des corps ronds, la notion de « génératrice » vient se substituer à la notion d'arête. Enfin, une difficulté se rapporte à la vision puisque, pour les corps ronds, une profonde

contradiction émerge, liée au fait qu'en observant une sphère, il est difficile de voir un contour apparent elliptique (Bonafé & Sauter, 1998).

De plus, ce mode de représentation reste uniquement un mode de représentation 2D fixe et perd sa logique dans le cadre de représentations dynamiques d'un objet 3D puisqu'il impose à l'objet de se situer dans une position particulière par rapport au plan de projection (avec une face parallèle au plan).

b. Les projections axonométriques

Les projections axonométriques sont des représentations planes obtenues à la suite d'une projection orthogonale d'un objet sur un plan oblique, c'est-à-dire non parallèle aux faces et arêtes de l'objet (Audibert, 1990), comme l'illustre la Figure 3. Dans la définition proposée par Audibert, on observe que les perspectives cavalières et projections axonométriques sont considérées comme distinctes puisqu'elles sont obtenues par des projections différentes (l'une oblique et l'autre orthogonale) d'un objet dont la position par rapport au plan de projection est aussi différente (l'une à une face parallèle au plan de projection et l'autre non). Toutefois, certains auteurs, à l'instar de Bakó (2003), considèrent que cette définition présentée est un cas particulier et que le terme de projection « axonométrique » peut s'étendre à l'ensemble des projections sur un plan obtenues grâce à des lignes de projections parallèles, pas uniquement orthogonales comme le suggère Audibert. De ce fait, ces auteurs incluent la perspective cavalière au sein des projections axonométriques.

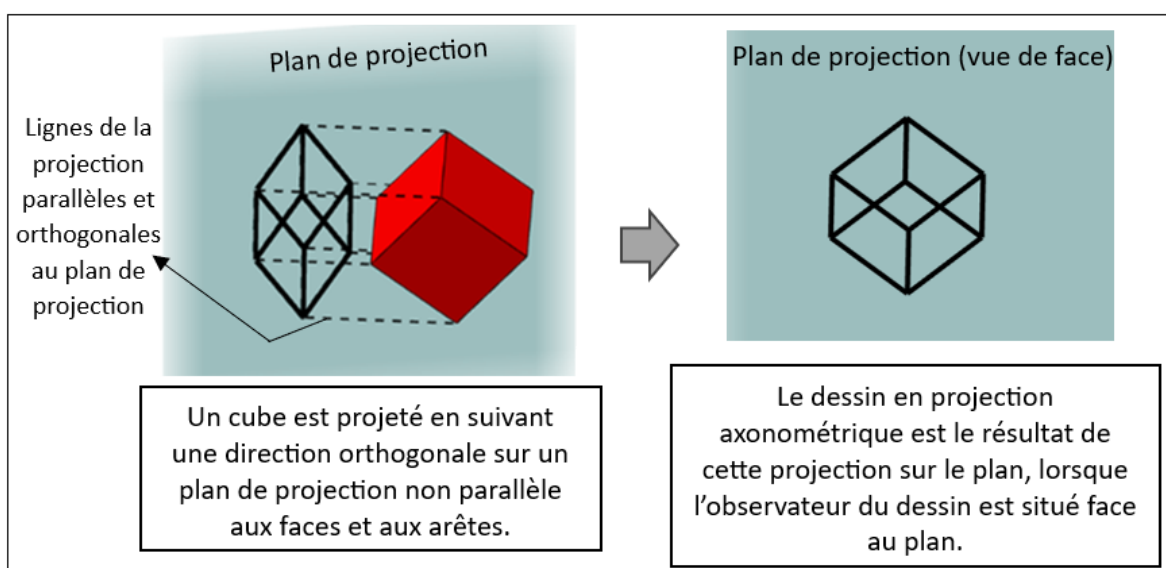


Figure 3 : Description du principe des projections axonométriques

Les projections axonométriques, telles que définie par Audibert, partagent certaines caractéristiques communes avec la perspective cavalière. D'abord, un même décalage avec le fonctionnement de la vision est observé dans les projections axonométriques, et ce même si les représentations de ce type sont majoritairement proches de ce que les yeux voient (Parzysz, 1991). En dépit de ce décalage, ce mode de représentation permet lui aussi de préserver des propriétés essentielles (Parzysz, 1991), qui rapprochent la représentation de la réalité de l'objet 3D. Parmi ces propriétés, il est possible d'évoquer la conservation du parallélisme, des alignements, des milieux et des rapports de longueurs selon une direction. Néanmoins, contrairement à la perspective cavalière, aucune face de l'objet réel n'est représentée par une forme identique³. Ainsi, comme l'illustrent les exemples donnés en Figure 4, la face frontale carrée d'un cube n'est donc pas représentée par un carré.


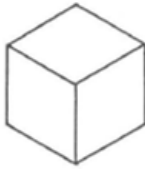
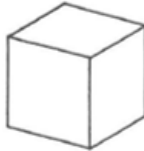
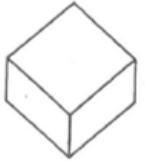
Nom associé	Isométrique	Trimétrique	Dimétrique usuelle
Caractéristiques (deux amplitudes d'angles formés par les trois dimensions de l'objet sur le dessin / rapports des longueurs sur chacune des trois dimensions)	120°, 120° / 0,82 , 0,82, 0,82	120°, 105° / 0,92 , 0,65, 0,86	131,30°, 131,30° / 0,47, 0,94, 0,94
			

Figure 4 : Exemples de représentations d'un cube en projection axonométrique

Comme pour la perspective cavalière, plusieurs variables sont à prendre en considération dans les représentations en projection axonométrique : les angles formés par les dimensions (deux angles) et le rapport de longueurs (trois rapports). Cela implique alors qu'une multitude de représentations en projection axonométrique existent pour un même objet. Parmi toutes les projections axonométriques, certaines sont plus régulièrement utilisées. C'est le cas notamment de celles présentées en

³Cela pourrait se produire uniquement si le plan était placé de manière parallèle aux faces de l'objet, ce qui ne correspond pas à la définition apportée par Audibert (1990) qui précise que le plan doit être dans une position oblique par rapport aux faces. Dans ce cas, la représentation obtenue serait uniquement une représentation de l'avant du solide, ce qui sera développé dans le mode de représentation des vues multiples.

Figure 4, à savoir la perspective isométrique, trimétrique ou encore dimétrique usuelle (Audibert & Keita, 1987).

c. Les perspectives linéaires

Contrairement aux modes de représentation préalablement présentés, les perspectives linéaires, nommées aussi perspectives coniques, centrales, ou vraies (Audibert, 1992), sont certainement le mode de représentation le plus proche de la vision. D'ailleurs, pour définir la perspective linéaire, Lismont et Rouche (1999, cités par Mithalal, 2014) utilisent l'analogie de ce qu'un œil, immobile et ponctuel, voit au travers d'une « fenêtre » et qui est reproduit sur un tableau de sorte que le tableau puisse être superposé sur la fenêtre sans que l'œil ne fasse de différence entre les deux. Comme l'illustre la Figure 5, dans ce mode de représentation, chaque point de l'objet représenté est relié à un point de convergence, nommé centre de projection, par un faisceau visuel et chaque point de la représentation se trouve à l'intersection entre ce rayon visuel et le plan de projection, couramment appelé plan du tableau (Audibert, 1990).

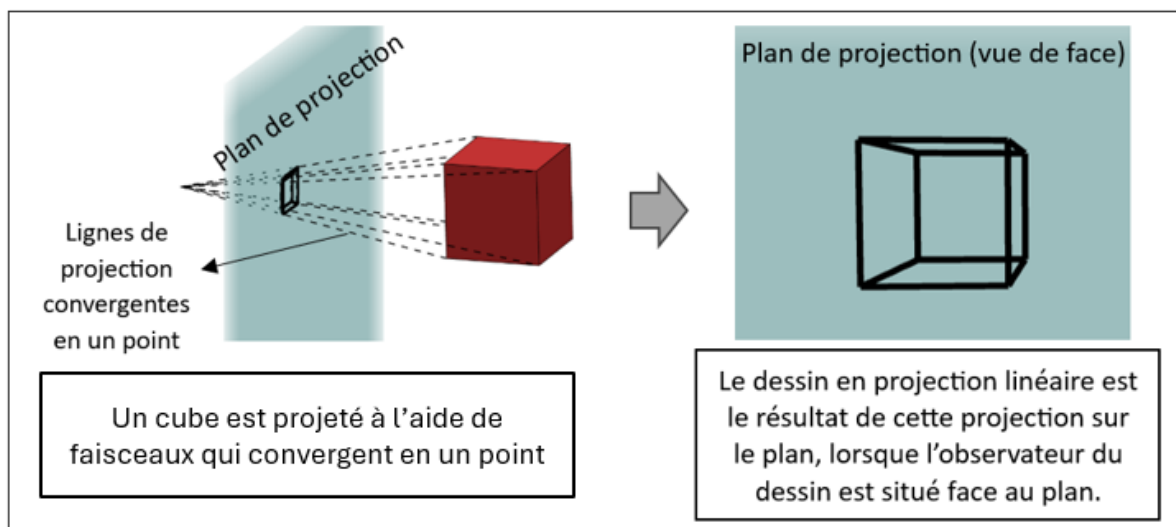


Figure 5 : Description du principe des projections linéaires

Ce mode de représentation est très complexe techniquement et n'est pas idéal pour travailler sur les propriétés des objets 3D puisqu'il ne respecte pas certains invariants fondamentaux comme l'égalité de rapports de longueurs suivant une direction ou la conservation du parallélisme (Mithalal, 2010). En effet, dans ce mode de représentation, des arêtes qui sont parallèles au sein de l'objet physique peuvent apparaître non parallèles sur la représentation puisqu'elles convergent vers un ou

plusieurs points nommés points de fuite. Ce mode de représentation est dès lors peu utilisé lors des apprentissages scolaires au primaire et secondaire, même s'il n'en reste pas moins historiquement important dans d'autres domaines, par exemple le domaine artistique (Audibert, 1990 ; Mithalal, 2010). Comme pour les deux précédents modes de représentation présentés, une infinité de dessins en perspective linéaire peuvent être proposés pour un même objet, comme l'illustrent trois exemples proposés en Figure 6. Ces dessins dépendent du nombre de points de fuite ou de leur(s) position(s).

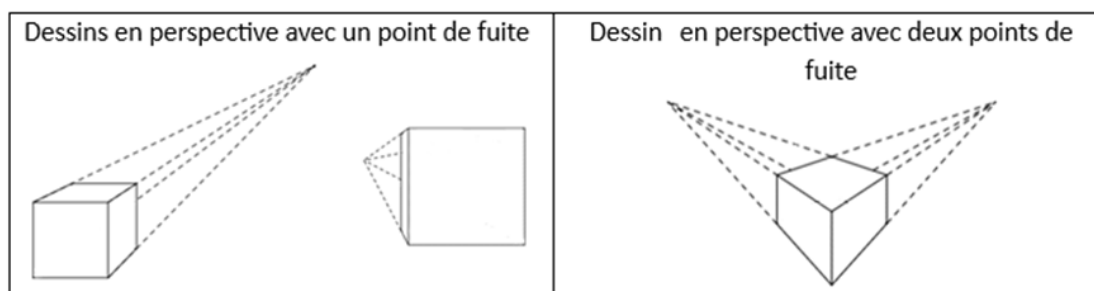


Figure 6 : Exemples de représentations d'un cube en perspective linéaire

d. Les vues multiples (vues coordonnées)

Outre les dessins en perspective, d'autres modes de représentation d'objets 3D peuvent également être utilisés. Il est par exemple possible de proposer une représentation en plusieurs parties, constituée des différentes vues de l'objet 3D (vue de face, vue arrière, vue du dessus, vue du dessous, vue de gauche, vue de droite), voire uniquement de certaines de ces vues. Il s'agit alors, pour obtenir le dessin de chaque vue, de faire appel à des projections orthogonales obtenues sur un plan parallèle à la face observée. Ce mode de représentation complet, illustré en Figure 7, est ce qui est couramment appelé « représentation en vues multiples » ou « vues coordonnées ». Dans le cadre d'un cube, cette représentation serait alors composée de carrés. Ce mode de représentation est particulièrement utilisé dans certains domaines industriels. Il offre l'avantage de ne fournir aucune déformation. Pour autant, il nécessite de pouvoir coordonner les différentes vues (Audibert, 1990) et n'offre pas d'indication directe relative à la troisième dimension. Contrairement au dessin en perspective présenté préalablement (perspectives cavalières, projections orthographiques ou perspectives linéaires), une seule représentation en vues multiples est associée à un objet 3D.

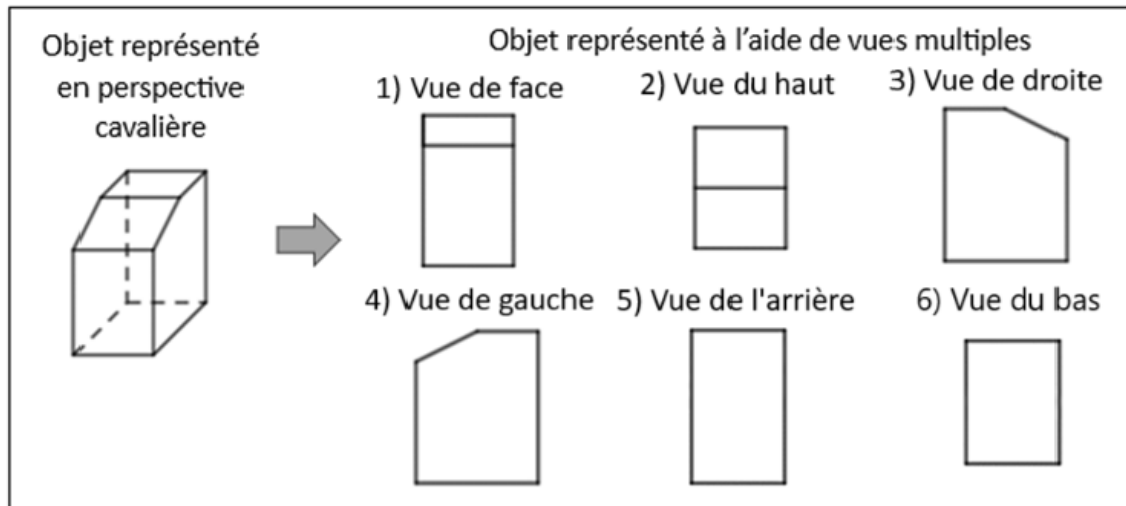


Figure 7 : Exemple d'une représentation d'un objet 3D en vues multiples

e. L'invisible rendu potentiellement visible

De manière générale, les différents modes de représentation préalablement présentés peuvent offrir la possibilité de rendre visibles ou non les parties cachées de l'objet 3D (Figure 8). Si conserver les arêtes cachées donne davantage d'informations, il implique aussi des limites qui rendent difficile la compréhension du dessin. Par ailleurs, une convention, qui n'est pas propre au mode de représentation, concerne l'usage de segments en pointillé pour distinguer les arêtes cachées, c'est-à-dire des arêtes normalement invisibles car n'apparaissant pas au premier plan. Cela permet d'offrir une information supplémentaire liée à l'orientation. Néanmoins, cette convention n'est pas systématiquement utilisée et les éléments cachés sont parfois donnés en traits pleins, comme les autres arêtes.

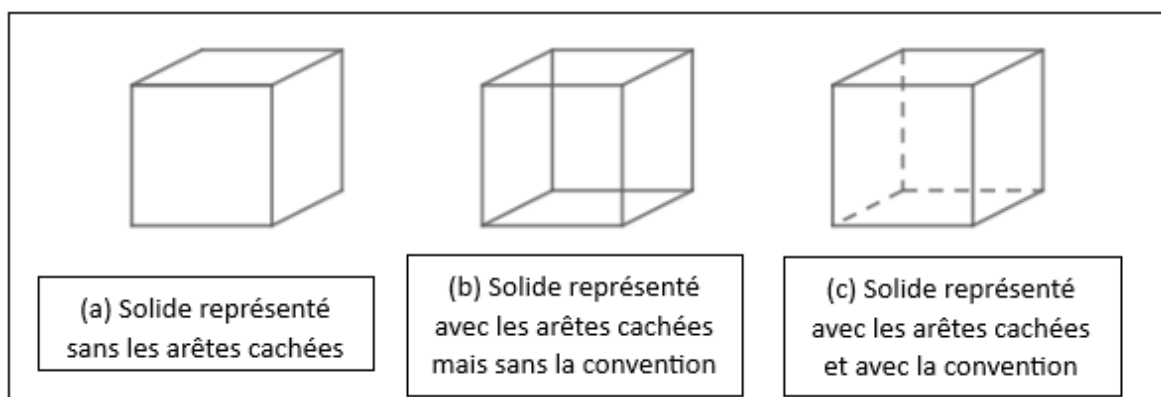


Figure 8 : Arêtes cachées invisibles (a), visibles sans convention (b) ou visibles avec convention (c)

1.1.2.2. Les représentations externes virtuelles (2 ½ D)

Si l'espace et les objets qu'il contient peuvent être représentés en deux dimensions, les frontières entre le monde réel et ses représentations 2D peuvent être modifiées grâce aux technologies. Même avec un écran bidimensionnel, ces dernières permettent de proposer, via des interfaces diverses, des représentations virtuelles de l'espace sensible et des objets de cet espace, permettant de les simuler au sein d'environnements virtuels. Avec la réalité du monde actuel, qui, comme l'évoquait déjà Marchand (2006), est tourné vers les technologies impliquant l'espace 2D et 3D, les représentations virtuelles de l'espace sensible et des objets de cet espace occupent une place de plus en plus importante dans le quotidien des enfants, adolescents et adultes. Ces technologies offrent une expérience multimédia plus riche aux jeunes de la génération actuelle (Chikha *et al.*, 2021) et viennent modifier leur rapport à l'espace. Elles sont notamment présentes dans l'enseignement obligatoire (géométrie, sciences...) et dans la formation professionnelle (architecture, industrie, médecine, graphisme...). La méta-analyse de Merchant *et al.* (2014) montre l'existence de nombreux dispositifs d'enseignement intégrant de tels environnements au sein de l'enseignement obligatoire ou supérieur. Plus tard, elles sont évidemment rencontrées dans ces mêmes contextes professionnels. En dehors du milieu scolaire, du milieu académique et du milieu professionnel, de tels environnements peuvent aussi être rencontrés dans la vie quotidienne. Les logiciels de modélisation 3D ou de graphisme, par exemple, qui offrent l'opportunité aux utilisateurs de créer ou manipuler virtuellement des objets ou espaces, semblent plus accessibles et utilisés par un public plus large. De plus, de nombreux jeux vidéo plongent les joueurs dans des simulations de l'espace sensible au sein desquelles ils sont invités à se déplacer ou déplacer leur personnage mais également à agir sur des objets de cet espace.

Bertolo (2014) qualifie ces représentations comme appartenant à un monde de type « 2 ½ D », situé à l'intermédiaire de l'espace sensible, en trois dimensions, et du monde graphique en deux dimensions. Ces représentations permettent de sortir du caractère statique des représentations 2D en offrant un traitement dynamique des informations (Osta, 1987) puisqu'elles permettent, en prenant en compte le facteur temps, de montrer des images en constante évolution. En ce sens, elles peuvent être considérées comme des animations (Schnotz & Lowe, 2008). Elles offrent l'opportunité d'observer le résultat de manipulations exercées sur l'objet 3D représenté ou sur l'environnement

virtuel dans lequel il est intégré, alors que face à des représentations 2D fixes, l'individu ne peut qu'imaginer mentalement ces manipulations (Vivian *et al.*, 2014). Grâce à ce dynamisme, c'est-à-dire par l'animation continue de l'objet 3D représenté ou de l'espace dans lequel il se situe, la deuxième dimension est modifiée au profit d'indices relatifs à la troisième. Ainsi, elle permet de simuler une vision tridimensionnelle (Bakó, 2003). Pour autant, les caractéristiques des représentations virtuelles diffèrent des objets 3D représentés du point de vue de leurs caractéristiques propres (Krylova & Vodyakha, 2022).

Par ailleurs, dans ce monde virtuel, les effets des manipulations effectuées sont finalement assez proches de ceux observés lors de la manipulation des objets physiques (Žilková & Partová, 2019). Les expériences kinesthésiques restent cependant différentes puisque dans l'espace sensible, l'individu a un contact direct avec l'objet 3D qu'il peut toucher tandis que, dans la représentation virtuelle, le contact se fait avec la modalité d'interaction, par exemple avec l'écran tactile pour les tablettes, ce qui fournit moins de stimuli sensoriels que la manipulation de matériel physique (Olkun, 2003 ; Sinclair & Bruce, 2015 ; Žilková & Partová, 2019).

Pour autant, malgré ces indices relatifs à la troisième dimension qui permettent de dépasser certaines limites associées aux représentations planes, elles n'en restent pas moins des représentations et conservent donc, par définition, une distance entre représentant et représenté (Bertolo, 2014).

a. Des interfaces, des modalités d'interaction et des types d'environnement différents

Ces représentations virtuelles dynamiques de l'espace et des objets de cet espace, pouvant être nommées représentations 2 ½ D⁴ en référence à Bertolo (2014), peuvent évidemment, selon le logiciel utilisé, être accessibles au travers de différentes interfaces. Elles peuvent être présentées sur un écran 2D non immersif (tablette, ordinateur...) avec, selon le type d'appareil, différentes modalités d'interaction (souris, clavier, joystick, écran tactile...) impliquant des degrés de liberté variables au niveau des manipulations.

Cependant, avec le développement des technologies, d'autres alternatives plus complexes ont également émergé. Le système de réalité augmentée en est un. Ce système permet la diffusion de représentations virtuelles sur un écran 2D mais avec

⁴ Par opposition à la terminologie « représentations 2D » utilisée pour évoquer les représentations planes.

pour modalité d'interaction la capture, à partir de caméra, de gestes physiques réalisés par l'utilisateur. D'une certaine façon, il implique l'ajout d'informations virtuelles dans l'environnement physique. Il permet ainsi d'offrir une expérience interactive en suggérant à l'utilisateur d'utiliser son propre corps pour interagir directement à la fois sur du contenu réel et virtuel faisant ainsi coexister le monde virtuel, dans lequel l'objet est diffusé, et le monde réel, dans lequel les manipulations sont menées (Billinghurst *et al.*, 2015 ; Kaur *et al.*, 2018). En comparaison aux modalités traditionnelles, cela permet d'augmenter le degré de liberté des gestes entrés (Kaur *et al.*, 2018 ; Kratz *et al.*, 2012 ; Le & Kim, 2017). Par ailleurs, lorsque l'individu est confronté à du matériel virtuel à manipuler, l'utilisation de ce matériel sollicite la mémoire de travail, générant ainsi une charge cognitive (Bujak *et al.*, 2013). Par charge cognitive, il est entendu la quantité de ressources mentales qu'un individu mobilise pour réaliser une tâche dans un contexte donné (Tricot, 2020) et qui peut donc être mise en lien avec les capacités limitées de la mémoire de travail. Plus spécifiquement, la charge cognitive dans des tâches spatiales se rapporte à la quantité limitée de ressources cognitives disponibles pour traiter des informations spatiales et donc à la limite des capacités de la mémoire de travail visuo-spatiale (Wang, 2017). Le système de réalité augmentée, en exigeant des manipulations naturelles et ne nécessitant que peu de connaissances et compétences, diminue la charge cognitive occasionnée par l'interaction avec le matériel virtuel (Bujak *et al.*, 2013 ; Hoe *et al.*, 2017).

Outre l'interface des écrans 2D, les environnements virtuels peuvent également être immersifs en exploitant le système de réalité virtuelle, même si ce système semble impliquer des performances de manipulation d'objets moins rapides qu'en réalité augmentée (Krichenbauer *et al.*, 2018, cités par Demitriadou *et al.*, 2020). La réalité virtuelle est définie par Fuchs *et al.* (2011) comme un système permettant, grâce aux technologies et aux interfaces comportementales, de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D. Il permet à ces entités d'interagir en temps réel entre elles et avec un ou plusieurs utilisateurs au moyen d'une immersion pseudo-naturelle et à l'aide de canaux sensorimoteurs. L'immersion est dite « pseudo-naturelle » car des biais sensorimoteurs sont observés par rapport à l'espace réel.

De plus, les actions autorisées permettant de percevoir la nature dynamique de l'espace au sein de tels environnements et les moyens de les opérer peuvent différer selon les logiciels et interfaces utilisés. Deux types d'action permettent de percevoir cette nature dynamique : des actions portant sur la modification du point de vue sur

l'espace simulé et d'autres où le point de vue reste fixe mais où les actions portent spécifiquement sur des objets de l'espace (Yeh & Nason, 2004b). Dans le premier cas, les actions réalisées au sein de l'environnement virtuel entraînent une modification de la position de l'observateur. Ouramdane *et al.* (2009) parlent alors d'actions de « navigation ». Les nombreux jeux où l'individu est placé dans la peau d'un personnage, à l'intérieur d'un environnement virtuel, et peut se déplacer dans cet environnement entrent dans cette catégorie. C'est le cas aussi, dans des logiciels permettant de simuler des aménagements d'espace où les actions menées permettent d'observer sous différents angles l'espace aménagé. C'est donc le point de vue qui évolue au travers des actions menées sur/dans l'environnement virtuel, ce point de vue pouvant être intérieur ou extérieur à l'espace observé. Les interactions permettent alors de changer le point de vue de l'observateur sur l'espace et les objets qu'il contient, comme c'est le cas dans l'espace sensible lorsqu'on se déplace autour d'un objet pour l'observer. Dans le second cas, la position de l'observateur par rapport à l'espace simulé reste figée et les actions permettent de manipuler uniquement les objets précis de l'espace, en leur appliquant par exemple des rotations sur eux-mêmes, ou en les déplaçant. Les actions sont alors menées sur des éléments de l'espace et non sur l'espace entier en lui-même. Ouramdane *et al.* (2009) parlent d'actions de « manipulation ». C'est le cas de certains logiciels de modélisation 3D ou de visualisation d'objets 3D. Par analogie à des actions menées dans l'espace sensible, cela pourrait se rapporter à une situation dans laquelle l'individu reste assis et dans une position fixe et observe un objet qui est en train de tourner sur lui-même.

Notons que, si certains logiciels proposant des représentations virtuelles de l'espace et des objets qu'il contient autorisent la mise en œuvre d'une des deux actions uniquement, d'autres environnements virtuels proposent de combiner les deux types d'action. L'utilisateur de l'environnement peut alors soit naviguer dans un environnement virtuel et bouger autour des objets qu'il contient en vue de les visualiser sous différents angles, soit, en utilisant d'autres modalités d'interaction, manipuler ces objets pour les placer, et donc les observer, dans différentes positions. En guise d'illustration, le logiciel *TinkerCAD* est un programme de modélisation 3D proposant des manipulations simples et accessibles à des enfants et des adolescents. Dans ce logiciel, comme l'illustre la Figure 9, l'utilisateur peut, en maintenant le clic droit, modifier son point de vue sur l'espace entier, ce qui entraîne une observation

sous un autre angle de l'ensemble du plan de construction. Il peut aussi, en cliquant spécifiquement sur un objet puis sur les flèches proposées, lui appliquer des rotations.

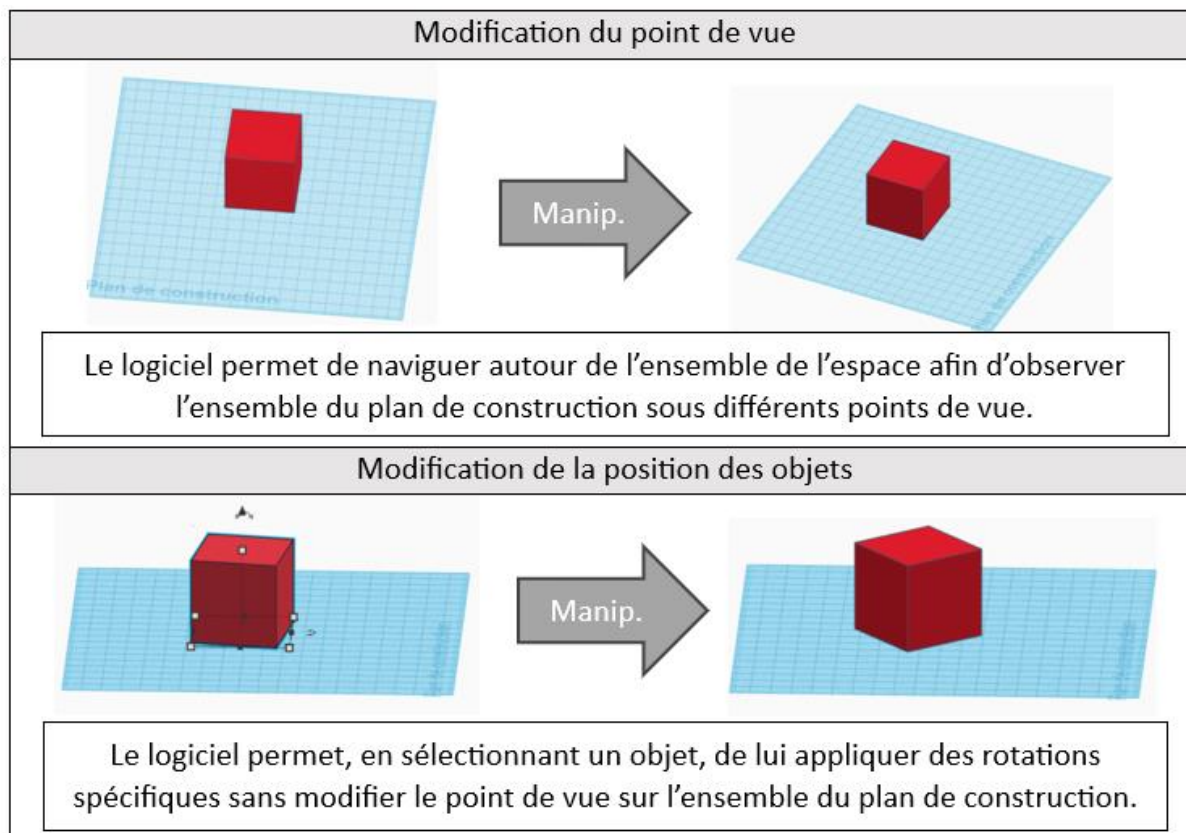


Figure 9 : Accès à l'information dynamique par modification du point de vue ou par modification de l'objet (exemple du logiciel TinkerCAD)

b. Des modes de représentation différents

Comme pour les représentations 2D, différentes perspectives peuvent être utilisées pour représenter un objet et plus largement l'espace au sein d'environnements virtuels de type 2 ½ D. Principalement, deux modes de représentation sont possibles.

D'une part, l'environnement virtuel peut être en projection orthographique, c'est-à-dire obtenu par une projection orthogonale de l'objet sur un plan. Celui-ci est à rapprocher du mode de représentation 2D des projections axonométriques. D'ailleurs, Bakó (2003) utilise cette même terminologie pour parler des environnements virtuels en projection orthographique. Les propriétés associées à ce mode de représentation sont proches de celles associées à la perspective axonométrique (conservation du parallélisme, conservation des alignements...) même si, grâce au caractère dynamique, les solides peuvent aussi apparaître dans des positions parallèles au plan de projection. Ce cas de figure est alors à rapprocher de ce qu'on obtient pour chacune des vues

multiples. D'autre part, l'environnement peut être proposé en perspective linéaire, appelée aussi projection centrale par Bakó (2003) et implique alors des caractéristiques similaires à celles décrites préalablement pour les représentations 2D en perspective linéaire (proximité avec le fonctionnement de la vision, non-conservation du parallélisme...). Notons que de nombreux logiciels offrent l'opportunité de passer d'un mode à l'autre, comme l'illustre la Figure 10 avec l'exemple du logiciel *TinkerCAD*.

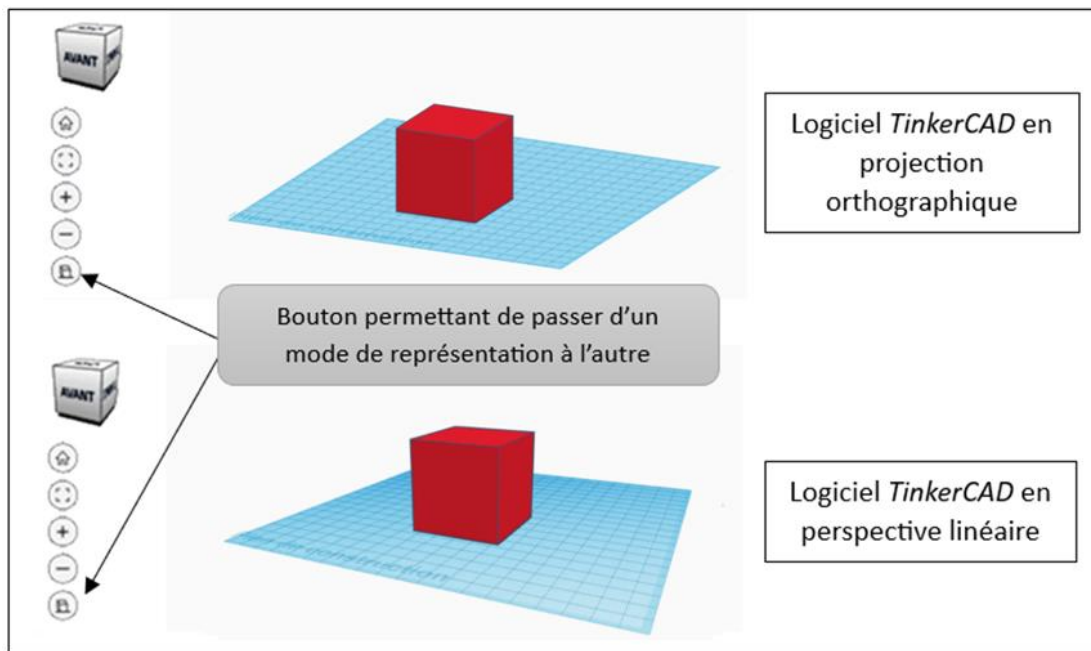


Figure 10 : Exemple d'un environnement 2 ½ D en projection orthographique et perspective linéaire (*TinkerCAD*)

D'autres logiciels proposent de combiner simultanément plusieurs modes de représentation via une solution multifenêtrée. Ils offrent la possibilité, en parallèle d'un des modes précédemment cités, de faire apparaître certaines vues du mode de représentation « vues multiples », afin de permettre une observation plus précise de l'objet représenté virtuellement. Ils proposent ainsi un découpage de l'écran en différents espaces, par exemple un espace portant sur la vue du dessus, un espace portant sur la vue de devant et un espace portant sur la vue de droite (Figure 11). Dans ce cas, deux grandes méthodes d'interaction sont proposées avec l'objet 3D (Vivian *et al.*, 2014) : soit une interaction en 2D, en se focalisant sur une des vues multiples, soit une interaction directement en 3D si l'individu interagit dans l'espace de « vue en perspective ». Ces possibilités sont plutôt privilégiées dans le cadre de logiciels de création/modélisation 3D (ex. *Rhino*, *Blender*) qui doivent offrir la possibilité de manipuler le plus précisément possible les objets 3D modélisés.

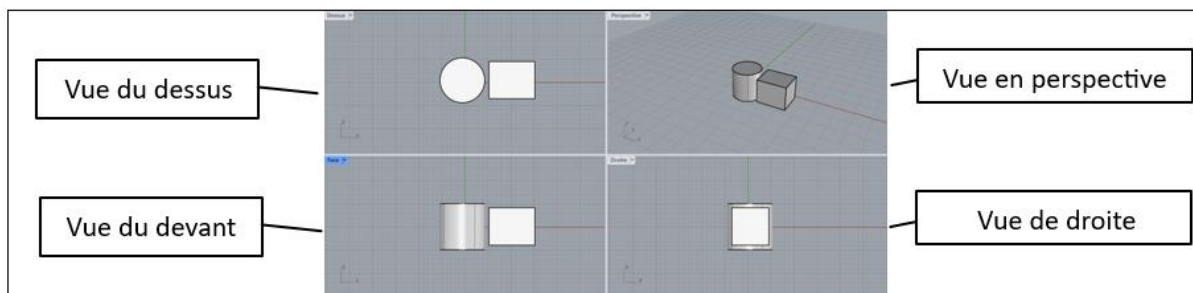


Figure 11 : Exemple de logiciel permettant de combiner différentes vues de l'objet 3D (Rhino 8)

1.2. La construction du rapport à l'espace sensible chez l'enfant et l'adolescent

1.2.1. Les théories piagésiennes

Piaget constitue certainement l'un des premiers et principaux auteurs à avoir étudié, dans une perspective développementale, la manière dont les enfants et les adolescents développent leur rapport avec l'espace sensible et dont cet espace se construit progressivement. L'auteur conçoit cette construction des rapports avec l'espace, et de manière plus générale le développement cognitif, comme progressive. Ainsi, avec certains collaborateurs, il a pu identifier quatre étapes mettant en lumière les différents rapports que l'enfant est capable d'entretenir avec l'espace sensible (Piaget, 1937) : l'espace subi, l'espace vécu, l'espace perçu et l'espace représenté. Ces étapes sont mises en lien avec les stades généraux du développement de la pensée, mis en évidence également par l'auteur, à savoir le stade sensorimoteur, le stade préopérateur, le stade des opérations concrètes et le stade des opérations formelles. En parallèle à l'évolution des rapports que l'enfant et l'adolescent entretiennent avec l'espace, l'auteur décrit le fait que l'espace qui se construit évolue et se complexifie. Progressivement, l'enfant accède à de nouvelles propriétés de l'espace qui permettent de le caractériser d'un point de vue géométrique. L'espace qui se construit et auquel l'enfant accède est d'abord qualifié de topologique, puis de projectif et enfin d'euclidien (Figure 12).

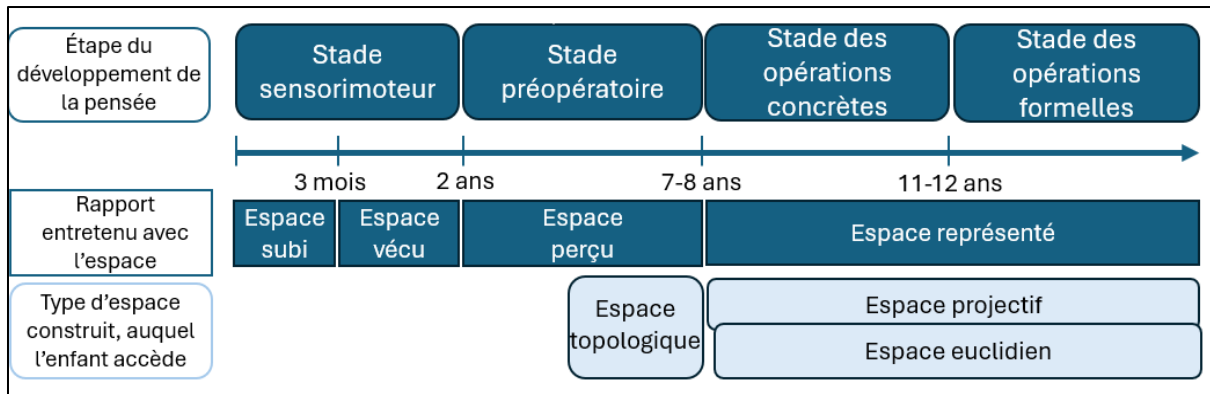


Figure 12 : Construction de l'espace chez l'enfant et l'adolescent : stades du développement de la pensée, rapport à l'espace et espace construit selon Piaget

De sa naissance jusqu'aux environs des trois premiers mois de sa vie, le nourrisson est situé dans un espace qui peut être qualifié de « subi ». Son rapport avec son environnement est dépendant de ce que son entourage lui impose, que ce soit au niveau des déplacements qu'il effectue (à bras, en poussette...) ou même de la prise de connaissance des éléments de l'environnement puisque ses sens ne lui permettent de prendre connaissance que des éléments les plus proches. À ce stade, le nourrisson ne possède pas réellement une représentation de l'espace sensible. Durant cette période, la permanence de l'objet n'est par exemple pas encore maîtrisée, ce qui signifie qu'il n'est pas capable de concevoir qu'un objet existe en soi de manière indépendante de ses propriétés spatio-géométriques. Il n'est pas non plus capable de coordonner différents éléments dans l'espace.

Tout au long du stade sensorimoteur de développement de la pensée (jusqu'à l'âge de 2 ans environ), après avoir « subi » l'espace, l'enfant va commencer à agir au sein de cet espace. Initialement les différents espaces sensoriels, et notamment l'espace visuel et l'espace tactilo-kinesthésique, ne sont pas coordonnés. Cela implique l'absence de constance perceptive et de permanence de l'objet. Les rapports spatiaux sont alors considérés comme élémentaires et la perception de l'espace est d'ordre primitif.

Néanmoins, avec le développement des sens, de l'action et du mouvement mais aussi grâce à la coordination des capacités sensorielles et motrices de l'enfant, l'espace perceptif se transforme progressivement et profondément et sa nature devient essentiellement active et opératoire. Au fur et à mesure, l'enfant va ainsi acquérir différentes capacités. Ce n'est par exemple qu'après un an que la permanence des objets est acquise et que l'enfant va pouvoir concevoir qu'un objet existe même s'il

n'est pas à la place attendue. Il devient alors capable de rechercher cet objet. En plus de la permanence des objets, l'enfant acquiert également des capacités d'organisation spatiotemporelle. Cette organisation se développe avec les déplacements que l'enfant effectue dans l'environnement et qui possèdent des propriétés. L'enfant va prendre conscience, par exemple, qu'il peut exister différents trajets pour aller d'un point A à un point B. À cette étape, ce sont finalement les actions que l'enfant effectue lors de ses interactions avec l'environnement qui vont organiser son rapport à l'espace, qu'on peut qualifier de « vécu ». Ainsi, c'est au départ de l'action qu'on est capable de se représenter l'espace. Pour autant, à ce stade, l'enfant ne dépasse pas l'action et ne parvient pas encore à analyser l'espace dans lequel il vit physiquement. De plus, l'espace exploré reste qualifié d'incomplet car il est au départ lié au champ présent et proche du sujet. Même si cet espace s'élargit progressivement, grâce à des anticipations courtes, l'individu n'est pas capable de se représenter la totalité de ses déplacements et chemins parcourus en un espace unique et général.

Dans un troisième temps, correspondant au stade de la pensée préopératoire allant environ de l'âge de 2 ans à celui de 7-8 ans, l'espace devient « perçu ». Bien que l'action reste un moyen principal pour développer ses connaissances de l'espace, l'enfant parvient maintenant à percevoir l'espace sans nécessairement y être confronté simultanément, en prenant appui sur ses expériences vécues. L'enfant devient capable d'évoquer mentalement cet espace. C'est donc le développement de l'imagerie mentale. Toutefois, à ce stade, les images mentales créées restent statiques. Par ailleurs, l'enfant garde une certaine dépendance à ses propres perceptions et aux apparences. Cette dépendance est inhérente à la perspective égocentrée associée au stade de la pensée préopératoire. Ainsi, on observe par exemple des erreurs de raisonnement lorsque l'enfant est amené à résoudre des tâches impliquant la conservation des volumes ou des liquides.

La présence de cet égocentrisme n'empêche cependant pas l'enfant d'acquérir des compétences spatiales topologiques entre les objets de son environnement. En effet, la plupart des enfants deviennent, à l'âge de 3 ans et jusqu'aux environs de 5 ans, capables de développer des intuitions topologiques élémentaires, de discerner et de construire des rapports élémentaires entre objets qualifiés de relations topologiques. Parmi ces relations topologiques, il est possible de citer les relations de voisinage (proximité des éléments perçus dans un même champ), de séparation (identification

de critères de distinction d'éléments voisins), d'ordre (distribution d'éléments voisins et séparés les uns à la suite des autres), d'entourage (placement d'un élément entre deux autres) et d'intériorité (en 3D, placement d'un élément à l'intérieur d'un autre), ou encore de continuité (identification du caractère continu ou non des lignes, des surfaces et des formes). L'espace qui se construit et auquel l'enfant accède est alors qualifié par Piaget et Inhelder (1948) d'espace « topologique ». Cette étape est indispensable pour que la reconstruction théorique de l'espace par l'enfant puisse avoir lieu. En grandissant, les relations topologiques que l'enfant est capable de mettre en œuvre évoluent et se réorganisent. Pour autant, l'espace topologique n'est pas encore un tout structuré englobant toutes les figures selon une même coordination spatiale. L'espace sensible ne fournit pas, à lui seul, l'essentiel de la représentation géométrique puisque cela reste une topologie perceptive et motrice indissociable de l'activité du sujet. Ainsi, on observe des difficultés à comprendre les transformations opérées sur les formes.

Ce n'est que par la suite, en parallèle à l'apparition du langage, de la représentation imagée et de la pensée intuitive, que l'individu va passer de l'espace vécu puis perçu à l'espace « représenté », vers l'âge de 7-8 ans.

Pour construire cette représentation de l'espace, l'enfant va reprendre appui sur les intuitions les plus élémentaires, en les appliquant à des figures projectives fournies par la perception. L'enfant va en quelque sorte reconstruire l'espace topologique pour aboutir à l'espace « projectif » (Piaget & Inhelder, 1948). C'est en envisageant un objet de manière relative à un point de vue donné (le sien ou celui d'un autre) et non en le considérant simplement pour lui-même que l'enfant accède à cet espace. À ce stade, la pensée n'est donc toujours pas complètement indépendante des objets perceptibles, et ce même si l'enfant devient capable de se créer des images mentales en mouvement et donc de réaliser mentalement des opérations sur les objets perçus. Il devient par exemple en mesure de s'imaginer à quoi ressembleraient des objets d'un autre point de vue, s'ils étaient transformés ou s'ils subissaient des rotations. La perspective égocentrée est alors dépassée, ce qui s'apparente au troisième stade du développement de la pensée : le « stade des opérations concrètes ». Plus tard, l'enfant devient même capable de comprendre le caractère relatif des perspectives.

De manière quasi simultanée, l'enfant devient capable de combiner les compétences projectives qu'il possède avec des concepts de mesure. Ainsi, on peut observer que la

visualisation des concepts d'aire, de volume, de distance, de translation, de rotation et de réflexion devient possible. Piaget et Inhelder (1948) parlent à cette étape de l'acquisition de l'espace « euclidien ». Contrairement à l'espace projectif, cet espace est défini par la coordination d'objets entre eux en fonction d'axe de coordonnées. Trois dimensions (sagittale, verticale et latérale) sont en mesure d'être utilisées pour situer les objets par rapport à d'autres. La construction de ce système de coordonnées est progressive puisqu'elle débute par la construction des notions physiques de verticalité et d'horizontalité vers l'âge de 7-8 ans et s'achève vers l'âge de 9 ans.

À de multiples reprises, l'espace projectif et l'espace euclidien s'entrecroisent. L'enfant prend appui soit sur un jeu de perspective (espace projectif), soit sur base d'axes de coordonnées (espace euclidien) pour construire « des systèmes d'ensemble réunissant une multiplicité de figures » (Piaget, 1972).

Vers l'âge de 11-12 ans, l'enfant devient en mesure de développer des concepts indépendants de tout point de vue et d'accéder à un raisonnement de façon abstraite. Il entre dans ce que Piaget appelle le « stade des opérations formelles ». Contrairement au stade des opérations concrètes, le raisonnement que l'enfant ou l'adolescent met en place peut se libérer de son contenu et la pensée spatiale devient ainsi davantage indépendante des objets perceptibles. Autrement dit, l'individu est capable de raisonner sans matériel concret, en se basant sur des hypothèses. La pensée formelle peut d'ailleurs être considérée comme une pensée hypothético-déductive.

De manière plus globale, Piaget et Inhelder (1948) évoquent qu'il est possible de résumer ce rapport de l'enfant à l'espace en deux grandes étapes dans la construction progressive de l'espace et des rapports spatiaux. Cette dernière fonctionne en deux plans distincts mais essentiels. Le plan perceptif et sensorimoteur, d'une part, est le point de départ de la construction représentative de l'espace qualifié de topologique. Le plan représentatif ou intellectuel, d'autre part, permet ensuite d'aboutir à un espace d'abord « projectif », puis « euclidien ». C'est en appliquant ses intuitions topologiques à des figures projectives et métriques fournies par la perception que l'enfant pourra dépasser l'espace vécu et perçu pour se construire l'espace représenté. Cette construction se fait progressivement jusqu'à ce que toutes les figures de l'espace soient englobées dans des systèmes de coordonnées. À terme, la perception permet elle-même de situer les configurations perçues directement dans de tels systèmes.

1.2.2. Limites des théories piagésiennes

Si les théories issues des recherches de Piaget et de ses collaborateurs servent d'appui à de nombreux travaux, certaines sont aussi remises en cause notamment en prenant appui sur des travaux expérimentaux (Newcombe & Stieff, 2012 ; Nys, 2015). Plusieurs critiques sont ainsi formulées à l'égard de ses théories et notamment à propos de celles se rapportant au développement spatial.

Une critique formulée par plusieurs auteurs concerne l'existence même de stades de développement (Nys, 2015). En effet, si la théorie piagésienne conçoit le développement dans une perspective linéaire, cette conception ne fait pas l'unanimité. Elle laisse peu de place à la variabilité observée dans les trajectoires développementales (Berthier *et al.*, 2018). En ce sens, les stades tels qu'identifiés par Piaget devraient, selon Berthelot et Salin (1992), non pas désigner des états mais des potentialités. Des conceptions du développement centrées sur une approche davantage non linéaire, dans laquelle les différences entre individus occupent une plus grande place, ont émergé. Par exemple, Siegler (2000, cité par Nys, 2015) perçoit plutôt le développement comme un chevauchement de plusieurs vagues, tandis que van Geert (1998) le considère davantage comme issu d'un système dynamique, propre à chacun, composé de transitions, de fluctuations mais aussi de régressions. La Figure 13 illustre ce contraste entre la vision linéaire, dite « en escalier », du développement tel qu'envisagée par les théories piagésiennes et la vision davantage non linéaire telle qu'envisagée par Siegler. Dans cette vision, l'auteur évoque que, face à des problèmes à résoudre, qu'ils soient d'ailleurs ou non d'ordre spatial, des séquences développementales au cours desquelles différentes stratégies de résolution sont observées, avec des fréquences d'utilisation de ces stratégies pouvant varier. Dans cette approche, chaque enfant dispose donc d'un ensemble de stratégies et peut recourir à certaines ou plusieurs d'entre elles. Si, avec le temps et le développement de l'expérience, les enfants développent de nouvelles stratégies, ils n'abandonnent pas forcément directement les anciennes et ne passent pas tous systématiquement d'une stratégie à une stratégie d'un niveau plus complexe. Cette approche revendique alors davantage de différences individuelles et une approche plus graduelle et moins organisée que ce que le modèle de Piaget envisage (Andrews & Lord, 2017).

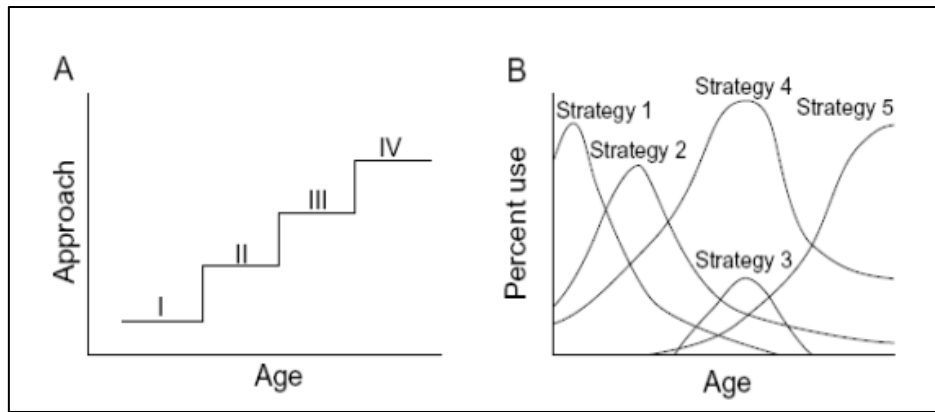


Figure 13 : Schématisation d'une approche linéaire (A) du développement (à l'instar de ce que proposent les théories piagétienne) et d'une approche non linéaire (B) du développement telle qu'envisagée par Siegler (tiré de Lubin et al., 2012)

D'autres critiques font écho à la présence de sous-estimations des capacités cognitives et notamment à l'absence de prise en compte de capacités très précoces, identifiées chez les nourrissons (Nys, 2015). À titre d'exemple, Baillargeon et DeVos (1991) ont montré que la permanence des objets, prédite initialement comme se développant après l'âge d'un an, pouvait être observée chez les enfants de 2 à 3 mois d'âge. Au-delà des sous-estimations relatives aux capacités des nourrissons, d'autres preuves empiriques de sous-estimations des capacités sont également observées chez les enfants plus âgés. Plusieurs recherches, à l'instar des travaux de Marmor (1977), Jansen *et al.* (2013) ou encore Hawes *et al.* (2015a) ont par exemple permis de prouver que les enfants, avant l'âge de 7-8 ans, sont capables de faire preuve de rotation mentale, c'est-à-dire la capacité à faire tourner mentalement des objets 2D ou 3D dans les différentes directions (Shepard & Metzler, 1971), contrairement à ce qu'annonçaient les théories piagétienne. Il en est de même pour la capacité à dépasser le point de vue égocentrique, comme le décrit Nys (2015) en présentant des contradictions entre les résultats de Piaget et d'autres études. Compte tenu de ces sous-estimations, l'ordre d'acquisition des différentes capacités identifié par Piaget est donc également remis en question (Nys, 2015).

Les différences de résultats obtenus entre les recherches de Piaget et les autres peuvent être expliquées par le fait que les caractéristiques des situations dans lesquelles les interactions avec l'espace sont étudiées ne sont pas suffisamment prises en considération, cela même alors que ces caractéristiques peuvent influencer l'acquisition des compétences spatiales (Berthelot & Salin, 1992). Les tâches proposées par Piaget nécessitent la production de dessins, d'actions ou d'explications verbales de

la part de l'enfant. Ces tâches n'évaluent pas forcément l'utilisation de stratégies mais l'évocation de ces stratégies, nécessitant que l'enfant invente ou choisisse la stratégie appropriée pour résoudre un problème donné (Marmor, 1977). Ce n'est en effet pas parce que l'enfant n'est pas capable de produire de lui-même une stratégie permettant de résoudre une tâche donnée qu'il ne peut pas, reproduire une stratégie qui lui est montrée. Par exemple, pour les tâches impliquant la rotation mentale, Piaget et ses collègues ont utilisé des épreuves testant la compréhension explicite du mouvement de rotation de stimuli, ce qui est différent des tâches de comparaison d'états de deux stimuli (Lejeune & Decker, 1994). Ces différences peuvent donc constituer une explication quant aux divergences observées entre les résultats de recherches. Une autre critique associée aux types de tâche utilisés relève du fait que dans ses expérimentations, Piaget ne s'assure pas de la compréhension de la tâche à réaliser (Marmor, 1975). De plus, l'auteur souligne que ces tâches impliquent une certaine subjectivité, lors de l'observation et surtout de l'interprétation.

Malgré la sous-estimation, une autre remise en question adressée aux résultats obtenus par Piaget concerne l'atteinte même des niveaux plus élevés par tous les individus. Piaget, lui-même, signalait déjà la variabilité individuelle par rapport à l'accession aux différents stades de la pensée spatiale (Pêcheux, 1990, cité par Berthelot & Salin, 1992). Des investigations sur les adultes ont permis d'illustrer que certains d'entre eux ont un stade d'élaboration de la représentation de l'espace se rapprochant parfois aux stades piagétiens les moins élaborés. Ces différences entre individus, entraînant la conception non unifiée et non générale du développement spatial, sont notamment expliquées par la dépendance avec l'environnement physique et social, puisque c'est l'action de l'enfant sur son environnement qui permet à la construction de ses rapports à l'espace.

D'après Pêcheux (1990, cité par Berthelot & Salin, 1992), alors que la théorie de Piaget met en parallèle les performances spatiales (accès à l'espace topologique, projectif et euclidien) avec la hiérarchie des géométries topologique, projective et métrique, plusieurs travaux ont remis en question ce parallèle. Ces travaux considèrent que, si les représentations d'objets familiers peuvent être appréhendées selon des règles projectives ou métriques, ce n'est pas forcément le cas des espaces flous ou contingents qui relient ces objets, qui eux restent organisées uniquement au niveau topologique. La capacité à appréhender l'espace au départ de relation topologique ou

de règles projectives et métriques ne dépendrait donc pas uniquement du développement de l'enfant.

Bien que Piaget et ses collègues aient pu s'intéresser au développement de savoir-faire spatiaux ou compétences spatiales des individus dans l'espace sensible, qu'ils ont mis en lien avec une proposition de modèle du développement intellectuel, la recherche menée se détache de cette approche globale compte tenu des limites présentées. Il s'agit ici de se focaliser davantage sur une étude approfondie de certains processus cognitifs spécifiques faisant écho aux rapports entretenus par les enfants et les adolescents avec l'espace sensible mais aussi avec des représentations externes de cet espace sensible. Cela n'exclut cependant pas de prendre appui sur certaines observations que l'auteur a pu réaliser, notamment au sujet de la manière dont l'enfant se représente l'espace puisque, comme le souligne Duroisin (2015), cela est globalement validé par la communauté scientifique, et ce malgré les limites susmentionnées.

1.3. De la cognition spatiale aux habiletés spatiales

1.3.1. La cognition spatiale : définition et concepts dérivés

La terminologie « cognition spatiale » est utilisée pour parler d'un ensemble de capacités cognitives que possède un individu puisque, comme le rappelle Nys (2015), le terme cognition vient du latin *cognito* et fait référence à « l'action d'apprendre à connaître ». Hart et Moore (1973) définissent la cognition spatiale comme « *la réflexion intériorisée et la reconstruction de l'espace dans la pensée* » (p.248). Elle fait écho à un triple contexte : la cognition dans l'espace, la cognition à propos de l'espace et la cognition avec l'espace (Committee on Support for Thinking Spatially, 2006).

D'après Montello (2001), la cognition spatiale désigne la manière dont les individus acquièrent, organisent, utilisent et actualisent leurs connaissances des propriétés spatiales des objets et des événements dans le monde (Montello, 2001). Elle fait donc référence aux processus mentaux liés à des connaissances déclaratives et perceptuelles relatives à l'espace et à des opérations cognitives utilisées pour combiner et transformer ces connaissances (Committee on Support for Thinking Spatially, 2006). Elle se rapporte aux capacités centrées sur les informations, les connaissances, les représentations internes et les actions liées à l'espace, à sa structure, ses entités et aux relations qu'il contient. Elle regroupe l'ensemble des facultés cognitives sollicitées

lorsqu'il s'agit de percevoir des informations spatiales utiles pour se représenter un espace, de les traiter, les comparer, les manipuler, les transformer et d'utiliser des concepts relatifs à cette notion (Denis, 2012; Hodgkiss *et al.*, 2021 ; Nys, 2015). Ces informations dites « spatiales » concernent, comme l'évoquent Montello et Raubal (2012), les informations se rapportant au traitement de caractéristiques telles que le lieu/la localisation, la taille, la forme, la direction, l'ordre, la continuité, les configurations ou encore la dimensionnalité. Newcombe et Shipley (2015) complètent cette liste en ajoutant également les relations des entités, que ce soit entre elles ou avec des cadres de référence.

Comme l'illustrent les éléments de définition apportés ci-dessus, la cognition spatiale n'est pas une entité isolée dans l'architecture cognitive dans la mesure où la représentation de l'espace est intimement liée à d'autres entités de la cognition telles que la perception, la sensorimotricité ou encore la mémoire (Denis, 2016). D'ailleurs, cette interaction entre les structures sensorimotrices et les systèmes neurologiques est décrite comme une caractéristique sur laquelle la cognition repose (Osberg, 1993, cité par Duroisin, 2015).

Dans la littérature, on retrouve plusieurs concepts liés à la cognition spatiale et qui gravitent autour, voire qui en sont des synonymes comme l'évoque le Committee on Support for Thinking Spatially (2006) : la pensée spatiale, le raisonnement spatial...

Le terme « pensée spatiale » est utilisé par plusieurs auteurs en tant que synonyme de la cognition spatiale puisque la cognition spatiale est avant tout un mode de pensée, comme le sont par exemple la pensée verbale ou la pensée logique, auquel chacun peut accéder par différents degrés et dans différents contextes. En ce sens, tous les processus mentaux impliqués dans la pensée spatiale se rapportent à la cognition spatiale (Postma, 2017). D'après le Committee on Support for Thinking Spatially (2006), la pensée spatiale est basée sur la construction d'un amalgame composé du concept d'espace, des outils de représentation et des processus de raisonnement. De plus, trois fonctions sont associées à cette pensée : une fonction descriptive (capture, préservation et transmission des apparences des objets et de leurs relations), une fonction analytique (établissement et compréhension de la structure des objets) et enfin une fonction inférentielle (réponse aux questions relatives aux fonctions des objets et à leur évolution).

Certains auteurs, à l'instar de Hertanti *et al.* (2019), utilisent le terme « raisonnement spatial » en tant que synonyme de « pensée spatiale ». Le raisonnement spatial peut en effet être défini comme la capacité à reconnaître, générer, inspecter, opérer et réfléchir sur des objets de l'espace, des images, relations, mouvements et transformations (Battista *et al.*, 2018 ; Clements & Battista, 1992 ; Mix *et al.*, 2016). Plus spécifiquement, Flynn (2018, cité par St-Jean *et al.*, 2022) évoque que le raisonnement spatial se rapporte à la capacité à se repérer dans l'espace et de manipuler mentalement les objets. Dans les deux cas, la mise en place d'un raisonnement spatial est possible grâce à la mise en œuvre des processus cognitifs qui composent la cognition spatiale. Ces processus cognitifs sont appelés habiletés spatiales.

1.3.2. Les habiletés spatiales

1.3.2.1. Définition des habiletés spatiales

Les habiletés spatiales sont considérées comme les composantes de la cognition spatiale. Ce sont l'ensemble des processus cognitifs exprimant la manière dont on apprend un environnement et les relations qu'entretiennent les objets de cet environnement (Darken & Sibert, 1996). Elles sont présentées par Wang *et al.* (2007) comme un facteur constitutif de l'intelligence humaine. Linn et Petersen (1985) les définissent comme des compétences au niveau de la représentation, de la transformation, dans la création et du rappel d'informations symboliques et non linguistiques. Hegarty et Waller (2005) mais aussi Kozhevnikov *et al.* (2007), au lieu de considérer les habiletés spatiales comme des compétences, les définissent comme des activités mentales qui permettent aux élèves la création et la manipulation d'images spatiales, ce qui peut s'avérer utile pour résoudre des problèmes variés pratiques ou théoriques. La mise en place d'un raisonnement spatial passe donc par l'exploitation d'habiletés spatiales, qui sont décrites par Hegarty et Waller (2005) comme à la base de la pensée spatiale.

1.3.2.2. Importance des habiletés et enjeux de leur évaluation

Depuis maintenant plus d'une vingtaine d'années, de nombreux auteurs s'attellent à démontrer ou à rappeler le rôle clé qu'occupe la maîtrise des habiletés spatiales, que ce soit pour le parcours scolaire et professionnel (Buckley *et al.*, 2019 ; Mix *et al.*, 2016 ; Uttal *et al.*, 2013a ; Verdine *et al.*, 2017 ; Wright *et al.*, 2008) mais également

pour la réalisation de tâches du quotidien (Marchand, 2006 ; Rodán *et al.*, 2019). Elles sont de nature fondamentale et sont en fait impliquées dans la résolution de problèmes variés pratiques ou théoriques (Hegarty & Waller, 2005 ; Kozhevnikov *et al.*, 2007). De plus, elles sont d'une importance critique pour la mise en place d'une pensée innovante dans le monde technologique actuel (Mulligan *et al.*, 2018). L'importance du développement des habiletés spatiales est donc désormais indéniable. Cela se reflète d'ailleurs, comme le soulignent Lowrie *et al.* (2018), par l'augmentation de l'attention qui y est portée dans le domaine de la recherche.

Le développement d'habiletés spatiales va de pair avec le développement de compétences mathématiques, dès l'enseignement maternel (Mix *et al.*, 2016). Les études qui ont établi le lien entre habiletés spatiales et performances en mathématiques sont nombreuses, comme le soulignent Mix et Cheng (2012) ou plus récemment Hawes et Ansari, (2020). La méta-analyse réalisée par Xie *et al.* (2020) confirme cette forte association. Ce lien a été établi dès la plus petite enfance et jusqu'à l'âge adulte (Cornu *et al.*, 2018 ; Delgado & Prieto, 2004 ; Gilligan *et al.*, 2017 ; Mix *et al.*, 2016 ; Resnick *et al.*, 2019 ; Zhang *et al.*, 2014) et n'est donc pas modéré par l'âge (Xie *et al.*, 2020). À titre d'exemple, Verdine *et al.* (2017) ont montré que le niveau des habiletés spatiales des enfants âgés de 3 ans est un bon prédicteur des performances en mathématiques des élèves une année plus tard. Plus spécifiquement, l'entraînement des habiletés spatiales des élèves peut occasionner un transfert de gain vers les compétences mathématiques (Hawes *et al.*, 2022 ; Xie *et al.*, 2020) et les effets de transfert apparaissent plus importants pour les enfants plus âgés et lorsque les interventions incluent des ressources physiques en comparaison à des ressources digitales ou sur papier (Hawes *et al.*, 2022).

De manière spécifique, la maîtrise des connaissances et habiletés spatiales influence notamment l'acquisition des savoirs géométriques et permet de résoudre des problèmes de géométrie (Baldy *et al.*, 2005 ; Berthelot & Salin, 1999-2000 ; Putri, 2017). Les compétences spatiales influencent la façon dont on interagit avec les sources disponibles et viennent impacter les stratégies de résolution de problèmes que les élèves mettent en œuvre (Buckley *et al.*, 2019 ; Widder & Gorsky, 2013). En ce sens, les recherches mettent largement en évidence l'importance du développement des habiletés spatiales pour l'enseignement de la géométrie 3D (Battista *et al.*, 2018 ; Clements & Sarama, 2007). Pittalis et Christou (2010) relèvent que les habiletés

spatiales constituent un fort prédicteur des performances des élèves dans ce domaine. Ce lien fera l'objet d'une analyse approfondie au sein du quatrième chapitre de cette partie, qui se focalise sur l'enseignement-apprentissage de ce domaine.

Néanmoins, le lien qui unit habiletés spatiales et mathématiques dépasse largement le domaine de la géométrie. Le transfert de l'entraînement spatial s'effectue vers des compétences diverses liées à l'arithmétique et au nombre : les tâches d'estimation de nombres (Crollen & Noël, 2015 ; Gunderson *et al.*, 2012 ; Simms *et al.*, 2016), les performances en calcul (Cheng & Mix, 2014 ; Gilligan *et al.*, 2019 ; Mix *et al.*, 2020 ; Zhang *et al.*, 2014) et notamment l'utilisation de stratégies plus avancées lors de la résolution d'additions (Whitehead & Hawes, 2023), le placement de valeurs (Mix *et al.*, 2020) ou encore la comparaison symbolique de nombres (Hawes *et al.*, 2017). Des études ont aussi pu relever des corrélations avec les performances en algèbre (Tolar *et al.*, 2009) ou encore avec les habiletés de raisonnement logique (Mix *et al.*, 2016). La méta-analyse de Xie *et al.* (2020) permet cependant de relever que, si des relations significatives sont observées pour chacun des sous-domaines mathématiques, la relation entre le domaine spatial et celui des mathématiques est modérée par les sous-domaines des mathématiques. Autrement dit, l'association avec les compétences spatiales apparaît plus forte pour certains sous-domaines, comme le raisonnement logique, que pour d'autres, comme les habiletés relatives au nombre et à l'arithmétique. En revanche, la méta-analyse montre que la relation entre le domaine spatial et celui des mathématiques n'est pas modérée par les sous-domaines spatiaux et est donc observée pour les différentes habiletés spatiales.

Ce lien entre mathématiques et habiletés spatiales peut s'expliquer par différentes raisons que plusieurs auteurs ont tenté d'étudier. Hawes et Ansari (2020), en faisant une synthèse de la littérature en psychologie, en neurosciences et en éducation, résumant l'explication de ce lien par une liste non exhaustive de quatre arguments.

D'abord, les mathématiques sont inhérentes à l'espace dans la mesure où le raisonnement spatial et les représentations spatiales sont indispensables pour créer et s'exprimer en mathématiques. D'ailleurs, les nombres sont représentés spatialement, comme l'a déjà décrit Galton à la fin du XIXe siècle en évoquant qu'ils peuvent être conçus en les faisant correspondre à une position spécifique dans l'espace (Hawes & Ansari, 2020). Pour reprendre le cas des compétences liées au nombre, il est possible de dire que le modèle du nombre est ancré dans des représentations spatiales

(Gunderson *et al.*, 2012 ; Hawes *et al.*, 2015b ; Verdine *et al.*, 2014). De ce fait, la représentation mentale de la ligne de nombres pourrait jouer un rôle de médiateur dans les relations entre raisonnement spatial et performance aux tâches impliquant le nombre. Si cette représentation spatiale mentale de la ligne des nombres est observée à la fois chez les enfants possédant un faible et chez ceux possédant un fort niveau de développement des habiletés spatiales (Crollen & Noël, 2015), le développement des capacités spatiales permet à l'individu d'améliorer ses capacités à agir mentalement sur cette ligne de nombres mentale. À son tour, cette amélioration pourrait occasionner une amélioration des performances mathématiques (Hawes & Ansari, 2020). Inversement, de faibles capacités visuo-spatiales conduisent à une diminution de la précision de la ligne mentale des nombres (Crollen & Noël, 2015) et est susceptible d'influencer les performances mathématiques.

Le phénomène de modélisation spatiale pourrait également expliquer le lien entre espace et mathématiques. À ce sujet, Hawes et Ansari (2020) évoquent que plusieurs études ont montré que l'habileté de visualisation spatiale, qui fait l'objet d'une attention particulière dans cette recherche, joue un rôle essentiel lorsque l'individu est confronté à de nouveaux (non familiers) problèmes mathématiques de raisonnement impliquant le nombre. L'habileté va aider à organiser, modéliser et enfin conceptualiser ces problèmes ainsi que les opérations et relations relatives aux nombres qui doivent être mises en place pour les résoudre. La modélisation spatiale permet par ailleurs de faire des ponts entre les connaissances antérieures et celles à mettre en œuvre pour résoudre les nouveaux problèmes. L'observation de productions d'enfants en résolution de problèmes a notamment permis d'identifier que les enfants qui produisent des représentations visuelles schématiques des problèmes sont ceux qui sont les plus susceptibles d'aboutir à la réponse correcte et que ces enfants sont aussi ceux ayant des capacités de visualisation spatiale plus développées. Autrement dit, cette modélisation spatiale constitue aussi un médiateur entre les capacités spatiales et les performances mathématiques. L'habileté de visualisation va permettre de favoriser cette modélisation spatiale, qui elle-même va permettre d'améliorer les performances en mathématiques (Boonen *et al.*, 2013, 2014, cités par Hawes & Ansari, 2020). Lourenco *et al.* (2018) évoquent par ailleurs que plusieurs ressources cognitives telles que l'organisation, la représentation et la manipulation d'informations, qui entrent en jeu dans la modélisation spatiale, sont nécessaires à la fois aux compétences mathématiques et aux habiletés spatiales.

En dehors, des ressources cognitives qui viennent d'être évoquées, une autre ressource commune se rapporte à la capacité de mémoire de travail et plus particulièrement la mémoire de travail visuo-spatiale. Cette ressource pourrait constituer une explication au lien observé entre les performances spatiales et mathématiques (Hawes & Ansari, 2020). Toutefois, les auteurs sont prudents vis-à-vis de cette supposition puisque des études ont mis en évidence que les relations entre compétences en mathématiques et visualisation spatiale ne pouvaient pas être expliquées par les mesures de la mémoire de travail visuo-spatiale. Il s'agit alors de considérer que la visualisation spatiale et la mémoire de travail visuo-spatiale représentent des facteurs cognitifs séparables partageant des relations différentielles avec les performances mathématiques. De tels résultats semblent par ailleurs confirmés par des différences observées entre les capacités de visualisation spatiale et de mémoire de travail visuo-spatiale (par exemple du point de vue des différences de genre ou de la façon dont elles peuvent se développer).

Enfin, la présence de similitudes dans les zones du cerveau stimulées lors de la mise en œuvre des habiletés spatiales et lors de la résolution de tâches impliquant le nombre (Hubbard *et al.*, 2005 ; Zacks, 2008) constitue un dernier argument. Des études de cas ont d'ailleurs mis en évidence des déficits conjoints dans l'élaboration de traitements spatiaux et de traitements des nombres, chez les personnes présentant des lésions au niveau du lobe pariétal (Hawes & Ansari, 2020). Plus récemment, les recherches ont permis d'établir que le traitement de l'espace et des nombres se rapportent tous deux à des régions communes du cerveau : le sillon intra-pariétal et ses régions voisines (Hawes *et al.*, 2019, cités par Hawes & Ansari, 2020).

Au-delà des mathématiques, les habiletés spatiales ont des implications dans d'autres domaines académiques et professionnels et sont indicatrices de succès pour l'apprentissage de multiples domaines. De nombreuses recherches démontrent que leur impact sur l'apprentissage des mathématiques peut être étendu aux disciplines issues des STEM, c'est-à-dire les sciences, les technologies, l'ingénierie et les mathématiques (Buckley *et al.*, 2019 ; David & Clinciu, 2009 ; Hegarty, 2018 ; Mix & Cheng, 2012 ; Nagy-Kondor, 2014 ; Nolte *et al.*, 2024 ; Uttal *et al.*, 2013a ; Vasilyeva & Lourenco, 2012 ; Wai *et al.*, 2009 ; Wu & Shah, 2004). L'écart observé entre les genres au sein des carrières STEM, en faveur des hommes, est d'ailleurs mis en lien avec la

supposée supériorité de ces derniers dans les tâches spatiales (Guizzo *et al.*, 2019 ; Moè, 2016a).

À titre d'exemple, Cohen et Hegarty (2012, 2014), en s'appuyant sur de précédentes recherches, rappellent que l'habileté de visualisation spatiale et en particulier la compétence à imaginer des sections d'objets 3D, a notamment un impact sur les performances en médecine, en sciences biologiques ou encore en géologie et en ingénierie. Cette compétence spécifique apparaît par exemple nécessaire pour comprendre les images médicales (résonance magnétique, rayon x) puisque ces images médicales sont la plupart du temps des coupes d'objets 3D à partir desquelles la structure 3D de l'anatomie doit être inférée (Hegarty *et al.*, 2007). C'est le cas aussi lorsqu'en biologie, on est amené à observer des coupes au microscope (Ratliff *et al.*, 2010) ou en géologie lorsqu'il s'agit de comprendre et s'imaginer la structure interne de la croûte terrestre (Kali & Orion, 1996). En dehors des STEM, des recherches ont montré que le développement de la pensée spatiale entraîne une amélioration des performances dans d'autres disciplines, par exemple en éducation physique (Pietsch & Jansen, 2012, cités par Hawes *et al.*, 2015a).

Outre l'impact potentiel dans les domaines académiques et professionnels, les habiletés spatiales sont décrites comme importantes pour mener à bien de nombreuses tâches du quotidien (David, 2012 ; Marchand, 2006 ; Mulligan *et al.*, 2018 ; Rodán *et al.*, 2019 ; Vasilyeva & Lourenco, 2012). De manière globale, l'humain a besoin d'habiletés spatiales pour réaliser de nombreuses actions de la vie de tous les jours et utilise donc quotidiennement, sans forcément le conscientiser, des habiletés spatiales. Comme l'exprime Denis (2016), peu nombreuses sont les tâches humaines échappant à la spatialité. Tzuriel et Egozi (2010) mais aussi Ramful *et al.* (2017) vont jusqu'à qualifier ces habiletés de vitales pour l'action humaine. Elles sont impliquées notamment lorsqu'on cherche à s'orienter, quand on est amené à reconnaître et manipuler divers objets ou à organiser des dispositions d'objets (aménagement de l'espace, rangement...), ou même pour des tâches plus simples comme la prise de photographies en « selfie ».

Étant donné ces nombreuses implications, être en mesure d'évaluer les habiletés spatiales chez les enfants et les adolescents, constitue un enjeu important. Ces évaluations peuvent permettre de comprendre certaines difficultés rencontrées dans les apprentissages scolaires ou dans la réalisation de tâches du quotidien et de

proposer un accompagnement adapté aux élèves qui en ont besoin. L'enjeu de cette évaluation se situe également dans l'identification d'enfants susceptibles de présenter des talents dans les domaines des STEM (Hawes *et al.*, 2015a ; Webb *et al.*, 2007).

1.3.2.3. Lien entre capacités spatiales et activité visuelle

Les habiletés spatiales peuvent s'exercer sans capacité visuelle. Il est par exemple possible de se représenter mentalement la forme ou la taille d'un élément uniquement par le toucher ou au départ uniquement d'informations sensorielles auditives, de se faire une idée de la distance et de la direction d'une personne au son de sa voix.

Malgré cela, un lien fort existe entre capacités visuelles et habiletés spatiales puisque les habiletés spatiales interviennent dès que l'individu observe un stimulus visuel pour analyser sa forme, sa taille. Piaget soulignait l'importance du visuel dans la construction du rapport à l'espace, en considérant que l'espace dans lequel nous vivons reste essentiellement visuel (Duroisin, 2015). Berthelot et Salin (1992) confirment l'importance de la vue en évoquant que c'est principalement grâce à ce sens que l'individu contrôle continuellement ses rapports effectifs avec l'espace sensible. En ce sens, Postma (2017) définit la vision comme le premier sens spatial.

1.3.2.4. Propriétés des habiletés spatiales

a. Les habiletés spatiales sont pluridimensionnelles

L'habileté spatiale a pu être considérée comme une entité simple et unifiée se rapportant à la capacité globale à pouvoir générer des images visuelles structurées, mais aussi les retenir, les récupérer et les transformer (Mohler, 2008a). Thurstone (1938, cité par Sims & Mayer, 2002), entre autres, la décrit comme l'une des sept habiletés mentales primaires. Toutefois, les résultats d'analyses factorielles menées contredisent cette conception unifiée et invitent à considérer l'existence non pas d'une habileté spatiale globale mais plutôt de plusieurs habiletés spatiales. C'est d'ailleurs pour cette raison que, depuis le début de ce chapitre, le pluriel a été privilégié lorsque les habiletés étaient évoquées. En ce sens, les habiletés spatiales sont qualifiées de pluridimensionnelles et ne relevant pas d'un tout unitaire (Carroll, 1993 ; Linn & Petersen, 1985).

Elles peuvent être regroupées en plusieurs catégories. Bishop (1983) relève deux grandes catégories d'habiletés spatiales liées aux capacités visuelles. D'une part, les *interpreting figural informations* (IFI), pouvant être traduites comme les habiletés

d'interprétation d'informations figurales, sont les habiletés qui impliquent la lecture, la compréhension et l'interprétation des informations issues de représentations visuelles telles que les dessins en perspective. D'autre part, les *visual processing* (VP), c'est-à-dire les habiletés de traitements visuels, sont les habiletés de manipulation et de transformation de représentations visuelles et d'imageries visuelles. Cette classification semble faire consensus puisque de nombreux auteurs à l'instar de Linn et Petersen (1985), Hegarty et Waller (2004) ou encore Lowrie *et al.* (2018) reprennent ces deux grandes catégories d'habiletés spatiales, bien que ces dernières soient plutôt respectivement nommées habiletés « visuo-perceptives » et « visuo-spatiales ».

b. Les habiletés spatiales sont modérément malléables

La cognition spatiale, et donc les différentes habiletés qui la composent, se développe tout au long de la vie, même si la période de l'enfance est une période au cours de laquelle des changements significatifs apparaissent, principalement entre l'âge de 6 ans et l'âge de 12 ans (Vasilyeva & Lourenco, 2012).

Dès l'enfance, que ce soit pour les filles ou les garçons, les habiletés spatiales peuvent être développées au moyen d'interventions diverses (Lowrie *et al.*, 2018 ; Uttal *et al.*, 2013a, 2013b, Yang *et al.*, 2020). En ce sens, Owens (2020, p.261) qualifie la pensée spatiale comme « *éducable* ». Plus encore, compte tenu de leur importance, les habiletés spatiales doivent être entraînées et ne peuvent être négligées, dans le but de pouvoir nous préparer à maîtriser l'espace qui nous entoure et à faire face à des situations complexes impliquant cet espace (Duroisin, 2015). La méta-analyse mise en œuvre par Uttal *et al.* (2013a) conclut que la mise en place d'un entraînement pour améliorer les habiletés spatiales possède une taille d'effet moyenne de 0,47. La mise en place d'un entraînement peut notamment permettre de diminuer les différences individuelles, telles que les différences de genre (Sinclair & Bruce, 2014) sur lesquelles nous reviendrons dans les prochains chapitres. De plus l'effet d'entraînement peut être qualifié de stable et durable dans la mesure où le délai qui sépare l'entraînement et l'évaluation (posttest) n'affecte pas l'effet (Uttal *et al.*, 2013a). De ce fait, Gilligan *et al.* (2019) qualifient les habiletés spatiales de changeables, en précisant que ces changements peuvent être durables, ce qui rend notamment plus légitime la mise en place d'entraînement.

c. Les habiletés sont potentiellement transférables

En plus d'être malléables, les habiletés spatiales peuvent être qualifiées de potentiellement transférables, avec des transferts proches ou plus éloignés, c'est-à-dire des transferts vers d'autres stimuli nouveaux dans des tâches impliquant la même habileté mais aussi, parfois, vers d'autres habiletés spatiales non entraînées (Cheung *et al.*, 2019 ; Ehrlich *et al.*, 2006 ; Gilligan *et al.*, 2019 ; Uttal *et al.*, 2013a ; Wright *et al.*, 2008). À titre d'exemple, Gilligan et ses collègues (2019) ont pu observer une amélioration significative des performances de rotation mentale chez des enfants âgés de 8 ans lorsqu'un entraînement focalisé sur cette habileté était proposé mais également lorsqu'un entraînement focalisé sur une autre habileté, en l'occurrence l'habileté de mise à l'échelle spatiale, définie par Frick et Newcombe (2012) comme la capacité à transformer une information relative à la distance d'une représentation à une autre représentation de taille différente.

Chapitre 2. Les habiletés visuo-perceptives et le cas de la perception visuelle de la 3D

Chapitre 2. Les habiletés visuo-perceptives et le cas de la perception visuelle de la 3D

Après avoir décrit l'espace sensible et ses représentations, le premier chapitre a permis de présenter la manière dont les rapports à l'espace se construisent à l'enfance. Ensuite, dans une approche davantage cognitiviste, les notions de cognition spatiale et d'habileté spatiale ont été définies et la classification, mise en évidence par Bishop (1983) ou encore Irani (2011) distinguant les habiletés visuo-perceptives et les habiletés visuo-spatiales, a été présentée.

Ce deuxième chapitre se focalise sur la première catégorie des habiletés spatiales liées aux capacités visuelles : les habiletés visuo-perceptives. Après une présentation de ce que sont les habiletés visuo-perceptives, ce chapitre propose de se focaliser sur l'habileté visuo-perceptive qui est étudiée dans cette recherche au travers des deux études menées : l'habileté de perception visuelle de la 3D. Après avoir décrit l'habileté, la façon dont elle s'exerce sur des objets physiques, mais aussi sur des représentations planes et virtuelles de ces objets est présentée. Enfin, le chapitre décrit la façon dont l'habileté est maîtrisée par les enfants et les adolescents et présente, finalement, les facteurs susceptibles d'impacter cette maîtrise.

2.1. Les habiletés visuo-perceptives : définition et étapes

Comme le souligne Duroisin (2015, p.35), « *un espace existe à partir du moment où il est perçu et cette perception dépend d'abord, chez un individu sain, du système visuel* ». Les habiletés visuo-perceptives sont définies par Irani (2011) comme les habiletés qui permettent au sujet d'analyser et de synthétiser les informations visuelles, ce qui permet la reconnaissance des objets, qu'ils soient en deux ou en trois dimensions.

Le modèle VPR (Visual Perception and perception-based knowledge Representation) constitue un modèle tentant de décrire les habiletés visuo-perceptives en les organisant en trois étapes (Gal & Linchevski, 2010). D'abord, l'étape de la perception visuelle, appelée aussi « organisation » est l'étape précoce au cours de laquelle le sujet va extraire les formes et objets depuis la scène visuelle à laquelle il est confronté (Anderson, 1995, cité par Gal & Linchevski, 2010). Ensuite, la deuxième étape est l'étape de reconnaissance avec les processus *bottom-up* et/ou *top-down* au cours

desquels la figure est reconnue. Enfin, la troisième étape est celle de la représentation impliquant la construction des représentations verbales et picturales, les images mentales et la structure hiérarchique. Il s'agit autrement dit de l'entrée dans le système cognitif.

Néanmoins, cette décomposition en trois étapes ne fait pas l'unanimité dans la mesure où certains auteurs, à l'instar de Barisnikov (2009), privilégient une décomposition en deux étapes : d'abord une étape perceptive permettant d'analyser les composantes visuelles et les caractéristiques de l'objet perçu et ensuite une étape mnésique faisant le lien entre les éléments visuels perçus et les connaissances stockées en mémoire. D'autres, comme Griva et Raftopoulos (2014), regroupent la deuxième et la troisième étapes de Gal et Linchevski (2010) sous le terme de « cognition », qui est alors différencié du terme « perception » (étape 1).

2.1.1. L'étape initiale de la perception visuelle

Nous sommes constamment en action dans notre milieu environnant, ce qui provoque une variété de stimuli visuels. La perception visuelle est le produit d'interactions complexes avec ces stimuli (Widder *et al.*, 2019). Elle est définie par Piaget et Inhelder (1948) comme la connaissance des objets résultante d'un contact direct avec ces derniers.

De manière générale, la perception occupe un statut particulier dans ces interactions. Elle va permettre, en suivant certains principes, de sélectionner, d'organiser et d'interpréter les sensations, c'est-à-dire les informations utiles à l'organisme reçues des récepteurs sensoriels (van der Ham & Ruotolo, 2017) et ce de manière instantanée ou presque et sans effort apparent (Flückiger & Klaue, 1991, cités par Blavier, 2006). La perception visuelle peut donc se résumer à l'habileté à interpréter les informations qui nous entourent et qui sont visibles dans le milieu environnant (van der Ham & Ruotolo, 2017).

Comme le mettent en évidence van der Ham et Ruotolo (2017) dans leur formulation de définition, une caractéristique fondamentale de la perception visuelle concerne son caractère sélectif. Schnotz et Lowe (2008) parlent d'ailleurs d'une sélectivité « *extrême* » (p.329) dans la mesure où seule une étroite partie des informations du champ visuel, lui-même étant une partie réduite de l'espace qui entoure l'individu, est capturée avec une résolution suffisamment haute pour être traitée de manière détaillée.

Classiquement, deux fonctions essentielles distinctes sont associées à la perception visuelle. D'une part, elle permet une prise de conscience et de connaissance du monde qui nous entoure. D'autre part, elle vient guider les activités que nous menons dans notre environnement direct (Bruce *et al.*, 2003 ; Jeannerod & Jacob, 2005).

2.1.2. De la perception à la reconnaissance et à la représentation mentale

2.1.2.1. Quelques précautions de vocabulaire

a. Distinction entre perception et représentation

Dans le langage courant, les termes de perception et de représentation sont parfois utilisés comme des synonymes. Toutefois, dans le cadre de l'étude des processus cognitifs, ces deux termes sont pourtant à distinguer puisqu'il s'agit de deux étapes distinctes (Piaget & Inhelder, 1948), l'une pouvant être le résultat de l'autre.

Etant centrée sur le point de vue propre du sujet, la perception est par conséquent incomplète et éventuellement inconsciente. La représentation est plus tardive que la perception et s'en distingue puisqu'elle implique une différenciation des points de vue ainsi qu'une coordination consciente entre l'objet et le sujet (Baldy, 1988).

En plus d'être distinctes, les étapes de perception et de représentation ne sont pas systématiquement liées. En effet, si dans ce chapitre et plus largement dans cette recherche, l'étape de représentation déclenchée par la perception visuelle au travers de stimuli externes ou de mouvements est étudiée, la représentation peut aussi être déclenchée de manière interne par des informations en mémoire créées par le processus d'imagerie mentale. Ainsi, un individu est capable de se représenter mentalement un élément sans forcément l'avoir sous les yeux.

Ces deux cas de figure menant à l'étape de représentation incluent des processus neuronaux qui se chevauchent. Qu'elles proviennent des stimuli ou actions perçus ou imaginés, les représentations neuronales sont similaires dans le cortex visuel, pariétal et frontal. De plus, perception et imagerie mentale fonctionnent en partie sur des processus similaires et peuvent être considérés comme deux phénomènes distincts mais similaires (Dijkstra *et al.*, 2019).

b. Distinction entre représentation mentale et représentation externe

Si le terme « représentation » est utilisé pour évoquer l'étape des représentations mentales, ce terme est ambigu car il est aussi utilisé pour évoquer des représentations

externes, comme cela a déjà été le cas plus tôt dans ce manuscrit, c'est-à-dire les moyens du monde matériel utilisés pour représenter un objet ou un espace. Les représentations externes et mentales sont donc deux éléments distincts puisque l'une existe dans le monde « matériel » et a des propriétés facilement identifiables tandis que l'autre est un « construct hypothétique » (Baldy & Chatillon, 1992, p.2). Par analogie, le premier peut être associé à un produit cognitif tandis que le second se rapporte davantage à un produit matériel. Malgré cette différence, plusieurs éléments communs les caractérisent. Elles sont toutes deux fonctionnelles, dans la mesure où les individus capables de les élaborer et/ou les exploiter peuvent s'appuyer sur elles pour mettre en place des actions efficaces. Il y a une congruence entre leurs fonctions et leurs propriétés. De plus, les procédés utilisés pour élaborer des représentations mentales sont les mêmes que ceux sur lesquels reposent les représentations externes graphiques, à savoir notamment la simplification, la sélection, la déformation (Baldy & Chatillon, 1992).

2.1.2.2. Le déroulement des étapes de reconnaissance et de représentation

Même s'il vient d'être mis en évidence que les représentations mentales peuvent se créer par le processus d'imagerie mentale, au départ d'informations en mémoire et donc sans être confronté directement à un processus perceptif, la suite de ce manuscrit se focalise uniquement sur le cas de la représentation mentale au départ de la perception puisque c'est ce qui est investigué dans cette recherche.

Après la perception de l'information, les formes et objets ont besoin d'être reconnus. Pour ce faire, le processus de reconnaissance passe par des analyses des caractéristiques et attributs (Gal & Linchevski, 2010). L'étape de reconnaissance peut fonctionner selon un processus *bottom-up* (c'est-à-dire ascendant), ou *top-down* (c'est-à-dire descendant). Dans le premier cas, ce sont les stimuli sensoriels qui sont le point de départ qui va guider la reconnaissance des formes. Dans le deuxième cas, c'est cette fois la connaissance du contexte ou du monde général qui va guider la reconnaissance.

L'étape de représentation se rapporte quant à elle aux mécanismes cognitifs qui permettent d'aboutir à la construction d'une image mentale notamment à partir de la représentation perceptive, elle peut donc être vue comme le résultat de la perception visuelle. Autrement dit, l'objet préalablement perçu va être reconstruit mentalement sous la forme d'une image mentale. L'image mentale est alors centrée sur l'objet préalablement perçu. Elle inclut des informations à propos des propriétés de l'entité

perçue mais également à propos des relations avec les autres entités (Griva & Raftopoulos, 2014). Dans le cadre de la perception des objets géométriques, elle inclut donc des informations au sujet de la catégorie des objets présentés, des propriétés de ces derniers, des relations qu'ils contiennent et des relations qu'ils entretiennent avec les autres objets géométriques.

L'image mentale peut être définie comme la représentation mentale analogue d'un objet perceptuel ou d'un événement moteur/d'une action motrice mené(e) sur cet objet (Hostetter & Alibali, 2008 ; Marchand, 2006). Plus spécifiquement, Piaget et Inhelder (1948) mettent en évidence l'existence de trois types d'image mentale. Premièrement, les images mentales peuvent être « statiques ». Elles peuvent aussi être qualifiées « cinétiques » lorsqu'elles représentent des objets en cours de transformations isométriques, par exemple des rotations d'un objet et les images mentales. Enfin, lorsqu'elles représentent des objets subissant des déformations, elles sont dites « transformatrices ». Au-delà de cette première classification, les auteurs relèvent que parfois, l'objet ou l'évènement représenté mentalement a déjà été vu auparavant par le sujet, dans ce cas elles sont qualifiées de « reproductrices » et peuvent être mises en œuvre dès le stade préopératoire voire même plus tôt. Dans le cas contraire, c'est-à-dire quand elles font écho à un évènement non perçu antérieurement, elles sont qualifiées de « anticipatrices ». Leur mise en œuvre est cependant plus tardive puisqu'elles ne se développent qu'à partir du stade des opérations concrètes.

2.2. Le cas de la perception visuelle de la 3D

Depuis la fin des années 90, la perception des informations 3D, et notamment de la profondeur, a fait l'objet de nombreux travaux qui ont cherché à identifier et comprendre les mécanismes en jeu dans le traitement de l'information 3D (Ernst & Banks, 2002 ; Knill & Saunders, 2003 ; Landy *et al.*, 1995). La perception visuelle des structures 3D constitue un prérequis pour que le sujet puisse s'orienter dans l'espace sensible, manipuler son environnement, ou encore reconnaître la forme des objets qui l'entourent (Welchman *et al.*, 2005). La perception de la profondeur est décrite par Blavier (2006) comme une des fonctions perceptives les plus importantes chez l'être vivant dans la mesure où il agit et vit dans un espace en trois dimensions.

2.2.1. La perception visuelle d'objets 3D dans l'espace sensible et au départ de représentations externes

Puisque la perception visuelle a pu être précédemment définie comme l'habileté à interpréter les informations qui nous entourent et qui sont visibles dans le milieu environnant, il est ici question de parler de la perception visuelle des objets 3D pour faire écho à la capacité à prendre conscience des caractéristiques géométriques des objets 3D observés et qui permettent de s'imaginer l'objet de manière véridique (Pizlo, 2008).

Comme cela est développé dans la suite de cette partie, les supports au départ desquels l'habileté est exercée sont susceptibles d'impacter les capacités de perception visuelle des objets 3D. En effet, des raisons invitent à considérer que percevoir visuellement les objets 3D présentés directement dans l'espace sensible pourrait être différent de la perception visuelle des représentations externes de ces objets, en particulier pour les représentations planes.

2.2.1.1. La perception visuelle d'objets 3D dans l'espace sensible

Alors qu'au quotidien les objets physiques qui nous entourent sont composés de matière tangible (métal, bois, plastique...) et existent dans un espace en trois dimensions, en optique, les images visuelles de ces objets perçus arrivant sur la rétine sont en deux dimensions (Bruce *et al.*, 2003 ; Postma, 2017 ; Todd, 2004). Comme l'expliquent Blavier (2006) mais aussi Havé *et al.* (2020), c'est en s'aidant de nombreux indices visuels de différents types que le système visuel va permettre de reconstruire la troisième dimension au départ de cette image bidimensionnelle.

Parmi ces derniers, on retrouve des indices pouvant être qualifiés de « binoculaires », puisqu'ils sollicitent nos deux yeux en extrayant des informations de la comparaison des images, légèrement différentes, obtenues par chacun d'eux. C'est le cas par exemple de la vergence qui permet d'appréhender la distance entre le sujet et l'objet observé ou de la disparité rétinienne qui permet d'appréhender les relations entre objets. Le traitement primitif et immédiat de ces indices permet une perception dite stéréoscopique tridimensionnelle.

En parallèle, d'autres indices, dits « monoculaires », permettent d'obtenir des informations au sujet des propriétés des objets et de leur position égocentrique. Ces indices, qui prennent appui sur l'interprétation des formes et des contours, ont un traitement cérébral beaucoup plus élaboré. C'est le cas notamment d'indices picturaux

tels que la taille familière, la taille relative, les ombres, le gradient de densité de texture...

S'ajoutent à cela des indices dits « musculaires » liés à la sollicitation des muscles oculaires : l'accommodation (mise au point de l'image sur la rétine) et la convergence (orientation des axes de nos yeux sur l'objet observé). Ces deux indices participent aussi à la perception de la 3D en renseignant sur la distance de l'objet observé.

Enfin, le flux optique est un indice qualifié de « dynamique » et informe sur la vitesse et la direction des déplacements dans l'espace.

La combinaison des informations issues de ces différents indices, qui pris individuellement peuvent s'avérer ambigus, rend possible la perception de la distance, de la profondeur et de la structure de l'objet observé. Elle permet ainsi de percevoir la troisième dimension de l'espace (Bruce *et al.*, 2003).

Plusieurs modèles du fonctionnement de la perception, organisés selon les différentes approches, sont identifiés dans la littérature :

- Une approche écologique, proposant un niveau global d'analyse, a été développée par Gibson lors de la deuxième moitié du XXème siècle (Blavier, 2006). Ce modèle considère que, grâce à l'exploration active de l'environnement, un flux optique de lumière provenant de ce dernier permet de capter de manière directe l'information, notamment en prenant appui sur les invariants, c'est-à-dire les propriétés spécifiques constantes du pattern de lumière reflété par ce qui est observé lors de l'action. Si une seule image rétinienne est ambiguë, l'action et le changement permettent de lever l'ambiguïté en fournissant des informations importantes pour la perception puisqu'elles transforment le réseau optique ce qui fournit des informations spécifiques notamment sur la disposition des objets et de l'espace (Kellman & Arterberry, 2006). C'est alors la détection des affordances activées par la structure tridimensionnelle des objets réels de l'espace sensible qui, selon ce modèle, rend la perception visuelle possible. Ce modèle implique alors l'absence d'intervention de la mémoire dans le processus de perception.
- Basé sur le modèle cognitif du traitement de l'information visuelle proposé par Humphreys et Riddoch, Marr (1982) propose un modèle spécifique de la perception de la 3D. Ce modèle, considérant davantage le traitement visuel comme un traitement passif d'une image sur la rétine, décrit l'étape perceptive en trois sous-étapes (Figure 14). La première de ces trois étapes, appelée « esquisse primaire » concerne l'élaboration d'une ébauche primitive, qui est en fait une représentation

en deux dimensions de chaque image rétinienne. Cette représentation est construite à partir des changements d'intensité présents dans l'image ainsi qu'en appliquant des règles de regroupement. Dans un second temps, avec l'étape « esquisse 2D ½ »⁵ ; le sujet va construire une ébauche en 2 D ½ de l'objet perçu. Cette ébauche est élaborée en partant des structures assemblées dans l'esquisse primaire et en analysant des indices tels que l'orientation, la profondeur des surfaces visibles, le mouvement, les ombres et les textures. Elle est dépendante du point de vue de l'observateur. Enfin, le modèle se conclut par l'étape de « représentation 3D ». Comme son nom l'indique, cette étape concerne la formation de la représentation définitive de l'objet en modèle 3D. Cette représentation sera cette fois indépendante du point de vue de l'observateur. À partir de cette dernière représentation, le sujet va pouvoir reconnaître les objets perçus en établissant un contact avec un registre de descriptions d'objets stockées en mémoire. Toutefois, d'après Pizlo *et al.* (2010), selon le modèle de Marr, l'esquisse 2D ½ est construite uniquement en prenant appui sur les surfaces, alors que d'autres éléments, notamment les sommets et les arêtes permettent aussi de définir les objets 3D et fournissent des informations sur l'objet 3D. Les auteurs envisagent alors que les surfaces ne servent pas d'appui à la récupération des formes 3D. Elles suivent plutôt que ne précèdent la perception des formes 3D.

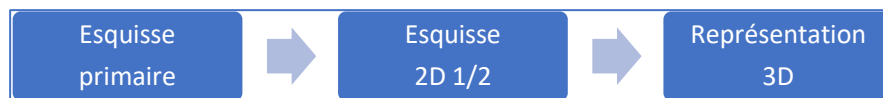


Figure 14 : Modèle de perception de la 3D de Marr (1982)

- Une autre approche de la perception est *l'approche des deux systèmes visuels séparés*. Cette approche, bien que distincte des deux approches précédentes, permet une résolution des contradictions apparaissant entre elles tout en les validant, au moins en partie, et semble confirmée par les études neuropsychologiques (Blavier, 2006). Comme son nom l'indique, cette approche part du principe qu'il existe deux voies distinctes de traitement de l'information visuelle, sous-tendues par des structures neuronales différentes. La première voie est la voie ventrale. Elle concerne la reconnaissance des formes (catégorisation et identification des objets) et traiterait des représentations cognitives conscientes de la perception visuelle (le « what »). Les indices monoculaires relatifs à la 3D sont

⁵ Le qualificatif « 2D ½ » présent dans le modèle de Marr est à distinguer de la terminologie « 2 ½ D » utilisée par Bertolo pour qualifier les environnements virtuels. Des parallèles peuvent cependant être faits puisque ce choix de terminologie fait écho à un intermédiaire entre le 3D et le 2D.

alors traités majoritairement par cette voie (Sevros 2000, cité par Blavier, 2006). La voie dorsale concerne quant à elle le contrôle visuo-moteur et traiterait les représentations sensorimotrices de l'espace visuel (le « how ») (Goodale & Milner, 1992). Elle interviendrait alors dans la localisation spatiale et le traitement visuel des actions. Le traitement des indices binoculaires serait majoritairement assuré par cette deuxième voie (Sevros 2000, cité par Blavier, 2006). Notons par ailleurs que Philips *et al.* (2002, cités par Blavier, 2006) suggèrent l'existence d'un possible troisième système associé au lobe pariétal inférieur, qui traiterait les informations spatio-temporelles nécessaires lorsque des habiletés sont exercées dans l'espace 3D, et qui combinerait des fonctions attentionnelles et spatiales.

- Blavier (2006) identifie une dernière approche, dite constructiviste, qui intègre les informations présentées dans l'approche des deux systèmes visuels séparés en insistant davantage sur l'interaction perception-action. Cette approche ne considère alors pas, contrairement à la précédente, que perception et action appartiennent à des domaines cognitifs isolés. Elle insiste d'une part sur l'importance de la perception pour orienter l'action, elle-même utilisée pour se construire une représentation du monde mais souligne également l'importance de l'action pour la perception.

2.2.1.2. La perception visuelle d'objets 3D au départ de représentations 2D

Que la perception visuelle des objets 3D se fasse au départ d'objets de l'espace sensible ou de représentations, les images envoyées sur la rétine sont de toute façon bidimensionnelles. Ces images se créent, dans l'espace sensible, au départ d'objet en trois dimensions contenant des indices relatifs à cette troisième dimension. En revanche, lorsque de telles images d'objets 3D se créent au départ de représentations 2D, il s'agit alors d'observer une surface uniquement sur laquelle l'élément est représenté. Cela implique une perte d'informations ainsi qu'une certaine ambiguïté.

De nombreuses recherches ont étudié l'habileté de perception visuelle d'objets 3D au départ de tâches de reconnaissance de photographies ou de représentations 2D d'espace 3D ou d'objets de cet espace (Baldy, 1988 ; Bulthoff & Edelman, 1992 ; Frick & Newcombe, 2015 ; Pittalis & Christou, 2013). Cette capacité se rapporte donc au passage de la 2D à la 3D tel que considéré par Hershkowitz (1990), c'est-à-dire au passage d'une représentation 2D d'un objet 3D à cet objet 3D, et apparaît essentielle compte tenu de la multiplicité des représentations 2D auxquelles nous pouvons être confrontés.

Kaufmann *et al.* (1981) soulignent que, déjà à l'âge de 7 mois, les enfants sont sensibles aux informations picturales relatives à la profondeur. Pour autant, de nombreux auteurs ont pu identifier que les enfants et les adolescents ont des difficultés à percevoir des représentations 2D d'objets 3D, et donc à faire le lien entre les objets 3D ou les scènes réelles et leur représentation plane, à se construire une image mentale des objets représentés et à raisonner sur ces représentations (Camou, 2012 ; Gutiérrez, 1996 ; Kondo *et al.*, 2014 ; Parzysz, 1988 ; Pittalis & Christou, 2010 ; Widder & Gorsky, 2013 ; Widder *et al.*, 2019).

D'après Fagot *et al.* (2000), lorsqu'il est amené à percevoir des représentations 2D d'objets 3D, l'individu peut se situer dans différents cas de figure en fonction du traitement de la relation entre l'objet et sa représentation. Le traitement de l'objet et celui de sa représentation peuvent être indépendants dans le cas où l'individu les différencie explicitement. Il peut aussi être identique dans le cas où l'individu ne les différencie pas. Enfin, le sujet peut comprendre la fonction de la représentation 2D, en différenciant physiquement l'objet et sa représentation mais en les considérant comme symboliquement liés.

a. Complexité de perception des représentations 2D d'objets 3D en perspective

D'après Pillay (1999), le passage de représentations 2D d'objets 3D à ces objets 3D nécessite de pouvoir mettre en place différents processus de manière combinée ou individuelle : récupérer et modifier des représentations mentales préalablement construites, créer des représentations complètement inédites et/ou encoder une représentation interne à partir d'une représentation externe donnée. Ces processus requièrent que les individus puissent mettre en place une série d'opérations parfois complexes, ce qui en fait une activité cognitive elle-même complexe :

- que des informations provenant de sources variées soient intégrées,
- qu'un sens soit construit pour les éléments abstraits issus des informations graphiques,
- que des informations parfois cachées ou pas claires soient construites également,
- que des représentations 3D des composantes et de l'objet complet soient construites et maintenues,
- que des schémas pertinents puissent être récupérés,

- que des informations issues d'une représentation spatiale donnée soient encodées et construites,
- que ces représentations puissent être transformées.

Même si, au début de l'adolescence, les individus sont la plupart du temps familiers avec de nombreux modes de représentation 2D, la perception visuelle de l'objet 3D exige une maîtrise des conventions de ces modes afin d'éviter les ambiguïtés et interprétations erronées qui peuvent en découler (Bayart *et al.*, 1996 ; Frick & Newcombe, 2015). Néanmoins, selon les modes de représentation 2D, ces conventions ne sont pas toutes triviales et ne font pas forcément l'objet d'un apprentissage scolaire traditionnel (Parzysz, 1988).

Cette difficulté est renforcée par la non-bijectivité entre dessin et objet représenté (Audibert & Keita, 1987). En effet, une multitude de représentations 2D existent pour représenter un même objet. De nombreux exemples ont d'ailleurs préalablement pu être donnés pour le cube (*cf.* 1.1.2.1). L'inverse est également vrai dans la mesure où un même dessin peut représenter plusieurs objets et une même représentation 2D peut être proposée pour représenter une infinité d'objets 3D (Pizlo *et al.*, 2010), notamment selon les conventions sélectionnées (Bayart *et al.*, 1996). Ainsi, un même dessin en perspective pourrait par exemple représenter un cube ou un parallélépipède rectangle selon le rapport de longueur sélectionné pour la direction des fuyantes.

Ainsi, pour certains enfants et adolescents, interpréter la représentation plane dans son ensemble comme une forme en 3D n'est pas évident. Cela les amène à concevoir la représentation plane uniquement comme une forme plane ou comme un assemblage de formes planes simples appartenant au même plan et donc à ne pas conceptualiser la troisième dimension. Pittalis et Christou (2013) qualifient cette situation de comportement bidimensionnel (Figure 15).

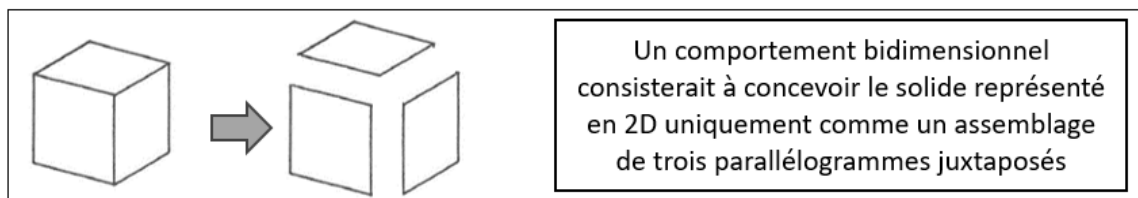


Figure 15 : Illustration d'un comportement « bidimensionnel »

Par ailleurs, au-delà des comportements bidimensionnels, Parzysz (1988) a relevé des difficultés d'encodage et de décodage des représentations d'objets 3D, avec

notamment des tendances à transférer les propriétés géométriques des représentations graphiques aux objets représentés et inversement. Les enfants et les adolescents sont donc confrontés à des difficultés à gérer ce que Laborde et Capponi (1994) nomment le domaine de fonctionnement et le domaine d'interprétation. Le premier domaine se rapporte à toutes les propriétés géométriques de l'objet représentées par certaines propriétés spatiales du dessin. Le deuxième fait référence à toutes les propriétés spatiales du dessin qui ne peuvent pas être interprétées comme renvoyant à des propriétés de l'objet. À titre d'exemple, pour pouvoir reconnaître le cube représenté en 2D en Figure 15, il sera nécessaire d'intégrer dans le domaine d'interprétation le fait que, sur le dessin, les amplitudes des angles ne correspondent pas aux amplitudes réelles des angles sur l'objet géométrique. Sans la prise en compte de cette règle et des autres règles relatives au mode de représentation, l'enfant et l'adolescent s'appuieront sur l'évidence perceptive, ce qui pourrait les amener à ne pas percevoir adéquatement l'objet géométrique présenté.

Cette tendance à s'appuyer sur l'évidence perceptive trouve son origine dans la présence, chez de nombreux enfants et adolescents, de l'illusion consistant à considérer qu'un dessin 2D peut représenter l'objet 3D sans ambiguïté. Ces derniers considèrent alors le dessin comme une bonne représentation de l'objet réel et inconsciemment font face à une barrière visuelle (Gutiérrez, 1996 ; Parzys, 1988). Or, pour assurer la perception de représentations 2D en perspective, l'individu va devoir admettre qu'il ne peut se fier à tout ce qui est présent sur la représentation 2D et qu'il y a une perte d'informations ainsi qu'une déformation de la réalité. Il va donc être amené à restituer les informations perdues et à inhiber ce qui est déformé pour se créer une représentation mentale en 3D de la situation 2D observée, par exemple en s'imaginant ce que l'objet 3D représenté serait si on le manipulait (Bayart *et al.*, 1996). Les formes apparaissant dans la représentation 2D d'objet 3D ne peuvent donc être appréhendées comme constantes sans quoi la perception apparaît impossible. Dans ce contexte, l'enfant doit dépasser une perspective égocentrée et le rôle de l'imagination du mouvement de l'objet apparaît essentiel (Piaget & Inhelder, 1948).

- Des informations qui peuvent aider et d'autres qui peuvent tromper (Widder *et al.*, 2014) :

De manière générale, Widder *et al.* (2014) ont mentionné que, face à une représentation 2D d'objets 3D, deux sortes d'informations viennent orienter la perception et donc la création de bonnes ou mauvaises représentations mentales des

objets représentés : les « potentially helpfull information » (PHI) et les « potentially misleading info » (PMI). Comme leur nom l'indique, les PHI sont des informations qui vont pouvoir potentiellement aider les individus dans la construction de représentations mentales correctes. C'est le cas par exemple de la face de front dans les dessins en perspective cavalière, qui est représentée à l'identique.

Inversement, les PMI sont des informations qui potentiellement vont venir gêner dans la construction de l'image mentale. Deux types de PMI peuvent être identifiées : d'une part les informations correctes cachées et d'autre part les informations incorrectes modifiées ou ajoutées. Évidemment, au plus les PMI sont importantes et les PHI sont peu élevées, au plus le risque d'être confronté à des difficultés de perception augmente. Ainsi, Widder *et al.* (2014) évoquent que le ratio « PHI/PMI » constitue un indice significatif des obstacles de perception de l'objet 3D au départ de représentations 2D.

Concernant les informations cachées, selon les conventions choisies, la quantité d'informations cachées peut varier, comme l'illustre la Figure 8 (p. 42). La capacité de compléter dans leur esprit les parties cachées de l'objet peut poser des difficultés aux enfants et aux adolescents (Bakó, 2003 ; Haj-Yahya, 2021). Cette nécessité de se construire mentalement des informations cachées entraîne une augmentation de la charge cognitive exigée en comparaison à la charge occasionnée par du matériel physique (Pillay, 1998).

Concernant les informations incorrectes affichées, Mithalal (2014) confirme la présence de nombreuses aberrations visuelles au sein des représentations 2D en perspective pouvant s'avérer trompeuses et complexifiant ainsi la perception de l'objet 3D. La liste de ces aberrations est non exhaustive mais plusieurs exemples principaux peuvent être cités :

- *la non-conservation des (in)égalités de longueurs* : certaines longueurs, pourtant égales sur l'objet 3D sont inégales dans la représentation 2D. Par exemple, dans un cube en perspective, les représentations des arêtes n'ont pas toutes la même longueur alors qu'un cube a pour propriété d'avoir des arêtes toutes isométriques. Inversement, on peut observer également que, sur des représentations 2D d'objets 3D, des segments ont la même longueur même si cette longueur n'est en réalité pas identique sur l'objet 3D réel.
- *la non-conservation des angles* : les amplitudes des angles ne sont pas systématiquement conservées sur les représentations en perspective. L'exemple du

cube constitue un exemple flagrant de cette non-conservation puisqu'on observe que les angles des faces transversales ne sont pas droits alors que ces faces sont sur l'objet 3D, toutes des carrés.

- *La présence de fausses intersections et de surfaces fermées inexistantes lorsque les arêtes cachées sont visibles* : différentes fausses propriétés apparaissent sur les représentations 2D en perspective. Parmi celles-ci, il est possible de citer la présence de fausses intersections puisque des segments ou droites peuvent être sécants sur les représentations 2D bien qu'ils ne le soient pas sur l'objet 3D (Figure 16). D'après Mithalal (2014), cela peut inciter l'élève à observer des « surfaces fermées » sur la représentation, qui pourtant n'existent pas dans l'objet géométrique.

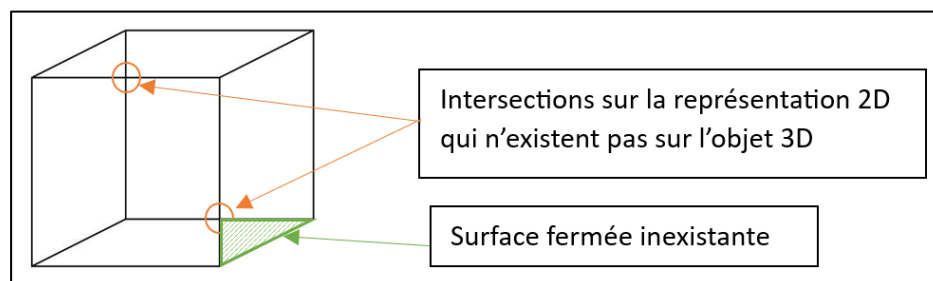


Figure 16 : Aberration des représentations en perspective liée à la présence d'intersections inexistantes

- *La présence de faux alignements* : on peut observer que certains éléments peuvent être alignés sur le dessin en perspective alors qu'ils ne le sont pas dans la réalité. C'est le cas par exemple au sein de la Figure 17, pour la diagonale de la face avant du cube, alignée avec l'arête commune à la face supérieure et la face de droite du cube. Dans cet exemple, on observe qu'il y a également une difficulté liée à la superposition entre la même diagonale et l'arête inférieure gauche.

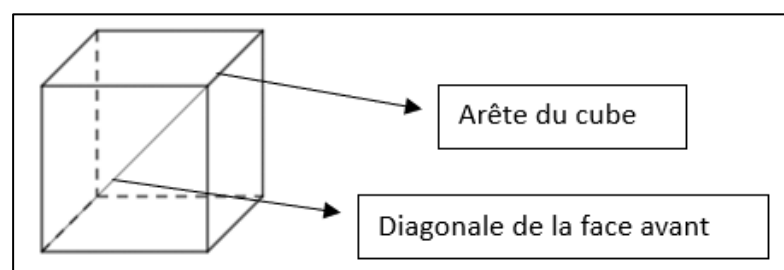
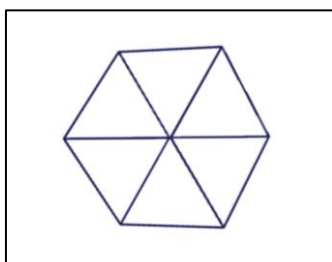


Figure 17 : Aberration des représentations 2D liée à la présence de faux alignements

Précisons par ailleurs que certains choix de représentations 2D (mode de représentation, angles de projection...) peuvent confronter les élèves à davantage

d'obstacles visuels que d'autres (Widder *et al.*, 2014) et renforcent donc les difficultés de perception de l'objet 3D. La Figure 18 est un exemple de représentation plane susceptible de poser de fortes difficultés. Pour ce type de représentation, un premier défi consiste à s'imaginer que le dessin représente une situation tridimensionnelle et donc à dépasser le comportement bidimensionnel, ce qui n'est pas aisé même pour un œil averti (Bayart *et al.*, 1996).



*Figure 18 : Exemple de représentation 2D d'un cube susceptible de confronter à davantage d'obstacles visuels (tiré de Widder *et al.*, 2014)*

Dans ce contexte, la fonction exécutive de contrôle inhibiteur, pouvant être définie comme un processus de supervision permettant le blocage des interférences et informations non pertinentes à la réalisation d'une tâche en cours (Bialystok & Craik, 2022 ; Diamond, 2013 ; Miyake *et al.*, 2001), apparaît essentielle pour pouvoir dépasser les aberrations visuelles au profit d'une perception adéquate de la 3D (Beauset *et al.*, 2025). En effet, l'individu va devoir résister aux informations directement visibles sur la représentation 2D.

- Conflit entre le « vu » et le « su » de Parzysz (1988) :

Comme évoqué précédemment, Parzysz (1988) a pu mettre en évidence une difficulté dans le chef des enfants à se détacher de ce qui apparaît sur les représentations 2D. Plus spécifiquement, l'auteur s'est intéressé aux difficultés de lecture d'informations au départ de représentations 2D d'objets ou de configurations d'objets 3D en mettant en évidence l'émergence d'un conflit entre le « vu » et le « su ». Il s'agit, comme son nom l'indique, d'un conflit pouvant exister entre ce que l'élève voit sur un dessin et entre ce que l'élève sait de l'élément représenté, notamment au regard des informations fournies dans l'énoncé. Bakó (2003) confirme également cette difficulté en montrant que les élèves prennent principalement en considération les aspects figuratifs (référence au « vu »), en omettant les inférences didactiques (référence au « su »).

Parzysz (1988) ainsi que Colmez et Parzysz (1993) relèvent trois étapes différentes dans l'évolution de la lecture d'informations sur des représentations 2D d'objets 3D, en référence à ce conflit :

- Dans la première étape, ayant lieu chez les enfants âgés de 8 et 10 ans, la lecture d'informations sur les dessins en perspective est basée sur ce qui est « vu » uniquement, sans se questionner sur le décalage avec ce qui est « su ». Cela implique que l'enfant prend appui sur ce qui est directement visible sur la représentation 2D sans concevoir les déformations des formes sur la représentation en perspective.
- La deuxième étape s'observe chez les enfants âgés de plus de 10 ans. Lors de cette étape, les enfants sont dans une position intermédiaire de conflit entre ce qui est « vu » et ce qui est « su ».
- Enfin, ce n'est qu'à partir de l'âge de 15 ans que les adolescents sont capables de se baser sur ce qui est « su » uniquement dans des dessins en perspective. Ils deviennent alors capables de dépasser complètement ce qui est vu. Bridoux et Nihoul (2015) évoquent que, pour les élèves de l'enseignement secondaire supérieur, *a priori* situé donc dans la troisième étape relevée par Parzysz, il est possible d'expliquer cette capacité à dépasser ce qui est « vu » par la présence d'un contrat. Ce dernier les inviterait à considérer que c'est du point de vue de ses connaissances qu'il doit interpréter la représentation 2D d'un objet géométrique et ne pas s'appuyer sur ce qu'il voit directement sur la représentation plane, ce qui les inciterait à décoder les informations à partir de ses connaissances. Les auteurs ont ainsi observé que les erreurs étaient moins fréquemment commises par ces élèves lorsqu'il s'agissait de travailler sur des représentations 2D d'objets 3D, en comparaison par exemple à un travail impliquant des représentations 2D de plans ou de droites dans l'espace.

b. La perception directe de certaines représentations 2D en perspective

Pour autant, malgré les recherches confirmant les difficultés observées chez de nombreux enfants et adolescents, notons que dans certains cas, les individus se font facilement et rapidement une bonne image mentale de l'objet 3D représenté en 2D. Parzysz (2006) évoque par exemple qu'une vue à peu près de face (mais pas complètement) et légèrement de dessus est une vue habituelle de l'objet qui est le plus souvent facilement perçue. Cette bonne perception de l'objet 3D représenté est

influencée par différents principes provenant principalement du fait que certaines représentations sont jugées plus représentatives que d'autres.

Un des principes de départ est lié au fait qu'on « reconnaît » mieux certains éléments lorsqu'ils possèdent une forme prototypique (Sarfaty & Patkin, 2013). Par exemple, pour les cylindres, on peut relever que certains cylindres, ceux plus longs que larges, sont prototypiques, alors que d'autres sont plutôt non prototypiques. Au-delà de la forme globale, la position dans laquelle est présentée l'objet 3D peut aussi influencer la reconnaissance, avec une meilleure reconnaissance des formes quand elles sont proposées dans une position typique (Parzysz, 1991 ; Sarfaty & Patkin, 2013). En position « debout » (sur une des bases), le cylindre est par exemple globalement mieux perçu qu'en position « couchée ». Larios (2006) parle de représentations d'objets 3D dans des « positions standard » et évoque une difficulté à s'imaginer les objets 3D, en l'occurrence des solides géométriques, quand ils ne sont pas présentés dans de telles positions. L'auteur appelle cela le phénomène de « rigidité géométrique ». Beuset *et al.* (2025) rattachent ce phénomène à un déficit dans la capacité de flexibilité cognitive, définie comme la fonction exécutive permettant notamment l'adaptation à une situation nouvelle (Miyake & Friedman, 2012).

Mithalal (2014) évoque l'existence de « représentations-types » qui peuvent être rapidement « reconnues ». Le terme « représentation-type » a été utilisé dans un premier temps par Chaachoua (1997) pour évoquer des représentations n'ayant pas fait l'objet de conventions explicites mais appartenant à une tradition d'enseignement. L'observation du contenu des manuels scolaires permet de souligner des tendances dans les représentations. De leur côté, Widder *et al.* (2014) utilisent le terme de « représentations normatives » pour évoquer ces représentations courantes et plus facilement perçues. Les auteurs ont pu observer que, lorsqu'on demande à des étudiants de dessiner un cube, une majorité d'entre eux proposent des dessins similaires, se rapportant aux représentations normatives qu'on retrouve notamment dans les manuels scolaires. Il est donc plus facile pour les enfants et les adolescents de se faire une image mentale correcte de telles représentations 2D, ce qui leur permet ensuite d'associer l'objet 3D construit à un objet géométrique et ainsi de pouvoir dire qu'il s'agit d'un cube. Par ailleurs, lorsqu'il est question d'utiliser des représentations 2D utilisant la convention des arêtes cachées représentées en pointillé, Widder *et al.* (2014) évoquent que l'orientation des objets présentés peut impacter la perception de l'objet 3D et complexifier l'élaboration de bonnes représentations mentales. Selon

l'orientation choisie, la représentation est aussi qualifiée de « normative » ou de « non normative ». La Figure 19 en est une illustration. On y observe quatre représentations 2D qui ont exactement les mêmes nombres de PHI et PMI mais qui sont orientées de différentes façons. Les auteurs relèvent que les deux premiers cas d'orientation utilisés dans les représentations font davantage référence à des positions « normatives », contrairement aux deux autres qui posent davantage de difficultés aux individus. Cette difficulté est également relevée par Claisse (2020) qui évoque que les représentations non normatives telles qu'illustrées en Figure 19 peuvent perturber sensiblement la mise en relief des représentations, entre autres car les individus sont peu habitués à ces représentations.

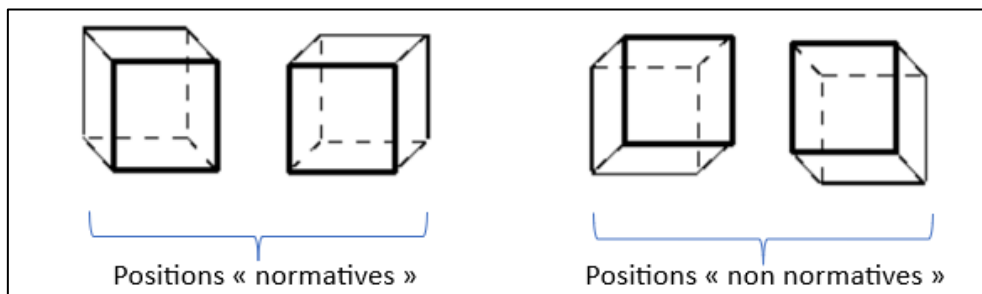


Figure 19 : L'orientation des représentations 2D en tant que facteur d'influence (tiré de Widder et al., 2014)

c. Le cas particulier de la perception au départ de vues multiples

St. John et ses collègues (2001) se sont particulièrement intéressés à la différence entre perception des objets 3D au départ d'une représentation 2D en perspective et au départ de vues multiples (cf. 1.1.2.1d). Même s'il offre l'avantage de n'offrir aucune déformation et donc de ne pas confronter l'individu à des informations trompeuses, il rend la compréhension de la forme générale des objets plus difficile puisqu'il n'intègre pas directement les trois dimensions ensemble (St John *et al.*, 2001). Il exige de l'individu une capacité à compiler et organiser les différentes vues pour percevoir l'objet 3D. Maitriser ce mode de représentation, et donc pouvoir percevoir le solide représenté au départ de ces différentes vues, demande certaines capacités spatiales.

Cela fait de ce mode un mode exigeant une charge cognitive plus complexe, nécessitant ainsi plus d'effort de la part de l'individu (Pillay, 1998 ; St John *et al.*, 2001). La difficulté de coordination des différentes vues est également mise en évidence par Battista et Clements (1996). Ces propos sont confirmés par Höffler et Leutner (2011) qui décrivent de manière plus générale que lorsqu'on est confronté à une série

d'images statiques, les différentes images doivent être connectées, ce qui nécessite une capacité spatiale développée.

Au travers d'une expérimentation évaluant la perception de la forme d'un assemblage de cubes, St John et ses collègues (2001) ont pu confirmer que, chez des adultes, la perception au départ de vues multiples était plus problématique que la perception au départ d'une vue en perspective, avec d'une part moins d'identifications réussies et d'autre part des temps de réponse plus longs. Les auteurs ont néanmoins montré que, lorsqu'il s'agit non pas de percevoir la forme d'un assemblage mais la position relative d'éléments entre eux, ces représentations posent moins de difficultés puisqu'elles sont moins ambiguës que les dessins en perspective.

2.2.1.3. La perception visuelle d'objets 3D au départ de représentations 2½D

Par analogie à la perception visuelle de représentations 2D, la perception visuelle au départ de représentations 2 ½ D pourrait être associée au passage de la 2 ½ D à la 3D, c'est-à-dire au passage de la représentation 2 ½ D d'un objet 3D à cet objet 3D. Si Pasqualotti et Freitas (2002) évoquent que les processus psychologiques activés dans les environnements virtuels peuvent être similaires à ceux activés dans le monde sensible, sans pour autant le démontrer, ce point de vue ne fait pas consensus et certains se montrent plus prudents à ce sujet. En effet, comme le soulignent Rose et Foreman (1999) ou Blavier (2006), les comportements perceptifs dans les environnements virtuels pourraient différer de ceux dans le monde réel.

Une des raisons permettant d'expliquer l'existence de potentielles différences entre la perception dans l'espace sensible et en environnement virtuel relève de la modification des indices, notamment musculaires, liée au fait que la perception ne porte plus sur un objet 3D mais sur un écran le représentant. L'indice de disparité rétinienne, qui apparaît dans l'espace sensible, n'est par exemple pas applicable dans l'environnement virtuel proposé sur écran alors qu'il constitue une source d'information sur la profondeur (Dumas *et al.*, 2001). Ainsi, l'environnement virtuel est qualifié de plus pauvre en indice que l'environnement 3D. De plus, les rapports entre l'indice d'accommodation et de vergence changent puisque, si ces indices varient ensemble dans l'espace sensible, ce n'est pas le cas dans l'environnement virtuel où l'indice d'accommodation est maintenu par rapport à l'écran tandis que la vergence change avec la scène représentée virtuellement (Wann *et al.*, 1991). Ces modifications dans les indices relatifs à la perception de la 3D permettent notamment de considérer

que la perception des distances semble poser plus de difficultés en environnement virtuel, ce qui semble confirmé par Park *et al.* (2021).

Pour autant, comme le soulignent Krylova et Vodyakha (2022), peu de recherches ont évalué les capacités de perception visuelle de représentations virtuelles d'objets 3D auprès d'enfants et, à notre connaissance, ce constat peut être élargi aux adolescents. Un tel constat nous empêche, à ce stade, de pouvoir déterminer, en prenant appui sur des données probantes, si cette habileté est maîtrisée par les enfants et les adolescents de 6 à 15 ans. Ainsi, il ne semble pas possible de dire si un enfant ou un adolescent confronté à une représentation virtuelle d'un objet 3D est capable de se représenter cet objet correctement ou si, comme c'est le cas face à des représentations 2D, la perception de telles représentations leur pose des difficultés.

Toutefois, l'étude exploratoire proposée par Krylova et Vodyakha (2020) investigate la perception d'objets 3D complexes (formes complexes arrondies ne ressemblant pas à des objets usuels) auprès de quelques enfants de 4 à 5 ans au départ d'une représentation virtuelle à manipuler sur tablette, mais aussi au départ d'une représentation 2D ou de matériel physique. Les auteurs ont pu mettre en évidence que la perception d'un objet 3D présenté virtuellement est majoritaire mais n'est pas maîtrisée chez tous les enfants interrogés (perception de l'objet 3D présenté pour 60% des enfants), même si la quasi-totalité des enfants semblent concevoir que l'objet présenté virtuellement est un objet tridimensionnel. En effet, l'objet 3D présenté est parfois perçu comme un objet 3D différent mais les comportements bidimensionnels, considérant que l'objet présenté est plat, sont en revanche relativement rares. De tels résultats se rapprochent de ceux observés au départ de matériel physique. La perception au départ d'une représentation 2D semble aussi partiellement maîtrisée avec un pourcentage d'enfants semblable à celui observé face aux représentations virtuelles. Par contre, davantage de comportements bidimensionnels sont observés face à ce type de support. Plus récemment, Krylova et Vodyakha (2022) ont à nouveau investigué l'habileté de perception visuelle d'objets 3D représentés virtuellement mais auprès d'un échantillon plus important d'enfants de 4 à 6 ans. Ils ont partiellement confirmé certains constats mais en ont nuancé d'autres. Les auteurs confirment le fait que la perception d'une représentation virtuelle d'objet 3D n'est pas automatique chez les enfants du préscolaire, même si une majorité d'entre eux perçoivent qu'elle se rapporte à un objet 3D et pas à un objet plat. La capacité de perception apparaît alors différente de la perception de l'objet au départ d'une représentation 2D, que les

enfants associent davantage à un élément plat. Cette seconde étude, contrairement à la première, indique que des divergences apparaissent aussi entre la perception de représentations 2 ½ D et de matériel physique, avec une sélection plus importante d'objets 3D différents de l'objet 3D présenté au départ de représentations virtuelles. Ces résultats semblent donc s'inscrire dans le sens de l'hypothèse de Rose et Foreman bien qu'ils ne portent que sur un nombre réduit d'objets 3D et sur une tranche d'âge spécifique et réduite (enfants de 4 à 6 ans).

De leur côté, Wu et Chiang (2013) ont évalué la capacité d'étudiants de l'enseignement supérieur à comprendre l'apparence et les caractéristiques d'objets 3D complexes subissant des rotations ou transformations (découpe de certaines parties de l'objet). Les auteurs ont comparé cette compréhension des objets lorsqu'ils ont été présentés au travers d'une représentation dynamique (animation de l'objet 3D en train de subir la rotation ou la transformation), soit au travers d'une succession de représentations 2D (photographies des différentes étapes de la rotation ou de la transformation de l'objet). Ils ont pu mettre en évidence une meilleure compréhension au départ de représentations dynamiques. Toutefois, selon les solides, les différences en faveur de ces supports n'apparaissent pas toutes significatives. Elles le sont, par exemple, pour les objets contenant des surfaces doublement incurvées mais pas pour des objets impliquant des surfaces classiques, inclinées ou encore cylindriques.

En dépit du peu de recherches évaluant la perception de représentations virtuelles d'objets 3D chez les enfants et les adolescents, certaines caractéristiques de ces représentations virtuelles permettent de mettre en avant des arguments en faveur d'une maîtrise de leur perception similaire à la perception des objets 3D de l'espace sensible. Inversement, d'autres arguments s'inscrivent en défaveur de cette hypothèse.

Les représentations 2 ½ D d'objets de l'espace 3D, grâce à leur caractère dynamique, offrent une impression de tridimensionnalité (Bakò, 2003) au travers d'une représentation pouvant être caractérisée de complète (Höffler, 2010). D'après Mithalal (2010), elles occasionneraient une baisse de la complexité de l'examen perceptif en comparaison aux représentations 2D. Claisse (2020) semble également confirmer cette idée puisqu'il mentionne que le mouvement peut constituer une aide précieuse pour une meilleure vision dans l'espace.

À l'arrêt, ces représentations virtuelles restent des représentations 2D, impliquant donc à nouveau les difficultés évoquées au point 2.2.1.2a (aberrations visuelles, informations cachées). En offrant la possibilité aux utilisateurs d'observer l'objet 3D en

mouvement et dans différentes positions, les ambiguïtés observées dans les représentations planes sont levées. Par exemple, dans le cas d'une représentation virtuelle d'un cube, l'observation de rotations de l'objet pourrait permettre de se rendre compte que la face supérieure est un carré. Cela permet ainsi de lever des doutes qui auraient pu être présents face à une représentation 2D en perspective, au départ de laquelle on aurait pu penser que la base était un parallélogramme. De même, le caractère dynamique permet d'observer que certaines intersections présentes sur les représentations statiques ne sont pas présentes en réalité sur l'objet 3D (Kovárová & Sokolský, 2011).

Pour autant, malgré les indices liés à la troisième dimension, il n'en reste pas moins que les représentations virtuelles peuvent se résumer à une succession d'informations planes (2D). Dès lors, elles demandent que l'individu puisse d'une part stocker en mémoire de travail visuo-spatiale cette succession d'informations et, d'autre part, reconstituer mentalement la troisième dimension au départ de ces informations stockées, ce qui n'apparaît pas forcément évident notamment pour les plus jeunes (Vivian *et al.*, 2014). Par conséquent, la charge cognitive occasionnée par la perception de représentations 2 ½ D est décrite comme plus élevée que dans les représentations 2D, ce qui risque de rendre plus difficiles les tâches les impliquant. Ayres et Paas (2009) mais aussi Höffler (2010) confirment cette idée en évoquant que les informations dynamiques occasionnent de manière générale une charge cognitive plus importante que les informations statiques. Lowe (2003, cité par Schnotz & Lowe, 2008) parle d'ailleurs d'un coût perceptif et cognitif lié à la nature transitoire des informations dynamiques. En effet, à la place de « simplement » intégrer les informations statiques perçues au départ d'une représentation 2D, l'individu va devoir retenir toutes les nouvelles informations présentées grâce au caractère dynamique de l'environnement. Il va devoir compiler ces nouvelles informations aux informations déjà stockées en mémoire. Les informations à compiler peuvent alors être qualifiées de transitoires et non de permanentes par Ainsworth et Van Labeke (2004, cités par Höffler, 2010). Dans notre exemple d'objet cubique, l'individu est donc amené à observer une première vue de celui-ci, celle accessible avant que n'intervienne le dynamisme de l'environnement. Ensuite, les rotations appliquées à l'objet 3D lui permettront de récolter de nouvelles informations, complémentaires à celles de départ, par exemple sur la face carrée supérieure. C'est en compilant les différents indices bidimensionnels comme celui-ci que l'individu pourra percevoir correctement l'élément présenté. Cet argument relatif

à la potentielle surcharge cognitive est également avancé par Miyake *et al.* (2001). Les auteurs relèvent que, de manière générale, pour maintenir en mémoire les informations présentées dans une animation, de hautes capacités de mémoire de travail visuo-spatiale sont requises. Castro-Alonso *et al.* (2015) ont pu observer, à l'aide d'une évaluation de l'effort cognitif ressenti, que l'effort nécessaire pour traiter des supports dynamiques est décrit comme plus important en comparaison à celui nécessaire pour traiter des supports statiques. *A contrario*, de Koning et ses collègues (2019) ont pu identifier que la charge cognitive occasionnée lors de l'apprentissage d'une tâche motrice était ressentie comme plus faible au départ d'une animation (vidéo des actions menées) plutôt qu'au départ d'informations statiques (succession de photographies) chez des jeunes adultes.

De plus, le risque avec les informations transitoires est que les observateurs n'aient pas le temps de les traiter et de les mettre en lien avec les informations déjà en mémoire avant qu'elles ne disparaissent (Sweller *et al.*, 2011). Étant donné que le processus de perception est sélectif, si l'information transitoire n'a pas reçu l'attention nécessaire, elle est alors perdue (Schnotz & Lowe, 2008).

D'ailleurs, la vitesse à laquelle sont présentées les informations dynamiques sont décrites comme un élément déterminant dans leur perception et leur traitement, pouvant poser des difficultés si elle n'est pas adaptée (Meyer *et al.*, 2010, cités par De Koning *et al.*, 2011 ; Narayanan & Hegarty 2002, cités par Lowe, 2008).

Outre les capacités de mémoire de travail, des habiletés sont requises pour comprendre les représentations dynamiques ou plus largement les animations. Néanmoins, on retrouve dans la littérature deux hypothèses qui s'opposent concernant la compréhension d'informations dynamiques (Hegarty & Kriz, 2008 ; Höffler & Leutner, 2011). La première consiste à considérer que ce qui est présenté est prêt à l'emploi et peut donc facilement être transféré dans un modèle mental dynamique, y compris par des individus ayant une faible capacité spatiale. Autrement dit, les informations dynamiques, en comparaison aux informations statiques, offriraient une compensation des capacités spatiales puisqu'elles externaliseraient les processus mentaux. Comme précisé antérieurement, une des conditions nécessaires à la perception de représentations 2D d'objets 3D relève du fait que l'observateur doit être conscient que certaines informations peuvent être restituées en appliquant des rotations à l'objet représenté (Bayart *et al.*, 1996). Dans le contexte des représentations en 2 ½ D, le caractère dynamique des informations permet de prendre conscience de cela et peut

donc aider à assurer la perception de l'élément représenté. D'une certaine façon, l'individu est assisté dans la perception des changements temporels et ne doit pas se représenter mentalement les changements temporels par lui-même (van Gog *et al.*, 2008).

L'autre hypothèse considère que ces informations sont moins adaptées pour des individus ayant une faible capacité spatiale, puisqu'elles sont difficiles à traiter en raison de la transitivité des informations dynamiques. Autrement dit, les compétences de visualisation spatiale sont nécessaires pour comprendre les informations dynamiques présentées. Les résultats de recherches s'étant intéressées à la compréhension d'informations dynamiques, notamment à des animations, sans spécifiquement être centrées sur la perception de représentations 2 ½ D d'objets 3D, confirment la deuxième hypothèse (Chikha *et al.*, 2021 ; Hegarty & Kriz, 2008). En prenant appui sur ces recherches, il semble donc possible de considérer que la compréhension des représentations 2 ½ D de solides impliquant donc des rotations de l'objet 3D sur lui-même seront mieux comprises par des élèves ayant une bonne capacité de rotation mentale.

Un autre argument incitant à considérer que la perception visuelle de représentations 2 ½ D d'objets 3D pourrait poser des difficultés concerne le phénomène de « rigidité géométrique » (Larios, 2006) préalablement présenté (2.2.1.2b). Ce phénomène implique que certains individus peinent à s'imaginer une figure géométrique présentée lorsqu'elle est en mouvement. D'autant que, l'objet 3D en mouvement est probablement amené, à certains moments, à être montré dans des positions standard et, à d'autres, dans des positions qui le sont moins.

Enfin, des déformations optiques se produisent lorsque les objets sont observés en mouvement (Todd, 2004), ce qui peut aussi complexifier la perception des objets 3D représentés.

Au vu de ces arguments, il apparaît nécessaire de considérer que la capacité de perception visuelle de représentations 2 ½ D pourrait ne pas être systématiquement maîtrisée par les enfants et les adolescents. Dans ce contexte, mener des études permettant d'évaluer la maîtrise de l'habileté de perception des objets 3D au départ de ces représentations, en comparaison à des représentations 2D ou du matériel physique, représente un enjeu essentiel pour confirmer ou non les éléments mis en évidence préalablement. Ce type d'étude pourrait permettre d'identifier si et quand les enfants

et les adolescents arrivent ou non à percevoir les représentations 2 ½ D d'objets 3D et donc d'aboutir à une meilleure compréhension de la façon dont les simulations virtuelles des objets de l'espace sont appréhendées par ces derniers. De plus, en prenant appui sur des comparaisons, de telles études permettraient d'identifier si les individus arrivent à percevoir la 3D dans l'environnement virtuel comme ils le font dans l'espace sensible, afin de valider ou non l'hypothèse de Rose et Foreman (1999).

2.2.2. Maîtrise et développement de la perception visuelle de la 3D chez l'enfant et l'adolescent

De manière générale, la perception de l'espace sensible se construit progressivement chez l'enfant (Piaget & Inhelder, 1948). La maîtrise de la perception de la 3D dans l'espace sensible a lieu très tôt dans la vie de l'enfant, dès qu'il est amené à se déplacer dans l'espace (Campos *et al.*, 1970 ; Gordon & Yonas, 1976). Les déplacements des nourrissons autour d'un objet 3D engendrent des transformations optiques continues qui conduisent à la perception de la forme de ce dernier (Kellman & Short, 1987 cités par Humphrey & Humphrey, 1989). Cette habileté est souvent considérée comme étant acquise à travers l'expérience visuelle comme le revendiquent par exemple Renier *et al.* (2003, cités par Blavier, 2006). Son développement nécessite une stimulation visuelle spécifique. En ce qui concerne la capacité de représentation, qui suit la perception visuelle, Kosslyn *et al.* (1990) ont mené des expérimentations auprès d'enfants âgés de 5 ans et 8 ans mais aussi auprès d'adolescents âgés de 14 ans et auprès d'adultes. Les auteurs ont mis en évidence que la capacité de génération d'images mentales à un niveau similaire à celui des adultes n'est pas présente avant l'âge de 14 ans. Wimmer *et al.* (2015), qui ont quant à eux étudié cette capacité auprès d'enfants âgés de 4, 6, 8 et 10 ans et auprès d'adultes, ont observé des résultats différents. Les auteurs ont constaté que cette capacité est présente chez des enfants âgés d'environ 8 ans avec un niveau similaire à celui observé auprès d'adultes et qu'elle peut même être présente dès 4 ans. Dernièrement, Bates et Farran (2020) ont mis en évidence que la capacité à générer des images visuelles et à les maintenir est maîtrisée par les enfants âgés d'au moins 6 ans.

En ce qui concerne spécifiquement la perception d'objets 3D au départ de représentations 2D en perspective, les recherches soulignent que les capacités de reconnaissance d'objets 3D familiers au départ de représentations 2D apparaissent tôt dans l'enfance. De plus, très tôt aussi, les enfants deviennent conscients de la fonction

de représentant d'objets 3D que possèdent les images 2D, par exemple les photographies ou dessins 2D (Frick & Newcombe, 2015). Pour autant, Leighty *et al.* (2008) ont pu souligner que les connaissances nécessaires sur les structures des objets 3D au départ de leur représentation 2D ne s'acquièrent qu'à partir de l'âge de 4 ans. De même, Piaget *et al.* (1948) soulignent que c'est également à cet âge que les enfants deviennent en capacité de percevoir si une représentation correspond à un modèle. De leur côté, Frick et Newcombe (2015), en évaluant la perception de représentations 2D auprès d'enfants dont l'âge varie entre 4 et 8 ans, ont pu relever que cette habileté pose des difficultés à l'âge 4 ans mais se développe avec l'âge, avec une évolution importante entre 5 et 6 ans. Pour autant, les auteurs soulignent qu'elle reste encore non parfaitement maîtrisée à 8 ans. La perception de représentations 2D constitue donc encore un défi à cet âge et des difficultés à dépasser les aberrations visuelles restent présentes à cet âge et chez les enfants plus âgés ainsi que chez les adolescents, comme cela a pu le mettre en évidence préalablement (*cf.* 2.2.1.2).

Enfin, pour les représentations 2 ½ D, l'absence, à notre connaissance, de recherche menée dans une perspective développementale ne permet à ce stade pas de décrire le niveau de maîtrise de l'habileté chez les enfants et les adolescents ni même la manière dont ce niveau se développe. Toutefois, les recherches de Krylova et Vodyakha (2022) ont permis de souligner qu'à l'âge de 4 ans, des enfants sont déjà capables de percevoir des objets 3D présentés virtuellement, même si cette habileté n'est pour autant pas acquise par tous.

2.2.3. Facteurs d'influence de l'habileté de perception visuelle de la 3D

La description de la perception visuelle de la 3D au départ d'objets de l'espace sensible ou de leurs représentations externes, mais aussi la description de la façon dont l'habileté s'acquiert et se développe avec l'âge ont permis de déjà mettre en évidence différents facteurs susceptibles d'influencer les performances à des tâches de perception visuelle de la 3D. Outre ces premiers facteurs déjà mis en évidence, d'autres facteurs peuvent impacter le niveau de maîtrise de la perception visuelle des individus au sein d'un public tout-venant. Parmi ces facteurs, certains, tout comme l'âge, sont intrinsèques à l'individu et d'autres, comme le moyen de représenter l'objet 3D, sont extrinsèques et dépendent, entre autres, des conditions dans lesquelles il lui est demandé de faire appel à cette habileté (Widder *et al.*, 2014).

2.2.3.1. Facteurs intrinsèques

a. L'expérience et les connaissances antérieures de l'individu

Arcavi (2003) ou encore Widder *et al.* (2014) évoquent que le processus cognitif de perception est orienté et intrinsèque à l'individu dans la mesure où il est influencé par son expérience et ses connaissances antérieures. Havé *et al.* (2020) confirment cette idée en évoquant que les informations sensorielles reçues sont combinées avec les connaissances préalables en vue de réduire les incertitudes et ambiguïtés pouvant être associées à la perception. À titre d'exemple, puisque dans notre environnement, nous sommes confrontés davantage à des lignes horizontales ou verticales qu'obliques, notre cerveau a tendance à associer des segments faiblement ou fortement inclinés à des segments horizontaux ou verticaux, puisqu'il fait l'hypothèse qu'il sera plus probable de les rencontrer.

Les connaissances antérieures des individus sont également sources d'influence pour les étapes de reconnaissance puisqu'elles influencent le processus de reconnaissance *top-down* et de représentation (Griva & Raftopoulo, 2014). Plus spécifiquement, concernant la perception visuelle au départ de représentations 2D, l'expérience avec les représentations 2D semble exercer une influence sur les capacités de perception. Les participants qui ont une faible expérience avec l'observation de représentations planes sont souvent incapables de reconnaître les objets représentés. C'est grâce à des expositions répétées ou en démontrant les caractéristiques principales qu'ils en deviennent capables (Leighty *et al.*, 2008).

b. Les processus perceptifs de base et la présence de certains troubles

Avant même leur scolarisation, les enfants peuvent être sensibles aux propriétés de longueurs et d'angles des formes (Izard *et al.*, 2011). L'exploitation de ces propriétés constitue une base essentielle à l'observation des caractéristiques des objets 2D mais également 3D. Ainsi, certains processus perceptifs de base, comme la perception de la taille d'éléments présentés ou de l'orientation de ces éléments, peuvent impacter la perception des objets 3D représentés. L'individu peut être confronté à des difficultés à faire appel à certains processus perceptifs de base venant impacter cette perception de la 3D. D'après Benton (1979), des troubles visuo-perceptifs sont associés à une altération des stimuli complexes, de la reconnaissance visuelle, de la reconnaissance des couleurs, de la différenciation figure-fond ou de l'intégration visuelle. Ces troubles sont évidemment susceptibles d'impacter la perception des objets 3D.

c. Le niveau de rotation mentale

Outre la capacité à faire appel à certains processus perceptifs de base, le niveau de développement d'autres habiletés spatiales peut être lié à la perception visuelle d'objets 3D représentés (Hegarty & Kriz, 2008 ; Widder *et al.*, 2019). L'habileté de rotation mentale est susceptible d'être liée à la capacité de perception de représentations 2D puisque les sous-performances à une tâche de reconnaissance de telles représentations peuvent être expliquées par une difficulté à appliquer des mouvements à l'objet représenté (Frick & Newcombe, 2015). D'autre part, elle est aussi susceptible d'impacter la capacité à percevoir des représentations 2 ½ D comme en atteste le débat présenté au point 2.2.1.3.

2.2.3.2. Facteurs extrinsèques

a. La distance : les différents espaces de Cutting (1997)

D'après Brissiaud (1994), les expériences perceptives sont différentes suivant la taille de l'espace dans lequel l'enfant agit. Cutting (1997) relève que la perception est influencée par la distance qui sépare l'élément observé de l'observateur puisque les indices monoculaires et binoculaires utilisés par le sujet pour la perception de la profondeur exercent une influence variable selon que les objets observés soient proches ou non du sujet, donc selon le type d'espace auquel ils appartiennent. Il évoque que dans l'espace personnel (<2m), la disparité binoculaire est l'indice qui joue le rôle le plus important dans la perception de la profondeur (Carey *et al.*, 1998, cités par Blavier, 2006) alors que, dans l'espace d'action (2m à 50m), ce sont surtout des indices tels que la hauteur dans le champ visuel, la parallaxe de mouvements et la disparité binoculaire qui interviennent dans le traitement visuel de la profondeur. Enfin, la perception dans l'espace perceptif (>50m) est davantage influencée par l'indice de perspective aérienne.

b. Les objets à percevoir

La recherche a pu mettre en évidence que certains objets occasionnent une perception visuelle qualifiée d'ambiguë chez les jeunes enfants. C'est le cas notamment lorsqu'il s'agit de discriminer deux objets symétriques contenant des changements d'orientation droite/gauche. En 2D, on sait par exemple que certains enfants ont des difficultés à discriminer la lettre « b » et la lettre « d » (Thompson, 1975). À l'inverse, la présence d'un axe de symétrie vertical au sein de la figure peut être un facilitateur pour

l'étape de reconnaissance, à la fois chez les enfants (Bornstein & Stiles-Davis, 1984) et chez les adultes (Royer, 1981). Spécifiquement en 3D, il est aisément possible d'admettre que certains objets sont par nature plus complexes et sont susceptibles de provoquer des difficultés de perception. D'ailleurs, la présence d'une symétrie est également un élément caractéristique des objets 3D pouvant faciliter la perception (Pizlo *et al.*, 2010). Ainsi, les auteurs soulignent que la perception d'un cube est décrite comme plus simple que la perception d'un polyèdre de forme aléatoire.

La recherche de Wu et Chiang (2013) semble aller dans ce sens puisque les résultats clés, préalablement présentés, ont montré des différences de performance aux tâches proposées selon le type d'objets sur lequel la tâche portait. Ainsi, les auteurs ont par exemple pu observer des différences de résultats entre une représentation proposée en environnement virtuel dynamique et une succession de représentations 2D en ce qui concerne les objets avec surface doublement incurvée, comme les objets sphériques, mais pas pour les objets avec surface cylindrique.

c. La possibilité d'exercer la perception haptique

Si ce chapitre s'est clairement et volontairement focalisé sur la perception visuelle, qui représente une large part de l'expérience sensorielle (Dijkstra *et al.*, 2019), d'autres types de stimuli peuvent venir impacter la perception et la création d'images mentales isolément ou parallèlement aux stimuli visuels. En effet, la perception visuelle n'est pas la seule source d'image mentale comme l'illustre le cas des aveugles qui uniquement en manipulant les objets, peuvent avoir une bonne compréhension de la forme de ces derniers (Papadaki, 2015).

En général, la perception visuelle ne constitue pas une modalité sensorielle isolée. La perception de l'espace et la construction d'une représentation mentale des objets qu'il contient ne passent donc pas, au quotidien, uniquement par une perception visuelle. Au contraire, elle interagit avec les autres modalités sensorielles. Elle comprend notamment une activité perceptive liée à la composante motrice et l'action effective (Meijer & van den Broeck, 2010). Ce sont, par exemple, les relations entre les actions motrices et leurs conséquences sensorielles qui déterminent la nature des perceptions (O'Regan & Noe, 2001). Inversement, les perceptions déterminent également les actions potentielles qui peuvent être menées. De ce fait, il est possible de souligner l'existence d'une interaction entre perception et action étant donné

l'influence mutuelle de l'une et l'autre et ce lien qui les unit est même qualifié de crucial par Hostetter et Alibali (2008).

Plus spécifiquement, il y a un lien étroit et robuste entre la perception et le toucher (Blavier, 2006). Ce sont, d'après Schwartz (2004), les sens qui ont la plus grande implication sur la perception de l'espace. La perception par le toucher est nommée perception haptique. Elle est le plus souvent liée à une exploration manuelle et est particulièrement efficace lorsqu'il s'agit de traiter les caractéristiques matérielles des surfaces et des objets. Elle est composée d'une part du système perceptif cutané, faisant référence aux informations sensorielles issues des mécanorécepteurs et des thermorécepteurs de la peau. D'autre part, elle est composée du système perceptif kinesthésique faisant référence à des informations sensorielles issues des mécanorécepteurs des muscles, des tendons, des articulations... Ces deux sources d'informations se combinent pour que le sujet puisse ressentir les objets, leurs propriétés et l'espace dans lequel ils se situent, mais également pour qu'il puisse les percevoir et penser sur eux (Lederman & Klatzky, 2009). La perception haptique des objets est organisée de manière séquencée et progressive suite à son mode d'exploration et les incompatibilités motrices. En cela, elle fonctionne de manière différente de la perception visuelle qui, elle, peut percevoir de manière quasiment simultanée et sans trop d'efforts les différentes informations relatives aux dimensions des objets (texture, taille, orientation, forme...) (Behrmann & Ewell, 2003 ; Gentaz *et al.*, 2009).

La vue et le toucher sont donc des modalités sensorielles distinctes, qui exploitent des informations de l'environnement différentes et qui fonctionnent selon des procédures d'encodages en partie différentes. Ces deux sens provoqueraient des représentations distinctes mais qui ne seraient pas totalement indépendantes l'une de l'autre. Au regard des résultats de certaines recherches cognitives, le système tactile pourrait être à l'origine de l'activation de mécanismes du système visuel. En effet, lors de l'exploration tactile d'objets 3D, de nombreuses aires du cerveau s'activent, notamment les aires somato-sensorielles mais également les aires du cortex occipital, généralement associées au traitement visuel (James *et al.*, 2002).

Même si la perception visuelle est décrite comme plus importante que la perception haptique pour assurer de bonnes représentations des objets, Gentaz *et al.* (2009) ont montré que l'utilisation de la manipulation constitue un facilitateur à la construction de représentations efficaces des formes. Malgré la présence d'illusions haptiques, les

ambiguïtés présentes dans les projections lorsque la perception est uniquement visuelle ne sont évidemment pas observées pour la perception haptique. De ce fait, la perception haptique peut permettre de rendre moins ambiguë la perception visuelle (Wijntjes *et al.*, 2009). Si la perception visuelle permet d'obtenir une idée globale et immédiate de l'apparence de l'objet, le toucher va permettre d'apporter des informations complémentaires permettant de comprendre les propriétés de la surface de l'objet 3D (Gori *et al.*, 2024).

L'intégration multisensorielle peut permettre de créer une perception de l'environnement 3D à la fois stable et organisée (van der Stoep *et al.*, 2017). Elle peut participer à la reconstruction de la structure tridimensionnelle des objets et donc au développement de connaissances concrètes intégrées qui s'y rapportent (James *et al.*, 2001, 2002), même si une exploration sans manipulation par l'individu permet tout de même de stocker des représentations mentales en mémoire (Meijer & van den Broeck, 2010). Par ailleurs, au-delà d'encourager l'étape de création de l'image mentale, la manipulation par l'individu est également susceptible de favoriser la reconnaissance des formes, comme Pinet et Gentaz (2008) l'ont mis en évidence pour les formes 2D ou encore Harman *et al.* (1999) pour les formes 3D.

Néanmoins, l'exploitation de situations dans laquelle la perception est bisensorielle (perception visuelle et haptique) implique une appréhension qui est séquentielle. De plus, elle occasionne en fin d'exploration un travail mental d'intégration, de coordination et de synthèse permettant d'aboutir à une représentation unifiée et cohérente. Le risque est d'occasionner une surcharge en mémoire de travail (Gentaz *et al.*, 2009). Figueiras et Arcavi (2014) l'ont qualifié de chronophage.

Si les éléments présentés précédemment incitent à mettre en évidence une influence de la perception haptique sur la perception visuelle d'objets 3D présentés au départ de matériel physique, les résultats des recherches antérieures ne semblent pas tous aller dans ce sens. Ainsi, en investiguant la perception chez les enfants de 4 à 6 ans, Krylova et Vodyakha (2022) ont mis en évidence que les informations haptiques, c'est-à-dire le fait d'autoriser à manipuler le matériel physique, n'entraînait pas de différence dans la capacité de perception des objets 3D. Une tendance similaire a par ailleurs pu être observée chez les adultes pour qui l'exploration bimodale des aspects spatiaux donne des résultats similaires à l'exploration unimodale visuelle, mais supérieurs à l'exploration unimodale haptique. En effet, l'exploration haptique

n'apporterait pas d'informations supplémentaires à l'exploration visuelle. Dès lors, les informations visuelles jouent un rôle plus important que les informations haptiques au niveau du traitement des propriétés géométriques et de l'analyse des propriétés spatiales des objets. La perception visuelle apparaît donc plus riche et économique (Gentaz *et al.*, 2009).

En ce qui concerne les représentations virtuelles, qui peuvent également être manipulées, les choses sont différentes. Comme évoqué en première partie (*cf.* 1.1.2.2), l'expérience kinesthésique est différente de celle exercée dans l'espace sensible sur du matériel physique. L'autorisation de manipulation, si elle permet à l'individu de garder un contrôle sur les mouvements effectués par les éléments 3D représentés, n'implique pas une perception haptique des objets étudiés c'est pourquoi il est possible de considérer que la perception des objets en environnements virtuels est majoritairement visuelle. D'ailleurs, l'expérience kinesthésique menée sur les objets virtuels, par exemple au travers des écrans tactiles est similaire pour l'ensemble des objets, ce qui n'est pas le cas dans l'espace sensible. Dans l'environnement virtuel, les informations kinesthésiques peuvent même entrer en conflit avec les informations visuelles (Krylova & Vodyaha, 2020), ce qui est susceptible d'occasionner des difficultés de perception.

Chapitre 3. Les habiletés visuo-spatiales et le cas de la visualisation spatiale

Chapitre 3. Les habiletés visuo-spatiales et le cas de la visualisation spatiale

À travers le chapitre 2, les habiletés visuo-perceptives ont pu être décrites en se focalisant sur le cas particulier de la perception visuelle d'objets 3D qui aide à la formation initiale des images mentales de ces objets. Les images mentales, créées au départ de la perception visuelle, constituent les unités opérationnelles de base de la pensée spatiale (Simons, 1996 ; Widder *et al.*, 2019). Autrement dit, à la suite de ces habiletés perceptives, le sujet va pouvoir effectuer des actions mentales sur les images mentales créées. C'est là qu'interviennent les habiletés visuo-spatiales, qui constituent la deuxième grande catégorie d'habiletés spatiales d'après la typologie de Bishop (1983) présentée en première partie.

En suivant une structure similaire au chapitre précédent, ce chapitre présente cette deuxième grande catégorie d'habiletés spatiales. À l'instar de la structure proposée dans le chapitre précédent au sujet des habiletés visuo-perceptives, les habiletés visuo-spatiales sont d'abord définies. Ensuite, au même titre qu'une attention particulière a été accordée à l'habileté de perception de la 3D dans le chapitre 2, ce troisième chapitre se focalise sur l'habileté de visualisation spatiale qui constitue la deuxième habileté investiguée dans ce manuscrit. Après avoir décrit et caractérisé cette habileté, ce chapitre présente la façon dont elle s'exerce sur des objets physiques de l'espace sensible, mais aussi sur des représentations planes et virtuelles de ces objets. Finalement, après avoir décrit le niveau de maîtrise de l'habileté chez les enfants et les adolescents ainsi que la manière dont elle se développe, les facteurs susceptibles d'impacter sa maîtrise et son développement sont présentés.

3.1. Les habiletés visuo-spatiales : définition et typologies

Les habiletés visuo-spatiales peuvent être définies comme les habiletés de manipulation et la transformation de représentations et d'imageries visuelles (Bishop, 1983). Si le caractère multidimensionnel du raisonnement visuo-spatial fait à ce jour l'unanimité, on constate dans la littérature une variété de typologies, parfois contrastées, au niveau des habiletés visuo-spatiales (Charles, 2023). Linn et Peterson (1985), Uttal *et al.* (2013a) ou encore Vander Heyden *et al.* (2016) ont relevé l'existence de discordes entre les auteurs, qui proposent des typologies plus ou moins éloignées.

Les principales différences sont dues à l'approche dans laquelle les chercheurs se situent, qui peut être une approche psychométrique, une approche d'investigation en neurosciences, ou encore une approche linguistique.

La typologie de Linn et Peterson (1985), puisqu'elle a été construite sur base d'une méta-analyse, fait l'objet d'un certain consensus. De nombreux auteurs, à l'instar de Zhang *et al.* (2014), Voyer et Jansen (2017), Uttal *et al.* (2013b) s'appuient sur cette classification composée de trois habiletés visuo-spatiales : la visualisation spatiale, la rotation mentale et la perception spatiale. Toutefois, l'habileté de perception spatiale, définie à l'origine par Linn et Peterson (1985) comme la capacité à déterminer des relations spatiales en respectant l'orientation de notre propre corps et en dépit d'informations distrayantes, ne fait pas consensus. Lowrie *et al.* (2018) privilégient d'intégrer, en plus de l'habileté de visualisation spatiale et de rotation mentale, l'habileté d'orientation spatiale, en référence à Kozhevnikov *et al.* (1999). Ces auteurs l'associent à la capacité à imaginer l'apparence d'un assemblage de stimuli (par exemple un objet 3D ou une disposition de plusieurs objets 3D positionnés les uns par rapport aux autres) lorsqu'il est observé d'un autre point de vue, d'une autre perspective. La terminologie « prise de perspectives spatiales » est également utilisée (Vander Heyden *et al.*, 2017). D'après Lowrie *et al.* (2018), la classification intégrant visualisation spatiale, rotation mentale et orientation spatiale est bien établie dans la littérature.

Une autre habileté souvent citée dans les typologies utilisées concerne l'habileté de relation spatiale, même si le sens attribué à cette dernière ne fait pas consensus (Di & Zheng, 2022). Martín-Dorta *et al.*, (2011), en la définissant comme l'habileté à imaginer des rotations d'objets 2D et 3D comme un corps entier, permettent de l'associer à l'habileté de rotation mentale. David et Clinciu (2009), en la définissant comme la capacité à déterminer les relations spatiales entre objets, et ce en tenant compte de l'orientation de notre propre corps, la rapprocheraient quant à eux de l'habileté de perception spatiale au sens de Linn et Peterson (1985).

Frick et Newcombe (2012) ajoutent à la liste des différentes habiletés l'habileté de mise à l'échelle spatiale, qui a pu être définie au chapitre 1 (*cf.* 1.3.2.4c). De plus, les habiletés visuo-spatiales jusqu'alors évoquées font écho à des capacités ne nécessitant pas une navigation physique dans l'espace figural ou panoramique puisqu'étant uniquement basées sur des informations visuellement présentées, qualifiées de « à petite échelle » par Hegarty *et al.* (2006). D'autres habiletés spatiales, à plus grande

échelle, existent cependant. C'est le cas de l'habileté de navigation spatiale faisant écho à la capacité à se déplacer et se localiser dans un espace, à localiser un point par rapport à sa propre position, à des points entre eux ou encore à estimer des distances.

Au vu de la complexité d'aboutir à un répertoire clair et unanime des différentes habiletés visuo-spatiales, McGee (1979) mais aussi Hegarty et Waller (2004) proposent un regroupement, plus général, des facteurs organisés en deux catégories : les habiletés de transformation d'objet et les habiletés de transformation de vue. Cette classification en deux groupes d'habiletés est validée par des analyses factorielles (Vander Heyden *et al.*, 2016).

Une autre solution d'organisation des habiletés spatiales semble également avoir gagné une approbation et une popularité significative. Il s'agit de la typologie spatiale *top-down* de Uttal *et al.* (2013a) reprise par plusieurs auteurs, notamment Newcombe et Shipley (2015) ou encore Hodgkiss *et al.* (2021). Cette typologie propose quatre catégories établies à partir de deux critères croisés. Le premier critère concerne le caractère des informations spatiales, qui peut être intrinsèque ou extrinsèque. Les informations spatiales sont considérées comme intrinsèques lorsqu'elles sont spécifiques à des parties de l'objet ou à des relations entre les parties qui définissent l'objet particulier, tandis que les informations extrinsèques se rapportent à la relation entre les objets inclus dans un groupe, les uns par rapport aux autres ou par rapport au champ entier. Le deuxième critère concerne le caractère statique ou dynamique des tâches données. Les tâches sont considérées comme dynamiques lorsqu'elles portent sur des objets qu'il faut mentalement faire bouger ou changer alors qu'elles sont considérées comme statiques quand ce n'est pas le cas. Dès lors, les quatre catégories créées sont les suivantes : les habiletés intrinsèques et statiques, les habiletés intrinsèques et dynamiques, les habiletés extrinsèques et statiques et les habiletés extrinsèques et dynamiques. À titre d'exemple, l'habileté d'orientation spatiale, préalablement définie, entre alors dans la catégorie des habiletés visuo-spatiales extrinsèques dynamiques. L'approbation associée à cette typologie s'explique selon Gilligan *et al.* (2017) par l'existence de preuves neurologiques, comportementales et linguistiques convaincantes qui vont dans son sens (Chatterjee, 2008).

3.2. Le cas de la visualisation spatiale

Comme cela vient d'être illustré en décrivant les différentes typologies d'habiletés visuo-spatiales, il n'existe pas une unique définition de ce qu'est et de ce qu'englobe l'habileté de visualisation spatiale (Bates *et al.*, 2021 ; Pitta-Pantazi & Christou, 2010 ; Sorby, 1999). Par ailleurs, d'après Lowrie *et al.* (2018), en comparaison à d'autres habiletés spatiales, la visualisation spatiale est moins bien définie par des cadres théoriques et ce sont le plus souvent les tests utilisés pour la mesurer qui la définissent (Hegarty & Waller, 2004).

Malgré cela, la visualisation spatiale est principalement définie comme une habileté à se représenter les informations spatiales non verbales, à analyser les relations entre les objets d'une configuration et à effectuer des opérations mentales sur ces objets (Eme, 2003 ; Loranger *et al.*, 2000 ; Marchand, 2006). Plusieurs auteurs, à l'instar de Nagy-Kondor (2014), Hegarty et Waller (2004) ou encore Barisnikov et Pizzo (2013), confirment cette définition et viennent la compléter en précisant qu'il s'agit aussi de pouvoir anticiper l'apparence d'objets complexes. L'habileté de visualisation spatiale implique de manipuler ou transformer des images mentales, c'est-à-dire de représentations mentales d'objets, au départ d'une perspective fixe ou changeante sur les objets, de sorte que l'on puisse raisonner sur les objets et sur les actions menées sur les objets, à la fois lorsque les objets sont et ne sont pas visibles (Battista *et al.*, 2018). De manière générale, il est donc possible de l'associer, à l'instar de Barisnikov et Pizzo (2013), à l'habileté à imaginer et transformer mentalement, c'est-à-dire effectuer des opérations mentales, sur des objets, qu'ils soient en deux ou en trois dimensions.

Plusieurs éléments de précision sont apportés quant à ces éléments définitoires.

D'abord, Tartre (1990) et Clements (2004) précisent que les modifications ou manipulations mentales en jeu dans la visualisation spatiale peuvent porter sur les objets dans leur entièreté ou sur une partie de ces derniers.

David et Cliniciu (2009) ajoutent que les opérations mentales effectuées sur les informations spatiales peuvent être multiples et complexes. La visualisation spatiale englobe des processus mentaux et des opérations mentales plus complexes que les autres habiletés, souvent en plusieurs étapes (Hegarty & Waller, 2004 ; Tversky, 2011). Gorska et Sorby (2008) évoquent qu'il peut par exemple s'agir de faire faire une rotation aux stimuli visuels présentés, de les tordre ou de les inverser picturalement. Pour autant, on ne retrouve pas de consensus sur ce qui est considéré comme opérations

mentales. C'est cette absence de consensus qui explique que l'habileté de rotation mentale est considérée par certains comme un cas particulier de la visualisation spatiale. En effet, pour plusieurs auteurs, les transformations ou manipulations mises en œuvre dans l'habileté de visualisation spatiale n'impliquent pas forcément de transformations en tant que tel de l'objet sur lequel s'exerce l'habileté. Ces auteurs, à l'instar de Tartre (1990), de Battista *et al.* (2018) ou Bates *et al.* (2021) incluent la rotation mentale dans la visualisation spatiale, puisque ce n'est pas l'objet en lui-même qui est transformé mais sa position. *A contrario*, d'autres auteurs, à l'instar de Sorby (1999), considèrent que les manipulations doivent entraîner une transformation des objets eux-mêmes au-delà de leur position pour pouvoir parler de visualisation spatiale. Ils font ainsi le choix de dissocier rotation mentale et visualisation spatiale.

Quel que soit le paradigme choisi, il s'agirait, d'après la classification d'Hegarty et Waller (2004), de considérer l'habileté de visualisation spatiale comme une habileté de transformation d'objets, par opposition à l'habileté d'orientation spatiale qui serait une habileté de transformation de point de vue. De plus, selon la typologie *top-down* d'Uttal *et al.* (2013a), l'habileté de visualisation spatiale peut être considérée comme une habileté intrinsèque, puisqu'elle porte sur un objet particulier ou une partie de cet objet. Elle est aussi dynamique lorsqu'il est question de mettre en œuvre une transformation de l'objet, quelle qu'elle soit.

Les tâches impliquant la transformation spatiale de représentations mentales sont des tâches pouvant servir à évaluer l'habileté de visualisation spatiale (Hawes & Ansari, 2020). Dans des contextes expérimentaux ou au sein d'épreuves psychométriques, une diversité de tests, et donc de tâches, sont utilisés pour évaluer l'habileté (Pitta-Pantazi & Christou, 2009). Certaines tâches peuvent porter sur des objets 2D tandis que d'autres portent sur des objets 3D. En prenant appui sur le contenu de différentes épreuves psychométriques ou de tests créés dans des contextes expérimentaux, une liste non exhaustive de différentes tâches utilisées pour évaluer l'habileté de visualisation spatiale, illustrées en Figure 20 avec des exemples issus d'épreuves de type papier-crayon, peut être identifiée :

- Tâche mentale de pliages de papier (ex. Paper Folding test: Ekstrom *et al.*, 1976 ; Mental Folding Test for Children: Harris *et al.*, 2013; Spatial Reasoning Instrument: Ramful *et al.*, 2017 ; Hawes *et al.*, 2017),
- Identification d'empreinte et de coupe (ou sections) d'objets 3D (ex. Mental cutting test: CEEB,1939 ; Mental cutting test "Schnitte": Fay & Quaiser-Pohl, 1999 ; Santa

Barbara Solids Test: Cohen & Hegarty, 2012 ; Spatial Reasoning Instrument: Ramful *et al.*, 2017),

- Passage d'un objet à son développement ou inversement (ex. Mental Paper Folding task: Shepard & Feng, 1972 ; Surface Development test: Ekstrom *et al.*, 1976 ; Subtest des relations spatiales du Differential Aptitude Test: Bennett *et al.*, 1973 ; Spatial Reasoning Instrument: Ramful *et al.*, 2017 ; Wai *et al.*, 2009),
- Puzzle – décomposition et recombinaison de formes (ex. Form Board test: Ekstrom *et al.*, 1976 ; Children's Mental Transformation Task: Levine *et al.*, 1999 ; Subtest « puzzles visuels » de la WISC-V: Gregoire, 2021 ; Spatial Reasoning Instrument: Ramful *et al.*, 2017 ; Hawes *et al.*, 2017)
- Identification de symétries (ex. Spatial Reasoning Instrument: Ramful *et al.*, 2017)
- Compréhension de visualisations mécaniques (ex. Hawes & Ansari, 2020 ; Wai *et al.*, 2009)

3.2.1. La visualisation spatiale sur les objets 3D dans l'espace sensible et au départ de représentations externes

De manière générale, si les recherches sur le développement des habiletés visuo-spatiales chez les adultes ont été nombreuses, et notamment chez les étudiants dans les domaines des STEM, celles s'intéressant aux enfants et aux adolescents le sont moins (Rodán *et al.*, 2016). Néanmoins, elles ont fait l'objet d'une attention croissante ces dernières années, probablement à la suite de la prise de conscience de leur importance. On observe par ailleurs que le cas spécifique de l'habileté de rotation mentale fait l'objet d'une attention particulièrement importante (Rodán *et al.*, 2016, 2019), en comparaison à d'autres tâches de visualisation spatiale, par exemple les tâches de coupe et d'empreinte, qui font l'objet d'une attention particulière dans cette recherche. Les tâches de coupe d'objets 3D, qui permettent d'évaluer la pensée spatiale pénétrante d'après Pathak *et al.* (2020), ont fait l'objet de peu d'investigations auprès des enfants, comme le soulignent Gori *et al.* (2024).

Lorsque l'habileté est investiguée sur des objets 2D, comme c'est le cas pour les tâches de puzzle, des supports de type papier-crayon semblent naturellement utilisés, bien que leur numérisation soit aussi possible et n'engendra pas réellement de modification des stimuli proposés. Lorsque l'habileté est investiguée sur des objets 3D, différents supports peuvent être utilisés pour évaluer l'habileté, pouvant ainsi permettre de proposer des stimuli différents pour présenter ces objets (matériel 3D, représentations planes, représentations virtuelles).

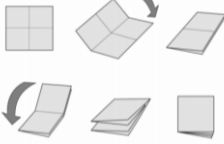

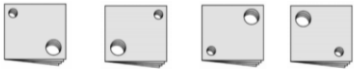
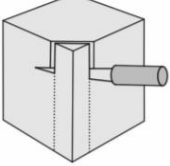
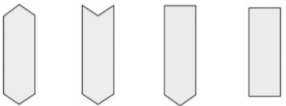
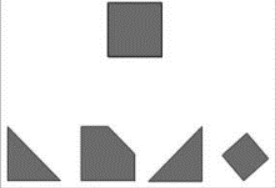



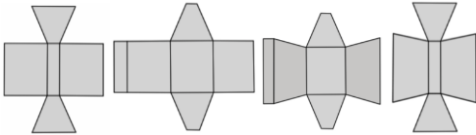
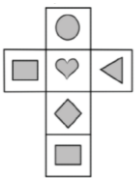
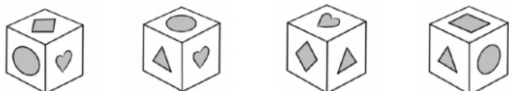

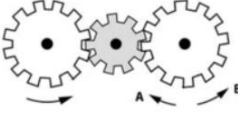
<p>Tâche mentale de pliages de papier (issue de Ramful <i>et al.</i>, 2017)</p>	<p>Tâche d'identification de coupe d'objets 3D (issue de Ramful <i>et al.</i>, 2017)</p>
<p>Voici ci-dessous le pliage d'une feuille de papier en quatre.</p>  <p>On perce deux trous, un petit et un gros sur la feuille pliée. En dépliant la feuille, il obtient le motif ci-dessous.</p>  <p>Où les trous ont-ils été percés dans la feuille pliée ?</p> 	<p>Un cube de pâte à modeler est tranché le long d'un de ses bords, comme ci-dessous.</p>  <p>Quelle illustration ci-dessous représente la forme du bord du cube une fois la coupe terminée ?</p> 
<p>Tâche de puzzle – décomposition (traduite de Hawes <i>et al.</i>, 2017) ou recombposition (issue de Levine <i>et al.</i> 1999)</p>	
<p>Montre les deux ou trois formes que tu peux mettre ensemble pour refaire la forme ci-dessous</p> 	<p>Regarde les deux pièces ci-dessous.</p>  <p>Si tu assembles les pièces ensemble, elles peuvent former l'une des formes ci-dessous, laquelle ?</p> 
<p>Tâche de passage d'un objet 3D à son développement ou inversement (issue de Ramful <i>et al.</i>, 2017)</p>	
<p>Le diagramme ci-dessous montre une boîte de chocolat fermée.</p>  <p>Laquelle des illustrations ci-dessous représenterait le mieux ce que l'on obtiendrait si l'on déplaît la boîte ?</p> 	<p>Voici l'illustration d'un cube déplié.</p>  <p>Laquelle des illustrations ci-dessous montre ce que l'on obtiendrait en repliant le cube ?</p> 
<p>Tâche d'identification de symétries (issue de Ramful <i>et al.</i>, 2017)</p>	<p>Tâche de compréhension de visualisations mécaniques (traduite de Hawes & Ansari, 2020)</p>
<p>Regarde bien le panneau ci-dessous.</p>  <p>Combien de ligne de symétrie vois-tu sur cette image ?</p>	<p>Si l'engrenage de gauche tourne dans la direction indiquée par la flèche, dans quelle direction tournera l'engrenage de droite ?</p> 

Figure 20 : Exemples de tâches impliquant l'habileté de visualisation spatiale

3.2.1.1. La visualisation spatiale dans l'espace sensible

Plusieurs auteurs revendiquent l'utilisation de matériel physique pour évaluer des habiletés visuo-spatiales portant sur des objets 3D. C'est le cas par exemple de Ratliff *et al.* (2010), de Hawes *et al.* (2015a) qui considèrent que ce type de support est plus adapté, notamment lorsqu'on cherche à évaluer des enfants.

Piaget et Inhelder (1948), lorsqu'ils ont étudié les rapports qu'entretient l'enfant avec l'espace projectif et euclidien, ont proposé à des enfants âgés de 4 à 12 ans de résoudre plusieurs exercices de coupe sur divers solides usuels (cylindre, sphère...) et complexes (anneaux, spirales...) en pâte à modeler. Il était alors demandé aux enfants d'observer la coupe montrée par l'expérimentateur à l'aide d'un couteau placé contre le solide et de dessiner la forme de la coupe avant que le couteau n'entame la coupe. Il s'agissait alors d'imaginer projectivement l'intérieur de l'objet sectionné selon un plan représenté par le couteau.

En plus de Piaget et Inhelder (1948), certains auteurs, à l'instar de Ratliff *et al.* (2010), Duroisin (2015) ou Bakó (2003) ont utilisé des tâches de coupe et/ou d'empreinte de solides, présentées à partir de matériel physique appartenant donc à l'espace sensible, pour évaluer l'habileté de visualisation spatiale auprès d'enfants ou d'adolescents. Duroisin (2015) a proposé des tâches d'identification de formes d'empreinte et de coupe dans lesquelles des enfants et des adolescents âgés de 8 à 14 ans étaient amenés à observer différents objets 3D simples (sphère, cylindre...) sans pouvoir les manipuler. Dans les exercices d'empreinte, l'expérimentateur présentait aux enfants et aux adolescents l'objet 3D et les participants étaient amenés à dessiner sur papier la forme de l'empreinte de cet objet. Dans les exercices de coupe, les mêmes objets 3D s'appêtant à être découpés par un couteau étaient présentés aux participants, qui devaient alors imaginer et dessiner, sur papier, la forme de la surface qui serait créée par la coupe présentée. De leur côté, Ratliff *et al.* (2010) ont proposé à des enfants âgés de 5 à 9 ans de résoudre plusieurs exercices de coupe au départ de matériel physique à observer. Ceux-ci se sont focalisés aussi sur des solides simples, mais cette fois déjà coupés par un plan représenté par une feuille de papier placée entre les deux parties du solide à l'endroit de la coupe (Figure 21). Cette fois, les participants ne devaient pas dessiner la forme de chaque coupe mais devaient sélectionner la forme correcte parmi quatre propositions. Gori *et al.* (2021) ont de leur côté mené le même type d'exercice avec du matériel similaire à observer également auprès d'enfants âgés de 3 à 10 ans.

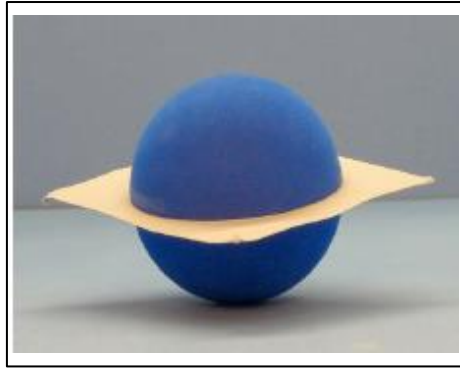


Figure 21 : Illustration du matériel physique utilisé lors de l'évaluation de la visualisation spatiale par Ratliff et al. (2010)

Dans l'expérimentation de Bakó (2003), des adolescents âgés de 14 et 15 ans disposaient d'un cube en plexiglas qu'ils pouvaient manipuler et devaient imaginer l'ensemble des formes qui pourraient être obtenues si des coupes étaient réalisées sur le cube.

De même, pour le cas de la rotation mentale, plusieurs épreuves utilisant du matériel physique pour évaluer l'habileté de rotation mentale ont pu être identifiées (Felix *et al.*, 2010 ; McWilliams *et al.*, 1997 ; Rahe & Quaiser-Pohl, 2023 ; Robert & Chevrier, 2003). Toutefois, celles-ci sont quasi-systématiquement destinées à des adultes. En ce qui concerne les enfants, Hawes *et al.* (2015a) ont constaté un progrès au niveau du développement des outils de mesure de la rotation mentale d'objets 2D. En revanche, les auteurs mentionnent qu'il n'en est pas de même en 3D. Pour contrer ce constat, les auteurs ont développé l'épreuve de la 3D-MRBT, qu'ils ont eu l'occasion de valider auprès d'enfants âgés de 4 à 8 ans et qui portait sur des rotations d'assemblages de cubes en bois.

3.2.1.2. La visualisation spatiale au départ de représentations 2D

De nombreux outils d'évaluation de type papier-crayon proposent comme susmentionné, d'évaluer l'habileté de visualisation au départ de représentations 2D en perspective d'objets 3D. Les tâches de coupe d'objets 3D, mais aussi de passage d'un objet 3D à son développement, proposées en Figure 20, en sont des exemples. Certaines de ces épreuves sont des tests assez anciens, datant d'une cinquantaine d'années, mais sont encore aujourd'hui des références. Ils se focalisent sur un type de tâche en proposant un certain nombre d'items similaires, en faisant varier certains paramètres pour identifier leur impact et proposer une progression de difficulté.

Une importante limite peut être mise en évidence à l'évaluation de la visualisation spatiale via ce type de support. Celle-ci se rapporte au prérequis relatif à la perception de la 3D. Puisque l'habileté de perception est préalable à l'habileté de visualisation (Simons, 1996), il apparaît évident que la manipulation mentale exercée portera sur l'objet 3D tel que perçu. Dès lors, un déficit de perception pourrait occasionner des difficultés dans la réussite de tâche de visualisation spatiale. Par exemple, pour une tâche de passage d'un objet 3D à son développement, il apparaît évident que le développement imaginé par l'individu se rapportera à l'objet tel que perçu par ce dernier. Si l'objet est mal perçu, cela aboutira à un développement autre que celui attendu. Or, la perception de représentations 2D d'objets 3D peut poser des difficultés notamment aux enfants, comme cela a déjà pu être souligné (cf. 2.2.1.2). Les représentations 2D auxquelles sont confrontés les individus dans les tâches proposées sont donc susceptibles d'impacter les capacités à faire preuve de visualisation spatiale puisque, ces représentations peuvent impacter la perception. Si le phénomène de rigidité géométrique (Larios, 2006) permet de relever des difficultés à s'imaginer mentalement les objets 3D lorsqu'ils sont représentés dans des positions non standard, il souligne aussi des difficultés à les manipuler mentalement dans ces cas de figure.

Tsutsumi *et al.* (2008) évoquent d'ailleurs que des difficultés observées chez les adultes dans la résolution d'exercices de coupe du Mental Cutting Test (MCT), épreuve impliquant des représentations 2D d'objets 3D complexes, sont associées à des difficultés à s'imaginer la forme de l'objet 3D représenté. Ce lien entre capacités de perception et de visualisation spatiale est également mis en évidence par Orion *et al.* (1997), qui se sont intéressés à la capacité d'étudiants du supérieur à imaginer l'apparence de coupes de structures en couches, telles qu'on en retrouve en géologie, représentées en 2D (dessin d'un cube en perspective composé de différentes couches). Les auteurs ont mis en évidence que les capacités à résoudre les exercices de section sont influencées par les capacités à percevoir la configuration spatiale des couches qui composent la structure.

Ratliff et ses collègues (2010) se sont intéressés aux supports d'évaluation utilisés lors de tâches de coupe de solides. En comparant les résultats d'enfants aux exercices de coupe sur du matériel physique avec des résultats aux mêmes exercices mais proposés au départ de représentations 2D (photo du matériel physique), les auteurs ont montré des résultats en défaveur des représentations 2D chez les enfants âgés de

5 à 7 ans. *A contrario*, Gori *et al.* (2024), qui ont comparé les performances d'enfants de 3 à 10 ans au départ de matériel physique et de représentations 2D ont observé des résultats similaires entre les deux supports aux différents âges investigués. Les auteurs soulignent cependant que les taux de performance aux exercices de coupe sont globalement faibles dans les deux modalités et que des différences pourraient émerger chez des enfants plus âgés, au moment où les capacités de résolution de tâches de coupe se développent davantage.

Des différences de performance selon la dimension ont par ailleurs été observées par Neubauer *et al.* (2010) qui se sont quant à eux intéressés à l'évaluation de l'habileté de rotation mentale. En comparant, au sein d'une même expérimentation, un groupe devant résoudre des tâches de rotation mentale sur des objets 3D et un autre groupe sur des représentations 2D de ces mêmes objets 3D, les auteurs ont montré un effet de la dimensionnalité des supports en faveur des objets 3D, que ce soit sur le temps de réaction ou sur les performances. Ce résultat est également confirmé par Felix *et al.* (2010) qui relèvent que l'utilisation de matériel physique lors de l'évaluation de la rotation mentale améliore les performances.

De telles observations invitent donc à rester prudent quant à l'évaluation d'habiletés spatiales portant sur des objets 3D au départ de représentations 2D. Elles constituent un argument permettant de revendiquer l'évaluation avec du matériel physique (Hawes *et al.*, 2015a ; Rahe & Quaiser-Pohl, 2023) ou au moins permettant de l'envisager comme une alternative potentielle aux épreuves traditionnelles (Cohen & Hegarty, 2012). Si des tests de type papier-crayon ont pu montrer qu'ils permettaient d'obtenir une mesure efficace de la visualisation spatiale chez les adultes, ceux-ci sont sans doute trop avancés pour l'évaluation de l'habileté chez les enfants (Ratliff *et al.*, 2010).

Parsey et Schmitter-Edgecombe (2013) identifient que de nombreuses épreuves évaluant les habiletés visuo-spatiales, initialement prévues sous format papier-crayon, ont été numérisées. Déjà, en 2004, Parsons et ses collègues soulignaient que le potentiel des technologies pour l'évaluation des processus cognitifs humains était reconnu, précisant notamment que la réalité virtuelle générée par ordinateur pouvait aider dans la récolte d'informations plus fiables, valides et précises. L'intérêt de cette numérisation est de profiter des divers avantages qu'elle offre : l'amélioration de l'implication et de l'engagement des individus, la facilité ainsi qu'un gain de cohérence dans l'administration et la cotation, la précision dans l'administration des stimuli (Bauer

et al., 2012 ; Cerrato & Ponticorvo, 2017). Néanmoins, lorsqu'elles proposent des représentations d'objets 3D, la plupart de ces évaluations numérisées conservent des représentations 2D, comme sur les épreuves papier-crayon, et ce en dépit des limites qui sont associées à de telles représentations.

3.2.1.3. La visualisation spatiale au départ des représentations 2 ½ D

Les épreuves numérisées ne semblent majoritairement pas profiter de la numérisation pour proposer des alternatives aux représentations 2D, par exemple en intégrant des représentations 2 ½ D. Pourtant, ce type de représentation, avec l'utilisation par exemple d'un environnement virtuel dans lequel des rotations des objets 3D peuvent être observées, pourrait constituer une alternative potentielle pour pallier les difficultés associées aux représentations planes (Cohen & Hegarty, 2012). Cela permettrait de proposer aux participants des stimuli 3D plus réalistes (Sanandaji *et al.*, 2017 ; Barlett *et al.*, 2024) et d'augmenter la motivation des participants (Barlett *et al.*, 2024).

Les environnements 2 ½ D ont été envisagés comme des outils pour entraîner les habiletés visuo-spatiales (Kwon, 2003 ; Sümen, 2018) ou pour évaluer d'autres habiletés que la visualisation spatiale. Déjà depuis une vingtaine d'années, l'évaluation de l'habileté de navigation spatiale en environnement virtuel a fait l'objet d'une attention particulièrement importante (Cogné *et al.*, 2015 ; Diersch & Wolbers, 2019 ; Duroisin, 2015 ; Jansen-Osmann & Fuch, 2006 ; Wallet *et al.*, 2013), probablement pour pouvoir étudier cette habileté dans d'autres conditions que dans l'espace sensible compte tenu des difficultés que cela pourrait occasionner (sécurité, temps, déplacement).

Toutefois, concernant la visualisation spatiale, peu d'expérimentations semblent évaluer l'habileté en environnement virtuel chez les enfants et adolescents. Bakó (2003), en plus d'évaluer cette habileté auprès d'adolescents au départ de matériel physique, a également comparé les résultats avec ceux d'adolescents confrontés à la même tâche d'identification de coupe du cube, mais au départ d'une représentation virtuelle du cube. Certains adolescents étaient confrontés à une représentation 2 ½ D du cube en projection orthographique tandis que d'autres étaient confrontés à une représentation 2 ½ D en perspective linéaire. Les résultats ont montré que les adolescents confrontés à des représentations virtuelles ont identifié davantage de

formes de coupe du cube possibles que ceux confrontés à du matériel physique. Néanmoins, ils n'arrivent la plupart du temps pas à expliquer comment ils ont pu obtenir cette coupe alors que ceux confrontés à du matériel physique y arrivent systématiquement. De plus, des formes de section inexistantes ont aussi été identifiées par les adolescents confrontés à des représentations 2 ½ D mais pas par ceux confrontés à du matériel physique (3D). Des différences sont donc observées entre les résultats obtenus dans l'espace sensible et en environnement virtuel. Cependant, très peu de différences sont observées entre les deux perspectives dans lesquelles l'environnement virtuel, et donc les objets qu'il contient, était proposé.

En parallèle à cette étude ayant évalué la visualisation spatiale en environnement virtuel auprès d'adolescents, quelques études ont également investigué cela chez des adultes. Tsutsumi *et al.* (2008), suite à la mise en évidence des difficultés à percevoir les objets 3D présentés dans les exercices du MCT ont par exemple proposé une adaptation du test (RV-MCT) permettant aux participants d'observer des rotations de l'objet 3D dans le plan horizontal uniquement. La comparaison des performances des individus au test papier-crayon traditionnel et au test adapté permet aux auteurs d'identifier des performances significativement plus élevées au test proposant d'observer une représentation dynamique de l'objet 3D. Sanandaji *et al.* (2017) ont de leur côté proposé d'évaluer les capacités de visualisation spatiale d'adultes au travers de tâches de coupe de solides proposées au sein d'environnements virtuels. Les auteurs ont pour cela adapté l'épreuve du *Santa Barbara Solids Test* (SBST) proposée par Cohen et Hegarty (2012) en remplaçant les stimuli de départ, à savoir des représentations 2D, par des vidéos de solides en rotation à observer (Figure 22). En comparant les résultats obtenus à l'épreuve d'origine avec ceux obtenus à l'épreuve adaptée, les auteurs ont mis en évidence que les performances sont meilleures quand les individus peuvent voir les stimuli en rotation plutôt qu'au départ d'une simple représentation plane.

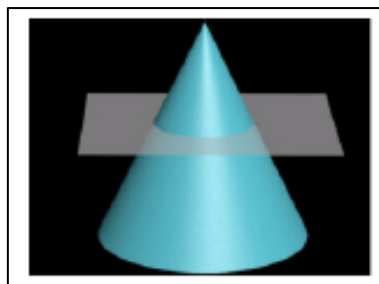


Figure 22 : Illustration du matériel virtuel utilisé par Sanandaji *et al.* (2017) pour évaluer la visualisation spatiale

Dans la même idée, Keehner *et al.* (2004) ont évalué la capacité à dessiner la forme d'une coupe au départ de solides représentés virtuellement. Les auteurs ont proposé de comparer les performances d'étudiants de l'enseignement supérieur lorsque ceux-ci ont le contrôle des manipulations effectuées sur l'objet virtuel représenté et lorsque ceux-ci ne sont pas autorisés à manipuler l'objet virtuel. Les résultats obtenus ont montré qu'avoir le contrôle des manipulations ne profite pas aux performances. Les auteurs observent que les performances des individus qualifiés de « fort spatialement », c'est-à-dire ayant de fortes capacités de rotation mentale et d'orientation spatiale (transformation de point de vue), sont plus élevées que celles des individus dit « spatialement faibles ». Ce constat est observé à la fois pour ceux ayant le contrôle des manipulations et pour ceux qui ne l'ont pas. Le niveau spatial est un prédicteur plus fort dans le groupe n'étant pas autorisé à manipuler le matériel. Autrement dit, le contrôle de la manipulation par l'individu aide davantage ceux qui sont faibles spatialement, même si cela ne permet pas de rattraper ceux ayant de meilleures performances spatiales. Si dans le chapitre précédent, l'impact potentiel de l'habileté de rotation mentale sur la perception des solides présentés virtuellement a pu être évoqué, cette habileté pourrait donc s'avérer aussi nécessaire pour la capacité à résoudre des tâches de coupe lorsque les solides sont présentés dans cet environnement, particulièrement lorsque l'individu ne manipule pas lui-même les solides virtuels. Sans entrer dans une approche comparative, Hartman *et al.* (2006) et plus récemment Guzsvinecz *et al.* (2022) ont adapté un test proposant des tâches de coupe, initialement prévu sous-format papier-crayon, en le proposant au travers d'un système de réalité virtuelle immersive.

De telles adaptations virtuelles d'épreuves sont également observées pour l'évaluation de l'habileté de rotation mentale, ce que propose par exemple Guzsvinecz *et al.* (2022) ou Barlett *et al.* (2024). Parsons *et al.* (2004) ont aussi évalué la rotation mentale auprès d'adultes au départ d'objets 3D représentés en 2 ½ D en réalité virtuelle immersive et en version papier-crayon. Les auteurs, qui se sont focalisés sur les écarts de performance entre hommes et femmes relèvent des différences entre les performances réalisées dans les deux types d'environnement, avec un effet du genre constaté dans le test proposé au départ de représentations 2D mais pas dans celui proposé en environnement virtuel. Cette différence pourrait, d'après les auteurs, être expliquée par le fait que les tâches soient approchées de différentes manières, par le

fait que la charge cognitive exigée est différente, mais aussi par la différence de complexité des stimuli.

Au-delà des observations mises en évidence par Bakó (2003), Parsons *et al.* (2004) ou encore Sanandaji *et al.* (2017), des arguments incitent à penser que l'habileté de visualisation pourrait poser davantage de difficultés aux enfants et aux adolescents si elle était évaluée au départ de représentations 2 ½ D plutôt que de matériel physique, même si elle pourrait être plus adaptée que les représentations 2D. Comme pour les représentations 2D, un déficit potentiel au niveau de l'habileté de perception visuelle des objets 3D, pour lequel on ne sait pour rappel pas grand-chose à ce stade, pourrait biaiser les résultats à l'évaluation de visualisation spatiale. La surcharge cognitive occasionnée par les informations dynamiques (Ayres & Paas, 2009 ; Höffler, 2010), suggérée également par Parsons *et al.* (2004) pourrait, comme pour l'habileté de perception visuelle, rendre plus complexe la mise en œuvre de l'habileté de visualisation spatiale. Cela est d'autant plus vrai que les tâches de visualisation nécessitent, déjà de base, des capacités en mémoire de travail visuo-spatiale (Hawes & Ansari, 2020 ; Mammarella *et al.*, 2013) afin de pouvoir manipuler mentalement l'élément présenté. En outre, lorsqu'elle est en mouvement, la figure est présentée dans des positions qui ne sont pas standard et cela pourrait occasionner des difficultés à manipuler mentalement les objets 3D présentés virtuellement (Larios, 2006).

Au vu cependant du nombre limité d'expérimentations comparant les performances d'enfants et d'adolescents de différents âges, confrontés aux différents supports à des tâches de visualisation telles que les tâches d'identification de formes de coupe, il est, à ce stade, difficile de considérer que ceux-ci pourraient arriver à faire preuve de visualisation spatiale dans un environnement virtuel comme ils le feraient sur du matériel physique. Cette considération apparaît en adéquation avec l'hypothèse de Rose et Foreman (1999) selon laquelle ce sont peut-être l'ensemble des processus cognitifs, au-delà des capacités perceptives, qui pourraient varier entre environnement virtuel et espace sensible. Cette hypothèse s'inscrit d'ailleurs en cohérence avec les propos de Taube *et al.* (2013, cités par Diersch & Wolbers, 2019) au sujet de l'habileté de navigation spatiale, qui considèrent cette dernière n'est pas la même en environnement virtuel et dans l'espace sensible.

3.2.2. Maîtrise et développement de la visualisation spatiale sur les objets 3D chez l'enfant et l'adolescent

Des résultats contrastés sont observés dans la littérature au niveau des capacités des enfants et adolescents à résoudre des tâches de coupe (Gori *et al.*, 2024).

Les expérimentations menées par Piaget et Inhelder (1948) ont mis en évidence que les jeunes enfants ne parviennent pas, d'eux-mêmes, à imaginer les résultats d'actions intériorisées avant de les avoir vu exécutées, même lorsqu'il s'agit d'actions simples. Certains en restent à la forme globale du solide tandis que d'autres considèrent qu'il n'est pas possible d'imaginer la forme de la coupe par anticipation. Progressivement, les enfants arrivent à différencier la forme d'ensemble du volume de la forme de la coupe. Ce n'est qu'à partir de l'âge de 8 ans environ que les enfants sont en mesure de comprendre et de réussir d'eux-mêmes des tâches de coupe d'objets 3D, même si la maîtrise des coupes géométriques devrait, d'après les auteurs, être acquise à l'âge de 12 ans chez une majorité d'enfants.

Plus récemment, Duroisin (2015) a pu confirmer qu'à l'âge de 8 ans, les enfants arrivent à faire preuve de visualisation spatiale en réussissant certains exercices de coupe et d'empreinte de solides. L'auteur montre que l'habileté n'est pas spontanée à cet âge-là et peut poser de fortes difficultés à certains enfants, notamment lorsqu'est requis un certain niveau d'abstraction. Parmi les enfants âgés de 8 ans, plus d'un enfant sur deux ne parvient pas à réaliser les exercices de visualisation spatiale tels que l'identification des formes de coupe d'objets 3D simples. Des difficultés surviennent ultérieurement puisqu'elles sont observées chez environ trois adolescents sur dix à l'âge de 14 ans (Duroisin, 2015) et même à l'âge adulte (Cohen & Hegarty, 2012). De son côté, Boe (2021, cité par Gori *et al.*, 2024) souligne qu'une efficacité à résoudre des tâches de coupe n'est pas atteinte avant l'âge de 15 ans et des observations proches sont observées par Davis (1973). De tels résultats s'inscrivent donc en cohérence avec les propos de Barisnikov et Pizzo (2013) qui relèvent qu'un grand nombre de difficultés est associé à la mise en œuvre de compétences visuo-spatiales et ces difficultés sont souvent sous-estimées chez les enfants et adolescents.

Néanmoins, Ratliff et ses collègues (2010) montrent dans leur étude que les enfants sont tout de même capables de réussir certaines tâches de coupe de solides avant l'âge de 8 ans quand celles-ci sont données dans certaines conditions (tâches de reconnaissance, solides simples...). Ils identifient que certains enfants sont capables de

retrouver parmi des propositions (tâche de reconnaissance) la forme de certaines coupes présentées à l'âge de 3 ans. Notons cependant, comme évoqué au point 1.2.2, que les processus opérés dans la résolution des tâches de reconnaissance de formes de coupe sont sans nul doute différents de ceux utilisés lors de tâches de production, ce qui peut constituer une explication aux différences observées. En effet, Yeaman *et al.* (2019) ont identifié divers processus pouvant être utilisés par les individus pour résoudre de tels exercices lorsque l'individu doit sélectionner sa réponse parmi les propositions : élimination, intuition directe, action mentale, combinaison de stratégies... Parmi ceux-ci, certains, comme le processus par élimination, par exemple, n'apparaissent pas possibles dans une tâche de production.

En ce qui concerne le cas particulier de l'habileté de rotation mentale, Jansen *et al.* (2013) ont mis en évidence qu'évaluer les enfants de l'enseignement primaire à l'aide de tâches de rotation mentale en 3D d'objets 3D (assemblages de cubes) présentées au départ de représentations 2D est inadapté puisque ces tâches exigent une charge cognitive trop importante pour eux, entraînant de fortes difficultés à résoudre les exercices. Néanmoins, Hawes *et al.* (2015a) montrent que les enfants, dès l'âge de 5 ans, sont capables de performer au-dessus du niveau de la chance à des tâches de rotation mentale en 3D lorsque celles-ci sont proposées avec des stimuli adaptés, en l'occurrence des objets 3D et non des représentations planes d'objets 3D. Ces résultats sont en cohérence avec ceux mis en évidence par Frick *et al.* (2013), qui soulignent que c'est vers ce même âge que les enfants peuvent s'engager dans une pensée spatiale dynamique.

L'âge auquel les enfants et les adolescents arrivent à résoudre des tâches impliquant l'habileté de visualisation spatiale apparaît donc variable selon le type de tâche proposé (ex. tâche de coupe, tâche de rotation mentale) et les conditions dans lesquelles ces tâches sont proposées (matériel physique ou représentations, exercices de reconnaissance ou de reproduction...). De plus, de fortes différences individuelles, qui émergent parfois dès le plus jeune âge, sont observées au niveau de l'habileté de visualisation spatiale (Carroll, 1993 ; Hegarty & Waller, 2005 ; Levine *et al.*, 1999). Pour certains, faire appel à cette habileté relève d'un réel défi.

Si l'âge auquel les enfants maîtrisent la résolution d'exercices de visualisation spatiale ne fait pas consensus, les recherches montrent que les performances aux

tâches impliquant l'habileté évoluent avec l'âge chez les enfants et les adolescents. En comparant les résultats obtenus au sein des différents groupes d'âge interrogés, Duroisin (2015), Davis (1973) ou encore Ratliff *et al.* (2010) ont par exemple identifié que les performances aux tâches de coupe s'amélioraient avec l'âge, même si les conditions d'évaluation étaient différentes. Un tel résultat apparaît cohérent avec ce que la méta-analyse d'Uttal *et al.* (2013a) a pu mettre en évidence au sujet des habiletés visuo-spatiales. Comme pour les tâches d'identification de la forme de coupe et d'empreinte d'objets 3D, un développement avec l'âge est aussi relevé pour le cas particulier de la rotation mentale (Hawes *et al.*, 2015a ; Mohler, 2008b). Précisons toutefois que la trajectoire de développement est variable selon les habiletés spatiales (Hodgkiss *et al.*, 2021). Les auteurs relèvent un développement précoce des habiletés intrinsèques⁶ et un développement plus lent et plus tardif des habiletés extrinsèques. Par exemple, les résultats montrent que les périodes « 7-8 ans » et « 9-11 ans » sont des périodes où les habiletés intrinsèques se développent significativement contrairement aux habiletés extrinsèques.

Contrairement à ce qui a longtemps été une croyance (Ardebili, 2006), l'habileté de visualisation spatiale, en plus de se développer avec l'âge, peut être développée et affinée grâce à la mise en œuvre d'interventions (Kwon *et al.*, 2002 ; Lowrie *et al.*, 2019 ; Martín-Dorta *et al.*, 2008 ; Samsudin *et al.*, 2011 ; Uttal *et al.*, 2013a, 2013b). Cela confirme le caractère malléable de l'habileté spatiale, mis en évidence dans le premier chapitre (*cf.* 1.3.2.4). Les interventions à mettre en place pour l'entraînement des habiletés visuo-spatiales peuvent être de courte ou de longue durée (Katsioloudis & Jovanovic, 2014). À titre d'exemple, Lowrie et ses collaborateurs (2019) ont testé un entraînement à la visualisation spatiale d'une durée de six heures auprès d'enfants de fin d'enseignement primaire et ont mis en évidence un gain significatif sur l'habileté de visualisation. Plus encore, un gain a été également observé sur d'autres habiletés spatiales ce qui confirme également le caractère transférable de l'habileté. Quelle que soit la durée, il est néanmoins nécessaire de placer l'individu dans un environnement d'apprentissage approprié (Ardebili, 2006). En particulier, il apparaît que le développement des habiletés spatiales et notamment de l'habileté de visualisation est possible grâce à l'utilisation des environnements virtuels puisqu'ils offrent un traitement dynamique des images (Ha & Fang, 2017 ; Lowrie *et al.*, 2017 ; Mjenda *et*

⁶ Au sens de la typologie de Uttal *et al.* (2013a) présentée au point 3.1.

al., 2023 ; Moustaki & Kynigos, 2011 ; Quintero *et al.*, 2015). Molina-Carmona *et al.* (2018) soulèvent que c'est particulièrement le cas lorsque ces environnements virtuels sont immersifs. La méta-analyse proposée par Di et Zheng (2022) semble confirmer la présence d'un effet moyen des technologies sur le développement de l'ensemble des habiletés spatiales, avec une taille d'effet de 0,617. De plus, en croisant les résultats de toute une série de recherches portant sur le sujet, les auteurs ont identifié des conditions dans lesquelles l'entraînement apparaît plus efficace : lorsqu'il se destine aux jeunes enfants, lorsqu'il est mené dans le domaine de sciences naturelles et de l'ingénierie technologique et lorsqu'il dure entre 3 et 6 mois. Les environnements virtuels semblent donc offrir un espace intéressant pour exercer l'habileté de visualisation spatiale des individus. Les recherches portant sur l'entraînement spatial en environnement virtuel montrent par ailleurs un bon transfert des connaissances spatiales vers le monde réel (Rodrigues *et al.*, 2010), ce qui encourage à la mise en œuvre d'entraînement des compétences spatiales en environnement virtuel.

3.2.3. Facteurs d'influence de l'habileté de visualisation spatiale

Comme cela vient d'être mis en évidence, des différences individuelles peuvent être constatées dans les capacités à résoudre des tâches impliquant la visualisation spatiale. Plusieurs facteurs inhérents aux caractéristiques des individus eux-mêmes peuvent expliquer ces différences. En parallèle à ces facteurs intrinsèques, d'autres facteurs extrinsèques peuvent également impacter les performances des enfants et des adolescents, voire même des adultes, à des tâches impliquant la visualisation.

3.2.3.1. Facteurs intrinsèques

Hormis le facteur âge, qui a été présenté au point 3.2.2, différents facteurs propres à chaque individu sont susceptibles d'influencer le niveau de maîtrise de l'habileté de la visualisation spatiale chez un public tout-venant. C'est le cas, par exemple, du niveau socio-économique et culturel mais aussi de certaines habitudes comme la pratique de jeux vidéo, de jeux de construction, ou encore de certains sports.

a. Le genre

L'impact que peut avoir le genre sur les performances à des tâches impliquant l'habileté de visualisation spatiale fait l'objet d'un désaccord. Des différences sont parfois observées ou non selon le type de tâche demandée. Des désaccords entre

résultats de recherche sont parfois même observés pour une même tâche. De plus, si des différences existent, l'âge auquel ces différences émergent fait également l'objet de débat puisque certains auteurs parlent d'une apparition des différences à l'adolescence, tandis que d'autres constatent des différences chez les enfants préscolarisés (Levine *et al.*, 1999).

Au niveau des tâches de rotation mentale, les méta-analyses ont souligné des différences parfois larges entre les filles et les garçons en faveur des garçons, y compris chez les enfants d'un très jeune âge (Hegarty, 2018). Ces différences entre filles et garçons peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs d'origines variées : biologique (hypothèses de facteurs hormonaux, d'une spécialisation hémisphérique et d'une organisation cérébrale : Moè, 2009), expérientielle (pratique de certaines activités : Moè, 2016a ; Terlecki & Newcombe, 2005), stratégique (différences des choix de stratégies de résolution : Moè, 2009 ; Tzuriel & Egozi, 2010), motivationnelle, émotionnelle ou encore sociale et culturelle (présence de certains stéréotypes de genre : Guizzo *et al.*, 2019 ; Moè, 2009 ; Moè, 2016b / présence d'une anxiété spatiale : Ramirez *et al.*, 2012). Contreras *et al.* (2012) considèrent à ce titre qu'il est difficile de considérer le genre comme un facteur à part entière puisque ce facteur est trop large et implique d'autres facteurs tels que ceux précédemment cités.

Notons cependant, que cette présence de différence de genre n'est pas observée systématiquement. Hawes *et al.* (2015a), ont par exemple observé une absence de différences de genre auprès des enfants âgés de 4 à 8 ans interrogés au niveau des performances en rotation mentale d'objets 2D ou d'objets 3D. Un même résultat est observé par Hodgkiss *et al.* (2021) qui a évalué des enfants âgés de 6 à 11 ans sur une tâche de rotation mentale en 2D. De plus, comme préalablement illustré, l'effet du genre est susceptible d'apparaître dans certaines conditions et pas dans d'autres. Parsons *et al.* (2004) ont notamment pu le montrer en évoquant les différences présentes lors d'un test de type papier-crayon mais pas lors d'un test en environnement virtuel.

Au niveau des tâches de visualisation spatiale autres que celles de rotation mentale, les différences entre filles et garçons sont décrites par Linn et Petersen (1985) comme moins importantes. Un tel résultat est par ailleurs confirmé par la méta-analyse de Voyer (2011), que ce soit chez les enfants et adolescents ou chez les adultes.

Pour les tâches d'identification de coupe de solides, on n'observe pas de consensus sur la présence ou non de différences fille/garçon. Si Németh *et al.* (2007) mais aussi Cohen et Hegarty (2012) observent un effet du genre en faveur des garçons auprès des étudiants de l'enseignement supérieur et Davis (1973) fait la même constatation pour des étudiants de l'enseignement secondaire, ce n'est pas le cas de Ratliff *et al.* (2010), qui se sont intéressés aux enfants de 5 à 9 ans.

b. Les capacités motrices

Si traditionnellement, le domaine cognitif (auquel appartient l'habileté de visualisation spatiale) et le domaine moteur constituent deux domaines distincts traités dans des régions différentes du cerveau (Davis *et al.*, 2011), l'idée de l'existence d'une proximité entre le développement moteur et le développement cognitif apparaît dans les premières théories développementales comme celles de Piaget. Depuis, Amorim *et al.* (2006) ou encore Steggemann *et al.* (2011) se sont intéressés au lien pouvant exister entre les compétences motrices et les tâches spatiales et soulignent que les compétences motrices jouent un rôle sur les performances spatiales.

Que ce soit chez les enfants (Fernández-Méndez *et al.*, 2020 ; Frick *et al.*, 2009) ou chez les adultes (Moreau, 2012 ; Voyer & Jansen, 2017), des liens ont par exemple pu être réalisés entre rotation mentale et habiletés motrices, les tâches de rotation mentale impliquant une composante motrice significative (Moreau *et al.*, 2011). Les capacités motrices d'équilibre constituent par exemple un bon prédicteur de la rotation mentale (Jansen & Kaltner, 2014).

La présence de troubles moteurs, tels que les troubles du développement de la coordination (TDC) est donc susceptible d'impacter le niveau de développement des habiletés spatiales. D'ailleurs, les TDC et les troubles visuo-spatiaux ont été mis en lien dans de nombreuses études (Blank *et al.*, 2012).

c. Les capacités de mémoire

Selon Hegarty et ses collègues (2005), la mise en œuvre d'une animation mentale telle que la rotation mentale repose fortement sur les ressources de la mémoire de travail visuo-spatiale. Shah et Miyake (1996) soulignent également que les capacités de la mémoire de travail peuvent venir expliquer, au moins en partie, les différences de résultats entre les individus au niveau des tâches impliquant l'habileté de visualisation spatiale. La mémoire de travail visuo-spatiale sous-tend en effet la capacité à conserver

et manipuler des informations spatiales pendant une courte période (van Asselen *et al.*, 2006). Elle intervient donc dans la formation et la manipulation d'images mentales (Hawes & Ansari, 2020 ; Mammarella *et al.*, 2013). Elle est à mettre en lien avec la résolution des tâches complexes impliquant la visualisation spatiale, comme précisé précédemment.

Par ailleurs, les différences observées entre individus dans le niveau d'acquisition de l'habileté de visualisation spatiale pourraient s'expliquer par la quantité variable d'images mentales spatiales présentes dans leur mémoire, mais aussi par des différences de facilité dans les processus basiques d'imagerie mentale (Cohen & Hegarty, 2014). En conséquence, deux approches d'entraînement de la visualisation spatiale sont envisagées dans les études en psychologie cognitive : d'une part, le développement par accumulation accrue d'images et, d'autre part, l'entraînement axé sur le développement des capacités de traitement, dépassant le stockage robuste d'images. Les résultats ont montré que la première approche ne permet pas le transfert lorsque les stimuli sont différents de ceux rencontrés en situation d'entraînement, contrairement à la seconde (Cohen & Hegarty, 2014 ; Wright *et al.*, 2008).

Malgré tout, Kaufmann (2007) souligne que les différences dans la capacité de mémoire ne sont pas suffisantes pour expliquer à elles seules la variance des performances entre les enfants et les adolescents et que d'autres facteurs entrent également en jeu.

d. Les stratégies exploitées

Différentes stratégies ou métastratégies peuvent être exploitées lors de la résolution de tâches impliquant les habiletés visuo-spatiales (Hegarty, 2018 ; Hegarty & Waller, 2005 ; Hoyek *et al.*, 2010). À ce sujet, les différentes stratégies mises en place lors de la résolution de tâches de coupe de solides par reconnaissance ont pu être citées en prenant appui sur les propos de Yeaman *et al.* (2019).

À titre d'illustration, pour la rotation mentale, les sujets peuvent exploiter une stratégie de rotation mentale des images holistiques (c'est-à-dire des formes globales), des stratégies de rotation au coup par coup, des stratégies de prise de perspective, ou encore des stratégies indépendantes du point de vue basées sur les caractéristiques. Les choix de stratégies exploitées pour résoudre les tâches incluant les habiletés spatiales peuvent expliquer des différences de performance entre individus. Par ailleurs, des différences de stratégies entre hommes et femmes peuvent également

être observées et sont une des raisons pouvant expliquer l'impact du critère du genre évoqué plus tôt. Les hommes privilégiant par exemple des stratégies portant sur la forme globale, qui peuvent s'avérer plus efficaces (Hegarty, 2018).

Notons cependant que lors de la réalisation de tâches de visualisation, les individus peuvent aussi faire appel à une stratégie mixte, en combinant plusieurs stratégies, voire à une stratégie changeante, en modifiant sa stratégie en cours de résolution (Newcombe & Stieff, 2012).

e. La présence de certains troubles ou déficits

Outre la présence de troubles visuo-spatiaux, la présence de différents troubles est susceptible d'impacter leur capacité à faire preuve de visualisation spatiale (Amorim *et al.*, 2006 ; Blank *et al.*, 2012), comme les TDC précédemment évoqués. De plus, une comorbidité entre des déficits visuo-spatiaux et d'autres troubles, par exemple les troubles de l'attention ou la dyslexie, est identifiée par certains auteurs (Barisnikov & Pizzo, 2013 ; Crawford & Dewey, 2008 ; Kaplan *et al.*, 1998).

f. Le niveau socio-économique

Le niveau socio-économique constitue un facteur d'influence du niveau de développement des habiletés spatiales. Des différences frappantes de niveau de raisonnement spatial existent entre les enfants selon leur indice socio-économique (Verdine *et al.*, 2013) et ce déjà même à l'âge de 3 ans (Tepylo *et al.*, 2014). Cela s'explique notamment par la variation de l'exposition à certaines activités permettant leur développement, ce qui peut provoquer des inégalités entre individus (Casey *et al.*, 2008). En effet, ce dernier peut avoir des impacts sur certaines habitudes, décrites ci-dessous, qui elles-mêmes impactent les performances visuo-spatiales.

g. L'expérience et les connaissances antérieures de l'individu

Évidemment, les performances aux tâches de visualisation peuvent être expliquées par l'expérience des individus vis-à-vis de ces tâches. Cohen et Hegarty (2007) évoquent que les performances aux tâches de coupe de solides peuvent être expliquées par l'expérience, suite à la présence en mémoire d'expériences relatives aux formes de certaines coupes. Cette expérience peut, d'après les auteurs, provenir de l'expérience acquise lors des apprentissages en mathématiques ou en sciences mais peut aussi faire suite à la découpe d'éléments en 3D de la vie de tous les jours (découpe d'aliments, de matériaux...).

Plus largement, des activités réalisées par les enfants dans leur quotidien sont susceptibles d'influencer leur expérience visuo-spatiale et peuvent ainsi favoriser le développement de leurs habiletés (Hoyek *et al.*, 2010). Non sans lien avec l'influence de la variable motrice, possiblement avec le niveau socio-économique, les recherches dans le domaine psycho-cognitif mettent en évidence que la pratique régulière de certains types d'activité, impliquant notamment la coordination « vue/geste », peut s'avérer être un facteur important, voire crucial pour le développement d'habiletés spatiales au plus jeune âge.

La pratique de manière régulière de certains jeux peut amener les enfants et les adolescents à développer des habiletés visuo-spatiales. Cette habitude constitue une des raisons permettant de justifier les différences constatées entre filles et garçons, ces derniers n'ayant pas les mêmes habitudes de jeux (Baenninger & Newcombe, 1989, cités par Feng *et al.*, 2007 ; Gold *et al.*, 2018 ; Castro-Alonso & Jansen, 2019). Dans la mise en place d'expérimentations portant sur l'étude des habiletés visuo-spatiales, la variable « habitude de jeux » est d'ailleurs prise en compte par certains auteurs (Battista & Clements, 1996 ; Charles, 2023 ; Hertanti *et al.*, 2019 ; Rodán *et al.* ; 2016) qui ont pu mettre en évidence une influence positive de l'expérience de jeu sur les performances à des tâches impliquant la visualisation spatiale. De plus, plusieurs recherches ont pu expérimenter et valider des programmes d'entraînement des habiletés visuo-spatiales basées sur la pratique de certains jeux et ont montré leur efficacité (Hawes *et al.*, 2022).

Parmi les jeux qui sont décrits comme susceptibles d'avoir un impact sur les habiletés spatiales et notamment l'habileté de visualisation, il est possible d'évoquer le cas des jeux de construction (par exemple, les blocs de construction Lego®). Verdine *et al.* (2014) mais aussi Nagy-Kondor (2017) et Lourenco *et al.* (2018) présentent les jeux de construction comme du matériel efficace pour réaliser des entraînements spatiaux et ainsi développer les habiletés spatiales. De plus, les habitudes relatives aux jeux de construction dans l'enfance ont une influence sur les capacités spatiales et notamment les capacités de rotation mentale ou de visualisation spatiale (Clements & Sarama, 2021 ; Gold *et al.*, 2018 ; Hertanti *et al.*, 2019 ; Leopold, 2005 ; Sorby, 1999), particulièrement quand ce jeu se fait de manière encadrée, en se fixant des objectifs de construction et non en jouant de manière libre (Casey *et al.*, 2008).

Par ailleurs, l'expérience précoce des jeux de type « puzzle » comme le tamgram est décrite comme pouvant influencer les performances spatiales. Verdine *et al.* (2008) ont notamment identifié des corrélations entre les performances de résolution de puzzles et le niveau de développement de plusieurs habiletés spatiales dont la visualisation spatiale. De même, plusieurs recherches ont montré que ce matériel permet de développer une « éducation spatiale » aux enfants (Verdine *et al.*, 2014). Ce type de jeu apparaît comme un support efficace pour le développement des habiletés spatiales (Clements & Sarama, 2021 ; Nagy-Kondor, 2017) et notamment les habiletés impliquant une transformation spatiale (Levine *et al.*, 2012).

En parallèle aux jeux de construction ou de puzzle, l'influence de la pratique de certains jeux vidéo est également investiguée dans de nombreuses recherches portant sur les habiletés spatiales. D'une part, plusieurs études ont été menées afin d'identifier si des habiletés spatiales pouvaient être développées en utilisant des jeux vidéo. Boot *et al.* (2008) ont par exemple exploré l'impact de la pratique du jeu Tetris® sur le développement de l'habileté de rotation mentale. Ils ont relevé un effet positif de ce dernier. En amenant les joueurs à anticiper mentalement la position de cubes pour pouvoir les encastrier, leur expérience spatiale est développée (Hoyek *et al.*, 2010). Dans la même optique, Feng *et al.* (2007) ont par exemple montré une meilleure efficacité à résoudre des tâches de rotation mentale chez les individus ayant suivi un dispositif d'entraînement basé sur un jeu vidéo d'action. D'autre part, plusieurs études se sont intéressées à l'influence de l'expérience des individus vis-à-vis de tels jeux sur le développement cognitif et singulièrement sur le développement des habiletés spatiales. De manière générale, Jonhson (2006, cité par Lorant-Royer *et al.*, 2010) relève que la pratique régulière de jeux vidéo peut avoir une incidence positive sur diverses capacités, notamment les capacités d'attention, de concentration, de mémoire visuelle, mais aussi sur la vitesse de traitement des données et sur certaines capacités métacognitives (planification...). De manière plus spécifique, concernant les capacités spatiales, Sims et Mayer (2002) ont comparé les résultats de joueurs expérimentés du même jeu et de non-joueurs à plusieurs tests de rotation mentale et ont souligné des résultats en faveur des joueurs expérimentés. Néanmoins, ces résultats doivent être nuancés. D'une part, un transfert des compétences spécifiques est observé en contexte uniquement, dans la mesure où les seules différences significatives observées entre joueurs et non-joueurs concernent des items semblables à ceux du jeu. D'autre part,

les analyses soulignent que ce qui différencie les deux groupes d'individus concerne principalement la vitesse d'exécution et non les processus utilisés. Plus récemment, Gold *et al.* (2018) ont confirmé que la pratique des jeux vidéo dans l'enfance, en particulier des jeux vidéo d'action mais aussi, dans une moindre mesure, les jeux vidéo de sport et de construction, ont une influence sur les résultats d'étudiants de l'enseignement supérieur à des tâches impliquant les habiletés spatiales, notamment des tâches de coupe ou de rotation mentale. De son côté, Sorby (1999) évoque la présence d'une influence des jeux vidéo impliquant une simulation de l'espace 3D.

Lorsqu'il participe à des activités sportives, l'individu doit prendre appui sur des informations spatiales perçues pour anticiper et imaginer des situations qui évoluent, ce qui développe son expérience spatiale (Hoyek *et al.*, 2010). Il doit par exemple, dans les sports collectifs, anticiper les positions de ses partenaires. Plusieurs auteurs, à l'instar de Heppe *et al.* (2016), se sont intéressés à l'influence de la pratique régulière de certains sports sur les habiletés visuo-spatiales. Il apparaît que les personnes pratiquant de manière assidue des activités sportives impliquant des habiletés motrices complexes, telles que les sports de combat, sont plus performants au niveau des habiletés spatiales que ceux impliqués dans d'autres activités sportives (par exemple la course) ou que ceux impliqués dans de telles activités mais de manière non assidue (Moreau *et al.*, 2011). Au-delà des sports de combat, il est également possible de citer des sports tels que la gymnastique et la danse, qui peuvent favoriser le développement d'habiletés spatiales. De manière générale, il est possible de relever que les résultats les plus significatifs dans ces différentes recherches investiguant le lien avec les habitudes de sport concernent l'habileté de rotation mentale, les résultats relatifs aux autres habiletés apparaissent plus mitigés (Adams & Mayer, 2014 ; Lorant-Royer *et al.*, 2010 ; Sims & Mayer, 2002).

Au même titre, que la pratique de sports et de certains jeux et jeux vidéo, la pratique d'instrument de musique est une pratique observée chez les individus ayant un haut niveau de développement des habiletés spatiales (Okamoto, 2014 ; Voyer & Jansen, 2017).

3.2.3.2. Facteurs extrinsèques

Outre les facteurs liés à l'individu et à ses caractéristiques, d'autres facteurs extrinsèques ne dépendant cette fois pas de l'individu peuvent également impacter les performances des enfants et des adolescents à des tâches impliquant l'habileté de visualisation spatiale. Si, en évoquant précédemment les supports d'évaluation utilisés pour évaluer l'habileté de visualisation spatiale exercée sur des objets 3D, un premier de ces facteurs extrinsèques pourrait être considéré, d'autres facteurs présentés ci-dessous peuvent venir compléter cette liste.

a. Les objets sur lesquels l'habileté est exercée

Les objets sur lesquels il est demandé à l'individu de faire preuve de visualisation spatiale influencent les performances à ces habiletés. Pour les tâches d'identification d'empreinte et de coupe, Duroisin (2015) a mis en évidence le fait que des objets géométriques différents entraînent des résultats variables chez les individus. À titre d'illustration, les enfants et les adolescents ont davantage de difficultés à se représenter l'empreinte d'une sphère en comparaison à un cube. Davis (1973), qui a interrogé des adolescents à propos de diverses coupes portant sur le cube, le parallélépipède rectangle, le cône et le cylindre, a également souligné que les exercices relatifs au cône semblent poser plus de difficultés que ceux relatifs aux autres objets 3D. Piaget et Inhelder (1948) avaient par ailleurs relevé que les difficultés à résoudre des tâches de coupe subsistent davantage quand celles-ci portent sur des objets avec lesquels les participants sont moins familiers. Des différences sont par ailleurs aussi mises en évidence chez les adultes quand les capacités à imaginer la forme d'une coupe sont évaluées sur des figures simples et des figures plus complexes (Sanandaji *et al.*, 2017).

Pour des tâches de rotation mentale, l'impact du caractère familier des objets sur lesquels les individus doivent mener la rotation mentale a également pu être mis en évidence (Amorim *et al.*, 2006 ; Tarr & Pinker, 1989). Amorim *et al.* (2006), en comparant les résultats obtenus lorsque les tâches portaient sur des objets non familiers et abstraits (assemblages de cubes) et lorsqu'ils portaient sur des objets familiers, faisant en plus référence au corps (forme incarnée de corps humains), ont observé de meilleurs résultats dans le deuxième cas de figure.

Au-delà de la forme des objets, Yue (2008) a montré que l'apparence de ces derniers constitue également un facteur d'influence, en mettant en évidence que les

adolescents de l'enseignement secondaire (collège et lycée) obtiennent de meilleurs résultats à un test de visualisation si ce dernier est aménagé avec des objets géométriques dont l'apparence est rendue réaliste (texture bois). Barlett *et al.* (2023) soulignent également l'influence positive du caractère réaliste des formes présentées sur les performances spatiales des individus.

b. Les manipulations mentales exigées

Des différences importantes de performance peuvent être observées selon les manipulations mentales exigées sur des mêmes objets. Par exemple, pour l'habileté de visualisation spatiale, Duroisin (2015) a pu mettre en évidence des différences de performance chez les enfants et les adolescents selon les coupes demandées, c'est-à-dire selon la position dans laquelle le couteau était placé, et même si ces coupes portaient sur un même objet géométrique. Ainsi, les coupes qualifiées de « transversales » ou « longitudinales », où le couteau est placé respectivement à l'horizontale sur le côté de l'objet 3D, ou à la verticale sur son dessus semblent poser moins de difficultés que les coupes « obliques » où le couteau était placé de biais sur son côté. De telles différences avaient également été mises en évidence par Davis (1973) sur les adolescents et se confirment également chez les adultes (Cohen & Hegarty, 2012 ; Sanandaji *et al.*, 2017).

En lien avec l'orientation du couteau et les objets sur lesquels porte la tâche, Ratliff *et al.* (2010) ont identifié que les enfants interrogés réussissent davantage les exercices de coupe lorsque la forme de la section attendue est dite « congruente », c'est-à-dire quand la forme de la coupe est identique à la forme globale du solide (ex. la forme ronde obtenue par la coupe transversale d'un cylindre, la forme carré pour la coupe transversale d'un cube) en comparaison aux formes dites « incongruentes » (ex. forme rectangulaire obtenue par la coupe longitudinale d'un cylindre, forme rectangulaire pour la coupe oblique d'un cube).

Au-delà des tâches de coupe et/ou d'empreinte, l'impact de la manipulation mentale exigée est également observé pour la rotation mentale puisque des recherches antérieures ont permis de mettre en évidence que la réussite et le temps de résolution étaient influencés par le plan dans lequel la rotation doit être mise en œuvre (Lejeune & Decker, 1994) ainsi que par l'amplitude de l'angle de rotation (Bates & Farran, 2020 ; Chu & Kita, 2011 ; Frick *et al.*, 2013 ; Lejeune & Decker, 1994). De même, la mise en place d'un raisonnement spatial sur des stimuli dont l'orientation est horizontale ou

verticale pose une difficulté moindre par rapport à des stimuli d'orientation oblique (Gentaz & Streri, 2004).

c. Les conditions dans lesquelles la tâche est proposée

Au-delà des caractéristiques des objets sur lesquels il est demandé que les habiletés soient appliquées, les conditions dans lesquelles les tâches impliquant l'habileté sont données peuvent venir influencer les performances. C'est le cas par exemple du temps laissé pour résoudre les tâches (Voyer, 2011).

En outre, Presmeg (2006, cité par Elia *et al.*, 2018) a pu montrer que les gestes sont fortement connectés à la visualisation. La place laissée ou non aux gestes dans la résolution des tâches de visualisation spatiale, qui est à rapprocher du lien entre compétences motrices et spatiales, est susceptible d'impacter les performances des individus.

D'une part, les gestes sont décrits comme une manière naturelle d'exprimer le résultat d'un processus d'animation mentale. Ils peuvent avoir un impact dans l'étape d'expression et d'explication des solutions à des tâches nécessitant cette transformation mentale (Ehrlich *et al.*, 2006 ; Goldin-Meadow *et al.*, 2009 ; Hegarty *et al.*, 2005). En particulier, les gestes représentationnels (gestes véhiculant du contenu sémantique grâce à la forme, au placement ou à la trajectoire de mouvement des mains) peuvent venir accompagner les informations spatiales lors de discours, surtout liés à des tâches impliquant des conditions motrices (Alibali, 2005).

D'autre part, les rôles des gestes dépassent la phase de communication des résultats et plusieurs recherches ont mis en évidence que les processus moteurs jouaient un rôle dans le processus de manipulation mentale d'objets (Meijer & van den Broeck, 2010). Plus que le simple reflet de représentations mentales utilisées dans la résolution de problèmes, les gestes occupent un rôle causal actif, et donc fonctionnel, dans la résolution de problèmes et plus largement dans les processus de pensées (Chu & Kita, 2008 ; Hegarty *et al.*, 2005). Chu et Kita (2011) se sont par exemple intéressés aux mouvements de main appelés « gestes de co-pensées » (gestes silencieux réalisés dans le vide pour soutenir le raisonnement lors de la résolution de problèmes spatiaux) effectués par le participant lors de tâches de rotation mentale et lors d'autres tâches impliquant la visualisation spatiale (pliage de papier). Les résultats montrent que des gestes sont mis en place spontanément par les participants, le plus souvent quand ils sont en difficulté et dans les exercices les plus compliqués. Ils mettent également en

évidence que, lorsqu'on recommande aux participants de mettre en place des gestes, les performances s'améliorent, en comparaison aux situations où les gestes sont autorisés mais pas recommandés mais aussi en comparaison aux situations où les gestes sont interdits. Inversement, Hegarty *et al.* (2005) ont pu mettre en évidence que ne pas autoriser les gestes lors de tâches impliquant une animation mentale n'a pas entraîné des résultats significativement plus faibles que lorsque les gestes sont autorisés. En revanche, Chu et Kita (2008) ont montré qu'une telle interdiction peut impacter des changements de stratégies. Le fait d'autoriser ou non les gestes aux individus, mais surtout de les encourager est donc susceptible d'impacter la résolution de tâches impliquant l'habileté de visualisation spatiale.

Outre les gestes effectués parfois dans le vide par les individus pour soutenir la manipulation mentale des stimuli, la place laissée à la manipulation des stimuli par l'individu lui-même est également susceptible d'impacter les performances à des tâches de manipulation mentale. Par exemple, Gori *et al.* (2024) ont évalué les performances à des exercices de coupe auprès d'enfants de 3 à 10 ans au départ de matériel physique ne pouvant qu'être observé ou pouvant être manipulé. Les auteurs ont mis en évidence des différences de performance à l'avantage des situations dans lesquelles les stimuli peuvent être manipulés pour les enfants âgés de 5 à 6 ans et de 7 à 10 ans mais pas pour ceux âgés de 3 à 4 ans. James *et al.* (2001) ont aussi observé que l'exploration physiquement active des stimuli, en comparaison à une observation sans autorisation de manipulation, permet, en plus de faciliter la compréhension de la structure tridimensionnelle de l'objet (*cf.* 2.2.3.2c), de les rendre capables de mettre en œuvre plus rapidement des rotations mentales de ces objets. Pour autant, ce résultat ne fait pas consensus puisque l'étude de Keehner *et al.* (2004), présentée antérieurement, avait pu relever que l'exploration physiquement active des stimuli à une tâche de coupe proposée virtuellement à des étudiants du supérieur n'entraîne pas de meilleures performances qu'une observation sans manipulation, même si elle aide davantage ceux qui sont faibles spatialement.

Chapitre 4. Les habiletés de perception et de visualisation spatiale à l'école

Chapitre 4. Les habiletés de perception et de visualisation spatiale à l'école⁷

Lors des apprentissages scolaires, les habiletés de perception de la 3D ou de visualisation spatiale, qui ont fait l'objet d'une attention particulière dans les deux chapitres précédents, sont à de multiples reprises sollicitées dans divers domaines d'enseignement-apprentissage. Elles interviennent par exemple lorsqu'on confronte l'élève à du matériel 3D ou à des supports d'apprentissage permettant de simuler ce matériel 3D. Le développement des technologies dans la société et en particulier dans le milieu éducatif amène de nouveaux outils d'apprentissage qui étendent les possibilités plus traditionnelles de matériel. Ces technologies offrent de nouvelles méthodes d'exploration des contenus lors des apprentissages (Lu *et al.*, 2023) et peuvent constituer un moyen de créer, structurer et développer les processus cognitifs (Rodríguez *et al.*, 2021).

Ce chapitre porte sur la place occupée par ces habiletés dans certains domaines d'apprentissage et à la question des supports d'apprentissage. Il se focalise d'abord et de manière approfondie, sur le domaine de la géométrie et en particulier de la géométrie 3D. Dans ce domaine, qui porte directement sur l'étude des objets en trois dimensions, les habiletés de perception de la 3D et de visualisation spatiale sont incontournables. De telles habiletés interviennent lors des apprentissages de ce domaine qui occupe un rôle clé dans leur développement. Ce quatrième chapitre est donc l'occasion de comprendre en quoi ce domaine occupe un rôle essentiel pour le développement spatial. Il permet par ailleurs d'identifier une série d'enjeux relatifs à son enseignement, notamment en lien avec les supports d'apprentissage, permettant de donner du sens aux études menées qui seront présentées dans la suite de ce manuscrit.

Dans un second temps, ce chapitre propose de dépasser le contexte spécifique de la géométrie 3D en illustrant la place occupée par les habiletés dans d'autres domaines de l'enseignement obligatoire : le domaine de la géographie et des sciences.

⁷ Plusieurs parties de ce chapitre ont fait l'objet de publications : Beuset *et al.* (2024b) ; Beuset et Duroisin (2024) ; Beuset *et al.* (2025).

4.1. L'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D

La géométrie euclidienne, sur laquelle cette recherche est focalisée, constitue un des domaines d'apprentissage dans lequel l'espace occupe une place centrale. Il a la particularité d'étudier des objets de l'espace pouvant être représentés, c'est pourquoi les représentations spatiales visuelles y sont importantes. Son enseignement fait partie intégrante du parcours scolaire en mathématiques lors de l'enseignement primaire et secondaire. Même déjà à la petite enfance, elle est une partie indispensable des programmes scolaires contemporains (Elia *et al.*, 2018).

Dans de nombreux pays, le curriculum prescrit exige des enseignants qu'ils développent, chez les élèves, diverses compétences de ce domaine. Mais que doit-on entendre par « géométrie » ? Quelles connaissances et compétences sont en jeu lors de l'apprentissage et en particulier quel est son lien avec le développement spatial et en particulier avec les habiletés visuo-perceptives et visuo-spatiales ? Quelles sont les difficultés rencontrées lors de son enseignement-apprentissage ? Quels supports d'apprentissage sont recommandés ? Cette partie du chapitre vise à répondre à ces quelques questions en mettant notamment l'accent sur le cas de la géométrie 3D. Celui-ci devrait ainsi permettre de mettre en exergue certains enjeux relatifs à l'enseignement-apprentissage de ce domaine qui apparaissent comme des éléments contextuels pour comprendre l'apport des études menées. En effet, bien que les études menées s'intègrent dans le domaine de la psychologie cognitivo-développementale, dès l'introduction de ce travail, l'ambition de mettre les résultats obtenus au service de la réflexion sur la manière d'envisager l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D a été revendiquée.

4.1.1. Définitions de la géométrie

Si, étymologiquement, le terme géométrie peut être traduit comme « la science de la mesure du terrain / de la Terre », il est possible de le définir instinctivement comme le domaine des mathématiques qui a pour objet l'étude de l'espace et des formes qu'il contient. C'est même ce type de définition que les enseignants francophones belges et français du primaire et du secondaire inférieur mettent majoritairement en évidence lorsqu'il leur est demandé de définir ce domaine d'apprentissage (Seha & Duroisin, 2021). Néanmoins, de telles définitions peuvent s'avérer insuffisantes pour percevoir la nature complexe du domaine.

Ainsi, dans la littérature, on observe des définitions plus précises, qui maintiennent tout de même le rôle central de la notion d'espace.

Certaines définitions insistent davantage sur les finalités associées à la discipline. Si Soury-Lavergne et Maschietto (2015) évoquent la finalité de modélisation de l'espace et définissent la géométrie comme une discipline modèle de l'espace qui se rapporte à la connaissance spatiale, d'autres complètent cette finalité de modélisation avec les finalités de représentation et de traitement des problèmes de l'espace : « *la géométrie est un moyen de représenter, modéliser et traiter des problèmes de l'espace* » (Mathé *et al.*, 2020, p.15).

Par ailleurs, Freudenthal (1971) propose une définition mettant davantage l'accent sur l'interaction présente entre l'individu et l'espace. Il définit alors la géométrie comme la science de l'espace physique, de l'espace au sein duquel on vit et se déplace, et qui permet d'organiser l'expérience spatiale des individus.

De leur côté, Elia *et al.* (2018) insistent sur le fait que, lorsqu'on parle d'espace, on parle en fait des relations spatiales qu'il contient. Ils définissent la géométrie comme un domaine permettant la formalisation de la compréhension et de la description de l'espace, via l'étude des relations définies dans différents espaces, par exemple dans l'espace 3D qui nous entoure ou dans des surfaces 2D de cet espace 3D.

De ces définitions, il ressort donc que la géométrie constitue un domaine scientifique centré sur l'espace, qui permet à l'individu d'organiser, de décrire et de comprendre cet espace avec lequel il interagit, les objets qu'il contient et les relations entretenues entre ces objets.

Plus particulièrement, le domaine de la géométrie se décline en trois parties : le repérage et l'orientation dans l'espace, la géométrie plane, et enfin la géométrie de l'espace et des objets 3D (Mathé *et al.*, 2020). Notons que dans le langage courant ainsi que dans la littérature, on observe que plusieurs termes sont utilisés pour évoquer cette troisième composante de la géométrie : géométrie de l'espace, géométrie spatiale, géométrie 3D, géométrie en trois dimensions, géométrie tridimensionnelle... Même si, communément, les terminologies « géométrie de l'espace » ou « géométrie spatiale », sont utilisées en opposition aux terminologies « géométrie du plan » ou « géométrie plane ». Dans ce travail, le choix a été d'éviter ces deux formulations, en considérant que la géométrie plane reste tout de même une partie de la géométrie qui étudie un espace bien que celui-ci soit contraint à deux dimensions. Ainsi, la

terminologie « géométrie 3D » est ici privilégiée et se rapporte à l'étude des objets en trois dimensions, par opposition au terme « géométrie 2D » utilisé pour l'étude des objets en deux dimensions. En particulier, dans l'enseignement primaire et secondaire inférieur, la géométrie 3D porte sur l'étude de solides géométriques particuliers, par exemple le cube ou la sphère, qui sont des entités abstraites en trois dimensions gouvernées par des relations et théories mathématiques (Markopoulos *et al.*, 2015).

4.1.2. La géométrie et son lien avec l'espace/les espaces

Comme l'illustrent parfaitement les définitions associées à la géométrie, l'espace sensible occupe une place centrale dans ce domaine qui cherche à le modéliser. Toutefois, pour ce faire, d'autres types d'espace sont sollicités.

Chevallard (1991) mais aussi Perrin-Glorian *et al.* (2013) distinguent l'espace sensible de l'espace géométrique, défini comme l'espace théorique contenant les déductions et les axiomes ainsi que les outils théoriques. D'une certaine façon, c'est cet espace théorique qui permet la modélisation de l'espace sensible. Inversement cet espace théorique peut être concrétisé par des objets de l'espace sensible. Ainsi, dans le cadre de l'apprentissage de la géométrie 3D, le matériel physique issu de l'espace sensible peut également être considéré comme une représentation des objets de l'espace géométrique théorique.

Perrin-Glorian *et al.* (2013) définissent également un troisième type d'espace : l'espace graphique. Il s'agit de l'espace dans lequel l'individu expérimente au moyen de schémas, de dessins... pour résoudre les problèmes géométriques et/ou spatiaux auxquels ils sont confrontés, qu'ils soient théoriques ou issus de l'espace sensible.

Si l'espace sensible, l'espace géométrique et l'espace graphique sont à distinguer, ils sont pourtant en interaction lorsqu'on est amené à résoudre des problèmes en géométrie. Ainsi, l'espace graphique peut être schématisé comme un pont entre l'espace sensible et l'espace géométrique (Soury-Lavergne & Maschiatto, 2015). Notons par ailleurs que l'espace graphique peut exister sur papier mais également sur écran. Toutefois, la présence de papier et/ou d'écran n'implique pas forcément cet espace puisque ces supports sont parfois utilisés uniquement pour représenter l'espace sensible, ou des objets de cet espace, comme cela a pu être présenté au chapitre 1, sans pour autant en faire un espace de résolution de problème.

4.1.3. Objectifs assignés et importance de la géométrie

Sarama et Clements (2009) qualifient la géométrie de domaine « indispensable » pour l'éducation dès la petite enfance et van den Heuvel-Panhuizen et Buys (2008) relèvent notamment qu'il est nécessaire de développer l'apprentissage de la géométrie 3D au plus jeune âge.

De nombreux objectifs sont assignés à l'enseignement-apprentissage de la géométrie et permettent de relever l'importance de ce domaine, que ce soit pour la réussite académique ou, plus tard, professionnelle.

Un premier objectif concerne le développement du raisonnement logique (Suydam, 1985). C'est sur cet objectif que se focalisait le domaine d'enseignement-apprentissage jusqu'au milieu du XX^e siècle (Belkhodja, 2007). Cet objectif est confirmé par Gonzales et Herbst (2006) qui complètent cette idée en soulignant que l'enseignement-apprentissage de la géométrie permet d'offrir l'opportunité aux élèves d'élaborer et de prouver des conjectures. Elle fournit en fait un moyen d'entrer dans le raisonnement mathématique et la démonstration en confrontant les élèves à des problèmes qui peuvent être présentés très tôt dans la scolarité (Mathé *et al.*, 2020). Comme le rappelle Parzysz (2006), une des finalités de l'enseignement de la géométrie est d'amener le passage d'une géométrie de l'observation à une géométrie de la démonstration. En s'appuyant sur l'observation des figures, l'élaboration de conjectures, la soumission de ces conjectures à un examen critique et enfin la validation au moyen d'une démonstration mathématique, la géométrie propose aux élèves de mettre en place un raisonnement déductif riche. Elle va alors pouvoir fournir une initiation à l'axiomatique.

Toutefois, si le développement de la pensée et du raisonnement logique reste encore actuellement un objectif couramment associé à l'enseignement-apprentissage de la géométrie, la liste des objectifs s'est depuis élargie. Avec cet élargissement des objectifs, l'intention est de relier davantage la discipline au quotidien des élèves qui l'apprennent et de mettre en avant la dimension sociale des apprentissages tout comme son impact sur le développement de la connaissance (Belkhodja, 2007). Selon Suydam (1985), un deuxième objectif se rapporte au développement de l'intention spatiale à propos du monde réel. D'ailleurs, de manière générale, Freudenthal (1973) associe à la géométrie la fonction globale de « *grasping space* » (p.477). Au travers de cette affirmation, on retrouve l'idée que l'apprentissage de la géométrie vise à la saisie

de l'espace qui nous entoure et dans lequel on vit. C'est pour cette raison que l'auteur revendique l'apprentissage de ce domaine dès les premières années de la scolarité. Déjà, l'acquisition de connaissances géométriques élémentaires permet à l'individu de comprendre, son environnement et de le transformer (Gentaz *et al.*, 2009). Dès lors, la géométrie permet à l'élève de disposer d'une appréhension plus complète du monde (van De Walle, 2001) et l'aide à interpréter le monde physique dans lequel nous vivons et à réfléchir sur et dans ce monde (Rohendi & Wihardi, 2020). Plus spécifiquement, la géométrie 3D a un impact sur la familiarisation et la maîtrise de l'espace (Bayart *et al.*, 1996 ; Royal Society and Joint Mathematical Council, 2001). En effet, puisque nous vivons dans un monde en trois dimensions, nous devons constamment nous situer par rapport à des objets 3D et agir sur eux (CREM, 2002) et le développement de compétences en géométrie 3D peut aider notamment à résoudre des problèmes impliquant des objets de cet espace. Cette maîtrise de l'espace passe par la construction, au départ de l'espace sensible, d'un espace abstrait et modélisé permettant de le formaliser (Marchand, 2009). En ce sens, Gonzales et Herbst (2006) assimilent l'enseignement de la géométrie au développement d'une « langue » qui rendrait possible cette modélisation.

Un troisième objectif se rapporte à l'impact de la géométrie sur l'apprentissage des mathématiques puisque la géométrie a pour objectif la transmission des connaissances nécessaires pour étudier davantage les mathématiques (Suydam, 1985). Elle joue un rôle crucial dans l'étude de ces autres domaines, par exemple l'algèbre (van De Walle, 2001) ou les statistiques (Audibert, 1992 ; Battista, 1999, cité par Fabiyi, 2017). En raison de son caractère concret, qu'il est possible de relier à son aspect visuel, la géométrie possède de nombreuses applications en mathématiques. Elle permet en fait de travailler avec l'imagerie. En cela, il s'agit d'un domaine indispensable pour les mathématiques puisque sans imagerie, il n'y a pas de mathématiques (Tahta, 1980). Comme le relèvent Mathé *et al.* (2020), la géométrie fournit en fait un moyen de représentation pour d'autres champs de savoirs à l'intérieur des mathématiques. De plus, elle permet notamment de développer des compétences de lecture des arguments mathématiques et de leur interprétation (Suydam, 1985).

Gonzales et Herbst (2006) complètent la liste des objectifs en relevant que la géométrie, en fournissant des outils rendant l'élève capable de réaliser de futurs travaux non mathématiques, dépasse la discipline des mathématiques. Mathé *et al.* (2020) confirment cette idée en évoquant que les moyens de représentation offerts par

la géométrie dépassent le champ de savoirs des mathématiques. La géométrie possède de nombreuses applications dans divers domaines académiques et professionnels. Audibert (1994) va même jusqu'à qualifier la géométrie de « *discipline de service* » (p.1) dans la mesure où le développement de compétences dans ce domaine peut aisément se mettre au service de nombreux autres domaines parmi lesquels il est possible de citer l'architecture ou encore les sciences et la géographie. À titre d'exemples, Audibert (1992) évoque que les concepts d'aires, de volumes et de vecteurs appris en géométrie sont nécessaires en physique, que les concepts de polyèdres et d'isométries sont nécessaires pour faire de la chimie, ou encore que ceux de sphères ou de coordonnées servent en géographie. Au-delà des concepts, les principes relatifs aux compétences en géométrie et en particulier en géométrie 3D, interviennent dans diverses disciplines scientifiques (Whiteley *et al.*, 2015, cités par Mjenda *et al.*, 2023). Les compétences de visualisation et de représentation des objets 3D, ou encore d'interprétation de relations géométriques constituent des exemples de compétences développées en géométrie utiles dans ces domaines mais également dans la réalisation d'activités techniques (National Council of Teachers of Mathematics, 2000). Il est également possible de citer les capacités de modélisation 3D qui sont actuellement d'une importance haute dans de nombreux domaines tels que le design ou l'ingénierie ou encore le concept des vues 3D notamment indispensable en robotique ou encore en imagerie médicale (Kaur *et al.*, 2018).

Le "Royal Society and Joint Mathematical Council" (2001, p.12) a également élaboré une liste d'objectifs qu'ils recommandent d'associer à l'enseignement-apprentissage de la géométrie au sein des parcours scolaires. Parmi ceux-ci, certains se rapprochent voire complètent, des objectifs préalablement cités. Ainsi, les objectifs « *Développement de la connaissance, de la compréhension et de la capacité à utiliser les propriétés géométriques et les théorèmes* » et « *Encouragement au développement et l'utilisation de conjectures, de raisonnements déductifs et de preuves* » convergent avec l'objectif de développement du raisonnement logique. Les objectifs « *Développement de la conscience spatiale, de l'intuition géométrique et de la capacité de visualiser* » et « *Développement des compétences d'application de la géométrie à travers la résolution de problèmes et modélisation dans le monde réel* » semblent se rapprocher du développement de l'intention spatiale et de la modélisation de l'espace. S'ajoutent à cela d'autres objectifs pouvant, pour certains, être rapprochés des liens entre la géométrie et les autres domaines académiques et professionnels dans et en dehors des

mathématiques : « mise à disposition d'une gamme d'expériences géométriques en 2D et en 3D », « développement des compétences utiles liées aux technologies de l'information et la communication (TIC) en contexte spécifiquement géométriques », « incitation à une attitude positive envers les mathématiques », « développement d'une conscience de l'histoire et du patrimoine culturel de la géométrie dans la société, et des applications contemporaines de la géométrie ».

De son côté, Belkhodja (2007) s'est intéressé aux objectifs présents dans les programmes scolaires de plusieurs pays et propose une liste d'objectifs cités couramment de manière explicite au sein de ces derniers. Le premier objectif concerne le développement de savoirs se rapportant aux figures géométriques, aux relations, aux transformations et aux mesures (concepts, propriétés, théorèmes, termes, symboles...). Le deuxième concerne le développement de capacités intellectuelles générales parmi lesquelles il cite notamment l'observation, la classification, la formulation de conjectures ou encore le raisonnement déductif. Un autre objectif couramment relevé dans les programmes concerne le développement des capacités de démonstration en géométrie. Parzysz (2006) rappelle qu'une des finalités de l'enseignement de la géométrie est d'amener le passage d'une géométrie de l'observation à une géométrie de la démonstration. Le quatrième objectif identifié par Belkhodja (2007) se rapporte au développement de savoir-faire techniques (utilisation d'instruments, construction de diagrammes, prise de mesures...). Enfin, le développement d'attitudes d'ordre intellectuel et affectif, par exemple la curiosité, la rigueur ou l'appréciation de la beauté de la géométrie, vient clôturer la liste des objectifs. Outre ces objectifs, Belkhodja (2007) relève cependant qu'un objectif, qu'il considère pourtant comme indissociable de la géométrie, apparaît négligé au sein des programmes : le développement de l'habileté à visualiser dans l'espace. Pourtant, pour Mithalal (2014), le développement de la visualisation dans l'espace constitue l'objectif principal de la géométrie 3D. Cet objectif a un double sens car il peut être interprété dans le contexte cognitif ou dans le contexte géométrique. Dans le premier cas, il signifie que la géométrie 3D vise à l'élaboration d'une bonne représentation de l'espace environnant et donc à la construction de bonnes images mentales des objets 3D. Dans le second cas, l'objectif fait écho au développement de la capacité à traiter des problèmes de géométrie 3D et se rapporte alors au développement du raisonnement logique et de la méthode hypothético-déductive. Ces deux sens accordés à l'objectif de visualisation de l'espace apparaissent complémentaires.

4.1.4. Les connaissances sollicitées en géométrie

Dans la pensée géométrique, deux types de connaissance sont principalement mis en jeu : les connaissances spatiales et les connaissances géométriques (Baldy *et al.*, 2005 ; Marchand, 2009). Bien que distincts, ces deux types de connaissance sont indissociables pour l'apprentissage de la discipline puisque leur traitement permet d'amener les élèves à passer de l'espace sensible vers un espace plus abstrait basé sur les propriétés des objets (Marchand, 2006). Chevallard et Julien (1991) présentent la discipline de la géométrie comme la constitution d'un monde géométrique à partir du monde sensible. Ce monde géométrique offre aux élèves des outils théoriques qui rendent possible la résolution de problèmes géométriques en tant que modélisation de problèmes réels (Perrin-Glorian *et al.*, 2013). L'articulation entre la maîtrise de ces deux espaces, tant par l'enseignant que par l'élève, constitue un écueil de l'enseignement-apprentissage de la géométrie (Berthelot & Salin, 1992).

Marchand (2006) définit la connaissance spatiale comme un « *processus qui, par le biais des cinq sens, amène l'apprenant à contrôler, anticiper et communiquer les états, les transformations ou les déformations des données (forme, position, orientation) d'objets relatifs à l'espace en deux ou en trois dimensions* » (p.107). Ces connaissances permettent aux élèves de contrôler les relations usuelles qu'ils entretiennent avec l'espace sensible, c'est-à-dire les espaces visuels, tactiles et moteurs accessibles par les élèves et appréhendés par les sens (Berthelot & Salin, 1999-2000 ; Douaire *et al.*, 2009 ; Marchand, 2009). Dans ce contexte, toutes les activités de reconnaissance, de description, de fabrication et de transformation des objets, mais aussi de déplacement, de recherche et de communication de position d'objets, ou encore de reconnaissance, de description, de construction ou de transformation d'espaces (de vie ou de déplacement) sont des activités qui sollicitent les connaissances spatiales (Berthelot & Salin, 1999-2000). À titre d'exemple, l'anticipation de la forme et de l'apparence d'un objet 3D à partir de son développement relève des connaissances spatiales.

À l'inverse, les connaissances géométriques font davantage référence aux contenus scolaires, qui, en vue de créer un système cohérent, deviennent théorisés ou axiomatisés (Clements & Battista, 1992). Dès lors, elles impliquent l'acquisition de notions théoriques et font écho à du vocabulaire spécifique comme le nom des figures et des solides étudiés. Ces connaissances portent sur des objets idéaux ayant toutefois des représentations dans l'environnement familier des élèves (Douaire *et al.*, 2009). Les

tâches consistant à déterminer le nom, la définition ou les propriétés des figures et solides font par exemple appel à des connaissances géométriques.

Ces deux types de connaissance sont complémentaires lors de l'apprentissage de la géométrie puisque l'un de ses enjeux est la création d'une relation entre le champ des connaissances spatiales et géométriques (Soury-Lavergne & Maschietto, 2015). En plus d'être complémentaires, ces connaissances sont liées puisque d'une part l'acquisition des savoirs géométriques est influencée par la maîtrise des connaissances spatiales (Berthelot & Salin, 1999-2000 ; Baldy *et al.*, 2005). En effet, les connaissances spatiales sont des fondations pour les apprentissages géométriques (Battista *et al.*, 2018 ; Clements & Sarama, 2007, Soury-Lavergne & Maschietto, 2015) exerçant donc une influence positive sur ces derniers (Putri, 2017). D'après Mithalal (2014), la représentation mentale et la manipulation mentale des objets ont un impact sur la facilité d'apprentissage de la géométrie 3D, même si les facilités et difficultés relatives à l'enseignement-apprentissage du domaine ne se résument pas à cela.

D'autre part, la détention de connaissances géométriques, permettant la résolution des problèmes donnés, facilite la maîtrise des connaissances spatiales et permet un contrôle efficace des relations avec l'espace sensible (Berthelot & Salin, 1992). Soury-Lavergne et Maschietto (2015) évoquent pour illustrer cela que le développement de connaissances géométriques fournit un modèle de l'espace permettant le développement de connaissances spatiales.

4.1.5. Lien avec les habiletés visuo-perceptives et visuo-spatiales

Comme cela a pu être mis en évidence plus tôt dans le manuscrit, que ce soit dans les trois premiers chapitres, en évoquant l'importance du développement des habiletés spatiales, ou plus tôt dans ce chapitre, en évoquant les objectifs assignés à la géométrie et les connaissances en jeu, des liens forts existent entre l'apprentissage de la géométrie et les habiletés spatiales.

Le premier lien qui unit géométrie et habiletés spatiales relève du fait que l'apprentissage de la géométrie et notamment l'acquisition de savoirs géométriques et la résolution de problèmes de géométrie requièrent la maîtrise de connaissances et d'habiletés spatiales. (Baldy *et al.*, 2005 ; Battista, 1990 ; Berthelot & Salin, 1999-2000 ; Clements & Sarama, 2007 ; Mithalal, 2014 ; Putri, 2017). En fait, le raisonnement spatial peut servir de support à la mise en place d'un raisonnement géométrique, à condition

que les connaissances opérationnelles relatives aux propriétés et concepts géométriques soient intégrées dans le modèle mental (Battista *et al.*, 2018).

Pittalis et Christou (2010) soulignent que les habiletés spatiales de types visuo-perceptives et visuo-spatiales occupent une place particulièrement importante pour la réussite de l'apprentissage en géométrie 3D.

En géométrie, le développement des apprentissages et la résolution de problèmes impliquent l'encodage des informations visuelles relatives à diverses représentations de figures géométriques (Lowrie 2012). Ces représentations visuelles sont importantes dans l'apprentissage de la géométrie au primaire et au secondaire inférieur puisque cet apprentissage vise à étudier des objets géométriques idéaux ayant la particularité d'être qualifiés de « *représentables* » (Griva & Raftopoulos, 2014, p.258) dans la mesure où ils peuvent être représentés par des dessins, des images ou du matériel physique. Dans ce contexte, les habiletés visuo-perceptives sont des habiletés qui vont permettre de rendre réalisable l'encodage de ces informations et leur interprétation. De manière générale, ces habiletés interviennent ainsi dès qu'on confronte l'élève à du matériel physique et à des représentations de ce matériel (par exemple, les dessins en perspective), utilisés comme représentants de solides géométriques théoriques qui seront étudiés, par exemple pour développer les connaissances relatives aux propriétés des solides. La perception visuelle est décrite comme un facteur essentiel qui affecte la capacité à reconnaître les formes (Kalogirou *et al.*, 2013). Cette habileté de perception est particulièrement importante lors des premiers apprentissages géométriques puisque ces apprentissages se basent essentiellement sur des tâches de reconnaissance perceptive des formes usuelles (Coutat & Vendeira-Maréchal, 2022) ou sur la perception directe des objets et des effets de déplacements (Mathé *et al.*, 2020). D'autant qu'en l'absence de connaissances géométriques théoriques, comme cela peut être le cas chez les plus jeunes élèves, le raisonnement mis en œuvre est influencé par ce qui est perçu (Fujita *et al.*, 2020). Un déficit de perception des objets 3D pourrait entraîner une incompréhension des propriétés géométriques des objets étudiés. Même pour les élèves ayant des connaissances développées en géométrie, les difficultés visuelles relatives par exemple aux représentations 2D peuvent impacter leur compréhension (Widder *et al.*, 2019). Claisse (2020) décrit d'ailleurs la compréhension des objets 3D, que ce soit au départ de représentations 2D ou de maquettes utilisées pour les représenter, comme un obstacle incontournable en géométrie 3D. Dans la même logique, Gutiérrez (1996) évoque que le succès en géométrie 3D est souvent

associé à la capacité à se représenter mentalement des configurations géométriques 3D au départ de représentations 2D.

Si, certes, l'avancement dans le parcours scolaire invite à amener progressivement l'élève à passer d'une géométrie basée sur la perception, à une géométrie dans laquelle l'élève est capable de mettre en œuvre des opérations mentales (Duval, 2013), la perception reste pour autant toujours très prégnante dans le chef des élèves. L'auteur relève qu'une approche basée uniquement sur la perception, qui pourrait être qualifiée de botanique, peut mener à des impasses pour l'apprentissage, alors que la mise en place d'opérations mentales sur les objets géométriques reconnus par la perception, telles que des activités de déconstruction des formes, apparaît un enjeu essentiel. Griva et Raftopoulos (2014) confirment que la perception visuelle n'est pas suffisante pour l'acquisition des concepts géométriques, même si les mécanismes d'analyse structurelle appliqués aux objets perçus ou aux objets abstraits basés sur la perception apparaissent importants. Même si les représentations de ces concepts renvoient à des représentations perceptives, les auteurs rapportent que ces deux types de représentation sont à distinguer puisqu'elles diffèrent. Contrairement aux représentations perceptives, les représentations géométriques sont exclusivement centrées sur l'objet, elles sont analytiques, elles représentent des relations qualitatives et non orientées et sont dépourvues de dimension spatio-temporelle. De ce fait, lors de l'apprentissage de la géométrie, il est nécessaire de dépasser, à l'aide de mécanisme de transformation, les représentations perceptives au profit de représentations davantage conceptuelles.

De manière complémentaire, İbili *et al.* (2019) présentent les habiletés visuo-spatiales comme nécessaires pour améliorer la compréhension de la géométrie. En particulier, l'habileté de visualisation spatiale possède un rôle clé dans la compréhension de la géométrie (Gal & Linchevski, 2010) et dans la mise en œuvre d'une pensée spatiale (Elia *et al.*, 2018). En effet, lors de l'apprentissage de la géométrie, l'élève va procéder, au moins mentalement, à la mise en œuvre d'opérations sur les objets géométriques représentés, par exemple sur des représentations planes, afin de pouvoir les analyser, les enrichir, les transformer en vue de faire apparaître de nouvelles configurations ou les mettre à l'épreuve de conjectures (Mithalal, 2014). La visualisation offre une appréhension complète des formes perçues (Kalogirou *et al.*, 2013). Elle permet à l'élève de faire sens à l'espace et aux formes qu'il contient et constitue notamment un outil puissant lors de la résolution de problèmes

géométriques (Elia *et al.*, 2018). Plus spécifiquement, elle intervient dans la compréhension efficace des concepts en géométrie 3D, qui requiert des capacités de manipulation mentale de représentations d'objets géométriques 3D (Gutiérrez, 1992 ; Kaur *et al.*, 2018 ; Mjenda *et al.*, 2023). Ce lien est confirmé par Pittalis et Christou (2010) qui ont pu identifier une corrélation entre la visualisation spatiale, en particulier la capacité à imaginer des coupes d'objets, et la réussite en géométrie.

Outre ce premier lien, se rapportant à l'importance des habiletés spatiales pour l'apprentissage, un autre lien unit habiletés spatiales et géométrie (3D) comme l'illustrent les objectifs assignés au domaine : le cours de géométrie et particulièrement de géométrie 3D est un temps propice pour le développement de ces habiletés. L'enseignement de la géométrie, et notamment de la géométrie 3D, contribue en effet au développement d'habiletés spatiales chez les élèves (Mix & Cheng, 2012 ; Rohendi & Wihardi, 2020 ; Sinclair & Bruce, 2014). Ainsi, Gutiérrez (1992) présente les habiletés spatiales, telles que l'habileté de visualisation spatiale, comme des composantes fondamentales du contenu à enseigner en géométrie 3D.

Le cours de géométrie 3D est par conséquent doublement lié aux habiletés spatiales, à la fois parce qu'il nécessite des habiletés spatiales et également parce qu'il est l'un des lieux propices à leur développement.

4.1.6. Les niveaux de pensée en géométrie 3D en lien avec les habiletés spatiales

En prenant appui sur le modèle de van Hiele (1959) s'intéressant aux différents niveaux de pensées dans lesquels les élèves peuvent se situer en géométrie, Pegg (1997) développe un modèle portant spécifiquement sur l'évolution de la pensée dans les tâches d'identification et la comparaison des solides en géométrie. Cette adaptation proposée par Pegg (1997) se focalise sur les quatre premiers niveaux du modèle de van Hiele mais décompose le deuxième niveau du modèle en deux sous-niveaux (Tableau 1). Au niveau 1, les solides sont perçus de manière holistique par les élèves, c'est-à-dire en s'intéressant à l'objet dans sa globalité. S'ils peuvent arriver à identifier ou distinguer des solides, ils ne le font donc pas sur base des propriétés de ces derniers mais plutôt sur base de la forme globale, en considérant l'objet comme une entité totale. Même s'ils peuvent mentionner des composantes spécifiques du solide, comme ses arêtes, ses sommets ou ses faces, les élèves n'arrivent pas à se focaliser sur ces éléments pour

mettre en place leur raisonnement. Au niveau 2A, les élèves réalisent l'identification et la comparaison des solides sur la base d'une propriété spécifique des composantes du solide, généralement ses faces, et non plus à partir d'une forme globale. Par exemple, pour reconnaître un parallélépipède rectangle, les élèves peuvent utiliser le lien d'égalité qui existe entre les faces opposées de ce dernier. Un autre exemple relatif à la perception du cube consiste à s'appuyer sur la propriété qui souligne que les six faces du solide sont des carrés identiques. Situé dans le niveau 2B, les élèves traitent les composantes du solide et leurs propriétés comme des caractéristiques indépendantes du solide. Un solide est alors identifié par ses composantes ou les propriétés de celles-ci. Les propriétés, telles que la taille des angles, les angles et l'égalité des bords, sont exploitées mais ne sont pas reliées les unes aux autres. Dans le niveau 3, les élèves reconnaissent le potentiel des propriétés du solide. Les propriétés du solide sont ordonnées logiquement et les élèves développent leur raisonnement sur base de liens faits entre elles. Dès lors, une classification des familles de solides qui tient compte des propriétés devient possible. De manière générale, les élèves de ce niveau sont capables de réaliser des preuves simples et de la déduction informelle. Enfin, dans le niveau 4, les élèves développent leur capacité de raisonnement analytique et logique. Leur raisonnement est basé sur une preuve géométrique construite avec du sens en déterminant des conditions essentielles et nécessaires. Les liens entre le solide et ses propriétés, ou entre différents solides, sont structurés de façon à définir les solides géométriques.

Tableau 1 : Modèle des niveaux de pensées en géométrie 3D développé par Pegg (1997)

Niveau 1	Les figures sont identifiées selon leur apparence générale
Niveau 2A	Les figures sont identifiées à partir d'une propriété simple
Niveau 2B	Les figures sont identifiées à partir des propriétés qui sont vues comme indépendantes du solide
Niveau 3	Les relations entre les propriétés des figures identifiées précédemment sont établies comme des relations entre les figures elles-mêmes
Niveau 4	La déduction est comprise et les individus peuvent développer des preuves logiques. De multiples définitions peuvent être fournies à partir d'un minimum de propriétés

De leur côté, Kondo *et al.* (2014) proposent également un autre modèle de développement de la pensée, prenant appui sur le modèle de Van Hiele (1959) mais se focalisant sur l'évolution de la maîtrise de deux capacités essentielles pour interpréter des représentations 2D d'objets 3D mises en évidence par Pittalis et Christou (2013) :

la capacité des élèves à reconnaître les propriétés des objets géométriques 3D et à manipuler différentes représentations d'objets 3D (Tableau 2). Fujita *et al.* (2017) complètent ce modèle en décrivant le raisonnement géométrique utilisé par l'élève pour résoudre des tâches avec représentations 2D, les éléments sur lesquels il prend appui pour mettre en place ce raisonnement et, pour les quatre premiers niveaux, les sources de réponse incorrecte.

Tableau 2 : Modèle développé par Kondo et al. (2014) complété par Fujita et al. (2017)

Niveau	Capacité 1 : Raisonnement sur les propriétés 3D	Capacité 2 : Manipulation	Caractéristique de la pensée 3D	Complément d'informations apporté par Fujita et al. (2017)
1	Non	Non	La pensée est influencée par la représentation 2D	L'élève s'appuie sur des jugements globaux bidimensionnels ou intuitifs mais n'utilise pas la visualisation spatiale et le raisonnement spatial fondé sur des propriétés.
2A	Oui (mais inappropriée)	Non	Les élèves commencent à utiliser des propriétés 3D des formes, sans arriver à mettre en place une manipulation effective	L'élève s'appuie uniquement sur un raisonnement analytique spatial basé sur la propriété. Néanmoins, le raisonnement contient des lacunes logiques ou est influencé par des informations visuelles et/ou des connaissances incorrectes/inappropriées spécifiques au domaine.
2B	Oui (mais inappropriée)	Oui (mais inappropriée)	Les élèves utilisent des propriétés 3D des formes et arrivent à mettre en place une manipulation mais qui n'est pas appropriée	L'élève s'appuie uniquement sur la visualisation spatiale mais est influencé par une information visuelle et/ou une connaissance incorrecte/inappropriée spécifique au domaine.
2C	Oui (mais inappropriée)	Oui	Les élèves utilisent des propriétés 3D des formes et arrivent à mettre en place une manipulation appropriée mais n'aboutissent pas à une réponse correcte	L'élève combine la visualisation spatiale et l'utilisation d'un raisonnement analytique spatial basé sur la propriété, mais reste néanmoins influencé par une information visuelle et/ou une connaissance incorrecte/inappropriée spécifique au domaine.
3	Oui	Oui	Les élèves utilisent des propriétés 3D des formes, arrivent à mettre en place une manipulation appropriée et aboutissent à une réponse correcte	L'élève met en place une utilisation valide de la visualisation et du raisonnement analytique spatial basé sur la propriété, en exploitant des connaissances spécifiques du domaine correctes.

Dans le premier niveau (niveau 1), les élèves ne maîtrisent aucune des deux capacités susmentionnées. La pensée des élèves n'est alors influencée que par la représentation 2D. Dans le deuxième niveau, les élèves sont capables de raisonner sur les propriétés 3D, mais ce de manière non appropriée, ce qui les amène à des réponses incorrectes. En revanche, au niveau de la capacité de manipulation, cela peut varier, c'est pourquoi les auteurs proposent une découpe en trois sous-niveaux. Dans le niveau 2A, les élèves n'ont pas la capacité de manipulation de représentation. Dans le niveau 2B, ils ont cette capacité mais de manière inappropriée et enfin dans le niveau 2C, ils ont cette capacité sans qu'elle soit inappropriée. Pour finir, dans le troisième niveau, les élèves disposent à la fois des capacités de raisonnement sur les propriétés 3D et des capacités de manipulation, le tout de manière appropriée, ce qui permet d'aboutir à des réponses correctes.

4.1.7. Contenus relatifs à l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D en Belgique francophone

Au niveau des prescrits, malgré les objectifs variés pouvant être assignés à l'enseignement-apprentissage de la géométrie et témoignant de son importance (cf. 4.1.3), les évaluations des contenus curriculaires, réalisées par l'analyse des programmes d'études belges, français et québécois d'application en 2015 concluent que les contenus géométriques sont sous-représentés en opposition aux contenus algébriques (Duroisin, 2015 ; Duroisin & Demeuse, 2015). De manière plus générale, la place et l'importance de ce domaine au sein des prescrits ont été variables et remises en question dans de nombreux pays (Mathé *et al.*, 2020 ; Salin, 2008).

Comme cela a pu être brièvement abordé dans l'introduction générale, la Fédération Wallonie-Bruxelles (FWB) organise une réforme en profondeur de son système éducatif, nommée Pacte pour un enseignement d'excellence (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2017). La mise en vigueur d'un tronc commun allant de la première année de l'enseignement maternel à la troisième année de l'enseignement secondaire constitue l'un des chantiers de cette réforme. Avec cette réorganisation du parcours scolaire, une redéfinition des référentiels est mise en œuvre. Ainsi, si depuis une vingtaine d'années, les « Socles de compétences » (Ministère de la Communauté française, 1999) définissaient les compétences à développer chez les élèves du primaire et du premier degré secondaire, de nouveaux référentiels, nommés « référentiels du tronc commun » (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2022), définissent désormais les

savoirs, savoir-faire et compétences à développer aux différents niveaux de l'enseignement primaire et secondaire inférieur. Depuis 2022, ces nouveaux référentiels sont progressivement mis en application dans l'enseignement primaire, de façon à ce qu'ils soient d'application à tous les niveaux scolaires visés en 2028.

4.1.7.1. *Le contenu des Socles de compétences*

Les Socles de compétences, conçus en 1999 et encore d'application jusqu'en 2028 dans certains niveaux scolaires, définissent les compétences que les élèves belges francophones doivent acquérir jusqu'au premier degré secondaire (grade 8). Plus précisément, pour chaque discipline ou regroupement de disciplines, ils listent les compétences qui doivent être sensibilisées, certifiées ou entretenues pour la fin du grade 2 (niveau I), la fin du grade 6 (niveau II) et/ou la fin du grade 8 (niveau III). En mathématiques, ces compétences sont réparties dans quatre domaines : « Les nombres », « Les solides et figures », « Les grandeurs » et « Le traitement de données ». Spécifiquement, il est possible de remarquer que, sur les dix-huit compétences que compte la partie « Les solides et figures », cinq se rapportent à l'étude des objets 3D (Tableau 3).

Tableau 3 : Contenu de la partie « Les solides et figures » des Socles de compétences (partie « Formation mathématique ») relatif à l'étude des solides (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2022)

Compétences	Niveau I	Niveau II	Niveau III
Reconnaitre, comparer des solides et des figures, les différencier et les classer	À certifier : Sur base de la perception et de la comparaison avec un modèle	À certifier	À certifier : Sur base de leurs éléments caractéristiques pour les solides
Construire des figures et des solides simples avec du matériel varié	À sensibiliser	À certifier	À entretenir
Associer un solide à sa représentation dans le plan et réciproquement (vues coordonnées, perspective cavalière et développement)		À sensibiliser	À certifier
Construire un parallélépipède		À sensibiliser	À certifier
Dans une représentation plane d'un objet de l'espace, repérer les éléments en vraie grandeur		À sensibiliser	À certifier

Les contenus des référentiels confirment explicitement que l'habileté de perception visuelle intervient dans les compétences à certifier en FWB notamment à l'issue de la deuxième primaire, en vue de reconnaître, différencier et classer les solides. Toutefois, l'énoncé ne précise pas si cette compétence doit être certifiée au départ de matériel

physique uniquement ou si elle doit aussi être développée au départ d'autres types de représentation (ex. matériel virtuel, dessins en perspective). La perception des solides au départ de représentations planes est en revanche évoquée au travers de deux compétences devant être sensibilisées en fin de primaire et certifiées à l'issue du premier degré secondaire. Dans ces compétences, on observe que l'accent est mis sur certains modes de représentation, à savoir la perspective cavalière et les vues coordonnées. Notons cependant qu'en dépit de cette prescription, l'observation du contenu des évaluations externes certificatives (EEC) et non certificatives (EENC) menées en FWB, alors qu'elles sont censées être en adéquation avec les prescrits, confrontent les élèves à d'autres modes de représentation 2D d'objets 3D, par exemple des objets 3D représentés en projection axonométrique ou en perspectives linéaires (Beuset & Duroisin, 2023c). Une telle observation laisse sous-entendre qu'il est attendu des élèves qu'ils puissent jongler entre les différents modes de représentation.

Les référentiels confirment en outre la présence de l'habileté de visualisation spatiale lors des apprentissages en géométrie 3D, même si elle n'est pas citée explicitement dans le prescrit, puisqu'il est attendu que l'élève puisse passer d'un solide à son développement et inversement. Lorsqu'on s'intéresse au contenu des EEC et EENC réalisées en FWB, on peut d'ailleurs observer que des tâches similaires faisant appel à l'habileté de visualisation spatiale et impliquant des représentations 2D d'objets 3D sont proposées. C'est le cas notamment de quelques exemples illustrés en Figure 23. Ces tâches sont cependant relativement rares (Beuset & Duroisin, 2022).

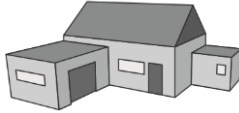
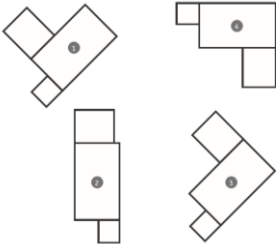

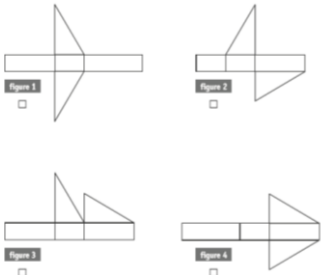
Item issu de l'EEC de fin d'enseignement primaire (CEB) de 2019	Item issu de l'EENC de fin de 1 ^{er} degré de l'enseignement secondaire (CE1D) de 2015
<p>Observe la maison ci-dessous.</p>  <p>Voici 4 plans, ENTOURE celui qui correspond à cette maison.</p> 	<p>Voici une représentation d'un prisme droit à base triangulaire.</p>  <p>COCHE les figures qui correspondent au développement de ce prisme.</p> 

Figure 23 : Exemples d'items d'évaluations externes nationales en Fédération Wallonie-Bruxelles pouvant faire intervenir l'habileté de visualisation spatiale au départ de représentations 2D

4.1.7.2. Le contenu des référentiels du tronc commun

Les référentiels de compétences du tronc commun, déjà d'application dans les premiers niveaux scolaires, poursuivent actuellement leur introduction. Si les compétences étaient définies en « niveaux » en regroupant plusieurs années scolaires au sein des socles de compétences, les référentiels du tronc commun proposent un découpage par année scolaire. De plus, ils définissent une liste des savoirs, des savoir-faire et des compétences que les élèves doivent avoir *a minima* acquis à chacune de ces années ainsi qu'un ou plusieurs attendus associés à chacun d'eux. Il n'est donc plus question d'une liste de compétences « à sensibiliser », « à certifier » et « à exercer » comme le proposaient les Socles de compétences.

Le référentiel de mathématiques est découpé en quatre domaines : « De l'arithmétique à l'algèbre », « Des objets de l'espace à la géométrie », « Des grandeurs à la relation entre variables » et « De l'organisation des données à la statistique ».

Au total, la partie « Des objets de l'espace à la géométrie » compte dix savoirs, quinze savoir-faire et quatre compétences à plusieurs niveaux scolaires, auxquels sont associés un ou plusieurs attendus. Parmi eux, un savoir, deux savoir-faire et une compétence, présentés dans le Tableau 4, portent spécifiquement sur l'étude des objets 3D. On y observe que du contenu relatif à la géométrie 3D (savoirs, savoir-faire et/ou compétences) est proposé à chacune des années de l'enseignement primaire. En secondaire inférieur, on observe uniquement du contenu relatif à la géométrie 3D lors de la deuxième année. Ce contenu repose en effet principalement sur l'étude des solides.

Si les prescriptions observées permettent de mettre en évidence que des compétences relatives à la lecture de représentations 2D de solides (perspective cavalière et vues coordonnées) doivent être développées au cours de la deuxième année de l'enseignement secondaire, ces prescriptions ne disent pas si les compétences à développer dans l'enseignement primaire (par exemple l'identification des solides) doivent être acquises au départ d'un matériel physique uniquement ou si elles doivent également l'être au départ de représentations 2D ou d'autres types de représentation comme des représentations virtuelles. Par exemple, lorsqu'il est question, lors de chacune des années de l'enseignement primaire, de développer le savoir relatif à l'identification des noms des solides, le référentiel ne dit pas aux enseignants à partir de quel(s) support(s) cette dernière doit se faire. Libre donc à

l'enseignant du primaire de travailler avec différents supports aux différents âges. Pour l'enseignant secondaire, il est question de travailler au moins au départ de représentations 2D puisque ces représentations sont l'objet de savoirs, savoir-faire et compétences à développer. Malgré ce flou dans les attendus des savoirs, savoir-faire et compétences associés à chaque année scolaire, l'énoncé général⁸ du savoir « Les solides, leurs composantes, leurs caractéristiques et leurs représentations planes » ou du savoir-faire « Établir des relations entre des objets en 3D et leurs représentations en 2D » pourrait inciter les enseignants à travailler au départ de matériel physique et de représentations 2D dès la première année d'enseignement primaire. Rien ne transparaît dans les prescriptions au sujet de l'utilisation des supports virtuels.

Si les savoirs, savoir-faire et compétences confirment la nécessité de l'habileté de perception visuelle de la 3D pour les apprentissages (ex. identifier les solides, identifier les composantes des solides et leurs caractéristiques), certaines compétences à développer, et ce aux différentes étapes du parcours scolaire, se rapportent à l'habileté de visualisation spatiale dans la mesure où elles exigent que les élèves mettent en place des opérations mentales sur les objets 3D étudiés. C'est le cas des attendus portant sur les empreintes (première et deuxième année de l'enseignement primaire), sur le développement des solides (troisième à sixième année de l'enseignement primaire), ou encore sur les sections (deuxième année de l'enseignement secondaire). Ce sont là des exemples de tâches qui ont précédemment été présentées comme impliquant l'habileté de visualisation spatiale (cf. 3.2).

⁸ Énoncé commun pour le savoir ou le savoir-faire qui se décline chaque année en un attendu précis.

Tableau 4 : Contenu de la partie « Des objets de l'espace à la géométrie » du référentiel du tronc commun relatif à la géométrie 3D (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2022)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	S1	S2	S3
Savoirs Les solides, leurs composantes, leurs caractéristiques et leurs représentations planes	Désigner cube, parallélépipède rectangle, cylindre, sphère.	Identifier cube, parallélépipède rectangle, cylindre, sphère.	Identifier cube, parallélépipède rectangle, cylindre, sphère, cône, pyramide.	Identifier cube, parallélépipède rectangle, cylindre, sphère, cône, pyramide.	Identifier polyèdre et non-polyèdre, cube, parallélépipède rectangle, cylindre, sphère, cône, pyramide, prisme	Identifier polyèdre et non-polyèdre, cube, parallélépipède rectangle, cylindre, sphère, cône, pyramide, prisme	/	Identifier des solides : cylindre, cube, parallélépipède rectangle, pyramide, prisme droit et cône.	/
	/	Identifier les composantes des solides travaillés : faces, arêtes, sommets.	Identifier les composantes des solides travaillés : faces, arêtes, sommets.	Identifier les composantes des solides travaillés : faces, arêtes, sommets.	Identifier les composantes des solides travaillés : faces, arêtes, sommets.	Identifier les composantes des solides travaillés : faces, arêtes, sommets.	/	/	/
	Désigner un objet courant correspondant à un solide similaire (cube, parallélépipède rectangle, cylindre, sphère).	Énoncer des caractéristiques des solides travaillés : nombre de faces, forme des faces, des faces de même empreinte.	Énoncer des caractéristiques des solides travaillés : nombre de faces, forme des faces, des faces isométriques.	Énoncer des caractéristiques des solides travaillés : nombre de faces, forme des faces, des faces isométriques	Énoncer des caractéristiques des solides travaillés : nombre de faces, forme des faces, des faces isométriques, faces parallèles, faces perpendiculaires.	Énoncer des caractéristiques des solides travaillés : nombre de faces, forme des faces, des faces isométriques, faces parallèles, faces perpendiculaires.	/	Identifier des figures et leurs caractéristiques dans une représentation en perspective cavalière d'un prisme droit (y compris d'un cube et d'un parallélépipède rectangle), d'une pyramide (y compris d'un tétraèdre) et d'un cylindre. Associer un prisme droit (y compris le cube et le parallélépipède rectangle), une pyramide (y compris le tétraèdre), un cylindre à une de ses représentations dans le plan (vues coordonnées, perspective cavalière) et réciproquement. Repérer les éléments en vraie grandeur dans une représentation plane d'un objet de l'espace.	/

Savoir-faire Construire des solides et des figures avec du matériel varié.	Reproduire des solides, à partir de modèles 3D donnés, avec du matériel varié (pâte à modeler, blocs ou boîtes à assembler...).	Reproduire des cubes et des parallélépipèdes à partir de modèles 3D donnés, avec du matériel varié (faces à assembler...).	Reproduire des cubes et des parallélépipèdes à partir de modèles 3D donnés, avec du matériel varié (faces à assembler...).	Construire des cubes et des parallélépipèdes avec du matériel géométrique varié (faces à assembler...).	Construire des prismes droits et des pyramides avec du matériel géométrique varié (faces à assembler...).	/	/	/
	Reproduire des solides, à partir de modèles 3D donnés, avec du matériel varié (pâte à modeler, blocs ou boîtes à assembler...).	Reproduire des cubes et des parallélépipèdes à partir de modèles 3D donnés, avec du matériel varié (faces à assembler...).	Construire un cube ou un parallélépipède rectangle à partir d'un développement tracé.	Construire un cube ou un parallélépipède rectangle à partir d'un développement tracé.	Construire des prismes droits et des pyramides avec du matériel géométrique varié (faces à assembler...).	Construire des prismes droits et des pyramides avec du matériel géométrique varié (faces à assembler...).	/	/
Savoir-faire Établir des relations entre des objets en 3D et leurs représentations en 2D	Associer les empreintes produites par les faces d'un solide aux figures géométriques (carré, rectangle, disque, triangle).	Associer une empreinte produite à une des faces d'un solide.	Reconnaître les figures possibles correspondant aux faces des solides observés.	Reconnaître les figures possibles correspondant aux faces des solides observés.	Reconnaître les figures possibles correspondant aux faces d'un assemblage de maximum trois cubes.	Reconnaître les figures possibles correspondant aux faces d'un assemblage de maximum cinq cubes.	/	/
	Dessiner le contour de toutes les faces d'une boîte parallélépipédique ou cubique donnée.	Dessiner le contour de toutes les faces d'une boîte parallélépipédique ou cubique donnée.	Représenter le développement d'un cube et d'un parallélépipède rectangle, en dessinant le contour de toutes ses faces.	Représenter le développement d'un cube et d'un parallélépipède rectangle, en dessinant le contour de toutes ses faces.	Tracer, à la latte, un développement d'un cube ou d'un parallélépipède rectangle, sur papier trame.	Tracer, à la latte et à l'équerre, un développement d'un cube ou d'un parallélépipède rectangle, sur papier vierge.	/	/

/	/	/	/	/
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/

Compétences
 Articuler, en contexte, les caractéristiques puis les propriétés des solides et des figures, les procédés de construction.

4.1.8. Les supports d'apprentissage en géométrie 3D

Comme cela vient d'être mis en évidence, les prémices de l'apprentissage de la géométrie 3D passent notamment par l'identification des solides, par l'énoncé de leurs caractéristiques ou encore par leur classement. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de confronter visuellement les élèves à des représentations de ces objets théoriques qui vont faire l'objet d'apprentissages. Selon Claisse (2020), trois techniques peuvent être utilisées pour représenter les solides étudiés dans l'enseignement secondaire et se rapportent à trois types de support. D'abord, les solides peuvent être représentés par des représentations 2D, le plus fréquemment en perspective cavalière. Ensuite, ils peuvent être représentés aux élèves au travers de matériel physique en trois dimensions (solides en bois, solides en plexiglas, objets du quotidien). Enfin, le développement des technologies et l'augmentation de la place qui leur est laissée dans les établissements scolaires, par exemple pour les interfaces tactiles (Bertolo *et al.*, 2015), entraînent une augmentation des possibilités de matériel à utiliser lors de l'apprentissage, avec des solides pouvant être présentés au sein d'environnements virtuels en 2 ½ D, offrant ainsi des représentations dynamiques en perspective de ces solides. Il est possible d'étendre cette triple possibilité de technique pour les apprentissages de l'enseignement primaire, même si la fréquence d'utilisation de chacune d'elles est certainement différente.

Par ailleurs, outre la fonction d'illustration d'objets théoriques, plusieurs autres fonctions peuvent être associées aux différentes représentations d'objets 3D pouvant être utilisées lors de l'apprentissage⁹ (Mithalal, 2014). Ces dernières ont également, dans le cadre notamment de la résolution de problèmes, une fonction de prise en charge d'hypothèses géométriques mais aussi une fonction d'expérimentation accompagnant la mise en place d'un raisonnement (recherche de solution, formulation de conjectures...).

Ces différentes possibilités de représentations, détaillées ci-dessous, offrent des avantages et des désavantages (Camou, 2012 ; Gutiérrez, 1992). Mithalal (2014) interroge d'ailleurs ces avantages et désavantages au regard des fonctions des représentations précédemment identifiées. De plus, selon le type de support utilisé, des tâches de nature différente sont induites (Bayart *et al.*, 1996).

⁹ Ces fonctions sont associées aux fonctions du dessin dans la résolution du problème en géométrie, que Mithalal (2014) généralise aux représentations pour la géométrie 3D.

Enfin, se pose également la question, pour le matériel physique et virtuel, de la place à accorder à la manipulation de ce matériel par l'élève.

Dans un premier temps, les recommandations relatives au support pour l'apprentissage de la géométrie 3D, mises en évidence dans la littérature sont présentées. Ensuite, en prenant principalement appui sur les résultats d'une enquête menée (Beuset & Duroisin, 2021 ; Beuset *et al.*, 2024b ; Seha *et al.*, 2023) auprès d'enseignants belges francophones et français du primaire et du secondaire, les pratiques mises en œuvre par les enseignants sont décrites.

4.1.8.1. Ce qu'en dit la recherche

Du côté de la littérature scientifique, malgré son importance pour le développement d'autres domaines des mathématiques, il apparaît que peu d'attention est accordée à la géométrie 3D dans le domaine de la recherche (National Council of Teachers of Mathematics, 2006). Belkhodja (2007) la présente comme l'un des parents pauvres de la discipline des mathématiques. Plus récemment, Haj-Yahya (2021) ou encore Saralar-Aras et Ainsworth (2020) font également la même observation en identifiant que la géométrie 2D domine la recherche sur l'enseignement de la géométrie et reçoit fondamentalement plus d'attention. En effet, au sein de la recherche en didactique des mathématiques et en sciences de l'éducation, la géométrie 3D constitue un domaine peu étudié, comme le soulevait déjà Chaachoua (1997, p.324) : « *la géométrie dans l'espace, moins étudiée dont on sait pourtant les difficultés d'enseignement et d'apprentissage grâce aux quelques travaux trop peu nombreux sur le thème* ». Qui plus est, les recherches menées se focalisent surtout sur les élèves plus âgés (Sinclair & Bruce, 2015). Plus spécifiquement, les recommandations basées sur des données probantes concernant les supports d'apprentissage à utiliser avec les élèves des différents niveaux scolaires pour apprendre la géométrie 3D sont peu nombreuses. Notons tout de même qu'une croissance est observée au sein de la littérature scientifique au niveau des études portant sur les connaissances spatiales et à leur développement (Lowrie *et al.*, 2018) mais celles-ci ne sont pas systématiquement mises en lien avec l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D. De plus, on retrouve un déficit dans ces recherches notamment pour ce qui est de l'étude des habiletés visuo-perceptives en environnement virtuel.

Ci-dessous sont évoquées les quelques recommandations ayant pu être identifiées concernant trois grandes catégories de supports : le matériel physique, les représentations planes et le matériel virtuel.

a. L'utilisation de matériel physique (3D)

Globalement, comme le précisent Douaire *et al.* (2009), il est possible de distinguer deux types de matériel physique : les solides sociaux et les solides géométriques. Les solides sociaux sont des objets qui existent dans le monde social environnant, par exemple des boîtes du quotidien, des meubles. Les solides géométriques, aussi appelés maquettes, sont des représentations d'objets mathématiques théoriques (cubes, cône...). Il peut s'agir de solides sociaux qui ont été épurés de toutes leurs propriétés qualitatives telles que leur matière ou leur couleur. On peut donc y inclure des solides en bois, en polystyrène ou en plexiglas.

Il ne fait aucun doute que la manipulation d'objets physiques occupe un rôle important pour l'apprentissage de la géométrie 3D (Audibert & Bonafé, 1986 ; Bakó, 2003 ; CREM, 2002 ; Douaire *et al.*, 2009 ; Grenier & Tanguay, 2008 ; Mithalal, 2014 ; Parzys, 1988, 1991). Ce matériel qui représente directement et de manière fidèle les solides géométriques qui vont être étudiés, permet de faire le lien entre les concepts théoriques abstraits et le concret. Cela permet ainsi d'assurer la fonction d'illustration au départ d'un simple « *examen visuel "naïf"* » (Mithalal, 2014, p.62). De plus, Bujak *et al.* (2013) relèvent que relier des concepts éducatifs abstraits à l'espace sensible et aux actions dans cet espace peut augmenter la rétention des connaissances, d'autant que le matériel physique, puisqu'il propose des interactions naturelles, peut faciliter l'expérience éducative.

Il semble y avoir un consensus sur le fait que ce type de support est particulièrement important au début des apprentissages, en vue d'acquérir notamment la notion de corps 3D, qui apparaît être fondamentale pour la suite des apprentissages (Camou, 2012). À ce propos, Bonafé et Sauter (1998) recommandent, dans la découverte des solides, de commencer par une première phase de manipulation d'objets 3D, en utilisant des objets de la vie courante ainsi que des objets construits par les élèves, avant de poursuivre avec une phase d'apprentissage de la représentation de ces objets. Cette phase permet l'encodage des images mentales de ces objets géométriques 3D (Mithalal, 2014). Par ailleurs, elle permet également de faire en sorte que les élèves acquièrent le vocabulaire de base nécessaire pour la suite (Bonafé & Sauter, 1998).

Malgré tout, on retrouve peu d'indications concernant l'âge ou le moment du parcours scolaire à partir duquel il est possible de se détacher en partie ou totalement de ce matériel au profit d'autres représentations plus abstraites. Pourtant ce détachement apparaît nécessaire puisque Mithalal (2014) associe quatre limites à ce type de matériel. Premièrement, si la perception des objets est rendue plus performante avec ce matériel pour les raisons précédemment évoquées, ce matériel n'offre que très peu d'informations géométriques. Pourtant, disposer de ces informations est nécessaire pour se placer dans une géométrie déductive. Deuxièmement, à l'instar du dessin en géométrie plane, il ne permet pas de maintenir une distance entre l'objet théorique étudié et le matériel manipulé. La troisième limite évoquée concerne le fait que ce matériel ne laisse qu'une place limitée à la prise en charge d'hypothèses géométriques. Enfin, ce matériel est peu manipulable dans une perspective de fonction d'expérimentation. Il est par exemple difficile de faire apparaître des configurations spécifiques en effectuant des tracés sur celui-ci, notamment lorsque cela concerne des éléments internes du solide.

b. L'utilisation de représentations 2D

Si la manipulation de vrais objets est indispensable, le travail sur les représentations planes constitue une étape cruciale également. Dans les apprentissages scolaires en géométrie 3D, traditionnellement, les dessins 2D sont les modes de représentation externes les plus souvent utilisés pour représenter des objets 3D, particulièrement les dessins en perspective cavalière. C'est le cas par exemple dans les manuels de cours, ou encore lors d'évaluations de type papier-crayon. De plus, elles ont une profonde signification culturelle (CREM, 2002).

La construction d'une bonne image mentale des objets 3D à partir de leur représentation plane est considérée comme la « *pierre angulaire* » de la pensée géométrique en 3D (Pittalis & Christou, 2013, p.673). Cela représente un vrai challenge compte tenu des différences entre les représentations planes et les objets 3D représentés (Ferrara & Mammana, 2014). Les comprendre constitue un besoin pour l'apprentissage de la géométrie afin que l'élève puisse accéder aux connaissances. Il s'agit d'un prérequis pour réussir à acquérir des compétences dans ce domaine à l'école secondaire (Gutiérrez, 1996).

Lors de l'apprentissage de la géométrie 3D, les représentations 2D peuvent avoir plusieurs statuts : elles peuvent être considérées comme un objet physique à part

entière, comme un modèle de l'objet géométrique ou comme un modèle de l'objet physique (Chaachoua, 1997). Dans le premier cas, le dessin est alors un objet d'étude sur lequel l'élève va devoir travailler. C'est le cas par exemple lors des tâches de comptage de cubes présents ou manquants dans une configuration. Dans le second cas, le terme « modèle » est utilisé au sens de Laborde (1992), pour le désigner comme un signifiant d'un objet géométrique qui est référent théorique. Le dessin permet de rendre compte, en partie, de propriétés de l'objet. Enfin, le dessin peut, dans certaines situations, être utilisé comme modèle d'un objet physique. Par exemple, au cours de l'enseignement primaire ou secondaire inférieur, des « objets physiques » de formes cubiques sont modélisés par des dessins, en vue d'étudier leurs propriétés.

Quel que soit le statut qu'occupent de telles représentations, lorsqu'elles sont utilisées lors des apprentissages, les élèves sont amenés à les percevoir correctement en vue de développer les apprentissages. Pourtant, dès le chapitre 2, des difficultés rencontrées dans la perception des objets 3D représentés ont été mises en évidence. Ces difficultés sont notamment associées aux aberrations visuelles que contiennent les représentations 2D ou à la perte d'informations qu'elles engendrent, même si certains modes de représentation, comme la perspective cavalière, conservent de nombreuses propriétés. Ces difficultés sont confirmées dans le contexte des apprentissages scolaires puisque les élèves rencontrent des difficultés à associer des solides à leur représentation plane (Bertolo, 2013 ; Gonzalès, 2015, cité par Demitriadou *et al.*, 2020) et une forte hétérogénéité des capacités des élèves à ce sujet est observée (Claisse, 2020).

Les difficultés observées chez les élèves à ce sujet ne sont évidemment pas sans conséquence pour l'apprentissage. D'après Claisse (2020), de nombreuses expérimentations ont montré que, pour un certain nombre d'élèves, un enseignement prenant appui exclusivement sur les représentations 2D en perspective sur papier n'apparaît pas efficace. Si les représentations sont utilisées pour illustrer les objets théoriques qui vont être étudiés, les difficultés de perception risquent d'occasionner des images mentales incorrectes de ces objets puisqu'elles se heurteraient aux propriétés abusivement perçues à cause des aberrations (Mithalal, 2014). İbili *et al.* (2019) rapportent que cela peut notamment complexifier la compréhension des propriétés des composantes des objets 3D, telles que le nombre de faces, caractéristiques des faces... De même, la fonction de prise en charge d'hypothèses pourrait se heurter à ces mêmes aberrations (Mithalal, 2014). De plus, ce type de

support est peu adapté à la fonction d'expérimentation dans le cadre de la résolution de problèmes (Chaachoua, 1997). Il est par exemple difficile, voire impossible, d'exhiber des contre-exemples sur le dessin tant le modifier le rend rapidement illisible (Mithalal, 2014).

Si les représentations planes sont un moyen d'accéder aux connaissances, elles sont aussi un objet d'apprentissage à part entière, comme en attestent par exemple les référentiels de compétences en Belgique francophone. En effet, la perception des représentations planes fait l'objet d'un apprentissage à part entière, passant notamment par l'apprentissage des conventions relatives au mode de représentation. Il s'agit alors de fournir aux élèves les clés pour maîtriser de telles représentations, notamment pour comprendre la perte d'informations et les aberrations visuelles occasionnées par de telles représentations. Ceci soulève un paradoxe : « *pour apprendre la géométrie, on doit s'appuyer sur les représentations planes, mais pour comprendre les représentations planes (dont la plupart sont des projections), on a besoin de la géométrie* » (CREM, 2002, p.56).

Il apparaît dès lors important de se demander à quel moment de la scolarité il est pertinent d'introduire de telles représentations lors des apprentissages. À ce sujet, Bonafé et Sauter (1998) évoquent que l'utilisation de représentations doit intervenir dans un deuxième temps, après l'utilisation de matériel physique. Toutefois, le passage de l'étude des solides avec manipulation de matériel physique au travail sur des représentations peut poser des difficultés (Ferrara & Mammana, 2014).

S'il est possible de proposer aux élèves de travailler avec une représentation 2D d'objet 3D, Haj-Yahya (2021) a investigué la possibilité de travailler avec des représentations multiples d'objets 3D, en proposant à des élèves de fin d'enseignement secondaire de résoudre des problèmes de preuve avec plusieurs représentations planes. L'étude relève une corrélation positive entre les bonnes réponses données et le nombre de représentations fournies. En effet, les élèves qui reçoivent plusieurs diagrammes donnent davantage de réponses correctes et fournissent des preuves plus complètes et contenant moins d'erreurs. Aucune étude similaire n'a été répertoriée pour les élèves plus jeunes.

c. L'utilisation de représentations 2 ½ D

Les représentations virtuelles d'objets 3D constituent également des possibilités de matériel pour l'enseignement-apprentissage de la géométrie, qui pourraient s'avérer

efficaces pour aider l'élève à faire des liens entre les objets de l'espace sensible et leur projection en 2D (Vivian *et al.*, 2014) et ainsi régler les problèmes liés aux supports 2D (Rodríguez *et al.*, 2021).

Dans le cadre spécifique de l'apprentissage de la géométrie 3D, deux grandes catégories de logiciels permettant d'offrir à l'élève des représentations 2 ½ D d'objets 3D : les logiciels de géométrie dynamique et les outils de manipulation virtuels offrant la possibilité de manipuler des représentations virtuelles de solides. S'ajoutent à cela d'autres logiciels impliquant des simulations de l'espace 3D, non initialement conçus pour l'apprentissage de la géométrie mais étant exploités comme tel (ex. logiciel de modélisation 3D, logiciels d'architecture).

Dans tous les cas, ces logiciels proposent un micromonde, défini par Soury-Lavergne (2020) comme un environnement informatique offrant à l'utilisateur la possibilité de manipuler directement des représentations graphiques en vue d'explorer un monde d'objets se comportant suivant des lois mathématiques.

Au niveau des modalités d'interaction, on peut retrouver des modalités différentes selon les logiciels, allant d'interactions plus traditionnelles (souris) ou à des interactions plus modernes par exemple via un système de réalité virtuelle immersive (Cangas *et al.*, 2019 ; Lai *et al.*, 2016 ; Lu *et al.*, 2023). Le développement des outils et des moyens d'interaction occasionne avec lui de nouvelles méthodes d'apprentissage offrant des interactions différentes impliquant davantage les sens et entraînant une révolution dans le domaine de l'éducation (Rodríguez *et al.*, 2021).

- Les logiciels de géométrie dynamique :

Dans la littérature, on constate un réel intérêt quant à l'utilisation d'un type de logiciel permettant d'intégrer, voire de faire construire, des objets géométriques au sein d'environnements virtuels : les logiciels de géométrie dynamique (Christou *et al.*, 2006 ; Mithalal, 2010 ; Soury-Lavergne, 2020). Dès les années 90, ces logiciels ont fait l'objet de travaux (Mathé *et al.*, 2020) de plus en plus importants. Ils continuent encore aujourd'hui d'être un sujet d'étude dans les recherches sur l'enseignement des mathématiques (Rodríguez *et al.*, 2021). De nos jours, ils sont probablement les logiciels les plus fréquemment utilisés lors de l'apprentissage de la géométrie. Ils possèdent aujourd'hui une place effective dans les pratiques même si les enseignants ne mobilisent pas toujours leur plein potentiel (Soury-Lavergne, 2020).

Ces logiciels, fonctionnant principalement sur ordinateur, sont des logiciels permettant la construction de figures dynamiques en suivant une procédure basée sur des propriétés et la modification de ces figures tout en conservant ces propriétés. Ces logiciels se basent donc sur l'application de transformations continues appliquées sur des objets représentés virtuellement mais ne permettant que de modifier les attributs non critiques des objets tout en préservant les attributs critiques. Ainsi, si une droite a été définie dans le logiciel comme parallèle à une droite donnée, la seule modification directe sur la droite est de modifier sa position par rapport à la droite parallèle donnée. Quelle que soit la modification opérée, la droite restera parallèle à la droite donnée. De ce fait, la fonction de déplacement constitue une fonctionnalité centrale de ces logiciels.

Plusieurs recherches mettent en avant le potentiel de ces logiciels pour l'apprentissage de la géométrie. Ces dernières relèvent que le principe de base qui sous-tend ces logiciels est intéressant puisqu'il peut permettre de favoriser la concentration des élèves sur les relations mathématiques et invariances (Sinclair & Bruce, 2014), ce qui peut participer à leur entrée dans une démarche de preuve prenant appui sur les propriétés. Ils peuvent ainsi renforcer le passage à une géométrie davantage axiomatisée et mettent en lien les connaissances spatiales et géométriques (Athias, 2015 ; Coutat-Gousseau, 2014 ; Mithalal, 2010 ; Soury-Lavergne, 2020 ; Voltolini, 2013). Par ailleurs, ces logiciels permettent de combiner la géométrie avec le calcul et l'algèbre (Kaur *et al.*, 2018). Si la majorité des logiciels de géométrie dynamique ont été conçus pour aborder la géométrie 2D et si l'intérêt de tels supports semble faire l'objet d'une certaine évidence pour cette partie de la géométrie, quelques logiciels de ce type sont dédiés à la 3D, par exemple *Cabri 3D*, *Geogebra 3D* (Figure 24), *Geospace*. Toutefois, les recherches portant sur l'effet de l'utilisation de la géométrie dynamique en géométrie 3D sont encore aujourd'hui insuffisantes (Rodríguez *et al.*, 2021). Même si ces logiciels permettent aux élèves de construire et d'effectuer des manipulations directes d'objets 3D en prenant appui sur les propriétés de ces objets, les auteurs soulignent différents manques à leur sujet dans la littérature. Des interrogations portent encore aujourd'hui notamment sur le degré d'influence des représentations virtuelles entraînées par ces environnements mais aussi sur le rôle de tels supports sur la perception et la compréhension des caractéristiques des solides géométriques étudiés.

Au-delà de ces différentes questions restant en suspens, de tels logiciels ne sont pas adaptés pour aborder la thématique des solides au primaire et secondaire inférieur (Bertolo, 2014). Ces environnements sont complexes. Ils nécessitent que l'utilisateur dispose de bonnes connaissances informatiques (Kaur *et al.*, 2018) et les possibilités de manipulation d'objets 3D qu'ils proposent sont peu évidentes pour les élèves de ces niveaux scolaires. De plus, l'appropriation de la fonctionnalité de déplacement, centrale dans ces logiciels, est complexe pour les élèves (Soury-Lavergne, 2020). Toujours en interrogeant quelques enseignants du primaire et du secondaire inférieur en France, Bertolo (2013) a pu mettre en évidence que la plupart d'entre eux considèrent les logiciels de géométrie dynamique comme inadaptés pour aborder la géométrie 3D avec les élèves âgés de moins de 15 ans.

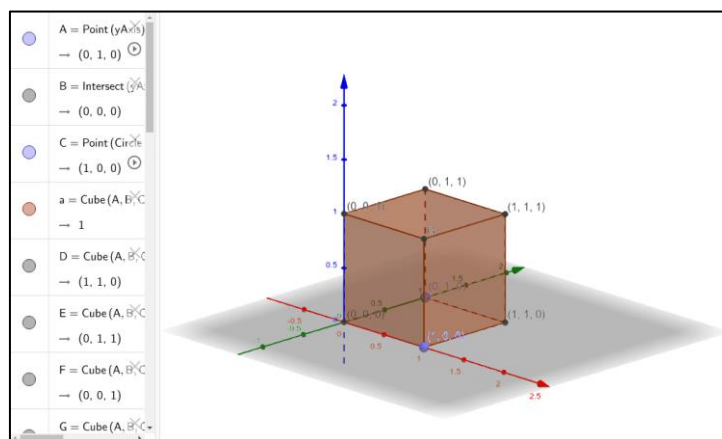


Figure 24 : Illustration du logiciel de géométrie dynamique Geogebra 3D

- Les outils de manipulation virtuels (« virtual manipulative ») intégrant des solides :

Les outils de manipulation virtuels mathématiques peuvent être définis comme des ressources accessibles via des moyens technologiques (Drijvers, 2012, cité par O'Meara *et al.*, 2019) offrant des représentations visuelles et interactives d'un objet dynamique présentant des opportunités pour la construction de connaissances mathématiques (Moyer *et al.*, 2002). Si ces éléments de définition font consensus, on retrouve dans la littérature des divergences dans les caractéristiques attribuées à ces matériels, probablement dues aux évolutions technologiques. La première divergence porte sur la méthode de fonctionnement de ces outils de manipulation. Si à l'origine, ces outils sont décrits comme fonctionnant via Internet (Moyer *et al.*, 2002), ces matériels peuvent être utilisés via des applications ne nécessitant pas forcément Internet (Bujak

et al., 2013). L'autre divergence concerne l'interface de manipulation puisqu'au départ, les outils de manipulation fonctionnaient via la souris alors que, comme évoqué précédemment, d'autres modalités d'interaction sont désormais possibles, comme l'interaction via interface tactile ou encore via la réalité augmentée (Demitriadou *et al.*, 2020 ; Liu *et al.*, 2018 ; Rohendi & Wihardi, 2020). Ainsi, une quinzaine d'années après la première définition formulée, Moyer-Packenham et Bolyard (2016) définissent les outils de manipulation virtuels comme des représentations visuelles, interactives et technologiques d'un objet mathématique dynamique pouvant être manipulé et offrant l'opportunité de construire des connaissances mathématiques.

Ces logiciels, quelle que soit leur interface de manipulation, peuvent permettre de transposer virtuellement des outils de manipulation mathématiques physiques¹⁰, c'est-à-dire des objets qui visent l'encouragement de la pensée mathématique consciente ou inconsciente par la manipulation sensorielle (Swan & Marshall, 2010), en offrant une réplique visuelle et dynamique de ces outils d'exploration physique (Bujak *et al.*, 2013 ; Moyer et al., 2008). À titre d'illustration, il est possible de citer le Géoplan virtuel, qui est la reproduction virtuelle des matériels Géoplan, c'est-à-dire de planches cloutées et des élastiques (Figure 25).

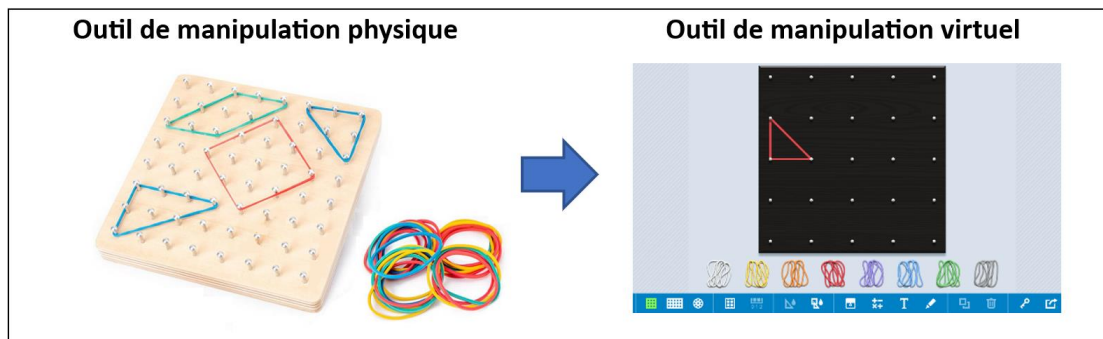


Figure 25 : De l'outil de manipulation physique à l'outil de manipulation virtuel : l'exemple du Géoplan

Au-delà d'une réplique de matériel de manipulation physique, ces outils peuvent aussi offrir l'opportunité de manipuler du matériel faisant écho à des concepts difficiles à explorer dans le monde physique (Bujak *et al.*, 2013).

¹⁰ Les outils de manipulation physiques sont aussi appelés *outils de manipulation concrets* (Drijvers, 2012, cité par O'Meara et al., 2019). Toutefois, le terme physique est privilégié dans ce travail puisque, à l'instar de Clements (1999), il est ici considéré que le terme « concret » n'est pas forcément à rapprocher des objets physiques.

Dans les deux cas, il s'agit de proposer un environnement virtuel dans lequel l'élève peut manipuler des objets. Zbiek *et al.* (2007) vont jusqu'à les qualifier d'outils technologiques cognitifs, considérant qu'ils permettent aux élèves d'agir sur le matériel de manipulation virtuel en tant que représentations d'objets et qu'ils offrent un feedback visuel permettant à l'individu d'observer les conséquences des manipulations réalisées. Évidemment, ce type d'outils n'est pas propre à la géométrie puisqu'on retrouve des outils numériques de ce type permettant d'aborder l'algèbre ou l'arithmétique (par exemple les tuiles algébriques). Néanmoins, la géométrie constitue un des domaines des mathématiques pour lequel de tels outils, par exemple le Géoplan, ou le tamgram virtuel, sont le plus souvent utilisés par les enseignants (Moyer *et al.*, 2001).

Plus spécifiquement, dans le domaine de la géométrie 3D, on retrouve plusieurs possibilités d'outils de manipulation virtuels. Les logiciels permettant de générer et de manipuler des assemblages de cubes en font partie (Žilková & Partová, 2019). On retrouve également des logiciels permettant la manipulation de solides virtuels, par exemple l'application *Shapes 3D* (Figure 26). Les solides virtuels sont en fait la réplique virtuelle du matériel de manipulation 3D classiquement utilisé lors de la découverte des solides géométriques, c'est-à-dire les objets physiques à manipuler (ex. solides en bois, solides en plexiglas, boîtes du quotidien). Il s'agit de solides représentés virtuellement et que les utilisateurs vont pouvoir manipuler. Si, dans l'espace sensible, les manipulations restent limitées (principalement des modifications de la position de l'objet dans l'espace), les outils de manipulation virtuels offrent davantage d'opportunités de manipulation, et ce compris des manipulations difficiles à réaliser sur du matériel physique. La plupart de ces environnements offrent à l'utilisateur la possibilité d'exercer au moins trois types de manipulation sur des solides présentés virtuellement : des rotations des solides sur eux-mêmes, des translations du solide dans l'environnement virtuel et des homothéties permettant d'agrandir ou de réduire la taille du solide. Certains proposent d'autres options comme la possibilité de modifier l'apparence des solides en les rendant transparents ou non, de mettre en évidence des éléments caractéristiques du solide comme ses faces, de tracer des segments sur l'objet 3D, d'opérer au développement du solide au travers d'une animation dynamique permettant de visualiser l'étape de développement ou encore de visualiser des coupes de solides.

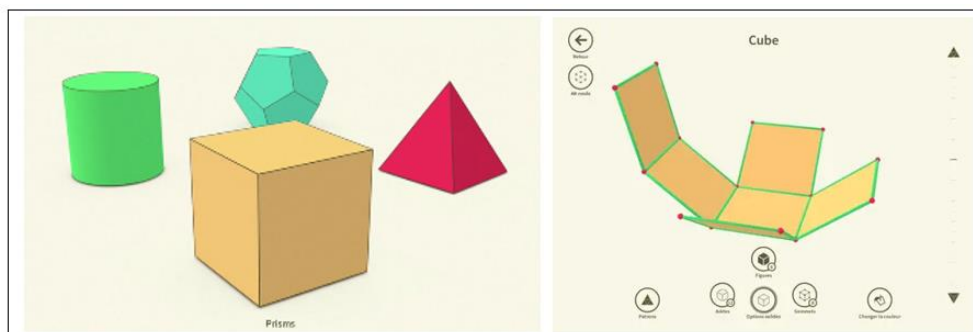


Figure 26 : Illustration de l'application Shapes 3D

Bien qu'ils partagent la caractéristique commune de pouvoir confronter l'élève à des représentations virtuelles d'objets 3D, les outils de manipulation virtuels sont donc à dissocier des environnements de géométrie dynamique. D'une part, contrairement aux outils de manipulation virtuels, les environnements de géométrie dynamique n'ont pas ou peu de rapport avec les outils de manipulation physiques (Sinclair & Bruce, 2015). D'autre part, les outils de manipulation virtuels offrent des environnements apparaissant moins complexes que les logiciels de géométrie dynamique ou que ceux de modélisation 3D dans la mesure où les manipulations offertes sont plus restreintes. Cette restriction reste cohérente avec les différences de buts assignés à ces types de matériel. L'objectif des solides virtuels, contrairement aux environnements de géométrie dynamique, n'est pas la modification de certaines caractéristiques spécifiques (position d'un sommet...) en vue de vérifier les transformations qu'elles occasionnent sur le solide, ni même la création par l'utilisateur d'objets 3D ou de configuration d'objets 3D au départ de leurs caractéristiques, mais uniquement la manipulation d'un contenu imposé qui leur est assigné dans l'environnement virtuel. Ce type de support apparaît donc en cohérence avec les compétences de découverte des solides et de leurs caractéristiques, attendues au primaire et au secondaire.

- Forces et limites des représentations 2 ½ D :

Les représentations dynamiques manipulables dans des environnements virtuels pourraient avoir du potentiel pour l'apprentissage de la géométrie 3D (Accascina & Rogora, 2006 ; Bakó, 2003 ; Flores-Bascuñana *et al.*, 2020 ; Gutiérrez, 1996 ; Haj-Yahya, 2021 ; Lai *et al.*, 2016 ; Markopoulos *et al.*, 2015). Les avantages associés aux représentations virtuelles, développés ci-dessous, invitent Bruce et Sinclair (2014) à reconsidérer l'idée selon laquelle le matériel physique est le matériel le plus approprié pour développer les apprentissages en géométrie.

Manipuler des objets 3D au travers de leur représentation 2 ½ D offre l'opportunité d'interconnecter les connaissances des objets physiques, les représentations symboliques de ces objets mais aussi les actions menées sur ces objets et ces représentations (Bruce & Sinclair, 2014). Leur utilisation lors de l'apprentissage pourrait donc constituer un soutien au développement de connaissances concrètes intégrées. Bertolo (2013) a notamment pu relever que ce type de matériel était susceptible d'aider les élèves lors de la résolution d'exercices de géométrie 3D.

Le caractère dynamique des représentations encourage les élèves à prendre en charge de multiples perspectives pour observer des objets, comme s'ils prenaient différentes positions physiques. Cela les met à la recherche des similarités et différences, des invariants et des changements dans les observations (Ferrara & Mammana, 2014) et peut aider à comprendre le concept d'objet 3D (Rohendi & Wihardi, 2020). Mithalal (2010, 2014) associe d'ailleurs à ses représentations une « meilleure fonction d'illustration », notamment en offrant la possibilité d'observer l'objet sous différents points de vue. Cette fonction permet ainsi de combler le vide existant entre le matériel physique et les représentations planes. Grâce à ce caractère dynamique, des images conceptuelles des concepts géométriques peuvent être développées (Accascina & Rogora, 2006). L'usage de tels outils pourrait ainsi participer à la consolidation et à l'enrichissement des images mentales des objets étudiés chez les élèves occasionnant alors une meilleure visualisation des représentations qu'avec des représentations statiques (Christou *et al.*, 2006 ; Gutiérrez, 1996). Les manipulations dynamiques des objets virtuels permettent notamment la construction des propriétés des figures (Patsiomitou & Emvalotis, 2010, cités par Jones & Tzekaki, 2016). De plus, l'apprentissage mené au départ d'informations dynamiques permet de compenser les déficits de capacité spatiale créés par les informations statiques (Höffler & Leutner, 2011). En ce sens, elles pourraient aider les élèves qui ont des difficultés face à des représentations statiques, notamment des difficultés à s'imaginer les différentes faces d'objets géométriques présentés (Rohendi & Wihardi, 2020).

En complément, de nombreux auteurs, à l'instar de Nagy-Kondor (2010), ont souligné que les technologies, en offrant la possibilité d'agir sur des représentations dynamiques, peuvent aider au développement de la vision dans l'espace et plus largement de la pensée spatiale. Cette idée semble confirmée par Rodríguez *et al.* (2021) au sujet de l'utilisation d'un environnement de réalité virtuelle immersive dédié

à l'apprentissage de la géométrie 3D (*NeoTrie*) en fin d'enseignement primaire et en enseignement secondaire. Cangas *et al.* (2019) évoquent également que ce même logiciel permet de ne pas être confronté à certains problèmes rencontrés par les élèves dans les premières étapes de l'apprentissage de la géométrie 3D.

Audibert (1990) encourage lui aussi l'usage de représentations virtuelles de solides dans les premières phases d'apprentissage de la géométrie 3D en vue d'aider les élèves à comprendre le principe de représentation dans le plan d'un objet de l'espace. Dans le prolongement de cette idée, il a précédemment été mis en évidence que les environnements virtuels, par le biais d'outils informatisés offraient des conditions propices au développement des habiletés spatiales et notamment de l'habileté de visualisation (*cf.* 3.2.2). Plusieurs recherches ont pu spécifiquement confirmer cela concernant l'apprentissage de la géométrie 3D en mettant en évidence que l'apprentissage de la géométrie 3D avec environnement virtuel entraînait un meilleur développement des habiletés spatiales des élèves (Flores-Bascuñana *et al.*, 2020 ; Muntazhimah & Miatun, 2018 ; Nurjanah *et al.*, 2020). Cela constitue pour rappel une des finalités de la géométrie et un besoin pour le développement des apprentissages dans ce domaine.

Sophocleous et Pitta-Pantazi (2011) ont pu montrer que l'utilisation d'environnements virtuels 3D pouvait permettre aux enfants de fin d'enseignement primaire de développer leur créativité lors de la résolution de problèmes, en les incitant à trouver davantage de solutions uniques différentes. Les deux auteurs soulignent également le rôle que peuvent jouer ces environnements dans le développement de l'imagination, de la synthèse et des capacités de réflexion. Toujours en faisant écho au logiciel de réalité virtuelle *NeoTrie*, des effets positifs d'un tel matériel ont été observés sur le développement des compétences de raisonnement et d'argumentation (Rodríguez *et al.*, 2021) ou encore sur la résolution de problèmes, en particulier ceux exigeant une imagination spatiale ou un haut degré de difficulté (Cangas *et al.*, 2019).

Markopoulos et ses collègues (2015), en faisant écho davantage au cas particulier des environnements de géométrie dynamique, soulignent le rôle crucial que peuvent jouer les transformations dynamiques pour le développement de la pensée en géométrie 3D. Elles peuvent permettre de les rendre conscients du rôle des propriétés directes ou indirectes sur la formation du solide. En se focalisant sur les transformations, les utilisateurs peuvent commencer à prendre conscience de la relation entre les propriétés du solide et les effets de leurs modifications. Cela les incite

donc à dépasser la perception holistique, au profit d'une compréhension des relations abstraites entre les propriétés. En dépassant cette approche holistique, les élèves vont pouvoir plus facilement manipuler mentalement l'image mentale construite (Markopoulos *et al.*, 2015). De plus, outre, l'intérêt, déjà mentionné, pour l'entrée dans une démarche de preuve, un intérêt spécifique à la géométrie 3D réside dans la présence de rétroactions visuelles riches que ces logiciels offrent (Soury-Lavergne, 2020). D'après Mithalal (2010, 2014), les environnements de géométrie dynamique, en plus d'offrir une bonne fonction d'illustration, permettent également d'assurer la fonction d'expérimentation, ce que confirment Coutat et Richard (2011) et rappellent également Hollebrands et Okumus (2017). Cette fonction est assurée grâce aux possibilités de mise en œuvre de constructions fondées sur des propriétés. Enfin, la fonction de prise en charge d'hypothèses est quant à elle aussi assurée (Hollebrands & Okumus, 2017), et ce même si, d'après Mithalal (2014), cette fonction, tout en restant tout de même convenable, est limitée par les fonctionnalités de l'environnement.

Pour autant, l'usage de tels outils n'est pas sans limite et il est important de les considérer pour comprendre et anticiper les difficultés des élèves confrontés à ces outils. D'après Bertolo (2014), l'utilisation de telles technologies dans un contexte d'apprentissage de la géométrie 3D n'est pas naturelle. Elle est *a minima* moins intuitive que la manipulation de matériel physique (Bujak *et al.*, 2013). La manipulation d'une simulation de l'espace à partir d'une modalité d'interaction le plus souvent en deux dimensions (écran d'ordinateur, de tablette...) ne se fait pas sans difficulté étant donné le décalage dimensionnel entre l'élément représenté et le support (Cohé, 2012 ; Herndon *et al.*, 1994). À titre d'illustration, des difficultés sont parfois rencontrées par les utilisateurs, au niveau du contrôle de la vitesse et de la navigation dans l'espace (Yeh & Nason, 2004a). Ainsi, l'appropriation d'un environnement 2 ½ D par l'élève peut s'avérer ne pas être évidente (Hancock *et al.*, 2006). Bujak et ses collègues (2013) relèvent que cette capacité à interagir physiquement avec la technologie peut varier selon le niveau de développement de l'utilisateur. De plus, si des logiciels proposent une solution multifenêtrée (*cf.* Figure 11, p.49) offrant l'opportunité de manipuler uniquement des mondes en deux dimensions et donc de faciliter la manipulation (Hancock *et al.*, 2006), cette solution peut occasionner d'autres difficultés pour l'élève, notamment des difficultés d'interprétation. De tels logiciels sont donc difficilement transférables dans un contexte d'apprentissage chez l'enfant (Vivian *et al.*, 2014).

Toutes ces difficultés relatives à l'interaction avec le matériel virtuel d'apprentissage sont susceptibles d'occasionner une charge cognitive puisque son utilisation peut requérir des ressources en mémoire de travail diminuant ainsi le potentiel d'apprentissage (Bujak *et al.*, 2013).

Au-delà des difficultés de manipulation et d'appropriation des environnements virtuels, qui assez logiquement peuvent venir impacter les apprentissages scolaires, les élèves pourraient être confrontés à des difficultés à percevoir et à agir mentalement sur des représentations virtuelles de solides. Au même titre que des difficultés de perception visuelle et de visualisation spatiale sont mises en évidence pour les représentations 2D de solides, plusieurs raisons invitent à suspecter que de telles difficultés existent également pour les représentations virtuelles. Les chapitres 2 et 3 ont été l'occasion de mettre en évidence ces raisons. Rappelons brièvement la potentielle surcharge cognitive liée aux informations transitoires présentées, qui viendrait alors, dans le contexte de l'apprentissage, s'ajouter à la charge cognitive occasionnée par l'utilisation du support. Rappelons également la nécessité de reconstruction mentale de la troisième dimension, mais aussi le phénomène de rigidité géométrique. L'utilisation de telles représentations peut donc s'avérer problématique étant donné la place importante qu'occupent ces habiletés dans les apprentissages en géométrie 3D (*cf.* 4.1.5).

D'autres limites, qui pourraient être généralisées à l'ensemble des logiciels impliquant ce genre d'interface, peuvent être identifiées. La focalisation de l'attention sur le support au détriment de l'activité mathématique demandée constitue une de ces limites. Elle se rapporte au caractère distracteur de l'outil ou de certaines de ses fonctionnalités (Highfield & Mulligan, 2007 ; Karsenti *et al.*, 2013 ; Petit, 2013) et constitue la contrepartie du caractère motivationnel souvent associé à l'usage de tels outils. C'est d'autant plus vrai que ces supports peuvent, pour les élèves, être davantage considérés comme des supports de divertissement que comme des supports d'apprentissage. Pacurar *et al.* (2020) ont par exemple observé cela pour le logiciel ANIPPO permettant à un avatar de se déplacer autour d'un assemblage de cubes en vue de l'analyser. En outre, d'autres limites se rapportent à l'expérience et aux caractéristiques des élèves. Parmi celles-ci, on retrouve d'une part la nécessité que l'élève dispose de certaines habitudes ou compétences informatiques (Highfield & Mulligan, 2007), ou au moins soit préparé à l'utilisation de l'appareil/du logiciel dans le contexte de l'apprentissage. Toujours par rapport au logiciel ANIPPO, Pacurar et ses

collaborateurs (2020) ont observé des difficultés chez les élèves à s'approprier les actions à réaliser pour se déplacer autour de l'assemblage de cubes et ce même après la mise en œuvre d'une session d'appropriation.

Enfin, la nécessité que l'enseignant soit lui-même à l'aise avec l'appareil/le logiciel constitue également une limite potentielle (Petit, 2013).

Bien que l'usage de représentations 2 ½ D de solides géométriques peut apporter certains bénéfices pour l'apprentissage, les limites ici susmentionnées invitent à conserver une certaine prudence quant à leur utilisation. Cependant, si la littérature offre des indications claires concernant le public cible auprès duquel il est pertinent ou non d'utiliser des logiciels de géométrie dynamique, cela semble être clairement moins le cas pour l'usage des outils de manipulation virtuels et en particulier les solides virtuels à manipuler.

d. La comparaison des supports

Comme cela vient d'être développé, Mithalal (2014) a pu effectuer des comparaisons des différents supports au regard des différentes fonctions associées aux représentations. Toutefois, peu d'études ont comparé les effets des supports sur l'apprentissage de la géométrie 3D (Claisse, 2020). Par exemple, si quelques études ont évalué l'efficacité des outils de manipulation virtuels pour l'apprentissage des formes géométriques 3D, avec qui plus est des résultats inconsistants, peu d'études ont comparé ces résultats avec d'autres supports d'apprentissage plus traditionnels (Thamrongrat & Law, 2019).

Bertolo (2014) a par exemple comparé, au sein de plusieurs plans quasi-expérimentaux, les trois modalités de supports décrites préalablement (support virtuel, support physique et représentations 2D) auprès d'enfants de l'enseignement primaire. Les résultats montrent que le groupe qui améliore significativement ses résultats entre l'épreuve pré-expérimentale et l'épreuve post-expérimentale est le groupe utilisant les tablettes. Un manque de confiance a pour autant été observé chez ces élèves en comparaison aux élèves ayant appris avec du matériel physique.

De leur côté, Demitriadou *et al.* (2019) se sont focalisés sur la comparaison de deux modalités d'environnement virtuel en géométrie 3D au primaire, en comparant la modalité de réalité augmentée et la modalité de réalité virtuelle. Ces modalités ont par ailleurs été comparées aux modalités traditionnelles utilisant uniquement des

représentations 2D de solides présentées sous format papier-crayon. Les auteurs montrent un apprentissage plus efficient et une compréhension plus approfondie des concepts mathématiques, en plus d'une augmentation de l'interactivité et de l'intérêt des élèves, pour les supports virtuels en comparaison au support traditionnel. Les deux modalités impliquant les technologies affichent cependant un potentiel similaire.

Gecu-Parmaksiz et Delialioglu (2019) ont quant à eux comparé l'effet de l'utilisation de matériel de manipulation virtuel en réalité augmentée et l'effet de l'utilisation de matériel physique (formes en bois) lors de la découverte des formes géométriques 2D et 3D avec les enfants de 5 à 6 ans. Les auteurs ont pu mettre en évidence une amélioration des capacités de reconnaissance des formes 2D chez les enfants ayant utilisé le matériel de manipulation virtuel et le matériel de manipulation physique, avec une amélioration plus importante pour ceux ayant utilisé le matériel virtuel. Les auteurs n'ont cependant pas évalué l'évolution des capacités de reconnaissance des formes 2D.

Thamrongrat et Law (2019) se sont aussi intéressés au cas de l'utilisation de la réalité augmentée en géométrie 3D mais cette fois avec des adolescents âgés de 12 à 16 ans pour l'apprentissage de tâches complexes de coupe de solides et dans une approche comparative avec du matériel traditionnel impliquant des dessins à la craie sur tableau. Les résultats s'avèrent en faveur du matériel de manipulation virtuel.

En parallèle, certaines études se sont focalisées sur l'effet des supports d'apprentissage en géométrie 3D dans l'enseignement secondaire supérieur ou dans l'enseignement supérieur. C'est le cas, par exemple, de Katsioloudis *et al.* (2014) qui ont comparé, au travers d'un plan quasi-expérimental, les trois modalités de supports préalablement présentés. Les résultats montrent que les étudiants ayant suivi la modalité des représentations 2D d'objets 3D obtiennent des scores statistiquement plus faibles que ceux obtenus avec les deux autres modalités. De plus, les étudiants confrontés à des modèles 3D ont obtenu des scores plus élevés que ceux confrontés à des solides virtuels, mais la différence entre les deux supports apparaît non significative. Une observation assez similaire est également réalisée par Claisse (2020), qui s'est uniquement focalisé sur la comparaison entre matériel virtuel et matériel physique au cours d'une courte activité de travaux dirigés proposée aussi en enseignement supérieur (résolution de problèmes faisant appel notamment à des rotations de solides). Les résultats ont montré que les performances à des tâches papier-crayon s'amélioreraient davantage dans le groupe ayant réalisé l'apprentissage

avec du matériel physique, en comparaison au groupe confronté à des représentations virtuelles. Toutefois, d'autres recherches obtiennent des résultats différents. En comparant l'effet des supports utilisés lors d'un cours de géométrie 3D (centré sur l'étude des objets géométriques) dispensé à des futurs enseignants de mathématiques sur les compétences de visualisation spatiale des étudiants, Baki *et al.* (2011) ont pu montrer que les élèves travaillant avec du matériel physique et des représentations virtuelles (environnement de géométrie dynamique) ont davantage développé leur habileté spatiale que les étudiants confrontés à un cours plus traditionnel impliquant les dessins de figures au tableau. En particulier, lorsque des tâches demandant d'imaginer à quoi ressemble un objet d'un autre point de vue, les résultats sont favorables aux individus ayant travaillé au départ de représentations virtuelles.

Enfin, à l'instar de ce que Demitriadou *et al.* (2019) ont pu mettre en évidence concernant l'équivalence des modalités d'interaction virtuelles sur les apprentissages en enseignement primaire, Lu *et al.* (2023) ont mis en évidence que les modalités d'interaction n'entraînent pas forcément de différences de résultats lors des apprentissages en géométrie 3D en supérieur. Les auteurs montrent des résultats comparables obtenus avec des représentations virtuelles présentées sur écran d'ordinateur, sur appareil tactile ou en environnement virtuel immersif.

e. L'utilisation combinée de supports

Plusieurs arguments apparaissent en faveur d'une utilisation conjointe de différents supports lors de l'apprentissage de la géométrie 3D. D'une part, pour initier l'utilisation de représentations 2D, l'utilisation conjointe de telles représentations et de matériel physique est revendiquée, en proposant d'abord une étape de comparaison du matériel physique et de sa représentation afin de prendre conscience des différences géométriques pouvant exister entre eux et d'ainsi résoudre les conflits mentaux existants (Bonafé & Sauter, 1998). L'intention derrière cette utilisation conjointe est de rendre opérantes les images mentales des objets 3D construites. Cependant, Pillay (1998) s'est intéressé, au travers d'une expérimentation, à la réalisation de tâches de géométrie 3D impliquant un double support, c'est-à-dire un modèle 3D accompagné d'une représentation 2D, et ce en comparaison de résolutions de problèmes impliquant un seul des supports. Les résultats ont montré que la modalité de double support n'entraîne pas de meilleurs résultats par rapport à la modalité dans laquelle les élèves ont uniquement le modèle 3D à leur disposition, même si les résultats sont meilleurs

que ceux obtenus chez l'élève disposant uniquement de représentations 2D. Ces résultats confirment donc l'importance du matériel physique qui peut lui apporter une plus-value à l'usage de représentations 2D, ce que revendique Parzysz (1989) en décrivant le matériel physique comme une ressource pour les élèves confrontés à des difficultés.

D'autre part, si les représentations virtuelles peuvent se révéler être un outil puissant, il apparaît à lui seul insuffisant (Accascina & Rogora, 2006). Il ne devrait donc pas être le seul moyen utilisé lors de l'apprentissage et devrait être utilisé de manière combinée avec d'autres supports. Bakó (2003) considère qu'une intégration harmonieuse des environnements virtuels et du matériel physique pourrait s'avérer pertinente. En effet, à eux seuls, les supports virtuels peuvent être insuffisants, mais ils peuvent tout de même apporter une plus-value. Les supports virtuels seraient alors ce qui permettrait de faire le lien entre le matériel physique et les représentations 2D. Les propos de Claisse (2020) revendiquent la réalisation d'allers-retours entre matériel 3D, représentations virtuelles et représentations planes pour donner du sens aux représentations en perspective et aux objets géométriques étudiés.

De manière plus large, Nagy-Kondor (2017), en mettant en évidence qu'à la fois l'utilisation de matériel physique et l'utilisation de représentations virtuelles permettent un développement des habiletés spatiales, souligne que, dans la perspective de développement de ces habiletés, l'utilisation du numérique doit être proposée à côté et non en remplacement de l'utilisation de matériel physique.

f. Manipulation ou non du matériel par l'élève

Si différents types de support pouvant être utilisés de manière combinée ou non pour l'apprentissage de la géométrie 3D, se pose également la question de la place à donner à l'élève lors de cette manipulation. En effet, si les représentations 2D n'impliquent que l'observation et la manipulation mentale (Vivian *et al.*, 2014), une place peut être accordée à la manipulation par l'élève des objets 3D face au matériel tangible et au matériel virtuel. Il est également possible de ne pas lui donner le contrôle de cette manipulation en montrant des manipulations préenregistrées ou en le laissant observer des manipulations réalisées par quelqu'un d'autre, par exemple l'enseignant. Wilson *et al.* (1997, cités par Rodrigues *et al.*, 2010) parlent alors de situations dans lesquelles l'élève est « physiquement passif ».

Comme le langage, les gestes occupent un rôle important dans l'enseignement des mathématiques et de l'espace aux enfants. Audibert et Bonafé (1986) évoquaient déjà l'importance de la manipulation. Les interactions manuelles, qu'elles soient dans l'espace sensible ou en environnement virtuel, sont susceptibles d'impacter la formation des représentations mentales lorsque l'enseignant cherche à familiariser l'élève avec les objets d'étude (Meijer & van den Broek, 2010). L'intégration des gestes offre notamment l'opportunité de capturer en continu des informations dans l'espace (Cartmill *et al.*, 2010, cités par Verdine *et al.*, 2014).

Néanmoins, se contenter d'incorporer de la manipulation n'est généralement pas une condition suffisante pour voir une amélioration automatique de la réussite en mathématiques (Carbonneau *et al.*, 2013, cités par Pacurar *et al.*, 2020).

La manipulation par l'élève implique deux changements. D'abord, dans le cas du matériel physique, la manipulation apporte de nouveaux stimuli sensoriels (perception haptique). À ce sujet, le chapitre 2 (*cf.* 2.2.3.2c) a été l'occasion de décrire l'apport de la perception haptique pour la perception visuelle, en mettant en lumière que cette dernière peut consolider la création des images mentales du matériel physique observé et manipulé. Une telle observation intervient évidemment lors de l'apprentissage de la géométrie 3D. En effet, la perception haptique occasionnée par l'autorisation de manipulation du matériel peut renforcer la construction des concepts géométriques (par exemple le concept de cube) ce qui permettrait ensuite une reconnaissance plus aisée de ces derniers (association avec des connaissances géométriques). D'après Gori *et al.* (2024), l'utilisation d'une stratégie multisensorielle incluant perception visuelle et perception haptique peut améliorer la compréhension de concepts géométriques complexes chez les enfants. De ce fait, les auteurs encouragent l'introduction d'une expérience multisensorielle dans la mise en place d'activités d'apprentissage. Même si elle peut être chronophage, Figueiras et Arcavi (2014) considèrent que la manipulation peut être bénéfique dans l'identification des propriétés des solides et dans la mise en lien entre leurs propriétés globales (propriétés de la forme prise dans son entièreté) et locales (propriétés de parties spécifiques de la forme). Les auteurs évoquent que le toucher peut particulièrement jouer un rôle important dans la compréhension des propriétés se rapportant aux solides de révolution tels que le cône ou le cylindre. Au-delà du contexte spécifique de l'apprentissage de la géométrie 3D, la manipulation de matériel physique peut permettre de fournir à l'élève une représentation multimodale (visuelle, motrice...) qui participe à l'encodage des informations nouvelles et à leur

réutilisation ultérieure (Marley & Carbonneau, 2015). Les auteurs justifient cela en prenant appui sur le champ de la cognition incarnée, qui permet d'offrir des explications complémentaires concernant l'efficacité de l'autorisation des actions physiques pour promouvoir les apprentissages. Ils ajoutent à cela les arguments relatifs à l'aspect motivationnel que peut entraîner l'engagement comportemental occasionné par la manipulation de matériel.

Le deuxième changement occasionné par la manipulation du matériel, qui contrairement au précédent s'observe à la fois avec le matériel physique et le matériel virtuel, concerne la mise en action de l'individu et le contrôle que cela lui offre sur les actions menées sur le matériel présenté. Les recherches ne semblent pas faire consensus concernant l'impact de la manipulation du matériel par l'élève sur les apprentissages spatiaux en environnement virtuel puisque certaines recherches montrent un effet supérieur quand l'élève peut manipuler de lui-même le matériel tandis que d'autres observent l'effet contraire (Rodrigues *et al.*, 2010). Toutefois, en cas d'absence de manipulation du matériel par l'enfant, les informations dynamiques montrées lui sont imposées, avec le risque que la nature éphémère de ce qui lui est montré vienne ralentir l'efficacité de l'apprentissage (Ayres & Paas, 2007, cités par Chikha *et al.*, 2021). Inversement, lorsque l'élève a le contrôle de la manipulation, il peut choisir ce qu'il veut observer, s'arrêter à certaines étapes s'il le juge nécessaire, voire refaire certaines manipulations.

g. L'orientation des supports

Notons par ailleurs que, lorsque des représentations planes ou virtuelles sont utilisées en contexte scolaire, celles-ci peuvent être proposées sur un support placé à la verticale commun à toute la classe (tableau blanc interactif, écran blanc...) ou individuel (écran d'ordinateur...). Elles peuvent aussi être proposées sur un support placé à l'horizontale notamment (feuilles ou tablettes placées sur le banc...). À notre connaissance, il n'y a pas de recherche antérieure sur l'apprentissage de la géométrie 3D qui permet de mettre en évidence l'influence de l'orientation sur les performances spatiales et sur les apprentissages du domaine.

4.1.8.2. Ce que font les enseignants

Concernant les choix de supports d'apprentissage utilisés par les enseignants pour aborder la géométrie 3D, une diversité est observée dans les pratiques des enseignants

comme le montrent les résultats d'une enquête menée auprès d'enseignants francophones du primaire et du secondaire inférieur¹¹. On y constate, comme l'illustre le Tableau 5 que le matériel physique (solides en bois, en plexiglas, objets du quotidien) est le matériel le plus souvent utilisé par les enseignants. Environ trois quarts des répondants déclarent qu'il leur arrive d'utiliser ce matériel en autorisant les élèves à le manipuler. Environ un quart des répondants déclarent qu'il leur arrive de l'utiliser en n'autorisant pas les élèves à le manipuler mais en le manipulant devant eux. Ce type de matériel est cependant davantage utilisé par les enseignants du primaire que par ceux du secondaire. Au primaire plus qu'au secondaire, les enseignants déclarent utiliser aussi davantage du matériel (bâtonnets, pailles, plasticines...) permettant à la construction des solides. Au total, 47,6% des enseignants déclarent utiliser ce type de matériel pour faire construire aux élèves des solides et 7,9% déclarent l'utiliser pour construire eux-mêmes les solides que les élèves observent.

Tableau 5 : Répartition de l'utilisation des supports d'apprentissage de la géométrie 3D au primaire et au secondaire inférieur (tiré de Beauset et al., 2024b)

En classe, quand vous travaillez le thème des solides (ex : découverte, construction, reconnaissance, caractéristiques, classification, développement ...), vous travaillez en général ... (plusieurs réponses possibles) (N = 126)	
Avec des représentations 2D des solides (ex. dessins en perspective cavalière donnés sur support papier ou numérique)	45,2%
Avec des solides 3D (ex. solides en bois, en plexiglas, boîtes et objets du quotidien) que les élèves peuvent manipuler individuellement	72,2%
Avec des solides 3D (ex. solides en bois, en plexiglas, boîtes et objets du quotidien) que les élèves peuvent observer uniquement (manipulation/présentation des solides par l'enseignant)	23,0%
Avec des solides virtuels (sur Tableau Blanc Interactif ou sur tablette, par exemple) que les élèves peuvent manipuler individuellement	10,3%
Avec des solides virtuels (sur Tableau Blanc Interactif ou sur tablette, par exemple) que les élèves peuvent observer uniquement (manipulation/présentation des solides par l'enseignant)	28,6%
Avec du matériel divers permettant aux élèves de construire les solides (ex. plasticine, piques, pailles...) que les élèves peuvent manipuler individuellement	47,6%
Avec du matériel divers permettant aux élèves de construire les solides (ex. plasticine, piques, pailles...) que les élèves peuvent observer uniquement (manipulation/présentation des solides par l'enseignant)	7,9%
Vous ne travaillez pas le thème des solides avec vos élèves	4,0%

¹¹ Une enquête relative aux conceptions, perceptions et pratiques des enseignants de mathématiques a été menée en amont des études expérimentales auprès d'enseignants francophones belges et français du primaire et du secondaire inférieur. Cette investigation à faire l'objet de publications (Beauset *et al.*, 2024b ; Seha *et al.*, 2023) dont les résultats clés relatifs à la géométrie 3D sont ici synthétisés.

Près de la moitié des enseignants interrogés (45,2%) déclarent utiliser des représentations 2D de solides lors de l'apprentissage de la géométrie 3D. Ce type de matériel est utilisé davantage par les enseignants du secondaire. Si certains enseignants les utilisent en parallèle à d'autres types de matériel, notamment du matériel physique, d'autres font le choix de n'utiliser que de telles représentations au moment de développer les apprentissages en géométrie 3D.

Enfin, l'utilisation de représentations de solides en 2 ½ D durant l'apprentissage de la géométrie 3D, déjà peu fréquente au début des années 2000 dans les pratiques enseignantes (Moyer *et al.*, 2001), apparaît encore minoritaire à ce jour comparé aux autres sortes de matériel. Parmi les enseignants interrogés, 28,6% déclarent qu'il leur arrive d'utiliser des solides virtuels sans autoriser les élèves à les manipuler mais en les manipulant eux-mêmes devant les élèves, par exemple sur le tableau blanc interactif (TBI), tandis que 10,3% déclarent les utiliser en autorisant des manipulations individuelles aux élèves. Le taux d'usage obtenu auprès des enseignants du secondaire inférieur est significativement plus élevé que celui obtenu auprès des enseignants du primaire. Le manque de matériel mais aussi le manque de formation sont les raisons principalement évoquées par les enseignants pour justifier la non-utilisation de ce type de support lors des apprentissages.

Si les résultats permettent de montrer une diversité des supports utilisés entre les enseignants, avec des fréquences variées d'utilisation, notons néanmoins que certains enseignants, surtout dans l'enseignement primaire, font le choix de varier le matériel en déclarant utiliser plusieurs sortes de matériel lors de l'apprentissage de la géométrie 3D.

Outre cette observation sur la diversité des supports d'apprentissage, l'enquête sur les pratiques des enseignants belges francophones et français du primaire et du secondaire inférieur permet de mettre en évidence des incohérences dans les choix de pratiques mis en œuvre par les enseignants.

Une première incohérence concerne le décalage pouvant exister entre le matériel d'apprentissage et le matériel d'évaluation (Beauset *et al.*, 2024b). Si le matériel d'évaluation est le plus souvent uniquement de type papier-crayon, confrontant ainsi les élèves à des représentations 2D de solides, ce type de matériel n'a parfois pas été préalablement utilisé lors des apprentissages. Les résultats de l'enquête soulignent que près de 50% des enseignants évaluant les apprentissages de géométrie 3D avec des

représentations 2D déclarent ne pas utiliser ce type de représentations lors de l'apprentissage. Pourtant, une grande majorité d'entre eux, lorsqu'on les interroge sur les difficultés de lecture de représentations 2D rencontrées par les élèves, sont conscients de ces difficultés, considérant que cette capacité est « peu aisée » ou « très peu aisée » pour les élèves.

Une deuxième incohérence concerne la place accordée à la manipulation des supports par l'élève (Seha *et al.*, 2023). Si l'enquête indique qu'une majorité d'enseignants considèrent comme importante la manipulation du matériel par l'élève, les choix de pratiques relatives aux représentations virtuelles, décrites précédemment, ne sont pas en adéquation avec cette conception. En effet, lorsque de telles représentations sont utilisées, c'est majoritairement pour observer les solides virtuels et non pour les faire manipuler aux élèves, alors même que la plupart d'entre eux considèrent cette manipulation par l'élève comme importante. Cette incohérence peut sans doute être expliquée par des contraintes matérielles.

4.1.9. Défis relatifs à l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D

Malgré son importance haute et les nombreux objectifs qui lui sont assignés (*cf.* 4.1.3), le domaine de la géométrie n'en reste pas moins un domaine complexe à apprendre et à enseigner, et ce pour diverses raisons. Duval (2005, p.6) présente la géométrie comme « *le domaine le plus difficile à enseigner et l'un de ceux où, même lorsque les objectifs restent très modestes, les résultats atteints sont décevants* ». De multiples recherches ont pu identifier des difficultés d'apprentissage en géométrie 3D (CREM, 2002 ; Le & Kim, 2017 ; Parzysz, 1991) et certains témoignages d'élèves vont également dans ce sens (Bridoux & Nihoul, 2015).

Une première raison relative à la difficulté d'enseignement du domaine relève d'une méconnaissance des enjeux et finalités du domaine observée dans le chef des enseignants (Mathé *et al.*, 2020). En ce sens, les résultats de l'enquête menée auprès d'enseignants francophones montrent une difficulté, chez certains enseignants, à définir et identifier l'utilité du domaine de la géométrie et aussi spécifiquement de la géométrie 3D (Beauset *et al.*, 2024b ; Seha *et al.*, 2023). Un enseignant interrogé sur dix admet ne pas savoir à quoi sert l'enseignement de la géométrie.

Le décalage pouvant exister entre apprentissage et vie quotidienne, que ce soit au niveau du langage ou au niveau du fonctionnement du regard (Duval, 2005) participe également à cette complexité d'enseignement-apprentissage. Ce décalage occasionne

des situations dans lesquelles les enseignants ne sont pas situés dans le même paradigme géométrique que les élèves (Houdement & Kuzniak, 1999). Dans certaines situations, l'enseignant peut raisonner dans un espace géométrique à l'aide de concepts mathématiques, centré sur le « su », et attendre la même chose de la part de ses élèves tandis qu'eux pourraient en rester au « vu » compte tenu des difficultés existantes dans le passage de l'un à l'autre. Afin d'éviter ces décalages, l'enseignement de la géométrie 3D nécessite que l'enseignant connaisse et comprenne le fonctionnement cognitif des élèves lors de la résolution de tâches géométriques. D'autant que l'activité cognitive attendue par l'élève dans les apprentissages en géométrie est complète (Bulf, 2019 ; Duroisin *et al.*, 2020 ; Duval, 2005). Ce domaine exige que les élèves puissent, de manière indissociable, voir, construire et raisonner, ce qui nécessite de simultanément solliciter la visualisation, l'activité matérielle et le langage. Les recherches actuelles démontrent que l'enseignement de contenus géométriques doit se faire en offrant une place suffisante aux théories issues de la psychologie cognitive et de la psychologie développementale. C'est dans ce sens que vont par exemple les travaux de nombreux didacticiens, à l'instar de ceux de Mangiante-Orsola et Perrin-Glorian (2014) qui prennent appui sur la théorie cognitiviste de Duval (2005) décrivant le fonctionnement de la visualisation. Pourtant, Bulf et Mathé (2018) identifient l'existence de difficultés dans le chef des enseignants à comprendre le fonctionnement cognitif des élèves.

Une conséquence potentielle de cette méconnaissance du fonctionnement cognitif se rapporte à la sous-estimation de la complexité des savoirs enseignés dans le chef des enseignants, mise en évidence par Salin (2014). Les résultats de l'enquête préalablement évoquée soulignent qu'une majorité d'enseignants du primaire et secondaire décrivent la géométrie 3D comme facile à enseigner et à apprendre (Beauset *et al.*, 2024b ; Seha *et al.*, 2023), ce qui est contraire à ce que relève la littérature sur le sujet. À titre d'exemple, d'après Berthelot et Salin (1999-2000), les enseignants ont souvent tendance à penser, à tort, que les différents modes de représentation sont spontanément maîtrisés par les élèves, tout comme les propriétés de la perspective cavalière. Pourtant, les chapitres 2 et 3 ont pu décrire certaines difficultés rencontrées par les enfants et les adolescents en ce qui concerne l'acquisition des habiletés spatiales et notamment de l'habileté de perception de représentations 2D. Ces propos sont toutefois à nuancer puisque la plupart des enseignants interrogés sont conscients des difficultés des élèves à comprendre et

interpréter des représentations en deux dimensions d'objet 3D, par exemple les dessins en perspective cavalière de solides (Beauset *et al.*, 2024b). Des témoignages d'enseignants, relevés par exemple par Bertolo (2013) ou Bridoux et Nihoul (2015), identifient également que la sous-estimation de la difficulté d'enseignement-apprentissage n'est pas systématique dans le chef des enseignants. Plus encore, les difficultés relatives à la visualisation dans l'espace en géométrie 3D sont considérées par certains d'entre eux comme une fatalité dans la mesure où elles sont liées au fait que certains élèves n'ont pas le don de voir dans l'espace (Audibert, 1990).

Justement, la réflexion quant aux supports d'apprentissage à utiliser en géométrie 3D participe à la complexité de l'enseignement-apprentissage du domaine. En effet, pour Camou (2012), la complexité relative aux différentes représentations d'objets 3D utilisées lors de l'apprentissage constitue l'un des plus gros obstacles dans l'enseignement du domaine. Un besoin de formation est exprimé par les enseignants francophones en ce qui concerne le choix des supports d'apprentissage et la place à accorder à la manipulation en géométrie (Beauset *et al.*, 2024b ; Seha *et al.*, 2023). Les décisions quant à la méthode d'enseignement mise en place en géométrie 3D, entre autres quant au matériel utilisé, sont le plus souvent prises de manière instinctive en fonction de leur expérience personnelle et du sens commun (Widder *et al.*, 2019). Pourtant, comme pour toute autre discipline, ces choix ne sont certainement pas sans conséquence pour l'apprentissage des élèves puisqu'ils pourraient déboucher sur des difficultés d'apprentissage. La méconnaissance du fonctionnement cognitif des élèves, accompagnée par la présence de peu de recommandations dans la littérature et les prescrits, risquent d'entraîner la création de ruptures dans le parcours scolaire, mais également une utilisation de supports inadaptés au fonctionnement cognitif des élèves. De ce fait, une condition *sine qua non* est la mise en œuvre de recherches permettant de compléter les informations sur le fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents, en particulier en lien avec les représentations virtuelles de l'espace. Il s'agirait alors de prendre appui sur les résultats de ces recherches pour apporter des recommandations à destination des enseignants. Le contenu de la formation des enseignants apparaît également un enjeu indéniable au vu des difficultés susmentionnées.

Outre les difficultés d'apprentissage occasionnées par la non-maitrise des habiletés spatiales, notons que l'acquisition de certaines connaissances géométriques peut poser

des difficultés aux élèves. C'est le cas par exemple des connaissances relatives au concept d'inclusion et de conditions nécessaires et suffisantes (Jones & Tzekaki, 2016) pour pouvoir classer les différents objets géométriques étudiés. Plus encore, d'après Salin (2014), c'est l'intrication entre les connaissances spatiales et les connaissances géométriques, nécessaires dans la résolution de problèmes géométriques, qui rend l'apprentissage du domaine complexe. Cette complexité est renforcée par la multiplicité des compétences exigées lors des apprentissages de géométrie et qui sont aussi à combiner : compétences visuelles, compétences verbales, compétences de dessins, compétences logiques... (Hoffer, 1981, cité par Astuti et al., 2020).

S'ajoute à cela la nécessité de faire appel à des processus cognitifs plus généraux étant sollicités notamment dans la résolution de tâches en géométrie 3D. C'est le cas notamment des fonctions exécutives, pouvant être définies comme l'ensemble des processus relatifs à la régulation de la pensée et des actions que l'individu met en place intentionnellement pour atteindre des objectifs (Miyake *et al.*, 2000) et plus particulièrement des trois fonctions exécutives fondamentales (Diamond & Lee, 2011) : le contrôle inhibiteur (Beauset *et al.*, 2025 ; Esplin *et al.*, 2021), la flexibilité cognitive (Beauset *et al.*, 2025 ; Khatin-Zadeh, 2022) ou encore la mise à jour de la mémoire de travail (Beauset *et al.*, 2025 ; Bizzaro *et al.*, 2018 ; Giofrè *et al.*, 2013 ; Peng *et al.*, 2016). D'après Esplin *et al.* (2021), le contrôle inhibiteur peut par exemple être particulièrement sollicité en géométrie puisque le sujet doit résister à des réponses intuitives. Les chapitres précédents ont d'ailleurs permis de mettre en évidence des liens entre ces fonctions exécutives et la mise en œuvre des habiletés de perception visuelle d'objets 3D et de visualisation spatiale.

Un autre enjeu relatif à l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D, à mettre en lien avec les conceptions quant à l'utilité de ce domaine, se rapporte au délaissement de ce domaine observé dans les pratiques enseignantes dans de nombreux pays. À ce sujet, Mathé *et al.* (2020) décrivent le domaine de la géométrie comme souvent délaissé par les enseignants ou mal-aimé par ces derniers. Plus particulièrement, la géométrie 3D est un domaine souvent relégué en fin d'année par les enseignants, voire délaissé en cas de manque de temps (Bayart *et al.*, 1996 ; Beauset *et al.*, 2024b ; Douaire *et al.*, 2009 ; Ferrarello *et al.*, 2014), et ce en dépit de son importance. Or, la mise en retrait de ce domaine pourrait occasionner des difficultés

pour la suite du parcours scolaire étant donné son lien avec d'autres apprentissages en mathématiques et dans d'autres domaines.

Outre ce délaissement général du domaine de la géométrie 3D, on observe également un délaissement spécifique au niveau des activités visant à développer les compétences spatiales des élèves, et ce en dépit de leur importance pour l'apprentissage de multiples domaines (*cf.* 1.3.2.2). En effet, les résultats de l'enquête menée auprès des enseignants (Beauset *et al.*, 2024b) ont montré qu'une majorité d'entre eux mettent peu en place des activités développant les capacités de lecture et d'interprétation de représentations 2D malgré leur conscience des difficultés rencontrées par les élèves à cet égard. L'habileté de visualisation est elle aussi peu développée par les enseignants d'après leur propre témoignage dans l'enquête. Ces observations sont en cohérence avec les constats de Burte *et al.* (2017) qui affirment que la place accordée dans les classes à l'entraînement spatial reste tout de même faible à l'école élémentaire. Webb *et al.* (2007) présentent par exemple la capacité visuo-spatiale comme un élément qui n'est pas systématiquement enseigné par les écoles, ce qui peut occasionner leur faible développement chez les élèves. Pourtant, Berthelot et Salin (1992) ont mis en évidence que de tels objets sont enseignables. Sorby (1999) relevait déjà un certain désintérêt, voire une hostilité, dans le chef des enseignants vis-à-vis du développement de la pensée spatiale et le Committee on Support for Thinking Spatial (2006) décrivait le besoin urgent de favoriser les compétences de raisonnement spatial dans les classes. Plusieurs explications peuvent être assignées à ce délaissement observé dans les pratiques enseignantes.

D'abord, comme en témoignent les enseignants (Beauset *et al.*, 2024b), celui-ci est le reflet d'un délaissement présent au sein des prescrits. L'analyse des prescrits de nombreux pays permet de confirmer un tel délaissement. En Belgique francophone par exemple, Duroisin (2015) a pu mettre en évidence qu'il n'y a que de rares et floues prescriptions dans les programmes d'études belges au sujet du développement des habiletés spatiales (pour cette étude, ce sont les programmes de la FWB qui ont été analysés). Marchand (2020) présente les compétences spatiales comme un « *angle mort* » des programmes de formation actuels québécois (p.140). Des raisons historiques, développées par Sinclair et Bruce (2014), peuvent expliquer cette faible place dans le curriculum encore constatée aujourd'hui. Toutefois, promouvoir une éducation spatialement enrichie peut constituer un enjeu politique pour développer la participation aux filières STEM, compte tenu du lien qui les unit (*cf.* chapitre 1).

En conséquence directe avec le délaissement dans les prescrits, la faible place accordée à ces connaissances dans les évaluations externes, observée par exemple en Belgique francophone dans les EEC et EENC antérieures à 2015 (Duroisin, 2015) et dans les évaluations de ces dernières années (Beuset & Duroisin, 2022), peut également constituer une explication à ce délaissement. En effet, plusieurs auteurs identifient que le contenu de ces épreuves influence les pratiques des enseignants qui notamment réduisent le temps qu'ils attribuent aux matières non testées et alignent les contenus enseignés sur le contenu de l'épreuve (Beuset & Duroisin, 2023b ; Boyle & Bragg, 2005 ; Rozenwajn & Dumay, 2014). C'est aussi une des raisons citées par les enseignants italiens qui délaissent ce domaine (Ferrarello *et al.*, 2014).

En plus du manque d'indication dans les prescrits, mais aussi de la faible place dans les évaluations externes nationales, trois autres raisons sont le plus souvent évoquées par les enseignants interrogés (Beuset *et al.*, 2024b) : leur manque de formation à ce sujet en est une, sans doute en lien avec le manque de connaissance du fonctionnement cognitif des élèves, combiné avec un probable manque de ressources. Le manque de temps et le sentiment que ce travail de développement spatial doit être réalisé plus tôt dans le cursus sont également des raisons évoquées par les répondants.

Les différents résultats ici présentés permettent de souligner de nombreux enjeux et défis relatifs à l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D dans l'enseignement primaire et secondaire inférieur. Ces éléments ici identifiés soulignent la nécessité que des recherches en psychologie des apprentissages et en didactique des mathématiques s'emparent de plusieurs questions et notamment de la pertinence des supports d'apprentissage et des difficultés d'apprentissage qu'ils peuvent générer. De plus, les enjeux identifiés amènent également à se questionner sur les prescriptions fournies par les autorités compétentes, qui devraient certainement prendre appui notamment sur les résultats de telles recherches. Enfin, et de manière incontestable, les nombreux enjeux associés invitent à se questionner sur le contenu de la formation des enseignants.

4.2. Les habiletés de perception de la 3D et de visualisation spatiale au-delà de l'apprentissage de la géométrie 3D

Si la géométrie 3D constitue un domaine dans lequel la cognition spatiale, et notamment les habiletés de perception de la 3D et de visualisation spatiale, occupe une place incontournable, ce n'est évidemment pas le seul domaine d'apprentissage

dans ce cas. Plusieurs autres domaines font appel à l'espace sensible ou à des représentations de cet espace ou des objets qu'il contient. Au premier chapitre, une diversité de domaines scolaires ou académiques en lien avec les habiletés spatiales, ou du moins pouvant être impactés positivement par le développement des habiletés spatiales des élèves, a d'ailleurs pu être mise en évidence. Parmi ces domaines, il est possible d'évoquer la géographie ou encore les sciences.

4.2.1. L'apprentissage de la géographie

L'apprentissage de la géographie, comme la géométrie, représente un lieu d'apprentissage de l'appréhension de l'espace (Kahane, 2002). Si contrairement au domaine de la géométrie, son objectif n'est pas d'investiguer en tant que telles les caractéristiques individuelles des objets de l'espace, ce domaine se questionne notamment sur la manière dont ces éléments se positionnent les uns par rapport aux autres dans cet espace, en vue par exemple d'étudier la manière dont ils s'y répartissent et dont l'espace est aménagé. Ainsi, Duroisin (2015) présente la géographie comme la « *science de l'organisation de l'espace et des pratiques et représentations spatiales* » (p.100).

Lors de l'apprentissage de géographie au primaire et au secondaire inférieur, les habiletés spatiales sont évidemment incontournables. Dans cette discipline, l'élève rencontre diverses représentations d'un espace, pouvant être en 3D (modèles-réduits et maquettes), en 2D (cartes, plans, photographies de paysage...), voire éventuellement en 2 ½ D (environnements virtuels simulant une ville ou simulant le système solaire). Il est donc amené à percevoir, au travers de ces représentations, l'espace représenté et la manière dont les éléments s'y répartissent.

4.2.2. L'apprentissage des sciences

Le domaine des sciences est lui aussi intimement lié à l'espace. D'ailleurs, l'habileté de visualisation spatiale a joué un rôle clé dans les découvertes et innovations scientifiques, par exemple dans la découverte de la structure de l'ADN (Hawes & Ansari, 2020). Plus spécifiquement, lors de l'apprentissage de l'éveil scientifique au primaire et des différents domaines des sciences au secondaire, les habiletés visuo-perceptives et visuo-spatiales sont également nécessaires. La visualisation spatiale peut permettre de comprendre certains mécanismes faisant écho à l'éveil scientifique, comme le principe des poulies, engrenages, puisque ce sont des mécanismes qui impliquent de devoir

anticiper une action mentalement. Les capacités à faire preuve de visualisation interviennent également dans les apprentissages en chimie. Wu et Shah (2004) proposent un résumé de ce que dit la littérature au sujet du lien qui unit la pensée visuo-spatiale et la chimie. Les auteurs confirment la présence d'une corrélation entre habiletés visuo-spatiales et réussite dans l'apprentissage de la chimie en présentant la chimie comme une « *science visuelle* » (p.465). Les élèves possédant de fortes habiletés visuo-spatiales arrivent mieux à résoudre des problèmes en chimie, même quand ces problèmes n'ont pas de composante spatiale.

Lors des apprentissages de ce domaine, des outils de manipulation physiques en trois dimensions peuvent être utilisés (Wu & Shah, 2004). En effet, des modèles peuvent permettre de représenter un objet, un processus ou encore un système, et sont notamment pertinents quand les objets ou phénomènes qui sont étudiés sont trop petits ou trop larges, trop distants voire inaccessibles, ou encore trop complexes (Valanides & Angeli, 2008, cités par Akilli, 2021). À titre d'exemple, les molécules en chimie peuvent être modélisées à l'aide de boules et de bâtons (Stull & Hegarty, 2016). De même, un écorché contenant les différents organes du corps humain peut être également présentés au moment de découvrir le corps humain et les systèmes qui le composent. D'après Friedel *et al.* (1990, cités par Wu & Shah, 2004), l'utilisation de matériel de manipulation en chimie peut aider les élèves à se représenter les concepts et à résoudre des problèmes.

Comme en géométrie, du matériel physique peut être proposé lors des apprentissages du domaine mais les technologies permettent de proposer des simulations de ce matériel physique, offrant ainsi de nouvelles possibilités de supports d'apprentissage. Pour reprendre les deux exemples précédemment évoqués, l'utilisation d'environnements virtuels permet de simuler les structures chimiques des molécules en vue d'offrir une compréhension approfondie de celles-ci (Akilli, 2021 ; Barrett *et al.*, 2015 ; Tuvi-Arad & Gorsky, 2007 ; Urhahne *et al.*, 2009) et permet de présenter le corps humain et de mieux comprendre les structures anatomiques de ce dernier, par exemple à l'aide d'un système de réalité virtuelle (Jang *et al.*, 2017 ; Nguyen *et al.*, 2012 ; Petersson *et al.*, 2009 ; Yu *et al.*, 2022). De manière plus large, comme l'évoque Gobert (2000, cité par Urhahne *et al.*, 2009), en sciences, de nombreux phénomènes sont non observables et les représentations virtuelles et dynamiques permettent d'offrir une explication à ces phénomènes.

Évidemment, il est également possible de proposer des représentations 2D des éléments 3D étudiés lors des apprentissages en sciences. Toutefois, comme on peut l'observer en géométrie, des difficultés sont parfois rencontrées avec ce type de support. Face aux illustrations 2D, les élèves ont des difficultés à générer un modèle spatial de l'élément 3D observé (Wu & Shah, 2004), ce qui peut provoquer des difficultés d'apprentissage et de compréhension des éléments présentés et de leurs propriétés, par exemple lorsque des structures de molécules sont présentées avec ce support. Ces représentations requièrent davantage d'habiletés spatiales que le matériel physique dans la mesure où elles exigent de se construire et manipuler un modèle mental au départ de la représentation alors que le matériel physique peut lui être directement manipulé (Nolte *et al.*, 2024).

En comparaison aux représentations virtuelles, les représentations planes occasionnent par ailleurs une difficulté de compréhension des concepts en chimie (Urhahne *et al.*, 2009). De même, pour l'exemple de l'anatomie, les représentations 2D planes peuvent occasionner des difficultés dans la compréhension des localisations et relations spatiales du corps humain et de ses parties notamment parce qu'elles offrent une moins bonne vue des informations en profondeur que ce que permettent les représentations virtuelles (Tam *et al.*, 2009, cités par Yu *et al.*, 2022).

Au même titre que des recherches, bien que rares, se sont intéressées à la pertinence des différents supports lors de l'apprentissage de la géométrie 3D, de nombreuses recherches, portant principalement sur l'apprentissage des STEM en fin d'enseignement secondaire et surtout en enseignement supérieur ont été menées en vue d'identifier si apprendre au départ de matériel virtuel et physique donne de mêmes résultats dans diverses disciplines. Si celles-ci semblent majoritairement s'accorder sur les bénéfices de l'utilisation d'outils de manipulation, qu'ils soient physiques ou virtuels (Marley & Carbonneau, 2015), ces dernières ne semblent pas faire consensus. Certaines études ont montré des différences en faveur du matériel physique. C'est le cas par exemple de Wainman *et al.* (2018), qui se sont intéressés à l'apprentissage de l'anatomie en enseignement supérieur. D'autres études ont montré des résultats en faveur du virtuel. À titre d'illustration, Barrett *et al.* (2015) et Hsiao *et al.* (2019) ont par exemple observé que l'utilisation de matériel 3D virtuel a entraîné une meilleure compréhension respectivement en chimie dans l'enseignement supérieur et en physique en enseignement secondaire supérieur en comparaison au matériel 3D physique. D'autres encore ont montré que les environnements virtuels et physiques

étaient en grande partie équivalents pour l'apprentissage (Petit, 2013 ; Zacharia & Olympiou, 2011). Par ailleurs, plusieurs recherches s'étant intéressées à la comparaison entre le matériel de manipulation réel et virtuel ont montré qu'un usage combiné des deux types de matériel de manipulation entraîne de meilleurs apprentissages que l'usage unique d'un des deux matériels. À titre d'exemple, Zacharia et Olympiou (2011) ont montré cela dans l'apprentissage de la physique en enseignement supérieur.

Au-delà de la comparaison entre l'utilisation de matériel virtuel et physique, d'autres recherches se sont intéressées au rôle à donner aux élèves lors des apprentissages menés avec du matériel virtuel. Cette question ne semble pas non plus faire l'objet de consensus puisque, à nouveau, les résultats de recherches semblent se contredire (Jang *et al.*, 2017).

Conclusion de la partie I

Au quotidien, l'être humain, qu'il soit enfant ou adulte, est en constante interaction avec l'espace dans lequel il vit et avec les objets que contient cet espace. Il est très souvent confronté à des représentations de cet espace et de ces objets, notamment des représentations planes mais aussi des représentations virtuelles. Face à cet espace, qualifié de sensible, ou à ses représentations, il est alors amené à mettre en place des processus cognitifs, appelés habiletés spatiales, qui lui permettent d'agir mentalement sur et dans cet espace. Ces processus, qui peuvent se développer avec l'âge mais également au moyen d'interventions, sont des processus cognitifs importants. Ils interviennent dans la réalisation de nombreuses tâches menées dans le contexte scolaire, académique, professionnel ou même dans sa vie quotidienne et jouent un rôle pour l'apprentissage de nombreux domaines. De ce fait, leur évaluation, notamment chez les enfants, apparaît un enjeu important. Par le premier chapitre de cette partie relative aux fondements théoriques, qui se veut plus général, le concept même d'espace sensible ainsi que les représentations de cet espace ont pu être définis. Ainsi, différents modes de représentation des objets 3D que les enfants et adultes sont susceptibles de rencontrer ont été présentés. En prenant appui sur les travaux de Piaget, tout en gardant une certaine distance avec ces derniers, la manière dont les rapports avec cet espace se construisent chez l'enfant et l'adolescent a pu être présentée, dans une perspective développementale. Enfin, les concepts de cognition spatiale et d'habiletés spatiales ont été présentés en vue notamment de percevoir l'enjeu que représente leur évaluation. Le premier chapitre a aussi permis d'identifier que les habiletés spatiales pouvaient être qualifiées de pluridimensionnelles et que parmi les habiletés spatiales liées à la vision, il était possible d'identifier les habiletés visuo-perceptives et les habiletés visuo-spatiales.

Cette recherche étudie plus spécifiquement la maîtrise de deux habiletés spatiales, en l'occurrence l'habileté visuo-perceptive de perception de la 3D et l'habileté visuo-spatiale de visualisation spatiale, lorsqu'elles sont mises en œuvre sur de représentations 2 ½ D d'objets 3D, dans une approche comparative avec d'autres supports. Cette première partie s'est donc focalisée sur la présentation théorique de ces deux habiletés. Ainsi, les chapitres 2 et 3, proposant une structure assez proche, ont apporté respectivement les fondements théoriques relatifs à chacune de ces deux habiletés. Ces deux chapitres ont permis de présenter l'habileté spatiale investiguée.

De plus, en prenant notamment appui sur les résultats de recherches antérieures, l'évaluation de ces habiletés au départ de matériel physique mais aussi au départ de représentations 2D et 2 ½ D a été abordée. La maîtrise de ces habiletés chez les enfants et les adolescents ainsi que les facteurs susceptibles d'influencer leurs performances à des tâches les évaluant ont été présentés. Ces deux chapitres ont ainsi permis de mettre en évidence certains manquements dans la littérature. Ils ont par ailleurs déjà apporté déjà certains éléments explicatifs par rapport aux éventuelles différences pouvant exister entre le fonctionnement cognitif au départ de matériel physique ou d'une représentation virtuelle ou plane de ce matériel.

Finalement, l'ultime chapitre de ces fondements théoriques permet de donner du sens à la recherche menée puisqu'il aborde les apprentissages scolaires en se focalisant particulièrement sur l'apprentissage de la géométrie 3D. Si la recherche ici présentée s'inscrit dans le domaine de la psychologie cognitivo-développementale, les résultats obtenus ont pour ambition de se mettre au service de la réflexion sur l'enseignement-apprentissage de domaines impliquant l'espace 3D et des représentations planes ou virtuelles de cet espace. Ce chapitre est notamment l'occasion de relever la façon dont les habiletés spatiales de perception de la 3D et de visualisation spatiale interviennent dans les apprentissages scolaires, mais également d'apporter des informations concernant la pertinence des supports d'apprentissage.

Ainsi, avec ces quatre chapitres, l'espace sensible et ses représentations ont pu être évoqués (chapitre 1) avant de présenter le fonctionnement cognitif de l'élève dans cet espace 3D et face à ces représentations, en mettant particulièrement l'accent sur l'habileté de perception de la 3D (chapitre 2) et de visualisation spatiale (chapitre 3). Enfin, une attention particulière a été portée sur les apprentissages scolaires impliquant l'espace 3D et notamment sur les supports d'apprentissage faisant directement écho aux objets de l'espace 3D ou à leurs représentations (chapitre 4). Tous ces éléments permettent ainsi d'apporter les balises permettant la compréhension de la problématique et des choix méthodologiques mis en œuvre dans les études menées, présentées dans la deuxième partie de ce manuscrit. Ces éléments théoriques mis en évidence vont également permettre d'aider à la compréhension et à l'interprétation des résultats obtenus, présentés dans la troisième partie (volume 2). Ils permettront également de comprendre les apports de tels résultats pour le domaine de la psychologie mais aussi pour l'enseignement-apprentissage, qui seront développés en quatrième partie (volume 2).

PARTIE II : ÉTUDES
EXPÉRIMENTALES –
MÉTHODOLOGIES

Introduction de la partie II

Cette recherche est une recherche fondamentale s'inscrivant dans le domaine de la psychologie cognitivo-développementale. Son objectif général est de caractériser la maîtrise d'habiletés spatiales exercées dans un environnement de type 2 ½ D chez les enfants et les adolescents. Autrement dit, la maîtrise de leur capacité à percevoir des objets 3D simples (ex. cube, cône) représentés dans un environnement virtuel (habileté visuo-perceptive de perception visuelle de la 3D) et de leur capacité à agir mentalement sur ces derniers (habileté visuo-spatiale de visualisation spatiale) sont étudiées. Plus particulièrement, elles sont étudiées au départ de représentations virtuelles d'objets 3D présentées dans différentes conditions (en autorisant ou non la manipulation, sur des supports d'orientation différente) mais également au départ d'autres modalités de présentation de ces objets 3D (représentations 2D, matériel physique). Cette recherche investigate ainsi le rapport que les enfants et les adolescents entretiennent avec l'espace sensible et ses représentations externes.

Pour cela, deux études expérimentales menées en contexte scolaire ont été réalisées. Cette deuxième partie présente la méthodologie de ces deux études en vue de mettre en lumière leur complémentarité, ce qui permettra dans la partie suivante (volume 2) de présenter les résultats obtenus à ces études. Cette deuxième partie s'organise en quatre chapitres.

D'abord, le chapitre 5 décrit la problématique relative aux études menées, en prenant notamment appui sur des éléments clés mis en évidence dans le cadrage théorique. Il permet d'aboutir à la présentation des objectifs, des questions de recherche auxquelles ce travail tente de répondre et des hypothèses associées.

Le chapitre 6 décrit l'environnement virtuel créé et utilisé dans les deux études. Après avoir justifié les choix d'interface et de logiciel, l'environnement utilisé est décrit, tout comme la validation dont il a fait l'objet avant d'entamer les deux études.

Le chapitre 7 porte sur la description de la première des deux études menées tandis que le chapitre 8 décrit quant à lui la seconde étude. Chacun de ces chapitres présente alors l'objectif général de l'étude ainsi que les variables investiguées. La méthodologie mise en œuvre est ensuite décrite, notamment la tâche choisie pour évaluer la ou les habiletés investiguées, tout comme l'échantillon sur lequel l'étude a été menée et les analyses réalisées sur les données récoltées.

Chapitre 5. Problématique,
objectif général, questions de
recherche et hypothèses
associées

Chapitre 5. Problématique, objectif général, questions de recherche et hypothèses associées

5.1. Problématique

L'enjeu que représente l'étude du fonctionnement cognitif spatial chez l'enfant et l'adolescent n'est plus à démontrer. La croissance des recherches qui étudient les habiletés spatiales auprès de ce public cible en est le reflet. L'étude de ces habiletés permet, étant donné la place qu'elles occupent au quotidien et dans des domaines scolaires et professionnels, de comprendre certaines difficultés rencontrées par l'enfant et l'adolescent dans la réalisation de nombreuses tâches qui les impliquent. Elle permet ainsi, dans la foulée, de proposer des interventions pertinentes pour développer ces habiletés spatiales, ce qui est possible étant donné leur caractère malléable. Elle supporte également l'identification d'éventuels talents dans les domaines des STEM parmi les enfants et les adolescents et peut être un indicateur pour l'orientation scolaire. Au-delà de cette perspective individuelle, l'étude des habiletés spatiales participe à l'élaboration d'un modèle complet du développement cognitif.

Au quotidien, les enfants et adolescents sont amenés à mettre en place de telles habiletés directement dans l'espace sensible, sur les objets 3D présentés dans l'espace dans lequel ils vivent. Ils sont aussi amenés à les mettre en œuvre au départ de représentations planes de ces objets appartenant au monde graphique (ex. photographies, dessins en perspective). Toutefois, avec le développement des technologies, les enfants et les adolescents sont, et probablement seront, de plus en plus confrontés à des environnements virtuels de type 2 ½ D simulant l'espace sensible et les objets qu'il contient, que ce soit dans le contexte des loisirs ou dans le contexte scolaire. D'ailleurs, la méta-analyse de Merchant *et al.* (2014) offre de nombreux exemples dans lesquels ce type d'environnement est utilisé dans le cadre d'apprentissages scolaires dans l'enseignement obligatoire et supérieur. Ces environnements, situés à l'intermédiaire du monde réel et du monde graphique, offrent des représentations dynamiques des objets 3D permettant de fournir davantage d'indices relatifs à la troisième dimension.

Lorsqu'ils agissent et interagissent avec cette simulation de l'espace 3D, les individus ont, tout comme face à des objets de l'espace sensible ou à leurs représentations planes plus traditionnelles, besoin de faire appel à des habiletés spatiales, notamment

quand il s'agit de percevoir et se représenter mentalement les objets 3D présentés et d'agir mentalement sur ces derniers. Néanmoins, il paraît légitime de se demander si les enfants et les adolescents sont capables de mettre en place des habiletés spatiales dans ces environnements virtuels comme dans l'espace sensible ou comme au départ de représentations planes de l'espace. Si Pasqualotti et Freitas (2002) évoquent que les processus psychologiques activés quand on utilise des environnements virtuels sont similaires à ceux qui s'opèrent dans le monde physique, d'autres auteurs, par exemple Rose et Foreman (1999), considèrent que les comportements perceptifs et plus largement les processus cognitifs pourraient différer dans le monde réel et dans le monde virtuel. La proximité entre les représentations virtuelles et les objets de l'espace sensible, grâce à l'impression de tridimensionnalité qu'elles offrent de par leur caractère dynamique, peut inciter à considérer comme égales les capacités cognitives des enfants et des adolescents exercées dans l'espace sensible et dans les environnements virtuels simulant cet espace. Ces représentations virtuelles restent pour autant des représentations sur support 2D et exigent de la part de celui qui les observe de se reconstruire la troisième dimension. Elles possèdent des caractéristiques propres qui les différencient du matériel physique (Krylova & Vodyakha, 2022). Par exemple, leur manipulation, contrairement au matériel physique, n'entraîne pas une perception haptique de l'objet 3D manipulé. D'autres raisons, notamment en lien avec la charge cognitive occasionnée par de telles représentations, invitent aussi à rester prudent quant à cette comparaison entre capacités cognitives dans l'espace sensible et en environnement virtuel.

De plus en plus de recherches portent sur l'étude de la cognition spatiale en environnement virtuel parce que ces environnements offrent des possibilités expérimentales (Rodrigues *et al.*, 2010). Néanmoins, si l'habileté de navigation spatiale est, à de nombreuses reprises, investiguée au sein de ces environnements, les autres habiletés spatiales sont finalement moins étudiées dans les environnements virtuels. Peu d'informations sont donc encore aujourd'hui disponibles concernant les rapports entretenus par les enfants et adolescents avec ces simulations de l'espace sensible et sur la manière dont les habiletés sont maîtrisées ou se développent dans ces environnements.

Les recherches actuelles fournissent, à notre connaissance et comme le confirment Krylova et Vodyakha (2022), peu d'informations sur la capacité des enfants et des adolescents à percevoir des objets 3D, même simples, représentés virtuellement, peut-

être parce qu'elle est considérée comme naturellement maîtrisée. Les investigations exploratoires menées par les auteurs ont pourtant mis en évidence des résultats semblant aller dans le sens de l'hypothèse de Rose et Foreman (1999), en montrant que certains enfants de 4 ans arrivent à percevoir une représentation virtuelle d'objet 3D mais que cela pose des difficultés à d'autres, entraînant des divergences avec la perception de matériel physique. Les auteurs se sont cependant focalisés sur la perception d'un nombre réduit d'objets 3D complexes et ont étudié l'habileté auprès d'une tranche d'âge spécifique, les enfants de 4 à 6 ans, et auprès d'un échantillon réduit de participants. On ne dispose donc actuellement que de peu d'informations au sujet de la maîtrise de l'habileté de perception de représentations virtuelles chez les enfants plus âgés et les adolescents. Néanmoins, les résultats obtenus auprès des enfants plus jeunes ainsi que les caractéristiques associées à ces représentations incitent à rester prudent quant à la maîtrise des capacités à se construire une image mentale correcte d'objets 3D représentés virtuellement, qui plus est chez les enfants et adolescents. Pourtant, étudier les capacités relatives à cette habileté au départ de représentations virtuelles d'objets 3D apparaît un enjeu essentiel, que Krylova et Vodyakha (2022) qualifient même de « *problème urgent* » (p.70). Cette habileté est essentielle eu égard à son rôle sur la formation des idées des enfants à propos des propriétés des objets 3D. Le chapitre 4 a, par exemple, été l'occasion de souligner la place qu'occupe l'habileté dans l'apprentissage de la géométrie 3D. La capacité de perception visuelle des objets 3D est par ailleurs antérieure aux autres habiletés spatiales et constitue donc un premier pas à l'étude du développement cognitif spatial en environnement virtuel. Comment un enfant ou un adolescent pourrait-il en effet exercer des habiletés spatiales comme la visualisation spatiale ou la rotation mentale sur une représentation virtuelle d'objet 3D si cet objet n'est pas adéquatement perçu ?

Si plusieurs études, à l'instar de Sanandaji *et al.* (2017), se sont intéressées à l'évaluation de la maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale en environnement virtuels auprès d'adultes, peu d'informations sont disponibles concernant la maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale en environnement virtuel chez les enfants et les adolescents. Cette habileté est d'ailleurs en général, en dehors du cas spécifique de rotation mentale, peu investiguée chez les enfants (Gori *et al.*, 2024). À notre connaissance, seul Bakó (2004) a pu étudier cette habileté (hors rotation mentale) au départ de matériel virtuel, et ce dans une approche comparative avec le matériel physique. Celui-ci s'est cependant focalisé sur les adolescents âgés de 14 à 15 ans

uniquement et n'a pas investigué la situation des enfants plus jeunes et ne s'est pas placé dans une perspective développementale. Pourtant, l'évaluation de l'habileté de visualisation au départ de matériel virtuel pourrait constituer une alternative intéressante pour peut-être dépasser certaines limites associées aux évaluations papier-crayon, comme l'évoquent Cohen et Hegarty (2012).

Dans ce contexte, étudier les capacités des enfants et des adolescents à faire appel aux habiletés spatiales de perception visuelle des objets 3D et de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles (2 ½ D) simulant l'espace sensible et les objets qu'il contient constitue un enjeu essentiel pour permettre de mieux appréhender le rapport qu'entretiennent les enfants avec ce type d'environnement. Cela pourrait également participer à la réflexion sur les supports d'évaluation des habiletés spatiales à utiliser avec les enfants et les adolescents.

Par ailleurs, la meilleure connaissance du fonctionnement spatial des enfants et des adolescents permettrait *in fine* d'apporter des éléments de réponse à une autre problématique associée au domaine des sciences de l'éducation ou de la didactique. Compte tenu de la place occupée par les habiletés spatiales dans l'apprentissage de la géométrie 3D, elle permettrait de contribuer à la réflexion sur son enseignement-apprentissage.

Comme en attestent les résultats de recherches en didactique mais également les résultats d'évaluations externes, l'apprentissage de la géométrie et plus particulièrement de la géométrie 3D pose des difficultés. Il s'agit d'un domaine dans lequel les enseignants retrouvent peu de recommandations basées sur des données probantes en ce qui concerne le matériel d'enseignement/apprentissage à utiliser pour proposer un enseignement efficace et adapté aux capacités cognitives de l'élève, que ce soit dans les prescrits ou dans la littérature. D'ailleurs, comme précisé dans le cadrage théorique, peu d'études se sont intéressées à la comparaison des supports en géométrie 3D. Un besoin de formation est exprimé par les enseignants quant au matériel d'apprentissage à utiliser en géométrie, ces derniers se sentant démunis face à ces choix. Dans ce contexte, les choix sont réalisés de manière arbitraire, sans un avis scientifiquement éclairé, parfois sans une prise de conscience des conséquences de ces derniers pour l'apprentissage des élèves. De ce fait, les choix de matériel utilisé varient selon les enseignants et créent parfois des ruptures dans le parcours scolaire. Certains font par exemple le choix de ne pas proposer de matériel à manipuler et de ne travailler

qu'avec des représentations planes de solides, et ce même dans le début du parcours scolaire. D'autres privilégient l'utilisation de matériels 3D que les élèves peuvent manipuler et/ou observer.

Avec le développement des technologies et la place parfois de plus en plus importante qu'elles occupent dans les établissements scolaires, les solides virtuels, c'est-à-dire les représentations virtuelles des solides géométriques, constituent une possibilité supplémentaire de support d'apprentissage. Bien qu'encore actuellement utilisé de manière minoritaire par les enseignants, par exemple en Belgique et en France (Beauset *et al.*, 2024b), ce matériel fournit une représentation dynamique des objets 3D. Si plusieurs recherches invitent à considérer que ce matériel pourrait être pertinent pour l'apprentissage du domaine, d'autres invitent à rester prudent, considérant notamment que son utilisation exige de la part de l'élève une reconstruction de la 3D qui peut s'avérer difficile à mettre en œuvre pour certains. Comme le revendiquent Hegarty et Kriz (2008), une des conditions pour pouvoir utiliser ce type de support est de pouvoir comprendre comment et sous quelles conditions les individus apprennent avec ces supports. Dans ce contexte, étudier les capacités cognitives des enfants et des adolescents face à ce type de représentation, pour identifier si les enfants et les adolescents sont capables de percevoir adéquatement les objets 3D représentés virtuellement et d'agir mentalement sur ces derniers, devient dès lors aussi un enjeu pour l'enseignement-apprentissage de la géométrie et pour la réflexion quant aux supports d'apprentissage. En effet, les habiletés spatiales de perception visuelle de la 3D et de visualisation spatiale sont intimement liées à l'apprentissage de la géométrie dans la mesure où elles interviennent lors des apprentissages de ce domaine lorsqu'on confronte les élèves au matériel d'apprentissage.

Cette recherche ne permet pas de certifier les bénéfices que pourrait apporter l'utilisation de tels supports pour les apprentissages. Elle n'évalue pas non plus l'impact des gestes professionnels mis en œuvre par l'enseignant en cas d'utilisation de ces supports puisqu'elle investigate le niveau de maîtrise des deux habiletés lorsque l'enfant ou l'adolescent est confronté, seul, face à ce type de support. Elle participe tout de même à la réflexion quant à leur usage en classe. En vérifiant, dans une perspective développementale, si les enfants et les adolescents sont ou non capables de percevoir et d'agir mentalement sur des représentations virtuelles comme ils le feraient sur du matériel physique de l'espace sensible, cela peut donner une idée de la pertinence ou

non de l'utilisation de ce type de matériel aux différents niveaux scolaires. De plus, l'observation des erreurs commises participe à la compréhension des potentielles difficultés rencontrées face à ce type de support et donc à la réflexion sur l'accompagnement à leur fournir en cas d'utilisation de ces supports. En effet, proposer aux élèves de travailler en classe au départ de représentations qui ne sont pas adéquatement perçues peut s'avérer problématique et doit, au minimum, nécessiter la mise en œuvre d'un accompagnement de l'enseignant. La conception de Widder *et al.* (2019), qui revendique que la meilleure compréhension des difficultés visuelles des élèves face aux représentations 2D peut guider la réflexion sur les apprentissages est ici revendiquée. Cette conception est d'ailleurs même ici étendue aux représentations 2 ½ D. Par ailleurs, les études menées, au-delà d'amener des éléments de réponses quant aux capacités des enfants et des adolescents à percevoir de telles représentations et à agir mentalement sur elles, permettent aussi d'identifier l'impact de certaines modalités d'utilisation de ces représentations virtuelles (ex. manipulation ou observation) sur ces capacités. Cela peut participer à la réflexion quant aux modalités d'usage de ce type de matériel dans le cadre des apprentissages.

Dans le contexte belge francophone actuel marqué par une réforme en profondeur de l'enseignement obligatoire, le Pacte pour un Enseignement d'Excellence (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2017), et par une Réforme de la Formation Initiale des Enseignants (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2019), les résultats de cette recherche peuvent permettre d'accompagner les (futurs) enseignants du primaire et secondaire dans leur choix de supports d'apprentissage à utiliser en géométrie 3D avec les enfants et les adolescents des différents niveaux scolaires. Les résultats peuvent par exemple permettre d'apporter des éléments de réflexion pour la réécriture des programmes scolaires. À l'heure où le numérique est de plus en plus présent dans les classes, il s'agit de prendre du recul vis-à-vis de l'implémentation de son utilisation lors des apprentissages en géométrie 3D en remplacement du matériel physique.

5.2. Objectif général, questions de recherche principales et spécifiques et hypothèses associées

5.2.1. Objectif général et questions de recherche principales

Compte tenu de la problématique évoquée et notamment du peu de recherches antérieures portant sur l'évaluation des habiletés de perception visuelle des objets 3D et de visualisation spatiale en environnement virtuel, l'objectif général de ce travail de recherche est d'évaluer la maîtrise des habiletés de **perception visuelle des objets 3D** et de **visualisation spatiale** auprès d'enfants et d'adolescents au départ de représentations virtuelles d'objets 3D. Ainsi, ce travail de recherche vise à apporter une réponse aux deux questions de recherche principales suivantes :

- 1° Les enfants et les adolescents arrivent-ils à percevoir visuellement les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle (2 ½ D) ?
- 2° Les enfants et les adolescents arrivent-ils à faire preuve de visualisation spatiale sur des objets 3D au départ de leur représentation virtuelle (2 ½ D) ?

À l'instar de ce qu'ont précédemment fait Krylova et Vodyakha (2022) pour évaluer l'habileté de perception visuelle des objets 3D en environnement virtuel auprès d'enfants plus jeunes, ou Bakó (2003) et Ratliff *et al.* (2010) pour évaluer l'habileté de visualisation spatiale en environnement virtuel auprès d'adolescents plus âgés ou d'adultes, une perspective comparative est envisagée pour apporter des éléments de réponse à ces deux questions.

Autrement dit, de façon exploratoire, il s'agit d'identifier si la maîtrise des capacités des enfants et des adolescents à résoudre des tâches impliquant les habiletés investiguées est équivalente au départ de différentes modalités de présentation des objets 3D, que ce soit en comparant différentes modalités de représentation virtuelle d'objet 3D (ex. avec ou sans manipulation autorisée) ou en comparant des supports de dimensionnalité¹² différente (représentations virtuelles, représentations planes ou matériel physique). Cette perspective comparative participe ainsi à une meilleure compréhension du fonctionnement cognitif dans l'environnement virtuel.

La recherche s'inscrit ainsi dans le prolongement de recherches antérieures ayant investigué les mêmes habiletés auprès du même public cible mais à partir de modalités

¹² Le terme « dimensionnalité » est utilisé en référence notamment à Neubauer *et al.* (2010) qui utilisent le terme anglophone « dimensionality » pour distinguer les différents supports utilisés pour évaluer les habiletés spatiales (matériel physique 3D *versus* représentation 2D d'objets 3D).

de présentation non virtuelles d'objets 3D, par exemple celles de Piaget et Inhelder (1948), Duroisin (2015) ou encore Gori *et al.* (2024), ainsi que dans le prolongement d'études ayant évalué ces habiletés dans l'environnement virtuel auprès d'un public cible en partie ou totalement différent et dans des conditions d'évaluations différentes (ex. objets différents), comme celle de Cohen et Hegarty (2012), Sanandaji *et al.* (2017).

Étant donné la perspective comparative et exploratoire envisagée, il est dès lors possible de décomposer chacune des deux questions de recherche principales en plusieurs questions de recherche spécifiques, considérant alors que la réponse à ces questions vient enrichir la compréhension de la maîtrise des habiletés en environnement virtuel.

5.2.2. Questions de recherche spécifiques et hypothèses relatives à l'habileté de perception visuelle des objets 3D

La première question de recherche principale (question 1°), portant sur l'habileté de perception visuelle des objets 3D, est subdivisée en six questions de recherche spécifiques. La première se focalise exclusivement sur l'évaluation de la maîtrise de l'habileté de perception de représentations virtuelles manipulables tandis que les suivantes sont proposées dans une perspective comparative. Les questions et hypothèses associées sont les suivantes :

1.1° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) manipulable de ces objets ?

Par cette première question, il s'agit d'identifier si la perception de représentations virtuelles à manipuler est maîtrisée par les enfants et les adolescents interrogés ou d'objectiver les potentielles difficultés suggérées dans la littérature au regard des caractéristiques de ces représentations virtuelles (nécessité d'une reconstruction mentale de la 3D, surcharge en mémoire de travail, phénomène de rigidité géométrique...). Au vu de ces caractéristiques et des résultats antérieurs obtenus auprès des enfants de 4 à 6 ans (Krylova & Vodyakha, 2022), il est possible d'émettre l'hypothèse que des difficultés à percevoir de telles représentations sont constatées chez les enfants et les adolescents malgré l'impression de tridimensionnalité qu'elles offrent. La validation de cette hypothèse viendrait alors objectiver les propos de Vivian *et al.* (2014), considérant que la capacité à voir dans l'espace au départ d'environnement virtuel peut s'avérer problématique pour certains individus.

1.2° La manipulation de représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D par les enfants ou les adolescents impacte-t-elle leur capacité à percevoir visuellement ces objets ?

Le questionnement relatif à l'impact potentiel de la manipulation apparaît pertinent au vu du lien existant entre action et perception (*cf.* 2.2.3.2c). Il revient à identifier si les enfants sont capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle manipulable comme au départ d'une représentation virtuelle que l'individu n'est pas autorisé à manipuler. De plus, dans une perspective de réflexion sur l'enseignement-apprentissage, ce questionnement permet de se positionner par rapport au décalage observé chez les enseignants entre leur conception sur l'importance de la manipulation et leur choix de pratiques mis en œuvre quand les représentations virtuelles d'objets 3D sont utilisées (*cf.* 4.1.8.2). Puisque la manipulation par l'individu de représentations virtuelles n'apporte pas de stimulus haptique supplémentaire (Žilková & Partová, 2019) offrant des informations sur l'objet 3D et occasionne même un conflit entre les informations visuelles et haptiques (Krylova & Vodyaha, 2020), il est possible de considérer pour hypothèse que le fait d'autoriser la manipulation n'occasionne pas une meilleure maîtrise de la perception de représentations virtuelles que l'observation sans manipulation de ces dernières.

1.3° L'orientation du support sur lequel les représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D sont présentées aux enfants ou aux adolescents impacte-t-elle leur capacité à percevoir visuellement ces objets ?

Cette question fait notamment écho au contexte éducatif dans lequel les apprenants sont tantôt amenés à observer des éléments présentés sur support vertical (tableau, écran de PC...) et tantôt sur support horizontal (feuille placée sur le banc, tablette). Au vu de l'absence de recherches antérieures ayant investigué ce facteur, il s'agit de considérer pour hypothèse une absence de l'influence de l'orientation du support sur la perception de représentations virtuelles.

1.4° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ d'une représentation plane (2D) ?

Les représentations virtuelles fournissent plus d'informations relatives à l'objet 3D que les représentations planes. Elles offrent plus de réalisme (Sanandaji *et al.*, 2017) et permettent de dépasser l'ambiguïté pouvant être associée à ces dernières (Smallmann *et al.*, 2001). Il s'agit alors de considérer pour hypothèse que les enfants et adolescents

maitrisent mieux la perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles qu'au départ de représentations planes.

1.5° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ de matériel physique (3D) ?

En prenant appui sur l'hypothèse de Rose et Foreman (1999), reprise également par Blavier (2006) soulignant une potentielle variation des capacités perceptives dans l'espace sensible et en environnement virtuel, l'hypothèse selon laquelle la perception visuelle des objets 3D au départ de représentations virtuelles diffère de la perception de matériel physique est ici posée. Il s'agit alors de considérer que la perception de représentations 2 ½ D pose davantage de difficultés que la perception du matériel physique.

1.6° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ d'une succession de représentations planes (2D's) ?

Cette question de recherche revient à évaluer la plus-value du caractère dynamique des représentations virtuelles puisqu'elle revient à interroger l'impact du dynamisme de la représentation sur la maîtrise de la perception visuelle des objets 3D. En effet, que ce soit face à des représentations virtuelles à observer, ou face à une suite de représentations planes, diverses informations planes sont données mais le passage des unes aux autres se fait de manière dynamique en environnement virtuel et pas dans la suite de représentations planes. Selon Claisse (2020), le mouvement constitue une aide précieuse pour une meilleure vision dans l'espace et peut donc être un argument relatif à la plus-value des représentations virtuelles dynamiques. Au départ de succession de représentations statiques, les différentes vues présentées doivent être coordonnées par l'individu (Audibert, 1990), ce qui constitue traditionnellement une source de difficultés (Battista & Clements, 1996) tandis que cette coordination est directement proposée au sein des représentations virtuelles. Il s'agit alors ici de considérer, en guise d'hypothèse, que les enfants et adolescents perçoivent davantage les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle qu'au départ d'une succession de représentations 2D.

5.2.3. Questions de recherche spécifiques et hypothèses relatives à l'habileté de visualisation spatiale

Concernant l'habileté de visualisation spatiale des objets 3D, la deuxième question de recherche principale (question 2°) est décomposée en cinq sous-questions de recherche. À nouveau, la première se focalise sur l'évaluation de la maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles alors que les autres sont menées dans une perspective comparative pour affiner la compréhension de la maîtrise de l'habileté. La liste des questions et hypothèses associées auxquelles la recherche tente de répondre est la suivante :

2.1° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) manipulable de ces objets ?

Comme la mise en œuvre d'opérations mentales sur les objets 3D, exigeant déjà une certaine charge cognitive (Hawes & Ansari, 2020), peut déjà poser des difficultés au départ de matériel physique (Duroisin, 2015), il est possible d'émettre l'hypothèse qu'il en est de même au départ de représentations 2 ½ D. D'autant que ces représentations virtuelles entraînent la possible observation des objets dans des positions non standard pouvant générer des difficultés de manipulation mentale (Larios, 2006).

2.2° La manipulation de représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D par les enfants ou les adolescents impacte-t-elle leur capacité à faire preuve de visualisation spatiale sur ces objets ?

Comme pour l'habileté de perception visuelle, et puisque les investigations Keehner *et al.* (2004) montrent une absence d'effet de la manipulation sur les capacités de visualisation spatiale évaluées au départ de représentations virtuelles, il est possible d'émettre l'hypothèse que la manipulation des représentations virtuelles d'objets 3D n'engendre pas une meilleure maîtrise des capacités de visualisation spatiale.

2.3° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ d'une représentation plane (2D) ?

Barlett *et al.* (2023) soulignent que le réalisme des représentations virtuelles peut impacter positivement les performances spatiales des individus. De plus, au regard des résultats d'études comparatives antérieures menées auprès d'adultes (Cohen &

Hegarty, 2012 ; Tsutsumi *et al.*, 2008), il est possible d'émettre l'hypothèse qu'une meilleure maîtrise de la capacité à mener des opérations mentales sur l'objet perçu est observée au départ de représentations 2 ½ D en comparaison aux représentations 2D.

2.4° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ de matériel physique (3D) ?

Comme Rose et Foreman (1999) le suggèrent, il est possible d'émettre l'hypothèse selon laquelle les capacités cognitives peuvent être différentes quand elles sont mises en œuvre dans l'espace sensible et en environnement virtuel, avec une meilleure maîtrise dans l'espace sensible, pouvant ici notamment être expliquée par des potentielles difficultés à percevoir l'objet 3D. Elle apparaît par ailleurs en cohérence avec les propos de Ratliff *et al.* (2010) et de Hawes *et al.* (2015a) qui préconisent une utilisation du matériel physique, considéré comme plus adapté lors de l'évaluation de cette habileté, notamment auprès d'enfants, ainsi qu'avec les observations de Bakó (2003) dans son étude comparative menée auprès d'adolescents.

2.5° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ d'une succession de représentations planes (2D's) ?

L'absence de recherche, à notre connaissance, ayant investigué cet aspect nous empêche de proposer une hypothèse basée sur les résultats d'études antérieures. Pour autant, de la même façon que de meilleures capacités de perception virtuelle peuvent être suspectées au départ de représentations virtuelles plutôt qu'au départ d'une succession de représentations planes, compte tenu de leur caractère dynamique, il est possible d'émettre l'hypothèse que l'habileté de visualisation spatiale est mieux maîtrisée également au départ de représentations 2D.

5.2.4. Mise en place des études expérimentales pour apporter des réponses aux questions de recherche investiguées

Pour apporter des éléments de réponse aux questions précédemment formulées et confirmer ou infirmer les hypothèses émises, deux études expérimentales ont été réalisées, chacune d'elles permettant de répondre à plusieurs de ces questions (Tableau 6).

La première étude se focalise uniquement sur l'évaluation du niveau de maîtrise de l'habileté de perception visuelle des objets 3D face à des représentations virtuelles à manipuler et à observer et face à des représentations planes. Elle permet ainsi de répondre aux questions 1.1°, 1.2°, 1.3° et 1.4°.

Dans la seconde étude expérimentale, l'habileté de perception visuelle est à nouveau évaluée en conservant certaines modalités de présentation des objets 3D et en en intégrant de nouvelles. Elle est alors étudiée auprès d'enfants et d'adolescents âgés de 6 à 15 ans au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer, de représentations planes uniques, de successions de représentations planes mais aussi au départ de matériel physique. Cette seconde étude permet ainsi de répondre aux questions 1.1°, 1.2°, 1.4°, 1.5° et 1.6°. D'autant qu'une légère modification de l'évaluation de l'habileté est proposée (choix multiple VS choix unique) afin d'offrir des informations complémentaires à la première étude et ainsi une meilleure compréhension de l'habileté. Dans cette seconde étude expérimentale, l'habileté de visualisation spatiale est également investiguée auprès des mêmes individus et en utilisant les mêmes modalités de présentation des objets 3D. De cette façon, l'étude permet d'apporter des éléments de réponses à l'ensemble des questions de recherche se rapportant à la deuxième habileté.

Que ce soit pour la première ou la seconde étude, des enfants et adolescents scolarisés en Belgique francophone sont interrogés. Si le niveau de performance à des tâches impliquant les habiletés spatiales est évalué chez ces enfants et adolescents de différents âges et donc de différents niveaux scolaires, il est nécessaire de garder à l'esprit que les performances obtenues sont dépendantes de ce contexte dans la mesure où les apprentissages rencontrés lors du parcours scolaire peuvent influencer l'acquisition de ces habiletés. Le chapitre 4 a d'ailleurs permis d'illustrer le lien entre ces habiletés spatiales et certains apprentissages scolaires, notamment en géométrie. Il s'agit d'ores-et-déjà de clarifier le fait que la recherche vise alors à évaluer les performances d'enfants et d'adolescents âgés de 6 à 15 ans scolarisés en Belgique francophone. De plus, cet aspect contextuel sera pris en compte dans l'interprétation des résultats. Par ailleurs, la variable relative aux apprentissages antérieurs sera, au moins en partie, prise en compte dans les analyses menées.

Tableau 6 : Questions de recherche et expérimentations associées

	Questions de recherche spécifiques	Étude 1	Étude 2
1° Les enfants et les adolescents âgés arrivent-ils à percevoir visuellement les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle (2 ½ D) ?	1.1° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) manipulable de ces objets ?	✓	✓
	1.2° La manipulation de représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D par les enfants ou les adolescents impacte-t-elle leur capacité à percevoir visuellement ces objets ?	✓	✓
	1.3° L'orientation du support sur lequel les représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D sont présentées aux enfants ou aux adolescents impacte-t-elle leur capacité à percevoir visuellement ces objets ?	✓	
	1.4° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ d'une représentation plane (2D) ?	✓	✓
	1.5° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ de matériel physique (3D) ?		✓
	1.6° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ d'une succession de représentations planes (2D's) ?		✓
2° Les enfants et les adolescents arrivent-ils à faire preuve de visualisation spatiale sur des objets 3D au départ de leur représentation virtuelle (2 ½ D) ?	2.1° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) manipulable de ces objets ?		✓
	2.2° La manipulation des représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D par les enfants ou les adolescents impacte-t-elle leur capacité à faire preuve de visualisation spatiale sur ces objets ?		✓
	2.3° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) comme au départ d'une représentation plane (2D) ?		✓
	2.4° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) comme au départ de matériel physique (3D) ?		✓
	2.5° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) comme au départ d'une succession de représentations planes (2D's) ?		✓

Chapitre 6. Création et validation de l'environnement 2 ½ D utilisé dans les études

Chapitre 6. Création et validation de l'environnement 2 ½ D utilisé dans les études¹³

Dans une recherche évaluant la capacité d'individus à exercer des habiletés spatiales portant sur des représentations virtuelles d'objets 3D, et plus encore lorsqu'une telle évaluation est prévue auprès d'enfants et d'adolescents, le choix de l'environnement virtuel (interface, logiciel...) est une variable cruciale pouvant impacter les performances de ces derniers. Celui-ci est notamment susceptible d'entraîner une charge cognitive pouvant varier (Vivian *et al.*, 2014).

Si les choix effectués par rapport à cet environnement sont décrits et justifiés au sein de ce chapitre, les possibilités finalement non choisies pourraient parfois constituer des prolongements aux études menées. Dans un premier temps, le type d'environnement et d'interface choisis sont justifiés avant de décrire le type de logiciel sélectionné. L'environnement virtuel créé pour les études est présenté au regard notamment des recommandations mises en avant au sein de la littérature scientifique. Avant d'être utilisé dans les études, l'environnement a fait l'objet d'une validation décrite également dans ce chapitre, visant la vérification de son utilité et son utilisabilité.

6.1. Justification du choix de l'environnement et de l'interface

Dans le chapitre 1, l'existence de plusieurs types d'environnement 2 ½ D a été mise en évidence : ceux dans lesquels les manipulations occasionnent une modification du point de vue et ceux entraînant une modification des positions des objets présentés dans cet environnement et conservant un point de vue fixe. Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur le deuxième type d'environnement en proposant d'étudier la perception d'objets 3D représentés virtuellement, placés seuls au sein d'un environnement virtuel et pouvant être manipulés. Cela se justifie par le fait de faire une analogie avec la manipulation de matériel physique, notamment dans le cadre des apprentissages en géométrie 3D, qui implique principalement que l'élève reste à sa place et manipule l'objet en gardant sa position plus ou moins fixe.

Dans cette étude, l'intention est d'évaluer les habiletés de perception visuelle et de visualisation spatiale exercées sur des objets 3D représentés virtuellement. La volonté est de se focaliser sur un environnement présenté sur écran 2D et non au sein d'un

¹³ Plusieurs parties de ce chapitre ont fait l'objet d'une publication : Beuset et Duroisin (2024).

environnement immersif de type « casque de réalité virtuelle ». Ce choix se justifie d'une part par le fait que c'est majoritairement face à ce type d'appareil que les enfants et les adolescents sont confrontés au quotidien. Par ailleurs, il s'agit de rester prudent quant à l'utilisation de casques de réalité virtuelle chez les enfants puisque peu d'informations sont disponibles concernant les effets de cette utilisation (Aubrey *et al.*, 2018). D'ailleurs, la plupart des compagnies recommandent de ne pas utiliser une telle interface avec les enfants âgés de moins de 12 ans, même si ces estimations ne découlent pas d'analyses empiriques et bien que certains appareils aient été pensés pour les enfants, par exemple le *View-Master VR*.

Sur écran 2D, plusieurs modalités d'interaction peuvent être envisagées pour effectuer des opérations sur les objets présentés virtuellement. Une première possibilité est d'utiliser un écran avec interface tactile (tablette, smartphone). Selon les logiciels, les gestes tactiles devant être appliqués pour les réaliser sont cependant variables. Certains logiciels fonctionnent avec des manipulations à partir d'un doigt, de deux doigts et/ou de trois doigts (Hancock *et al.*, 2007). Bertolo (2013) présente d'ailleurs de nombreux exemples de modalités d'interaction. Cependant, des contraintes peuvent être ajoutées dans certains logiciels afin de limiter certaines actions et de faire en sorte que les utilisateurs se focalisent sur d'autres (Moyer *et al.*, 2001). Une deuxième possibilité est d'utiliser une interaction via souris, clavier, ou manette, sur ordinateur ou télévision par exemple. Une dernière possibilité, un peu plus spécifique, pourrait être envisagée : l'utilisation d'un système de réalité augmentée avec interaction au travers d'un objet manipulable. Cette possibilité consiste à utiliser un objet physique de référence devant être scanné par la caméra d'un appareil (téléphone ou tablette) sur lequel l'élément à observer apparaît. Les manipulations effectuées sur l'objet de référence sont scannées par l'appareil et sont alors appliquées à l'élément. Le système du Merge cube, illustré en Figure 27, propose que cet objet de référence soit cubique mais d'autres alternatives existent, par exemple des QR code imprimés sur une feuille.

Puisque les deux habiletés investiguées ont été peu étudiées en environnement virtuel et compte tenu du fait que les études portent sur des enfants dès l'âge de 6 ans, l'interface la plus simple et habituelle pour ce public cible est privilégiée. Au vu de la charge cognitive plus importante occasionnée par la deuxième possibilité en comparaison aux interactions tactiles (Hoe *et al.*, 2017) et puisqu'elle est décrite comme moins adaptée (Bertolo, 2013), le choix ne s'est pas porté sur cette possibilité.

Ce choix est d'ailleurs confirmé par Sinclair et Bruce (2015) qui ont pu observer que des enfants du primaire trouvaient l'utilisation de la souris difficile dans le cadre de la manipulation de solides et que les interactions tactiles peuvent atténuer cette difficulté de manipulation. La dernière solution n'a pas non plus été maintenue puisque, même si elle augmente le degré de liberté et offre un moyen d'interaction plus naturel car associé à l'espace physique, celle-ci occasionne une contradiction importante entre la perception visuelle et la perception haptique, ce qui est susceptible d'impacter les résultats. En effet, l'individu manipule un objet de référence d'une certaine forme, par exemple cubique mais il observe que ses manipulations s'appliquent à un objet d'une autre forme. Cette contradiction, venant créer un conflit spatial multisensoriel (Van Der Stoep *et al.*, 2017) pourrait sans doute aussi affecter la perception étant donné la complémentarité des perceptions sensorielles. À l'instar de Krylova et Vodyaha (2020) mais aussi de Krylova et Vodyakha (2022), la première possibilité a été conservée, même si celle-ci implique également un conflit multisensoriel entre la perception visuelle et haptique (manipulation tactile de l'écran), avec l'idée de se focaliser sur une utilisation la plus simple possible et un logiciel n'exigeant pas de gestes très précis vu les risques d'imprécision qu'occasionne la manipulation tactile (Vivian *et al.*, 2014). De plus, afin de profiter d'une plus grande dimension d'écran, la tablette a été privilégiée au détriment du téléphone. Cette solution apparaît par ailleurs en cohérence avec le type de matériel utilisé dans les classes (TBI, tablette...).



Figure 27 : Illustration du Merge Cube

6.2. Justification du choix de logiciel

Pour les raisons citées préalablement, l'environnement virtuel souhaité est un environnement virtuel de type 2 ½ D dans lequel des objets 3D sont manipulables via interface tactile, se rapprochant le plus possible de la manipulation des objets dans

l'espace physique, devant demeurer utilisable par des enfants âgés d'au moins 6 ans et offrant la possibilité d'intégrer n'importe quel objet 3D virtuel préalablement conçu. S'il existe déjà plusieurs logiciels qui intègrent des environnements virtuels 2 ½ D (ex. logiciels de géométrie dynamique, logiciels de modélisation 3D, applications préconçues), ces derniers ne permettent pas de répondre aux attentes pour les études menées puisqu'ils offrent des possibilités plus complexes que ce qui est attendu.

Les logiciels de géométrie dynamique ou de modélisation 3D offrent de nombreuses possibilités d'action aux utilisateurs qui les rendent moins faciles à utiliser. En effet, de tels logiciels offrent la possibilité de créer et transformer des configurations 3D diverses, ce qui occasionne de nombreuses commandes pour les utilisateurs et ne permet pas de contrôler les actions de l'utilisateur. Leur utilisation avec les élèves du primaire et secondaire inférieur lors de l'apprentissage peut s'avérer inadaptée (cf. 4.1.8.1c). De plus, même si certaines interactions dans ces logiciels peuvent permettre une manipulation des objets 3D (possibilité d'appliquer une rotation d'un objet), ils reposent principalement sur des interactions entraînant une modification du point de vue, ce qui n'est pas ici souhaité pour des raisons déjà décrites.

Par ailleurs, des applications préconçues, de type « outils de manipulation virtuels » (cf. 4.1.8.1c), existent déjà pour manipuler des objets 3D au sein d'environnements virtuels. Pour deux raisons principales, elles ne conviennent pas non plus dans le cadre de cette étude. D'une part, elles offrent souvent une multitude d'actions de manipulation (rotation, translation, homothétie, passage au développement...), ce qui complexifie son utilisation notamment chez les plus jeunes et qui ne permet pas de contrôler la variable des actions menées sur la tablette. D'autre part, si certaines n'offrent que pour possibilité l'action de rotation, les objets 3D proposés dans ces applications restent uniquement ceux proposés par les concepteurs de l'application, sans possibilité pour l'utilisateur d'intégrer des objets de son choix. Il y a donc des contraintes vis-à-vis du choix des objets 3D à manipuler mais aussi vis-à-vis de leur taille et leur apparence (couleur/texture).

L'option de création de l'environnement virtuel utilisé lors des études s'est alors avérée la plus pertinente. Celui-ci a été élaboré via le logiciel *Unity*, permettant la conception d'applications diverses. L'utilisation de ce logiciel a permis de créer un environnement virtuel 2 ½ D offrant la possibilité au chercheur d'y intégrer n'importe quelle forme 3D (forme, grandeur, texture) préalablement conçue et de contrôler les actions de l'utilisateur en les limitant pour faciliter l'utilisation par l'enfant et

augmenter, dans la limite du possible, la ressemblance avec la manipulation d'objets physiques, en tenant compte de recommandations identifiées au sein de la littérature, qui ne sont pas toujours respectées au sein des logiciels existants. Du point de vue de la recherche, ce choix permet ainsi de contrôler différentes variables. Ce logiciel rend possible la création d'environnements identiques manipulables sur ordinateur (rotations des objets effectuées via les touches directionnelles du clavier). Cette fonctionnalité ne sera pas utilisée par les participants lors des expérimentations mais sera exploitée pour la création de matériel expérimental.

6.3. Description du logiciel et de l'environnement 2 ½ D créé

L'environnement créé pour les études est illustré en Figure 28, avec l'exemple d'un cylindre. À l'instar de ce qu'ont proposé Ha et Fang (2017), le choix a été d'opter pour un environnement en projection orthographique. Si ce choix, en comparaison à la perspective linéaire, s'éloigne du fonctionnement de la vision, il permet de mettre en avant les caractéristiques réelles des objets 3D que l'on souhaite représenter et pour lesquels on tente de vérifier la perception. De plus, les enfants et les adolescents semblent considérer que ce choix fournit une meilleure représentation des objets 3D, du moins pour le cube, qu'une représentation en perspective linéaire (Parzys, 1991).

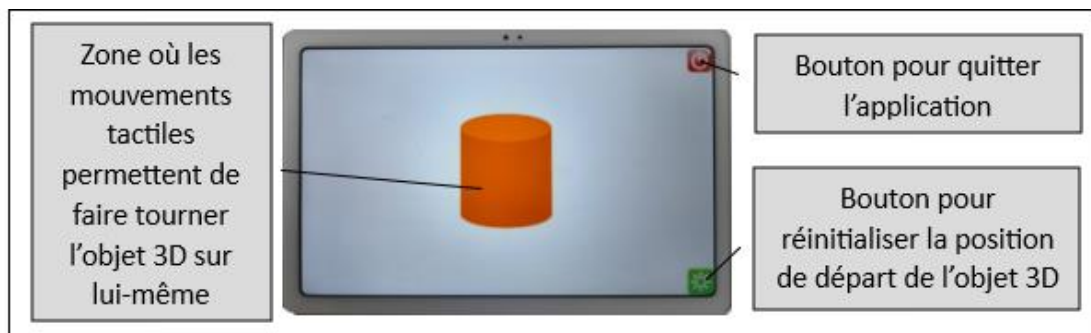


Figure 28 : Environnement virtuel créé et utilisé

Dans cet environnement simulant le micro-espace (au sens de Brousseau, 2000), l'objet apparaît au centre dans un espace vide, tel un objet en lévitation, de façon à proposer un environnement le plus simple et le plus neutre possible afin de ne pas complexifier la compréhension du processus cognitif de perception visuelle. Seules trois actions sont possibles sur cette interface. D'abord, sur la partie centrale de l'écran se situe l'objet virtuel qui est présenté. À l'aide de déplacements de son doigt sur l'écran tactile, une rotation de l'objet 3D sur lui-même est réalisée. Afin de garder une certaine

facilité de manipulation et de contrôle des actions par l'utilisateur, étant donné la complexité d'effectuer des mouvements en 3D au départ d'une interface 2D, le choix a été de limiter les actions à des rotations dans deux plans, à l'instar de Krylova et Vodyaha (2020). Comme l'illustre la Figure 29, les rotations sont limitées à des rotations dont le centre est le centre de l'objet dans un plan « à plat¹⁴ » ou dans un plan vertical. Ainsi, un mouvement de doigt sur l'écran vers la gauche ou la droite entraîne une rotation de l'élément sur lui-même dans le sens du mouvement réalisé selon ce plan « à plat » (dans le cas du cylindre droit, cela revient à une rotation autour d'un axe imaginaire passant par le centre des bases). Un mouvement vers le bas ou le haut entraîne quant à lui une rotation en profondeur de l'élément sur lui-même, respectivement vers l'avant ou l'arrière (ce qui revient à une rotation autour d'un axe imaginaire horizontal). Il s'agit donc d'une manipulation simple au travers d'interactions unimanuelles. Cette limitation des manipulations apparaît nécessaire pour que les enfants et les adolescents utilisant l'environnement virtuel puissent maîtriser les manipulations des objets de l'espace 3D sur un support 2D.

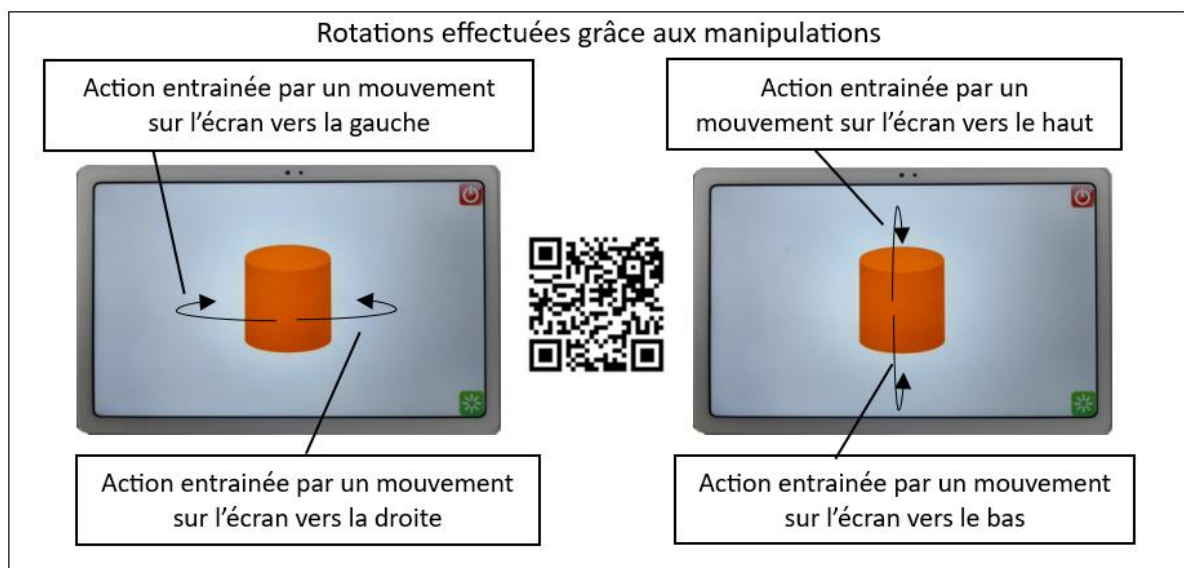


Figure 29 : Rotations possibles au sein de l'environnement virtuel

Par ailleurs, une autre spécificité de l'environnement créé, pour des raisons techniques, relève du fait que, si les rotations vers la gauche ou la droite peuvent être illimitées et permettent ainsi de faire tourner indéfiniment l'objet 3D sur lui-même, celles menées vers l'avant ou l'arrière sont quant à elles limitées. Elles ne permettent

¹⁴ Plan parallèle aux sol « invisible » sur lequel est posé l'objet et passant par le centre de l'objet.

pas de faire tourner indéfiniment l'objet dans ce sens puisque la manipulation vers l'avant de l'objet n'est pas possible au-delà de son dessus, tandis que la manipulation vers l'arrière ne permet pas d'aller au-delà de son dessous. Par exemple, un cylindre peut être manipulé vers l'arrière et vers l'avant de façon à voir les faces supérieures et inférieures mais la rotation ne peut pas aller au-delà. Autrement dit, au départ de la position permettant d'observer parfaitement l'avant de l'objet 3D, la manipulation vers l'avant ou l'arrière est restreinte à 90°.

Les différentes contraintes présentées ci-dessus, si elles ont été mises en œuvre pour des raisons pratiques ou techniques, entraînent cependant une certaine distance avec les manipulations possibles dans l'espace sensible qui elles ne sont pas limitées aux rotations dans les deux plans présentés. Appliquer un basculement de l'objet 3D vers la gauche n'est par exemple pas possible. Ainsi, l'objet 3D ne pourra pas être observé dans toutes les positions contrairement à ce qui pourrait être fait dans l'espace physique. Cette distance est importante à garder à l'esprit dans l'analyse des résultats.

Les deux autres actions possibles sont liées aux deux boutons proposés sur l'interface. En haut à droite se situe le bouton rouge qui permet à l'utilisateur de sortir de l'environnement virtuel ouvert. En bas à droite se situe le bouton vert qui permet de réinitialiser la position de départ de l'objet 3D, ce qui sera utile pour l'expérimentateur lors des études. Autrement dit, après avoir manipulé l'objet 3D, il est possible, grâce à ce bouton, de le remettre en position initiale. Aucune autre action réalisée sur l'interface, qu'elle soit réalisée à l'aide d'un ou plusieurs doigts, n'aboutit à une modification. Il n'y a donc pas de possibilité pour l'utilisateur d'agrandir l'objet, de le déplacer à un autre endroit de l'écran ou encore de déplacer le centre de rotation, qui reste au centre de l'objet 3D de façon à uniquement le faire tourner sur lui-même.

L'environnement créé semble en accord avec les intentions initiales et les recommandations identifiées dans la littérature puisque Bertolo (2014) semble recommander des logiciels au sein desquels les manipulations sont les plus simples, en proposant de se focaliser, pour les actions les plus courantes, sur des interactions unimanuelles. De manière générale, une interface la plus naturelle possible permet de réduire la charge cognitive exigée (Bujak *et al.*, 2013) et permet d'établir plus facilement des connexions entre rotation et visualisation (Hoe *et al.*, 2017). Dans notre cas, comme présenté préalablement, seules des interactions unimanuelles réalisées avec un seul doigt sont proposées et aboutissent à un seul type d'action, afin de

simplifier les interactions avec le logiciel, notamment pour les plus petits et afin de contrôler les actions autorisées dans le contexte expérimental. Cette action est relativement intuitive puisqu'un mouvement sur l'écran permet d'appliquer une rotation dans le sens du mouvement effectué. Cette manipulation reste simple, et ce même si ce sont des transformations en 3D appliquées au départ d'un geste 2D sur l'écran. Cela devrait favoriser, chez les utilisateurs, la maîtrise de la coordination entre les gestes faits sur la tablette et les mouvements effectués par l'objet 3D, qui peut s'avérer problématique dans les environnements virtuels (Bertolo, 2013). Par ailleurs, la limitation des actions pouvant être menées permet de diminuer les risques d'actions inattendues entraînées par des difficultés motrices (Highfield & Mulligan, 2007), pouvant s'avérer gênantes lors de l'utilisation du logiciel.

La taille de l'espace de manipulation constitue également un point d'attention. Il est recommandé que l'environnement fournisse un espace de manipulation suffisant, en évitant, ou au moins en limitant la présence de menu (Bertolo, 2014), ce que respecte l'environnement créé. En effet, l'espace de manipulation occupant la quasi-totalité de l'écran et, pour remplacer un potentiel menu, deux boutons distincts et clairement identifiables ont été intégrés.

De plus, certains logiciels proposent l'affichage de widgets pour effectuer les manipulations. Il s'agit, comme illustré au sein de la Figure 30, de repères intégrés lors de la réalisation de manipulation (rotation, déplacement, homothétie) et permettant de définir des directions, des orientations, des axes. Ces widgets doivent être évités dans le cadre de l'utilisation d'environnement avec les élèves puisqu'elle amène deux inconvénients d'un point de vue didactique. D'une part, elle complique l'acquisition du rapport topologique de séparation. D'autre part, elle complique également le processus cognitif de déconstruction des formes décrit par Duval (2005) comme essentiel pour un développement de la visualisation. Pour ces raisons, aucun widget n'a été intégré dans l'environnement créé.

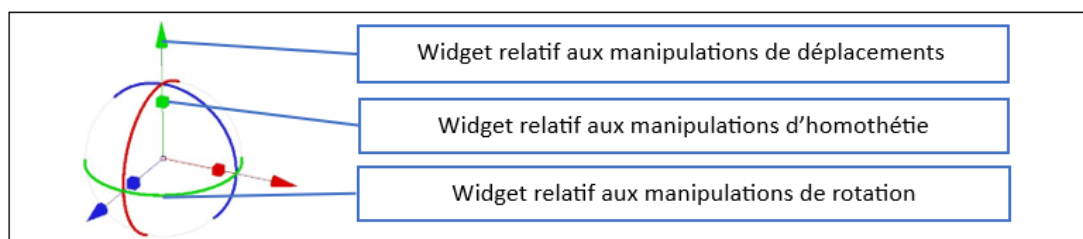


Figure 30 : Exemple de widgets (Cohé et al., 2011, p.3005)

Par ailleurs, si Dumas *et al.* (2001), mais aussi Todd (2004), évoquent que plusieurs indices peuvent être intégrés pour encourager la perception de la troisième dimension (variantes d'intensité, ombrage de l'image, texture représentant des gradients...), ces indices semblent davantage adaptés à des objets complexes. Puisque l'étude se focalise ici sur des objets simples, des effets de lumière ont été ajoutés sur l'objet 3D pour que l'utilisateur puisse percevoir les mouvements de l'objet lorsque ceux-ci n'occasionnent pas de transformation de l'allure de l'objet. Par exemple, pour le cas du cylindre, lorsque des rotations du solide sont effectuées autour de l'axe vertical (rotation du solide sur lui-même vers la gauche ou la droite), ce qui est vu par l'utilisateur conserve la même allure. L'effet des lumières permet finalement à l'utilisateur d'avoir conscience des mouvements effectués sur l'objet présenté.

Enfin, au-delà des caractéristiques prises en compte lors de la création de l'environnement, il apparaît indispensable à l'instar de ce qu'a fait Bertolo (2014) de valider l'environnement créé en testant son utilisabilité notamment. L'utilisabilité peut être définie comme « *le degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs spécifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié* » (normes ISO 9241-11, 1998, citées par Bertolo, 2014, p.106). En plus du critère de l'efficacité, de l'efficience et de la satisfaction, Nielsen (1994) évoque que l'utilisabilité contient aussi la facilité d'apprentissage de l'utilisation du produit. Plusieurs auteurs ont élaboré un questionnaire permettant d'évaluer l'utilisabilité des outils, par exemple Davis (1989) ou Baraudon *et al.* (2021).

Même après validation de l'outil, il semble essentiel de prévoir un temps d'apprentissage ou du moins de familiarisation de l'utilisation du logiciel en lui-même pour les participants de l'étude avant d'entamer les tâches expérimentales (Mithalal, 2010). Ce temps de première manipulation, permet une familiarisation des enfants et des adolescents avec le logiciel, ce qui est essentiel étant donné les difficultés potentielles à manipuler ce type d'environnement au travers d'une interface tactile. D'autre part, cela permet également de limiter le caractère distracteur lorsqu'il sera question d'utiliser l'outil lors de l'évaluation des habiletés spatiales.

6.4. Apparence des éléments intégrés dans l'environnement virtuel

Le logiciel utilisé permet d'intégrer n'importe quel élément préalablement modélisé au sein d'un logiciel de modalisation 3D et de faire varier son apparence. Le choix a

cependant été de se focaliser sur l'intégration d'éléments non transparents (où les éléments non visibles ne sont donc pas tracés) d'apparence neutre et colorée. Si ce choix entraîne une augmentation des informations cachées puisqu'il ne permet pas de percevoir, sans le manipuler, la forme de la face arrière, il entraîne une diminution des PMI (au sens de Widder *et al.*, 2014) en limitant la présence d'aberrations visuelles comme les fausses intersections, les surfaces fermées inexistantes ou encore les faux alignements.

Afin de se rapporter à ce qu'on peut observer dans les objets du quotidien (Figure 31), les arêtes ne sont pas tracées en noir sur l'objet 3D, contrairement à ce qui peut être souvent observé dans les représentations utilisées en contexte scolaire. Elles sont néanmoins perceptibles grâce à la distinction des faces, en proposant des faces adjacentes de différentes teintes d'une même couleur. Ce choix de proposer l'objet en couleur est renforcé par les observations de Wu et Chiang (2013) qui ont pu relever que les étudiants considéraient que proposer un objet coloré dans un environnement virtuel pouvait mieux aider à percevoir les caractéristiques de l'objet présenté.

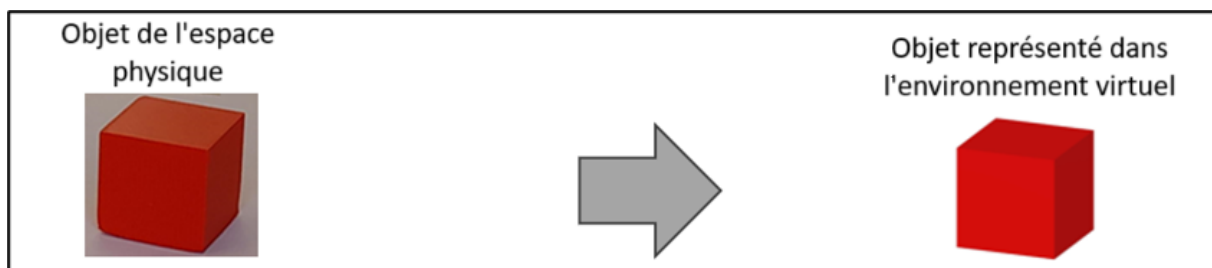


Figure 31 : Comparatif entre espace physique et environnement virtuel

6.5. Validation de l'environnement 2 ½ D créé

Comme précisé, avant d'être exploité lors des études, l'environnement virtuel élaboré a fait l'objet d'une validation. Cette validation apparaît essentielle compte tenu des potentielles difficultés de manipulation d'environnement virtuel via une interface en 2D (Cohé, 2012 ; Herndon *et al.*, 1994) même si les différentes recommandations identifiées dans la littérature ont été prises en compte. La validation de ce dernier a été réalisée auprès d'un échantillon tout-venant d'enfants et d'adolescents dont l'âge correspond au public cible des études. Étant donné la crise sanitaire de la covid-19, entraînant l'organisation de l'enseignement à distance en FWB, la validation a dû être menée en dehors du contexte scolaire. Elle a pour objectif de vérifier si les enfants et

les adolescents sont capables de manipuler aisément des objets 3D représentés au sein de l'environnement virtuel créé, d'estimer le temps et les consignes nécessaires à son appropriation et d'évaluer son utilité et son utilisabilité.

6.5.1. Déroulement de la validation de l'environnement 2 ½ D créé

La validation menée prend la forme d'un entretien individuel d'une quinzaine de minutes organisé en quatre étapes (Figure 32). La première étape est un questionnaire *a priori* utilisé pour interroger les participants sur leurs habitudes avec les appareils tactiles (tablette ou smartphone). Ensuite, un temps de manipulation libre est laissé pour identifier le temps nécessaire aux participants pour s'approprier l'environnement virtuel, ainsi que les consignes importantes à leur fournir. Dans un troisième temps, trois tâches exigeant la manipulation d'objets 3D dans l'environnement virtuel sont proposées aux participants et permettent d'identifier les capacités et éventuelles difficultés à manipuler l'environnement. Enfin, après avoir résolu les trois tâches, autrement dit après avoir été amené à utiliser à plusieurs reprises l'environnement virtuel, un questionnaire *a posteriori* est proposé aux enfants et aux adolescents pour évaluer l'utilité et l'utilisabilité de l'environnement. L'expérimentateur dispose d'une feuille de réponse qu'il complète tout au long de l'entretien (pour y noter ses observations et les réponses données par l'enfant ou l'adolescent) afin de garder une trace des données récoltées lors de l'entretien.

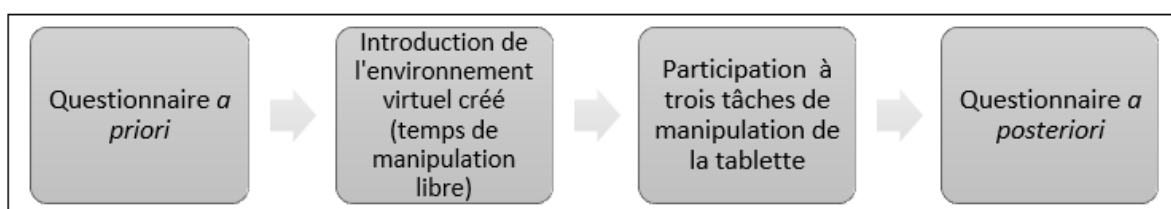


Figure 32 : Étape de la validation de l'environnement 2 ½ D

6.5.1.1. Questionnaire *a priori*

Après une brève introduction permettant de rassurer le participant, plusieurs questions lui sont posées oralement afin d'identifier ses habitudes vis-à-vis des appareils tactiles. Cela constitue une variable indispensable à prendre en considération puisque notre objectif est de vérifier si l'environnement est utilisable par tous, y compris par des enfants et des adolescents peu habitués à manipuler ce type

d'environnement. Une première question porte sur la fréquence d'utilisation de la tablette et permet d'identifier si l'enfant ou l'adolescent utilise ce type d'appareil tous les jours, plus d'une fois par semaine, moins d'une fois par semaine, occasionnellement ou jamais. Une deuxième question porte sur les usages qu'ils ont de ces appareils. Le participant doit dire s'il utilise ou non les appareils tactiles pour jouer à des jeux, regarder des vidéos/films/..., aller sur internet, communiquer avec d'autres personnes ou pour effectuer d'autres actions. Enfin, une dernière question permet de savoir s'il se sentirait globalement à l'aise, plus ou moins à l'aise ou globalement pas à l'aise avec le fait de devoir manipuler un écran tactile.

6.5.1.2. Introduction de l'environnement, manipulation libre et questionnaire intermédiaire

Directement après la récolte d'informations *a priori*, l'expérimentateur introduit l'environnement en expliquant au participant qu'il permet de manipuler des objets qui seront présentés dans la tablette. Il ouvre ensuite l'environnement dans lequel un objet 3D usuel, à savoir une bouteille, est placé et explique au participant qu'il suffit de faire glisser son doigt sur l'écran pour faire tourner l'objet 3D. Il illustre ses explications en réalisant un geste vertical et un geste horizontal sur l'écran. Ensuite, il propose au participant d'essayer de manipuler la tablette : « *Je vais te proposer d'essayer de t'habituer à manipuler la tablette car tu en auras besoin pour la suite des activités. Au moindre problème avec la tablette, n'hésite pas à me le dire. Dès que tu te sens à l'aise avec la tablette et que tu penses avoir bien compris comment fonctionne l'environnement sur la tablette, préviens-moi* ». L'expérimentateur laisse alors le participant manipuler la tablette, observe les manipulations réalisées et répond à ses éventuelles questions. Il chronomètre le temps mis par ce dernier avant qu'il ne déclare se sentir à l'aise et prend note de ses observations (questions ou remarques formulées par le participant, difficultés observées...).

Enfin, ce temps de manipulation libre se finit par la passation d'un court questionnaire intermédiaire écrit dans lequel le participant est invité à donner son degré d'accord par rapport à trois affirmations au travers d'une échelle de type Lickert à cinq niveaux allant de « Pas du tout d'accord » à « Tout à fait d'accord », chacune des possibilités étant associée à un smiley (Figure 33). Les trois affirmations sont les suivantes : « J'ai eu assez de temps pour m'habituer à utiliser la tablette », « J'arrive à

manipuler un objet sur la tablette » et « Apprendre à manipuler un objet sur la tablette était facile ».
















1) J'ai eu assez de temps pour m'habituer à utiliser la tablette	 Pas du tout d'accord	 Plutôt pas d'accord	 Sans avis	 Plutôt d'accord	 Tout à fait d'accord
2) J'arrive à manipuler un objet sur la tablette	 Pas du tout d'accord	 Plutôt pas d'accord	 Sans avis	 Plutôt d'accord	 Tout à fait d'accord
3) Apprendre à manipuler un objet sur la tablette était facile	 Pas du tout d'accord	 Plutôt pas d'accord	 Sans avis	 Plutôt d'accord	 Tout à fait d'accord

Figure 33 : Questionnaire intermédiaire utilisé lors de la validation de l'environnement

6.5.1.3. Réalisation de trois tâches de manipulation

Trois exercices différents impliquant la manipulation de l'environnement virtuel créé sont proposés à chaque enfant et adolescent. Le premier est un exercice d'exploration partiellement libre. Si dans le premier exercice, les mouvements à effectuer n'étaient pas imposés, ce n'est plus le cas dans le deuxième et troisième exercice. Dans le deuxième, il doit réaliser des manipulations en suivant des consignes verbales tandis que, dans le troisième, il doit répliquer des mouvements appliqués sur un objet physique. L'expérimentateur, de son côté, observe si le participant réussit ou non les différents items proposés et prend note des éventuelles difficultés de manipulation observées. Cette progression d'exercices est proposée afin d'identifier d'abord si le participant est capable de manipuler l'environnement et ensuite s'il maîtrise pleinement la manipulation dans l'environnement, en pouvant effectuer des manipulations imposées.

a. Premier exercice : exploration partiellement libre

Dans le premier exercice, un cube possédant sur chacune de ses faces un dessin différent (soleil, smiley...) est placé dans l'environnement virtuel. Il est demandé au participant de manipuler le cube de façon à pouvoir citer l'ensemble des dessins présents sur les faces. Il est donc amené à manipuler librement le cube de façon à explorer l'ensemble des faces. L'expérimentateur vérifie si tous les dessins ont été cités.

b. Deuxième exercice : exploration en suivant des consignes verbales

Dans le deuxième exercice, une représentation virtuelle d'une voiture est proposée au sein de l'environnement virtuel. Il est demandé au participant de manipuler la voiture en suivant les consignes. L'expérimentateur annonce les différentes consignes une à une :

- Déplace l'objet pour qu'on puisse voir l'arrière de la voiture,
- Déplace l'objet pour qu'on puisse voir le dessus de la voiture,
- Déplace l'objet pour qu'on puisse voir l'un des côtés de la voiture,
- Déplace l'objet pour qu'on puisse voir le dessous de la voiture,
- Déplace l'objet pour qu'on puisse voir le dernier côté de la voiture.

L'expérimentateur vérifie, pour chaque déplacement, si le participant a réussi directement le déplacement, s'il l'a réussi avec tâtonnement ou s'il ne l'a pas réussi.

c. Troisième exercice : exploration en répliquant des manipulations réalisées sur un objet physique

Le troisième exercice propose au participant un simple cube présenté dans l'environnement virtuel. De son côté, l'expérimentateur dispose du même cube proposé en matériel physique. L'expérimentateur demande au participant de réaliser sur le cube virtuel, les mêmes manipulations que ce qu'il va lui montrer sur le matériel physique. L'expérimentateur se place à côté du participant et tient le matériel physique dans la même position que celle dans lequel l'objet virtuel est placé (vue de la face avant du cube). Il effectue un premier mouvement au matériel physique, en l'occurrence une rotation de 90° vers la gauche (vue de la face de droite du solide) et lui demande de reproduire cette manipulation dans l'environnement virtuel. Il observe si la manipulation a été réussie directement, avec tâtonnement ou si elle n'a pas été réussie. Il fait ensuite de même avec d'autres actions : rotation de 180° vers la droite, de 90° vers l'arrière, de 45° vers la droite, de 90° vers l'avant puis 90° vers la gauche.

6.5.1.4. Questionnaire a posteriori

En fin d'entretien, un questionnaire de perception *a posteriori* est finalement proposé aux enfants et aux adolescents. Le questionnaire aborde plusieurs thématiques telles que l'utilité, l'utilisabilité (aisance de manipulation, agréabilité, maîtrise et compréhension du fonctionnement). Il s'inspire notamment du

questionnaire de Davis (1989) ainsi que du questionnaire de Baraudon *et al.* (2021). Compte tenu des difficultés de contrôle de la vitesse identifiée par Yeh et Nason (2004a) et du fait que la vitesse est susceptible d'améliorer la compréhension lorsque des éléments animés sont proposés (Fischer *et al.*, 2008, cités par De Koning *et al.*, 2011), les participants ont par ailleurs été questionnés à ce sujet, afin de récolter leur opinion, quant à la vitesse à laquelle les mouvements de l'objet virtuel sont effectués.

Le questionnaire est composé de vingt questions et s'organise de la même façon que le questionnaire intermédiaire, comme l'illustre deux exemples d'items proposés en Figure 34, c'est-à-dire avec des affirmations à propos desquelles il doit se positionner, avec cinq choix allant de « Pas du tout d'accord » à « Tout à fait d'accord », illustrés par des smileys. Le questionnaire complet, tout comme les questionnaires *a priori* et intermédiaire sont proposés en annexe (Annexe 1).











1) Avant aujourd'hui, j'avais déjà manipulé des objets sur une tablette	 Pas du tout d'accord	 Plutôt pas d'accord	 Sans avis	 Plutôt d'accord	 Tout à fait d'accord
2) Grâce à la tablette, j'ai été capable de résoudre correctement les différents exercices proposés	 Pas du tout d'accord	 Plutôt pas d'accord	 Sans avis	 Plutôt d'accord	 Tout à fait d'accord

Figure 34 : Exemple de questions du questionnaire *a posteriori* utilisé lors de la validation de l'environnement

L'expérimentateur lit chaque affirmation à voix haute et note la réponse fournie par le participant. Il demande ensuite au participant s'il a des remarques éventuelles à propos de la tablette, des trois exercices proposés, des objets présentés dans la tablette, des difficultés rencontrées ou d'autre chose.

6.5.2. Échantillon de la validation

Au total, 24 participants âgés de 6 à 15 ans (échantillon de convenance) ont participé à la validation de l'environnement, avec au minimum deux participants par âge. Cet échantillon était constitué de trois enfants âgés de 6 ans, de cinq enfants âgés de 7 ans et de deux enfants ou adolescents pour chacun des âges restants. Les résultats du questionnaire *a priori* permettent d'identifier le profil des participants vis-à-vis des appareils tactiles tels que la tablette. Les résultats indiquent que pour les enfants âgés de 6 à 12 ans, l'échantillon est, pour chaque âge, constitué d'au moins un enfant

utilisant les appareils tactiles au moins une fois par semaine et d'au moins un enfant utilisant occasionnellement, voire jamais, ce type d'appareil. Pour les adolescents dont l'âge varie entre 13 et 15 ans, en revanche, tous déclarent utiliser un appareil tactile tous les jours. Si au total, comme l'illustre le Tableau 7, la fréquence « tous les jours » est davantage représentée que les autres au sein de l'échantillon, ce dernier contient également des enfants moins habitués avec ce type d'appareil, ce qui semble essentiel dans le cadre de la validation d'un tel outil.

En ce qui concerne les raisons d'utilisation, les réponses indiquent que l'échantillon est majoritairement composé d'individus utilisant la tablette pour regarder des vidéos/films/... (20 sur les 22 personnes ayant déjà utilisé un appareil tactile) ou pour jouer à des jeux (17 sur 22). Les autres usages semblent davantage mis en œuvre par les participants plus âgés de l'échantillon.

Enfin, pour le sentiment d'aisance, seul un répondant a déclaré ne pas se sentir à l'aise à l'idée de devoir manipuler l'écran tactile. Il s'agit d'un enfant ayant préalablement déclaré ne jamais avoir manipulé ce type de matériel. Trois enfants, tous utilisant pourtant plus d'une fois par semaine ce type d'appareil, ont déclaré se sentir plus ou moins à l'aise et les 20 autres répondants ont émis un sentiment positif.

Tableau 7 : Usage des appareils tactiles pour les enfants et les adolescents participant à la validation – Nombre de participants par âge et par fréquence d'usage

	6 ans	7 ans	8 ans	9 ans	10 ans	11 ans	12 ans	13 ans	14 ans	15 ans	Total
Tous les jours	1	1	1	1	1	0	0	2	2	2	11
Plus d'une fois par semaine mais pas tous les jours	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	3
Souvent mais moins d'une fois par semaine	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Occasionnellement	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	5
Jamais	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2

6.5.3. Résultats de la validation

6.5.3.1. Résultats relatifs à la manipulation libre et au questionnaire intermédiaire

Le temps de manipulation libre a permis d'observer que des interventions verbales en cours de manipulation ont été nécessaires uniquement pour 3 participants sur 24. Une première intervention nécessaire a été de préciser à un enfant âgé de 6 ans qu'il

pouvait aussi effectuer des mouvements verticaux car il ne réalisait que des mouvements vers la gauche ou vers la droite, appliquant ainsi des rotations dans une seule direction. Une deuxième intervention qui s'est avérée nécessaire pour un enfant âgé de 6 ans et un enfant âgé de 8 ans concerne la limitation de rotation vers l'avant et l'arrière. Ces deux enfants ont interpellé l'expérimentateur sur le fait qu'il ne leur était pas possible de continuer la rotation vers l'avant/arrière pour voir l'arrière du solide. Il leur a alors été mentionné qu'il n'était pas possible d'aller plus loin dans la rotation vers l'avant/arrière mais qu'ils pouvaient réaliser d'autres mouvements leur permettant d'observer l'arrière du solide, par exemple en faisant tourner vers la gauche ou la droite le solide. Si plusieurs autres participants ont fait face à un peu de difficultés au moment de réaliser une rotation de plus de 90° vers l'avant ou vers l'arrière, cela ne les a pas empêchés de poursuivre la manipulation dans une autre direction sans que cela ne nécessite une intervention de l'expérimentateur.

Concernant le temps de manipulation libre nécessaire avant que l'enfant ou l'adolescent ne se dise à l'aise avec l'environnement 2 ½ D, la mise à l'essai permet de montrer que ce temps n'excède une minute pour aucun participant. Pour la majorité des participants (15 sur 24), il varie entre quinze et trente secondes. Pour six participants, ce temps est inférieur à quinze secondes et pour les trois derniers participants, il avoisine les 45 secondes.

Les réponses aux trois questions posées à l'issue du temps de manipulation libre (Tableau 8) semblent également confirmer de faibles difficultés relatives à la manipulation de l'environnement. Concernant la suffisance du temps pour s'habituer à utiliser la tablette, 22 participants sur 24 donnent un avis positif. Les deux autres participants, dont une est un enfant âgé de 6 ans n'ayant jamais utilisé un écran tactile auparavant et l'autre un enfant âgé de 8 ans ayant utilisé ce type d'appareil de manière occasionnelle, sont sans avis par rapport à cette affirmation. Ils ont respectivement manipulé 30 et 20 secondes la tablette avant de se sentir prêts. Concernant le sentiment de capacité à manipuler un objet sur tablette, une fois encore, la majorité des participants a un avis positif. Un seul avis neutre et un seul avis négatif ont été récoltés. L'avis négatif provient d'un adolescent âgé de 12 ans n'ayant l'habitude d'utiliser les appareils tactiles qu'occasionnellement. L'avis neutre provient d'un enfant âgé de 6 ans n'ayant jamais utilisé de tablette auparavant. Finalement, à l'affirmation se rapportant à la facilité d'apprentissage de l'utilisation de la tablette, un seul avis neutre et un seul avis négatif ont à nouveau été obtenus. L'avis négatif provient de

l'enfant âgé de 6 ans n'ayant jamais utilisé la tablette tandis que l'avis neutre provient d'un enfant âgé de 8 ans l'utilisant de manière occasionnelle.

Tableau 8 : Résultats au questionnaire de perception intermédiaire utilisé pour valider l'environnement– Nombre de participants par possibilité de réponse pour chaque affirmation

	« J'ai eu assez de temps pour m'habituer à utiliser la tablette »	« J'arrive à manipuler un objet sur tablette »	« Apprendre à manipuler un objet sur la tablette était facile »
Pas du tout d'accord	0	0	0
Plutôt pas d'accord	0	1	1
Sans avis	2	1	1
Plutôt d'accord	7	6	8
Tout à fait d'accord	15	16	14

6.5.3.2. Résultats relatifs à la réalisation des trois tâches de manipulation

a. Premier exercice : exploration partiellement libre

Les 24 participants ont réussi cette première tâche puisqu'ils ont tous cité les 5 dessins présents sur les autres faces du cube. L'expérimentateur a néanmoins pu observer que quatre enfants, parmi les plus jeunes, sont restés bloqués quelques secondes après la rotation de 90° vers l'avant ou vers l'arrière, en souhaitant continuer dans cette direction pour observer la face arrière, ou en souhaitant effectuer une rotation impossible dans l'environnement proposé. Ils ont néanmoins tous trouvé, quelques secondes plus tard, une alternative pour observer la face arrière.

b. Deuxième exercice : exploration en suivant des consignes verbales

Les résultats à ce deuxième exercice, présentés au sein du Tableau 9, montrent que peu d'enfants n'ont pas réussi à manipuler l'objet 3D (la voiture), représenté virtuellement en suivant les consignes orales imposées. D'ailleurs, la majorité des enfants et des adolescents ont réussi à effectuer la manipulation demandée sans tâtonnement. Cependant, le premier item a été raté par un participant et cet échec s'explique par une incompréhension des consignes puisqu'au lieu de manipuler l'objet pour pouvoir observer son arrière, il a montré où se situait l'arrière de l'objet sans pour autant manipuler virtuellement l'objet. Les items 2 et 4 ont aussi été ratés à une reprise sur 24 par un même enfant âgé de 6 ans. Cet échec s'explique par une confusion entre « dessus » et « dessous » puisque l'enfant a réussi à manipuler l'objet 3D mais a montré le côté opposé à celui demandé. Pour cet exercice, trois enfants ont par ailleurs

rencontré des difficultés similaires à celles observées dans l'exercice précédent en ce qui concerne les limites de rotations vers l'avant et vers l'arrière et les rotations impossibles. Ces difficultés n'ont pas occasionné un échec de l'exercice mais uniquement du tâtonnement.

Tableau 9 : Résultats du deuxième exercice de validation de l'environnement – Nombre de participants par cas de figure pour chaque item

	Item 1 : l'arrière	Item 2 : le dessus	Item 3 : un côté	Item 4 : le dessous	Item 5 : l'autre côté
Réussite sans tâtonnement	19	22	22	23	14
Réussite avec tâtonnement	4	1	2	0	10
Échec	1	1	0	1	0

c. Troisième exercice : exploration en répliquant des manipulations réalisées sur un objet physique

Les résultats du troisième exercice sont présentés dans le Tableau 10. Les trois premiers items ainsi que le cinquième sont réussis par une majorité de participants, même par tous pour le troisième item. Les quelques échecs se rapportent soit au fait que l'amplitude de rotation effectuée en virtuel est plus petite ou plus grande que celle effectuée sur le matériel tangible, soit au fait que la rotation a été faite dans le sens opposé de celui demandé. L'item 4 a quant à lui été moins bien réussi. Peu ont réussi à faire la manipulation directe. Cette difficulté est expliquée notamment parce que cette manipulation est effectuée après une rotation vers l'arrière, à un endroit où les utilisateurs ne peuvent pas continuer vers l'arrière, ce qui pousse certains à retourner dans le sens contraire et donc à ne pas aboutir au mouvement demandé. D'autres disent explicitement qu'ils n'arrivent pas à effectuer le mouvement.

Tableau 10 : Résultats du troisième exercice de validation de l'environnement – Nombre de participants par cas de figure pour chaque item

	Item 1 : 90° vers la gauche	Item 2 : 180° vers la droite	Item 3 : 90° vers l'arrière	Item 4 : 45° vers la droite	Item 5 : 90° vers l'avant et 90° vers la gauche
Réussite sans tâtonnement	22	21	24	4	15
Réussite avec tâtonnement	0	0	0	13	5
Échec	2	3	0	7	4

6.5.3.3. Résultats relatifs au questionnaire *a posteriori*

Les perceptions *a posteriori* des participants (Tableau 11) semblent être majoritairement positives. On y observe un avis globalement positif à l'égard de l'utilité de l'environnement dans la mesure où celui-ci semble, pour la plupart des participants, permettre d'atteindre son objectif (ex. questions 2, 3, 6, 7, 9, 12). Les résultats aux questions relatives à l'atteinte rapide des objectifs (questions 4 et 5) sont quant à eux plus nuancés. En ce qui concerne l'utilisabilité, on observe aussi une majorité d'avis positifs : facilité d'utilisation (ex. questions 10 et 11), agréabilité d'utilisation (ex. questions 13 et 14), maîtrise et compréhension (ex. questions 15, 16, 17, 18 et 19). Enfin, au niveau de l'avis des participants sur la rapidité de l'environnement, il semble que la majorité d'entre eux (16 sur 24) trouvent la vitesse adaptée, trois ont un avis neutre et cinq estiment que l'environnement virtuel est trop lent. De plus, les résultats relatifs à la question comparant le matériel virtuel et le matériel physique (question 8) sont quant à eux plus nuancés puisque la moitié des participants sont tout à fait d'accord ou plutôt d'accord avec l'idée selon laquelle il aurait été plus facile de réaliser la tâche sur du matériel physique. Notons également que les participants ayant choisi des réponses négatives ne sont pas forcément les participants plus jeunes ou ceux moins habitués à utiliser des appareils tactiles.

Tableau 11 : Résultats du questionnaire a posteriori utilisé pour valider l'environnement – Nombre de participants par choix de réponse pour chaque item

	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Sans avis	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord
1. Avant aujourd'hui, j'avais déjà manipulé des objets sur une tablette	16	1	1	0	6
2. Grâce à la tablette, j'ai été capable de résoudre correctement les différents exercices proposés	0	0	2	7	15
3. Grâce à la tablette, j'ai été capable de manipuler correctement des objets	0	0	2	5	17
4. Grâce à la tablette, j'ai été capable de résoudre rapidement les différents exercices proposés	2	1	5	5	11
5. Grâce à la tablette j'ai été capable de manipuler rapidement des objets	1	3	5	7	8
6. Utiliser la tablette est utile pour manipuler des objets	1	0	3	5	15
7. J'ai pu manipuler efficacement les objets avec la tablette	0	2	1	5	16
8. J'aurais trouvé cela plus facile d'avoir des vrais objets à manipuler en main (ex. : cubes en bois...) (et pas sur tablette)	4	6	2	2	10
9. Grâce à la tablette, je vais pouvoir réussir des exercices nécessitant la manipulation d'objets	0	0	1	7	16
10. Manipuler des objets sur la tablette a été facile	0	0	2	4	18
11. J'aurais aimé recevoir de l'aide pour manipuler la tablette lors des exercices	21	0	1	2	0
12. La manière dont fonctionne la tablette a rendu facile la manipulation des objets	0	0	1	6	17
13. J'ai apprécié utiliser la tablette pour manipuler les objets	0	1	2	3	18
14. C'était agréable de travailler sur la tablette pour manipuler les objets	0	1	0	4	19
15. Je suis certain(e) de pouvoir réussir à manipuler des objets sur la tablette	0	0	0	5	19
16. Sur la tablette, j'arrivais facilement à manipuler les objets comme je le voulais	0	0	1	8	15
17. J'ai compris les gestes que je devais faire sur la tablette pour réaliser directement les différents mouvements des objets	0	0	0	3	21
18. J'effectuais au hasard les gestes sur la tablette pour obtenir les mouvements des objets	17	1	1	1	4
19. Je me souviens facilement de la manière de manipuler les objets sur la tablette	1	0	1	3	19
20. La vitesse à laquelle tournaient les objets sur la tablette était bonne/adaptée	0	5	3	0	16
20bis. Cochez l'un des deux en cas de réponse négative à la question 20	- Les objets tournaient trop vite : 0 - Les objets tournaient trop lentement : 0				

6.6. Conclusion de la validation

La mise à l'essai de l'environnement virtuel élaboré semble être concluante puisque les différentes informations récoltées permettent d'identifier que la manipulation de cet environnement ne pose globalement pas de difficulté aux utilisateurs, et ce quel que soit leur profil. Les résultats des questionnaires intermédiaires et *a posteriori* semblent révéler des perceptions majoritairement positives à l'égard de l'environnement virtuel. La majorité des enfants et des adolescents interrogés disent par exemple avoir compris les gestes, ne pas forcément avoir besoin d'aide, être confiants avec cet usage de la tablette, avoir trouvé la manipulation agréable et facile. Par ailleurs, la validation a permis d'une part d'estimer le temps d'appropriation nécessaire aux enfants et aux adolescents, à savoir pas plus d'une minute. Elle a, d'autre part, permis d'identifier les consignes à leur fournir avant la première utilisation. Ainsi, les résultats semblent indiquer qu'il est important de préciser aux utilisateurs, dès la première utilisation, que les manipulations peuvent être effectuées dans différentes directions, vers la gauche, vers la droite, mais aussi vers le haut ou vers le bas, et d'accompagner ces consignes de gestes réalisés sur un objet « exemple » donné sur la tablette. En outre, compte tenu des observations réalisées lors de la manipulation libre ainsi que lors des différents exercices, il apparaît important de faire comprendre aux utilisateurs que les mouvements autorisés sont limités, par exemple en leur précisant qu'une fois qu'ils ont atteint le haut ou le bas de l'objet, ils ne peuvent pas aller plus loin. À nouveau, il apparaît nécessaire que l'expérimentateur puisse illustrer cela sur un exemple avant de laisser un temps de manipulation libre permettant à l'utilisateur de s'approprier l'environnement.

Chapitre 7. Première étude :
étude de la perception visuelle
de la 3D au départ de
représentations 2 ½ D et 2D

Chapitre 7. Première étude : étude de la perception visuelle de la 3D au départ de représentations 2 ½ D et 2D¹⁵

Compte tenu du peu de recherches antérieures portant sur le sujet, pouvoir identifier si les enfants et les adolescents sont capables de percevoir visuellement des représentations virtuelles d'objets 3D, et le faire dans une perspective comparative en variant les modalités de présentation des objets 3D, constitue un enjeu essentiel pour pouvoir mieux comprendre le rapport que ces derniers entretiennent avec les environnements virtuels simulant l'espace 3D. C'est à cet enjeu que la première étude expérimentale menée tente de s'atteler. Ce chapitre présente cette première étude en décrivant son objectif général ainsi que les questions de recherche auxquelles elle va permettre de répondre et les variables investiguées, ensuite la méthodologie (déroulement, matériel et échantillon) et enfin les analyses qui seront menées.

7.1. Objectif général et questions de recherche

L'objectif général de cette première étude est d'évaluer le niveau de maîtrise de l'habileté visuo-perceptive de perception visuelle d'objets 3D au départ de représentations virtuelles. Celle-ci participe donc à l'apport d'éléments de réponse à la première question de recherche principale (question 1°). Plus particulièrement, cette étude est mise en œuvre en vue d'apporter des éléments de réponse aux quatre premières questions de recherche spécifiques relatives à l'habileté de perception visuelle de la 3D, présentées au sein du chapitre 5. Autrement dit, il s'agit, d'abord, d'identifier si les enfants et les adolescents arrivent à percevoir visuellement des objets 3D quand ces derniers sont présentés au départ de représentations virtuelles que les enfants et adolescents peuvent manipuler (question de recherche 1.1°). Ensuite, dans une perspective comparative, il s'agit de vérifier si la manipulation des représentations virtuelles par l'enfant ou l'adolescent favorise la perception visuelle des objets 3D en comparaison à leur observation uniquement (question de recherche 1.2°), si l'orientation du support sur lequel la représentation virtuelle est présentée impacte la perception visuelle des objets 3D (question de recherche 1.3°) et enfin si la perception visuelle d'objets 3D représentés virtuellement est équivalente à la perception de leur représentation plane (question de recherche 1.4°).

¹⁵ Plusieurs parties de ce chapitre ont fait l'objet d'une publication : Beauset et Duroisin (2024).

7.2. Variables étudiées

7.2.1. Variable dépendante

La variable dépendante de cette première étude est la maîtrise de la perception visuelle des objets 3D présentés. Cette variable est calculée en proposant une tâche de reconnaissance évaluant la capacité des enfants et des adolescents à retrouver parmi une série de propositions, l'objet 3D qui leur a été présenté préalablement. Si l'analyse des sélections réalisées lors de la tâche évaluant la perception des objets 3D permet évidemment de fournir des informations sur cette capacité, les verbatims utilisés par les enfants et les adolescents pour justifier leur choix sont également utilisés. Dans certains cas, ils peuvent venir affiner les constats relatifs à la perception ou non des objets 3D puisque la simple observation des choix réalisés peut parfois être ambiguë.

7.2.2. Variables indépendantes

Différentes variables principales et secondaires sont investiguées pour identifier la façon dont elles impactent ou non l'acquisition de l'habileté de perception visuelle des objets 3D. Ces variables sont compilées au sein du Tableau 12 et ont été principalement définies en prenant appui sur des éléments mis en évidence au sein de la première partie de ce manuscrit, notamment les facteurs intrinsèques et extrinsèques susceptibles d'impacter l'acquisition des habiletés spatiales.

Tableau 12 : Variables indépendantes principales et secondaires étudiées (1^{ère} étude)

Variables principales	Modalité de présentation des objets 3D		
	Âge		
	Objet 3D à percevoir		
Variables secondaires	Genre		
	Niveau des processus perceptifs de base		
	Distinction des teintes de couleurs présentes sur les représentations des objets 3D		
	Suspicion d'un trouble développemental de la coordination (TDC)		
	Habitudes et pratiques régulières	Utilisation de l'appareil tactile	
		Pratique régulière des jeux vidéo	
		Pratique régulière des jeux de construction	
		Pratique régulière des jeux de puzzle	
		Pratique régulière d'un sport	
		Pratique régulière d'un instrument de musique	
	Niveau scolaire et expérience antérieure en géométrie 3D	Niveau scolaire	
		Apprentissage de la géométrie 3D	
		Expérience avec les représentations virtuelles d'objets 3D	
Expérience avec les tâches similaires à la tâche de perception visuelle des objets 3D			

7.2.2.1. Variables principales

a. La modalité de présentation des objets 3D

La première variable investiguée relève de la modalité de présentation des objets 3D présentés. Il s'agit de la variable permettant de situer la recherche dans la perspective comparative souhaitée.

Au total, quatre niveaux de cette variable sont proposés :

- Modalité 1 : représentations 2 ½ D que les enfants et les adolescents sont autorisés à manipuler physiquement (présentées sur un support placé à l'horizontale),
- Modalité 2 : représentations 2 ½ D que les enfants et les adolescents ne sont pas autorisés à manipuler physiquement (observation uniquement) et présentées sur un support placé à l'horizontale,
- Modalité 3 : représentations 2 ½ D que les enfants et les adolescents ne sont pas autorisés à manipuler (observation uniquement) et présentées sur un support placé à la verticale,
- Modalité 4 : représentations 2D (présentées sur un support placé à l'horizontale).

L'analyse des résultats obtenus dans la première modalité permet d'apporter des éléments de réponse à la question de recherche 1.1°. Par ailleurs, puisqu'elles sont formulées dans une perspective comparative, des éléments de réponses aux trois questions de recherche suivantes sont amenés par la comparaison de résultats obtenus dans les modalités de présentation des objets 3D. Plus particulièrement, c'est en comparant les modalités 1 et 2, qu'une réponse à la question de recherche 1.2° est apportée. En effet, il s'agit de vérifier si le contrôle par l'individu des actions réalisées sur les représentations virtuelles des objets 3D impacte leur perception des objets 3D. Pour ce faire, une modalité dans laquelle l'individu manipule des représentations virtuelles est comparée à une modalité dans laquelle il est « physiquement passif », au sens de Rodrigues *et al.* (2010), c'est-à-dire dans laquelle il observe les représentations virtuelles sans avoir le contrôle des manipulations. La comparaison des résultats obtenus dans les modalités 2 et 3 permet quant à elle d'apporter une réponse à la question de recherche 1.3° puisqu'elle permet d'identifier si des représentations virtuelles d'objets 3D sont perçues de la même façon lorsqu'elles sont présentées sur support vertical ou horizontal. Le choix a été fait d'investiguer la sous-variable de l'orientation en se focalisant uniquement sur les représentations virtuelles à observer et non sur celles à manipuler. Ce choix permet de faire écho, le plus possible, aux

pratiques de classe des enseignants de mathématiques. En effet, l'investigation des pratiques enseignantes a permis de mettre en évidence qu'en géométrie 3D, le matériel virtuel est davantage utilisé en classe sans manipulation par l'élève (cf. 4.1.8.2). C'est donc sur cette modalité que la variable de l'orientation du support est investiguée. Enfin, c'est grâce à la comparaison des modalités 1 et 2 avec la modalité 4, impliquant une comparaison de la maîtrise de la perception de représentations virtuelles et planes, qu'une réponse peut être formulée à la question 1.4°. La Figure 35 synthétise le lien entre les modalités de présentation des objets 3D investiguées et les questions de recherche de l'étude.

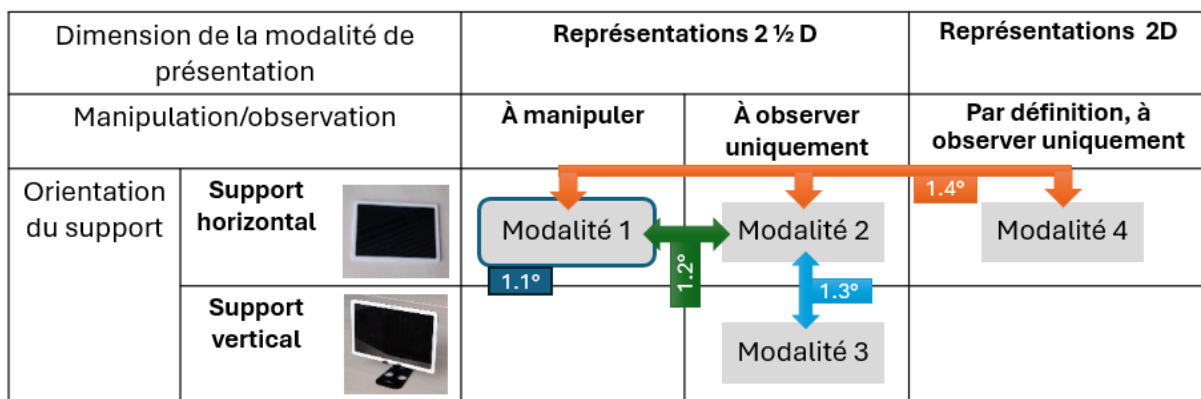


Figure 35 : Description des modalités de présentation des objets 3D investiguées et lien avec les questions de recherche (1^{ère} étude)








b. L'âge des enfants et des adolescents

Dans une perspective développementale, et compte tenu du peu d'informations disponibles au sein de la littérature concernant les capacités de perception visuelle des objets 3D représentés dans un environnement virtuel (cf. chapitre 2), la variable âge constitue également une variable principale investiguée afin d'affiner la compréhension de l'habileté de perception visuelle des objets 3D et la réponse aux différentes questions de recherche. Il s'agit alors, pour la première question de recherche (1.1°), de vérifier si l'habileté de perception visuelle de chacun des objets au départ de représentations virtuelles à manipuler est maîtrisée aux différentes tranches d'âge et si cette maîtrise évolue avec l'âge entre 6 et 15 ans. Par ailleurs, pour les trois autres questions de recherche (1.2°, 1.3° et 1.4°), il s'agit d'identifier si, aux différentes tranches d'âge, les capacités de perception sont équivalentes dans les modalités de présentation des objets 3D comparées et si l'évolution de la maîtrise de l'habileté est similaire entre ces modalités.

c. L'objet 3D sur lequel la perception visuelle est évaluée

Étant donné le peu de recherches ayant préalablement évalué l'habileté de perception de représentations virtuelles d'objets, l'étude se focalise ici sur la perception d'objets 3D simples. C'est d'ailleurs dans cette même dynamique qu'ont été menés les travaux de Widder *et al.* (2019), qui se sont intéressés aux difficultés visuelles relatives aux représentations planes de solides et qui se sont focalisés uniquement sur un objet 3D simple : le cube. Ici, la volonté est, certes, d'étudier le cas de cet objet 3D mais aussi d'intégrer d'autres objets 3D usuels. Cette volonté est renforcée par les résultats d'études antérieures, ayant mis en évidence que les résultats à des tâches impliquant les habiletés spatiales pouvaient varier en fonction des objets 3D présentés (Duroisin, 2015 ; Piaget & Inhelder, 1948). Le choix des objets 3D investigués a été réalisé en prenant appui sur ces mêmes recherches antérieures afin de pouvoir mettre en parallèle les résultats obtenus. Ainsi, les solides usuels investigués sont le cube, la sphère, le cône, le cylindre et le prisme droit à base triangulaire. Ce choix permet par ailleurs de faire écho à des objets 3D étudiés lors des apprentissages de géométrie 3D. Au-delà de ces cinq objets 3D simples, deux objets moins usuels sont également étudiés, comme l'ont préalablement fait Piaget et Inhelder (1948) : l'anneau rond à bord rond (ou tore) et l'anneau rond à bord droit (cylindre creux). Sept objets 3D sont investigués au total. Ceux-ci sont illustrés et décrits brièvement dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Liste et illustration des objets 3D investigués (1^{ère} étude)

Nom de l'objet 3D	Illustration	Brève description de l'objet 3D
Cylindre		Cylindre de révolution, droit à base circulaire dont la hauteur équivaut au diamètre de la base
Cône		Cône de révolution droit à base circulaire dont la hauteur équivaut au diamètre de la base
Sphère		/
Prisme droit à base triangulaire		Prisme droit dont la base est un triangle équilatéral et dont la hauteur équivaut à la longueur du côté de la base
Anneau rond à bord rond		Tore (solide engendré par la révolution d'un cercle autour d'une droite) dont le rayon intérieur équivaut à la hauteur et à la moitié du rayon extérieur
Cube		/
Anneau rond à bord droit		Cylindre creux dont le rayon intérieur équivaut à la hauteur et à la moitié du rayon extérieur (solide engendré par la révolution d'un carré autour d'une droite)

La prise en compte de cette deuxième variable permet d'affiner la réponse aux différentes questions de recherche. Par rapport à la question de recherche 1.1°, il s'agit alors d'identifier si l'habileté de perception de représentations virtuelles à manipuler est maîtrisée pour chacun des objets investigués et si des différences de maîtrise de la perception sont observées entre les objets 3D. Pour les questions comparatives (1.2°, 1.3° et 1.4°), il s'agit d'identifier si, pour chacun des objets, les capacités de perception sont équivalentes dans les modalités comparées et si les potentielles différences entre les objets sont semblables dans les différentes modalités.

7.2.2.2. Variables secondaires

En plus des variables principales décrites, d'autres variables secondaires sont également prises en considération dans les analyses menées puisqu'elles pourraient impacter les performances des enfants et des adolescents aux tâches spatiales pour des raisons présentées dans le cadre théorique. Ces variables sont les suivantes : le genre, le niveau des processus perceptifs de base, la capacité de distinction des teintes de couleurs présentes dans les représentations des objets 3D utilisées, les habitudes et pratiques régulières (utilisation régulière d'appareil tactile, pratique régulière des jeux vidéo, des jeux de construction, des jeux de puzzle, d'un sport et d'un instrument de musique), le niveau scolaire et l'expérience antérieure en géométrie 3D (apprentissage antérieur de la géométrie 3D, confrontation antérieure à des représentations virtuelles d'objets 3D, résolution de tâches de reconnaissance similaires).

Il s'agit alors d'une part de vérifier si les groupes comparés sont, au départ, équivalents par rapport à ces variables. D'autre part, il s'agit d'identifier si ces variables sont susceptibles d'impacter la capacité de perception visuelle des objets 3D, que ce soit au départ de représentations virtuelles afin d'affiner la compréhension de la maîtrise de cette capacité.

7.3. Déroulement et matériel

Pour répondre aux différentes questions de recherche secondaires, l'étude expérimentale prévoit la création de groupes indépendants d'enfants et d'adolescents, chacun étant confronté à une modalité de présentation des objets 3D, à l'instar de ce qu'ont envisagé Krylova et Vodyakha (2022).

L'étude est réalisée en quatre grandes étapes (Figure 36). D'abord un appel à participation a été mené auprès de directions d'établissements scolaires, d'enseignants

puis des parents, en vue d'obtenir un échantillon de convenance. Des informations relatives à certaines variables secondaires investiguées ont, dans la foulée, été récoltées auprès des parents ayant marqué leur accord et de l'enseignant. Les groupes ont ensuite été constitués afin que chaque participant soit attribué à un groupe. Enfin, un entretien individuel est ensuite réalisé avec chaque participant. Celui-ci s'organise en trois temps : un temps de récolte d'informations *a priori* relatives aux variables secondaires, un temps d'évaluation des capacités de perception des objets 3D permet d'obtenir des données relatives à la variable dépendante en fonction des variables indépendantes principales, un temps de récolte d'informations *a posteriori*.

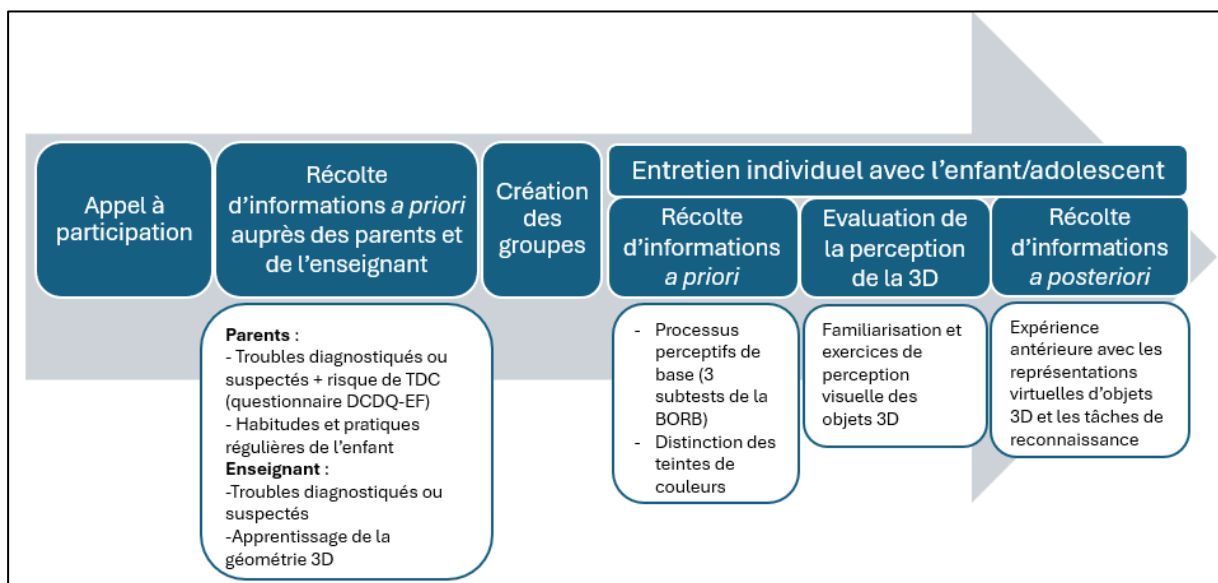


Figure 36 : Grandes étapes de l'étude menée (1^{ère} étude)

7.3.1. Appel à participation auprès de directions, d'enseignants et des parents

Des prises de contact avec les écoles d'enseignement primaire et secondaire en province du Hainaut, tous réseaux d'enseignement confondus, ont été menées via l'envoi de courriels aux établissements scolaires mais également via la diffusion d'appel à participation sur les réseaux sociaux. Une lettre (Annexe 2) a été présentée aux directions des établissements afin d'obtenir leur accord quant à la participation de l'établissement ou au moins d'une partie de celui-ci à la recherche. Ensuite, en cas d'accord de la direction, une lettre a été diffusée auprès des enseignants des niveaux

scolaires concernés (primaire¹⁶ et secondaire inférieur) afin d'obtenir leur accord quant à la participation de leur(s) classe(s) à l'étude menée (Annexe 3).

Une fois l'accord marqué par l'enseignant, un document d'autorisation a été distribué à l'ensemble des parents/responsables légaux¹⁷ (Annexe 4). Celui-ci a permis d'obtenir leur consentement quant à la participation de leur enfant à l'étude menée et donc quant à la récolte et le traitement de données auprès de ce dernier, dans le respect du RGPD. Dans la foulée, les parents ayant accepté la participation de leur enfant ont également dû compléter un questionnaire d'accord quant à la production et à l'exploitation d'images de leur enfant (enregistrements vidéo de leur enfant). Cet accord n'était pas obligatoire pour la participation mais a permis d'identifier quels participants pouvaient être filmés.

7.3.2. Récolte d'informations préalables auprès des parents et enseignants

7.3.2.1. Questionnaire destiné aux parents

Annexé à l'attestation de participation de leur enfant, un questionnaire de type papier-crayon a été distribué aux parents et devait être entièrement complété par ceux ayant marqué leur accord quant à la participation de leur enfant. Par ce questionnaire, différentes informations ont pu être récoltées, à commencer par des données signalétiques (nom et prénom de l'enfant, date de naissance...). En outre, d'autres informations, relatives notamment à certaines variables secondaires décrites précédemment, ont été récoltées.

a. Présence avérée ou suspectée de troubles de l'apprentissage et de troubles visuels

Une partie du questionnaire porte sur la présence d'un ou plusieurs troubles de l'apprentissage. Il y est d'abord demandé de préciser si leur enfant présente un trouble de l'apprentissage diagnostiqué. En cas de réponse positive, il est demandé aux parents de préciser le trouble en question (dyscalculie, dyslexie, dysorthographe, dyspraxie, dysphasie, trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité, autre). Il est ensuite demandé si, malgré l'absence d'un diagnostic officiel, ils suspectent la présence d'un trouble de l'apprentissage chez leur enfant et, en cas de réponse positive, de

¹⁶ Dans l'enseignement primaire, il s'agit le plus souvent de l'enseignant titulaire de la classe.

¹⁷ Par facilité, seul le terme « parents » est utilisé dans la suite de ce manuscrit pour parler des parents et représentants légaux.

préciser ce trouble (trouble de l'apprentissage des nombres, de la lecture, de l'écriture, du langage, de l'attention, moteur). Il est également demandé aux parents de préciser si leur enfant est porteur d'un trouble visuel.

b. Risque de trouble développemental de la coordination

En plus de questionner les parents sur la présence d'une éventuelle ou avérée dyspraxie, une attention particulière est accordée aux habiletés motrices étant donné le lien fort qui unit ces habiletés et les habiletés spatiales. Cette attention est par ailleurs justifiée par le fait que la manipulation exercée par les enfants et les adolescents constitue une variable investiguée et que les participants du groupe 1 sont amenés à faire appel à leur habileté motrice pour manipuler l'environnement virtuel.

Si la récolte d'informations au sujet du développement moteur d'un enfant ou d'un adolescent peut se faire via des questionnaires adressés aux individus eux-mêmes ou à leurs enseignants, ceux destinés aux parents sont décrits comme plus valides (Blank *et al.*, 2019, cités par Ray-Kaeser *et al.*, 2019). Dans ce contexte, le questionnaire « Developmental Coordination Disorder Questionnaire French European » (DCDQ-FE) proposé par Ray-Kaeser *et al.* (2019) a également été intégré dans le questionnaire soumis aux parents. Il s'agit d'un questionnaire fiable et valide permettant d'interroger les parents d'enfants et d'adolescents francophones européens âgés de 5 à 15 ans, dont l'objectif n'est pas d'établir un bilan neuropsychologique de l'enfant ou de l'adolescent, mais de pouvoir identifier un risque de trouble développemental de la coordination. Le choix de ce questionnaire se justifie par le fait qu'il correspond à la fois à l'objectif et au public cible visés.

Le questionnaire est composé de quinze situations pour lesquelles il est demandé aux parents de comparer le niveau de capacité de leur enfant à la capacité des autres enfants de son âge en sélectionnant une réponse parmi une échelle allant de 1 à 5 (5 étant à sélectionner si leur enfant fonctionne de manière comparable aux autres du même âge, ou mieux que les autres). Parmi les quinze situations, six portent sur le niveau de contrôle pendant le mouvement, quatre portent sur la motricité fine et cinq sur la motricité globale. Au total, en additionnant les réponses à chaque item, un score sur 75 est ainsi calculé. Si le score total est inférieur ou égal à 55, le questionnaire prévoit de conclure qu'il y a un risque de TDC, il prévoit dans le cas contraire de conclure qu'il n'y a probablement pas de risque de TDC.

c. Habitudes des enfants et des adolescents

Étant donné l'impact qu'elles sont susceptibles d'avoir sur les performances évaluées, certaines habitudes (pratiques régulières) des participants ont été investiguées également au travers de plusieurs questions. D'une part, les parents ont été questionnés sur la fréquence d'utilisation d'appareils tactiles de leur enfant puisque les enfants et les adolescents sont confrontés à ce type de support dans l'étude. Notons néanmoins que la validation de l'environnement virtuel a permis d'identifier que la manipulation de l'environnement virtuel est aussi adaptée à des enfants ou adolescents ayant peu l'habitude d'utiliser ce type d'appareil. Une question a permis aux parents de préciser la fréquence d'utilisation de ce type d'appareil. D'autre part, des informations ont été récoltées au sujet d'habitudes susceptibles d'impacter l'acquisition des habiletés spatiales. Il a été demandé aux parents de préciser si leur enfant joue (ou jouait) de manière régulière, c'est-à-dire plus d'une fois par semaine, à des jeux vidéo et si oui lesquels. De la même façon, les pratiques régulières de jeux de construction (ex. Lego® ou équivalent), de jeux de type « puzzle » (ou équivalent), d'un sport (en précisant le ou lesquels) et d'un instrument de musique ont été questionnées.

7.3.2.2. Questionnaire destiné aux enseignants

En parallèle au questionnaire distribué aux parents, un questionnaire écrit (Annexe 5) a été distribué à l'enseignant prenant en charge l'enseignement des mathématiques dans la classe de l'enfant ou de l'adolescent pour récolter des informations supplémentaires ou complémentaires concernant des variables indépendantes secondaires. Ce questionnaire est organisé en deux volets : un premier sur les troubles de l'apprentissage des enfants et des adolescents et un second sur l'apprentissage de la géométrie 3D proposé lors de l'année scolaire en cours.

a. Présence avérée ou suspectée de troubles de l'apprentissage

Au même titre que les parents, l'enseignant a lui aussi été questionné sur les troubles avérés ou suspectés chez les enfants et les adolescents participant à l'expérimentation (dyscalculie, dyslexie, dysorthographe, dyspraxie, dysphasie, trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité, autre).

b. Apprentissages antérieurs en géométrie 3D

Comme évoqué en fin de chapitre 5, l'étude est menée auprès d'enfants et d'adolescents scolarisés en FWB et cet élément contextuel est susceptible d'influencer les performances. En effet, étant donné les objets sur lesquels la perception est évaluée et la place qu'occupe cette habileté dans les apprentissages scolaires de la géométrie 3D, l'apprentissage de ce domaine est susceptible d'influencer les performances des participants. Le chapitre 4 a d'ailleurs permis de décrire le contenu des référentiels, dans lequel il a pu être observé que plusieurs des objets 3D ici étudiés sont rencontrés, par exemple le cube, la sphère et le cylindre dès les premières années de l'enseignement primaire. Si, comme précédemment évoqué, cet aspect sera pris en compte dans l'interprétation des résultats, des informations récoltées sur les apprentissages de l'année scolaire en cours peuvent également impacter les performances des individus. Le questionnaire récolte donc également des informations à propos de l'apprentissage de la géométrie 3D. D'abord, il demande à l'enseignant si la thématique des solides géométriques a déjà été abordée avec les élèves de la classe concernée cette année. En cas de réponse positive, différentes questions sont également posées afin de savoir avec quel matériel cet apprentissage s'est réalisé mais aussi sur quelles compétences il portait (Figure 37).

1. Cette année scolaire, avez-vous déjà travaillé la thématique des solides géométriques avec vos élèves ?
 - Oui
 - Non
2. Si oui, quel(s) type(s) de matériel(s) avez-vous utilisé lors des apprentissages :
 - Des solides (objets à manipuler) d'apparence neutre (solides en bois, en plexiglas,...)
 - Des solides (objets à manipuler) d'apparence réalistes (boîtes du quotidien)
 - Des solides virtuels (sur tablette, TBI,...)
 - Des représentations 2D de solides (dessins en perspectives de solides,...)
 - Autre :

Figure 37 : Extrait du questionnaire destiné aux enseignants (1^{ère} étude)

7.3.3. Création des groupes

Les enfants et les adolescents dont l'accord n'a pas été obtenu (désaccord ou absence de réponse) ont été exclus de l'échantillon de convenance. Aucun autre critère d'exclusion n'a ici été pris en considération.

Pour cette première étude, les participants sont répartis dans quatre groupes, chacun des groupes étant associé à une des quatre modalités de la première variable, c'est-à-dire une modalité dans laquelle les objets 3D à percevoir vont être présentés dans les exercices évaluant l'habileté de perception visuelle. La répartition des enfants et des adolescents de chaque tranche d'âge dans les groupes s'est réalisée de manière aléatoire, à une exception près, de façon à obtenir au moins 30 participants par groupe et par tranche d'âge. Ce minimum permet de maintenir un équilibre entre les tranches d'âge au sein des groupes et inversement. L'exception se rapporte au fait que les enfants et les adolescents pour qui un refus d'enregistrement vidéo est obtenu ne peuvent pas être répartis au sein du groupe 1 puisqu'il s'agit de la modalité qui nécessite un enregistrement vidéo. En effet, dans ce groupe, les enfants et les adolescents sont amenés à manipuler la tablette et un enregistrement vidéo est prévu pour garder des traces des manipulations effectuées.

7.3.4. Entretien individuel

Au total, un entretien individuel d'environ 20 à 25 minutes est proposé à chaque participant. Celui-ci s'organise en trois temps. D'abord, l'expérimentateur recueille plusieurs informations auprès des enfants et des adolescents, permettant de récolter des informations relatives aux variables susceptibles d'impacter les capacités de perception. L'ensemble de l'entretien est enregistré de façon à garder une trace des données récoltées. Par ailleurs, l'expérimentateur dispose d'un formulaire sur ordinateur, créé sur le logiciel Excel, dans lequel les différentes réponses fournies par le participant sont encodées en direct.

7.3.4.1. Récolte d'informations a priori auprès de l'enfant ou de l'adolescent

a. Évaluation des processus perceptifs de base

Un déficit dans la capacité au niveau de la perception visuelle et en particulier au niveau de certains processus perceptifs de base est susceptible de générer des difficultés durant les tâches de perception visuelle d'objets 3D. Afin de mesurer de tels processus, trois parties de subtests provenant de l'épreuve psychométrique de la Birmingham Object Recognition Battery (BORB) proposée par Riddoch et Humphreys, (1993) ont été administrées auprès de chaque participant. Il s'agit d'une épreuve destinée initialement aux adultes mais dont l'utilisation pédiatrique est supportée par de nombreux auteurs (Brunsdon *et al.*, 2018). Brundson *et al.* (2018) l'ont d'ailleurs eux-

mêmes utilisée auprès d'enfants âgés de 3 à 8 ans mais d'autres, par exemple Swain *et al.* (2009) ou encore Bova *et al.* (2007) l'ont utilisée sur des enfants plus âgés.

Si, dans son entièreté, la BORB propose huit subtests pour évaluer les processus perceptifs de base, appelés également processus pré-catégoriques, seul trois de ces subtests ont été ici exploités. Le premier est le subtest « Association de longueurs », dans lequel les enfants et les adolescents sont amenés à identifier si deux segments donnés sont de taille identique ou non. Le subtest « Association de tailles » évalue la capacité à percevoir si deux formes, en l'occurrence des disques, sont de taille identique. Enfin, le troisième subtest utilisé est le test « Association d'orientation ». Dans ce test, les enfants et les adolescents doivent identifier si des segments suivent la même orientation ou non, autrement dit s'ils sont parallèles. Ces trois subtests ont été conservés car ils prévoient l'évaluation de processus pré-catégoriques qui sont susceptibles d'intervenir directement dans la perception de représentations d'objets géométriques usuels, qui contiennent des arêtes ou génératrices de mêmes longueurs ou non, parallèles ou non, et des faces de même taille ou non. En effet, si l'enfant ou l'adolescent a des difficultés à identifier si des formes ont la même taille, des segments ont la même longueur ou même si des traits sont parallèles, cela est susceptible d'impacter la perception de l'objet 3D présenté, notamment dans l'observation des caractéristiques de l'objet ou de ses faces. Par exemple, si l'individu a des difficultés à percevoir si deux segments ont la même longueur, les différentes faces du cube pourraient être perçues comme des rectangles (non carrés), ce qui impacterait la perception des objets 3D. Les participants sont amenés à devoir statuer sur la différence de taille entre des lignes ou des disques ou encore sur le parallélisme de deux lignes. Des déficiences au niveau de ces processus de base pourraient entraîner des difficultés dans la perception de la 3D. Inversement, des subtests comme celui de « copiage de formes élémentaires » semblent eux moins directement liés à l'habileté de perception de la 3D.

Les trois subtests initiaux issus de la BORB contiennent chacun trente items au départ (15 éléments identiques, 5 éléments « différents légers », 5 « différents intermédiaires » et 5 « différents forts ») et proposent deux versions de chaque subtest (une dans laquelle les stimuli sont plutôt placés horizontalement et l'autre verticalement). Toutefois, dans le cadre de cette recherche, un nombre limité d'items, à l'instar de Gillet *et al.* (2009), a été conservé étant donné l'usage pédiatrique envisagé. Dans le cadre de cette étude, dans chaque subtest, douze items sont

conservés, la moitié étant tiré de la version « horizontale » et l'autre de la version « verticale ». Le ratio des différents types d'item sélectionnés est identique au ratio observé dans la version complète de la BORB. Ainsi, sur les douze items, six portent sur des éléments identiques à comparer, deux portent sur des éléments « différents légers », deux sur des éléments « différents intermédiaires » et enfin deux sur des éléments « différents forts » (Annexe 6). De la même façon que pour l'usage du questionnaire de la DCDQ-FE, l'intention en utilisant une partie de la BORB n'est évidemment pas d'établir un bilan neuropsychologique au niveau de la capacité de reconnaissance visuelle des objets et du traitement visuel des participants, ni même de déceler la présence d'un trouble à ce sujet chez ces derniers, mais d'obtenir une mesure de certaines capacités susceptibles d'impacter les performances à l'habileté étudiée. C'est d'ailleurs pour cette raison que certains subtests uniquement, avec un nombre réduit d'items, ont été utilisés.

b. Évaluation de la capacité de distinction des teintes de couleurs

Pour les objets 3D constitués des faces adjacentes (tous sauf l'anneau rond à bord rond et la sphère), des teintes d'une même couleur sont proposées pour distinguer ces faces. Par exemple, dans la représentation plane ou virtuelle du cube, trois teintes de rouge sont proposées. Ces différentes teintes sont reprises au sein de la Figure 38. Un déficit au niveau de la distinction des teintes de couleurs est évidemment susceptible d'impacter négativement la perception des objets 3D puisque cela entraînerait chez l'individu une difficulté à distinguer les faces adjacentes qui le composent. Avant d'être utilisées dans le cadre de l'étude ici menée, les différentes teintes ont été proposées aux enfants et aux adolescents ayant participé à la validation de l'environnement virtuel (Chapitre 6). Il leur a été demandé, au départ des images fournies en Figure 38, de déterminer combien de teintes étaient présentes sur l'image. Les résultats ont montré qu'une majorité de participants (20 sur 24) ont perçu le nombre exact de teinte(s) pour chacune des images proposées. Trois participants ont distingué quatre teintes de rouge et non trois et un a perçu deux teintes de bleu clair sur l'image et non une seule. Cette mise à l'essai a permis de souligner que les teintes choisies arrivent à être distinguées par une majorité d'enfants et d'adolescents. Toutefois, puisque cette perception des différences de teintes n'est pas automatique, il est tout de même nécessaire d'évaluer cette capacité de distinction des teintes auprès des participants à l'étude menée. Cette vérification a été réalisée en suivant à nouveau la méthode décrite préalablement.

Autrement dit, les images contenant les teintes de couleurs ont été montrées de manière successive à chaque participant et il lui a été demandé de préciser pour chaque image combien de « sortes » de la couleur étaient présentes sur l'image (ex. « *Sur cette image, il y a de l'orange, mais combien de sortes d'orange vois-tu ?* »).








Deux teintes d'orange utilisées pour le cylindre	Deux teintes de vert utilisées pour le cône	Une teinte de bleu foncé utilisée pour la sphère	Quatre teintes de jaune utilisées pour le prisme droit à base triangulaire	Une teinte de bleu clair utilisée pour l'anneau rond à bord rond	Trois teintes de rouge utilisées pour la sphère	Deux teintes de violet utilisées pour l'anneau rond à bord droit
						

Figure 38 : Teintes de couleurs présentes au sein des objets 3D

7.3.4.2. Évaluation de la perception visuelle des objets 3D

La perception visuelle de la 3D est évaluée au travers d'une tâche de reconnaissance d'objets 3D présentés, selon le groupe d'appartenance, dans une des quatre modalités de présentation des objets 3D investiguée. Dans un premier temps, les modalités de présentation sont détaillées. Ensuite, l'évaluation de la perception visuelle de la 3D utilisée dans l'étude est décrite puis discutée.

a. Description détaillée de la modalité de présentation des objets 3D selon le groupe d'appartenance

Selon le groupe dans lequel il est réparti, le participant est confronté à une des quatre modalités de présentation des objets 3D lors de la réalisation des exercices évaluant sa capacité à percevoir les objets 3D. Le Tableau 14 propose un résumé de ces quatre modalités.

Les enfants et les adolescents répartis dans le groupe 1 sont confrontés aux objets 3D représentés sur tablette au sein de l'environnement virtuel décrit au chapitre 6. La tablette est posée à l'horizontale (à plat) sur le banc et chaque participant est invité à ouvrir l'application se rapportant à l'exercice. Dans cette application, l'objet 3D apparaît dans une position initiale, qui est celle illustrée dans le Tableau 14. Ensuite, le participant est invité à manipuler librement l'objet 3D au sein de l'environnement virtuel. Lorsqu'il estime avoir suffisamment manipulé l'objet sur la tablette, il est invité à cliquer sur le bouton vert de l'application en vue de remettre l'objet 3D dans sa

position initiale. Il est alors invité à résoudre la tâche demandée avant de quitter l'application.

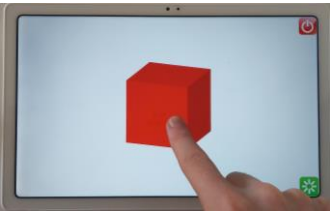



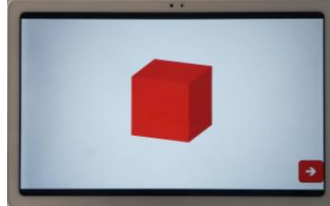
Les enfants et les adolescents appartenant aux groupes 2 et 3 sont confrontés à des objets 3D représentés virtuellement à observer et non à manipuler. Pour cela, une vidéo de chaque objet 3D effectuant des rotations sur lui-même, créée préalablement au sein du même environnement, est proposée sur tablette. Dans le groupe 2, la tablette est placée à l'horizontale alors que, dans le groupe 3, elle est placée à la verticale à l'aide d'un petit support. Dans chaque vidéo, l'objet 3D tourne à environ 20° par seconde, comme envisagé par Pani *et al.* (1997). Il apparaît dans la même position initiale que pour le groupe 1. Une rotation lui est d'abord appliquée de façon à voir l'avant de l'objet 3D, par exemple le carré correspondant à la face avant pour le cube. Après trois secondes de pause permettant d'observer l'avant de l'objet, une rotation de 90° vers l'avant est effectuée afin de pouvoir observer le dessus de l'objet (par exemple le carré correspondant à la face supérieure du cube). Après trois secondes de pause, une rotation d'environ 60° vers l'avant est ensuite effectuée et est directement suivie d'une rotation vers la gauche de 360°, permettant de faire faire un tour complet de l'objet 3D sur lui-même avant de retourner dans sa position initiale. Pour chaque objet 3D, la vidéo dure en moyenne 35 secondes. L'intégration de différents temps de pause se justifie par le fait que les individus passent davantage de temps à observer certaines vues lors de l'exploration libre, notamment la vue du devant et du côté (James *et al.*, 2001, 2002). Les auteurs considèrent alors ces vues comme essentielles pour le stockage visuo-spatial des informations. Ces pauses à des moments cruciaux, comme le suggèrent Wu et Chiang (2013), peuvent être bénéfiques car elles permettent d'offrir davantage de temps aux participants pour comprendre les caractéristiques de l'objet et intégrer l'observation réalisée dans la représentation mentale en train d'être construite. D'après Mayer et Chandler (2001, cités par Schnotz & Lowe, 2008), l'intégration de pause au sein d'animations participe à la réduction de la charge cognitive et peut encourager leur compréhension. Wu et Chiang (2013) ont, dans leur expérimentation, proposé des pauses de deux secondes mais considèrent qu'augmenter ce temps peut être encore plus bénéfique c'est pourquoi des pauses de trois secondes ont été intégrées. Après un premier visionnage de la vidéo, le participant est autorisé, s'il le souhaite, à regarder une seconde fois la vidéo.

Enfin, les enfants et les adolescents répartis dans le groupe 4 sont quant à eux confrontés à une représentation 2D unique de chaque objet 3D. Il s'agit d'une

représentation de l'objet dans la même position qu'au début et à la fin de la manipulation du groupe 1 ou de la vidéo des groupes 2 et 3 afin de favoriser la comparaison des différents groupes. Le mode de représentation 2D correspond donc à une projection axonométrique.

Entre les quatre groupes, l'apparence des représentations des objets 3D est identique (couleur, mode de perspective, taille...) et les différences entre groupes concernent simplement l'accès ou non au caractère dynamique de la représentation et la manière de gérer ce dynamisme (contrôle de l'individu ou non). De même, comme précédemment évoqué, la représentation 2D fournie au commencement et à la fin de l'exercice est la même dans tous les groupes. Ce sont donc là toutes des variables potentielles qui sont neutralisées. La variable relative à la position de la tablette est contrôlée dans le cadre de la troisième question de recherche (impact de l'orientation) mais est neutralisée dans le cadre de la deuxième (impact de la manipulation) et de la quatrième question de recherche (différence entre 2 ½ D et 2D) puisque des modalités dans lesquelles les tablettes sont présentées dans la même position sont comparées.

Tableau 14 : Illustrations du matériel pour évaluer la perception visuelle des objets 3D (1^{ère} étude)

Groupes	Brève explication	Illustration de l'exercice du cube et lien vers une vidéo illustrative pour les groupes 1, 2 et 3
Groupe 1 : manipulation 2 ½ D (G1 : manip. 2½D)	Objets 3D représentés virtuellement à manipuler via interface tactile sur tablette placée à l'horizontale sur le banc en mode « paysage »	 
Groupe 2 : observation 2 ½ D horizontal (G2 : obs. 2½D H.)	Objets 3D représentés virtuellement à observer en vidéo sur tablette placée à l'horizontale sur le banc en mode « paysage »	 
Groupe 3 : observation 2 ½ D vertical (G3 : obs. 2½D V.)	Objets 3D représentés virtuellement à observer en vidéo sur tablette placée verticalement à l'aide d'un support et en mode « paysage »	
Groupe 4 : observation 2D (G4 : obs. 2D)	Objets 3D représentés à l'aide d'une représentation plane unique présentée sur tablette placée à l'horizontale sur le banc en mode « paysage »	

Par ailleurs, le choix des positions initiale et finale de l'objet 3D au sein des représentations virtuelles (pour les groupes 1, 2 et 3) et donc de la représentation plane proposée dans le groupe 4, n'est pas anodin puisqu'il offre un point de vue dans lequel l'objet 3D est à peu près de face (mais pas complètement) et légèrement de dessus, ce qui est plus facilement identifiable d'après Parzysz (2006). L'objet 3D apparaît par ailleurs dans une position dite typique (au sens de Sarfaty & Patkin, 2013) et normative (au sens de Widder *et al.*, 2014) ce qui peut aussi faciliter la perception.

b. Description de la tâche de perception visuelle

- Temps de familiarisation avec le matériel :

Dans un premier temps, avant d'entamer les exercices permettant d'évaluer l'acquisition de la perception des objets 3D, un temps de familiarisation est proposé avec la modalité de présentation des objets 3D utilisée dans le groupe d'appartenance. Pour ce faire, un premier exemple d'objet 3D, en l'occurrence une bouteille, est proposé au participant dans la modalité de son groupe d'appartenance.

Pour le groupe 1, autorisé à manipuler des représentations virtuelles, le temps de familiarisation suit les recommandations mises en évidence lors de la validation de l'environnement. Autrement dit, l'expérimentateur explique que la tablette va servir à montrer des éléments, par exemple une bouteille, qu'ils pourront manipuler. Il montre au participant qu'il est possible de faire tourner l'élément sur lui-même dans les différentes directions en effectuant des mouvements sur l'écran. Ensuite, il explique au participant, toujours en illustrant ses explications par des actions menées sur la tablette, que les rotations vers le haut et vers le bas sont limitées. Un temps de manipulation libre d'une minute maximum est ensuite laissé au participant pour qu'il puisse se familiariser avec la tablette.

Pour les groupes 2 et 3, l'expérimentateur explique que la tablette va ici être utilisée pour diffuser des vidéos d'éléments en train de tourner sur eux-mêmes, par exemple une bouteille, et que les rotations effectuées seront toujours les mêmes. La vidéo de la bouteille démarre ensuite et l'expérimentateur commente les mouvements effectués par la bouteille (ex. « [...] La bouteille tourne vers l'avant, elle fait ensuite une pause pour bien te laisser le temps d'observer le dessus de l'élément [...] »).

Pour le groupe 4, l'expérimentateur explique que la tablette va être utilisée pour présenter la photographie d'un élément, par exemple une bouteille.

Ensuite, un deuxième exemple, se rapprochant davantage d'un objet 2D, en l'occurrence une feuille d'arbre, est proposé. La volonté, en optant pour la présentation d'un objet fin est d'éviter d'inciter les participants à considérer que les éléments présentés sont uniquement des éléments volumineux. À nouveau, le participant est invité, selon son groupe d'appartenance, à manipuler, observer la vidéo ou observer la photographie de la feuille. L'objectif, au travers de ce deuxième exemple est de lui faire comprendre que le principe reste le même quel que soit ce qui sera présenté sur la tablette. D'ailleurs à la fin du temps de familiarisation, l'expérimentateur explique à chaque participant que plusieurs exercices vont lui être proposés et que dans chaque exercice, un élément va lui être présenté de la même façon que pour la bouteille et la feuille. Il lui est annoncé qu'il va devoir prendre connaissance de l'élément représenté afin de pouvoir ensuite retrouver l'élément parmi une série de propositions présentées.

- Exercices et consignes :

À l'instar de Baldy (1988), Frick et Newcombe (2015) ou encore Krylova et Vodyaha (2020), la tâche proposée pour évaluer l'habileté de perception de la 3D au départ d'une représentation est une tâche de reconnaissance d'objets 3D et plus précisément une tâche de mise en correspondance d'une représentation et de l'objet réel. Au total, sept exercices de reconnaissance d'objets 3D présentés dans la modalité de leur groupe d'appartenance, chacun des exercices portant sur un objet 3D différent (objets décrits et illustrés au sein du Tableau 13). S'ajoutent à cela deux exercices parasites prenant exactement la même forme mais dans lesquels c'est un élément 2D qui est présenté au sein de l'environnement virtuel. La liste des exercices est la suivante : le cylindre (exercice 1), le rond (exercice parasite 1), le cône (exercice 2), la sphère (exercice 3), le carré (exercice parasite 2), le prisme droit à base triangulaire (exercice 4), l'anneau rond à bord rond (exercice 5), le cube (exercice 6), l'anneau rond à bord droit (exercice 7).

Dans chaque exercice, le participant est d'abord invité à prendre connaissance de l'élément présenté dans la modalité de son groupe d'appartenance, en suivant les principes décrits ci-dessus. Pour le groupe 1, un enregistrement vidéo des manipulations tactiles menées par le participant est réalisé afin de garder des traces des rotations appliquées aux représentations virtuelles et de pouvoir déterminer quelles positions de l'élément ont été observées.

Ensuite, à la fin du temps de manipulation/observation, différentes propositions sont dévoilées au participant (ex. Figure 39) tout en lui laissant la possibilité d'observer

l'élément sur la tablette mais uniquement via la représentation plane de l'élément correspondant à la position initiale. En se contentant de les observer, sans donc être autorisé à les prendre en main, il lui est demandé de sélectionner parmi ces propositions, laquelle est l'élément qui lui était représenté sur la tablette. Il est précisé au participant qu'il peut sélectionner aucune, une seule ou plusieurs propositions. De plus, il lui est demandé, pour chaque proposition choisie, de justifier son choix. Une fois l'ensemble des choix effectués, les propositions sont recouvertes. L'exercice suivant est proposé en suivant la même logique.

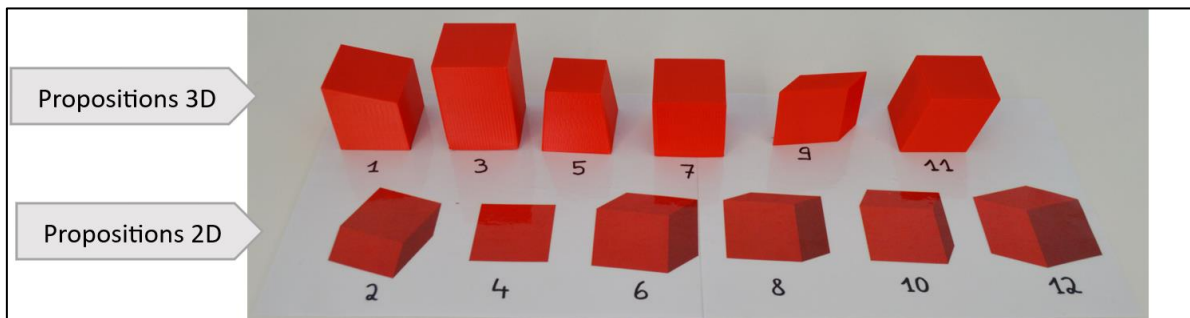


Figure 39 : Propositions fournies pour l'exercice du cube à la tâche de perception visuelle

Lors de la passation des différents exercices, plusieurs précautions sont prises par l'expérimentateur. Dans la manière de formuler les consignes, l'expérimentateur veille à utiliser le terme « élément » pour parler de ce qui est présenté sur la tablette. D'une part, il veille à ne jamais utiliser du vocabulaire se rapportant aux noms géométriques des objets présentés. Cela afin de ne pas influencer les participants et afin de se focaliser uniquement sur l'évaluation de connaissances spatiales sans que cela ne fasse intervenir des connaissances géométriques. Cela n'empêche évidemment pas certains participants de recourir à des connaissances géométriques dans les justifications mais ces connaissances ne sont pas nécessaires pour résoudre la tâche, c'est-à-dire choisir la ou les propositions. D'autre part, les termes « objet » ou « figure » sont également évités car ceux-ci sont susceptibles d'influencer les choix étant donné qu'ils ont une connotation relative à la 3D ou à la 2D. Le terme « élément », plus neutre, est donc privilégié.

Par ailleurs, l'autre précaution concerne les propositions et leur dévoilement. Au moment du temps de manipulation ou d'observation de la vidéo, elles sont recouvertes afin de ne pas être visibles par le participant. Ce n'est qu'une fois que l'élément est replacé dans sa position initiale (fin du temps de manipulation, fin de l'observation de

la vidéo) que l'expérimentateur dévoile les propositions. Les participants sont alors sur un même pied d'égalité au moment de la sélection puisque tous effectuent leur sélection en pouvant observer la représentation plane initiale de l'élément. De plus, pour chaque exercice, l'expérimentateur précise à chaque fois le nombre de propositions qui sont proposées au participant. Pour le premier exercice, l'expérimentateur prend le temps de pointer du doigt, une à une, chacune des propositions afin de lui montrer qu'il peut choisir parmi les propositions 2D et les propositions 3D.

L'expérimentateur veille également, pour chaque exercice, à rappeler au participant qu'il peut sélectionner aucune, une ou plusieurs propositions. D'ailleurs, après qu'une proposition soit choisie et justifiée, l'expérimentateur demande au participant s'il pense qu'une autre proposition est aussi l'élément qu'il a manipulé/observé sur la tablette.

Lors de la résolution des exercices, les gestes de co-pensées (Chu & Kita, 2011) sont autorisés mais ne font pas l'objet d'analyse.

- Description des propositions :

À l'instar de ce que Baldy (1988) ou Krylova et Vodyaha (2020) proposent dans leur tâche de reconnaissance, deux types de proposition sont suggérées : des éléments 3D ainsi que des éléments se rapportant à des propositions 2D.

Parmi les éléments 3D, obtenu à l'aide d'impressions 3D, il y a systématiquement l'objet 3D attendu¹⁸ (sur la Figure 39 : proposition 7) ainsi que d'autres objets 3D proches, dont certaines caractéristiques ont été modifiées (objets 3D non attendus, c'est-à-dire ne correspondant pas à l'objet initialement proposé). Comme l'ont fait Frick et Newcombe (2015), il est apparu pertinent d'intégrer une proposition pour laquelle les proportions de l'objet 3D ne sont pas conservées mais aussi d'intégrer des propositions pour laquelle l'objet a été déformé. Quand c'est possible, les objets 3D proches suivants ont été proposés :

- objet 3D dont seule la hauteur a été modifiée (sur la Figure 39 : proposition 3),
- objet 3D dont seule l'inclinaison a été modifiée (sur la Figure 39 : proposition 11),

¹⁸ Par objet 3D attendu, il est entendu l'objet 3D de l'espace sensible correspondant à celui ayant été représenté en 2 ½ D et en 2D, dont le chercheur souhaite évaluer la perception. Le terme attendu a été privilégié au terme « correct » notamment suite à l'ambiguïté présente dans les représentations 2D.

- objet 3D dont seule la ou les bases ont été déformées pour correspondre à la forme dans laquelle la base apparaît sur la position initiale de l'objet 3D (sur la Figure 39 : proposition 9),
- objet 3D dont seule la taille de la base supérieure a été rétrécie (sur la Figure 39 : proposition 5),
- objet 3D dont seule l'orientation de la base supérieure a été modifiée (sur la Figure 39 : proposition 1),
- autres modifications de l'objet 3D quand cela apparaît pertinent.

Les choix 2D sont quant à eux imprimés sur papier. Il s'agit de dessins correspondant à des représentations de l'objet 3D dans différentes positions :

- représentation 2D de l'objet 3D en position initiale (sur la Figure 39 : proposition 6),
- représentation 2D de l'objet 3D après légère rotation de l'objet vers l'avant (sur la Figure 39 : proposition 2),
- représentation 2D de l'objet 3D après légère rotation de l'objet vers l'arrière (sur la Figure 39 : proposition 8),
- représentation 2D de l'objet 3D après légère rotation de l'objet vers la gauche (sur la Figure 39 : proposition 12),
- représentation 2D de l'objet 3D après légère rotation de l'objet vers la droite (sur la Figure 39 : proposition 10),
- représentation 2D du devant de l'objet 3D (sur la Figure 39 : proposition 5),
- représentation 2D du dessus de l'objet 3D (pour le cube, cela correspond à la vue du devant (sur la Figure 39 : proposition 5),
- autres représentations 2D quand cela apparaît pertinent.

La volonté a été de conserver, quand c'est possible, le même type de propositions pour chaque objet 3D dans une optique de comparaison. Néanmoins, cela implique un nombre de propositions variable d'un objet 3D à l'autre notamment suite aux caractéristiques de l'objet 3D. Concernant les choix 3D, certaines propositions sont incompatibles avec l'objet 3D. C'est le cas par exemple pour la proposition « Objet 3D dont seule la taille de la base supérieure a été rétrécie » qui n'est pas compatible avec le cône puisqu'il ne possède pas de base supérieure. Concernant les choix 2D, certaines propositions n'ont pas de sens dans la mesure où elles aboutiraient à une proposition déjà existante. C'est le cas par exemple pour le cylindre, pour qui la forme 2D de la vue en perspective de départ sera la même que la forme 2D de la vue en perspective après rotation de l'objet vers la droite ou vers la gauche. En plus de conserver, dès que c'est

possible, les mêmes propositions, des spécificités concernent les propositions apportées pour certains objets 3D. Pour la sphère, afin d'obtenir plus d'une proposition 2D, une forme proche est ajoutée : un ovale. Pour ce même objet, afin d'obtenir plus d'une proposition 3D non attendue en plus de la proposition 3D attendue, une proposition d'objet dont la hauteur et la largeur ont été modifiées a été intégrée. Une autre spécificité concerne également les anneaux pour qui des propositions supplémentaires en 3D différentes de celles apportées aux autres objets 3D ont été ajoutées, elles font référence à une modification des bords de l'objet. Le Tableau 15 reprend pour chacun des objets 3D, la liste des propositions présentées aux participants. Dans ce tableau, le symbole « ✓ » est indiqué pour les propositions présentées. Le symbole « ✕ » est indiqué pour les propositions 3D n'ayant pas de sens et le symbole « = » est indiqué pour les propositions 2D correspondant déjà à une autre proposition (en l'occurrence la représentation 2D de l'objet 3D en position initiale). Pour les exercices parasites, trois éléments 3D et quatre éléments 2D sont proposés.

Les propositions sont réparties sur deux lignes horizontales (les objets 2D sur la ligne à l'avant et les propositions 3D sur la ligne à l'arrière) en quinconce en conservant un écart équivalent entre elles à l'instar de Frick et Newcombe (2015). Entre les exercices, l'ordre des propositions varie. Par contre, pour chaque exercice, la disposition des propositions est exactement la même pour tous les enfants et les adolescents, quel que soit le groupe. Des illustrations des différentes propositions ainsi que de leur ordre, à l'instar de celle présentée en Figure 39 pour l'exercice du cube, sont fournies en annexe (Annexe 7).

Tableau 15 : Liste des propositions par exercice à la tâche de perception visuelle des objets 3D

		Cylindre	Cône	Sphère	Prisme droit à base triangulaire	Anneau rond à bord rond	Cube	Anneau rond à bord droit
Propositions 3D	Objet 3D attendu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Objet 3D dont la hauteur a été modifiée	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Objet 3D dont l'inclinaison a été modifiée	✓	✓	×	✓	×	✓	✓
	Objet 3D dont la/les bases ont été déformées (pour correspondre à la forme dans laquelle la base apparaît dans la position initiale de l'objet 3D)	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓
	Objet 3D dont la taille de la base supérieure a été rétrécie	✓	×	×	✓	×	✓	✓
	Objet 3D dont l'orientation de la base supérieure a été modifiée	✓	×	×	✓	×	✓	✓
	Autre proposition 3D : objet 3D proche (spécificité pour les anneaux et la sphère)			✓ sphère aplatie et élargie		✓✓ anneau rond à bord droit / anneau ovale à bord droit		✓✓ anneau rond à bord rond / anneau ovale à bord rond
	Propositions 2D	Représentation 2D de l'objet 3D en position initiale	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Représentation 2D de l'objet 3D après légère rotation de l'objet vers l'avant		✓	✓	=	✓	✓	✓	✓
Représentation 2D de l'objet 3D après légère rotation de l'objet vers l'arrière		✓	✓	=	✓	✓	✓	✓
Représentation 2D de l'objet 3D après légère rotation de l'objet vers la gauche		=	=	=	✓	=	✓	=
Représentation 2D de l'objet 3D après légère rotation de l'objet vers la droite		=	=	=	✓	=	✓	=
Représentation 2D de l'avant de l'objet 3D		✓	✓	=	✓	✓	✓	✓
Représentation 2D du dessus de l'objet 3D		✓	✓	=	✓	✓	=	✓
Autre proposition 2D : représentation 2D proche (spécificité pour la sphère)				✓ Ovale				
Nombre total de propositions		11	9	5	13	10	12	13

c. Analyse a priori de la tâche au regard d'éléments théoriques

- Analyse au regard des types d'espace et de représentation :

De façon à évaluer la capacité des enfants et des adolescents à percevoir visuellement des représentations, qu'elles soient virtuelles ou planes, d'objets de l'espace sensible, les participants sont invités à devoir passer de ces représentations aux objets de l'espace sensible eux-mêmes au travers d'une tâche de reconnaissance. Autrement dit, pour savoir comment l'objet 3D représenté est perçu par les enfants et adolescents, il leur est demandé d'observer différentes propositions réalisées dans l'espace sensible et de sélectionner celle(s) qui correspond(ent) à ce qu'ils ont perçu au travers de la représentation plane ou virtuelle fournie préalablement. La tâche ici utilisée pour évaluer la perception visuelle d'objets 3D face à des représentations 2D ou 2 ½ D passe donc par la perception visuelle d'éléments présentés dans l'espace sensible. De cette façon, l'image mentale que les enfants se sont créée au départ de l'objet représenté, qui est donc le résultat de la perception visuelle, est investiguée.

Même si les objets sur lesquels porte l'étude sont des objets de l'espace sensible se rapportant à des objets idéaux de l'espace géométrique (cube, cône...), les tâches proposées n'évaluent pas les rapports qu'entretient l'enfant ou l'adolescent avec cet espace géométrique (au sens de Perrin-Glorian *et al.*, 2013). En effet, les consignes apportées par l'expérimentateur, en ne fournissant pas le nom géométrique des objets, n'incitent pas les participants à prendre appui sur des propriétés théoriques associées aux objets géométriques mais à leur observation des représentations d'objets, même si les participants peuvent y faire allusion lors de la résolution des tâches proposées. Dans le cadre de cette étude, les rapports entretenus par l'enfant et l'adolescent avec l'espace graphique (au sens de Perrin-Glorian *et al.*, 2013) ne sont pas non plus investigués. Si la représentation de l'objet 3D est fournie sur un support 2D, il s'agit là davantage d'une simulation de l'espace sensible que d'un réel espace graphique puisque les participants ne sont pas autorisés à y expérimenter au moyen de schémas ou dessins, ni même d'annotations ou de prises de mesures sur le dessin. Il s'agit donc d'une tâche de perception visuelle focalisée sur l'espace sensible et sur des représentations d'objets de cet espace.

Concernant le mode de représentation utilisé, comme précédemment précisé, la perception a été évaluée au départ de représentations en projection orthographique dans l'environnement virtuel, ce qui correspond à une projection axonométrique pour

la représentation 2D de départ. Même si la maîtrise des règles associées à chaque perspective peut faire l'objet d'un apprentissage (connaître les propriétés conservées et avoir conscience de l'existence d'aberrations visuelles), ce mode de représentation ne constitue pas un mode de représentation faisant, d'après les référentiels, l'objet d'un apprentissage scolaire particulier, comme c'est le cas par exemple de la perspective cavalière. Il s'agit donc de rester prudent quant à l'impact des apprentissages antérieurs en géométrie 3D. Notons cependant que les perspectives cavalières et les projections axonométriques partagent une série de propriétés communes, notamment la conservation du parallélisme. Pour autant, une représentation 2D en projection axonométrique semble contenir davantage de PMI (au sens de Widder *et al.*, 2014), qu'en perspective cavalière puisque les faces parallèles au plan de projection n'y sont pas représentées à l'identique. On y observe par exemple davantage d'amplitudes d'angle ou d'égalités de longueur non conservées. Elles constituent des aberrations visuelles pouvant gêner la perception des objets 3D d'après Mithalal (2014). Face aux représentations virtuelles, ces aberrations semblent cependant se modifier et disparaître, au moins momentanément grâce au caractère dynamique de l'environnement. Ce dernier permet d'observer l'objet dans différentes positions et d'observer, par exemple, la forme exacte de faces lorsque l'objet est placé dans une position permettant que ces dernières soient parallèles au plan de projection. Par exemple, grâce au caractère dynamique de l'environnement, le participant va pouvoir observer que la face supérieure du cube, qui est de forme parallélogramme sur la représentation 2D, est en fait un carré quand on observe le dessus de l'objet. De la même façon, si dans les représentations 2D, des informations relatives aux représentations 2D sont cachées et ne peuvent être accessibles, elles le deviennent face à des représentations dynamiques.

Une différence relative aux représentations d'objet 3D à prendre en considération *a priori* concerne par ailleurs la comparaison entre le groupe 1 et le groupe 2 (impact de la manipulation). Évidemment, et c'est inhérent au fait d'investiguer la manipulation, les participants du groupe 1 ont le contrôle sur les mouvements effectués puisque les rotations observées sont menées en fonction des gestes qu'ils effectuent. Dans les groupes amenés à observer les représentations 2 ½ D d'objets 3D, les participants, en plus de ne pas effectuer lui-même les gestes sur l'écran, n'ont pas non plus le contrôle des rotations effectuées et subissent les rotations imposées par la vidéo à observer.

Seules des instructions orales sont fournies en complément à la vidéo pour décrire le sens dans lequel l'objet 3D est en train d'effectuer des rotations.

Par ailleurs, les enfants et les adolescents confrontés aux représentations virtuelles à manipuler possèdent une plus large marge de manœuvre dans les mouvements effectués sur l'objet 3D puisque ceux-ci sont autorisés à faire des manipulations jusqu'à 90° vers l'arrière, permettant l'observation du dessous de l'objet 3D, là où la vidéo ne montre pas cette information puisque la rotation vers l'arrière s'arrête à l'observation de l'avant de l'objet 3D. Pour autant, si de telles manipulations sont possibles, elles restent au choix de l'utilisateur. En ce sens, la liberté de manipulation est susceptible d'occasionner une moins bonne perception visuelle des objets 3D. En effet, si le participant n'a pas le choix des informations observées dans les vidéos, les informations qui lui sont montrées sont suffisantes pour lui permettre d'assurer la perception de l'objet 3D, en offrant en plus un temps d'arrêt aux endroits donnant des informations essentielles pour la perception, par exemple lorsqu'elle montre l'avant ou le dessus de l'objet 3D. Inversement, les participants amenés à manipuler les objets représentés virtuellement peuvent accéder à ces informations à une ou plusieurs reprises et y marquer des pauses s'ils le souhaitent. Toutefois, ils peuvent aussi faire le choix de ne pas récolter ces informations qui pourraient être pourtant capitales pour assurer la perception (ex. observation des différentes faces ou au moins de certaines). Par ailleurs, comme l'évoquent Sanandaji *et al.* (2017), la vidéo permet de s'assurer que tous voient la même chose, là où la manipulation libre ne permet pas cela et risque donc d'entraîner des différences individuelles plus importantes.

- Analyse au regard des fonctions exécutives sollicitées :

Cela a pu être souligné dans le cadrage théorique (*cf.* 4.1.9), les fonctions exécutives de contrôle inhibiteur, de flexibilité cognitive ou encore de mémoire de travail, interviennent dans de nombreuses tâches du quotidien et notamment dans la résolution de tâches en géométrie et de tâches impliquant les représentations d'objets 3D. La tâche de reconnaissance ici proposée pour évaluer l'acquisition de l'habileté de perception de la 3D ne semble pas échapper à la règle. Plus encore, les modalités de représentation utilisées sont susceptibles d'exiger des niveaux différents de ces fonctions exécutives, ce qui peut être à l'origine de différences de performance.

La mémoire de travail est sollicitée dans l'ensemble des modalités mais pour des raisons différentes. Elle semble particulièrement être sollicitée dans les modalités

relatives aux représentations virtuelles d'objets 3D puisque les différentes propriétés observées lorsque la représentation de l'objet 3D est en mouvement doivent être retenues et compilées. D'ailleurs, le cadrage théorique a permis d'identifier la charge cognitive importante associée aux représentations dynamiques (Höffler, 2010). Plus encore, dans le groupe 1, la manipulation du matériel virtuel occasionne aussi une charge cognitive même si le matériel a été pensé pour la limiter au maximum (cf. Chapitre 6). Par ailleurs, dans le groupe confronté à des représentations 2D, la charge mentale exigée est associée au fait que l'individu doit se représenter des informations non visibles (Pillay, 1998).

La fonction exécutive du contrôle inhibiteur semble quant à elle être sollicitée davantage face à la représentation 2D puisque le participant est confronté à plus d'aberrations visuelles qu'il va devoir inhiber. Cette fonction exécutive semble cependant aussi observée dans tous les autres groupes au regard du type de tâche proposée, c'est-à-dire une tâche de reconnaissance dans laquelle des distracteurs sont proposés (Scionti *et al.*, 2020). Le fait d'avoir opté pour ce type de tâche est donc également à prendre en considération dans les analyses menées. Celle-ci offre l'occasion au participant de procéder par élimination même la possibilité de ne choisir aucune des propositions est tout de même offerte au participant.

Enfin la flexibilité cognitive apparaît particulièrement sollicitée face à des représentations virtuelles puisque dans la tâche, les participants sont amenés à exercer l'habileté de perception sur des objets 3D dont la position évolue, passant de positions familières à des positions non familières. Elle est également sollicitée chez les participants confrontés à des représentations 2D puisque la perspective utilisée n'est pas celle habituellement utilisée (perspective cavalière) lors des apprentissages en géométrie.

7.3.4.3. Récolte d'informations a posteriori

Pour conclure l'entretien, après avoir effectué l'évaluation de l'habileté de perception visuelle de la 3D, deux questions ont été posées aux participants pour obtenir des informations supplémentaires quant à la variable secondaire relative à son expérience antérieure en géométrie 3D. La première consiste à leur demander s'ils avaient déjà dû, avant aujourd'hui, résoudre des exercices similaires évaluant la perception visuelle d'objets 3D. La deuxième, posée uniquement aux participants des groupes confrontés aux représentations virtuelles d'objets 3D, leur demande s'ils ont

déjà manipulé des objets géométriques sur tablette (pour le groupe 1) ou observé des vidéos d'objets qui tournent sur eux-mêmes (pour les groupes 2 et 3).

7.4. Échantillon

7.4.1. Taille des groupes

Au total, cette première étude a été menée sur 640 participants dont 158 ont été répartis dans le groupe 1, 157 dans le groupe 2, 166 dans le groupe 3 et enfin 159 dans le groupe 4 (Tableau 16). À l'exception de la tranche d'âge constituée des enfants âgés de 6 et 7 ans, pour le groupe 1 (N= 28), un minimum de trente participants par groupe et par tranche d'âge est observé. Ce manque de deux enfants dans cette partie de l'échantillon s'explique par l'absence des enfants lors des différentes journées au cours desquelles l'étude a été menée dans leur établissement.

Tableau 16 : Taille de l'échantillon (nombre de participants) par groupe et par tranche d'âge (1^{ère} étude)

	G1 : manip. 2½D	G2 : obs. 2½D H.	G3 : obs. 2½D V.	G4 : obs. 2D	TOTAL
6-7 ans	28	31	31	31	121
8-9 ans	34	31	31	32	128
10-11 ans	31	31	34	32	128
12-13 ans	34	34	34	34	136
14-15 ans	31	30	36	30	127
TOTAL	158	157	166	159	640

7.4.2. Description de l'échantillon

Comme susmentionné dans les étapes d'appel à participation et d'organisation des groupes, l'échantillon est un échantillon de convenance constitué d'enfants et d'adolescents tout-venant. Au total, cinq établissements ont pris part à l'étude (Tableau 17). Parmi eux, trois sont des établissements d'enseignement fondamental et deux d'enseignement secondaire. Dans chacun de ces trois établissements, l'entièreté des enseignants concernés ont accepté de prendre part à l'étude. Le premier établissement, dont l'indice socio-économique (ISE)¹⁹ est de 5 sur 20, est composé d'une classe par niveau scolaire. Au total, 101 enfants de cet établissement ont pris part à l'étude. Le deuxième établissement possède un ISE de 4 sur 20. Il est composé

¹⁹ Indicateur (sur 20) assigné par la Fédération Wallonie-Bruxelles d'après le Décret de Gouvernement de la Fédération Wallonie-Bruxelles du 24 mars 2011.

de trois classes par niveau scolaire à l'exception de la sixième primaire qui ne contient que 2 classes. Au total, 165 participants sont issus de cet établissement. Enfin, le dernier établissement d'enseignement, dont l'ISE est également de 4 sur 20, dispose de deux classes par niveau scolaire. Au total, 122 enfants de cet établissement ont pris part à l'étude. En ce qui concerne les établissements d'enseignement secondaire, les deux établissements ont un même niveau socio-économique de 11 sur 20. Dans le premier établissement, quatre enseignants de mathématiques ont accepté de prendre part à la recherche, ce qui a permis de solliciter au total huit classes de secondaire inférieur et d'obtenir la participation de 125 participants. Enfin, dans le dernier établissement, trois enseignants de mathématiques ont pris part à la recherche et ont accepté de mettre à disposition sept classes de secondaire inférieur. Au total, 157 participants sont issus de cet établissement. La proximité des indices socio-économiques entre les établissements d'enseignement primaire entre eux mais aussi entre les deux établissements d'enseignement secondaire reflète une certaine homogénéité des publics interrogés aux différentes tranches d'âge. En revanche, une telle homogénéité n'est pas observée entre les établissements d'enseignement primaire et secondaire puisque les premiers ont un niveau socio-économique plus faible que les seconds.

Tableau 17 : Descriptif des établissements participants (1^{ère} étude)

	Niveau scolaire	ISE (sur 20)	Nbre de classes sollicitées	Nombre de participants
1	Primaire	5	6	101
2	Primaire	4	17	165
3	Primaire	4	12	122
4	Secondaire	11	8	125
5	Secondaire	11	7	127

7.4.3. Équivalence des groupes quant aux variables investiguées

Les différentes informations récoltées au sujet des participants, que ce soit auprès de ces derniers, auprès de leurs parents ou auprès des enseignants, permettent de statuer sur l'équivalence au départ entre les groupes. C'est le cas de l'âge des participants, des variables secondaires (ex. genre, habitudes de jeux) mais aussi d'autres informations récoltées comme les troubles diagnostiqués ou suspectés.

Plus particulièrement, l'équivalence entre les paires de groupes faisant l'objet d'une comparaison pour les questions de recherche est investiguée (G1-G2 pour la question 1.2° ; G2-G3 pour la question 1.3° ; G1-G4 et G2-G4 pour la question 1.4°). Pour cela, différents tests inférentiels ont été appliqués²⁰ (selon le type de données et les conditions d'application des tests). Pour les variables relatives à des données métriques (ex. âge, score aux subtests de la BORB), le test *U de Mann-Whitney* est utilisé afin d'identifier si des différences significatives sont constatées entre les groupes deux à deux ou si ces derniers peuvent être considérés comme équivalents. Lorsque les variables impliquent des données catégorielles (par exemple la répartition filles/garçons ou le pourcentage de joueurs réguliers), le *test du Khi-carré de Pearson*²¹ est utilisé sur les paires de groupes pour vérifier le caractère dépendant de la variable testée et de la variable groupe, à condition que son domaine d'application soit respecté. Dans le cas contraire son alternative, le *test exact de Fisher*, est privilégié.

Les résultats détaillés de ces tests inférentiels sont placés en annexe (Annexe 8). Ceux-ci permettent d'indiquer que de nombreux résultats non significatifs sont observés entre les groupes comparés au niveau des différentes variables investiguées, que ce soit par rapport à l'âge, au niveau socio-économique moyen, au niveau des processus perceptifs de base, à la capacité de distinction des teintes de couleurs, à la présence des différents troubles diagnostiqués ou suspectés, à la présence d'habitudes régulières (ex. usage de la tablette, pratique régulière de jeux vidéo) ou encore d'une expérience en géométrie 3D (ex. résolution antérieure de tâches similaires de perception d'objets 3D).

Plus spécifiquement, au niveau de la comparaison entre le groupe 1 et le groupe 2, les résultats des tests appliqués sont tous non significatifs, ce qui permet de statuer sur une équivalence des groupes par rapport aux variables investiguées.

Au niveau de la comparaison entre le groupe 2 et le groupe 3, deux résultats significatifs apparaissent sur l'ensemble des tests menés. D'une part, il semble exister une dépendance entre la variable groupe et la variable genre ($\chi^2 = 4,592$; $p\text{-value} = 0,032$), avec une part plus importante de filles dans le groupe 3. D'autre part, une relation significative est également observée entre le groupe d'appartenance et le fait d'avoir déjà abordé la géométrie 3D lors de l'année scolaire en cours ($\chi^2 = 30,392$; p -

²⁰ Tests à deux issues avec un seuil de significative de 0,05.

²¹ Dans le reste du manuscrit, la formulation « *Test du Chi-carré* » sera privilégiée.

$value < 0,001$). On observe que les enfants ayant abordé la géométrie représentent une part plus importante dans le groupe 3 en comparaison au groupe 2.

Comme pour le groupe 1 et le groupe 2, une absence de résultat significatif est observée par rapport à toutes les variables investiguées entre les groupes 1 et 4. Enfin, concernant le groupe 2 et le groupe 4, la seule variable pour laquelle un résultat significatif a été obtenu concerne le pourcentage de participants porteurs d'une dysorthographe ($\chi^2 = 5,439$; $p-value = 0,020$), plus élevée dans le groupe 4 que dans le groupe 2.

7.5. Analyses

7.5.1. Analyse des réponses sélectionnées à la tâche de perception

7.5.1.1. Différents cas de figure par exercice

En analysant, pour chaque exercice, les propositions sélectionnées par les participants, trois cas de figure principaux sont identifiés : une perception adéquate de l'objet 3D, une perception inadéquate de l'objet 3D et une non-perception de l'objet.

Le cas de « perception adéquate de l'objet 3D » est associé aux situations dans lesquelles le participant sélectionne uniquement la proposition 3D attendue parmi les propositions 3D ainsi qu'éventuellement une ou des propositions 2D. Le choix d'intégrer dans ce cas de figure les enfants et les adolescents ayant sélectionné éventuellement des propositions 2D et pas seulement sur ceux ayant choisi uniquement le choix 3D relève de la confusion pouvant exister entre l'objet et sa représentation (Fagot *et al.*, 2000). Si la consigne demandée aux participants était de sélectionner l'élément qui était présenté sur la tablette et non une représentation de cet élément, il est possible que certains choisissent une proposition 2D en tant que représentation de l'objet 3D observé et non en tant qu'élément 2D (exemple de verbatim : « je choisis cette proposition car c'est une photo de l'objet que j'ai vu sur la tablette »). Néanmoins, même en présence de cette confusion, puisqu'un choix multiple est autorisé, les participants percevant adéquatement l'objet 3D devraient sélectionner l'objet 3D attendu en plus des éventuelles propositions 2D. Les participants qui auraient choisi, en plus de la proposition 3D attendue, une ou plusieurs propositions 3D non attendues ne sont *a contrario* ici pas considérés comme ayant perçu adéquatement l'objet 3D dans la mesure où cela signifie qu'ils acceptent une proposition qui n'est pas l'objet qu'on souhaitait leur faire percevoir.

Le cas de « perception inadéquate de l'objet 3D » est associé aux situations dans lesquelles le participant sélectionne au moins une proposition 3D non attendue, dans la mesure où il a perçu que l'élément présenté est un objet 3D mais pas forcément l'objet 3D représenté, qu'on souhaitait lui faire percevoir. Néanmoins, au sein de ce profil, deux cas de figure doivent être distingués : ceux ayant sélectionné, en plus d'un ou plusieurs objets 3D non attendus (« perception inadéquate de l'objet 3D avec le choix 3D attendu ») et ceux ayant sélectionné parmi les propositions 3D, qu'une ou des proposition(s) 3D inattendue(s) (« perception inadéquate de l'objet 3D sans le choix 3D attendu »). Notons par ailleurs que l'observation des différents choix 3D non attendus permet d'aller plus loin dans la compréhension de la perception inadéquate des objets 3D. Comme pour le profil de « perception adéquate » et pour les mêmes raisons, la sélection d'éventuelles propositions 2D en complément du ou des choix 3D non attendus n'est pas prise en considération.

Enfin, lorsqu'aucune proposition 3D n'a été sélectionnée par le participant, qui a plutôt opté pour la sélection d'une ou plusieurs propositions 2D, il est associé au cas de « non-perception de l'objet 3D », ce qui correspond à ce que Pittalis et Christou (2013) appellent un comportement « bidimensionnel » puisqu'il en reste à la 2D. Compte tenu de la remarque préalablement décrite au sujet de la confusion entre objet et représentation, il s'agit de rester prudent dans l'interprétation de ce cas de figure. L'analyse des verbatims, décrite au point 7.5.2, devrait permettre de nuancer cette interprétation. Néanmoins, comme précisé préalablement, ce cas de figure reste à distinguer de la perception adéquate des objets 3D puisque, même s'il a sélectionné la proposition 2D en tant que représentation de l'objet 3D, le participant avait tout de même l'opportunité de choisir l'objet 3D attendu, voire même un autre objet 3D en plus des propositions 2D, choix qu'il n'a pas fait s'il se retrouve dans ce cas de figure.

S'ajoute à cela le cas de figure rare du participant ne sélectionnant aucune des propositions. Ce cas de figure, étant minoritaire (15 participants au total ont sélectionné au moins une fois aucune proposition 2D), ne fera pas l'objet d'analyse contrairement aux autres taux.

7.5.1.2. Absence de compilation de scores totaux (tous exercices confondus)

En conservant la même logique pour chaque objet 3D, un score total (sur 7) de « perception adéquate des objets 3D », un score total de « perception inadéquate des objets 3D » et un score total de « non-perception des objets 3D » pourraient être

associés à chaque participant et correspondraient alors au nombre de fois, sur les sept exercices, que l'enfant ou l'adolescent se situe dans chacun des cas de figure. Ces scores auraient ainsi pu constituer des indices globaux de sa capacité de perception visuelle des objets 3D simples, même s'il est important de garder à l'esprit qu'il est ici question d'évaluer la perception de sept objets 3D spécifiques, dans un environnement virtuel spécifique lui aussi. Pour autant, les analyses de consistance interne (*alpha de Cronbach*) réalisées sur base des résultats obtenus soulignent majoritairement une consistance interne discutable, voire mauvaise, au niveau de chacun des scores totaux observés dans chaque groupe, que ce soit sur l'échantillon complet ou pour chacune des tranches d'âge. En effet, comme l'illustre le Tableau 18²², la plupart des indices calculés ont une consistance interne inférieure à 0,7. C'est particulièrement le cas pour le score de perception adéquate et le score de perception inadéquate et c'est plus rarement le cas pour le score de non-perception.

De tels résultats invitent à ne pas prendre appui sur ces scores globaux relatifs qui ne semblent pas constituer des indicateurs consistants de la capacité de perception des objets 3D. Il s'agit alors plutôt d'analyser séparément les résultats relatifs à chaque exercice. Un tel constat suggère par ailleurs l'existence d'irrégularités entre les objets 3D et ces écarts de performance entre les exercices, donc entre les objets 3D, seront investigués dans les analyses menées. Ainsi, les analyses sont uniquement réalisées pour chaque exercice en prenant appui sur le pourcentage de participants percevant adéquatement, inadéquatement ou ne percevant pas l'objet 3D. Des statistiques descriptives puis inférentielles, réalisées à l'aide du logiciel SPSS, vont être menées sur ces fréquences en prenant en considération les variables principales puis secondaires. Ces analyses permettront ainsi d'apporter des éléments de réponses aux différentes questions de recherche présentées préalablement. Pour plus de facilité, les choix des tests inférentiels utilisés ainsi que l'organisation de la structure que prendra la présentation des analyses menées seront présentés en partie III (volume 2), dédiée à la présentation des résultats. Notons déjà néanmoins que l'ensemble des tests inférentiels réalisés seront des tests à deux issues avec un seuil de significativité de 0,05.

²² Les alphas de Cronbach supérieurs à 0,7, permettant de considérer la consistance interne comme acceptable, sont placés en vert dans le tableau. Les autres, permettant de considérer la consistance interne comme discutable, mauvaise voire inacceptable, sont placés en orange.

Tableau 18 : Calcul de la consistance interne pour les scores totaux de perception adéquate, de perception inadéquate et de non-perception : alpha de Cronbach (α)

		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Score de perception adéquate	Toutes tranches d'âge confondues	$\alpha = 0,644$	$\alpha = 0,718$	$\alpha = 0,609$	$\alpha = 0,548$
	6-7 ans	$\alpha = 0,320$	$\alpha = 0,755$	$\alpha = 0,567$	$\alpha = 0,481$
	8-9 ans	$\alpha = 0,580$	$\alpha = 0,637$	$\alpha = 0,654$	$\alpha = 0,641$
	10-11 ans	$\alpha = 0,719$	$\alpha = 0,525$	$\alpha = 0,607$	$\alpha = 0,271$
	12-13 ans	$\alpha = 0,672$	$\alpha = 0,721$	$\alpha = 0,473$	$\alpha = 0,628$
	14-15 ans	$\alpha = 0,444$	$\alpha = 0,686$	$\alpha = 0,425$	$\alpha = 0,533$
Score de perception inadéquate	Toutes tranches d'âge confondues	$\alpha = 0,573$	$\alpha = 0,662$	$\alpha = 0,578$	$\alpha = 0,677$
	6-7 ans	$\alpha = 0,584$	$\alpha = 0,775$	$\alpha = 0,680$	$\alpha = 0,615$
	8-9 ans	$\alpha = 0,337$	$\alpha = 0,648$	$\alpha = 0,543$	$\alpha = 0,780$
	10-11 ans	$\alpha = 0,572$	$\alpha = 0,495$	$\alpha = 0,310$	$\alpha = 0,719$
	12-13 ans	$\alpha = 0,586$	$\alpha = 0,391$	$\alpha = 0,501$	$\alpha = 0,591$
	14-15 ans	$\alpha = 0,556$	$\alpha = 0,570$	$\alpha = 0,535$	$\alpha = 0,625$
Score de non-perception	Toutes tranches d'âge confondues	$\alpha = 0,701$	$\alpha = 0,738$	$\alpha = 0,495$	$\alpha = 0,704$
	6-7 ans	$\alpha = 0,647$	$\alpha = 0,816$	$\alpha = 0,663$	$\alpha = 0,765$
	8-9 ans	$\alpha = 0,779$	$\alpha = 0,755$	$\alpha = 0,105$	$\alpha = 0,777$
	10-11 ans	$\alpha = 0,711$	$\alpha = 0,701$	$\alpha = 0,591$	$\alpha = 0,602$
	12-13 ans	$\alpha = 0,662$	$\alpha = 0,608$	$\alpha = 0,197$	$\alpha = 0,615$
	14-15 ans	$\alpha = 0,435$	$\alpha = 0,730$	$\alpha = 0,126$	$\alpha = 0,622$

7.5.2. Analyse des verbatims

Les arguments utilisés par les enfants et les adolescents pour justifier chacun des choix effectués sont pris en considération en vue de compléter les analyses menées sur les propositions sélectionnées. Plus particulièrement, les verbatims relatifs aux propositions 2D sont analysés pour apporter des précisions étant donné la limite préalablement susmentionnée quant à ces cas de figure. En effet, si la simple observation du choix réalisé ne permet pas d'identifier si le participant a choisi la proposition 2D en tant qu'objet plat ou en tant que représentation de l'objet 3D préalablement observé, les justifications fournies par les participants sont susceptibles de fournir des indices à ce sujet, ce qui permet de nuancer les résultats et notamment les cas de figure de type « non-perception de l'objet 3D ». Dans ce contexte, les verbatims associés aux propositions 2D ont été pris en considération pour les analyses menées. Ces derniers ont été codés au regard de la grille illustrée en Tableau 19.

Ce codage s'organise en trois catégories, la première étant elle-même décomposée en trois sous-catégories. La première catégorie (A) est utilisée pour coder les verbatims qui permettent de considérer que le participant a choisi la proposition 2D en tant que représentation d'un objet 3D, soit en y faisant écho explicitement, soit implicitement,

soit au travers d'arguments faisant comprendre qu'il y a passage à la 3D. La deuxième catégorie (B) est utilisée pour coder, à l'inverse, les verbatims se rapportant au fait que l'enfant ou l'adolescent en reste à la 2D. Enfin, la dernière catégorie (C) concerne les verbatims ne permettant pas de statuer sur le passage ou non à la 3D.

Tableau 19 : Grille de codage des verbatims

Codage		Exemples
A. Le participant justifie son choix 2D en tant que représentation d'un objet 3D.	A.1. Le participant fait écho explicitement au fait qu'il choisit une représentation d'un solide (en évoquant par exemple la notion de représentation, de vue, d'image du solide).	« c'est la photo du solide qui était sur la tablette », « c'est ce que j'ai vu quand le cube tournait »...
	A.2. participant fait écho implicitement au fait qu'il choisit une représentation d'un solide et parle directement de la sélection d'un solide.	« c'est le même solide », « C'est un cube »...
	A.3. Le participant ne fait écho ni explicitement ni implicitement au fait qu'il s'agit d'une représentation d'un solide mais l'argumentaire montre une conscience de la 3D par exemple en utilisant des caractéristiques de l'objet 3D.	« sur les côtés c'est bien une face carrée »...
B. Le participant justifie son choix 2D en tant que qu'objet 2D.		« c'est une forme plate », « en 2D »...
C. La justification du participant ne permet pas d'identifier si le choix 2D est effectué en tant que représentation d'un objet 3D ou en tant que qu'objet 2D.		« c'est le même »...

Un codage en double aveugle a été mené sur les 5584 arguments proposés par les participants à propos des choix 2D sélectionnés (tous exercices confondus). Le pourcentage total d'accords obtenus entre les deux codeurs est de 82,4%. Afin de vérifier la fiabilité inter-codeurs, le *Kappa de Cohen* a été calculé pour chaque exercice et au total. Les résultats (Tableau 20) indiquent que ce degré d'accord peut être considéré comme fort. Notons cependant que les degrés d'accord sont, pour trois exercices, légèrement inférieurs à 80,0% et les accords sont, pour ces trois exercices, considérés comme modérés. Pour les quatre autres exercices, les accords sont supérieurs à 80,0% et considérés comme forts d'après l'interprétation des *Kappa de Cohen*.

Pour les cas de désaccord, c'est le chercheur en charge de l'étude qui a tranché en privilégiant, en cas de doute, le codage C puisque ce dernier se rapporte à l'impossibilité d'identifier s'il y a ou non passage à la 3D.

Tableau 20 : Indice de la fiabilité inter-codeurs pour le codage des verbatims relatifs aux choix 2D (1^{ère} étude)

	Nombre de verbatims	Degré d'accord (% de codages identiques)	Kappa de Cohen	Interprétation du Kappa de Cohen (d'après Landis & Koch, 1977)
Exercice 1	767	86,3%	0,667	Accord fort
Exercice 2	605	83,6%	0,601	Accord fort
Exercice 3	399	88,5%	0,674	Accord fort
Exercice 4	774	79,8%	0,572	Accord modéré
Exercice 5	815	77,4%	0,504	Accord modéré
Exercice 6	1236	85,0%	0,698	Accord fort
Exercice 7	988	78,7%	0,546	Accord modéré
Total	5584	82,4%	0,611	Accord fort

À partir du codage définitif, il est alors vérifié pour chaque exercice si le codage invite à considérer un passage à la 3D certain (si tous les arguments se rapportant aux choix 2D font écho à la première catégorie de codage), un passage à la 3D probable (si au moins un argument se rapportant aux choix 2D fait écho à la première catégorie de codage), un non-passage à la 3D certain (si tous les arguments se rapportant aux choix 2D font écho à la deuxième catégorie de codage), un non-passage à la 3D probable (si au moins un argument se rapportant aux choix 2D fait écho à la deuxième catégorie de codage et aucun à la première), ou si finalement on ne sait pas trancher (si tous les arguments se rapportant aux choix 2D font écho à la troisième catégorie de codage). Les résultats de ce codage sont ainsi utilisés pour nuancer le pourcentage d'enfants et d'adolescents considérés, grâce à l'analyse des choix, comme ne percevant pas la 3D.

7.6. Manquements et prolongements

La Figure 40 propose un résumé de la première étude expérimentale. Sans prendre en compte l'analyse des résultats, différents manquements dans l'étude ici menée peuvent être mis en avant *a priori*.

Le principal d'entre eux concerne les modalités de présentation d'objets 3D ici évaluées. En effet, cette première étude ne permet pas de répondre à l'ensemble des questions de recherche relative à l'habileté de perception auquel ce travail ambitionne de répondre. Si cette étude a investigué la comparaison entre des représentations virtuelles et des représentations planes, ces modes de représentation n'ont pas été comparés à la perception visuelle au départ de matériel physique (3D), même si la perception du matériel physique est utilisée pour résoudre la tâche de reconnaissance.

Pourtant, une telle comparaison apparaît indispensable si on veut vérifier si la perception des objets 3D représentés dans un environnement virtuel est équivalente à la perception des objets 3D dans l'espace sensible (question 1.5°). De même, l'étude ne permet pas d'investiguer l'impact du caractère dynamique des représentations virtuelles (question 1.6°). Pour pouvoir apporter des éléments de réponses à ces questions, il apparaît important d'intégrer de nouvelles modalités de représentation des objets 3D.

Par ailleurs, dès le cadrage théorique, une série de variables susceptibles d'impacter les performances aux tâches de perception des objets 3D, notamment au départ de représentations virtuelles ont pu être identifiées. Si la première étude permet de prendre en considération certaines de ces variables (habitudes...), d'autres n'ont pas pu ici être prises en considération, par exemple les capacités de rotation mentale.

Si dans cette première étude, les participants étaient autorisés à sélectionner plusieurs propositions, résoudre la même tâche au départ en imposant un unique choix pourrait aussi permettre de récolter des informations complémentaires à la première étude, toujours dans le but d'affiner la compréhension de la maîtrise de l'habileté de perception visuelle des objets 3D chez les enfants et les adolescents.

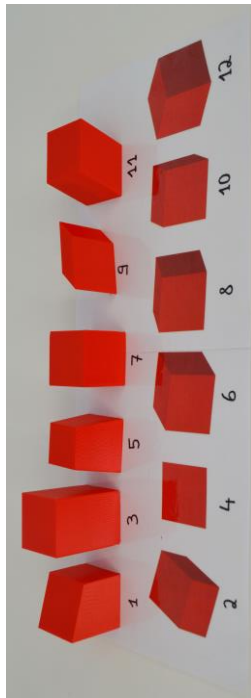
Enfin, si cette première étude a permis de se focaliser sur l'habileté de perception visuelle des objets 3D, l'habileté de visualisation spatiale n'a quant à elle pas été investiguée, ne permettant ainsi d'apporter aucun élément de réponse aux questions de recherche qui s'y rapportent.

Objectif général : Évaluer le niveau de maîtrise de l'habileté de **perception visuelle** d'objets 3D au départ de représentations virtuelles auprès d'enfants et d'adolescents

Tâche de reconnaissance (avec choix multiple) + justification (7 exercices)

3 cas de figure :

- perception adéquate de l'objet 3D (choix 3D attendu + ~~autre choix 3D~~ + éventuel choix 2D)
- perception inadéquate de l'objet 3D (choix 3D non attendu avec ou sans le choix 3D attendu)
- non-perception de l'objet 3D (choix 2D uniquement) **!** A nuancer (analyse des justifications)



VARIABLES PRINCIPALES :

1) La modalité de représentation des objets 3D

Dimensionnalité	Représentations 2 ½ D		Représentations 2D
Manipulation/observation	À manipuler	À observer uniquement	Par définition, à observer uniquement
Orientation du support	Support horizontal	Groupe 1 N = 158 1.1°	Groupe 2 N = 157 1.3° Groupe 3 N = 166 1.4° Groupe 4 N = 159
	Support vertical		

2) L'âge des participants : 6 à 15 ans répartis en cinq tranches d'âge (6-7 ans...)

3) Les objets 3D : 1 exercice = 1 solide



VARIABLES SECONDAIRES :

Récolte d'informations auprès des parents, de l'enseignant et du participant :

- Genre
- Niveau des processus perceptifs de base (score aux trois subtests de la BORB)
- Capacité de distinction des teintes de couleurs présentes dans les représentations
- Suspicion d'un trouble développemental de la coordination suspecté (résultats au DCDO-FE)
- Habitudes et pratiques régulières (utilisation d'un appareil tactile, jeux vidéo, jeux de construction, jeux de puzzle, pratique d'un sport, pratique d'un instrument de musique)
- Niveau scolaire et expérience antérieure en géométrie 3D (apprentissage de la géométrie 3D cette année, expérience avec la modalité de représentation des solides, expérience avec la tâche de perception visuelle)

Figure 40 : Résumé de la 1^{ère} étude expérimentale

Chapitre 8. Seconde étude :
étude de la perception visuelle
de la 3D et de la visualisation
spatiale au départ de
représentations 2 ½ D, de
représentations 2D et de
matériel physique

Chapitre 8. Seconde étude : étude de la perception visuelle de la 3D et de la visualisation spatiale au départ de représentations 2 ½ D, de représentations 2D et de matériel physique²³

Ce huitième chapitre présente la seconde étude expérimentale menée en décrivant d'abord ses objectifs généraux et rappelant à quelles questions de recherche elle permet de répondre. Les variables principales et secondaires investiguées dans l'étude sont ensuite présentées. Enfin, la méthodologie (déroulement, matériel et échantillon) et les analyses qui en découlent sont présentées. Cette seconde étude expérimentale s'inscrit dans la poursuite de la première étude et permet de répondre aux manquements et prolongements relatifs à cette dernière, qui ont été décrits en clôture du chapitre précédent. Celle-ci continue donc d'investiguer l'habileté de perception visuelle de la 3D exercée sur des représentations virtuelles auprès d'enfants et d'adolescents âgés de 6 à 15 ans. Elle va néanmoins plus loin que la précédente en évaluant également ensuite l'habileté de visualisation spatiale chez les mêmes individus. Autrement dit, cette seconde étude évalue la capacité des enfants et des adolescents à percevoir visuellement des objets 3D représentés notamment au travers de représentations virtuelles, mais aussi à agir mentalement sur eux.

8.1. Objectifs généraux et questions de recherche

Les objectifs généraux de cette seconde étude sont au nombre de deux. Il s'agit d'une part d'évaluer le niveau de maîtrise de l'habileté de perception visuelle d'objets 3D au départ de représentations virtuelles (2 ½ D) à manipuler auprès d'enfants et d'adolescents âgés de 6 à 15 ans et de le faire en comparaison à d'autres modalités de présentation (représentations virtuelles à observer, représentations planes, matériel physique, successions de représentations planes). Ainsi, l'étude mise en œuvre vise à identifier si les enfants et les adolescents arrivent à percevoir visuellement des objets 3D présentés virtuellement par des représentations virtuelles à manipuler (question de recherche 1.1°), si la manipulation de telles représentations favorise la perception visuelle des objets 3D représentés (question de recherche 1.2°) et si la perception de

²³ Plusieurs parties de ce chapitre ont fait l'objet de publications : Beauset et Duroisin (2023a) ; Beauset *et al.* (2025) ; Beauset *et al.* (2024a).

représentations virtuelles des objets 3D est équivalente ou non à la perception de leur représentation plane (question de recherche 1.4°), de matériel physique (question de recherche 1.5°) et de successions de représentations planes (question de recherche 1.6°).

D'autre part, il s'agit d'évaluer le niveau de maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale sur les objets 3D auprès d'enfants et d'adolescents âgés de 8 à 15 ans au départ de modalités de présentation de ces objets similaires (représentations virtuelles à manipuler et à observer, représentations planes uniques, successions de représentations planes et matériels physiques à manipuler et à observer). Ainsi, des réponses peuvent être apportées à l'ensemble des questions de recherche relatives à l'habileté de visualisation spatiale qui, pour rappel, portent respectivement sur le niveau de maîtrise de cette habileté chez les enfants et les adolescents au départ de représentations virtuelles à manipuler (question de recherche 2.1°), sur l'impact de la manipulation de telles représentations sur le niveau de maîtrise de l'habileté (question de recherche 2.2°), sur la comparaison entre la maîtrise de l'habileté au départ de telles représentations et de représentations planes (question de recherche 2.3°), de matériel physique (question de recherche 2.4°) et de successions de représentations planes (question de recherche 2.5°).

8.2. Variables étudiées

8.2.1. Variables dépendantes

Suite au double objectif précédemment évoqué, les variables dépendantes sont elles aussi au nombre de deux. La première variable dépendante est similaire à celle de la première étude. Il s'agit du niveau de maîtrise de la perception visuelle d'objets 3D représentés. Cette variable est obtenue en analysant les réponses données par des enfants et des adolescents à une tâche de reconnaissance dans laquelle les participants sont amenés à retrouver parmi une série de propositions, l'objet 3D qui leur a été présenté préalablement. Si les réponses choisies (un choix par exercice) constituent les données principalement observées, les justifications apportées par les enfants et les adolescents sont également utilisées pour nuancer les analyses. La deuxième variable dépendante est inédite en comparaison à la première étude. Il s'agit du niveau de maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale, obtenu en analysant les réponses à des

tâches de dessin de formes d’empreinte et de coupe d’objets 3D qui constituent des tâches évaluant l’habileté de visualisation spatiale (cf. chapitre 3).

8.2.2. Variables indépendantes

Comme lors de la première étude, des variables principales et secondaires sont investiguées pour identifier leur impact sur la maîtrise des habiletés étudiées et apporter des éléments de réponse aux questions de recherche. Ces variables sont pour la plupart similaires à celles étudiées lors de la première étude même si certaines variables ont été modifiées, d’autres ajoutées et d’autres encore supprimées. Ces variables sont compilées au sein du Tableau 21.

Tableau 21 : Variables indépendantes principales et secondaires investiguées (2^e étude)

	En lien avec la première variable dépendante (perception)		En lien avec la deuxième variable dépendante (visualisation spatiale)		
Variables principales	Modalité de présentation des objets 3D		Modalité de présentation des objets 3D		
	Âge		Âge		
	Objet 3D à percevoir		Objet 3D à manipuler mentalement Opération mentale à réaliser/type d’exercice		
Variables secondaires	Genre		Genre		
	Niveau de rotation mentale		Niveau de rotation mentale		
	Suspicion d’un trouble développemental de la coordination (TDC)		Suspicion d’un trouble développemental de la coordination (TDC)		
	Habitudes et pratiques régulières	Utilisation de l’appareil tactile		Habitudes et pratiques régulières	Utilisation de l’appareil tactile
		Pratique régulière des jeux vidéo			Pratique régulière des jeux vidéo
		Pratique régulière des jeux de construction			Pratique régulière des jeux de construction
		Pratique régulière des jeux de puzzle			Pratique régulière des jeux de puzzle
		Pratique régulière d’un sport			Pratique régulière d’un sport
		Pratique régulière d’un instrument de musique			Pratique régulière d’un instrument de musique
	Niveau scolaire et expérience antérieure en géométrie 3D	Niveau scolaire		Niveau scolaire et expérience antérieure en géométrie 3D	Apprentissage de la géométrie 3D
		Apprentissage de la géométrie 3D			Expérience avec la modalité de présentations des objets 3D
		Expérience avec les représentations virtuelles d’objets 3D			Expérience avec les tâches d’empreinte
		Expérience avec les tâches similaires à la tâche de perception visuelle des objets 3D			Expérience avec les tâches de coupe
			Capacité de perception visuelle des objets 3D à manipuler mentalement		

8.2.2.1. Variables indépendantes principales

Pour l'étude de la première habileté spatiale, à savoir l'habileté de perception visuelle de la 3D, trois variables principales sont étudiées. Ces trois variables sont la modalité de présentation des objets 3D au départ de laquelle il est demandé aux participants de faire preuve de l'habileté spatiale étudiée, l'âge des participants et les objets 3D sur lesquels l'habileté est exercée. Pour l'étude de la deuxième habileté, l'habileté de visualisation spatiale, s'ajoute à ces trois variables une variable supplémentaire : le type d'opération mentale à effectuer, autrement dit, le type d'exercice de visualisation.

a. La modalité de présentation des objets 3D

La principale variable, investiguée à la fois dans l'étude de la perception de la 3D et de la visualisation spatiale, relève de la modalité de présentation des objets 3D à laquelle les participants vont être confrontés. Six modalités sont étudiées :

- Modalité 1 : représentations 2 ½ D que les enfants et les adolescents sont autorisés à manipuler physiquement,
- Modalité 2 : représentations 2 ½ D que les enfants et les adolescents ne sont pas autorisés à manipuler physiquement (observation uniquement),
- Modalité 3 : matériel physique (3D) que les enfants et les adolescents sont autorisés à manipuler physiquement,
- Modalité 4 : matériel physique (3D) que les enfants et les adolescents ne sont pas autorisés à manipuler physiquement (observation uniquement),
- Modalité 5 : représentations 2D uniques,
- Modalité 6 : Successions de représentations 2D.

C'est cette variable qui permet, comme lors de la première étude, de se placer dans une perspective comparative. La Figure 41 présente un résumé de ces différentes modalités ainsi que de leur lien avec les questions de recherche investiguées.

En analysant les résultats de la première modalité, qui permettent d'évaluer la maîtrise des habiletés au départ de représentations virtuelles manipulables d'objets 3D, une réponse peut être apportée aux questions de recherche 1.1° et 2.1°. La comparaison des résultats obtenus dans cette modalité et dans la deuxième permet d'investiguer l'impact de la manipulation sur les habiletés spatiales et permet donc d'apporter des éléments de réponse aux questions de recherche 1.2° et 2.2°. Ces deux premières modalités peuvent par ailleurs être comparées à la modalité relative aux

représentations planes d'objet 3D (modalité 5) en vue d'apporter des éléments de réponse quant aux questions investiguant les différences entre la maîtrise des habiletés au départ de représentations virtuelles et planes (questions de recherche 1.4° et 2.3°). Pour étudier la différence entre la maîtrise des habiletés dans l'espace sensible et en environnement virtuel (questions de recherche 1.5° et 2.4°), les modalités 3 et 4 ont été mises en œuvre. La comparaison des modalités 1 et 3 ainsi que des modalités 2 et 4 permet ainsi d'investiguer ces différences respectivement quand la manipulation est autorisée et quand elle ne l'est pas. La comparaison des modalités 3 et 4 permet par ailleurs de vérifier l'éventuel impact de la manipulation dans l'espace sensible. Elle peut donc, en prenant appui sur les résultats relatifs à l'impact de la manipulation dans l'environnement virtuel, fournir des indications sur les différences d'impact de la manipulation dans les deux modalités. De plus, vérifier si un impact de la manipulation est constaté dans l'espace sensible est d'autant plus pertinent que les études antérieures menées sur les capacités de résolution d'exercices de coupe de solide au départ de matériel physique auprès d'enfants et d'adolescents n'ont pas étudié cet aspect. Bakó (2004) a par exemple proposé aux adolescents interrogés de travailler avec du matériel physique à manipuler tandis que Duroisin (2015) ou Ratliff *et al.* (2010) ont évalué les individus au départ de matériel physique à observer uniquement. Enfin, dans l'optique d'investiguer la plus-value du caractère dynamique des représentations virtuelles sur la maîtrise des deux habiletés (questions de recherche 1.6° et 2.5°), une sixième modalité est proposée. Celle-ci implique l'observation d'une succession de représentations 2D (vue de l'avant de l'objet 3D, vue du dessus de l'objet 3D, vue du côté de l'objet 3D). La comparaison de cette modalité et de la deuxième modalité, qui propose des représentations virtuelles à observer, donc dynamiques, permet ainsi d'apporter des éléments de réponse à ces deux questions.

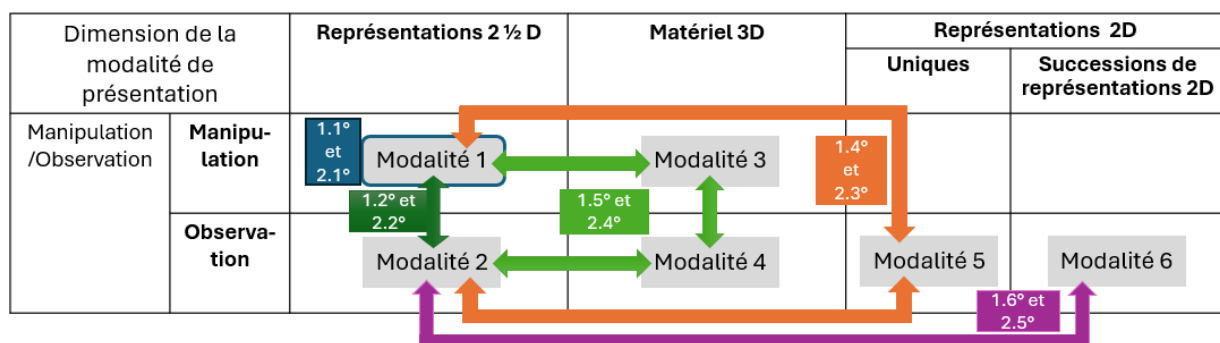


Figure 41 : Description des modalités de présentation des objets 3D investiguées et lien avec les questions de recherche (2^e étude)

b. L'âge des enfants et des adolescents

Dans une perspective développementale, compte tenu du peu d'informations disponibles dans la littérature concernant à la fois la maîtrise de l'habileté de perception de la 3D (*cf.* chapitre 2) et de l'habileté de visualisation spatiale (*cf.* chapitre 3) en environnement virtuel chez les enfants et les adolescents, la variable âge constitue la deuxième variable principale analysée. Notons cependant que l'habileté de perception visuelle de la 3D est évaluée auprès d'enfants et d'adolescents dont l'âge varie entre 6 et 15 ans, alors que l'évaluation de l'habileté de visualisation est restreinte à ceux âgés de 8 à 15 ans. Cela s'explique par les résultats de recherches antérieures ayant pu mettre en évidence le caractère inadapté des exercices ici utilisés (exercices impliquant le dessin de formes de coupe d'objets 3D) pour les enfants dont l'âge est inférieur à 8 ans (Duroisin, 2015).

Que ce soit pour l'étude de l'habileté de perception ou de visualisation spatiale, la prise en compte de la variable âge permet d'affiner la réponse aux différentes questions de recherche. Il s'agit alors de vérifier si la maîtrise des habiletés, dans les différentes modalités de présentation, est maîtrisée aux différentes tranches d'âge et si elle évolue avec l'âge.

c. L'objet 3D sur lequel les habiletés sont mises en œuvre

Comme la première étude, cette étude se focalise sur des habiletés spatiales exercées sur des objets 3D simples, et ce pour les mêmes raisons, se rapportant principalement au peu de recherches antérieures et donc, *a fortiori*, à la nécessité de d'abord se focaliser sur des tâches à résoudre sur ce type d'éléments avant d'envisager des objets 3D plus complexes. La perception est évaluée sur les sept mêmes objets 3D que la première étude (cylindre, cône, sphère, prisme droit à base triangulaire, anneau rond à bord rond, cube, anneau rond à bord droit).

La visualisation spatiale est quant à elle investiguée sur cinq de ces sept objets 3D, cela afin de conserver une durée raisonnable d'évaluation. L'anneau rond à bord droit et le prisme droit à base triangulaire ne sont pas pris en considération (Figure 42). Ce choix de poursuivre, en partie, avec les mêmes objets 3D permet d'analyser des liens directs entre les capacités de perception et de visualisation. De plus, il est cohérent avec les propos de Ratliff *et al.* (2010) qui recommandent d'utiliser des stimuli familiers pour évaluer la visualisation spatiale d'enfants à l'aide de tâches de coupe. À l'exception de l'anneau rond à bord rond, ce sont d'ailleurs les mêmes objets 3D que ceux étudiés par

Duroisin (2015), qui, pour rappel, s'est focalisée sur l'étude de la même habileté spatiale mais exercée sur du matériel physique à observer. La volonté est ici de compléter cette étude antérieure notamment en diversifiant les supports d'évaluation de l'habileté. L'anneau rond à bord rond a quant à lui été ajouté afin de pouvoir évaluer la visualisation sur un objet 3D moins usuel. De plus, en optant pour un objet 3D ayant des caractéristiques similaires à la sphère, l'intention est de vérifier si les difficultés identifiées par Duroisin (2015) pour ce dernier solide se confirment.

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme droit à base triangulaire équilatérale	Anneau rond à bord rond	Cube	Anneau rond à bord droit
Perception	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Visualisation	✓	✓	✓		✓	✓	

Figure 42 : Liste et illustration des objets 3D investigués (2^e étude)

Comme pour la variable âge, la prise en compte de cette troisième variable principale permet d'affiner la réponse aux questions de recherche. Il s'agit alors d'identifier si les deux habiletés sont maîtrisées pour chacun des objets investigués et si des variations sont observées entre les objets 3D.

d. Le type de manipulation mentale / type d'exercice

Si un seul type d'exercice est utilisé pour évaluer l'habileté de perception visuelle de la 3D, ce n'est pas le cas pour l'habileté de visualisation spatiale. Cette quatrième variable principale, à savoir le type d'exercice, n'intervient donc que dans le cadre de l'étude de la deuxième variable dépendante. En effet, à l'instar de ce que propose l'étude de Duroisin (2015), pour chaque objet 3D, les participants sont invités à résoudre un exercice d'identification de la forme de l'empreinte et trois exercices d'identification de la forme d'une coupe : une coupe transversale, une coupe longitudinale et une coupe oblique²⁴. Il est donc question de vérifier si l'habileté est maîtrisée pour chacun des types d'exercice et si des différences entre les types d'exercice sont observées. Il s'agit aussi de vérifier si l'habileté est maîtrisée pour

²⁴ Les termes « transversale », « longitudinale » et « oblique » décrivant différentes coupes ont été utilisés en référence à Duroisin (2015).

chaque type d'exercice et chaque objet, pour chaque type d'exercice aux différentes tranches d'âge et enfin pour chaque type d'exercice et chaque objet aux différentes tranches d'âge.

8.2.2.2. Variables indépendantes secondaires

En plus des variables indépendantes principales décrites, des variables secondaires sont également prises en considération dans les analyses menées puisque des raisons incitent à penser qu'elles pourraient impacter les performances des individus interrogés que ce soit pour les tâches d'évaluation de la perception de la 3D ou celles évaluant la visualisation spatiale. Pour la perception visuelle des objets 3D, les variables secondaires étudiées sont les suivantes :

- genre,
- niveau de rotation mentale,
- habitudes et pratiques régulières (utilisation régulière d'appareil tactile, pratique régulière des jeux vidéo, des jeux de construction, des jeux de puzzle, d'un sport et d'un instrument de musique),
- niveau scolaire et expérience antérieure en géométrie 3D (apprentissage antérieur de la géométrie 3D et matériel associé, confrontation antérieure à des représentations virtuelles d'objets 3D, résolution de tâches similaires).

Ces différentes variables sont pour la plupart similaires aux variables secondaires considérées dans la première étude (cf. Tableau 12). Toutefois, la volonté est de compléter les résultats de la première étude grâce à l'investigation d'une nouvelle variable qui semble faire l'objet d'un débat au sein de la littérature : le niveau de rotation mentale. En effet, la littérature évoque deux hypothèses concernant l'impact des capacités spatiales sur l'utilisation de représentations virtuelles. Le cadrage théorique a d'ailleurs été l'occasion de mettre en évidence cette absence de consensus (cf. 2.2.1.3) en soulignant que les animations peuvent être davantage comprises par des personnes ayant de fortes capacités spatiales ou inversement qu'elles peuvent être davantage profitables aux autres. L'investigation de cette variable devrait donc permettre d'enrichir le débat relevé dans la littérature. Elle permet d'identifier si les enfants et les adolescents ayant des difficultés en rotation mentale arrivent davantage à percevoir les objets 3D représentés virtuellement et à agir mentalement sur eux ou si ce type de représentation est plus adapté aux enfants et aux adolescents ayant de

meilleures capacités de rotation mentale. Le premier cas se justifie par le fait que l'individu n'aurait pas besoin de faire appel à des capacités de rotation mentale face à ce support puisque ces rotations sont externalisées dans l'environnement virtuel. Le deuxième cas considère plutôt qu'avec des capacités de rotation mentale plus élevée, l'individu a davantage en capacité de comprendre les rotations que subissent les représentations virtuelles d'objets 3D qui leur sont présentés. En contrepartie, les variables secondaires relatives à la perception des teintes de couleurs et aux processus visuel de base, investiguées dans la première étude, ne le sont pas dans cette seconde étude.

Concernant l'habileté de visualisation spatiale, les mêmes variables secondaires sont prises en considération. S'ajoute à cela une variable secondaire supplémentaire : la capacité de perception visuelle des objets 3D. En effet, comme rappelé dans le chapitre 5, il est assez intuitif de considérer que les capacités de perception visuelle de la 3D sont antérieures aux capacités de visualisation spatiale dans la mesure où il s'agit d'abord de percevoir sur ce qui est présenté avant d'être en mesure de réaliser des opérations mentales sur ce qui est perçu. Cette conception est d'ailleurs partagée par Widder *et al.* (2019) qui considèrent en effet que les images mentales créées à l'issue de la perception sont donc les unités opérationnelles qui serviront de base à l'habileté de visualisation. En ce sens, les résultats relatifs à la perception de la 3D sont ici pris en compte dans l'analyse des performances aux tâches de visualisation spatiale.

Ces variables secondaires sont, d'une part, utilisées pour vérifier l'équivalence des groupes comparés au départ. D'autre part, l'impact des variables secondaires sur le niveau de maîtrise des deux habiletés au départ de représentations virtuelles est investigué.

8.3. Déroulement et matériel

Cinq grandes étapes ponctuent l'étude menée (Figure 43). Les quatre premières, c'est-à-dire la réalisation de l'appel à participation, la récolte d'informations auprès des parents et enseignants, la création des groupes, ainsi que la réalisation d'un entretien individuel permettant notamment d'évaluer la perception de la 3D, se rapprochent fortement des étapes décrites dans la première étude expérimentale. La cinquième étape, qui se focalise sur l'évaluation de la visualisation spatiale et la récolte d'informations *a posteriori* au moyen d'une séance collective, a été intégrée.

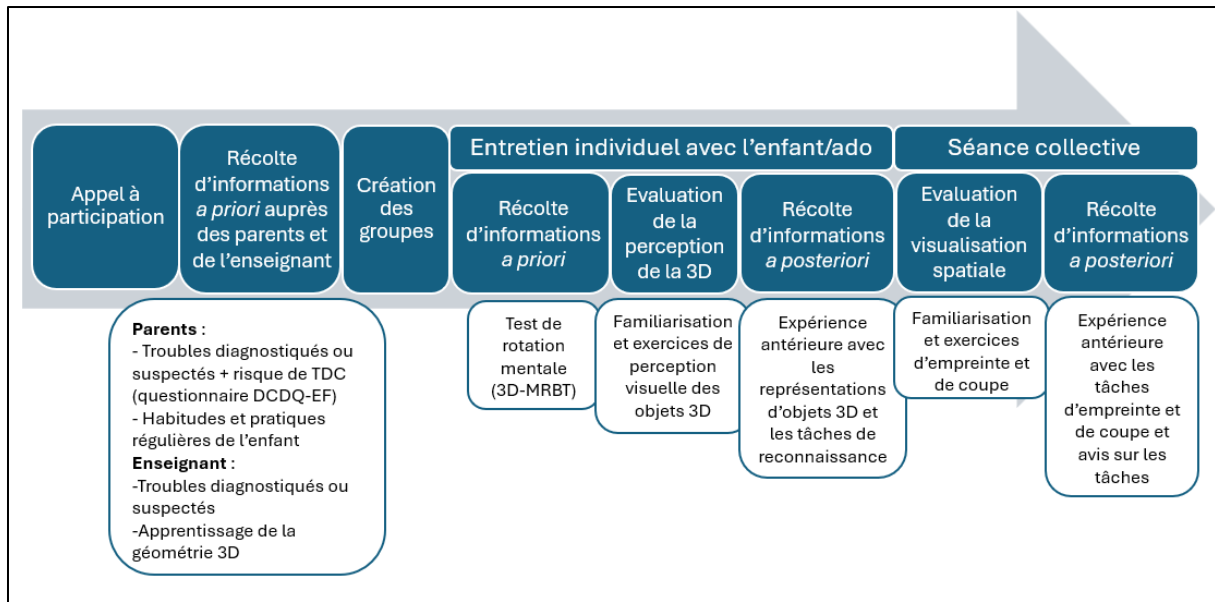


Figure 43 : Grandes étapes de l'étude menée (2^e étude)

8.3.1. Appel à participation auprès de directions, d'enseignants et des parents

La procédure mise en œuvre pour recruter des enfants et des adolescents s'organise comme lors de la première étude, en passant par les établissements scolaires. Autrement dit, des prises de contact avec les écoles d'enseignement primaire et secondaire de la région (en dehors des écoles ayant participé à la première étude), tous réseaux d'enseignement confondus, ont à nouveau été menées via l'envoi de courriels aux établissements scolaires mais également via la diffusion d'appel à participation sur les réseaux sociaux. Après obtention de l'accord de la direction d'établissement (Annexe 9), les enseignants de l'établissement ont été contactés au travers d'une lettre (Annexe 10) présentant les tenants et aboutissements de l'expérimentation pour qu'ils puissent eux aussi marquer leur accord pour la participation de leur(s) classe(s). S'en est alors suivi une distribution des documents aux parents des enfants et des adolescents afin d'obtenir, d'une part, leur accord concernant la participation de leur enfant à l'étude et par conséquent la récolte de données sur ce dernier (Annexe 11) et d'autre part leur accord concernant l'enregistrement et l'analyse d'images (enregistrement vidéo des manipulations effectuées par les enfants et les adolescents sur la tablette). Le premier des deux accords conditionne la participation à l'étude tandis que le second restreint la participation à certains groupes expérimentaux, comme cela sera développé au point 8.3.3.

8.3.2. Récolte d'informations préalables auprès des parents et enseignants

8.3.2.1. Questionnaire destiné aux parents

Comme dans la première étude, les parents ont été invités à compléter un questionnaire (Annexe 11) permettant de récolter diverses données signalétiques (date de naissance...) ainsi que des informations relatives notamment aux variables indépendantes secondaires. Ce questionnaire est similaire à celui utilisé lors de la première étude. Il questionne d'abord les parents sur la présence avérée ou suspectée de troubles de l'apprentissage et de troubles visuels. Pour les mêmes raisons que celles présentées dans la première étude (*cf.* 7.3.2.1b), le questionnaire DCDQ-FE (Ray-Kaesler *et al.*, 2019) est proposé aux parents afin d'identifier s'il y a ou non un risque que leur enfant soit porteur d'un trouble développemental de la coordination. Enfin, des questions portant sur la fréquence de certaines pratiques et habitudes de leur enfant sont intégrées dans le questionnaire distribué aux parents.

8.3.2.2. Questionnaire destiné aux enseignants

En complément aux informations récoltées auprès des parents, des informations ont été collectées auprès des enseignants à l'aide d'un questionnaire (Annexe 12). Celui-ci s'organise en deux parties, dont la première porte sur les troubles diagnostiqués ou suspectés chez les enfants et les adolescents participant à l'expérimentation. À l'instar de ce qui a été demandé aux parents, les enseignants ont dû mentionner si, parmi les enfants et les adolescents participant à l'expérimentation, certains sont porteurs de troubles de l'apprentissage diagnostiqués. De même, il leur est demandé s'ils soupçonnent la présence de troubles chez certains d'entre eux.

L'autre partie porte sur les apprentissages en géométrie 3D qui ont été réalisés cette année. D'abord, il est demandé aux enseignants de préciser si la géométrie 3D a déjà été abordée lors de l'année scolaire en cours. En cas de réponse positive, il a été demandé, à l'aide d'un choix multiple, de préciser quel type de matériel a été utilisé lors de cet apprentissage et quelles compétences ont été travaillées. Plus spécifiquement, il leur a été demandé si dans les activités proposées, des tâches d'empreinte et de coupe étaient proposées.

8.3.3. Création des groupes

Les enfants et les adolescents dont l'accord de participation a été obtenu ont été répartis dans six groupes, chacun des groupes étant associé à une des six modalités de la première variable, c'est-à-dire une modalité dans laquelle les objets 3D vont être présentés dans les tâches proposées pour évaluer l'habileté de perception visuelle de la 3D puis l'habileté de visualisation spatiale. Comme lors de la première étude, la répartition des enfants et des adolescents dans les groupes s'est faite de manière aléatoire, sauf pour le groupe 1 qui ne peut contenir que des enfants et des adolescents dont l'accord de prise d'enregistrement vidéo a été obtenu afin de pouvoir garder des traces des manipulations effectuées sur la tablette.

8.3.4. Entretien individuel

Dans un premier temps, comme pour la première étude, un entretien individuel d'environ 20 à 25 minutes est proposé à chaque participant. Celui-ci s'organise en trois temps. D'abord, un test de rotation mentale est dispensé aux participants. Ensuite, l'évaluation de la perception visuelle de la 3D est menée. Dans un troisième temps, deux questions *a posteriori* sont posées aux participants pour identifier leur expérience antérieure vis-à-vis des tâches de perception des solides et vis-à-vis de la modalité de présentation des objets 3D à laquelle ils ont été confrontés.

8.3.4.1. Récolte d'informations préalables auprès de l'enfant ou de l'adolescent : évaluation de la rotation mentale

La rotation mentale constitue une variable secondaire investiguée dans l'étude. Si de nombreuses épreuves existent pour évaluer l'habileté de rotation mentale, plusieurs critères ont été pris en considération pour réaliser le choix d'épreuve ici utilisé. Les capacités de rotation mentale sur des objets 2D et 3D peuvent différer (Hoyek *et al.*, 2010), la rotation mentale menée sur des objets 3D étant susceptible d'exiger une plus forte demande cognitive. Puisque dans le cadre de cette étude, les habiletés spatiales exercées sur les objets 3D sont étudiées, la volonté a été d'évaluer la rotation mentale exercée en trois dimensions sur des objets 3D. Par ailleurs, si de nombreuses épreuves existent pour évaluer la rotation mentale d'objets 3D, ces épreuves utilisent majoritairement des représentations 2D d'objets 3D. Or, des limites associées à ces épreuves ont pu être mises en évidence au sein du chapitre 3, notamment le fait qu'elles soient biaisées par la capacité à percevoir adéquatement l'objet 3D représenté.

Le choix s'est donc porté sur l'utilisation d'une épreuve proposant aux enfants et aux adolescents d'exercer l'habileté spatiale sur du matériel physique, comme le recommandent Hawes et ses collègues (2015a) ou encore Rahe et Quaiser-Pohl (2023). Comme relevé au chapitre 3, il existe plusieurs épreuves utilisant du matériel physique pour évaluer l'habileté de rotation mentale mais ces dernières sont majoritairement destinées à des adultes. À notre connaissance, aucune épreuve ayant fait l'objet d'une validation permet d'évaluer la rotation mentale en 3D sur du matériel physique auprès d'enfants et d'adolescents âgés de 6 à 15 ans. En revanche, la 3D-MRBT (Hawes *et al.*, 2015a) est une épreuve qui a été testée et validée auprès d'une partie de celui-ci, à savoir les enfants âgés de 6 à 8 ans et qui est susceptible de pouvoir être utilisée avec des enfants ou adolescents plus âgés. C'est cette épreuve, détaillée en annexe (Annexe 13), qui a ici été utilisée. Elle propose une tâche de rotation mentale portant sur des assemblages de cubes (Figure 44). Cette épreuve est composée de seize items prenant la forme d'exercices de reconnaissance chronométrés au cours desquels le participant doit sélectionner, parmi trois propositions, l'élément correspondant à un modèle montré. Au travers des items, des rotations de sens et d'angles différents portant sur plusieurs assemblages de cubes sont proposés. À l'issue de l'épreuve, un score sur 16, ainsi que le temps moyen de réponse sont calculés.

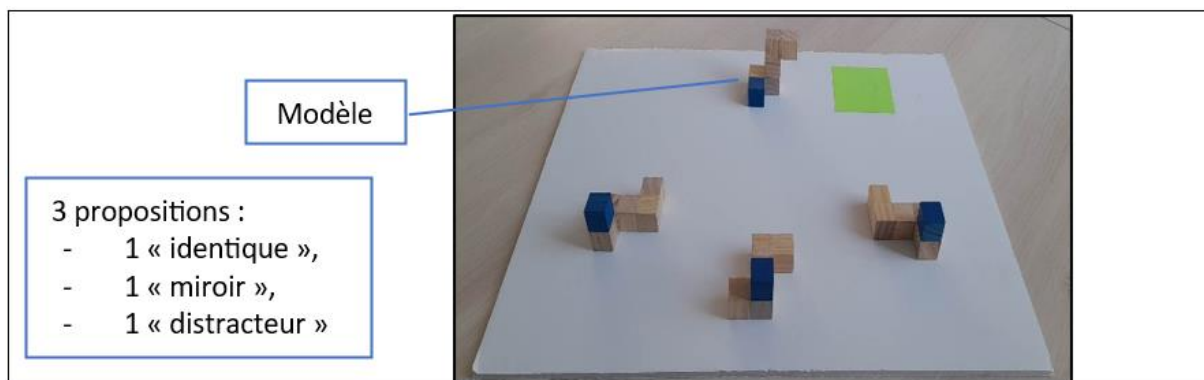


Figure 44 : Illustration d'un item de la 3D-MRBT

8.3.4.2. Évaluation de la perception visuelle de la 3D

La perception visuelle de la 3D est évaluée par une tâche similaire à la première étude mais différents changements ont été apportés. D'une part, un premier changement, inhérent à la modification des niveaux de la première variable décrite préalablement, concerne les modalités de présentation des objets 3D proposées dans

les différents groupes. Ensuite, si la perception de la 3D est à nouveau évaluée à l'aide d'une tâche de reconnaissance des objets 3D conservant les mêmes objets 3D et les mêmes propositions, il s'agit d'une tâche de reconnaissance à choix unique contrairement à l'étude précédente qui laissait la possibilité aux participants de choisir plusieurs propositions. Ce choix a été réalisé afin de pouvoir affiner et compléter les observations relatives à la première étude.

a. Description détaillée de la modalité de présentation des objets 3D selon le groupe d'appartenance

Comme pour la première étude, le groupe attribué à chaque enfant et adolescent définit la façon dont les objets 3D vont lui être présentés lors de l'évaluation de la capacité de perception visuelle des objets 3D.

Les groupes 1 et 2 sont des répliques à l'identique des groupes 1 et 2 de la première étude expérimentale. Les objets 3D y sont donc présentés virtuellement sur une tablette placée à l'horizontale sur le banc, au sein de l'environnement virtuel créé (Chapitre 6). Dans le groupe 1, chaque représentation virtuelle de l'objet 3D apparaît dans une position initiale. Le participant est alors invité à le manipuler au sein de l'environnement virtuel afin de l'observer dans différentes positions. Quand il estime avoir fini, il lui est demandé de cliquer sur le bouton vert de l'application permettant de remettre l'objet manipulé dans sa position initiale. Dans le groupe 2, le participant est confronté à une vidéo d'environ 35 secondes de chaque objet en train d'effectuer des rotations sur lui-même. Comme décrit au sein du chapitre 7 (7.3.4.2a), l'objet apparaît dans la même position initiale que le groupe précédent. Une première rotation permet d'observer l'avant de l'objet. S'en suit une rotation vers l'avant permettant d'observer le dessus de ce dernier. Une rotation vers l'arrière est finalement proposée avant que l'objet ne fasse une rotation de 360° vers la gauche jusqu'à retrouver sa position initiale.

Dans les groupes 3 et 4, le participant est confronté à du matériel physique, plus précisément des objets obtenus par impression 3D. Dans le groupe 3, le matériel est d'abord placé dans une position précise sur le banc devant le participant. Cette position se rapproche de celle proposée au matériel physique, comme le montrent les illustrations du Tableau 22. Le participant est invité à prendre en main ce matériel et à le manipuler avant de le redéposer dans sa position initiale. Dans le groupe 4, le








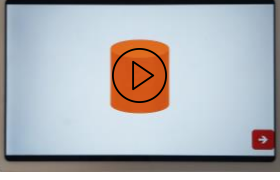

matériel est placé devant le participant dans la même position initiale et ce dernier doit se contenter d'observer ce matériel.

Dans le groupe 5, une représentation plane de chaque objet 3D est proposée sur la tablette posée à l'horizontale sur le banc. Cette représentation est identique à la vue initiale et finale de la représentation virtuelle proposée dans les groupes 1 et 2. Ce groupe est alors comparable au groupe 4 de la première étude.

Enfin, pour le groupe 6, chaque participant est amené à observer une succession de représentations planes d'objets 3D présentée également sur une tablette posée à l'horizontale sur le banc. Chaque représentation est proposée durant cinq secondes avant de passer automatiquement à la représentation suivante. Comme pour les temps de pause proposés dans la vidéo, la focalisation sur ces différentes vues est proposée compte tenu de l'importance qu'elles peuvent avoir sur le stockage visuo-spatial des informations relatives aux objets 3D (James *et al.*, 2001, 2002). La première représentation plane qui est proposée est la même que ce qui est proposé dans les groupes 1, 2 et 5. S'en suivent respectivement une représentation de l'avant de l'objet 3D, du dessus de l'objet 3D, du côté de l'objet 3D, avant de finir avec la représentation initiale. Le participant, grâce aux consignes données, est évidemment informé des différentes représentations qui se succèdent.

Entre les six groupes, les objets 3D proposés sont de la même proportion, de la même taille et de la même couleur. De plus, comme susmentionné, les positions initiales et finales sont similaires. Les tablettes sont en outre placées dans la même position pour les quatre groupes confrontés à ce matériel, c'est-à-dire à l'horizontale sur le banc. En effet, contrairement à la première, cette seconde étude n'investigue pas l'influence de l'orientation du support sur le niveau de maîtrise des habiletés. Ce sont là plusieurs variables qui sont neutralisées.

Tableau 22 : Illustrations du matériel pour évaluer la perception visuelle des objets 3D (2^e étude)

Groupe	Brève explication	Illustration de l'exercice du cylindre et lien vers une vidéo illustrative pour les groupes 1, 2 et 6	
Groupe 1 : manipulation 2 ½ D (G1 : manip. 2 ½ D)	Objets 3D représentés virtuellement à manipuler via interface tactile sur tablette placée à l'horizontale sur le banc		
Groupe 2 : observation 2 ½ D (G2 : obs. 2 ½ D)	Objets 3D représentés virtuellement à observer en vidéo sur tablette placée à l'horizontale sur le banc		
Groupe 3 : manipulation 3D (G3 : manip. 3D)	Objets 3D présentés à l'aide de matériel physique pouvant être manipulé		
Groupe 4 : observation 3D (G4 : obs. 3D)	Objets 3D présentés à l'aide de matériel physique pouvant uniquement être observé		
Groupe 5 : observation 2D (G5 : obs. 2D)	Objets 3D représentés à l'aide d'une représentation plane unique présentée sur tablette placée à l'horizontale sur le banc		
Groupe 6 : observation 2D's (G4 : obs. 2D's)	Objets 3D représentés à l'aide d'une succession de représentations planes (devant, dessus, côté) présentée sur tablette placée à l'horizontale sur le banc		

b. Description de la tâche de perception visuelle

- Temps de familiarisation avec le matériel :

Comme lors de la première étude et pour les mêmes raisons, afin que le participant puisse se familiariser avec le type de matériel utilisé dans leur groupe, deux exemples sont proposés au participant, en l'occurrence une bouteille et une feuille d'arbre. Cela permet à l'expérimentateur d'expliquer au participant que, dans l'activité qui va être réalisée, des éléments vont lui être présentés d'une certaine façon.

Si le participant appartient au groupe 1, comme mis en évidence dans la validation de l'environnement virtuel (chapitre 6), l'expérimentateur explique que des éléments vont être présentés sur la tablette et qu'il pourra les manipuler sur l'écran. Avec l'exemple d'une représentation virtuelle de la bouteille, il va décrire comment cette manipulation est possible en montrant que des rotations de l'élément sur lui-même sont appliquées dans les différentes directions selon les mouvements effectués. Il va également expliquer que les rotations vers l'avant et l'arrière sont limitées. Ensuite, le participant est invité à manipuler lui-même la bouteille pour se familiariser avec l'environnement virtuel. Enfin, il a la possibilité de manipuler la représentation virtuelle d'un deuxième élément : une feuille d'arbre.

Dans le groupe 2, l'expérimentateur commence la familiarisation en expliquant au participant que des éléments vont lui être montrés sur la tablette au travers de vidéos dans lesquelles ils tournent sur eux-mêmes. Il précise que, quel que soit l'élément présenté dans la vidéo, les mouvements effectués par l'élément vont toujours être les mêmes. Un premier exemple de vidéo d'une bouteille est montré et est commenté par l'expérimentateur qui décrit les différents mouvements. Ensuite, le deuxième exemple (feuille d'arbre) est montré.

Pour le groupe 3, l'expérimentateur explique que lors de l'activité, des éléments vont lui être placés devant lui sur le banc et qu'il pourra les prendre en main pour les manipuler pour ensuite les replacer sur le banc. L'expérimentateur place un premier élément, à savoir une bouteille et laisse le participant le manipuler. Ensuite, l'expérimentateur fait de même avec l'autre exemple.

La familiarisation pour les enfants et les adolescents du groupe 4 est assez proche de celle du groupe précédent à l'exception du fait qu'ils ne sont pas autorisés à manipuler les éléments. L'expérimentateur explique donc à chaque participant que lors de l'activité, des éléments vont être placés devant lui mais qu'il ne pourra pas les manipuler et va devoir se contenter de les observer. À titre d'exemples, la bouteille puis la feuille sont montrées.

Pour le groupe 5, l'expérimentateur explique à chaque participant que la tablette va être utilisée lors de l'activité pour présenter la photographie d'éléments qu'il devra observer. L'exemple de photographie de la bouteille, puis celui de la feuille sont alors proposés.

Enfin, pour chaque participant appartenant au groupe 6, l'expérimentateur explique que dans l'activité, une succession de photographies d'un même élément va lui être

présentée sur la tablette, ce qui lui permettra d'observer l'élément dans différentes positions. Il lui explique que quel que soit l'élément présenté, les photographies qui vont lui être proposées suivent toujours le même ordre afin de lui montrer systématiquement une photographie du devant, du dessus et du côté de l'élément. L'exemple de la bouteille, puis celui de la feuille sont montrés et l'expérimentateur commente cette succession d'images en précisant de quelle photographie il s'agit (photographies du devant, du dessus et du côté).

- Exercices et consignes :

La tâche proposée est exactement la même que celle proposée dans la première étude à l'exception du fait qu'il s'agit d'exercices de reconnaissance à choix unique et non plus à choix multiple. Comme pour la première étude, cette tâche s'organise en sept exercices, chaque exercice étant associé à un objet 3D à percevoir, et de deux exercices parasites organisés de la même façon mais portant sur la perception d'objets 2D. L'ordre des exercices proposés est identique à la première étude, à savoir : cylindre, rond (exercice parasite 1), cône, sphère, carré (exercice parasite 2), prisme droit à base triangulaire, anneau rond à bord rond, cube et anneau rond à bord droit.

Après le temps de familiarisation, l'expérimentateur explique à chaque participant que plusieurs exercices vont lui être proposés et que, dans chaque exercice, un élément va lui être présenté comme ce fut le cas pour la bouteille et la feuille. Il explique qu'après avoir observé/manipulé l'élément, différentes propositions lui seront dévoilées et qu'il devra sélectionner parmi ces propositions l'élément qui aura été préalablement observé/manipulé. L'expérimentateur commence ensuite le premier exercice en présentant le premier élément, à savoir le cylindre, dans la modalité de présentation du groupe d'appartenance du participant. Lors de l'ensemble de l'exercice, pour des raisons similaires à celles évoquées dans la première étude, l'expérimentateur veille à utiliser le terme « élément » pour parler de ce qui est présenté sur la tablette et évite d'utiliser le terme « objet » ou encore d'utiliser le nom géométrique de ce dernier. Le participant est alors invité à prendre connaissance de l'élément en le manipulant (pour les groupes 1 et 3) ou uniquement en l'observant (pour les groupes 2, 4, 5 et 6). Pour le cas spécifique du groupe 1, les actions menées sur l'écran de la tablette sont filmées de façon à garder des traces de la manipulation. Après le temps de manipulation ou le temps d'observation, l'élément est replacé dans sa position initiale et l'expérimentateur dévoile différentes propositions au participant, cachées

jusqu'alors. Pour cet exercice, onze propositions sont dévoilées (Figure 45), six étant des objets 3D et cinq des propositions 2D. Il est alors demandé au participant, toujours autorisé à observer l'élément dans sa position initiale, de sélectionner, parmi les propositions, laquelle est l'élément qui a préalablement été observé/manipulé. L'expérimentateur informe le participant qu'il n'est pas autorisé à manipuler les propositions et qu'il ne peut en choisir qu'une seule ou aucune. Les gestes de compensées sont autorisés sans être analysés.

Il lui est ensuite demandé de justifier son choix. Une fois le choix effectué, les propositions sont recouvertes. L'exercice suivant peut alors commencer et s'organise de façon similaire.

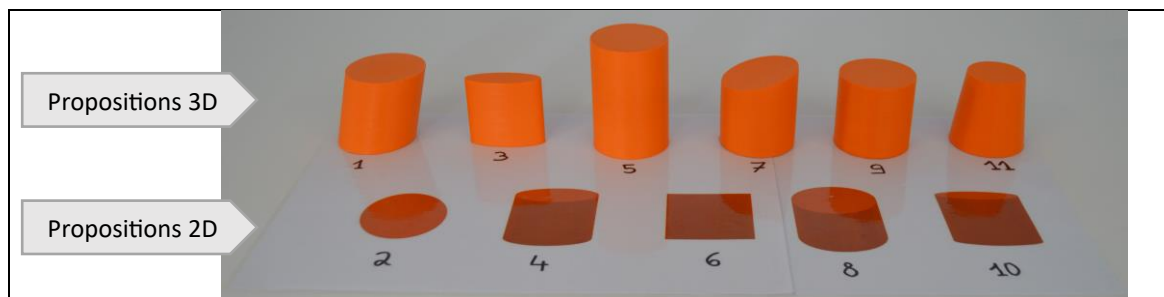


Figure 45 : Propositions fournies pour l'exercice du cylindre à la tâche de perception visuelle des objets 3D

- Description des propositions :

Pour chaque exercice, les propositions parmi lesquelles le choix doit être effectué sont identiques à celles proposées dans la première étude. Celles-ci sont décrites au sein du Tableau 15 et sont illustrées en annexe (Annexe 7). Systématiquement, des propositions d'objets 3D sont proposées : l'objet 3D attendu ainsi que des propositions 3D non attendues pour lesquelles des caractéristiques ont été modifiées (objet 3D dont la hauteur a été modifiée, solide dont l'inclinaison a été modifiée...). De plus des propositions 2D sont proposées. Il s'agit de différentes représentations de l'objet 3D attendu (représentation 2D de l'objet 3D en position initiale, représentation de l'objet 3D après rotation vers l'avant...). Tant que possible, entre les exercices, les mêmes choix sont proposés. Néanmoins, le nombre de propositions entre les exercices varie compte tenu des caractéristiques spécifiques des différents objets 3D.

8.3.4.3. Récolte d'informations *a posteriori*

Comme dans la première étude, à l'issue des neuf exercices et pour conclure l'entretien individuel, deux questions fermées sont proposées au participant afin d'identifier son expérience antérieure par rapport aux types d'exercice ici proposés mais aussi au type de support auquel il a été confronté. L'expérimentateur demande d'abord au participant si, avant aujourd'hui, il avait déjà dû résoudre des exercices similaires de perception visuelle d'éléments. Ensuite, il lui demande s'il avait déjà été confronté au type de matériel utilisé dans les exercices, c'est-à-dire, respectivement selon le groupe d'appartenance, des objets géométriques à manipuler sur écran tactile, des vidéos d'objets géométriques, du matériel physique à manipuler, du matériel physique à observer, des représentations planes et enfin une succession de représentations planes d'un même objet géométrique.

8.3.5. Séance collective

Cette dernière partie de l'étude ne s'adresse qu'aux enfants et aux adolescents âgés de 8 ans et plus. Autrement dit, les enfants âgés de 6 et 7 ans ne participent pas à cette séance collective et l'habileté de visualisation spatiale ne sera pas évaluée sur ces derniers. Cette séance réunit plusieurs enfants ou adolescents appartenant au même groupe pour faciliter l'administration des consignes, puisqu'ils seront à nouveau confrontés à des objets 3D présentés dans la modalité de leur groupe d'appartenance.

Le nombre d'enfants et d'adolescents présents dans cette séance collective est variable puisqu'elle regroupe des participants provenant d'une ou de plusieurs classes, en fonction des possibilités des enseignants. Ce nombre n'excède cependant pas quinze participants. De même, la durée qui sépare les entretiens individuels de la séance collective puisque la séance collective est réalisée une fois que l'ensemble des entretiens individuels de la/des classe(s) concernées ont été réalisés. Elle est en moyenne de 17 jours.

La séance collective s'organise en deux temps. D'abord, un temps d'évaluation de l'habileté de visualisation spatiale et ensuite un temps de récolte d'informations *a posteriori*. La durée totale de cette séance est d'environ 40 minutes.

8.3.5.1. Évaluation de la visualisation spatiale

Si plusieurs tâches existent pour évaluer l'habileté de visualisation (*cf.* chapitre 3), cette étude propose une adaptation de l'expérimentation proposée par Duroisin (2015)

qui l'évalue au travers de tâches d'identification d'empreinte et de coupe d'objets 3D. Ces tâches nécessitent que les participants se créent une image mentale de l'objet 3D et qu'ils opèrent sur cette image mentale en vue d'imaginer la trace que ce dernier laisserait ou en vue d'imaginer l'objet 3D après la découpe et la forme associée à la coupe. Autrement dit, pour les tâches d'empreinte, il s'agit d'être en mesure de générer des images mentales dites « cinétiques » (au sens de Piaget & Inhelder, 1948). En effet, l'action de manipulation nécessaire pour la réalisation de l'empreinte de l'objet 3D présenté doit pouvoir être imaginée. Pour les tâches de coupe, les images mentales devant être créées sont dites « transformatrices » puisque ces tâches impliquent d'abord d'imaginer la découpe de l'objet 3D (ce qui implique une transformation et une déformation de ce dernier), puis « cinétiques » pour imaginer la forme de l'intérieur de l'objet sectionné (ce qui revient à en faire l'empreinte ou à lui appliquer une rotation pour observer la forme de la coupe de face). Dans les deux cas, à l'instar de ce qu'envisageait Piaget, les dessins produits par les participants peuvent être considérés comme des approximations graphiques satisfaisantes de l'image mentale (Denis, 1979). De cette façon, le rapport qu'entretiennent les enfants et les adolescents à l'espace projectif et euclidien est étudié, avec des tâches proches de celles proposées par Piaget et Inhelder (1948).

Si l'auteur a évalué cette habileté au départ de matériel physique, elle est ici évaluée sur différents types de matériel comme le fut l'habileté de perception visuelle de la 3D. La modalité de présentation des objets 3D de chaque groupe est d'abord décrite en insistant sur les quelques différences observées par rapport au matériel utilisé lors d'évaluation de la perception, principalement au niveau des groupes confrontés à du matériel physique. Ensuite, la tâche proposée pour évaluer l'habileté ainsi que les consignes fournies sont décrites.

a. Description détaillée des modalités de présentation selon les groupes

Lors de la tâche de visualisation, les participants sont à nouveau confrontés à des objets 3D présentés dans la modalité de leur groupe d'appartenance. Dans certains exercices, en l'occurrence les exercices d'identification de formes d'empreinte, les objets 3D seront présentés seuls. Dans les autres exercices (exercices d'identification de formes de coupe), les représentations fournies montrent l'objet 3D mais également un couteau s'appêtant à le couper. Le moyen utilisé dans chaque groupe pour présenter les objets 3D, avec ou sans le couteau est synthétisé et illustré en Tableau 23.

Celui-ci est similaire à ce qui a été proposé lors de l'étude de la perception même si de légers changements, inhérents aux tâches, sont proposés dans les groupes confrontés à du matériel physique (groupes 3 et 4).


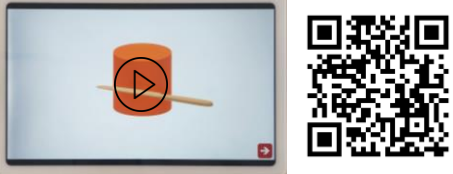




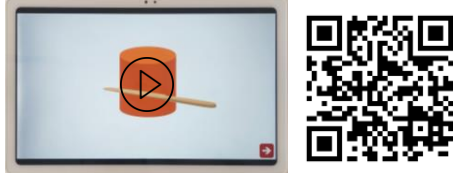
Le matériel proposé dans les groupes 1 et 2, confrontés à des représentations 2 ½ D, est identique à celui proposé lors de la tâche de perception visuelle. Chaque participant dispose d'une tablette placée à l'horizontale sur le banc et il lui est demandé de ne pas modifier la position de cette dernière. Dans le groupe 1, la représentation virtuelle de l'objet 3D, seul ou s'apprêtant à être coupé par un couteau, est proposée au sein de l'environnement virtuel créé (chapitre 6), présenté sur la tablette. Le participant est invité à le manipuler librement. Dans le cas des exercices de coupe, ce sont à la fois l'objet 3D et le couteau placé contre lui qui effectuent ensemble des rotations dont le centre de rotation est le centre de l'objet 3D, en fonction des manipulations effectuées. Ces rotations permettent d'observer sous différents angles la façon dont l'objet 3D s'apprête à être coupé par le couteau. Lorsqu'il estime avoir suffisamment manipulé l'objet 3D, le participant est invité à appuyer sur le bouton vert afin de remettre l'objet 3D et le couteau dans leur position initiale avant de résoudre l'exercice proposé. Dans le groupe 2, le participant est à nouveau confronté à une vidéo de chaque objet 3D seul ou avec le couteau, en train d'effectuer une rotation, à l'instar de ce que proposent Sanandaji *et al.* (2017) dans leur adaptation de l'épreuve de la SBST. Comme pour le groupe 1, dans le cas des exercices de coupe et empreinte, la rotation s'effectue autour du centre de l'objet 3D. Les rotations proposées dans la vidéo sont identiques à celles proposées dans la tâche de perception. L'objet 3D (avec ou sans le couteau selon les exercices) apparaît dans une position initiale, effectue une suite de rotations permettant notamment d'observer l'avant de l'objet, son dessus puis réalisant un tour complet de l'objet 3D sur lui-même avant de reprendre sa position initiale.

Dans les groupes 3 et 4, chaque participant est confronté à du matériel physique respectivement à manipuler et à observer. Deux formats du matériel sont utilisés. D'une part, chaque participant dispose de son objet 3D ainsi que d'un couteau en bois. Ce matériel possède les mêmes proportions, la même taille et la même couleur que les objets présentés sur la tablette dans les groupes précédents. L'expérimentateur, de son côté, placé à l'avant de la classe, dispose du même matériel en grand format (environ 8 fois plus grand) mais conservant les mêmes proportions et la même couleur. Par exemple, pour le cube, l'arête de l'objet 3D en format individuel est d'environ cinq centimètres, comme sur la tablette, alors que celle de l'objet en grand format mesure

40 cm. Dans le groupe 3, le matériel individuel est placé sur le banc du participant. Pour chaque exercice d'empreinte, le participant est simplement invité à prendre et à manipuler le matériel physique en format individuel correspondant à celui montré par l'expérimentateur en grand format. Pour les exercices de coupe, l'expérimentateur montre, à l'aide du matériel en grand format, la façon dont le couteau doit être placé par rapport à l'objet 3D. L'expérimentateur demande alors au participant de prendre son matériel individuel et de lui-même replacer le couteau par rapport à l'objet en format individuel dont il dispose. Il vérifie pour chaque participant la position du couteau. Ensuite, ce dernier est invité à manipuler librement le matériel avant de résoudre les exercices. L'expérimentateur, lui, présente la coupe avec le matériel en grand format toute la durée de l'exercice. Dans le groupe 4, l'expérimentateur précise directement au participant que le matériel placé sur leur banc ne peut pas être manipulé mais qu'il est placé devant lui pour qu'il observe de plus près le matériel qui sera montré en grand format. Ensuite, l'expérimentateur montre, pour les tâches d'empreinte l'objet 3D seul ou pour les coupes, l'objet 3D s'apprêtant à être coupé par un couteau. Des rotations similaires à celles présentées dans la vidéo sont appliquées au matériel par l'expérimentateur et permettent au participant d'observer parfaitement l'avant de l'objet 3D, le dessus de l'objet 3D mais également d'observer un tour complet de l'objet 3D sur lui-même.

Pour les groupes 5 et 6, comme pour les deux groupes 1 et 2, une tablette individuelle est placée sur le banc de chaque participant. Celle-ci est posée à l'horizontale et le participant est à nouveau invité à ne pas modifier sa position. Dans le groupe 5, la tablette permet de diffuser une représentation plane de l'objet 3D seul, pour les exercices d'empreinte, ou de l'objet s'apprêtant à être coupé par un couteau pour les exercices de coupe. Comme pour la tâche de perception, cette représentation est similaire à ce qui est présenté dans les groupes 1 et 2 avant et après que des rotations soient appliquées à l'objet 3D. Dans le groupe 6, c'est une succession de représentations planes de l'objet 3D seul ou s'apprêtant à être coupé par un couteau, que le participant est invité à observer. Cette succession suit le même principe que ce qui a été proposé lors de la tâche de perception, c'est-à-dire la représentation dans la position initiale, la représentation de l'avant, du dessus et du côté et finalement la représentation dans l'objet en position initiale.

Tableau 23 : Illustrations du matériel pour évaluer la visualisation spatiale (2^e étude)

Groupe	Brève explication	Illustration d'un exercice de coupe (coupe transversale du cylindre) et lien vers une vidéo illustrative pour les groupes 1, 2 et 6	
Groupe 1 : manipulation 2 ½ D (G1 : manip. 2 ½ D)	Objets 3D (avec ou sans couteau) représentés virtuellement à manipuler via interface tactile sur tablette placée à l'horizontale sur le banc		
Groupe 2 : observation 2 ½ D (G2 : obs. 2 ½ D)	Objets 3D (avec ou sans couteau) représentés virtuellement à observer en vidéo sur tablette placée à l'horizontale sur le banc		
Groupe 3 : manipulation 3D (G3 : manip. 3D)	Objets 3D présentés à l'aide de matériel physique en petit format (avec ou sans couteau) pouvant être manipulés par le participant et matériel physique en grand format (avec ou sans couteau) présenté par l'expérimentateur	Matériel en petit format : 	Matériel en grand format : 
Groupe 4 : observation 3D (G4 : obs. 3D)	Objets 3D présentés à l'aide de matériel physique en petit format devant être uniquement observés par le participant (posé sur le banc) et matériel physique en grand format (avec ou sans couteau) présenté par l'expérimentateur	Matériel en petit format placé sur le banc : 	
Groupe 5 : observation 2D (G5 : obs. 2D)	Objets 3D (avec ou sans couteau) représentés à l'aide d'une représentation plane unique présentée sur tablette placée à l'horizontale sur le banc		
Groupe 6 : observation 2D's (G6 : obs. 2D's)	Objets 3D (avec ou sans couteau) représentés à l'aide d'une succession de représentations planes (devant, dessus, côté) présentée sur tablette placée à l'horizontale sur le banc		

Le groupe 4 est celui qui se rapproche le plus de l'étude de Duroisin (2015) qui s'est, elle aussi, focalisée sur l'observation de matériel physique. Néanmoins, quelques adaptations sont ici proposées. Si le même matériel physique en grand format était proposé, des rotations de ces objets 3D n'étaient pas montrées aux participants dans

l'étude de Duroisin. De plus, les participants ne disposaient pas du matériel en petit format placé sur leur banc. Ces modifications ont été apportées car elles apparaissent pertinentes pour une comparaison plus juste des groupes expérimentaux. En effet, les rotations appliquées au matériel physique permettent une meilleure comparaison avec le groupe 2 qui observe des rotations sur tablette. Rappelons que l'étude de Duroisin (2015) n'était pas menée dans une perspective comparative. Par ailleurs, l'ajout de matériel physique en petit format permet une comparaison avec le groupe 3.

Ces différents choix, tout comme le fait de choisir des objets 3D ayant les mêmes proportions, la même taille et la même couleur permettent de neutraliser certaines variables susceptibles d'impacter les résultats. Il en est de même pour le fait d'avoir proposé, dans les groupes confrontés à des représentations virtuelles et planes, des représentations de l'objet 3D dans la même position initiale et finale et sur une tablette placée dans la même position sur le banc.

b. Description de la tâche de visualisation spatiale

- Exercice de vérification de la compréhension des concepts d'empreinte et de coupe :

Avant d'entamer les exercices, l'expérimentateur explique que deux types d'exercice vont être proposés. D'une part, des exercices d'empreinte et d'autre part des exercices de coupe. Il propose ensuite de réaliser deux exercices de familiarisation lui permettant de clarifier les notions d'empreinte et de coupe, notamment en s'aidant de matériel.

Dans le premier exercice, correspondant à la tâche d'empreinte, les exemples des empreintes de la main et du pied sont utilisés pour faire (re)découvrir la notion d'empreinte. L'expérimentateur montre alors qu'il dispose d'un plateau d'encre et demande aux enfants et aux adolescents de dessiner la forme de l'empreinte d'une main. Il explique, en simulant l'action à l'aide du matériel, que cela revient à imaginer quelle forme apparaîtrait sur la feuille si cette main était trempée à plat dans l'encre puis déposée sur celle-ci. Les participants sont ensuite invités à dessiner la forme de l'empreinte d'une main et l'expérimentateur vérifie les réponses afin de s'assurer de la compréhension de chacun. Une explication complémentaire est apportée quand un participant n'a pas compris ou s'est trompé (ex. le participant dessine les ongles). L'expérimentateur fait ensuite de même avec la forme de l'empreinte d'un pied.


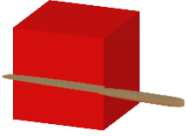

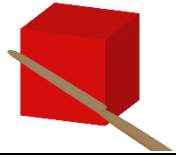


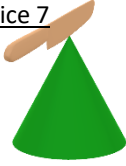


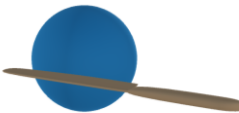
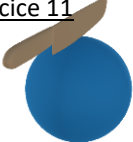
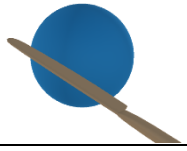








Le deuxième exercice de familiarisation, portant sur la tâche de coupe, est réalisé avec une bouteille. L'expérimentateur explique que dans les exercices de coupe, un couteau s'appêtant à couper un objet leur sera présenté. Il précise ensuite qu'ils

devront alors imaginer que le couteau coupe complètement l'objet en deux. L'expérimentateur en guise d'exemple place le couteau sur la bouteille et montre les deux parties obtenues (déjà prédécoupées). Il explique ensuite qu'il leur est demandé d'imaginer la forme de la surface créée par le couteau à l'intérieur de l'objet de départ, c'est-à-dire l'empreinte de la surface que le couteau a créé sur l'objet. À l'aide de gestes et en appliquant les actions sur le matériel mais en veillant à ne pas montrer le résultat de la section, il explique qu'il faut donc imaginer qu'on trempe dans de l'encre (petit plateau avec de l'encre) la forme que le couteau a créé sur les bords de l'objet en le coupant, par exemple la base inférieure de la partie supérieure sectionnée, puis, qu'on la dépose sur une feuille de papier. Après avoir donné les explications et répondu aux éventuelles questions des participants, ces derniers sont invités à dessiner la forme de la coupe de la bouteille présentée juste avant. L'expérimentateur vérifie les réponses afin de s'assurer de la compréhension de chacun. Une explication complémentaire est apportée quand un participant n'a pas compris ou s'est trompé (ex. le participant a dessiné une demi-bouteille). À la fin des exercices de familiarisation, l'expérimentateur précise aux enfants et aux adolescents qu'ils devront réaliser plusieurs exercices comme ceux qui viennent d'être effectués, mais que les objets 3D seront présentés à l'aide du même matériel que celui utilisé lors de l'activité individuelle (tâche de perception). Puisque les participants ont déjà été familiarisés avec ce dernier, il n'y a pas d'autre familiarisation prévue.

- Exercices et consignes :

Au total, vingt exercices sont proposés (Tableau 24). Lors de ces exercices, les participants sont interrogés sur cinq objets 3D présentés dans l'ordre suivant : cube, cône, sphère, cylindre et anneau rond à bord rond. Pour chacun des objets, un exercice d'empreinte est d'abord demandé. Ensuite, trois exercices de coupe sont présentés : un exercice de coupe transversale, un de coupe longitudinale et un de coupe oblique. L'empreinte demandée est l'empreinte de l'objet s'il est laissé dans la position initiale dans laquelle il est montré. La coupe transversale est une coupe pour laquelle la lame du couteau placée horizontalement et à plat, sur l'avant de l'objet 3D et à la mi-hauteur de celui-ci. La coupe longitudinale est une coupe pour laquelle la lame du couteau est placée verticalement sur le dessus de l'objet 3D et permettant de couper celui-ci en deux parties égales. Concernant le cas spécifique du cube, la lame est placée parallèlement aux faces latérales. Dans la coupe oblique, la lame du couteau est placée

Tableau 24 : Illustration des exercices de visualisation spatiale proposés (issu de Beuset et al., 2024a)

	Empreinte	Coupe transversale	Coupe longitudinale	Coupe oblique
Cube	<u>Exercice 1</u> 	<u>Exercice 2</u> 	<u>Exercice 3</u> 	<u>Exercice 4</u> 
	Réponse attendue : un carré	Réponse attendue : un carré	Réponse attendue : un carré	Réponse attendue : un rectangle strict
Cône	<u>Exercice 5</u> 	<u>Exercice 6</u> 	<u>Exercice 7</u> 	<u>Exercice 8</u> 
	Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un triangle isocèle	Réponse attendue : un ovale
Sphère	<u>Exercice 9</u> 	<u>Exercice 10</u> 	<u>Exercice 11</u> 	<u>Exercice 12</u> 
	Réponse attendue : un point ou un petit rond	Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un rond
Cylindre	<u>Exercice 13</u> 	<u>Exercice 14</u> 	<u>Exercice 15</u> 	<u>Exercice 16</u> 
	Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un rond	Réponse attendue : un rectangle (ou carré)	Réponse attendue : un ovale
Anneau	<u>Exercice 17</u> 	<u>Exercice 18</u> 	<u>Exercice 19</u> 	<u>Exercice 20</u> 
	Réponse attendue : un rond ou deux ronds concentriques rapprochés	Réponse attendue : deux ronds concentriques	Réponse attendue : deux ronds disjoints	Réponse attendue : deux ovales disjoints

Remarques :

- Si les illustrations ici proposées peuvent créer une certaine ambiguïté quant à la position du couteau, ambiguïté présente pour les participants du groupe 5 puisqu'ils sont confrontés à ces représentations planes, pour tous les autres groupes, cette ambiguïté est levée par le fait que différentes positions de l'objet et du couteau sont observées (grâce à la manipulation, à l'observation des rotations ou à la succession de représentations 2D).
- Nous sommes conscients que les deux réponses acceptées concernant l'empreinte de l'anneau et de la sphère sont des réponses fortement différentes puisque la première est théorique (basée sur la connaissance de propriétés) tandis que l'autre est empirique et se rapprocherait de ce qui serait obtenu avec de l'encre comme expliqué dans l'exercice de familiarisation. Nous nous devons néanmoins d'accepter les deux propositions.

en oblique ($\pm 25^\circ$) mais dans un plan perpendiculaire au plan avant. Dans les exercices du cube et du cylindre, la coupe oblique ne passe ni par la face inférieure, ni par la face supérieure. Il est en de même pour le cône pour qui la coupe ne passe pas par la base. L'annexe 14 propose plusieurs illustrations des différentes coupes.

Dans chaque exercice, l'objet 3D (seul pour les empreintes ou avec le couteau pour les coupes) est montré selon la modalité du groupe d'appartenance du participant. Ensuite, en prenant appui sur ce qu'il a observé, le participant est invité à dessiner à main levée, sur son carnet de réponses à l'endroit prévu à cet effet, la forme de l'empreinte ou de la surface de la coupe de l'objet. Il lui est demandé, si possible, d'écrire le nom de la forme qu'il a voulu dessiner. Le nom est utilisé par le chercheur pour pouvoir interpréter le dessin en cas de difficultés d'interprétation de ce dernier. L'expérimentateur passe ensuite à l'exercice suivant. Les consignes fournies dans chacun des groupes sont détaillées en annexe (Annexe 15).

Comme pour les tâches de perception, des précautions sont prises par l'expérimentateur au niveau du vocabulaire utilisé. D'une part, il veille à ne jamais citer le nom de l'objet 3D. Le terme « solide » est en revanche librement utilisé dans cette partie, contrairement aux tâches de perception, puisque cela n'a de toute façon pas de sens de parler d'empreinte et de coupe d'objets 2D. Lors de la résolution des exercices, les gestes de co-pensées sont à nouveau autorisés, comme lors de la tâche de perception, sans pour autant être analysés.

c. Analyse a priori de la tâche au regard d'éléments théoriques

- Analyse au regard des types d'espace et de représentations :

Dans la tâche utilisée pour évaluer l'habileté de visualisation spatiale, les participants sont invités à devoir effectuer des opérations mentales sur des objets de l'espace sensible ou sur des représentations planes ou virtuelles de ces objets. Les objets en question, même s'ils sont proposés dans l'espace sensible, font écho à des objets idéaux de l'espace géométrique (cube, cône...). En ne donnant pas les noms géométriques des objets présentés aux participants dans les différentes tâches, les participants sont incités à se focaliser sur les connaissances spatiales relatives à l'objet et non sur des connaissances géométriques. Pour autant, si les opérations mentales exercées peuvent être réussies en prenant appui sur des connaissances spatiales des participants, elles peuvent aussi prendre appui sur des connaissances géométriques, donc théoriques, des objets 3D et de leurs propriétés. Le cas évoqué dans le Tableau

24 concernant l’empreinte de la sphère et de l’anneau en est un exemple. C’est le cas également de la coupe oblique du cube, qui ne peut être un carré compte tenu du principe de l’inégalité triangulaire. La maîtrise de cette propriété géométrique permet ainsi d’éviter l’erreur type (Figure 46).

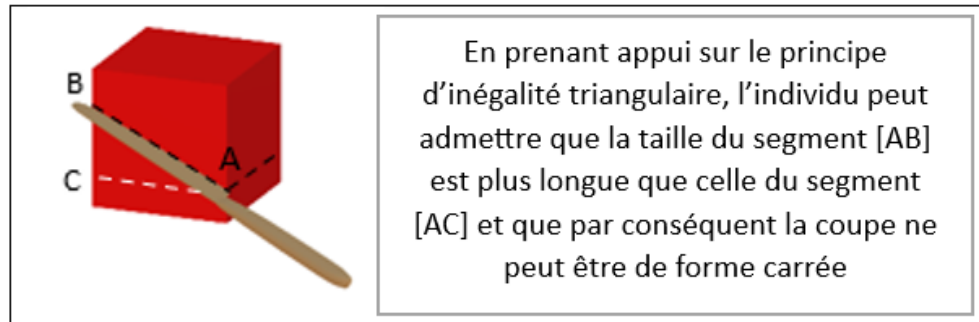


Figure 46 : Exemple de connaissance géométrique pouvant être utilisée

Si l’espace sensible, ou au minimum ses représentations, et éventuellement l’espace géométrique sont sollicités, notons également que l’espace graphique apparaît sollicité puisqu’il est demandé aux participants de dessiner la forme de l’empreinte ou de la coupe. C’est donc ici en observant la production du participant dans l’espace graphique de la feuille, que son rapport avec l’espace sensible est étudié. Finalement, l’espace géométrique est sollicité pour que le participant puisse, si possible, nommer ou expliquer son dessin en vue de faciliter l’analyse de la production.

De plus, des différences entre les groupes sont observées au niveau des types d’espace. En effet, selon la typologie de Brousseau (2000) dans les groupes observant les objets 3D sur tablette, les objets sont présentés dans le micro-espace des participants. De plus, l’espace représenté sur la tablette est aussi un micro-espace. Dans le groupe 3 et le groupe 4, les objets 3D sont présentés en format individuel dans le micro-espace du participant mais aussi en grand format dans leur méso-espace. D’ailleurs, si dans le groupe 3, l’idée est que le participant puisse répliquer la coupe dans son micro-espace en manipulant le matériel physique individuel, ce n’est pas le cas pour les participants du groupe 4, qui eux disposent du matériel physique seul dans le micro-espace mais qui doivent résoudre la tâche de coupe alors au départ de matériel proposé dans le méso-espace. De même, selon la typologie de Cutting (1997), les objets en grand format appartiennent à l’espace d’action contrairement aux objets en format individuel qui appartiennent à l’espace personnel.

Même si l'évaluation porte sur l'habileté de visualisation spatiale, l'habileté de perception est susceptible de l'influencer, comme elle le ferait pour toute évaluation intégrant une représentation d'objet 3D. En ce sens, des différences de performance entre les groupes pourraient être expliquées par des différences dans la capacité de perception. Les éléments mis en évidence au point 7.3.4.2c, analysant *a priori* la tâche de perception proposée sur les représentations virtuelles et planes d'objets de l'espace sensible, peuvent à nouveau être pris en considération.

Ici, afin de s'inscrire dans le prolongement de l'étude de Duroisin (2015), des exercices de coupe dans lesquels les couteaux sont placés contre les objets 3D ont été proposés. Néanmoins, comme l'illustre la Figure 47 d'autres exemples de tâches de coupe proposent de directement travailler avec un plan découpant l'objet 3D, ce qui peut s'avérer moins concret. D'autres tests, comme le Spatial Reasoning Instrument (Ramful *et al.*, 2017), proposent de travailler avec un couteau qui entame la coupe, ce qui peut déjà en partie guider le participant. Cet élément caractéristique des tâches proposées doit être pris en considération dans la comparaison des résultats obtenus.

Par ailleurs, les modes de représentation 2D utilisés varient également selon les tests et sont, tous comme la modalité de présentation de la coupe et sont aussi à prendre en considération. Dans la plupart des épreuves papier-crayon évaluant l'habileté de visualisation spatiale, une projection axonométrique isométrique est utilisée pour présenter les stimuli, notamment parce que ce cas de projection axonométrique est simple à dessiner et représente l'avant, le dessus et le côté de manière équilibrée (Yue, 2006). C'est le cas par exemple de l'épreuve MCT, illustrée à gauche dans la Figure 47. Dans le cadre de cette étude, ce n'est pas le cas des représentations 2 ½ D de l'objet 3D en position initiale et finale, ni des représentations 2D. Toutefois, la projection proposée reste axonométrique et permet d'observer, comme pour la perspective axonométrique isométrique, l'objet à peu près de face et légèrement de dessus. Dans les deux cas, l'objet 3D est rendu plus facilement identifiable d'après Parzys (2006).

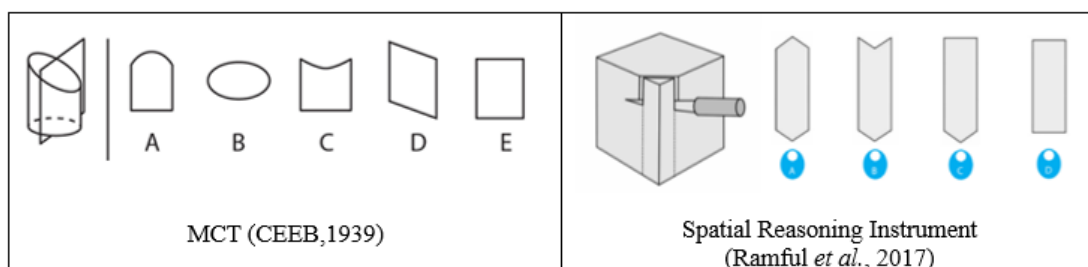


Figure 47 : Exemples d'autres tâches de coupe

- Analyse au regard du type de tâche :

Le choix d'opter pour une réponse de type « dessin à main levée » doit également être pris en compte dans les analyses. Si les épreuves existantes et illustrées en Figure 47 privilégient une tâche de reconnaissance avec choix unique parmi un nombre restreint de propositions, l'étude de Duroisin (2015) met en évidence l'existence de bien d'autres erreurs types produites par les enfants et les adolescents lorsqu'il leur est demandé d'imaginer des formes de coupe au départ de matériel physique. S'ajoutent, à cela d'autres erreurs types potentielles pouvant survenir face aux supports inédits utilisés ici comme les représentations virtuelles. Dans ce contexte, en vue d'explorer au mieux l'acquisition de l'habileté de visualisation quand celle-ci est évaluée au départ de représentations virtuelles, et compte tenu du peu de recherches antérieures l'ayant préalablement fait, le choix a ici aussi été d'opter pour une tâche de production dans laquelle les participants doivent dessiner la forme de la coupe ou de l'empreinte. Il est cependant essentiel de rester conscient que les résultats restent ceux d'une tâche d'évocation de l'habileté, possédant par ailleurs des limites associées sur lesquelles nous reviendrons (potentielles difficultés motrices, difficultés d'interprétation). Ceux-ci pourraient être différents et probablement meilleurs si une tâche de reconnaissance était proposée. Cela constitue d'ailleurs un prolongement qui pourrait être envisagé et qui permettrait d'évaluer l'habileté de visualisation en environnement virtuel chez des enfants encore plus jeunes, comme l'ont envisagé par exemple Ratliff *et al.* (2010).

- Analyse au regard des fonctions exécutives sollicitées :

Comme dans la tâche de perception, les fonctions exécutives sont susceptibles d'intervenir à différents degrés dans la résolution de la tâche ici proposée selon les modalités de présentation auxquelles les participants sont confrontés, comme cela a pu être mis en évidence pour la tâche de perception des objets 3D (*cf.* 7.3.4.2).

La mémoire de travail, en l'occurrence la mémoire de travail visuo-spatiale, intervient dans la formation et la manipulation d'images mentales comme le soulignent Mammarella *et al.* (2013) ou encore Cohen et Hegarty (2014). Dès lors, la résolution de la tâche d'identification d'empreinte et de coupe n'échappe pas à cette règle puisque les répondants sont invités à se faire une image mentale de l'objet 3D avant puis après la découpe et à la stocker pour ensuite seulement imaginer la forme de la coupe, autrement dit l'empreinte que laisserait ce « nouvel » objet créé. De plus, outre la charge associée à la tâche même de visualisation spatiale, les différents supports

utilisés sont aussi susceptibles d'occasionner des charges cognitives d'ampleur variée, comme cela a pu être évoqué dans l'analyse des tâches de perception (cf. 7.3.4.2). Ainsi, une charge cognitive potentiellement plus importante peut être suggérée pour les groupes 1 et 2, confrontés à des représentations virtuelles. Les différentes informations transitoires fournies au travers de la représentation dynamique doivent être compilées pour se faire une bonne image de l'objet 3D et de la position du couteau par rapport à ce dernier, avant de seulement devoir opérer sur cette image mentale. Dans la même logique, une charge cognitive potentiellement plus importante est également à prévoir pour les participants du groupe 6, confrontés à des successions de représentations 2D. Déjà, le mode de représentation 2D des vues multiples, proposant de manière simultanée les différentes vues (vue de l'avant...), exige une charge cognitive élevée (Pillay, 1998 ; St John *et al.*, 2001). Ici, puisque les différentes vues sont présentées successivement, les informations transitoires doivent être maintenues en mémoire de travail et compilées, comme pour les groupes confrontés à des représentations 2 ½ D. Pour les représentations 2D, la charge cognitive sollicitée se rapporte au fait qu'elles exigent de se construire mentalement des informations cachées, ce qui n'est pas le cas pour le matériel physique (Pillay, 1998).

Si la tâche de perception implique une nécessité de faire appel au contrôle inhibiteur face à des représentations planes ou dynamiques de l'espace sensible, la tâche de visualisation spatiale n'échappe pas à la règle puisque les participants doivent être capables de dépasser ce qui est visible sur les représentations 2D. Les exemples de propositions de réponse dans les tâches illustrées en Figure 47, par exemple la 3^{ème} proposition dans la tâche de coupe proposée par Ramful *et al.* (2017), montrent cette nécessité de dépasser ce qui est vu au profit de l'image mentale qui est faite de l'objet 3D. Cette fonction apparaît particulièrement sollicitée face aux représentations 2D compte tenu des aberrations visuelles qui lui sont associées. Elle l'est néanmoins avec toutes les modalités du matériel physique, par exemple pour considérer que l'empreinte d'une sphère n'est pas un rond, ou pour imaginer qu'une coupe oblique ne donne pas systématiquement comme résultat une figure inclinée. Notons d'ailleurs qu'à ce niveau, certains exercices peuvent solliciter davantage le contrôle inhibiteur que d'autres.

La fonction exécutive de flexibilité apparaît quant à elle particulièrement nécessaire dans les groupes confrontés à des représentations 2D et 2 ½ D, pour les mêmes raisons que celles évoquées lors de l'analyse de la tâche de perception visuelle, c'est-à-dire la

confrontation à des représentations d'objets 3D avec lesquels il est moins familier ou qui évoluent suite au caractère dynamique de l'environnement.

8.3.5.2. Récolte d'informations a posteriori

Une fois les vingt exercices réalisés, l'expérimentateur distribue un questionnaire par participant (Annexe 16). Ce questionnaire est composé de sept items avec échelle de Likert à cinq niveaux allant de pas du tout d'accord à tout à fait d'accord dont chaque niveau est illustré par un smiley (Figure 48). Deux items portent par exemple sur la facilité des exercices d'empreinte et de coupe.

Enfin, deux derniers items, par oui par non, demande au participant s'il a respectivement déjà été amené à résoudre des exercices d'empreintes et des exercices de coupe, ce qui permet de donner une indication sur l'expérience des participants vis-à-vis des exercices proposés. Les participants ont été invités à répondre par écrit au questionnaire distribué. Pour les classes du primaire, les affirmations sont lues à voix haute une à une par l'expérimentateur.










1) Les exercices d'empreinte étaient faciles	 Pas du tout d'accord	 Plutôt pas d'accord	 Sans avis	 Plutôt d'accord	 Tout à fait d'accord
2) Les exercices de coupe étaient faciles	 Pas du tout d'accord	 Plutôt pas d'accord	 Sans avis	 Plutôt d'accord	 Tout à fait d'accord

Figure 48 : Extrait du questionnaire de perception a posteriori associé à la tâche de visualisation spatiale

8.4. Présentation de l'échantillon

8.4.1. Taille des groupes

L'échantillon expérimental complet est constitué d'au total 656 enfants et adolescents dont l'âge varie entre 6 et 15 ans. Plus spécifiquement, pour la tâche de visualisation, les participants âgés d'au moins 8 ans ont été retenus, ce qui représente au total 529 participants. Néanmoins, pour chaque tranche d'âge et dans chaque groupe, le nombre d'enfants et d'adolescents n'est pas toujours le même comme l'illustre le Tableau 25. Cette différence s'explique par le fait que certains participants ont changé de tranche d'âge entre les deux évaluations. De plus, quatre participants de

plus de 8 ans ayant réalisé l'évaluation de la perception visuelle étaient absents lors de la séance collective et n'ont pas participé à l'étape d'évaluation de la visualisation spatiale. À l'inverse, tous les participants ayant passé l'évaluation de la visualisation ont participé préalablement à l'évaluation de la perception visuelle. À l'exception de la tranche d'âge constituée des adolescents de 14 à 15 ans pour le groupe 2 (partie perception) et 4 (partie visualisation), un minimum de vingt participants par groupe et par tranche d'âge est systématiquement observé. Les manques s'expliquent par l'absence longue durée d'enfants dont l'accord avait préalablement été obtenu.

Tableau 25 : Taille de l'échantillon (nombre de participants) par groupe et par tranche d'âge (2^e étude)

	G1 : manip. 2½D		G2 : obs. 2½D		G3 : manip. 3D		G4 : obs. 3D		G5 : obs. 2D		G6 : obs. 2D's		TOTAL	
	Perception	Visualisation	Perception	Visualisation	Perception	Visualisation	Perception	Visualisation	Perception	Visualisation	Perception	Visualisation	Perception	Visualisation
6-7 ans	22	/	20	/	20	/	20	/	21	/	21	/	124	/
8-9 ans	23	22	23	22	23	22	24	23	23	22	24	24	140	135
10-11 ans	23	23	25	24	24	23	21	22	23	23	23	25	139	140
12-13 ans	23	22	24	21	20	20	22	22	21	22	21	20	131	127
14-15 ans	20	21	19	23	21	22	20	19	21	21	21	21	122	127
TOTAL	111	88	111	90	108	87	107	86	109	88	110	90	656	529

8.4.2. Description de l'échantillon

Comme susmentionné dans les étapes d'appel à participation et d'organisation des groupes, l'échantillon est un échantillon tout-venant. Celui-ci est constitué d'enfants et d'adolescents provenant d'au total neuf établissements différents (Tableau 26), se situant en Belgique francophone. Sept de ces écoles sont des établissements d'enseignement primaire. Dans la première école, dont l'ISE est de 13 sur 20, douze enseignants sur vingt ont accepté de prendre part à l'étude, ce qui a permis de faire participer deux classes de première primaire, aucune classe de deuxième, deux classes de troisième, trois de quatrième, deux de cinquième et trois de sixième année de l'enseignement primaire. Six autres écoles ont été sollicitées de manière progressive en vue de compléter l'échantillon. Ces écoles ont un ISE variant entre 3 et 12. Au sein de ces écoles, toutes les classes n'ont pas pris part à l'étude car des contacts ont été pris uniquement avec les enseignants des niveaux pour lesquels les tranches d'âge

manquaient. Cela explique parfois la faible quantité de classes sollicitées et donc de participants observés dans certaines écoles.

Tableau 26 : Descriptif des établissements participants (2^e étude)

	Niveau scolaire	ISE (sur 20)	Nombre de classes sollicitées		Nombre de participants	
			perception	visualisation	perception	visualisation
1	Primaire	13	12	10	204	178
2	Primaire	3	8	8	66	42
3	Primaire	10	4	3	31	5
4	Primaire	6	3	1	35	8
5	Primaire	8	5	4	26	9
6	Primaire	7	1	1	18	17
7	Primaire	12	3	3	16	12
8	Secondaire	12	16	16	230	229
9	Secondaire	10	5	5	30	29
Total			57	51	656	529

Pour le secondaire, la quasi-totalité des participants provient d'un établissement dans lequel plusieurs enseignants de mathématiques ont accepté de prendre part à la recherche, ce qui a permis de solliciter de nombreuses classes. L'ISE de l'établissement est de 12 ce qui est un niveau proche de l'établissement primaire qui constitue une grande partie de l'échantillon. Afin de compléter l'échantillon, majoritairement pour la tranche des adolescents âgés de 14 et 15 ans, quelques classes d'une autre école, dont l'ISE est de 10 sur 20, ont été sollicitées.

8.4.3. Équivalence des groupes quant aux variables investiguées

Au travers de cette étude, les groupes constitués vont être comparés afin d'identifier d'éventuelles différences aux tâches de perception et visualisation selon les modalités de présentation des objets 3D utilisées. Afin d'être précautionneux vis-à-vis de la comparaison des groupes, l'équivalence entre les groupes au départ est calculée pour différentes variables, à commencer par l'âge. Différents tests inférentiels sont appliqués afin d'identifier si des divergences peuvent être ou non observées entre les groupes 2 à 2. Leurs résultats sont compilés en annexe pour l'échantillon utilisé lors de l'évaluation de la perception visuelle (Annexe 17) et pour l'échantillon restreint se rapportant à la visualisation spatiale (Annexe 18). En particulier, les résultats présentés dans les deux tableaux susmentionnés se focalisent sur les comparaisons des groupes deux à deux

nécessaires pour répondre aux différentes questions de recherche. Comme pour la première étude, le *test du Khi-carré* (χ^2), ou son alternative, le *test exact de Fisher*, sont utilisés pour les données catégorielles afin d'établir un potentiel lien entre la variable investiguée et le groupe d'appartenance. Parmi ces données, on retrouve le genre (répartition fille/garçon), la part de participants porteurs d'un trouble de l'apprentissage diagnostiqué, la part de participants pour qui un trouble de l'apprentissage est suspecté, la part de participants porteurs d'un trouble visuel avéré, la part de participants avec risque de TDC, la part d'utilisateurs réguliers des appareils tactiles et la part de ceux n'en ayant jamais utilisé, la part de participants ayant certaines pratiques régulières (jeux vidéo...) et enfin la part de participants ayant déjà une certaine expérience vis-à-vis de la géométrie 3D et des tâches évaluées. Pour ce qui est des données métriques, à savoir l'âge, l'ISE et le niveau de rotation mentale, le test *U de Mann-Whitney* est utilisé pour permettre d'identifier d'éventuelles différences significatives entre les groupes.

8.4.3.1. Équivalence entre les groupes pour l'habileté de perception visuelle

Concernant les comparaisons entre groupes 1 et 2, se rapportant donc à l'impact de la manipulation, des résultats non significatifs sont observés pour toutes les variables investiguées excepté pour les variables « pratique régulière des jeux de construction » ($\chi^2 = 6,1000$; $p\text{-value} = 0,014$) et « pratique régulière des jeux de type puzzle » ($\chi^2 = 4,784$; $p\text{-value} = 0,029$) à propos desquelles plus de joueurs réguliers sont constatés dans le groupe 1.

Au sujet de la comparaison des groupes 1 et 5, on constate aussi un résultat significatif en ce qui concerne la part de joueurs réguliers à des jeux de construction ($\chi^2 = 5,377$; $p\text{-value} = 0,020$), plus importante dans le groupe 1 que dans le groupe 5. Un résultat significatif est également constaté concernant la part de participants porteurs d'une dyslexie entre ces deux mêmes groupes ($\chi^2 = 5,237$; $p\text{-value} = 0,022$), plus élevée dans le groupe 1. Des résultats significatifs sont aussi observés entre les groupes 1 et 5 ($\chi^2 = 4,489$; $p\text{-value} = 0,034$) et les groupes 2 et 5 ($\chi^2 = 3,872$; $p\text{-value} = 0,049$) concernant la part de participants ayant déjà suivi des apprentissages scolaires relatifs à la géométrie 3D lors de l'année en cours, plus élevée dans le groupe 5. Une équivalence est en revanche observée pour toutes les autres variables que ce soit entre les groupes 1 et 5 et entre les groupes 2 et 5.

Les comparaisons des groupes 1 et 3 et des groupes 2 et 4 montrent que les groupes investigués sont équivalents pour la majorité des variables investiguées dans la mesure où la majorité des tests appliqués apparaissent non significatifs. Quelques résultats significatifs sont toutefois constatés pour certaines variables au sein de ces paires de groupes. Le « niveau socio-économique » moyen apparaît plus élevé dans le groupe 1 que dans le groupe 3 ($U = 4417,000$; $p\text{-value} < 0,001$) et plus élevé dans le groupe 2 que dans le groupe 4 ($U = 4105,000$; $p\text{-value} < 0,001$). Un résultat significatif est aussi observé concernant les habitudes de jeux de construction quand on prend en compte les groupes 1 et 3 ($\chi^2 = 6,312$; $p\text{-value} = 0,012$), avec davantage de joueurs réguliers dans le groupe 1. De plus, les deux groupes ne semblent pas équivalents quant à la part de participants ayant déjà suivis des apprentissages scolaires relatifs à la géométrie 3D lors de l'année en cours ($\chi^2 = 6,659$; $p\text{-value} = 0,010$), les participants du troisième groupe étant plus nombreux dans ce cas de figure. Enfin, concernant la variable relative aux troubles d'apprentissage, la présence de participants porteurs d'un TDA-H varie significativement entre les groupes 2 et 4 (*Test exact de Fisher* = 6,406 ; $p\text{-value} = 0,019$). Même si le pourcentage de participants concernés est minoritaire dans les deux groupes, il est plus élevé dans le groupe 2. En revanche, aucun résultat significatif n'apparaît quand les groupes 3 et 4 sont comparés.

Enfin, la comparaison des groupes 2 et 6 indique un seul résultat significatif, concernant la variable relative à la part de participants porteurs d'un TDA-H ($\chi^2 = 4,622$; $p\text{-value} = 0,032$), plus importante dans le groupe 2.

8.4.3.2. Équivalence entre les groupes pour la visualisation spatiale

En se focalisant cette fois uniquement sur les participants ayant participé à l'évaluation de la visualisation, les comparaisons de groupes donnent des résultats assez similaires, laissant ainsi entrevoir une certaine équivalence entre les groupes par rapport à de nombreux critères. Néanmoins, certaines différences qui étaient significatives sur l'échantillon complet ne le sont plus lorsque celui-ci est restreint et inversement. Par facilité, les résultats significatifs sont uniquement présentés ci-dessous, ce qui implique que les groupes peuvent être considérés comme équivalents par rapport à toutes les variables non citées.

Des résultats significatifs sont observés quand on compare les groupes 1 et 2 uniquement par rapport à la variable de l'habitude relative aux jeux de construction ($\chi^2 = 5,450$; $p\text{-value} = 0,020$), les joueurs réguliers étant plus nombreux dans le groupe 1.

Entre les groupes 1 et 5, une différence significative est observée concernant les habitudes de jeux de construction ($\chi^2 = 6,823$; $p\text{-value} = 0,009$), avec davantage de joueurs réguliers dans le groupe 1. Les capacités de rotation mentale des élèves du groupe 5 apparaissent significativement plus élevées ($U = 3279,000$; $p\text{-value} = 0,045$) que celles du groupe 2. Enfin, un résultat significatif est observé entre les groupes 2 et 5 en ce qui concerne la part de participants disposant d'une expérience antérieure vis-à-vis des tâches d'empreinte ($\chi^2 = 7,267$; $p\text{-value} = 0,007$), plus élevée dans le groupe 5.

Concernant les comparaisons des groupes 1 et 3, des groupes 2 et 4 et des groupes 3 et 4, des résultats significatifs sont observés au niveau de l'ISE, plus élevé dans le groupe 1 que dans le groupe 3 ($U = 2933,000$; $p\text{-value} = 0,004$) et plus élevé dans le groupe 2 que dans le groupe 4 ($U = 2554,000$; $p\text{-value} < 0,001$). Si par rapport aux troubles diagnostiqués, aucun résultat n'apparaît significatif, les enfants ou adolescents pour qui un trouble de l'apprentissage est suspecté sont plus nombreux dans le groupe 4 que dans le groupe 3 ($\chi^2 = 3,916$; $p\text{-value} = 0,048$) et que dans le groupe 2 ($\chi^2 = 6,175$; $p\text{-value} = 0,013$). Par ailleurs, au niveau des habitudes, des résultats significatifs sont observés entre les groupes 1 et 3 ($\chi^2 = 7,999$; $p\text{-value} = 0,005$) et les groupes 3 et 4 ($\chi^2 = 4,994$; $p\text{-value} = 0,025$) par rapport aux jeux de construction, avec moins de joueurs réguliers dans le groupe 3. Il en est de même entre les groupes 2 et 4 ($\chi^2 = 5,750$; $p\text{-value} = 0,016$) et les groupes 3 et 4 ($\chi^2 = 4,269$; $p\text{-value} = 0,039$) par rapport aux jeux de type « puzzle », avec plus de joueurs réguliers dans le groupe 4.

Concernant la comparaison des groupes 2 et 6, le seul résultat significatif obtenu concerne la variable relative à la pratique régulière d'un sport ($\chi^2 = 5,896$; $p\text{-value} = 0,015$), avec davantage de sportifs réguliers dans le groupe 2.

8.5. Analyses

8.5.1. Analyse des réponses sélectionnées à la tâche de perception visuelle : différents taux calculés et analyses statistiques

8.5.1.1. Différents cas de figure par exercice

Comme lors de la première étude, trois cas de figure principaux sont identifiés pour chaque exercice : la perception adéquate de l'objet 3D, la perception inadéquate de l'objet 3D et la non-perception de l'objet 3D. Puisque la modalité de résolution a été

modifiée entre les deux études expérimentales, les critères associés à chacun de ces cas de figure sont légèrement différents de ceux présentés lors de la première étude.

Le participant est considéré comme ayant une « perception adéquate de l'objet 3D » lorsqu'il sélectionne la proposition 3D attendue. En cas de sélection d'un objet 3D non attendu, il est alors considéré comme ayant une « perception inadéquate de l'objet 3D », puisqu'il a perçu l'élément présenté comme un objet 3D mais différent de l'élément qu'on souhaitait lui faire percevoir. L'analyse de la récurrence des différents choix non attendus, comme pour la première étude, participe par ailleurs à la compréhension de la perception inadéquate des objets 3D. Enfin, lorsque le participant sélectionne une proposition 2D, il est associé au cas de figure de « non-perception de l'objet 3D ». Néanmoins, la prudence relative à l'interprétation de ce cas de figure est de rigueur, et ce davantage encore que lors de la première étude puisque les participants ne peuvent sélectionner qu'une seule proposition. En effet, il est probable qu'une proposition 2D soit choisie en tant que représentation d'un objet 3D et non en tant qu'objet 2D. La démarche d'analyse des verbatims, décrite au point 8.5.2, devraient permettre, comme dans la première étude, de nuancer ce cas de figure.

Un dernier cas de figure concerne les participants ne sélectionnant aucune proposition. Comme dans l'étude 1, ce cas est minoritaire (15 enfants au total concernés) et n'est donc pas analysé.

8.5.1.2. Absence de compilation de scores totaux (tous exercices confondus)

Comme dans la première étude, le calcul de la consistance interne (*alpha de Cronbach*) des scores totaux (sur 7) obtenus en calculant le nombre d'exercices dans lequel les participants sont situés pour chacun des cas de figure est réalisé afin d'identifier s'il est ou non pertinent d'utiliser de tels scores. Les indices calculés mettent en évidence une faible consistance interne de ces différents scores. En effet, la quasi-totalité des indices de consistance interne calculés pour la perception adéquate et pour la perception inadéquate dans chacun des groupes (que ce soit pour toutes les tranches d'âge confondues ou à chacune d'elles) sont inférieurs à 0,7, comme l'illustre le Tableau 27²⁵. Ils peuvent donc être considérés comme inconsistants. C'est le cas également pour le score de non-perception même si la consistance interne apparaît acceptable dans davantage de cas de figure.

²⁵ Les alphas de Cronbach supérieurs à 0,7, permettant de considérer *a minima* la consistance interne comme acceptable, sont placés en vert dans le tableau. Les autres sont placés en orange.

De tels résultats invitent à considérer qu'il est plus adapté de prendre appui sur les résultats par exercice, puisque les items ne semblent pas, s'ils sont mis ensemble, mesurer un tout cohérent qui serait un indicateur de la capacité de perception, sans doute suite aux différences importantes constatées entre objets 3D. Ainsi, les analyses réalisées seront menées sur les taux de perception adéquate, de perception inadéquate et de non-perception relatifs à chacun des objets 3D. Des statistiques descriptives puis inférentielles portant sur ces fréquences à l'aide du logiciel SPSS seront menées en prenant en considération les variables principales et secondaires, afin d'apporter des éléments de réponses aux différentes questions de recherche présentées. La structure choisie pour la présentation des résultats obtenus, tout comme la justification des choix d'analyses (tests inférentiels...) seront proposées en troisième partie (volume 2) pour introduire les résultats mis en exergue. Comme dans la première étude, des tests à deux issues seront uniquement effectués et le seuil de significativité utilisé pour ces tests sera de 0,05.

Tableau 27 : Calcul de la consistance interne pour les scores totaux de perception adéquate, de perception inadéquate et de non-perception : alpha de Cronbach (α) (2^e étude)

		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5	Groupe 6
Score de perception adéquate	Toutes tranches d'âge confondues	$\alpha = 0,502$	$\alpha = 0,563$	$\alpha = 0,737$	$\alpha = 0,279$	$\alpha = 0,687$	$\alpha = 0,668$
	6-7 ans	$\alpha = 0,159$	$\alpha = 0,544$	$\alpha = 0,875$	$\alpha = 0,327$	$\alpha = 0,570$	$\alpha = 0,493$
	8-9 ans	$\alpha = 0,586$	$\alpha = 0,696$	$\alpha = 0,830$	$\alpha = -0,237$	$\alpha = 0,650$	$\alpha = 0,805$
	10-11 ans	$\alpha = 0,495$	$\alpha = 0,456$	$\alpha = 0,353$	$\alpha = 0,583$	$\alpha = 0,400$	$\alpha = 0,790$
	12-13 ans	$\alpha = 0,688$	$\alpha = 0,533$	$\alpha = 0,471$	$\alpha = 0,161$	$\alpha = 0,679$	$\alpha = 0,321$
	14-15 ans	$\alpha = 0,400$	$\alpha = 0,587$	$\alpha = -0,105$	$\alpha = 0,218$	$\alpha = 0,735$	$\alpha = 0,669$
Score de perception inadéquate	Toutes tranches d'âge confondues	$\alpha = 0,353$	$\alpha = 0,475$	$\alpha = 0,333$	$\alpha = 0,214$	$\alpha = 0,424$	$\alpha = 0,412$
	6-7 ans	$\alpha = 0,333$	$\alpha = 0,478$	$\alpha = 0,433$	$\alpha = -0,664$	$\alpha = 0,687$	$\alpha = 0,517$
	8-9 ans	$\alpha = 0,564$	$\alpha = 0,555$	$\alpha = 0,750$	$\alpha = 0,571$	$\alpha = 0,317$	$\alpha = 0,252$
	10-11 ans	$\alpha = 0,228$	$\alpha = 0,179$	$\alpha = 0,188$	$\alpha = 0,470$	$\alpha = -0,279$	$\alpha = 0,228$
	12-13 ans	$\alpha = 0,352$	$\alpha = 0,422$	$\alpha = -0,187$	$\alpha = -0,320$	$\alpha = 0,451$	$\alpha = 0,092$
	14-15 ans	$\alpha = 0,028$	$\alpha = -0,015$	$\alpha = 0,426$	$\alpha = 0,217$	$\alpha = 0,517$	$\alpha = 0,114$
Score de non-perception	Toutes tranches d'âge confondues	$\alpha = 0,599$	$\alpha = 0,698$	$\alpha = 0,796$	$\alpha = 0,207$	$\alpha = 0,825$	$\alpha = 0,736$
	6-7 ans	$\alpha = 0,348$	$\alpha = 0,745$	$\alpha = 0,959$	$\alpha = /$	$\alpha = 0,812$	$\alpha = 0,751$
	8-9 ans	$\alpha = 0,736$	$\alpha = 0,771$	$\alpha = 0,833$	$\alpha = -0,150$	$\alpha = 0,879$	$\alpha = 0,871$
	10-11 ans	$\alpha = 0,647$	$\alpha = 0,596$	$\alpha = 0,557$	$\alpha = 0,254$	$\alpha = 0,545$	$\alpha = 0,817$
	12-13 ans	$\alpha = 0,713$	$\alpha = 0,659$	$\alpha = 0,378$	$\alpha = 0,166$	$\alpha = 0,572$	$\alpha = 0,271$
	14-15 ans	$\alpha = 0,197$	$\alpha = 0,647$	$\alpha = 0,207$	$\alpha = /$	$\alpha = 0,856$	$\alpha = 0,633$

8.5.2. Analyse des verbatims utilisés lors de la tâche de perception visuelle

Comme pour la première étude, et en prenant appui sur la même grille d'analyse (Tableau 19), les verbatims utilisés par les enfants et les adolescents pour justifier les choix 2D sélectionnés sont analysés. Le codage, organisé en trois parties, permet de nuancer l'affirmation selon laquelle le fait de choisir une proposition 2D implique une non-perception de l'objet 3D. En effet, le codage permet d'identifier pour chaque verbatim si le choix 2D a été sélectionné en tant que représentant d'objet 3D ou en tant qu'objet 2D, en sachant que le verbatim ne permet pas toujours de trancher à ce sujet.

Au total, l'ensemble des verbatims associés à des choix 2D (tous exercices confondus), ce qui représente 916 arguments, ont été codés en double aveugle. Un degré d'accord de 85,58% entre les deux codeurs a été obtenu pour l'ensemble de verbatims codés. La valeur du *Kappa de Cohen* calculé, utilisé pour évaluer la fiabilité inter-codeurs, indique que ce degré d'accord peut être considéré comme fort (Tableau 28). Les résultats par exercice montrent que l'accord pour chacun des exercices peut être considéré comme presque parfait. En cas de désaccord, le chercheur en charge de l'étude a décidé du codage finalement conservé, en privilégiant le codage C en cas de doute puisque celui-ci fait référence à une impossibilité d'identifier s'il y a passage ou non à la 3D.

Tableau 28 : Indice de la fiabilité inter-codeurs pour le codage des verbatims relatifs aux choix 2D (2^e étude)

	Nombre de verbatims	Degré d'accord (% de codages identiques)	<i>Kappa de Cohen</i>	Interprétation du <i>Kappa de Cohen</i> (d'après Landis & Koch, 1977)
Exercice 1	156	94,9%	0,970	Accord presque parfait
Exercice 2	120	85,8%	0,920	Accord presque parfait
Exercice 3	143	88,1%	0,933	Accord presque parfait
Exercice 4	139	87,8%	0,930	Accord presque parfait
Exercice 5	101	84,1%	0,913	Accord presque parfait
Exercice 6	146	76,7%	0,867	Accord presque parfait
Exercice 7	111	79,3%	0,885	Accord presque parfait
Total	916	85,6%	0,621	Accord fort

8.5.3. Analyse des réponses à la tâche de visualisation spatiale

Pour évaluer l'habileté de visualisation spatiale, des exercices de dessins de formes d'empreinte et de coupe d'objets 3D ont été utilisés. En vue d'analyser les performances, les différents dessins ont été codés en suivant la grille de codage détaillée en annexe (Annexe 19) dont un extrait est fourni en Figure 49. Cette grille a été élaborée au regard d'erreurs types identifiées dans la littérature, notamment dans la recherche de Duroisin (2015). Des grilles différentes ont été proposées pour chacun des exercices même si des erreurs types récurrentes sont proposées entre les exercices.



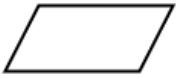

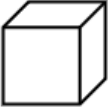

Dessin	Nom écrit
A : Dessin d'un carré 	A.0 : « je ne sais pas », « / », « » A.1 : « carré » A.2 : « rectangle » A.3 : autre nom + à préciser
B : Dessin d'un rectangle 	B.0 : « je ne sais pas », « / », « » B.1 : « rectangle » B.2 : « carré » B.3 : autre nom + à préciser
C : Dessin d'un parallélogramme 	C.0 : « je ne sais pas », « / », « » C.1 : « parallélogramme » C.2 : « carré » C.3 : autre nom + à préciser
D : Dessin d'une ligne droite 	D.0 : « je ne sais pas », « / », « » D.1 : « droite », « segment », « ligne », ... D.2 : « carré » D.3 : autre nom + à préciser
E : Dessin d'un cube 	E.0 : « je ne sais pas », « / », « » E.1 : « cube » E.2 : « carré » E.3 : autre nom + à préciser
F : Dessin d'un demi-cube (en suivant la coupe transversale) 	F.0 : « je ne sais pas », « / », « » F.1 : « demi-cube », « parallélépipède rectangle », « prisme », ... F.2 : « carré » F.3 : autre nom + à préciser
X : Dessin d' autre chose (autre forme) + à préciser	X.0 : « je ne sais pas », « / », « » X.1 : « carré » X.2 : autre nom + à préciser
Y : Dessin non compréhensible	Y.0 : « je ne sais pas », « / », « » Y.1 : « carré » Y.2 : autre nom + à préciser
Z : Aucun dessiné / « je ne sais pas »	Z.0 : « je ne sais pas », « / », « » Z.1 : « carré » Z.2 : autre nom + à préciser

Figure 49 : Extrait de la grille de codage (exemple de la coupe transversale du cube)

Un codage en double-aveugle a été réalisé sur l'ensemble des productions. Les taux d'accord inter-codeurs pour chaque exercice, présentés en Tableau 29, sont systématiquement supérieurs à 90%. Au total, sur les 10580 productions codées, 515

désaccords ont été relevés, ce qui représente un taux d'accord d'environ 95%. L'indice de fiabilité inter-codeurs (*Kappa de Cohen*) calculé pour chaque exercice est quant à lui systématiquement supérieur à 0,85 ce qui correspond à un accord presque parfait entre les codeurs. En cas de désaccord, afin d'aboutir à un codage définitif, la procédure mise en œuvre est la suivante : d'abord le chercheur en charge de l'étude a vérifié s'il ne s'agit pas d'une erreur de codage de l'un des deux codeurs : 18 cas de désaccord sur 515 ont pu ainsi être résolus. Ensuite, en cas d'ambiguïté du dessin, le chercheur a tranché en prenant appui sur le nom écrit²⁶ par le participant : 356 cas de désaccord sur les 497 restants ont pu être résolus. Si l'enfant ou l'adolescent n'a pas écrit le nom de la figure ou si le nom écrit ne permet pas de trancher, le chercheur a lui-même décidé du codage au regard de la production dessinée : les 141 derniers cas de désaccord ont dû être résolus de cette façon.

Tableau 29 : Indice de la fiabilité inter-codeurs pour le codage des dessins d'empreinte et de coupe (N = 529)

	Degré d'accord (% de codages identiques)	<i>Kappa de Cohen</i>	Interprétation du <i>Kappa de Cohen</i> (d'après Landis & Koch, 1977)
Exercice 1	97,0%	0,850	Accord presque parfait
Exercice 2	95,5%	0,899	Accord presque parfait
Exercice 3	96,6%	0,944	Accord presque parfait
Exercice 4	92,6%	0,913	Accord presque parfait
Exercice 5	97,2%	0,917	Accord presque parfait
Exercice 6	96,4%	0,946	Accord presque parfait
Exercice 7	95,8%	0,939	Accord presque parfait
Exercice 8	97,0%	0,962	Accord presque parfait
Exercice 9	93,4%	0,915	Accord presque parfait
Exercice 10	96,0%	0,930	Accord presque parfait
Exercice 11	93,4%	0,892	Accord presque parfait
Exercice 12	95,0%	0,930	Accord presque parfait
Exercice 13	96,0%	0,901	Accord presque parfait
Exercice 14	93,0%	0,868	Accord presque parfait
Exercice 15	94,5%	0,927	Accord presque parfait
Exercice 16	94,3%	0,933	Accord presque parfait
Exercice 17	93,0%	0,917	Accord presque parfait
Exercice 18	94,0%	0,928	Accord presque parfait
Exercice 19	97,7%	0,975	Accord presque parfait
Exercice 20	94,7%	0,940	Accord presque parfait

²⁶ Pour rappel, en plus du dessin, il est demandé au participant d'écrire, quand c'est possible, le nom de la figure dessinée.

À partir du codage définitif, des scores ont été calculés. Un exercice est considéré comme réussi si le codage associé à la production dessinée correspond à la réponse attendue (telle que décrite au sein du Tableau 24). Par exemple, pour l'exercice de la coupe transversale, l'exercice est considéré comme réussi si le codage attribué est celui relatif au carré, c'est-à-dire le codage A, et ce quel que soit le nom attribué par le participant au dessin. Inversement, un codage de type « C.2 » pour l'exercice de la coupe transversale du cube, c'est-à-dire un dessin considéré par les codeurs comme un parallélogramme, n'est pas assimilé à une réussite même si le participant a nommé ce dessin « carré ». Le nom attribué par l'enfant ou l'adolescent n'est donc utilisé que pour trancher en cas de désaccord inter-codeurs comme susmentionné. Ce choix se justifie par la volonté de se focaliser sur l'étude des connaissances spatiales et non géométriques.

Un score (sur 20) est attribué par participant et correspond au nombre d'exercices réussis. Contrairement aux résultats obtenus pour l'habileté de perception, l'utilisation de score total apparaît ici pertinente puisque le calcul de la consistance interne de ce score (*alpha de Cronbach*) indique que, toutes tranches d'âge confondues, les indices de consistance interne calculés sont tous supérieurs à 0,7 (Tableau 30). La plupart sont mêmes supérieurs à 0,8, ce qui permet de considérer la consistance interne comme bonne. Lorsqu'on s'intéresse aux scores sur 20 obtenus à chaque tranche d'âge, on constate qu'à la plupart d'entre elles, la consistance interne obtenue est acceptable ou bonne. De manière ponctuelle, on observe qu'une consistance interne discutable est parfois observée. Globalement, il est donc possible de considérer que les vingt items proposés permettent, ensemble, de mesurer un seul et même aspect, que nous considérons comme le niveau de maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale.

Tableau 30 : Calcul de la consistance interne pour les scores totaux de visualisation spatiale : alpha de Cronbach (α)

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5	Groupe 6
Toutes tranches d'âge confondues	$\alpha = 0,868$	$\alpha = 0,836$	$\alpha = 0,798$	$\alpha = 0,851$	$\alpha = 0,806$	$\alpha = 0,868$
8-9 ans	$\alpha = 0,893$	$\alpha = 0,887$	$\alpha = 0,620$	$\alpha = 0,851$	$\alpha = 0,614$	$\alpha = 0,858$
10-11 ans	$\alpha = 0,857$	$\alpha = 0,815$	$\alpha = 0,805$	$\alpha = 0,856$	$\alpha = 0,655$	$\alpha = 0,744$
12-13 ans	$\alpha = 0,854$	$\alpha = 0,717$	$\alpha = 0,704$	$\alpha = 0,765$	$\alpha = 0,795$	$\alpha = 0,879$
14-15 ans	$\alpha = 0,693$	$\alpha = 0,611$	$\alpha = 0,808$	$\alpha = 0,780$	$\alpha = 0,799$	$\alpha = 0,877$

Il apparaît donc pertinent de conserver ce score total et de réaliser des analyses sur ce dernier. Des statistiques descriptives puis inférentielles, réalisées à l'aide du logiciel SPSS, vont donc être mises en place sur les scores récoltés auprès des enfants et adolescents et permettront de mieux comprendre la maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale. Pour plus de facilité, ces tests seront présentés et justifiés directement dans le chapitre 10, présentant les résultats. Notons néanmoins que ce seront tous des tests à deux issues et que le seuil de significativité utilisé pour interpréter ces derniers sera de 0,05.

En prenant en considération les variables principales et secondaires dans ces analyses, des éléments de réponse pourront alors être apportés aux différentes questions de recherche.

8.6. Complémentarité entre les deux études

La seconde étude s'inscrit dans le prolongement de la première dans la mesure où elle confronte les enfants et les adolescents à certaines modalités de présentation des objets 3D communes (représentations virtuelles à manipuler, représentations virtuelles à observer et représentations 2D). Dans la première étude, l'habileté de perception a été investiguée au travers d'une tâche de reconnaissance avec choix multiple. Lors de la seconde étude, résumée en Figure 50, la même tâche de reconnaissance a été proposée mais cette fois en contraignant le participant à la sélection d'une seule proposition, tout en conservant les mêmes objets 3D à percevoir et les mêmes propositions offertes lors de la tâche de reconnaissance. Les résultats de la seconde étude permettent alors d'affiner la réponse apportée par la première étude aux questions de recherche 1.1°, 1.2° et 1.4°. De plus, la seconde étude permet de poursuivre les investigations relatives à l'habileté de perception visuelle d'objets 3D représentés virtuellement en les comparant cette fois à de nouvelles modalités de présentation : du matériel physique et des successions de représentations 2D. Ces ajouts permettent eux aussi de mieux appréhender la capacité des enfants et des adolescents à percevoir les représentations virtuelles, notamment en la comparant à la perception de matériel physique ou en tentant d'identifier si le dynamisme des représentations virtuelles constitue la plus-value de ces représentations.

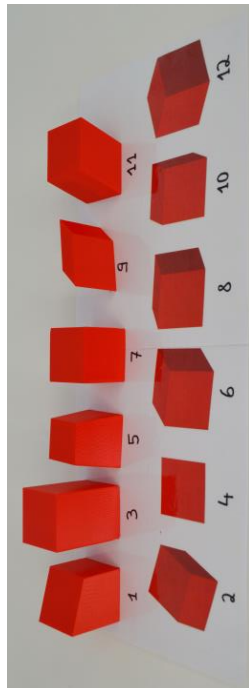
Une autre différence entre les deux études menées concerne les variables secondaires investiguées. Si les variables investiguées au travers des questionnaires destinés aux parents et aux enseignants ont été conservées, celles investiguées

directement auprès de l'enfant et l'adolescent ont été modifiées. En effet, la première étude a investigué les processus perceptifs de base ainsi que la capacité de distinction des teintes de couleurs tandis que dans la seconde étude, une mesure de la capacité à faire preuve de rotation mentale a été prise. Ce changement au niveau des variables secondaires investiguées permet d'apporter de nouveaux éléments de réponse concernant les facteurs susceptibles ou non d'impacter l'acquisition de l'habileté de perception visuelle de la 3D.

En plus de compléter les informations relatives à l'habileté de perception visuelle de la 3D, la seconde étude permet également d'aller plus loin en investiguant aussi l'habileté de visualisation spatiale, comme l'illustre la Figure 51. Plus encore, en évaluant les deux habiletés auprès des mêmes enfants et adolescents, le lien entre ces deux habiletés pourra être étudié. Les résultats des deux études participent ainsi conjointement à l'étude de la cognition spatiale en environnement virtuel.

Objectif général : Évaluer le niveau de maîtrise de l'habileté de **perception visuelle** d'objets 3D au départ de représentations virtuelles auprès d'enfants et d'adolescents

Tâche de reconnaissance (avec choix unique) + justification (7 exercices)



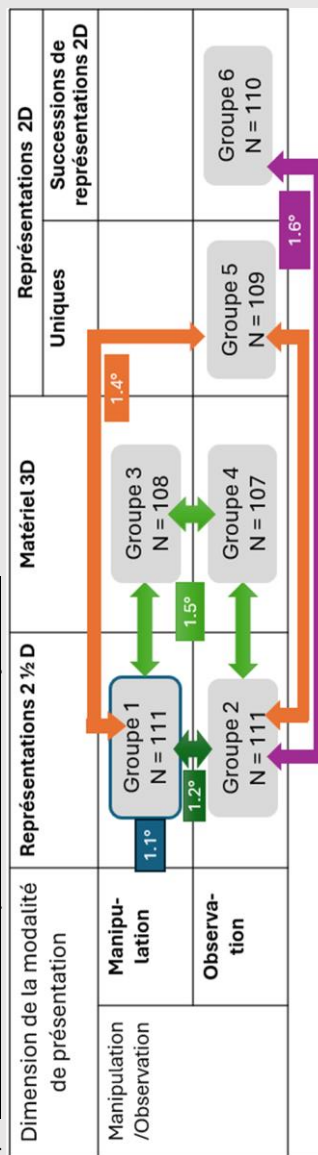
3 cas de figure :

- perception adéquate de l'objet 3D (choix 3D attendu)
- perception inadéquate de l'objet 3D (choix 3D non attendu)
- non-perception de l'objet 3D (choix 2D uniquement)

! A nuancer (analyse des justifications)

VARIABLES PRINCIPALES :

1) La modalité de représentation des objets 3D :



2) L'âge des participants : 6 à 15 ans répartis en cinq tranches d'âge (6-7 ans...)

3) Les objets 3D : 1 exercice = 1 solide



VARIABLES SECONDAIRES :

Récote d'informations auprès des parents, de l'enseignant et du participant :

- Genre
- Niveau de rotation mentale
- Suspicion d'un trouble développemental de la coordination suspecté (résultats au DCDQ-FE)
- Habitudes et pratiques régulières (utilisation d'un appareil tactile, jeux vidéo, jeux de construction, jeux de puzzle, pratique d'un sport, pratique d'un instrument de musique)
- Niveau scolaire et expérience antérieure en géométrie 3D (apprentissage de la géométrie 3D cette année, expérience avec la modalité de représentation des solides, expérience avec la tâche de perception visuelle)

Figure 50 : Résumé de la 2^e étude expérimentale (1^{ère} partie : évaluation de la perception visuelle)

Objectif général 2 : Évaluer le niveau de maîtrise de l'habileté de **visualisation spatiale** sur les objets 3D au départ de représentations virtuelles (2 ½ D) auprès d'enfants et d'adolescents

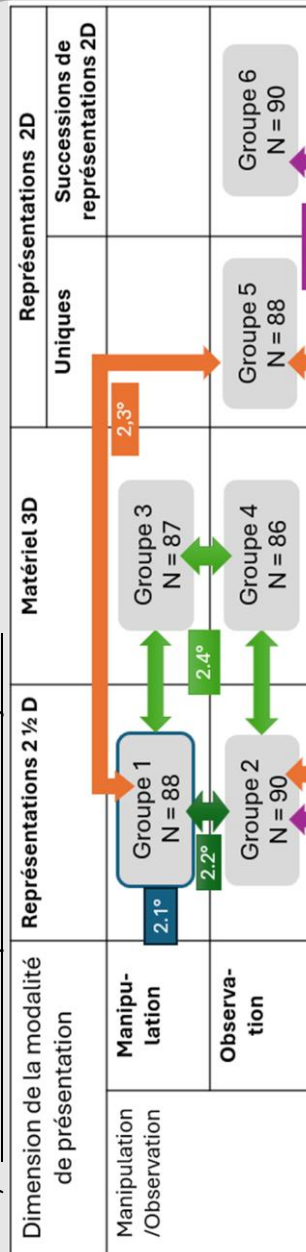
Tâche de dessin de formes d'empreinte et de coupe d'objets 3D (20 exercices)



Empreinte : solide présenté seul
Coupe : solide présenté avec un couteau s'appuyant à le couper

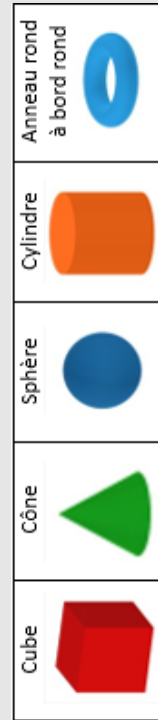
VARIABLES PRINCIPALES :

1) La modalité de représentation des objets 3D



2) L'âge des participants : Conservation des enfants/adolescents de 8 ans et plus

3) Les objets 3D :



4) Les types d'exercice : 4 exercices par objet 3D : empreinte, coupe transversale, coupe longitudinale, coupe oblique

VARIABLES SECONDAIRES :

Récolte d'informations auprès des parents, de l'enseignant et du participant :

- Genre
- Niveau de rotation mentale
- Habitudes et pratiques régulières (utilisation d'un appareil tactile, jeux vidéo, jeux de construction, jeux de puzzle, pratique d'un sport, pratique d'un instrument de musique)
- Expérience antérieure en géométrie 3D (apprentissage de la géométrie 3D cette année, expérience avec la modalité de représentation des solides, expérience avec la tâche de perception visuelle)
- Perception des objets 3D

Figure 51 : Résumé de la 2^e étude expérimentale (2^e partie : évaluation de la visualisation spatiale)

Conclusion de la partie II

Dans ce travail, deux études complémentaires ont été menées en contexte scolaire, avec pour objectif général d'évaluer, de manière exploratoire, la maîtrise des capacités à percevoir des objets 3D représentés dans un environnement virtuel à agir mentalement sur ces derniers auprès d'enfants et d'adolescents âgés de 6 à 15 ans. Toutes deux menées dans une approche comparative, les études proposent d'évaluer le niveau de maîtrise des habiletés dans différentes conditions, c'est-à-dire au départ de différentes modalités de présentation des objets.

Après une présentation des fondements théoriques, proposées en première partie, la deuxième partie de ce premier volume a permis la présentation de la méthodologie de ces deux études. Le chapitre 5 a été l'occasion de décrire la problématique qui leur est associée, en reprenant les éléments clés du cadrage théorique (partie 1). Elle a permis de souligner les enjeux relatifs à l'étude des habiletés spatiales de perception visuelle et de visualisation spatiale, que ce soit pour le domaine de la psychologie ou pour celui de l'enseignement-apprentissage. Ensuite, compte tenu de cette problématique, les questions de recherche ont été présentées. Le chapitre 6 s'est quant à lui focalisé sur la présentation de l'environnement virtuel utilisé lors des deux études. Cela constitue une variable essentielle à prendre en considération dans les analyses des résultats obtenus. Enfin, les chapitres 7 et 8 ont permis la présentation respective de chacune des deux études. Ils ont décrit, pour chacune d'elles, les variables étudiées mais aussi la démarche expérimentale mise en œuvre et notamment l'évaluation utilisée pour mesurer les habiletés. L'échantillon ainsi que les analyses menées ont été également décrits.

En se focalisant entièrement, dans cette deuxième partie, sur la méthodologie, la volonté était de présenter la complémentarité des études, rappelée en fin de chapitre 8. De cette façon, les résultats des deux études peuvent être présentés et mis en relation au travers de la troisième partie de ce travail, proposée dans le second volume. Une réflexion quant à l'apport des résultats de ces deux études sera ensuite apportée en quatrième et ultime partie de ce second volume.

ANNEXES

Liste des annexes

- Annexe 1 : Matériel utilisé pour la validation de l'environnement 2 ½ D utilisé dans les études expérimentales (questionnaire a priori, questionnaire intermédiaire et questionnaire a posteriori)*
- Annexe 2 : Lettre envoyée aux directions d'établissement pour l'appel à participation à la première étude expérimentale*
- Annexe 3 : Lettre envoyée aux enseignants pour l'appel à participation à la première étude expérimentale*
- Annexe 4 : Lettre envoyée aux parents/responsables légaux pour la première étude expérimentale*
- Annexe 5 : Questionnaire envoyé aux enseignants pour la récolte d'informations a priori pour la première étude expérimentale*
- Annexe 6 : Subtests utilisés pour évaluer les processus visuels de base (inspirés de la BORB, Riddoch & Humphreys, 1993)*
- Annexe 7 : Illustration des propositions dans chaque exercice de la tâche de reconnaissance*
- Annexe 8 : Caractéristiques des groupes et équivalences entre les groupes deux à deux toute tranche d'âge confondue : moyenne/pourcentage et test inférentiel U de Mann-Whitney/Chi-carré de Pearson/Test exact de Fisher et p-value associée (1^{ère} étude expérimentale)*
- Annexe 9 : Lettre envoyée aux directions d'établissement pour l'appel à participation à la deuxième étude expérimentale*
- Annexe 10 : Lettre envoyée aux enseignants pour l'appel à participation à la deuxième étude expérimentale*
- Annexe 11 : Lettre envoyée aux parents/responsables légaux pour la deuxième étude expérimentale*
- Annexe 12 : Questionnaire envoyé aux enseignants pour la récolte d'informations a priori pour la deuxième étude expérimentale*
- Annexe 13 : 3D-MRBT (Hawes et al., 2015a)*
- Annexe 14 : Illustration des exercices de coupe*
- Annexe 15 : Consignes exactes par groupe pour l'évaluation de la tâche de visualisation spatiale*
- Annexe 16 : Questionnaires de perception réalisés après l'évaluation de la visualisation*
- Annexe 17 : Caractéristiques des groupes et équivalences entre les groupes deux à deux toute tranche d'âge confondue : moyenne/pourcentage et test inférentiel U de Mann-Whitney/Chi-carré de Pearson/Test exact de Fisher et p-value associée (2^e étude expérimentale – partie perception)*

Annexe 18 : Caractéristiques des groupes et équivalences entre les groupes deux à deux toute tranche d'âge confondue : moyenne/pourcentage et test inférentiel U de Mann-Whitney/Chi-carré de Pearson/Test exact de Fisher et p-value associée (2^e étude expérimentale – partie visualisation)

Annexe 19 : Grille d'analyse des productions à la tâche de visualisation spatiale

Les annexes sont disponibles en cliquant sur le QR Code ci-dessous.

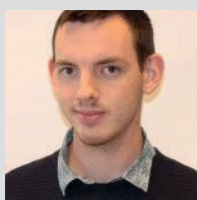


Grâce aux technologies, les objets en trois dimensions (3D) que l'on retrouve dans l'espace physique peuvent être simulés au sein d'environnements virtuels au travers de représentations offrant, par leur caractère dynamique, une impression de tridimensionnalité. Pour autant, les enfants et adolescents arrivent-ils à se représenter mentalement les objets 3D au départ de telles représentations et arrivent-ils à agir mentalement sur ces dernières? Cette thèse, située dans le domaine de la psychologie cognitive et développementale, a pour objectif de répondre à ces questions en évaluant, de manière exploratoire, le niveau de maîtrise de deux processus cognitifs en environnement virtuel auprès d'enfants et d'adolescents âgés de 6 à 15 ans: l'habileté de perception visuelle de la 3D et l'habileté de visualisation spatiale.

Pour atteindre cet objectif, deux études expérimentales, chacune réalisée auprès de plus de six cents enfants et adolescents, ont été menées dans une perspective comparative, c'est-à-dire en comparant le niveau de maîtrise des habiletés lorsque les objets 3D sont présentés dans différentes modalités (représentations virtuelles, matériel physique, représentations planes,...).

Les résultats obtenus indiquent que la perception visuelle des objets 3D, évaluée au travers d'une tâche de reconnaissance, n'est pas systématique quand ces derniers sont présentés au sein d'un environnement virtuel. Elle pose des difficultés pour certains enfants et adolescents, même à l'âge de 15 ans et même pour des objets 3D simples (ex. cube, cône). Elle diffère de la perception dans l'espace physique et se rapproche même, du moins chez les plus jeunes enfants, de la perception de représentations 2D. L'habileté de visualisation, évaluée par une tâche d'imagination de la forme de l'empreinte et de plusieurs coupes des objets 3D, semble quant à elle plus proche entre les différentes modalités même si des divergences peuvent apparaître pour certains exercices.

Puisque les habiletés spatiales étudiées sont impliquées dans les apprentissages scolaires, en particulier dans le domaine de la géométrie 3D, cette recherche s'inscrit au service de la réflexion sur l'enseignement-apprentissage de ce domaine et notamment sur le caractère adapté ou non des solides virtuels au fonctionnement cognitif des élèves. Ils invitent à éviter d'utiliser ce type de matériel en remplacement du matériel physique au moment de la découverte des objets 3D, et à prendre des précautions lorsqu'ils sont envisagés.



Aspirant F.R.S.-FNRS puis assistant sous mandat au sein du Service d'Éducation et des Sciences de l'Apprentissage (Ecole de Formation des Enseignants), dirigé par le Professeur Natacha Duroisin, Romain Beauset mène des travaux de recherche portant sur l'étude de processus cognitifs en lien avec la spatialité impliqués dans les apprentissages scolaires. Plus largement, depuis 2018, il s'intéresse à la validation d'outils et de dispositifs d'apprentissage et de différenciation notamment dans le domaine des mathématiques. Au travers de ses travaux, il considère qu'une meilleure connaissance du développement cognitif des élèves ainsi que de leur conception peut guider les pratiques enseignantes.

Romain Beauset

Études des habiletés de perception visuelle de la 3D et de visualisation spatiale en environnement virtuel chez les enfants et les adolescents âgés de 6 à 15 ans

Vol. 2

2024

Thèse de Doctorat

2024

Études des habiletés de perception visuelle de la 3D et de visualisation spatiale en environnement virtuel chez les enfants et les adolescents âgés de 6 à 15 ans

Apports pour une meilleure compréhension des mécanismes cognitifs impliqués dans les apprentissages scolaires

Volume 2

Romain Beauset



Université de Mons

Ecole de Formation des Enseignants



**Études des habiletés de perception visuelle de la 3D
et de visualisation spatiale en environnement virtuel
chez les enfants et les adolescents âgés de 6 à 15 ans**

Apports pour une meilleure compréhension des mécanismes
cognitifs impliqués dans les apprentissages scolaires

Volume 2

Beauset Romain

Thèse défendue pour l'obtention du diplôme de Docteur en Sciences de
l'éducation et Enseignement

Jury

Natacha Duroisin (Promotrice), Université de Mons
Marc Demeuse (Co-promoteur), Université de Mons
Stéphanie Bridoux, Université de Mons
Isabelle Deshaies, Université du Québec à Trois-Rivières
Annick Fagnant, Université de Liège
Isabelle Simoes Loureiro, Université de Mons

TABLE DES MATIÈRES

Volume 1

Volume 2

TABLE DES MATIÈRES	3
LISTE DES TABLEAUX	11
LISTE DES FIGURES.....	19
PARTIE III : ÉTUDES EXPÉRIMENTALES – RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	21
Introduction de la partie III.....	23
Chapitre 9. Résultats relatifs à l’habileté de perception visuelle de la 3D	33
9.1. Réponse à la question de recherche 1.1° : perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables	35
9.1.1. Résultats relatifs à la première étude expérimentale (groupe 1)	35
9.1.1.1. Perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables (toutes tranches d’âge confondues).....	35
9.1.1.2. Perception des différents objets 3D selon l’âge au départ de représentations virtuelles manipulables	45
9.1.1.3. Influence des variables secondaires sur la perception visuelle des objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables	48
a. Le genre.....	48
b. Le niveau de maîtrise des processus perceptifs de base	49
c. La perception des teintes de couleurs	50
d. Le risque de TDC	51
e. Les habitudes et pratiques régulières	52
f. Le niveau scolaire et l’expérience antérieure en géométrie 3D.....	53
9.1.2. Résultats relatifs à la seconde étude expérimentale (groupe 1).....	56
9.1.2.1. Perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables (toutes tranches d’âge confondues).....	56
9.1.2.2. Perception de chaque objet 3D au départ d’une représentation virtuelle manipulable selon l’âge	62
9.1.2.3. Influence des variables secondaires sur la perception au départ de représentations virtuelles manipulables	65
a. Le genre.....	65
b. Le niveau de maîtrise de la rotation mental	65
c. Risques de TDC.....	66
d. Habitudes et pratiques régulières.....	67
e. Le niveau scolaire et l’expérience en géométrie 3D	68
9.1.3. Discussion spécifique à la question 1.1°	70
9.1.3.1. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle manipulable : une habileté majoritairement non systématique.....	70
a. La présence de quelques comportements bidimensionnels	71
b. La sélection de choix 3D différent(s) de l’objet présenté.....	73
9.1.3.2. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle manipulable : une habileté qui varie entre les objets 3D.....	78
9.1.3.3. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle manipulable : une habileté qui n’évolue que partiellement avec l’âge.....	81

9.1.3.4.	Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle manipulable, une habileté susceptible d'être influencée par certaines variables secondaires	84
9.2.	Réponse à la question de recherche 1.2° : impact de la manipulation sur la perception des objets 3D au départ de représentations 2 ½ D	86
9.2.1.	Résultats relatifs à la première étude expérimentale (groupe 1 vs groupe 2).....	86
9.2.1.1.	Impact de la manipulation sur la perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles (toutes tranches d'âge confondues)	86
a.	Analyses générales.....	86
b.	Analyses inférentielles comparatives	92
9.2.1.2.	Impact de la manipulation sur la perception de chaque objet 3D au départ d'une représentation virtuelle selon l'âge	93
a.	Analyses générales.....	93
b.	Analyses inférentielles comparatives	98
9.2.1.3.	Influence des variables secondaires sur la perception au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer	99
a.	Le genre.....	99
b.	Le niveau de maîtrise des processus perceptifs de base	100
c.	La perception des teintes de couleurs	101
d.	Le risque de TDC	102
e.	Les habitudes et pratiques régulières	103
f.	Le niveau scolaire et l'expérience antérieure en géométrie 3D.....	104
9.2.2.	Résultats relatifs à la seconde étude expérimentale (groupe 1 vs groupe 2)	107
9.2.2.1.	Impact de la manipulation sur la perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles (toutes tranches d'âge confondues)	107
a.	Analyses générales.....	107
b.	Analyses inférentielles comparatives	112
9.2.2.2.	Impact de la manipulation sur la perception de chaque objet 3D au départ d'une représentation virtuelle selon l'âge	113
a.	Analyses générales.....	113
b.	Analyses inférentielles comparatives	116
9.2.2.3.	Influence des variables secondaires sur la perception de représentations virtuelles à manipuler et à observer.....	117
a.	Le genre.....	117
b.	Le niveau de maîtrise de la rotation mentale	118
c.	Le risque de TDC	118
d.	Les habitudes et pratiques régulières	119
e.	Le niveau scolaire et l'expérience antérieure en géométrie 3D.....	120
9.2.3.	Discussion spécifique à la question 1.2°	122
9.2.3.1.	Percevoir les objets 3D au départ de vidéo à observer : une habileté majoritairement non systématique qui diffère parfois de la perception de représentations virtuelles manipulables	122
9.2.3.2.	Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer en vidéo : une habileté qui varie également entre les objets	128
9.2.3.3.	Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer en vidéo : une habileté qui n'évolue que partiellement avec l'âge	128
9.2.3.4.	Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer en vidéo : une habileté susceptible d'être influencée par les mêmes variables secondaires..	129

9.3.	Réponse à la question de recherche 1.3° : impact de l'orientation du support sur la perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles.....	130
9.3.1.	Résultats relatifs à la première étude expérimentale (groupe 2 vs groupe 3).....	130
9.3.1.1.	Impact de l'orientation sur la perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles (toutes tranches d'âge confondues)	130
a.	Analyses générales.....	130
b.	Analyses inférentielles comparatives.....	135
9.3.1.2.	Impact de l'orientation sur la perception de chaque objet 3D au départ d'une représentation virtuelle selon l'âge	136
a.	Analyses générales.....	136
b.	Analyses inférentielles comparatives.....	140
9.3.2.	Discussion spécifique à la question 1.3°	142
9.3.2.1.	Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer : une habileté majoritairement non systématique quelle que soit l'orientation du support, malgré un effet de l'orientation pour certains objets.....	142
9.3.2.2.	Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer : une habileté qui varie entre les objets 3D quelle que soit l'orientation du support.....	145
9.3.2.3.	Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer : une habileté qui n'évolue que partiellement avec l'âge quelle que soit l'orientation du support	145
9.4.	Réponse à la question de recherche 1.4° : perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles et planes	147
9.4.1.	Résultats relatifs à la première étude expérimentale (groupes 1 et 2 vs groupe 4)	147
9.4.1.1.	Différence entre la perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles et planes (toutes tranches d'âge confondues)	147
a.	Analyses générales.....	147
b.	Analyses inférentielles comparatives.....	154
9.4.1.2.	Différence entre perception de représentations virtuelles et planes pour chaque objet selon l'âge.....	156
a.	Analyses générales.....	156
b.	Analyses inférentielles comparatives.....	159
9.4.2.	Résultats relatifs à la seconde étude expérimentale (groupes 1 et 2 vs groupe 5)	162
9.4.2.1.	Différence entre perception de représentations virtuelles et planes pour chaque objet (toutes tranches d'âge confondues).....	162
a.	Analyses générales.....	162
b.	Analyses inférentielles comparatives.....	167
9.4.2.2.	Différence entre perception de représentations virtuelles et planes pour chaque objet selon l'âge.....	168
a.	Analyses générales.....	168
b.	Analyses inférentielles comparatives.....	170
9.4.3.	Discussion spécifique à la question 1.4°	172
9.4.3.1.	Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation plane : une habileté non systématique mais posant plus de difficultés que la perception de représentations virtuelles	172
9.4.3.2.	Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation plane : habileté qui varie entre les objets 3D comme c'est le cas pour les représentations virtuelles.....	180

9.4.3.3.	Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation plane : une habileté proche de la perception de représentations virtuelles chez les plus jeunes enfants mais qui évolue différemment.....	181
9.5.	Réponse à la question de recherche 1.5° : perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique.....	184
9.5.1.	Résultats relatifs à la seconde étude expérimentale (groupe 1 vs groupe 3 ; groupe 2 vs groupe 4 ; groupe 3 vs groupe 4).....	184
9.5.1.1.	Différence entre perception de représentations virtuelles et de matériel physique pour chaque objet.....	184
a.	Analyses générales.....	184
b.	Analyses inférentielles comparatives.....	189
9.5.1.2.	Différence entre perception de représentations virtuelles et de matériel physique pour chaque objet selon l'âge.....	192
a.	Analyses générales.....	192
b.	Analyses inférentielles comparatives.....	195
9.5.2.	Discussion spécifique à la question 1.5°.....	198
9.5.2.1.	Percevoir les objets 3D au départ de représentations virtuelles : une habileté posant plus de difficultés que la perception dans l'espace sensible.....	198
9.5.2.2.	Percevoir les objets 3D au départ de représentations virtuelles : une habileté qui possède quelques points communs et divergences avec la perception dans l'espace sensible.....	203
9.6.	Réponse à la question de recherche 1.6° : perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes.....	205
9.6.1.	Résultats relatifs à la seconde étude expérimentale (groupe 6 vs groupes 2).....	205
9.6.1.1.	Différence entre perception de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D pour chaque objet (toutes tranches d'âge confondues).....	205
a.	Analyses générales.....	205
b.	Analyses inférentielles comparatives.....	210
9.6.1.2.	Différence entre perception de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D pour chaque objet selon l'âge.....	211
a.	Analyses générales.....	211
b.	Analyses inférentielles comparatives.....	214
9.6.2.	Discussion spécifique à la question 1.6°.....	216
9.6.2.1.	Percevoir les objets 3D au départ de représentations virtuelles : le dynamisme du support n'apporte pas réellement de plus-value.....	216
9.7.	Discussion générale, limites et perspective aux études.....	221
9.7.1.	Retour sur les principaux résultats obtenus.....	222
9.7.2.	Limites et perspectives aux études menées.....	228
9.7.2.1.	Des études menées dans un environnement virtuel spécifique.....	228
9.7.2.2.	Des études menées sur des objets spécifiques à l'apparence particulière.....	232
9.7.2.3.	Des études menées au départ d'une tâche de reconnaissance.....	234
9.7.2.4.	Des études menées dans une perspective comparative comparant des groupes indépendants constitués d'un échantillon tout-venant.....	236
Chapitre 10.	Étude de l'habileté de visualisation spatiale.....	243
10.1.	Vérification de la normalité des données.....	244
10.2.	Réponse à la question de recherche 2.1° : Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables.....	244

10.2.1. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables (toutes tranches d'âge confondues)	244
10.2.2. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables <i>selon l'âge</i>	245
10.2.3. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables <i>selon l'objet 3D</i>	247
10.2.4. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables <i>selon le type d'exercice</i>	248
10.2.5. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables <i>selon l'âge et l'objet 3D</i>	250
10.2.6. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables <i>selon l'âge et le type d'exercice</i>	252
10.2.7. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables <i>selon le type d'exercice et l'objet 3D (résultats par exercice)</i>	253
10.2.7.1. Analyses des taux de réussite	253
10.2.7.2. Analyses des erreurs types.....	256
10.2.8. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables <i>selon l'âge, le type d'exercice et l'objet 3D</i>	263
10.2.9. Impact des variables secondaires sur la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables.....	264
a. Le genre.....	264
b. Le niveau de maîtrise de la rotation mentale	265
c. Risques de TDC.....	265
d. Habitudes et pratiques régulières.....	265
e. Expérience en géométrie 3D.....	266
f. Capacités de perception visuelle des objets 3D.....	267
10.2.10. Discussion spécifique à la question 2.1°	269
10.2.10.1. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : une habileté pouvant poser des difficultés mais qui se développe avec l'âge	269
10.2.10.2. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : une habileté qui varie selon les objets 3D et les types d'exercice.....	272
10.2.10.3. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : une habileté variable selon l'exercice proposé.....	274
10.2.10.4. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : quid de l'influence des processus perceptifs ?	279
10.2.10.5. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : une habileté influencée par certaines variables secondaires.....	280
10.3. Réponse à la question de recherche 2.2° : Impact de la manipulation sur la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles.....	282
10.3.1. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer (toutes tranches d'âge confondues)	282
10.3.2. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer <i>selon l'âge</i>	283
10.3.3. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer <i>selon l'objet 3D</i>	285
10.3.4. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer <i>selon le type d'exercice</i>	286

10.3.5. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer <i>selon l'âge et l'objet 3D</i>	286
10.3.6. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer <i>selon l'âge et le type d'exercice</i>	287
10.3.7. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer <i>selon le type d'exercice et l'objet 3D (résultats par exercice)</i>	289
10.3.7.1. Analyses des taux de réussite.....	289
10.3.7.2. Analyses des erreurs types.....	290
10.3.8. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer <i>selon l'âge, le type d'exercice et l'objet 3D</i>	297
10.3.9. Impact des variables secondaires sur la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer.....	297
a. Le genre.....	297
b. Le niveau de maîtrise de la rotation mentale.....	298
c. Risques de TDC.....	298
d. Habitudes et pratiques régulières.....	299
e. Expérience en géométrie 3D.....	300
f. Capacités de perception visuelle des objets 3D.....	302
10.3.10. Discussion spécifique à la question 2.2° : la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles, une habileté non impactée par la place accordée à la manipulation.....	303
10.4. Réponse à la question de recherche 2.3° : Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes.....	306
10.4.1. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes (toutes tranches d'âge confondues).....	306
10.4.2. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes <i>selon l'âge</i>	307
10.4.3. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes <i>selon l'objet 3D</i>	309
10.4.4. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes <i>selon le type d'exercice</i>	310
10.4.5. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes <i>selon l'âge et l'objet 3D</i>	311
10.4.6. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes <i>selon l'âge et le type d'exercice</i>	312
10.4.7. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes <i>selon le type d'exercice et l'objet 3D (résultats par exercice)</i>	314
10.4.7.1. Analyses des taux de réussite.....	314
10.4.7.2. Analyses des erreurs types.....	316
10.4.8. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes <i>selon l'âge, le type d'exercice et l'objet 3D</i>	324
10.4.9. Discussion spécifique à la question 2.3° : la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles, une habileté qui diffère en partie de la visualisation spatiale au départ de représentations planes.....	327
10.5. Réponse à la question de recherche 2.4° : Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique.....	333
10.5.1. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique (toutes tranches d'âge confondues).....	333

10.5.2. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique <i>selon l'âge</i>	335
10.5.3. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique <i>selon l'objet 3D</i>	337
10.5.4. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique <i>selon le type d'exercice</i>	339
10.5.5. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique <i>selon l'âge et l'objet 3D</i>	339
10.5.6. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique <i>selon l'âge et le type d'exercice</i>	342
10.5.7. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique <i>selon le type d'exercice et l'objet 3D (résultats par exercice)</i>	344
10.5.7.1. Analyses des taux de réussite	344
10.5.7.2. Analyses des erreurs types.....	347
10.5.8. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique <i>selon l'âge, le type d'exercice et l'objet 3D</i>	354
10.5.9. Discussion spécifique à la question 2.4°	357
10.5.9.1. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : une habileté proche de l'habileté exercée dans l'espace sensible	357
10.5.9.2. La visualisation spatiale dans l'espace sensible, une habileté non impactée par la manipulation des stimuli, comme dans l'environnement virtuel	361
10.6. Réponse à la question de recherche 2.5° : Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D	363
10.6.1. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D (toutes tranches d'âge confondues).....	363
10.6.2. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D <i>selon l'âge</i>	364
10.6.3. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D <i>selon l'objet 3D</i>	366
10.6.4. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D <i>selon le type d'exercice</i>	366
10.6.5. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D <i>selon l'âge et l'objet 3D</i>	367
10.6.6. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D <i>selon l'âge et le type d'exercice</i>	368
10.6.7. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D <i>selon le type d'exercice et l'objet 3D (résultats par exercice)</i>	369
10.6.7.1. Analyses des taux de réussite	369
10.6.7.2. Analyses des erreurs types.....	370
10.6.8. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D <i>selon l'âge, le type d'exercice et l'objet</i>	377
10.6.9. Discussion spécifique à la question 2.5°	378
10.7. Discussion générale relative à l'habileté de visualisation, limites et perspectives ...	380
10.7.1. Retour sur les principaux résultats obtenus	381
10.7.2. Limites et perspectives à l'étude menée.....	386
10.7.2.1. Une étude menée dans un environnement virtuel spécifique proposé sur tablette et portant sur des objets spécifiques.....	386
10.7.2.2. Une modalité de présentation des exercices de coupe bien spécifique.....	388

10.7.2.3. Une étude menée au départ d'une tâche de dessin.....	388
10.7.2.4. Une étude menée dans une perspective comparative comparant le niveau de maîtrise des groupes indépendants constitués d'un échantillon tout-venant.....	391
Conclusion de la partie III	393
PARTIE IV : ÉTUDES EXPÉRIMENTALES – APPORTS DES RÉSULTATS.....	395
Introduction de la partie IV	397
Chapitre 11. Apports pour le domaine de la psychologie	401
11.1. Apports pour la compréhension du fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents en environnement virtuel.....	401
11.2. Réflexions sur les supports utilisés lors de l'évaluation de la cognition spatiale chez les enfants et les adolescents	402
11.2.1. Réflexions sur la dimensionnalité des supports utilisés et la numérisation des épreuves	403
11.2.2. Réflexions sur d'autres aspects susceptibles d'influencer les performances et d'expliquer les écarts entre études.....	406
Chapitre 12. Apports pour l'enseignement-apprentissage.....	411
12.1. Les représentations virtuelles de solides : créatrices d'obstacles potentiels, en particulier lors des premiers apprentissages.....	413
12.1.1. Les représentations virtuelles de solides : un support à bannir ?	418
12.1.2. Conscientiser les enseignants sur les difficultés de perception de représentations virtuelles et de manipulation mentale.....	419
12.1.3. Éviter les représentations virtuelles lors des premiers apprentissages	420
12.1.4. Anticiper en développant antérieurement les capacités de rotation mentale.....	422
12.1.5. Proposer un accompagnement lors de leur première utilisation	423
12.1.5.1. Un accompagnement technique dont l'ampleur varie selon l'environnement utilisé	423
12.1.5.2. Un accompagnement sur la compréhension du principe des environnements virtuels	424
12.1.5.3. Un accompagnement passant initialement par un usage conjoint de matériel physique et de représentations virtuelles pour dépasser les obstacles de perception	426
12.1.6. Encourager la manipulation face à ce type de matériel	427
12.1.7. Veiller à certains choix concernant l'apparence des objets 3D présentés virtuellement.....	430
12.1.8. Différencier avec le numérique et lors de l'utilisation du numérique	430
12.1.9. Conserver une cohérence entre les supports d'apprentissage et d'évaluation	431
12.2. L'utilisation de plusieurs représentations 2D en l'absence de matériel virtuel.....	433
12.3. L'habileté de visualisation spatiale : une habileté à entraîner quel que soit le support.	434
12.4. Quid du contenu des prescrits en Fédération Wallonie-Bruxelles ?	436
12.5. Quid de la formation des enseignants ?.....	438
12.6. Des réflexions qui dépassent la discipline de la géométrie 3D	439
12.7. Une nécessité de poursuivre les recherches concernant l'impact du support sur les apprentissages et le rôle de l'enseignant pour dépasser les obstacles.....	440
Conclusion de la partie IV.....	443
CONCLUSION GÉNÉRALE	447
Références bibliographiques	455
Liste des abréviations et acronymes.....	503
Liste des annexes.....	507

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Rappel des questions de recherche portant sur l'habileté de perception	24
Tableau 2 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (1 ^{ère} étude)	35
Tableau 3 : Pourcentage d'enfants/adolescents percevant adéquatement chaque objet 3D quand 6 objets sur 7 sont adéquatement perçus et quand 1 objet sur 7 est adéquatement perçu au départ de représentations virtuelles manipulables (1 ^{ère} étude).....	38
Tableau 4 : Corrélations entre la perception adéquate des différents objets 3D deux à deux : coefficient phi (Φ) et p-value associée (1 ^{ère} étude)	39
Tableau 5 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (1 ^{ère} étude).....	44
Tableau 6 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles manipulables et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p-value (p) (1 ^{ère} étude).....	47
Tableau 7 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (1 ^{ère} étude).....	48
Tableau 8 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables par genre et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (1 ^{ère} étude).....	49
Tableau 9 : Corrélations entre le score aux subtests de la BORB et la perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme ou la sélection de certaines propositions 3D non attendues au départ de représentations virtuelles manipulables : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p-value.....	50
Tableau 10 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables selon la bonne ou mauvaise perception des teintes de couleurs concernées et comparaison pour le cas du prisme : taux de perception adéquate, test exact de Fisher et p-value (1 ^{ère} étude).....	51
Tableau 11 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents concernés ou non par un risque de TDC et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (1 ^{ère} étude).....	52
Tableau 12 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : taux, Khi-carré (ou alternative) et p-value (1 ^{ère} étude)	53
Tableau 13 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (1 ^{ère} étude)	55
Tableau 14 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (2 ^e étude).....	56
Tableau 15 : Pourcentage d'enfants/adolescents percevant adéquatement chaque objet 3D quand 6 objets sur 7 sont adéquatement perçus et quand 1 objet sur 7 est adéquatement perçu au départ de représentations virtuelles manipulables (2 ^e étude).....	58
Tableau 16 : Corrélations entre la perception adéquate des différents objets 3D deux à deux : coefficient phi (Φ) et p-value associée (2 ^e étude)	59
Tableau 17 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (2 ^e étude).....	61
Tableau 18 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles manipulables et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p-value (p) (2 ^e étude).....	64
Tableau 19 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (2 ^e étude).....	65
Tableau 20 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables par genre et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (2 ^e étude).....	65

Tableau 21 : Corrélacion entre le score au test de rotation mentale (sur 16) et la perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles : coefficient de corrélacion r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value	66
Tableau 22 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents concernés ou non par un risque de TDC et comparaison : taux, Khi-carré (ou alternative) et p -value (2 ^e étude).....	66
Tableau 23 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : taux, khi-carré (ou son alternative) et p -value (2 ^e étude)	68
Tableau 24 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : taux, Khi-carré (ou son alternative) et p -value (2 ^e étude)	69
Tableau 25 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal pour chacun des objets 3D : pourcentage (1 ^{ère} étude)	86
Tableau 26 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal pour chacun des objets 3D : pourcentage (1 ^{ère} étude)	91
Tableau 27 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G2 : Khi-carré (χ^2) et p -value (p) (1 ^{ère} étude)	92
Tableau 28 : Corrélacions entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal et l'âge (en jour) : coefficient de corrélacion r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p) (1 ^{ère} étude)	97
Tableau 29 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p -value (p) ($ddl = 6$) (1 ^{ère} étude).....	98
Tableau 30 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G2 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p -value (p) (1 ^{ère} étude).....	99
Tableau 31 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal par genre et comparaison : taux, Khi-carré et p -value (1 ^{ère} étude)	100
Tableau 32 : Corrélacion entre le score aux subtests de la BORB et la perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme ou la sélection de certaines propositions 3D non attendues au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal : coefficient de corrélacion r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value	101
Tableau 33 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal selon la bonne ou mauvaise perception des teintes de couleurs concernées et comparaison pour le cas du prisme : taux de perception adéquate, test exact de Fisher et p -value	102
Tableau 34 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal chez les enfants/adolescents concernés ou non par un risque de TDC et comparaison : taux, Khi-carré et p -value (1 ^{ère} étude).....	103
Tableau 35 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : taux, Khi-carré et p -value (1 ^{ère} étude)	104
Tableau 36 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : taux, Khi-carré et p -value (1 ^{ère} étude).....	106
Tableau 37 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour chacun des objets 3D : pourcentage (2 ^e étude)	108
Tableau 38 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour chacun des objets 3D : pourcentage (2 ^e étude).....	112
Tableau 39 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G2 : Khi-carré (χ^2) et p -value (p) (2 ^e étude)	112

Tableau 40 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p) associée (2 ^e étude).....	115
Tableau 41 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p -value (p) ($ddl = 6$) (2 ^e étude) ...	116
Tableau 42 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération $G1$ et $G2$: Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p -value (p) (2 ^e étude).....	117
Tableau 43 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer par genre et comparaison : taux, Khi-carré et p -value (2 ^e étude)	118
Tableau 44 : Corrélation entre le score au test de rotation mentale (sur 16) et la perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value.....	118
Tableau 45 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer chez les enfants/adolescents concernés ou non par un risque de TDC et comparaison : taux, Khi-carré (ou son alternative le test exact de Fisher) et p -value (2 ^e étude)	119
Tableau 46 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : taux, Khi-carré (ou son alternative) et p -value (2 ^e étude).....	120
Tableau 47 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : taux, Khi-carré (ou son alternative) et p -value (2 ^e étude).....	121
Tableau 48 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical pour chacun des objets 3D : pourcentage (1 ^{ère} étude).....	130
Tableau 49 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical pour chacun des objets 3D : pourcentage (1 ^{ère} étude) ..	135
Tableau 50 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération $G2$ et $G3$: Khi-carré (χ^2) et p -value (p) associée (1 ^{ère} étude).....	136
Tableau 51 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p) (1 ^{ère} étude).....	139
Tableau 52 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p -value (p) ($ddl = 6$) (1 ^{ère} étude)	140
Tableau 53 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération $G2$ et $G3$: Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p -value (p) (1 ^{ère} étude).....	141
Tableau 54 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (1 ^{ère} étude)	148
Tableau 55 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (1 ^{ère} étude)	154
Tableau 56 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération $G1$ et $G4$ et $G2$ et $G4$: Khi-carré (χ^2) et p -value (p) (1 ^{ère} étude).....	155
Tableau 57 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles et planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p) (1 ^{ère} étude).....	158
Tableau 58 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles et planes par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p -value (p) ($ddl = 6$) (1 ^{ère} étude).....	159
Tableau 59 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération $G1$ et $G4$ et $G2$ et $G4$: Khi-carré (χ^2) et p -value (p) (1 ^{ère} étude)	161
Tableau 60 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets : pourcentage (2 ^e étude).....	162

Tableau 61 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D: pourcentage (2 ^e étude)	165
Tableau 62 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3, G2 et G4, G1 et G5 et G2 et G5 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) (2 ^e étude).....	167
Tableau 63 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles et planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p-value (p) (2 ^e étude).....	169
Tableau 64 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles et planes par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (2 ^e étude).....	170
Tableau 65 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3, G2 et G4, G1 et G5 et G2 et G5 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher) et p-value (p) (2 ^e étude).....	171
Tableau 66 : Taux de perception adéquate de chaque objet 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique : pourcentage (2 ^e étude)	185
Tableau 67 : Taux de perception inadéquate et de non-perception de chaque objet 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique : pourcentage (2 ^e étude).....	188
Tableau 68 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3, G2 et G4, et G3 et G4 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) (2 ^e étude).....	190
Tableau 69 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3, G2 et G4, et G3 et G4 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) (2 ^e étude).....	191
Tableau 70 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p-value (p) (2 ^e étude)...	194
Tableau 71 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (2 ^e étude).....	195
Tableau 72 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3 et G2 et G4 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher) et p-value (p) (2 ^e étude).....	196
Tableau 73 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (2 ^e étude).....	206
Tableau 74 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes : pourcentage (2 ^e étude).....	210
Tableau 75 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G2 et G6 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) (2 ^e étude).....	211
Tableau 76 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p-value (p) (2 ^e étude)	213
Tableau 77 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (2 ^e étude).....	214
Tableau 78 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G2 et G6 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) (2 ^e étude).....	215
Tableau 79 : Résumé des réponses aux différentes questions de recherche	227
Tableau 80 : Vérification de la normalité des scores de visualisation spatiale (sur 20) au total et par groupe : test de normalité de Shapiro-Wilk et p-value (p)	244
Tableau 81 : Score moyen de visualisation spatiale par objet 3D au départ de représentations virtuelles manipulables : score moyen (sur 4) et écart type	247
Tableau 82 : Score moyen de visualisation spatiale par type d'exercice au départ de représentations virtuelles manipulables : score moyen (sur 4) et écart type	248

Tableau 83 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par objet (sur 4) au départ de représentations virtuelles manipulables et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)	250
Tableau 84 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par type d'exercice (sur 5) au départ de représentations virtuelles manipulables et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)	252
Tableau 85 : Différence entre les taux de réussite des cinq objets 3D aux exercices de visualisation au départ de représentations virtuelles manipulables pour chaque type d'exercice et des quatre types d'exercice pour chaque objet 3D : Q de Cochran (Q) et p-value (p)	256
Tableau 86 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles manipulables pour les exercices de visualisation du cube : pourcentage d'occurrence	257
Tableau 87 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles manipulables pour les exercices de visualisation du cône : pourcentage d'occurrence	258
Tableau 88 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles manipulables pour les exercices de visualisation de la sphère : pourcentage d'occurrence	259
Tableau 89 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles manipulables pour les exercices de visualisation du cylindre : pourcentage d'occurrence	260
Tableau 90 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles manipulables pour les exercices de visualisation de l'anneau : pourcentage d'occurrence	261
Tableau 91 : Corrélation entre le taux de réussite par exercice au départ de représentations virtuelles manipulables et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p-value (p)	264
Tableau 92 : Score moyen de visualisation au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : score moyen (sur 20), U de Mann-Whitney (U) et p-value	266
Tableau 93 : Score moyen de visualisation au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : score moyen, U de Mann-Whitney (U) et p-value	267
Tableau 94 : Score moyen de visualisation spatiale par objet 3D chez les enfants/adolescents ayant ou non perçu adéquatement l'objet 3D : score moyen (sur 4), U de Mann-Whitney (U) et p-value	268
Tableau 95 : Comparaison des scores de visualisation (sur 20) entre G1 et G2 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	285
Tableau 96 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G2 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	285
Tableau 97 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G2 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	286
Tableau 98 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G2 et entre G3 et G4 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	286
Tableau 99 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par objet (sur 4) au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)	287
Tableau 100 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G2 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	288
Tableau 101 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par type d'exercice (sur 5) au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)	288
Tableau 102 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation du cube : pourcentage d'occurrence	291
Tableau 103 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation du cône : pourcentage d'occurrence	292
Tableau 104 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation de la sphère : pourcentage d'occurrence	293
Tableau 105 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation du cylindre : pourcentage d'occurrence	294

<i>Tableau 106 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation de l'anneau : pourcentage d'occurrence</i>	<i>296</i>
<i>Tableau 107 : Score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à observer par genre et comparaison : score moyen (sur 20), U de Mann-Whitney (U) et p-value</i>	<i>298</i>
<i>Tableau 108 : Corrélation entre le score au test de rotation mentale (sur 16) et le score de visualisation spatiale (sur 20) au départ de représentations virtuelles à observer : coefficient de corrélation de Bravais-Pearson (r) et p-value.....</i>	<i>298</i>
<i>Tableau 109 : Score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à observer chez les enfants/adolescents concernés ou non par un risque de TDC et comparaison : score moyen (sur 20), U de Mann-Whitney (U) et p-value</i>	<i>299</i>
<i>Tableau 110 : Score moyen de visualisation au départ de représentations virtuelles à observer chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : score moyen (sur 20), U de Mann-Whitney (U) et p-value</i>	<i>300</i>
<i>Tableau 111 : Score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : score moyen (sur 20), U de Mann-Whitney (U) et p-value</i>	<i>301</i>
<i>Tableau 112 : Score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer par objet 3D chez les enfants/adolescents ayant ou non perçu adéquatement l'objet 3D : score moyen (sur 4), U de Mann-Whitney (U) et p-value.....</i>	<i>302</i>
<i>Tableau 113 : Comparaison des scores de visualisation (sur 20) entre G1 et G5 et entre G2 et G5 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p) associé</i>	<i>309</i>
<i>Tableau 114 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G5 et entre G2 et G5 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p).....</i>	<i>310</i>
<i>Tableau 115 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G5 et entre G2 et G5 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p).....</i>	<i>310</i>
<i>Tableau 116 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G5 et entre G2 et G5 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p).....</i>	<i>311</i>
<i>Tableau 117 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par objet (sur 4) au départ de représentations virtuelles et planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)</i>	<i>312</i>
<i>Tableau 118 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G5 et entre G2 et G5 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)</i>	<i>313</i>
<i>Tableau 119 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par type d'exercice (sur 5) au départ de représentations virtuelles et planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)</i>	<i>314</i>
<i>Tableau 120 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation du cube : pourcentage d'occurrence</i>	<i>317</i>
<i>Tableau 121 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et planes pour les exercices de visualisation du cône : pourcentage d'occurrence.....</i>	<i>318</i>
<i>Tableau 122 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et planes pour les exercices de visualisation de la sphère : pourcentage d'occurrence.....</i>	<i>319</i>
<i>Tableau 123 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et planes pour les exercices de visualisation du cylindre : pourcentage d'occurrence.....</i>	<i>321</i>
<i>Tableau 124 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et planes pour les exercices de visualisation de l'anneau : pourcentage d'occurrence.....</i>	<i>323</i>
<i>Tableau 125 : Comparaison des scores de visualisation (sur 20) entre G1 et G3, G2 et G4 et entre G3 et G4 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p) associé.....</i>	<i>337</i>
<i>Tableau 126 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G3, G2 et G4 et entre G3 et G4 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)</i>	<i>338</i>
<i>Tableau 127 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G3 et entre G2 et G4 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p).....</i>	<i>339</i>
<i>Tableau 128 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par objet (sur 4) au départ de représentations virtuelles et de matériel physique et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p) 340</i>	

Tableau 129 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G3, G2 et G4 et entre G3 et G4 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p).....	341
Tableau 130 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par type d'exercice (sur 5) au départ de représentations virtuelles et de matériel physique et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)	343
Tableau 131 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G3, G2 et G4 et G3 et G4 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	344
Tableau 132 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour les exercices de visualisation du cube : pourcentage d'occurrence.....	348
Tableau 133 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour les exercices de visualisation du cône : pourcentage d'occurrence.....	349
Tableau 134 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour les exercices de visualisation de la sphère : pourcentage d'occurrence	350
Tableau 135 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour les exercices de visualisation du cylindre : pourcentage d'occurrence.....	351
Tableau 136 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour les exercices de visualisation de l'anneau : pourcentage d'occurrence.....	353
Tableau 137 : Comparaison des scores de visualisation (sur 20) entre G2 et G6 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	365
Tableau 138 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G2 et G6 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	366
Tableau 139 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G2 et G6 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	366
Tableau 140 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G2 et G6 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	367
Tableau 141 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par objet (sur 4) au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)	368
Tableau 142 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G2 et G6 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)	368
Tableau 143 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par type d'exercice (sur 5) au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)	369
Tableau 144 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour les exercices de visualisation du cube : pourcentage d'occurrence.....	371
Tableau 145 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour les exercices de visualisation du cône : pourcentage d'occurrence.....	372
Tableau 146 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour les exercices de visualisation de la sphère : pourcentage d'occurrence	373
Tableau 147 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour les exercices de visualisation du cylindre : pourcentage d'occurrence.....	374
Tableau 148 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour les exercices de visualisation de l'anneau : pourcentage d'occurrence.....	376
Tableau 149 : Résumé des réponses aux différentes questions de recherche	385

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Résumé de la 1^{ère} étude expérimentale</i>	27
<i>Figure 2 : Résumé de la 2^e étude expérimentale (1^{ère} partie : évaluation de la perception visuelle)</i>	28
<i>Figure 3 : Résumé de la 2^e étude expérimentale (2^e partie : évaluation de la visualisation spatiale)</i>	29
<i>Figure 4 : Répartition selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles manipulables (1^{ère} étude)</i>	37
<i>Figure 5 : Taux de perception inadéquate (avec ou sans le choix 3D attendu) au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)</i>	40
<i>Figure 6 : Répartition selon le nombre d'objets 3D inadéquatement perçus au départ de représentations virtuelles manipulables (1^{ère} étude)</i>	41
<i>Figure 7 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D (1^{ère} étude)</i>	46
<i>Figure 8 : Répartition selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles manipulables (2^e étude)</i>	57
<i>Figure 9 : Taux de perception inadéquate au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)</i>	60
<i>Figure 10 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D (2^e étude)</i>	62
<i>Figure 11 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal (1^{ère} étude)</i>	88
<i>Figure 12 : Taux de perception inadéquate (avec ou sans le choix 3D attendu) au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)</i>	89
<i>Figure 13 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal pour chacun des objets 3D (1^{ère} étude)</i>	94
<i>Figure 14 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer (2^e étude)</i>	109
<i>Figure 15 : Taux de perception inadéquate au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)</i>	111
<i>Figure 16 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour chacun des objets (2^e étude)</i>	114
<i>Figure 17 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal ou vertical (1^{ère} étude)</i>	132
<i>Figure 18 : Taux de perception inadéquate au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical pour chacun des objets 3D: pourcentage (1^{ère} étude)</i>	133
<i>Figure 19 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical pour chacun des objets 3D (1^{ère} étude)</i>	137
<i>Figure 20 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles et planes (1^{ère} étude)</i>	150
<i>Figure 21 : Taux de perception inadéquate (avec ou sans le choix 3D attendu) au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)</i>	152
<i>Figure 22 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D (1^{ère} étude)</i>	157
<i>Figure 23 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles et planes (1^{ère} étude)</i>	164
<i>Figure 24 : Taux de perception inadéquate au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)</i>	166
<i>Figure 25 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D (2^e étude)</i>	168

<i>Figure 26 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles et de matériel physique (2^e étude).....</i>	<i>187</i>
<i>Figure 27 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour chacun des objets 3D (2^e étude)</i>	<i>192</i>
<i>Figure 28 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes (2^e étude).....</i>	<i>208</i>
<i>Figure 29 : Taux de perception inadéquate au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude).....</i>	<i>209</i>
<i>Figure 30 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour chacun des objets 3D (2^e étude)</i>	<i>212</i>
<i>Figure 31 : Répartition du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables</i>	<i>245</i>
<i>Figure 32 : Évolution de la répartition des scores de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables et corrélation avec l'âge en jour</i>	<i>246</i>
<i>Figure 33 : Évolution du score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D.....</i>	<i>251</i>
<i>Figure 34 : Évolution du taux de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des types d'exercice.....</i>	<i>253</i>
<i>Figure 35 : Taux de réussite à chaque exercice de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables.....</i>	<i>254</i>
<i>Figure 36 : Illustrations d'erreurs types faisant écho à la confusion entre le point de vue extérieur et intérieur de l'objet 3D</i>	<i>277</i>
<i>Figure 37 : Illustrations de quelques erreurs faisant écho à une absence de prise en compte de la 3D.....</i>	<i>278</i>
<i>Figure 38 : Illustrations de quelques erreurs combinant confusion entre point de vue intérieur et extérieur et absence de prise en compte de la 3D</i>	<i>278</i>
<i>Figure 39 : Répartition du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer.....</i>	<i>282</i>
<i>Figure 40 : Évolution des répartitions du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer</i>	<i>284</i>
<i>Figure 41 : Taux de réussite à chaque exercice de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer</i>	<i>290</i>
<i>Figure 42 : Répartition du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes.....</i>	<i>307</i>
<i>Figure 43 : Évolution des répartitions du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes.....</i>	<i>308</i>
<i>Figure 44 : Taux de réussite à chaque exercice de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes.....</i>	<i>315</i>
<i>Figure 45 : Répartition du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique</i>	<i>334</i>
<i>Figure 46 : Évolution des répartitions du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique</i>	<i>336</i>
<i>Figure 47 : Taux de réussite à chaque exercice de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique</i>	<i>345</i>
<i>Figure 48 : Répartition du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D.....</i>	<i>363</i>
<i>Figure 49 : Évolution des répartitions du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à observer et de successions de représentations 2D par tranche d'âge.....</i>	<i>365</i>
<i>Figure 50 : Taux de réussite à chaque exercice de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes.....</i>	<i>370</i>
<i>Figure 51 : Cas de non-correspondance entre le dessin et le nom</i>	<i>390</i>

PARTIE III : ÉTUDES
EXPÉRIMENTALES –
RÉSULTATS ET
DISCUSSIONS

Introduction de la partie III

Au sein du premier volume, la première partie de ce travail a d'abord permis de fournir les fondements théoriques nécessaires à la définition de la problématique et des questions de recherche et à la compréhension des choix méthodologiques réalisés. Ces éléments ont d'ailleurs été décrits dans la deuxième partie de ce travail, proposée également dans le premier volume. Nous rappelons ci-dessous les éléments clés s'y rapportant afin de guider le lecteur dans le passage entre les deux volumes.

Comme évoqué au travers du premier volume, cette recherche vise à apporter des éléments de réponse à deux questions de recherche principales, se rapportant chacune à l'évaluation du niveau de maîtrise d'une habileté spatiale en environnement virtuel. La première porte sur l'habileté de perception visuelle des objets 3D, autrement dit la capacité à se représenter mentalement des objets 3D au départ de leur représentation virtuelle. La deuxième porte sur l'habileté de visualisation spatiale, autrement dit la capacité à mener des opérations mentales sur de telles représentations d'objets 3D.

De manière exploratoire, étant donné l'absence d'études antérieures menées sur ces habiletés et ce public cible dans les environnements virtuels, et de façon à pouvoir affiner la réponse apportée à ces deux questions de recherche principales, celles-ci sont décomposées en plusieurs questions de recherche spécifiques, rappelées au sein du Tableau 1. Une première question de recherche spécifique porte sur le niveau de maîtrise de l'habileté au départ de représentations virtuelles manipulables par l'individu. Plusieurs autres questions de recherche sont formulées dans une perspective comparative en investiguant l'effet de certaines variables (ex. manipulation) sur les habiletés lorsqu'elles sont évaluées au départ de représentations virtuelles, ou en investiguant les différences avec d'autres modalités de présentation des objets 3D (matériel physique, représentations planes...). Les réponses à ces questions de recherche permettent donc d'appréhender de manière plus complète le fonctionnement cognitif en environnement virtuel en ayant notamment des points de comparaison avec d'autres modalités de présentation d'objets 3D.

Pour apporter des éléments de réponse à ces questions de recherche, deux études expérimentales complémentaires ont été menées auprès de plus de six cents enfants et adolescents. Celles-ci proposent d'analyser le niveau de maîtrise des habiletés auprès de groupes indépendants d'enfants et d'adolescents confrontés à différentes modalités de présentation des objets 3D.

Tableau 1 : Rappel des questions de recherche portant sur l'habileté de perception¹

	Questions de recherche spécifiques	Étude 1	Étude 2
1° Les enfants et les adolescents âgés arrivent-ils à percevoir visuellement les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle (2 ½ D) ?	1.1° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) manipulable de ces objets ?	✓	✓
	1.2° La manipulation de représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D par les enfants ou les adolescents impacte-t-elle leur capacité à percevoir visuellement ces objets ?	✓	✓
	1.3° L'orientation du support sur lequel les représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D sont présentées aux enfants ou aux adolescents impacte-t-elle leur capacité à percevoir visuellement ces objets ?	✓	
	1.4° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ d'une représentation plane (2D) ?	✓	✓
	1.5° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ de matériel physique (3D) ?		✓
	1.6° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ d'une succession de représentations planes (2D's) ?		✓
2° Les enfants et les adolescents arrivent-ils à faire preuve de visualisation spatiale sur des objets 3D au départ de leur représentation virtuelle (2 ½ D) ?	2.1° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) manipulable de ces objets ?		✓
	2.2° La manipulation des représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D par les enfants ou les adolescents impacte-t-elle leur capacité à faire preuve de visualisation spatiale sur ces objets ?		✓
	2.3° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) comme au départ d'une représentation plane (2D) ?		✓
	2.4° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) comme au départ de matériel physique (3D) ?		✓
	2.5° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) comme au départ d'une succession de représentations planes (2D's) ?		✓

La première de ces études se focalise uniquement sur l'habileté de perception visuelle des objets 3D. Comme le rappelle le Tableau 1, cette étude apporte ainsi des éléments de réponse à la première question de recherche principale et plus

¹ Le code couleur utilisé dans ce tableau est repris en marge des pages tout au long des chapitres 9 et 10 pour guider le lecteur dans sa prise de connaissance des résultats.

particulièrement à quatre des six questions de recherche spécifiques puisqu'elle se focalise sur l'évaluation de la perception visuelle des objets 3D au départ des représentations virtuelles (à manipuler, à observer sur support horizontal et à observer sur support vertical) et planes. La Figure 1, déjà présentée dans le premier volume, offre un résumé de cette première étude expérimentale. Nous invitons le lecteur à (re)prendre connaissance de cette figure pour se remémorer la méthodologie de l'étude lors de la lecture de ce second volume dès que cela s'avère nécessaire pour lui.

La seconde étude évalue les deux habiletés spatiales investiguées dans cette recherche. Les deux habiletés y sont évaluées au départ de six modalités de présentation des objets 3D : au départ de représentations virtuelles (à manipuler ou à observer uniquement), de représentations planes, de matériel physique (à manipuler ou à observer uniquement) et de successions de représentations planes. Cette seconde étude permet alors d'apporter des éléments de réponse aux deux questions de recherche principales. Plus spécifiquement, elle apporte des éléments de réponse à cinq des six questions de recherche spécifiques relatives à la première habileté, qui viennent donc compléter et affiner certaines réponses apportées à l'issue de la première étude. D'autant que la modalité d'évaluation a été adaptée tout comme certaines variables secondaires investiguées, ce qui permet une complémentarité des résultats. En plus, la seconde étude permet d'apporter des éléments de réponse à la deuxième question de recherche ainsi qu'à l'ensemble des questions de recherche spécifiques qui s'y rapportent. La seconde étude expérimentale est illustrée par la Figure 2 (pour la perception visuelle de la 3D) et la Figure 3 (pour la visualisation spatiale). Celles-ci peuvent aussi servir d'appui, à tout moment, lors de la lecture de ce second volume.

Cette troisième partie présente les résultats de ces deux études. Elle est composée de deux chapitres. Étant donné la particularité des deux études mais surtout au vu de leur complémentarité, la structure de la présentation des résultats proposée au travers de cette troisième partie n'est pas une structure par étude expérimentale. De façon à mettre en avant cette complémentarité, à favoriser la mise en relation des résultats des deux études et à apporter des réponses claires et distinctes aux deux questions de recherche principales qui balisent ce travail, la structure de présentation des résultats est une structure par habileté spatiale. Ainsi, le chapitre 9 présente et discute les résultats relatifs à l'habileté de perception visuelle des objets 3D. Il contient donc les

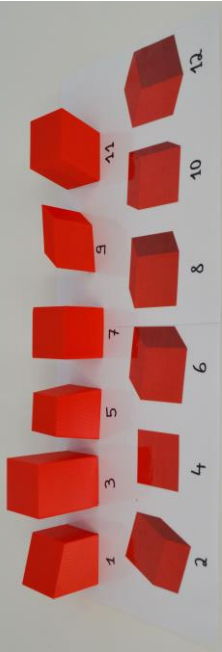
résultats de la première étude ainsi qu'une partie de ceux de la seconde étude. Le chapitre 10 se focalise quant à lui sur les résultats relatifs à l'habileté de visualisation spatiale. Ce dernier présente puis discute, pour ce faire, une partie des résultats obtenus au travers de la seconde étude.

S'en suivra finalement, pour clôturer ce travail de thèse, une quatrième partie portant sur les apports des résultats pour d'une part le domaine de la psychologie mais aussi pour la réflexion sur l'enseignement-apprentissage.

Objectif général : Évaluer le niveau de maîtrise de l'habileté de **perception visuelle** d'objets 3D au départ de représentations virtuelles auprès d'enfants et d'adolescents

Tâche de reconnaissance (avec choix multiple) + justification (7 exercices)

3 cas de figure :



- perception adéquate de l'objet 3D (choix 3D attendu + ~~autre choix 3D~~ + éventuel choix 2D)
- perception inadéquate de l'objet 3D (choix 3D non attendu avec ou sans le choix 3D attendu)
- non-perception de l'objet 3D (choix 2D uniquement) **!** A nuancer (analyse des justifications)

VARIABLES PRINCIPALES :

1) La modalité de représentation des objets 3D

Dimensionnalité	Représentations 2 ½ D		Représentations 2D
Manipulation/observation	À manipuler	À observer uniquement	Par définition, à observer uniquement
Orientation du support	Support horizontal	Groupe 1 N = 158 1.1°	Groupe 2 N = 157 1.3° Groupe 3 N = 166 1.4° Groupe 4 N = 159
	Support vertical		

2) L'âge des participants : 6 à 15 ans répartis en cinq tranches d'âge (6-7 ans...)

3) Les objets 3D : 1 exercice = 1 solide



VARIABLES SECONDAIRES :

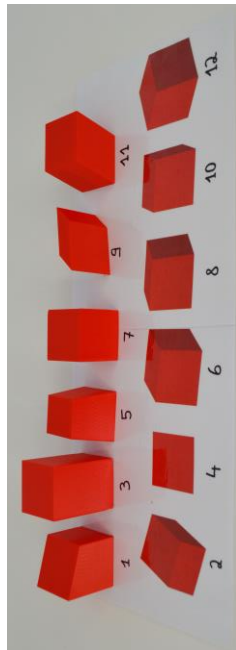
Récolte d'informations auprès des parents, de l'enseignant et du participant :

- Genre
- Niveau des processus perceptifs de base (score aux trois subtests de la BORB)
- Capacité de distinction des teintes de couleurs présentes dans les représentations
- Suspicion d'un trouble développemental de la coordination suspecté (résultats au DCDC-FE)
- Habitudes et pratiques régulières (utilisation d'un appareil tactile, jeux vidéo, jeux de construction, jeux de puzzle, pratique d'un sport, pratique d'un instrument de musique)
- Niveau scolaire et expérience antérieure en géométrie 3D (apprentissage de la géométrie 3D cette année, expérience avec la modalité de représentation des solides, expérience avec la tâche de perception visuelle)

Figure 1 : Résumé de la 1^{ère} étude expérimentale

Objectif général : Évaluer le niveau de maîtrise de l'habileté de **perception visuelle** d'objets 3D au départ de représentations virtuelles auprès d'enfants et d'adolescents

Tâche de reconnaissance (avec choix unique) + justification (7 exercices)



3 cas de figure :

- perception adéquate de l'objet 3D (choix 3D attendu)
- perception inadéquate de l'objet 3D (choix 3D non attendu)
- non-perception de l'objet 3D (choix 2D uniquement)



A nuancer (analyse des justifications)

VARIABLES PRINCIPALES :

1) La modalité de représentation des objets 3D :



2) L'âge des participants : 6 à 15 ans répartis en cinq tranches d'âge (6-7 ans...)

3) Les objets 3D : 1 exercice = 1 solide



VARIABLES SECONDAIRES :

Récolte d'informations auprès des parents, de l'enseignant et du participant :

- Genre
- Niveau de rotation mentale
- Suspicion d'un trouble développemental de la coordination suspecté (résultats au DCDQ-FE)
- Habitudes et pratiques régulières (utilisation d'un appareil tactile, jeux vidéo, jeux de construction, jeux de puzzle, pratique d'un sport, pratique d'un instrument de musique)
- Niveau scolaire et expérience antérieure en géométrie 3D (apprentissage de la géométrie 3D cette année, expérience avec la modalité de représentation des solides, expérience avec la tâche de perception visuelle)

Figure 2 : Résumé de la 2^e étude expérimentale (1^{ère} partie : évaluation de la perception visuelle)

Objectif général 2 : Évaluer le niveau de maîtrise de l'habileté de **visualisation spatiale** sur les objets 3D au départ de représentations virtuelles (2 ½ D) auprès d'enfants et d'adolescents

Tâche de dessin de formes d'empreinte et de coupe d'objets 3D (20 exercices)

Empreinte :
solide présenté seul



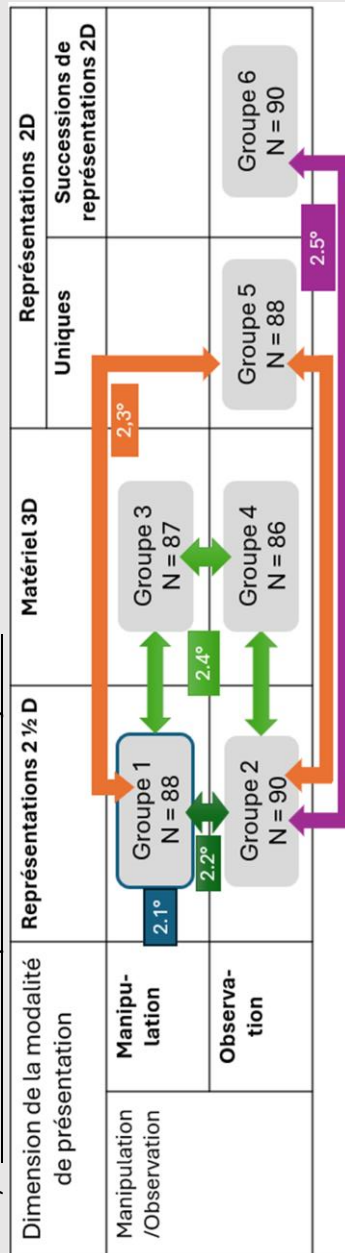
Coupe :

solide présenté avec un couteau s'appêtant à le couper



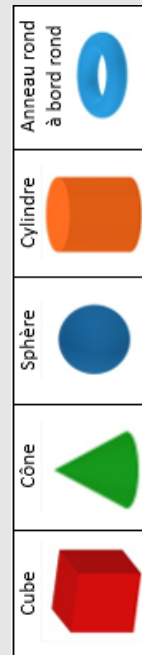
VARIABLES PRINCIPALES :

1) La modalité de représentation des objets 3D



2) L'âge des participants : Conservation des enfants/adolescents de 8 ans et plus

3) Les objets 3D :



4) Les types d'exercice : 4 exercices par objet 3D : empreinte, coupe transversale, coupe longitudinale, coupe oblique

VARIABLES SECONDAIRES :

Récolte d'informations auprès des parents, de l'enseignant et du participant :

- Genre
- Niveau de rotation mentale
- Habitudes et pratiques régulières (utilisation d'un appareil tactile, jeux vidéo, jeux de construction, jeux de puzzle, pratique d'un sport, pratique d'un instrument de musique)
- Expérience antérieure en géométrie 3D (apprentissage de la géométrie 3D cette année, expérience avec la modalité de représentation des solides, expérience avec la tâche de perception visuelle)
- Perception des objets 3D

Figure 3 : Résumé de la 2^e étude expérimentale (2^e partie : évaluation de la visualisation spatiale)

Chapitre 9. Résultats relatifs à l'habileté de perception visuelle de la 3D

Chapitre 9. Résultats relatifs à l'habileté de perception visuelle de la 3D²

Ce premier chapitre de présentation des résultats se focalise sur la première habileté investiguée, c'est-à-dire l'habileté de perception visuelle de la 3D. Comme rappelé précédemment, cette habileté est investiguée lors d'une première étude, à l'aide d'une tâche de reconnaissance (choix multiple) d'objets 3D auprès d'enfants et d'adolescents confrontés à des représentations 2 ½ D à manipuler, à des représentations 2 ½ D à observer sur support placé à l'horizontale et à la verticale, mais aussi à des représentations planes. Ensuite, elle est étudiée au travers de la seconde étude auprès d'enfants et d'adolescents toujours confrontés à des représentations en 2 ½ D à manipuler et à observer et à des représentations 2D mais aussi à du matériel physique 3D et à une succession de représentations 2D lors d'une même tâche de reconnaissance (mêmes objets 3D et mêmes propositions) mais imposant cette fois un choix unique aux participants. Elle investigate par ailleurs certaines variables secondaires communes à la première étude mais aussi une nouvelle variable secondaire, le niveau de rotation mentale. Ces points communs et spécificités les rendent complémentaires, ce qui permet à la seconde étude de compléter, voire d'affiner les résultats de la première.

Toujours dans une même optique de capitalisation sur la complémentarité des études et sur la mise en évidence claire des éléments de réponse à chacune des questions de recherche spécifiques, la structure interne proposée au sein de ce chapitre est une structure par question de recherche spécifique et non par étude. Ainsi, les résultats permettant d'apporter des éléments de réponse à chacune des questions de recherche spécifiques sont tour à tour présentés. Ce chapitre s'organise donc en six temps, correspondant chacun à une des six questions de recherche spécifiques.

Quand les deux études permettent d'apporter des éléments de réponse à la question de recherche spécifique (questions 1.1°, 1.2° et 1.4°), les résultats obtenus à la première étude sont d'abord présentés et sont suivis de la présentation des résultats relatifs à la seconde étude. Une discussion commune est alors finalement proposée pour apporter des éléments de réponse à la question de recherche spécifique au regard

² Une partie des résultats présentés dans ce chapitre a fait l'objet de publications : Beuset et Duroisin (2024) pour la 1^{ère} étude expérimentale ; Beuset et Duroisin (2023a) pour la 2^e étude.

des résultats obtenus dans les deux études. *A contrario*, quand une seule étude permet d'apporter des réponses à la question de recherche (questions 1.3°, 1.5° et 1.6°), les résultats qui s'y rapportent sont présentés puis directement discutés.

Les résultats des deux études sont donc présentés en se focalisant, pour chaque question de recherche spécifique, uniquement sur les données qui permettent d'apporter des éléments de réponse à la question de recherche, autrement dit, en se focalisant sur les données relatives au(x) groupe(s) concerné(s) par la question.

Pour finir, après la présentation et la discussion des résultats relatifs à chacune des questions de recherche spécifique, une discussion commune globale est proposée afin de revenir sur la question de recherche principale. Ce temps de discussion est également l'occasion de mettre en avant les limites aux études menées ainsi que leurs prolongements éventuels.

Que les résultats présentés proviennent de la première ou de la seconde étude, la structure de leur présentation reste identique. Étant donné l'absence de consistance interne observée entre les exercices, les résultats obtenus pour chacun des exercices, et donc pour chacun des objets 3D, sont présentés. Ils se focalisent d'abord sur les cas de perception adéquate et s'intéressent ensuite, en vue de comprendre les difficultés rencontrées, aux cas de perception inadéquate et de non-perception. Dans un second temps, la variable « âge » est prise en considération dans les analyses menées afin d'identifier son influence potentielle sur la perception des différents objets 3D. Sur toutes ces données, des statistiques descriptives et inférentielles sont proposées au départ des différents taux de perception obtenus. Rappelons que l'ensemble des tests inférentiels réalisés sont des tests à deux issues avec un seuil de significativité de 0,05. Enfin, dans les groupes confrontés aux représentations virtuelles, les analyses sont menées en prenant en considération les variables secondaires, afin d'identifier si elles sont susceptibles d'influencer ou non les capacités de perception. L'analyse de l'influence des variables secondaires sur les capacités de perception est réalisée uniquement sur trois des sept objets 3D : le cube, la sphère et le prisme. Le choix s'est porté sur ces deux premiers objets puisque ceux-ci sont deux des premiers objets rencontrés dans le parcours scolaire en géométrie 3D, comme en attestent les prescrits belges francophones (*cf.* 4.1.7.2, volume 1). Par ailleurs, le choix s'est porté également sur le troisième objet puisqu'il s'agit d'un objet 3D qui semble poser davantage de difficultés.

9.1. Réponse à la question de recherche 1.1° : perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables

Pour rappel, pour apporter des éléments de réponse à cette première question de recherche, les résultats obtenus auprès du premier groupe de chacune des deux études sont successivement présentés, ces deux groupes étant confrontés à des représentations virtuelles à manipuler sur tablette. Ces résultats sont ensuite discutés, notamment en pointant les différences observées entre les deux études pour affiner la compréhension du niveau de maîtrise de l'habileté chez les enfants et les adolescents.

9.1.1. Résultats relatifs à la première étude expérimentale (groupe 1)

9.1.1.1. Perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables (toutes tranches d'âge confondues)

Le taux de perception adéquate associé à chacun des objets 3D, présenté au sein du Tableau 2, varie entre 48,1% et 83,5%. La perception adéquate n'est donc systématique pour aucun des objets 3D investigués, même pour des objets tels que le cube. Le prisme (prisme droit à base triangulaire³) est l'objet 3D, parmi les sept évalués, pour qui le taux de perception adéquate est le plus faible. Il est perçu adéquatement par moins de la moitié des participants. Attention toutefois que c'est l'objet 3D qui, avec l'anneau droit (anneau rond à bord droit³⁵), compte le plus de propositions. Inversement, la sphère, qui est l'objet 3D qui compte le moins de propositions, est celui dont le taux de perception adéquate est le plus élevé. Toutefois, près de deux participants sur dix ne le perçoivent pas adéquatement. En revanche, des solides comme le cube obtiennent un taux de réussite plus élevé (75,3%) malgré la présence d'un grand nombre de propositions.

Tableau 2 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
71,5%	65,2%	83,5%	48,1%	75,3%	75,3%	67,7%

³ Dans la présentation des résultats, la terminologie « prisme » est utilisée en référence au prisme droit à base triangulaire. De même, les terminologies « anneau rond » et « anneau droit » sont utilisées respectivement pour évoquer l'objet 3D « anneau rond à bord rond » et l'objet 3D « anneau rond à bord droit ».

Si les analyses descriptives, au vu des écarts observés entre les taux de perception adéquate, permettent de suspecter l'existence de différences entre objets 3D, un test *Q de Cochran* est utilisé pour vérifier si les chances de maîtrise de la perception sont les mêmes entre les sept objets 3D. Les résultats de ce test inférentiel confirment l'existence de différences significatives entre les taux de perception adéquate des sept objets ($Q = 68,612$; $p\text{-value} < 0,001$). Pour aller plus loin dans l'identification des différences entre objets 3D, des *tests de McNemar* sont utilisés pour identifier si des différences significatives sont observées entre le taux de perception adéquate des objets 3D deux à deux. Les résultats de ces tests inférentiels sont placés en annexe (Annexe 20). Ceux-ci indiquent que, sur les 21 paires d'objets 3D, des différences significatives apparaissent pour 11 paires d'objets 3D. Parmi celles-ci, le taux relatif au prisme, qui pour rappel est le taux de perception adéquate le plus faible, apparaît significativement différent de celui obtenu pour chacun des autres objets 3D. La sphère, qui est à l'inverse l'objet le plus souvent perçu adéquatement, se distingue elle aussi significativement de tous les autres objets sauf du cube ($K = 3,200$; $p\text{-value} = 0,074$) et de l'anneau rond ($K = 3,064$; $p\text{-value} = 0,074$), bien que les résultats soient proches du seuil de significativité.

De manière à compléter les résultats relatifs à chaque objet 3D, la Figure 4 présente la répartition des participants selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus. Elle permet d'illustrer que le pourcentage de participants ayant perçu adéquatement l'ensemble des objets 3D investigués est de 23,4%. Inversement, la part d'individus n'ayant perçu adéquatement aucun des sept objets 3D apparaît presque nulle. Au vu de ces résultats, il est donc possible de considérer que la perception adéquate des objets 3D n'est majoritairement pas dichotomique (totalement acquise ou pas du tout acquise). Elle est, le plus souvent, partiellement acquise dans la mesure où la majorité des participants perçoivent adéquatement au moins quelques-uns des objets 3D représentés. De plus, les résultats indiquent que plus de 50% des participants ont perçu adéquatement au moins cinq objets 3D sur les sept proposés. La perception des objets 3D au départ de leur représentation 2 ½ D à manipuler n'est pour autant pas totalement acquise pour tous les enfants et les adolescents et peut poser des difficultés à certains d'entre eux qui n'arrivent à percevoir adéquatement qu'un nombre réduit d'objets 3D, même si la majorité des participants arrivent à percevoir adéquatement une grande partie des objets 3D proposés.

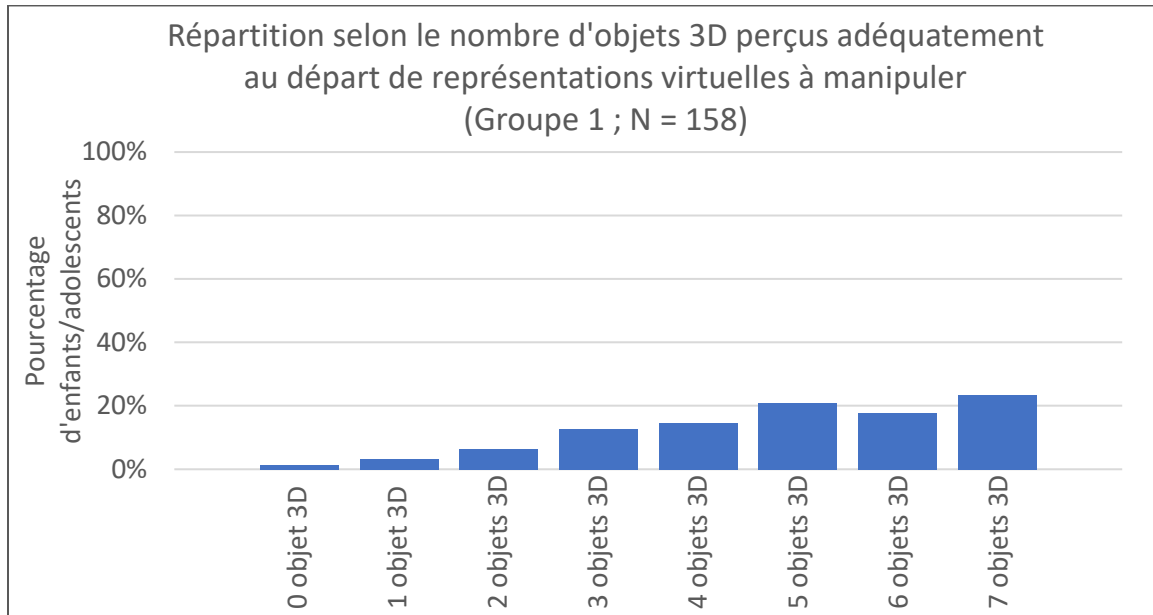


Figure 4 : Répartition selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles manipulables (1^{ère} étude)

Les différences entre les taux de perception adéquate de chacun des objets 3D laissent sous-entendre que certains d'entre eux posent plus de difficultés que d'autres et qu'aucun n'est systématiquement adéquatement perçu. Il apparaît cependant important, compte tenu de la maîtrise partielle observée, de poursuivre les investigations afin d'identifier si des régularités sont constatées entre les participants au niveau des objets 3D perçus adéquatement ou non. Par exemple, il s'agit de vérifier si, lorsque les participants perçoivent adéquatement six objets 3D sur les sept, l'objet qui n'est pas perçu adéquatement est systématiquement le même ou non. Le Tableau 3 décrit justement le pourcentage de participants percevant adéquatement chacun des objets 3D lorsque six objets sur sept sont adéquatement perçus et lorsqu'un seul objet sur sept est adéquatement perçu⁴. Les cas intermédiaires, dans lesquels entre deux et cinq objets 3D sont adéquatement perçus, sont placés en annexe (Annexe 21).

Face à des représentations virtuelles à manipuler, quand un seul objet n'est pas adéquatement perçu, ce n'est jamais le cube ni l'anneau droit. C'est le prisme pour plus d'un participant sur deux (53,6%) alors que c'est plus rarement les autres objets 3D. Inversement, lorsqu'un seul des sept objets 3D est perçu adéquatement, ce n'est jamais le cône, le prisme et les anneaux. Dans les cas intermédiaires (2 à 5 objets 3D adéquatement perçus), les objets 3D bien perçus sont variables selon les participants.

⁴ Dans le tableau, les éléments systématiquement adéquatement perçus sont indiqués en vert tandis que les éléments n'étant jamais adéquatement perçus sont indiqués en orange.

Dans la quasi-totalité des cas, aucun objet n'est systématiquement perçu et aucun ne l'est pas. La sphère fait partie des objets 3D les plus régulièrement perçus adéquatement mais sa perception n'est pas systématique. Elle est toujours perçue adéquatement par plus de sept participants sur dix. Le prisme apparaît quant à lui plutôt rarement adéquatement perçu. Ces résultats permettent donc de pointer la présence d'irrégularités entre les individus puisque les objets qui posent des difficultés varient selon les participants. Ce ne sont pas systématiquement les mêmes objets qui posent des difficultés, bien que certains en posent plus régulièrement que d'autres.

Tableau 3 : Pourcentage d'enfants/adolescents percevant adéquatement chaque objet 3D quand 6 objets sur 7 sont adéquatement perçus et quand 1 objet sur 7 est adéquatement perçu au départ de représentations virtuelles manipulables (1^{ère} étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Quand 6 objets 3D sont adéquatement perçus (N = 28)	89,3%	85,7%	85,7%	46,4%	92,9%	100,0%	100,0%
Quand 1 objet 3D seulement est adéquatement perçu (N = 5)	20,0%	0,0%	40,0%	0,0%	0,0%	40,0%	0,0%

Enfin, l'irrégularité observée entre les objets invite à investiguer aussi les corrélations entre la perception adéquate des différents objets 3D. Pour ce faire, puisque les corrélations portent sur des données dichotomiques (avoir ou non perçu l'objet 3D), des *coefficients Phi* ont été calculés. Les résultats de ces coefficients de corrélation, présentés au sein du Tableau 4⁵, montrent que de nombreuses corrélations calculées peuvent être considérées comme nulles ou négligeables. C'est le cas entre la sphère et l'ensemble des autres objets 3D, ou entre l'anneau rond et l'ensemble des objets 3D excepté l'autre anneau. C'est le cas également entre le prisme et le cube. Ceci confirme bien la présence d'irrégularités entre les comportements perceptifs aux exercices. Des corrélations non nulles et positives sont cependant observées pour les autres paires d'objets 3D, mais les indices obtenus montrent que celles-ci sont majoritairement faibles. Les corrélations entre la perception adéquate du cône et du

⁵ Dans l'ensemble du manuscrit, les interprétations des coefficients de corrélation sont réalisées au regard de l'échelle d'interprétation proposée par Dancy et Reidy (2004) :

- Corrélation nulle ou négligeable : $0,01 \leq |\rho| \leq 0,19$;
- Corrélation faible positive ou négative : $0,20 \leq |\rho| \leq 0,29$;
- Corrélation modérée positive ou négative : $0,30 \leq |\rho| \leq 0,39$;
- Corrélation forte positive ou négative : $0,40 \leq |\rho| \leq 0,69$;
- Corrélation très forte positive ou négative : $0,70 \leq |\rho| \leq 1$

Le code couleur présenté ci-dessus sera proposé au sein de l'ensemble des tableaux présentant des corrélations

cylindre ($\Phi = 0,334$) mais aussi entre celle du prisme et de l'anneau droit ($\Phi = 0,312$) apparaissent modérées. Enfin, une corrélation plus forte unit les deux anneaux ($\Phi = 0,484$).

Tableau 4 : Corrélation entre la perception adéquate des différents objets 3D deux à deux : coefficient phi (Φ) et p-value associée (1^{ère} étude)

		Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Cylindre	Φ	0,334	0,023	0,243	0,192	0,224	0,254
	p-value	< 0,001**	0,777	0,002**	0,016*	0,005**	0,001**
Cône	Φ		0,070	0,251	0,167	0,290	0,263
	p-value		0,380	0,002**	0,036*	< 0,001**	< 0,001**
Sphère	Φ			0,086	0,102	0,142	0,132
	p-value			0,282	0,199	0,075	0,098
Prisme	Φ				0,140	0,199	0,312
	p-value				0,079	0,013*	< 0,001**
Anneau rond	Φ					0,047	0,484
	p-value					0,557	< 0,001**
Cube	Φ						0,233
	p-value						0,003**

En croisant les résultats aux tests de McNemar et les corrélations calculées, certaines paires d'objets 3D obtiennent des taux pouvant être considérés comme équivalents sans pour autant que la corrélation entre les deux ne soit positive. Cela revient à souligner que, malgré les taux de perception semblables, ce ne sont pas forcément les mêmes participants qui ont réussi les deux exercices. C'est par exemple le cas entre l'anneau rond et le cylindre ou entre l'anneau rond et la sphère. Cela confirme donc qu'au-delà d'une irrégularité chez les individus, illustrée par l'observation d'une maîtrise partielle de l'habileté chez la plupart des participants, une irrégularité entre les individus est aussi constatée. Pour autant, pour le cas des deux anneaux, en plus d'obtenir des taux de perception statistiquement équivalents, une corrélation forte est constatée, montrant une certaine proximité au niveau des résultats obtenus entre ces deux objets. Une même tendance est observée pour la paire « cylindre-cône » même si la corrélation est modérée.

Inversement, même si des différences sont parfois constatées entre la perception adéquate de certains objets 3D, il arrive qu'elles soient positivement corrélées. C'est le cas par exemple pour l'anneau droit et le prisme. Dans ces cas, malgré les différences de taux de perception adéquate, des comportements identiques sont observés chez davantage d'individus à ces deux exercices. Enfin, il arrive évidemment à plusieurs

reprises que des objets 3D obtiennent des taux de perception différents et non corrélés (ex. entre la sphère et le cône ou entre la sphère et le cylindre).

Quand ils ne sont pas perçus adéquatement, les participants peuvent avoir sélectionné une ou plusieurs propositions 3D ne correspondant pas à l'objet présenté (perception inadéquate). Lorsqu'on s'intéresse aux fréquences de ces cas de figure chez les différents objets 3D, des différences parfois importantes entre objets 3D sont à nouveau observées comme l'illustre la Figure 5.

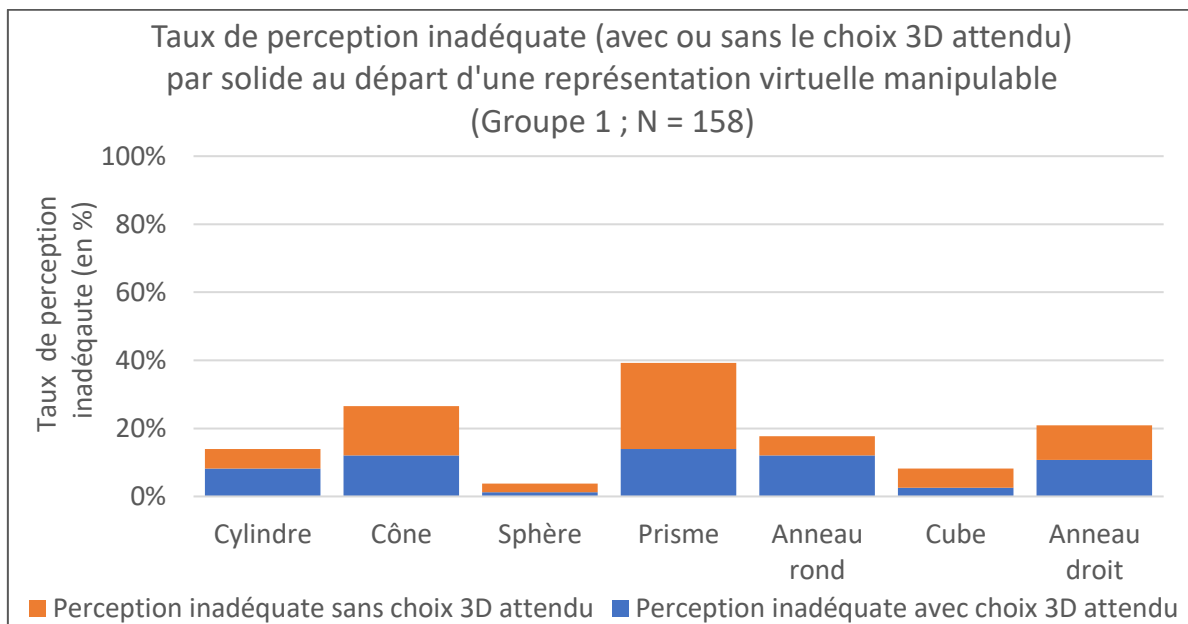


Figure 5 : Taux de perception inadéquate (avec ou sans le choix 3D attendu) au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

Au niveau des taux de participants ayant choisi une ou plusieurs propositions 3D non attendues en plus de la proposition 3D attendue, la sphère et le cube sont les objets pour lesquels ce taux est le moins fréquent, d'une valeur proche de 0. Entre les autres objets 3D, il y a finalement peu de différences quant au pourcentage de participants situés dans ce cas de figure, qui avoisine 10%. Concernant le second cas de figure, lorsqu'au moins un objet 3D non attendu est choisi sans l'objet 3D attendu, des résultats un peu différents sont observés. La sphère obtient le taux le plus faible tandis que celui relatif au prisme est le plus élevé.

Au cumul des deux cas de figure, le prisme est l'objet 3D pour lequel la perception de l'objet 3D est le plus souvent inadéquate, avec un taux de perception inadéquate se rapprochant de 40%. Cela signifie donc qu'environ quatre enfants ou adolescents sur

dix confrontés à une représentation virtuelle du prisme à manipuler sélectionnent un objet 3D différent de l'objet présenté.

Comme l'illustre la répartition de ce cas de figure entre les différents exercices (Figure 6), près de 40% des participants ne sélectionnent de proposition 3D non attendues pour aucun des sept exercices au départ de représentations virtuelles, ce qui signifie que, *a contrario*, près de 60% des participants font ce type de choix pour au moins un des sept exercices. Toutefois, le nombre de participants diminue quand ces choix deviennent plus fréquents. D'ailleurs, aucun participant ou presque ne sélectionne de proposition 3D non attendue dans plus de quatre des sept exercices. L'analyse de la répartition indique que la sélection d'une ou plusieurs propositions 3D non attendues sans l'objet 3D attendu se produit pour au moins un des sept exercices chez environ 48,1% des participants confrontés à des représentations virtuelles à manipuler. En contrepartie, la sélection d'une ou plusieurs propositions 3D non attendues en plus de l'objet 3D attendu se produit au moins dans un des sept exercices pour 30% des participants.

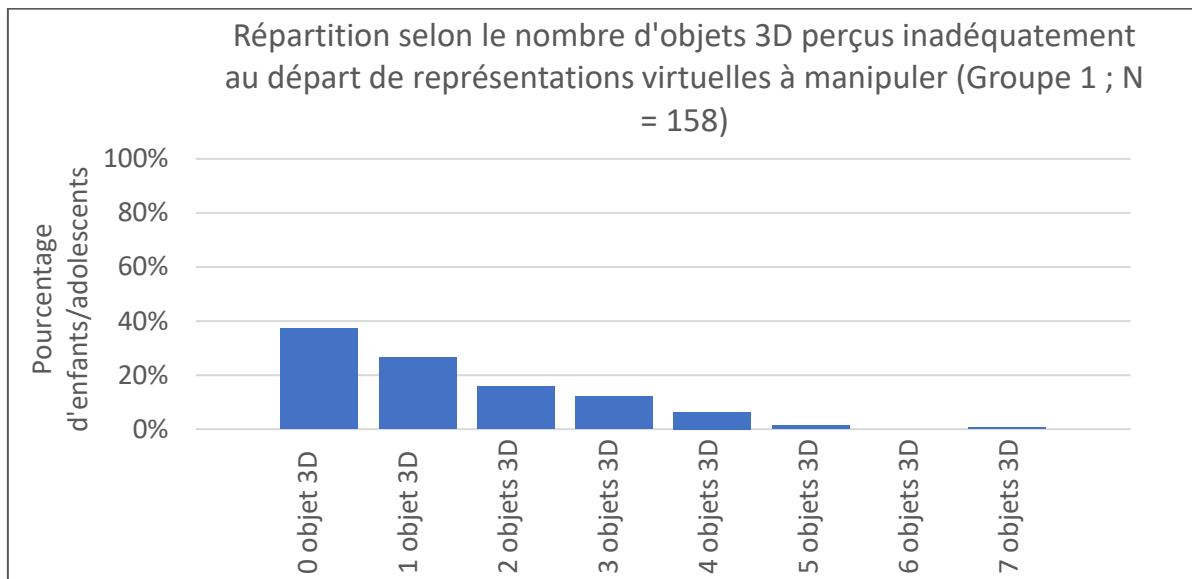


Figure 6 : Répartition selon le nombre d'objets 3D inadéquatement perçus au départ de représentations virtuelles manipulables (1^{ère} étude)

Afin d'analyser plus en détail les propositions 3D non attendues les plus souvent sélectionnées, l'annexe 23 présente, pour chaque objet 3D, la fréquence de sélection de chacune d'elles pour l'échantillon total. Il ressort donc de ces taux de sélection que, pour tous les objets 3D excepté le cube, la proposition 3D la plus fréquemment choisie parmi les propositions 3D non attendues est celle relative à l'objet dont la hauteur a

été modifiée. Cela signifie que, excepté pour cet objet 3D, l'erreur la plus fréquente, lorsqu'il y a perception inadéquate, est de sélectionner un élément proche, partageant de nombreuses caractéristiques avec l'objet présenté mais pour lequel les proportions ne sont pas respectées. Par exemple, pour le cylindre, qui est un cylindre droit à base ronde, cette proposition renvoie aussi à un cylindre droit à base ronde, même si ce dernier n'a pas la même hauteur. Des éléments explicatifs relatifs à cette observation seront apportés en discussion. Néanmoins, la fréquence de ce choix est variable. À titre d'illustration, elle vaut 25,9% pour le cône et 21,5% pour le prisme mais ne vaut que 3,8% pour la sphère. Excepté pour le prisme, les autres propositions 3D non attendues sont plus rarement sélectionnées puisque leur fréquence ne dépasse pas 5%. Pour le prisme, néanmoins, des taux de sélection plus élevés apparaissent également pour d'autres propositions 3D non attendues : l'objet 3D dont l'inclinaison a été modifiée (13,9%) et l'objet dont l'orientation de la base supérieure a été modifiée (5,7%). Les autres propositions sont plus rarement sélectionnées elles aussi.

Concernant le cube, qui se distingue des autres objets 3D, différentes propositions 3D non attendues sont faiblement choisies et la proposition 3D non attendue la plus sélectionnée est l'objet dont l'orientation de la base supérieure a été modifiée, avec une fréquence de 3,8%. Face au cube, comme face à la sphère, aucun choix 3D ne semble se distinguer des autres.

L'annexe 23 présente également la fréquence des différentes propositions 3D non attendues lorsque sont pris en compte uniquement les individus ayant perçu inadéquatement l'objet 3D tout en sélectionnant l'objet 3D correct. Il apparaît que, lorsqu'un objet 3D non attendu est sélectionné en plus de l'objet 3D attendu, il s'agit le plus souvent de l'objet dont la hauteur a été modifiée, et ce pour tous les objets 3D investigués. C'est d'ailleurs le cas pour la totalité des participants concernés pour l'exercice de la sphère, du cône et du cylindre, même si certaines autres propositions sont parfois aussi sélectionnées par les participants. Excepté pour le prisme, où 50% des participants qui choisissent une proposition 3D non attendue en plus de l'objet 3D attendu sélectionnent l'objet 3D incliné, la sélection des autres propositions 3D non attendues est moins observée. Ce constat vient donc compléter les informations quant à la fréquence de sélection des différentes propositions au total et notamment nuancer quelque peu l'observation précédemment réalisée au sujet du cube. En effet, si la sélection de l'objet 3D dont la hauteur a été modifiée apparaît rarement pour cet objet 3D, elle est plus présente que les autres quand les participants sélectionnent la

proposition 3D attendue en plus de propositions 3D non attendues. Notons cependant que le nombre de participants concernés par ce cas de figure est faible, comme l'illustre la Figure 5.

L'annexe 23 présente en outre la fréquence de sélection des différentes propositions 3D non attendues en prenant en considération uniquement les participants percevant inadéquatement l'objet 3D sans sélectionner l'objet 3D attendu. Il apparaît, que quand le participant sélectionne un ou des objets 3D non attendus et pas l'objet 3D attendu, la proposition la plus sélectionnée est systématiquement l'objet 3D dont la hauteur est modifiée, sauf pour l'exercice du cube. C'est par exemple le cas de l'ensemble des participants concernés pour l'exercice de la sphère et de plus de 90% d'entre eux pour le cône. La sélection d'autres propositions apparaît quant à elle beaucoup plus rare. Pour l'exercice du cube, un constat différent est dressé puisqu'aucun des quelques participants concernés ne sélectionne la proposition 3D dont la hauteur est modifiée. La plupart d'entre eux sélectionnent l'objet dont la base supérieure est inclinée (55,6%) ou l'objet 3D incliné (44,4%).

Si les résultats indiquent que certaines propositions 3D non attendues semblent plus récurrentes que d'autres, il apparaît intéressant d'à nouveau investiguer la régularité dans les choix de proposition 3D réalisés. Pour cela, l'annexe 24 présente pour chaque type de proposition 3D non attendue, la répartition du nombre de fois que la proposition a été sélectionnée pour l'ensemble des exercices selon le nombre d'objets 3D perçus inadéquatement au total. Rappelons qu'étant donné la particularité des objets 3D, toutes les propositions 3D non attendues ne sont pas systématiquement proposées ce qui explique que le nombre maximum de fois que chaque proposition a pu être choisie ne vaut pas toujours 7. De plus, rappelons qu'une absence de régularité est observée entre les objets concernant la fréquence de la perception inadéquate.

Concernant le choix relatif à l'objet 3D dont l'inclinaison a été modifiée, dont la/les bases ont été déformées, dont la base supérieure a été rétrécie ou encore dont la base supérieure a été inclinée, une majorité des participants ne sélectionnent jamais ce choix et le nombre de participants qui répètent systématiquement ce choix est souvent faible, voire nul. Quelques participants font cette sélection à plusieurs reprises même si une régularité dans la sélection de ces propositions n'est majoritairement pas observée. Concernant la proposition 3D non attendue majoritairement sélectionnée, c'est-à-dire l'objet 3D dont la hauteur a été modifiée, il apparaît que les participants qui perçoivent inadéquatement un ou plusieurs objets 3D réalisent souvent ce choix à au

moins une reprise. Une régularité plus importante est par ailleurs observée pour la sélection de cette proposition en comparaison aux autres. Toutefois, un certain nombre de participants réalisent ce choix un nombre réduit de fois et ne sont donc pas réguliers dans leur comportement perceptif.

Enfin, s'il arrive à certains participants de sélectionner des propositions 3D non attendues, il peut également arriver qu'aucune proposition 3D ne soit sélectionnée par le participant et que ce dernier privilégie une proposition 2D, même si ce cas est majoritairement rare. Si un tel choix invite à considérer que ce comportement peut laisser transparaître une absence de passage à la 3^{ème} dimension, les verbatims utilisés par les participants pour justifier leur choix de proposition 2D permettent cependant de nuancer une absence de passage à la 3D. En effet, certains verbatims semblent mettre en évidence que le participant a bien perçu que l'élément représenté est un élément tridimensionnel malgré le choix 2D réalisé. L'annexe 25 présente les résultats de l'analyse des verbatims et permet de réviser les taux de non-perception en ne prenant pas en considération les enfants et les adolescents dont le verbatim incite à considérer un passage à la 3D.

En prenant en compte les verbatims, il apparaît que le taux de non-perception (Tableau 5) associé à chaque objet 3D n'est jamais supérieur à 15%, ce qui confirme bien que ce cas de figure apparaît plutôt rarement au sein des différents exercices. Plus précisément, les taux varient entre 5,1% (anneau rond) et 13,3% (cube). Pour la plupart des solides investigués, ce cas de figure est moins récurrent que le cas de perception inadéquate. En particulier, pour le prisme et le cône, les cas de perception inadéquate sont près de quatre fois plus souvent observés que ceux de non-perception. Néanmoins, pour le cube et la sphère, ce type de comportement apparaît plus fréquent que la sélection d'une proposition 3D ne correspondant pas à l'objet présenté, qui, pour rappel, était relativement rare.

Tableau 5 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
10,1%	5,7%	10,8%	9,5%	5,1%	13,3%	10,8%

Concernant la répartition du taux de non-perception entre les différents exercices, 65,2% des participants ne se situent jamais dans un cas de non-perception de la 3D. Ils

sont donc une majorité à systématiquement être conscients de la troisième dimension. *A contrario*, aucun des participants ne se situe dans le cas de non-perception pour l'ensemble des exercices. Les participants semblent donc tous conscients que les environnements virtuels peuvent servir à présenter des objets en trois dimensions, même s'il arrive à certains d'être dans le cas de figure de non-perception de la 3D, le plus souvent pour un exercice (20,9% des participants), ou pour plusieurs : 4,4% sont dans ce cas de figure à deux reprises, 5,7% à trois reprises, 1,3% à quatre reprises, 1,9% à cinq reprises et enfin 0,6% à six reprises

L'annexe 26 présente les taux de sélection relatifs à l'ensemble des choix 2D réalisés et pas uniquement ceux réalisés lorsqu'il y a une non-perception de l'objet 3D. En effet, à de nombreuses reprises, les participants ont sélectionné des choix 2D en plus d'un ou plusieurs choix 3D. Il ressort que, pour le choix 2D, le plus fréquent reste quasi-systématiquement celui de la représentation 2D de l'objet 3D en position initiale. La fréquence de ce choix 2D varie entre 20,9% (pour le prisme) et 53,2% (pour le cylindre).

9.1.1.2. Perception des différents objets 3D selon l'âge au départ de représentations virtuelles manipulables

La Figure 7 présente l'évolution du taux de perception adéquate relatif à chaque objet 3D entre les différentes tranches d'âge. Son observation indique une évolution variable entre les objets 3D. Elle indique cependant qu'à chacune des tranches, aucun objet n'est adéquatement perçu par l'ensemble des participants, même si à la dernière tranche d'âge, certains objets se rapprochent de cette situation. Pour certains objets 3D, comme le prisme, l'anneau droit, le cône ou l'anneau rond, le taux semble augmenter entre les tranches d'âge sauf entre la première et la deuxième tranche d'âge où celui-ci semble diminuer (pour les trois premiers cités) ou stagner (pour l'anneau rond). Pour la sphère, le taux semble augmenter entre les deux premières tranches d'âge. Celui-ci stagne ensuite avant d'augmenter légèrement à nouveau. Pour le cube, le taux alterne entre diminution, augmentation puis diminution à nouveau, même si les variations sont faibles entre les tranches d'âge. Enfin, pour le cylindre, le taux stagne entre les deux premières tranches puis diminue fortement à la troisième tranche d'âge avant d'augmenter fortement à la dernière tranche d'âge. Malgré ces évolutions variables, pour tous les objets à l'exception du cube, le taux obtenu est plus faible à la première tranche d'âge (taux variant entre 30 et 80% selon les objets 3D) qu'à la dernière (taux supérieur à 70% pour tous les objets 3D).

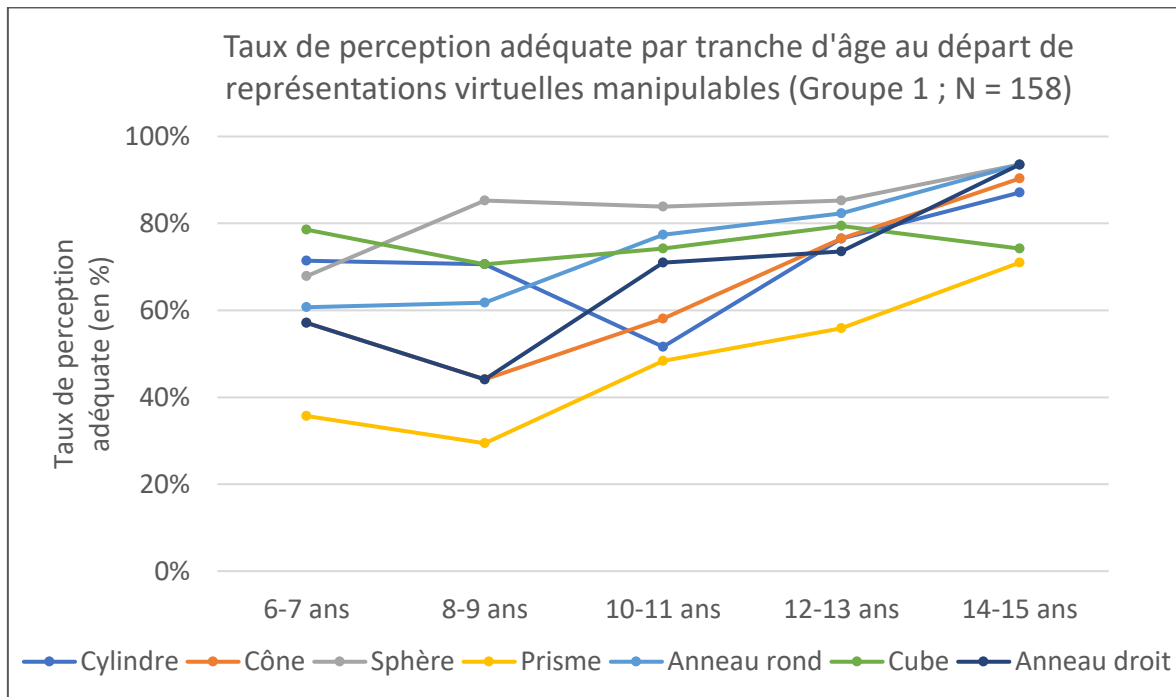


Figure 7 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D (1^{ère} étude)

Pour accompagner les observations réalisées grâce au graphique présenté, les corrélations entre la perception adéquate de chaque objet 3D et l'âge en jour (Tableau 6) ont été calculées à l'aide de coefficient *r point bi-sérial* (r_{pb}) puisque les corrélations s'appliquent entre des données dichotomiques (perception adéquate ou non) et des données métriques (âge en jour). Les résultats de ces indices de corrélation indiquent une corrélation non nulle pour tous les objets 3D excepté le cylindre ($r_{pb} = 0,136$; $p\text{-value} = 0,087$) et le cube ($r_{pb} = 0,003$; $p\text{-value} = 0,970$). La corrélation apparaît non nulle, positive mais négligeable pour la sphère ($r_{pb} = 0,194$). Elle est positive mais faible pour le prisme ($r_{pb} = 0,265$) et l'anneau rond ($r_{pb} = 0,283$). Enfin, elle peut être qualifiée de positive et modérée pour les deux derniers objets 3D, c'est-à-dire le cône ($r_{pb} = 0,302$) et l'anneau droit ($r_{pb} = 0,318$). Ces différences de coefficient de corrélation confirment donc que les évolutions sont variables entre les objets 3D et que les taux ne semblent pas tous évoluer positivement avec l'âge.

Les corrélations calculées cette fois entre la perception inadéquate et l'âge, aussi présentées dans le Tableau 6 soulignent assez logiquement des résultats divers selon les objets 3D. Pour le cône et l'anneau droit, ce type de comportement diminue avec l'âge de manière modérée ($r_{pb} = -0,341$ et $r_{pb} = -0,321$). Il diminue également avec l'âge mais de manière faible pour l'anneau rond ($r_{pb} = -0,266$). Des corrélations négligeables

sont observées pour les quatre autres objets 3D même si elles peuvent être considérées comme significativement non nulles pour la sphère et le prisme. En revanche, pour le cas de non-perception des objets 3D, les corrélations calculées indiquent que les liens entre non-perception de chaque objet 3D et âge sont tous négligeables. Ces résultats permettent ainsi de relever que, pour les objets 3D pour lesquels la capacité semble évoluer positivement avec l'âge, l'amélioration semble pouvoir être attribuée à une diminution de la sélection de choix 3D non attendus avec l'âge et non à une diminution des cas de sélection de propositions 2D uniquement.

Tableau 6 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles manipulables et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p) (1^{ère} étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Perception adéquate	$r_{pb} = 0,136$ $p = 0,087$	$r_{pb} = 0,302$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,194$ $p = 0,015^*$	$r_{pb} = 0,265$ $p = 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,283$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,003$ $p = 0,970$	$r_{pb} = 0,318$ $p < 0,001^{**}$
Perception inadéquate	$r_{pb} = -0,088$ $p = 0,272$	$r_{pb} = -0,341$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,164$ $p = 0,039^*$	$r_{pb} = -0,193$ $p = 0,015^*$	$r_{pb} = -0,266$ $p = 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,077$ $p = 0,339$	$r_{pb} = -0,321$ $p < 0,001^{**}$
Non-perception (avec prise en compte des verbatims)	$r_{pb} = -0,125$ $p = 0,117$	$r_{pb} = -0,018$ $p = 0,818$	$r_{pb} = -0,158$ $p = 0,047^*$	$r_{pb} = -0,167$ $p = 0,036^*$	$r_{pb} = -0,102$ $p = 0,201$	$r_{pb} = -0,129$ $p = 0,106$	$r_{pb} = -0,091$ $p = 0,254$

Spécifiquement, puisqu'il a pu être mis en évidence que l'objet 3D dont la hauteur est modifiée est la proposition non attendue principalement sélectionnée pour tous les objets 3D sauf le cube, des corrélations ont également été calculées entre la sélection de cette proposition et l'âge. Les indices obtenus montrent une corrélation négative et modérée pour le cône ($r_{pb} = -0,304$) tandis qu'une corrélation négative mais faible est observée pour l'anneau rond ($r_{pb} = -0,232$) et pour l'anneau droit ($r_{pb} = -0,285$). Pour les autres objets 3D, l'évolution de la sélection de cette proposition avec l'âge est négligeable. Il est donc possible de considérer que la sélection de cette proposition diminue avec l'âge pour certains objets mais pas pour tous, mais que cette diminution est cohérente avec la diminution du taux de perception inadéquate.

En ce qui concerne les corrélations entre l'âge et la sélection des autres propositions 3D, il apparaît que la majorité des coefficients de corrélation calculés s'avèrent négligeables puisque deux corrélations non négligeables, en l'occurrence négatives mais faibles, sont identifiées. La première se rapporte à l'exercice du prisme pour la sélection de la proposition 3D inclinée ($r_{pb} = -0,244$). La diminution de ce choix peut

sans doute expliquer l'amélioration du taux de perception adéquate. La seconde se situe dans l'exercice de l'anneau rond pour la sélection de la proposition 3D proche relative à l'anneau droit ($r_{pb} = -0,225$). La diminution de la fréquence de ce choix, comme la diminution de la fréquence associée à la proposition 3D dont la hauteur est modifiée, participe à la diminution des taux de perception inadéquate.

À chacune des tranches d'âge, l'objet qui obtient le taux de perception adéquate le plus faible est systématiquement le prisme, même si ce taux est proche de celui observé pour d'autres objets à certaines d'entre elles (ex. le cylindre à la troisième tranche d'âge). Des *tests Q de Cochran* sont appliqués pour identifier si des différences significatives sont présentes ou non entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D à chaque tranche d'âge (Tableau 7). Les résultats indiquent la présence de différences significatives entre les sept objets pour l'ensemble des tranches d'âge, y compris à la dernière. La présence de différences entre objets constatées sur l'ensemble du public cible semble donc pouvoir être généralisée à l'ensemble des tranches d'âge. Ces dernières ne semblent toutefois pas aller dans le même sens à toutes les tranches d'âge puisque l'ordre de réussite varie entre les objets 3D. Par exemple, si la sphère obtient le taux le plus élevé à la plupart des tranches d'âge, ce n'est pas le cas à la première d'entre elles. Par ailleurs, même si des différences significatives subsistent à chaque tranche d'âge, les écarts entre les taux de perception des objets 3D diminuent dans les tranches d'âge plus élevées.

Tableau 7 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (1^{ère} étude)

6-7 ans	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
Q = 14,030 p = 0,029*	Q = 36,157 p < 0,001**	Q = 20,378 p = 0,002**	Q = 12,808 p = 0,046*	Q = 15,803 p = 0,015*

9.1.1.3. Influence des variables secondaires sur la perception visuelle des objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables

a. Le genre

Pour rappel, les analyses relatives aux variables secondaires se focalisent uniquement sur trois des sept objets 3D investigués : le cube, la sphère et le prisme. Pour ces trois objets, les taux de perception adéquate obtenus auprès des filles

s'avèrent proches de ceux obtenus chez les garçons, en particulier pour la sphère. Afin de statuer sur cette proximité entre les taux observés entre filles et garçons, des tests du *Khi-carré* ont été appliqués. Les résultats de ces tests, tous non significatifs (Tableau 8), confirment que la perception de ces objets 3D est indépendante du genre.

Tableau 8 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables par genre et comparaison : taux, *Khi-carré* et *p-value* (1^{ère} étude)

	G1 : manip. 2½D (N = 158)			
	Taux de perception adéquate		<i>Khi-carré</i>	<i>p-value</i>
	♀ (N = 69)	♂ (N = 89)		
Cube	73,9%	76,4%	0,130	0,719
Sphère	84,1%	83,1%	0,024	0,878
Prisme	42,0%	52,8%	1,809	0,179

b. Le niveau de maîtrise des processus perceptifs de base

Dans cette partie, des corrélations (*r point biserial*) sont effectuées, entre d'une part les scores aux trois subtests de la BORB et d'autre part la perception adéquate de chacun des trois objets 3D investigués. Les résultats (Tableau 9) indiquent que, parmi les trois processus perceptifs de base, seule la capacité d'association d'orientation, c'est-à-dire la capacité à distinguer visuellement si des segments sont ou non parallèles, est corrélée positivement avec la perception adéquate du prisme et de la sphère. Cette corrélation reste cependant faible dans les deux cas (0,258 pour le prime et 0,208 pour la sphère). Le lien entre les processus perceptifs de base relatifs à la distinction des longueurs, des tailles et des orientations et la perception adéquate des objets 3D représentés virtuellement est donc faible, voire absent.

Plus particulièrement, des corrélations sont également calculées entre l'occurrence de choix 3D non attendus susceptibles et les scores de subtests. Une attention particulière est accordée aux taux de sélection d'objets 3D non attendus qui pourraient être associés à des déficits relatifs aux processus perceptifs de base. Par exemple, des raisons invitent à penser qu'un déficit dans la comparaison des orientations est susceptible d'entraîner davantage le choix de l'objet pour lequel l'orientation de la base a été modifiée puisque les bases ne sont pas parallèles dans cet objet alors qu'elles le sont dans l'objet présenté, des corrélations négatives pourraient ainsi être calculées entre les scores aux subtests et la sélection de certaines propositions 3D non attendues. Les différentes corrélations calculées, apparaissant toutes nulles ou négligeables, indiquent une absence de lien entre le niveau des trois processus perceptifs de base

évalués et la sélection de propositions 3D qui occasionnent des changements au niveau des longueurs, des tailles ou de l'orientation. De telles observations permettent par ailleurs de clarifier le fait que les participants qui choisissent la proposition 3D dont la hauteur est modifiée, qui, pour rappel, est la proposition la plus souvent choisie, ne sont pas forcément des participants qui ont des difficultés de perception des longueurs.

Tableau 9 : Corrélation entre le score aux subtests de la BORB et la perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme ou la sélection de certaines propositions 3D non attendues au départ de représentations virtuelles manipulables : coefficient de corrélation r_{pb} et p -value

		G1 : manip. 2½D (N = 158)		
		Cube	Sphère	Prisme
Score au subtest « Association de longueurs » (sur 12) et la perception adéquate	r_{pb}	0,065	0,133	0,006
	p -value	0,415	0,097	0,938
Score au subtest « Association de tailles » (sur 12) et la perception adéquate	r_{pb}	-0,075	0,083	0,098
	p -value	0,347	0,303	0,219
Score au subtest « Association d'orientations » (sur 12) et la perception adéquate	r_{pb}	-0,053	0,208	0,258
	p -value	0,511	0,009**	0,001**
Score au subtest « Association de longueurs » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont la hauteur a été modifiée »	r_{pb}	-0,079	-0,139	-0,009
	p -value	0,326	0,082	0,915
Score au subtest « Association de longueurs » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont l'inclinaison a été modifiée »	r_{pb}	0,033	/	-0,106
	p -value	0,683	/	0,187
Score au subtest « Association de longueurs » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont la taille de la base supérieure a été rétrécie »	r_{pb}	-0,024	/	0,145
	p -value	0,766	/	0,069
Score au subtest « Association de longueurs » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont l'orientation de la base supérieure a été modifiée »	r_{pb}	-0,139	/	-0,161
	p -value	0,082	/	0,044*
Score au subtest « Association de tailles » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont la taille de la base supérieure a été rétrécie »	r_{pb}	0,029	/	-0,085
	p -value	0,721	/	0,290
Score au subtest « Association d'orientation » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont l'orientation de la base supérieure a été modifiée »	r_{pb}	0,042	/	-0,121
	p -value	0,603	/	0,129

c. La perception des teintes de couleurs

Pour chacun des objets 3D, le taux de perception adéquate de l'objet obtenu auprès des enfants et des adolescents ayant su distinguer le nombre de teintes présentes sur l'image (qui sont donc en mesure de distinguer les différentes teintes présentes sur la représentation virtuelle) est comparé à celui des enfants et des adolescents qui n'ont pas perçu les différentes teintes. Les analyses menées ont permis de montrer qu'à l'exception des teintes de jaune (en référence à l'exercice du prisme), peu de

participants n'arrivent pas à différencier la quantité de teintes présentes. Mener des statistiques inférentielles pour le cube et la sphère, compte tenu de la situation, apparaît donc dérisoire. Les statistiques descriptives (Tableau 10) indiquent que le taux de perception adéquate est systématiquement plus élevé pour les participants ayant su distinguer les teintes de couleurs. Pour le prisme, pour qui un nombre plus important de participants n'ont pas su distinguer correctement les teintes de jaune, les comparaisons menées soulignent que les taux de perception adéquate sont aussi plus élevés chez les participants distinguant correctement les teintes. Un *test exact de Fisher*⁶ a été réalisé pour identifier l'éventuelle dépendance de la perception de l'objet 3D à la distinction correcte des teintes de jaune. Les résultats significatifs sont obtenus (*Test exact de Fisher* = 8,429 ; *p-value* = 0,004). Ces résultats indiquent donc une dépendance de la perception des objets 3D à la perception des teintes présentes sur sa représentation. Notons néanmoins qu'un problème de distinction des teintes de jaune présentes sur la représentation n'implique pas systématiquement un problème de perception de l'objet 3D. Les analyses descriptives pour le cube et la sphère ainsi que les analyses inférentielles pour le prisme semblent donc aller dans le sens de la présence d'un impact de la distinction des teintes sur la perception des représentations virtuelles manipulables.

Tableau 10 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables selon la bonne ou mauvaise perception des teintes de couleurs concernées et comparaison pour le cas du prisme : taux de perception adéquate, test exact de Fisher et p-value (1^{ère} étude)

		G1 : manip. 2½D	
		Teintes perçues	Teintes perçues
Cube	Taux de perception adéquate	50,0% (n = 4)	76,0% (n = 154)
Sphère	Taux de perception adéquate	72,7% (n = 11)	84,4% (n = 157)
Prisme	Taux de perception adéquate	20,8% (n = 24)	53,0% (n = 134)
	<i>Test exact de Fisher</i>	8,429	
	<i>p-value</i>	0,004**	

d. Le risque de TDC

En prenant appui sur les résultats au DCDQ-FE complété par les parents, deux profils d'enfants et d'adolescents peuvent être identifiés : ceux susceptibles d'être porteurs de TDC et ceux non susceptibles de l'être. Afin de statuer sur l'éventuelle dépendance des

⁶ Les conditions d'application du *test du Chi-carré* n'étant pas respectées.

capacités de perception à ces profils, les taux de perception observés auprès de chacun de ces deux profils ont été calculés et comparés à l'aide de *tests du Khi-carré*. Les résultats (Tableau 11) indiquent que, pour les trois objets 3D, le taux de perception adéquate observé chez les participants présentant un risque de TDC est plus faible que celui observé chez les autres. Pour autant, des résultats significatifs n'apparaissent que pour le cas du prisme ($\chi^2 = 6,869$; $p\text{-value} = 0,009$). Il est donc possible de considérer qu'une dépendance de la présence de risque de TDC sur les capacités de perception visuelle de représentations virtuelles manipulables est présente mais n'est pas constatée pour tous les objets 3D. Cet effet concerne le prisme, dont la perception est plus complexe, mais pas le cube et la sphère.

Tableau 11 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents concernés ou non par un risque de TDC et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (1^{ère} étude)

	G1 : manip. 2½D (N = 158)			
	Taux de perception adéquate		Khi-carré	p-value
	Risque de TDC (N = 123)	Risque de TDC (N = 35)		
Cube	78,0%	65,7%	2,230	0,135
Sphère	85,4%	75,1%	1,340	0,247
Prisme	53,7%	28,6%	6,869	0,009**

e. Les habitudes et pratiques régulières

Pour chacune des pratiques régulières investiguées des enfants et des adolescents (ex. pratique des jeux vidéo), les taux de perception adéquate observés chez les participants concernés par la pratique régulière sont comparés aux taux de perception observés chez ceux n'étant pas concernés par cette dernière. Pour ce faire, le *test du Khi-carré* (ou son alternative, *le test exact de Fisher*, quand les conditions d'application du premier ne sont pas respectées⁷) est utilisé.

Pour la majorité des habitudes investiguées, des résultats non significatifs sont obtenus pour les trois objets aux tests inférentiels appliqués (Tableau 12). C'est le cas pour l'utilisation des appareils tactiles, la pratique de jeux de construction, d'un sport et d'un instrument de musique. Pour les deux habitudes restantes, des effets sont constatés uniquement pour un des objets 3D : pour la sphère concernant la pratique des jeux vidéo ($\chi^2 = 9,647$; $p\text{-value} = 0,002$) et pour le prisme concernant les jeux de

⁷ Dans la suite du manuscrit, dès qu'il sera fait écho à l'alternative du *test du Chi-carré*, cela renvoie à une situation dans laquelle les conditions d'application du test ne sont pas respectées, et donc à l'utilisation du *test exact de Fisher*.

puzzle ($\chi^2 = 3,878$; $p\text{-value} = 0,049$). Dans les deux cas, les résultats sont à l'avantage des participants chez qui l'habitude est présente.

Les capacités de perception visuelle de la représentation virtuelle manipulable semblent donc, à quelques exceptions près, indépendantes des différentes habitudes investiguées et si une dépendance est observée, elle ne concerne pas tous les objets 3D et elle est en faveur des participants possédant l'habitude.

Tableau 12 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : taux, Khi-carré (ou alternative) et p-value (1^{ère} étude)

		G1 : manip. 2½D (N = 158)			
		Taux de perception adéquate		Khi-carré (ou test exact de Fisher)	p-value
		Régulier	Régulier		
Utilisation des appareils tactiles	Cube	75,0%	75,4%	Test ex. de F. = 0,001	1,000
	Sphère	87,5%	83,1%	Test ex. de F. = 0,203	1,000
	Prisme	56,3%	47,2%	0,474	0,491
Pratique des jeux vidéo	Cube	74,2%	76,1%	0,070	0,791
	Sphère	72,7%	91,3%	9,647	0,002**
	Prisme	45,5%	50,0%	0,318	0,573
Pratique des jeux de construction	Cube	75,4%	75,3%	0,000	0,983
	Sphère	83,6%	83,5%	0,000	0,987
	Prisme	41,0%	52,6%	2,016	0,156
Pratique des jeux de type « puzzle »	Cube	71,8%	78,2%	0,843	0,359
	Sphère	84,5%	82,8%	0,087	0,768
	Prisme	39,4%	55,2%	3,878	0,049*
Pratique d'un sport	Cube	77,3%	74,6%	0,126	0,723
	Sphère	84,1%	83,3%	0,013	0,908
	Prisme	43,2%	50,0%	0,591	0,442
Pratique d'un instrument de musique	Cube	74,1%	82,6%	0,770	0,380
	Sphère	83,0%	87,0%	0,228	0,633
	Prisme	47,4%	52,2%	0,179	0,672

f. Le niveau scolaire et l'expérience antérieure en géométrie 3D

Concernant le niveau scolaire, puisque le cube et la sphère doivent, d'après les nouveaux référentiels en FWB, faire l'objet d'un apprentissage dès la 1^{ère} primaire et à chacune des années de l'enseignement primaire, il n'est pas possible de vérifier si les taux de réussite sont différents dans les niveaux scolaires ayant déjà été ou non confrontés à ces objets.

Concernant le cube, selon les niveaux scolaires, le taux de perception varie entre 66,7% (taux observé en 1^{ère} primaire, mais aussi en 4^e primaire et en 6^e primaire) et 88,9% (en 2^e secondaire). Le nombre de participants percevant adéquatement le cube

ne semble donc pas systématiquement augmenter entre les différents niveaux scolaires. Il est par exemple plus faible en 3^e secondaire (74,2%) qu'en 2^e secondaire (88,9%). Il ressort également que, pour aucun des niveaux scolaires, la perception du cube n'est automatique, et ce en dépit du fait qu'il fasse l'objet d'apprentissages scolaires dès le début de la scolarité.

Pour la sphère, des écarts plus importants sont observés entre les niveaux scolaires. Le taux de perception adéquate du solide est de 50% en 1^{ère} primaire et atteint 100% en 2^e secondaire. Si le taux en 1^{ère} primaire se distingue de celui obtenu aux autres niveaux scolaires de l'enseignement primaire, valant au minimum 78,9%, un taux plus faible est à nouveau observé en 1^{ère} secondaire (66,7%).

Enfin, pour le prisme, une variation encore plus importante du taux de perception adéquate apparaît entre les niveaux scolaires. Ce taux vaut par exemple 9,1% en 3^e primaire alors qu'il avoisine les 40% en 1^{ère} et 2^e primaire. Il atteint même 75% en 1^{ère} secondaire. En comparant le taux obtenu dans les classes inférieures et supérieures à la 5^e primaire, qui est le niveau scolaire dans lequel ce type d'objet 3D est découvert en classe d'après les nouveaux référentiels⁸, on constate que les taux de perception adéquate obtenus avant la 5^e primaire sont tous inférieurs à 42%. Ceux obtenus à partir de la 6^e primaire valent tous plus de 50%. De plus, un taux de perception de 31% est obtenu pour l'ensemble des enfants dont le niveau est inférieur à la 5^e primaire et alors qu'il vaut 65% lorsqu'on compile ceux supérieurs à ce niveau scolaire.

Par ailleurs, étant donné la diversité entre les niveaux scolaires, il apparaît intéressant d'identifier si les capacités de perception sont plus élevées chez les participants ayant déjà abordé la géométrie 3D lors de l'année scolaire en cours. Comme l'illustre le Tableau 13, pour aucun des trois objets 3D, le taux de perception adéquate est dépendant du fait d'avoir déjà abordé la géométrie 3D lors de l'année scolaire en cours. En effet, les *tests du Khi-carré* comparant les taux de perception des deux profils de participants s'avèrent non significatifs.

Un même constat est établi concernant le fait d'avoir déjà dû être confronté à des représentations virtuelles d'objets 3D, mais aussi concernant le fait d'avoir déjà dû

⁸ Rappelons d'une part que ces nouveaux référentiels sont en cours d'implémentation et que les anciens référentiels de compétences ne précisait pas le niveau scolaire auquel ce solide devait être abordé avec les élèves. D'autre part, puisque les nouveaux référentiels décrivent les savoirs, savoir-faire et compétences minimaux relatifs à chaque niveau scolaire, il est possible de suspecter que cet objet ait déjà été rencontré antérieurement dans les apprentissages scolaires en géométrie 3D.

résoudre des tâches similaires de perception. Ces deux variables relatives à l'expérience des participants à l'égard de la géométrie 3D ne semblent pas non plus impacter les capacités de perception de représentations virtuelles manipulables.

Tableau 13 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (1^{ère} étude)

		G1 : manip. 2½D (N = 158)			
		Taux de perception adéquate		Khi-carré	p-value
		Non	Oui		
Apprentissage de la géométrie 3D cette année scolaire	Cube	72,0%	85,0%	2,702	0,100
	Sphère	82,2%	87,5%	0,610	0,435
	Prisme	50,0%	42,5%	0,673	0,412
Expérience avec les représentations virtuelles	Cube	73,3%	78,9%	0,632	0,427
	Sphère	84,2%	82,5%	0,077	0,782
	Prisme	51,5%	42,1%	1,284	0,257
Résolution de tâches de reconnaissance similaires	Cube	76,1%	73,2%	0,137	0,711
	Sphère	84,6%	80,5%	0,376	0,540
	Prisme	50,4%	41,5%	0,977	0,323

9.1.2. Résultats relatifs à la seconde étude expérimentale (groupe 1)

9.1.2.1. Perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables (toutes tranches d'âge confondues)

Les taux de perception adéquate relatifs à chacun des objets 3D obtenus lors de la seconde étude sont présentés au sein du Tableau 14. Ceux-ci permettent de relever que, pour tous les objets 3D, les taux obtenus sont supérieurs à 60%. Cela permet de montrer que, pour chacun des objets, plus de la moitié des participants confrontés à sa représentation virtuelle manipulable perçoivent adéquatement l'objet représenté. Pour autant, les taux ne semblent pas excéder la valeur de 90% ce qui signifie également que, pour aucun des objets 3D, la perception n'est systématique. De plus, cet écart entre le taux de perception le plus faible, observé pour le prisme, et celui le plus élevé, se rapportant à la sphère, invite à suspecter que les capacités de perception varient selon les objets 3D.

Tableau 14 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)

Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
68,5%	71,2%	90,1%	64,9%	84,7%	70,3%	77,5%

Le test *Q* de Cochran, appliqué sur l'ensemble des taux obtenus, dont les résultats s'avèrent significatifs ($Q = 34,328$; $p\text{-value} < 0,001$), permet de confirmer l'existence de différences entre la maîtrise de la capacité de perception des différents objets 3D. Afin d'aller plus loin dans l'identification des différences entre les objets 3D, des tests de McNemar, dont les résultats sont présentés en annexe (Annexe 26), sont appliqués pour comparer les taux de perception adéquate pour chaque paire d'objets 3D. Les résultats de ces tests montrent de multiples différences significatives entre les objets 3D sont constatées lorsque la perception est évaluée au départ de représentations virtuelles manipulables : des différences significatives sont relevées pour 10 paires d'objets 3D sur 21. Il apparaît que quatre objets 3D (le prisme, le cylindre, le cône et le cube) se détachent de la plupart des autres avec un taux significativement plus faible. De plus, deux objets (sphère et anneau rond) se distinguent de la plupart des autres avec un taux plus élevé. Au milieu de ces deux groupes d'objets 3D, l'anneau droit se distingue significativement de l'objet 3D le plus souvent adéquatement perçu (la

sphère) et de celui le moins souvent adéquatement perçu (le prisme), mais pas des autres objets 3D.

L'observation du nombre d'objets perçus adéquatement par participant permet de compléter les résultats relatifs au taux de perception adéquate de chaque objet 3D. La Figure 8, qui présente cette information, permet de mettre en évidence que tous les participants perçoivent adéquatement au moins un des sept objets 3D et que très peu d'entre eux perçoivent seulement un ou deux objets adéquatement. Pour autant, seuls 25% des participants confrontés à des représentations virtuelles manipulables arrivent à percevoir l'ensemble des objets 3D présentés. La capacité de perception semble donc majoritairement partiellement maîtrisée même si, le plus souvent, un nombre important d'objets 3D est perçu adéquatement par les participants.

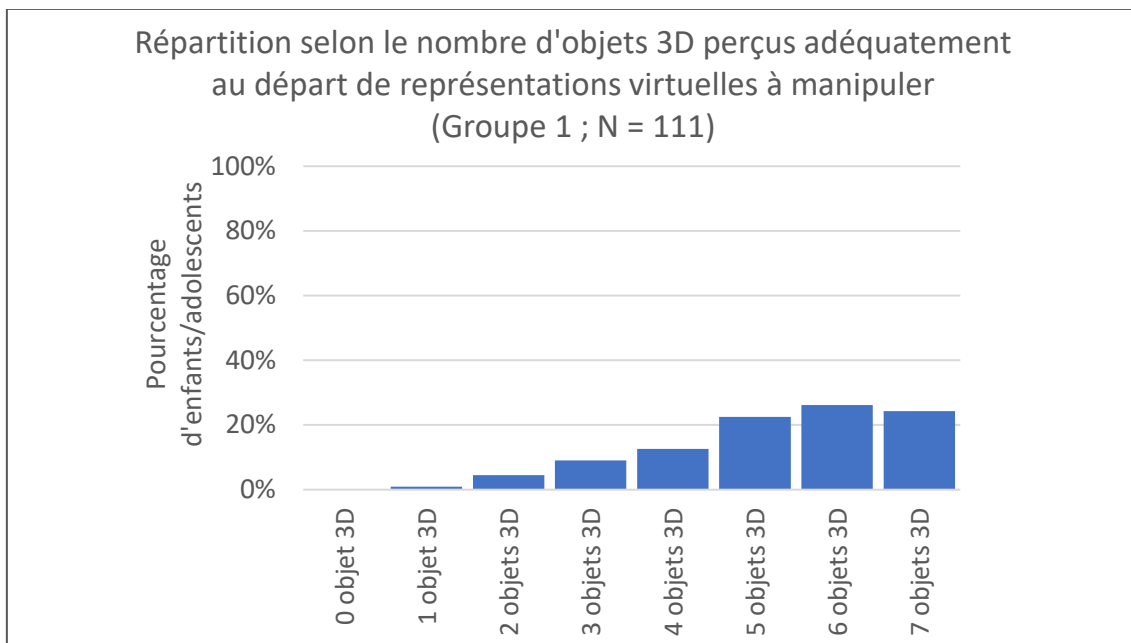


Figure 8 : Répartition selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles manipulables (2^e étude)

Puisque, comme dans la première étude, la majorité des participants montrent une capacité de perception partiellement maîtrisée, il apparaît à nouveau intéressant d'identifier si ce sont systématiquement les mêmes objets qui posent des difficultés à ces derniers. Même si le taux de perception adéquate de chacun des objets 3D invite à considérer que la perception de certains objets comme le prisme, pose plus de difficultés, il s'agit ici d'identifier si des régularités sont observées entre les participants

au niveau des objets 3D perçus adéquatement ou non. Pour ce faire, le Tableau 15⁹ présente le pourcentage de participants percevant adéquatement chacun des objets 3D lorsque six objets sur sept sont adéquatement perçus et lorsqu'un seul des sept objets l'est. Les résultats relatifs aux cas intermédiaires, c'est-à-dire lorsqu'entre 2 et 5 objets 3D sont adéquatement perçus, sont placés en annexe (Annexe 27). Les résultats obtenus confirment une certaine irrégularité entre les individus dans la perception des différents objets 3D. Lorsque six objets sur sept sont adéquatement perçus, il arrive à chacun des objets d'être le seul à ne pas être perçu, même si cela arrive plus rarement pour l'anneau rond et la sphère. Quand un seul objet sur sept n'est pas adéquatement perçu, cet objet diffère selon les participants et il arrive à tous les objets 3D d'être cet objet, même si c'est plus rarement l'anneau rond à bord rond (dans 6,9% des cas) et la sphère (dans 3,4% des cas). Le cas de perception adéquate d'un seul objet sur sept ne se produit que pour un participant et l'objet perçu adéquatement est la sphère. Si les taux de perception adéquate ont permis de relever des tendances quant aux plus nombreuses difficultés rencontrées face au prisme, il s'agit donc de considérer que pour autant, au vu des différences individuelles, cet objet 3D ne pose pas systématiquement de difficultés aux participants ne percevant pas adéquatement l'ensemble des objets 3D.

Tableau 15 : Pourcentage d'enfants/adolescents percevant adéquatement chaque objet 3D quand 6 objets sur 7 sont adéquatement perçus et quand 1 objet sur 7 est adéquatement perçu au départ de représentations virtuelles manipulables (2^e étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Quand 6 objets 3D sont adéquatement perçus (N = 29)	82,8%	82,8%	96,6%	79,3%	93,1%	82,8%	82,8%
Quand 1 objet 3D seulement est adéquatement perçu (N = 1)	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Des coefficients de corrélation (*coefficients Phi*) sont calculés afin d'identifier si des liens existent entre la perception adéquate des différents objets 3D. Les coefficients obtenus (Tableau 16) montrent uniquement deux corrélations non négligeables entre la perception des objets 3D : une corrélation positive mais faible entre le cube et le cône ($\Phi = 0,282$) et une corrélation positive et modérée entre le cube et l'anneau droit

⁹ Dans le tableau, les éléments systématiquement adéquatement perçus sont indiqués en vert tandis que les éléments n'étant jamais adéquatement perçus sont indiqués en orange.

($\Phi = 0,310$). Ces indices de corrélation, croisés avec les différences de taux de perception entre objets 3D, permettent ainsi de confirmer les fortes irrégularités entre les exercices et entre les individus.

Tableau 16 : Corrélation entre la perception adéquate des différents objets 3D deux à deux : coefficient phi (Φ) et p-value associée (2^e étude)

		Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Cylindre	Φ	0,167	0,034	0,110	0,142	0,195	0,052
	p-value	0,078	0,716	0,247	0,134	0,040*	0,585
Cône	Φ		0,055	0,032	0,171	0,282	0,181
	p-value		0,561	0,740	0,071	0,003**	0,057
Sphère	Φ			0,135	0,026	-0,018	0,110
	p-value			0,155	0,781	0,851	0,247
Prisme	Φ				0,054	0,141	0,100
	p-value				0,571	0,139	0,292
Anneau rond	Φ					0,107	0,190
	p-value					0,262	0,045*
Cube	Φ						0,310
	p-value						0,001**

Parmi les enfants et les adolescents n'ayant pas perçu adéquatement l'objet 3D, une des erreurs commises se rapporte au fait d'avoir considéré que l'élément représenté est un élément 3D, certes, mais différent de celui que l'on souhaitait présenter. La Figure 9 présente le taux de fréquence de ce cas de figure pour chacun des objets 3D. Ce taux varie entre 10% et 15 % pour tous les objets 3D, sauf pour le prisme où il dépasse légèrement 20% et pour la sphère où il n'atteint pas les 5%. Des différences sont donc constatées entre les objets 3D au niveau de l'apparition de ce comportement, en particulier pour la sphère.

La répartition de ce cas de figure entre les différents exercices permet de relever que plus de 40% des participants ne sélectionnent jamais de propositions 3D non attendues au départ de représentations virtuelles. Néanmoins, s'il arrive à 56% des participants d'avoir ce type de comportement à au moins une reprise, la plupart de ces derniers ne commettent ce choix que pour un seul objet. Peu de participants réalisent ce choix pour plus de trois des sept objets et aucun d'entre eux n'a ce comportement pour plus de cinq des sept objets. Une faible régularité est donc observée dans ce comportement face aux représentations virtuelles à manipuler.

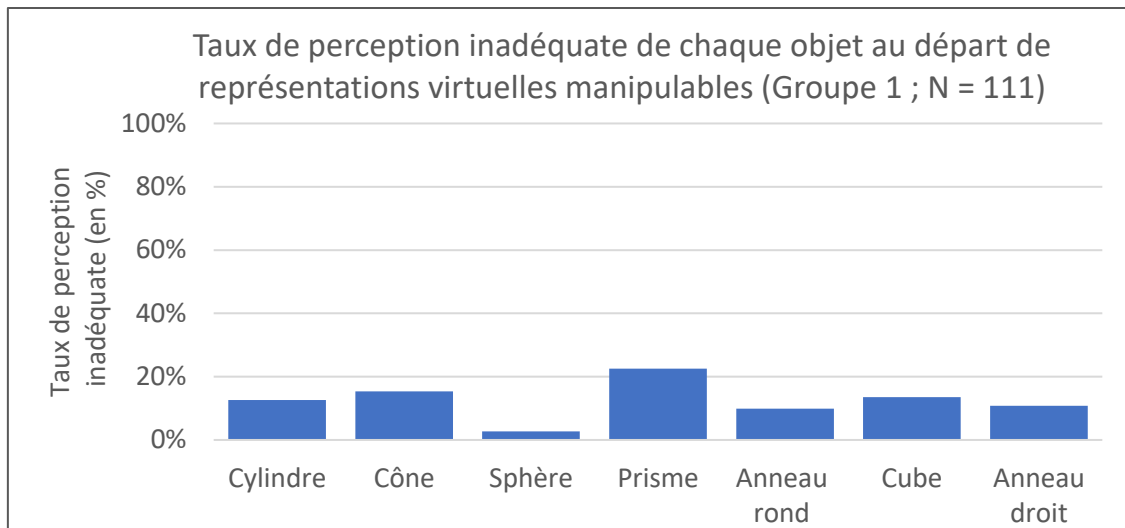


Figure 9 : Taux de perception inadéquate au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)

Plus particulièrement, les taux de sélection associés à chacune des propositions 3D non attendues, dont les résultats sont placés en annexe (Annexe 29), indiquent que pour le prisme, qui pour rappel est l'objet 3D pour qui la fréquence de sélection d'un choix 3D non attendu est la plus élevée, la proposition non attendue la plus fréquente est l'objet 3D dont la hauteur a été modifiée (9,3%). Viennent ensuite la sélection de la proposition 3D inclinée (6,3%) et ensuite la proposition 3D dont l'orientation de la base supérieure a été modifiée (4,5%). Les autres choix 3D non attendus s'avèrent plus rarement sélectionnés, voire absents.

La proposition 3D dont la hauteur a été modifiée est également la proposition 3D non attendue la plus choisie pour le cône (12,6%) et l'anneau rond (8,1%), tandis que pour ces deux objets, les autres propositions ne sont jamais sélectionnées ou presque. Pour la sphère, parmi les deux propositions 3D non attendues, la seule sélectionnée est également l'objet 3D dont la hauteur a été modifiée, même si sa fréquence est très faible. Pour le cylindre, cette proposition est aussi la plus sélectionnée, au même titre que l'objet dont la base supérieure a été inclinée (4,5%). Pour ce qui est de l'anneau droit, l'objet dont la hauteur a été modifiée n'est pas la proposition la plus sélectionnée (4,5%) mais obtient un taux proche de la proposition la plus sélectionnée, à savoir un anneau rond à bord rond (5,4%).

À la différence des autres objets 3D, la proposition 3D dont la hauteur est modifiée n'est jamais sélectionnée face au cube. Pour cet objet, la proposition 3D non attendue la plus fréquente est celle de l'objet 3D incliné (8,1%), les autres propositions étant rarement, voire jamais, choisies.

Si une partie des enfants et des adolescents ont choisi une proposition 3D aux différents exercices, qu'elle corresponde ou non à l'objet présenté, d'autres ont opté pour la sélection d'une proposition 2D. Si ces résultats permettent de suspecter une absence de passage à la 3^{ème} dimension, les verbatims utilisés par les enfants permettent de nuancer ces propos en montrant que certains participants semblent passer à la troisième dimension malgré le choix 2D effectué. Les résultats synthétisés de cette analyse sont proposés en annexe (Annexe 30). Le Tableau 17 présente les taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) obtenus pour chacun des objets 3D. Face à des représentations virtuelles manipulables, ce taux varie entre 5,4% (anneau rond à bord rond) et 18,0% (cylindre). L'annexe 29, qui présente également les taux de sélection de chacune des propositions 2D, permet de mettre en évidence que, pour la plupart des objets 3D, le choix de proposition 2D le plus fréquent est la représentation 2D de l'objet 3D en position initiale.

Lorsqu'on compare la fréquence des cas de non-perception avec celle des cas de perception inadéquate, des situations différentes sont constatées selon les objets 3D. Pour l'anneau droit, le cube et le cône, ces deux cas de figure ont des fréquences proches. Les enfants et adolescents sont donc aussi nombreux à ne pas percevoir la 3D qu'à la percevoir de manière inadéquate. En revanche, davantage de cas de non-perception que de cas de perception inadéquate sont observés pour le cylindre et la sphère tandis que c'est l'inverse pour l'anneau rond et le prisme.

Tableau 17 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)

Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
18,0%	13,5%	6,3%	9,0%	5,4%	13,5%	9,0%

Par ailleurs, la répartition du nombre de cas de non-perception, tous exercices confondus, indique que 55% des participants ne sélectionnent jamais de proposition 2D et qu'aucun d'entre eux ne sélectionne un tel choix à plus de cinq reprises. Quand ce type de comportement apparaît, il se produit majoritairement à une reprise. Cela signifie que les participants perçoivent tous, au moins une fois, que ce qui est présenté dans l'environnement virtuel est un objet tridimensionnel, qu'il soit celui présenté initialement ou non. Ils semblent donc tous conscients que les environnements virtuels peuvent permettre de présenter des objets tridimensionnels.

9.1.2.2. Perception de chaque objet 3D au départ d'une représentation virtuelle manipulable selon l'âge

L'évolution des taux de perception adéquate entre les différentes tranches d'âge (Figure 10) permet de souligner que ces taux semblent évoluer différemment selon les objets 3D. Pour aucun des objets 3D, le taux n'augmente systématiquement entre des tranches d'âge consécutives. Parfois même, le taux est marqué par une forte diminution entre deux tranches d'âge consécutives. Néanmoins, deux objets 3D semblent se distinguer en montrant une évolution forte des taux entre la première tranche d'âge et la dernière tranche d'âge. D'une part, il est possible de citer le prisme, dont le taux passe respectivement de 36,4% à 70,0%. Si le taux relatif à ce solide augmente jusqu'à la quatrième tranche d'âge, avec une évolution forte entre les deux dernières tranches d'âge. D'autre part, pour la sphère, le taux de perception obtenu à la première tranche d'âge est de 72,7% alors que tous les participants perçoivent adéquatement la représentation virtuelle manipulable de cet objet 3D à la dernière tranche d'âge. Ce taux augmente fortement entre les trois premières tranches d'âge pour atteindre une première fois une valeur de 100% à la troisième tranche d'âge.

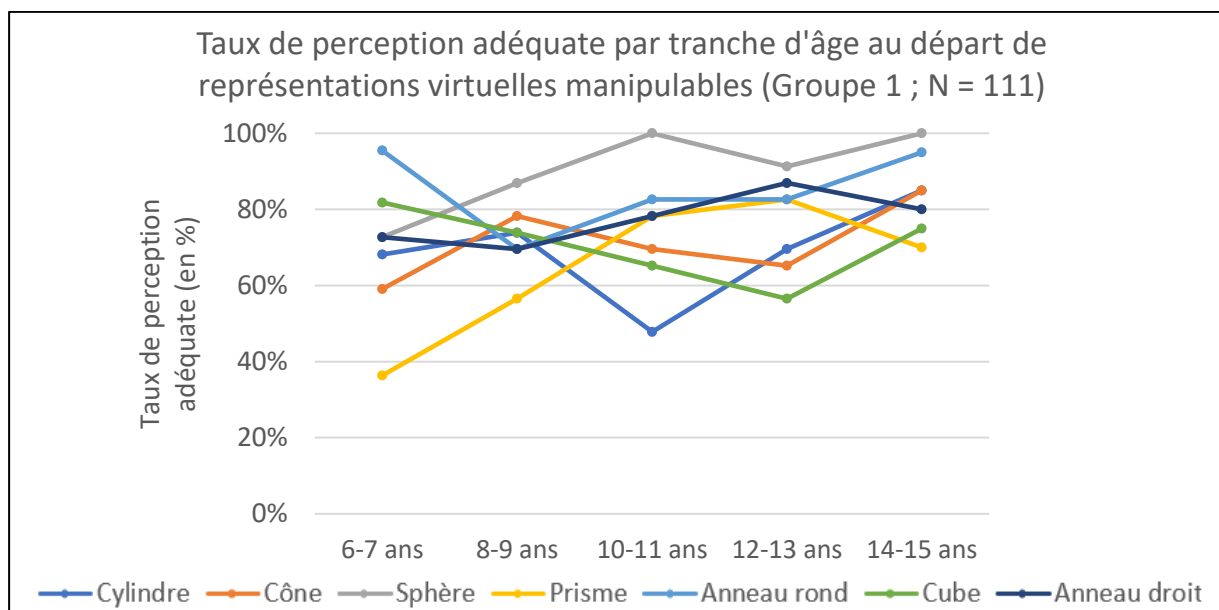


Figure 10 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D (2^e étude)

Les coefficients de corrélation r point bi-sérial calculés entre le taux de perception adéquate de chaque objet 3D et l'âge en jour (Tableau 18) permettent de confirmer cette observation puisque le prisme et la sphère sont les deux seuls objets 3D pour qui

une corrélation positive et non négligeable est observée. Celle-ci reste cependant faible puisqu'elle vaut 0,292 pour la sphère et 0,289 pour le prisme. Pour les cinq autres objets 3D, les corrélations apparaissent négligeables ce qui incite à considérer que les capacités de perception de ces objets n'augmentent pas avec l'âge. Même si pour le cône, le cylindre et l'anneau droit, le taux obtenu à la dernière tranche d'âge apparaît plus élevé que celui de la première, les taux relevés à chaque tranche d'âge fluctuent entre ces dernières. Par exemple, pour le cylindre, le taux augmente légèrement, puis diminue de manière importante avant d'à nouveau augmenter. Pour ce qui est de l'anneau rond, le taux de perception adéquate apparaît aussi élevé à la première tranche d'âge (95,5%) qu'à la dernière (95,0%). Pour autant, ce taux n'apparaît pas stable puisqu'il diminue fortement entre la première et la deuxième tranche d'âge, avant d'augmenter ou de stagner aux tranches suivantes. Enfin, le cas du cube indique que le taux observé à la première tranche d'âge est plus élevé (81,8%) que celui observé à la dernière (75,0%). D'ailleurs, le taux diminue entre les quatre premières tranches d'âge avant d'augmenter à la dernière tranche, mais pas de manière suffisante pour égaler le taux obtenu chez la tranche d'âge la plus jeune.

Face à des représentations virtuelles manipulables, les taux de perception adéquate obtenus à chaque tranche d'âge indiquent donc que l'évolution de la perception adéquate avec l'âge varie donc entre les objets 3D. Ces taux ne sont pas forcément croissants entre les tranches d'âge et sont même plutôt instables. Toutefois, si pour la quasi-totalité des objets 3D, la perception adéquate n'est maîtrisée par tous à aucune des tranches d'âge, ce n'est pas le cas pour la sphère dont le taux atteint la valeur maximale à la troisième et à la dernière tranche d'âge.

Le calcul des corrélations entre taux de perception inadéquate et âge, mais également entre taux de non-perception et âge, permet de relever que l'amélioration du taux de perception adéquate avec l'âge observée pour la sphère et le prisme est davantage expliquée par une diminution de la sélection de propositions 3D non attendues que par une diminution des cas de non-perception. En effet, une corrélation négative non négligeable, bien que faible également, est observée entre perception inadéquate et âge pour le premier ($r_{pb} = -0,209$) et le deuxième objet ($r_{pb} = -0,273$) mais pas entre non-perception et âge. Plus particulièrement, les corrélations avec la sélection des différents choix 3D réalisés indiquent que pour la sphère, la sélection de la proposition dont la hauteur a été modifiée diminue avec l'âge ($r_{pb} = -0,209$). En

revanche, pour le prisme, la diminution de la perception inadéquate ne semble pas concerner une proposition 3D en particulier puisque seules des corrélations négligeables sont observées. Notons par ailleurs qu'une corrélation négative et faible apparaît pour l'exercice du cône entre la sélection de la proposition 3D dont la base est déformée et l'âge ($r_{pb} = -0,211$). Toutes les autres corrélations calculées peuvent être considérées comme négligeables.

Tableau 18 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles manipulables et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p) (2^e étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Perception adéquate	$r_{pb} = 0,059$ $p = 0,538$	$r_{pb} = 0,098$ $p = 0,308$	$r_{pb} = 0,292$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = 0,289$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = 0,072$ $p = 0,454$	$r_{pb} = 0,072$ $p = 0,454$	$r_{pb} = 0,119$ $p = 0,215$
Perception inadéquate	$r_{pb} = -0,051$ $p = 0,596$	$r_{pb} = -0,134$ $p = 0,161$	$r_{pb} = -0,209$ $p = 0,027^*$	$r_{pb} = -0,273$ $p = 0,004^{**}$	$r_{pb} = -0,130$ $p = 0,173$	$r_{pb} = 0,113$ $p = 0,239$	$r_{pb} = -0,186$ $p = 0,050^*$
Non-perception (avec prise en compte des verb.)	$r_{pb} = -0,030$ $p = 0,752$	$r_{pb} = 0,012$ $p = 0,902$	$r_{pb} = -0,181$ $p = 0,057$	$r_{pb} = -0,128$ $p = 0,181$	$r_{pb} = 0,058$ $p = 0,548$	$r_{pb} = -0,047$ $p = 0,621$	$r_{pb} = -0,076$ $p = 0,428$

Même si les analyses menées sur le public cible complet, c'est-à-dire toutes tranches d'âge confondues, ont permis de souligner, grâce au résultat du *test Q de Cochran*, l'existence de différences entre la maîtrise de la perception des différents objets 3D, un tel constat ne semble pas pouvoir être observé à chacune des tranches d'âge. En appliquant cette même démarche à chaque tranche d'âge, il apparaît en effet que l'existence de différences entre les sept objets 3D se confirme à plusieurs des tranches d'âge mais pas à toutes. Comme l'indique le Tableau 19, des résultats significatifs sont observés aux *tests Q de Cochran* appliqués à la première ($Q = 21,306$; p -value = 0,002), à la troisième ($Q = 20,714$; p -value = 0,002) et à la quatrième tranche d'âge ($Q = 15,739$; p -value = 0,015). Toutefois, des résultats non significatifs apparaissent aux deux tranches d'âge restantes. Par ailleurs, les taux obtenus aux différents objets 3D montrent que ces différences entre objets 3D, quand elles existent, ne vont pas forcément dans le même sens. Si la perception du prisme semble être plus problématique lorsque toutes les tranches d'âge sont prises en considération, ce n'est pas le cas à chaque tranche d'âge. À la troisième et à la quatrième tranche d'âge, cet objet semble même faire partie de ceux posant le moins de difficultés. À l'inverse, si la sphère semble être l'objet obtenant le meilleur taux à partir de la deuxième tranche,

ce n'est pas le cas à la première tranche d'âge. Il s'agit donc de rester prudent à l'égard des constats réalisés au départ de l'ensemble du public cible.

Tableau 19 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (2^e étude)

6-7 ans	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
Q = 21,306 p = 0,002**	Q = 7,111 p = 0,311	Q = 20,714 p = 0,002**	Q = 15,739 p = 0,015*	Q = 10,846 p = 0,093

9.1.2.3. Influence des variables secondaires sur la perception au départ de représentations virtuelles manipulables

a. Le genre

Chez les filles, les taux de perception s'avèrent proches de ceux observés chez les garçons, aussi bien pour le cube que pour la sphère et le prisme (Tableau 20). Les tests inférentiels *du Khi-carré* appliqués à chacun des trois objets 3D pour comparer ces taux de perception adéquate sont tous non significatifs. Ces tests confirment ainsi que les capacités de perception de ces trois objets 3D ne sont pas dépendantes du genre.

Tableau 20 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables par genre et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (2^e étude)

	G1 : manip. 2½D (N = 111)			
	Taux de perception adéquate		Khi-carré	p-value
	♀ (N = 58)	♂ (N = 53)		
Cube	69,0%	71,7%	0,099	0,753
Sphère	91,4%	88,7%	0,226	0,634
Prisme	65,5%	64,2%	0,023	0,880

b. Le niveau de maîtrise de la rotation mentale

Les indices de corrélation calculés (*r point bi-sérial*) entre le score de rotation mentale et la capacité de perception adéquate des trois objets investigués, présentés au sein du Tableau 21, indiquent que le lien qui unit la capacité de rotation mentale et perception des objets 3D varie selon les objets 3D à percevoir. Si une corrélation positive, bien que faible, est observée entre niveau de rotation mentale et perception de la sphère ($r_{pb} = 0,250$) et du prisme ($r_{pb} = 0,239$), cela ne semble pas être le cas pour le cube pour qui la corrélation est nulle. La variable secondaire relative au niveau de rotation mentale semble donc être liée en partie aux capacités de perception de

certaines objets 3D et pour ces derniers, ce lien semble positif mais faible. Il semble donc possible de suggérer que certains objets 3D sont mieux perçus par les enfants étant davantage capables de faire preuve de rotation mentale.

Tableau 21 : Corrélation entre le score au test de rotation mentale (sur 16) et la perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles : coefficient de corrélation r_{pb} point bi-sérial (r_{pb}) et p -value

		G1 : manip. 2½D (N = 111)		
		Cube	Sphère	Prisme
r_{pb}		0,014	0,250	0,239
p -value		0,882	0,008**	0,012*

c. Risques de TDC

En prenant appui sur les résultats au DCDQ-FE complété par les parents, deux profils d'enfants et d'adolescents peuvent être identifiés : ceux susceptibles d'être porteurs de TDC et ceux n'étant pas susceptibles de l'être. Afin de statuer sur l'éventuelle dépendance des capacités de perception à cette variable, les taux de perception adéquate observés auprès des enfants et des adolescents des deux profils sont comparés à l'aide de *tests du Khi-carré* (ou alternative). Les résultats (Tableau 22) indiquent que seule la capacité de perception visuelle du prisme est dépendante de la présence d'un risque de TDC puisqu'un résultat significatif est obtenu uniquement pour cet objet 3D ($\chi^2 = 4,943$; p -value = 0,026). Pour cet objet 3D, dont la perception pose davantage de difficultés, le taux de perception apparaît plus élevé chez les enfants ne présentant pas de risque TDC que chez les autres. Pour les deux autres objets 3D, même si le taux observé chez les enfants et les adolescents présentant un risque est plus élevé que celui recensé chez ceux n'en présentant pas, les résultats non significatifs obtenus indiquent que la capacité de perception de ces deux objets 3D n'est pas dépendante de la présence d'un risque de TDC.

Tableau 22 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents concernés ou non par un risque de TDC et comparaison : taux, Khi-carré (ou alternative) et p -value (2^e étude)

		G1 : manip. 2½D (N = 111)			
		Taux de perception adéquate		<i>Khi-carré (ou son alternative le test exact de Fisher)</i>	p -value
		Risque de TDC (N = 94)	Risque de TDC (N = 17)		
Cube		69,1%	76,5%	0,369	0,543
Sphère		88,3%	100,0%	<i>Test ex. de F. = 2,208</i>	0,210
Prisme		69,1%	41,2%	4,943	0,026*

d. Habitudes et pratiques régulières

L'ensemble des résultats relatifs à la dépendance des capacités de perception aux différentes habitudes investiguées chez l'individu sont présentés au sein du Tableau 23. Concernant les différentes pratiques régulières des enfants et des adolescents, les résultats relatifs à la perception du cube indiquent que pour toutes les pratiques régulières investiguées excepté la pratique d'un instrument de musique, des taux de perception plus élevés sont observés auprès des profils d'enfants ne présentant pas l'habitude. Pour autant, les *tests du Khi-carré* (ou alternative) n'indiquent la présence d'aucun résultat significatif pour cet objet 3D. De ce fait, il est possible de considérer que la capacité de perception du cube est indépendante des habitudes et pratiques régulières investiguées.

Concernant la perception de la sphère, contrairement au cube, le taux de perception est systématiquement plus élevé chez les participants présentant les habitudes. Néanmoins, il est également possible de statuer sur l'absence d'une dépendance de la perception aux pratiques régulières puisque, comme pour le cube, les résultats de l'ensemble des tests inférentiels appliqués sont non significatifs. Précisons cependant que des résultats proches du seuil de significativité sont observés concernant la pratique régulière des jeux de construction ($\chi^2 = 3,617$; $p\text{-value} = 0,057$), avec un taux de perception adéquate plus élevé chez les individus jouant régulièrement à ces jeux.

Enfin, concernant le prisme, les taux de perception sont tantôt plus élevés chez les participants possédant certaines habitudes et tantôt plus élevés chez les autres. Toutefois, comme pour les deux autres objets 3D, les tests inférentiels appliqués s'avèrent tous non significatifs ce qui souligne une indépendance de la capacité de perception aux habitudes investiguées. À nouveau, concernant l'utilisation régulière de la tablette tactile, les résultats sont proches du seuil de significativité (*Test exact de Fisher* = 2,995 ; $p\text{-value} = 0,098$), avec un taux de perception adéquate plus élevé chez les individus n'utilisant pas régulièrement ce type de support.

Un même constat général d'indépendance des capacités de perception aux habitudes que possède ou non le participant peut donc être réalisé pour les trois objets 3D investigués.

Tableau 23 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : taux, khi-carré (ou son alternative) et p-value (2^e étude)

		G1 : manip. 2½D (N = 111)			
		Taux de perception adéquate		Khi-carré (ou test exact de Fisher)	p-value
		Régulier	Régulier		
Utilisation des appareils tactiles	Cube	80,0%	68,8%	Test ex. de F. = 0,786	0,546
	Sphère	86,7%	90,6%	Test ex. de F. = 0,228	0,642
	Prisme	86,7%	61,5%	3,617	0,057
Pratique des jeux vidéo	Cube	75,0%	65,5%	1,210	0,271
	Sphère	89,3%	90,9%	0,082	0,775
	Prisme	60,7%	69,1%	0,854	0,355
Pratique des jeux de construction	Cube	71,4%	69,7%	0,033	0,856
	Sphère	82,9%	93,4%	Test ex. de F. = 2,995	0,098
	Prisme	60,0%	67,1%	0,531	0,466
Pratique des jeux de type « puzzle »	Cube	72,4%	67,9%	0,267	0,605
	Sphère	86,2%	94,3%	2,052	0,152
	Prisme	65,5%	64,2%	0,023	0,880
Pratique d'un sport	Cube	80,0%	67,4%	1,462	0,227
	Sphère	80,0%	93,0%	Test ex. de F. = 3,680	0,120
	Prisme	60,0%	66,3%	0,335	0,563
Pratique d'un instrument de musique	Cube	70,1%	71,4%	Test ex. de F. = 0,010	1,000
	Sphère	89,7%	92,9%	Test ex. de F. = 0,137	1,000
	Prisme	61,9%	85,7%	Test ex. de F. = 3,056	0,132

e. Le niveau scolaire et l'expérience en géométrie 3D

Concernant le cube, le taux de perception adéquate varie selon les niveaux scolaires et ne semble pas croître entre ces derniers. Par exemple, le taux de perception le plus faible est observé en 1^{ère} secondaire (56,3% de perception adéquate) et un taux proche apparaît en 4^e primaire (57,1%) et en 6^e primaire (60,0%) alors que les taux valent au moins 70% dans les autres niveaux scolaires et notamment en 3^e primaire où tous les enfants interrogés perçoivent adéquatement le solide. Même si ce solide est déjà rencontré dès la 1^{ère} année d'enseignement primaire, la perception de sa représentation virtuelle pose des difficultés à plusieurs enfants et adolescents des différents niveaux scolaires.

Pour la sphère, le taux de perception adéquate obtenu à chaque niveau scolaire excède toujours 75%, excepté en 1^{ère} primaire où il est de 60%. Il vaut même 100% dans plusieurs des niveaux scolaires (4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} primaire mais aussi 3^{ème} secondaire).

Enfin, pour le prisme, une variation encore plus importante du taux de perception adéquate entre les niveaux scolaires. Si à partir de la cinquième primaire, les taux

observés pour ce solide sont supérieurs à 70%, ce n'est pas le cas dans les niveaux scolaires inférieurs où les taux varient entre 33,3% et 57,1%. On remarque aussi que jusqu'en 1^{ère} secondaire, le taux de perception augmente avec le niveau scolaire.

Lorsqu'on compare les résultats des apprenants ayant ou non abordé la géométrie 3D lors de l'année scolaire en cours, il apparaît que le taux de perception adéquate obtenu auprès des participants ayant déjà abordé cette matière est plus élevé que celui obtenu chez les autres pour le cube mais pas pour la sphère et le prisme. Pour autant, dans les deux cas, les *tests du Khi-carré* (ou alternative) utilisés pour vérifier l'indépendance de la perception à cet aspect s'avèrent non significatifs pour les trois objets 3D, comme l'illustre le Tableau 24. Cela permet de statuer sur le fait que la capacité de perception des trois objets 3D au départ de leur représentation virtuelle manipulable ne dépend pas du fait d'avoir déjà abordé la géométrie 3D.

Tableau 24 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : taux, Khi-carré (ou son alternative) et p-value (2^e étude)

		G1 : manip. 2½D (N = 111)			
		Taux de perception adéquate		<i>Khi-carré (ou test exact de Fisher)</i>	<i>p-value</i>
		Non	Oui		
Apprentissage de la géométrie 3D cette année scolaire	Cube	67,5%	78,6%	1,235	0,266
	Sphère	92,8%	82,1%	<i>Test ex. de F. = 2,649</i>	0,141
	Prisme	68,7%	53,6%	2,096	0,148
Expérience avec les représentations virtuelles	Cube	68,1%	82,4%	1,403	0,236
	Sphère	89,4%	94,1%	<i>Test ex. de F. = 0,365</i>	1,000
	Prisme	62,8%	76,5%	1,186	0,276
Résolution de tâches de reconnaissance similaires	Cube	71,3%	67,7%	0,132	0,717
	Sphère	87,5%	96,8%	<i>Test ex. de F. = 2,152</i>	0,178
	Prisme	68,8%	54,8%	1,897	0,168

Si des taux de perception adéquate plus élevés sont observés chez les participants déclarant avoir déjà été confrontés à des représentations virtuelles manipulables d'objets 3D, les analyses inférentielles indiquent là aussi des résultats non significatifs pour les trois objets. La perception de telles représentations n'apparaît donc pas dépendante de l'expérience des individus vis-à-vis de ces représentations.

Finalement, un même constat peut être dressé concernant le fait d'avoir déjà dû résoudre des tâches de reconnaissance d'objets 3D. Puisqu'aucun des tests appliqués n'apparaît significatif, il semble que la capacité de perception des trois objets 3D est indépendante de ce critère.

9.1.3. Discussion spécifique à la question 1.1°

Au travers des deux études menées, il a été proposé à des enfants et des adolescents âgés de 6 à 15 ans d'observer une série d'objets 3D représentés dans un environnement virtuel en projection orthographique dans lesquels ils étaient autorisés à manipuler l'objet 3D en lui appliquant librement des rotations sur lui-même. Il leur a ensuite été proposé de résoudre une tâche de reconnaissance dans lequel ils ont été amenés à retrouver, parmi plusieurs propositions 3D (matériel physique) et 2D (représentations planes), l'élément qui leur a été préalablement présenté, en étant autorisé à sélectionner plusieurs propositions (1^{ère} étude) ou en devant se focaliser sur un seul choix (2^e étude). Par cette évaluation, la manière dont ces derniers ont perçu les objets 3D représentés virtuellement a alors été explorée. De cette façon, il s'agit d'une première approche relative à la manière dont ce public cible arrive à percevoir la 3D, et plus spécifiquement la forme des objets 3D, dans ce type d'environnement au vu du peu d'investigations préalables à ce sujet (Krylova & Vodyakha, 2022).

9.1.3.1. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle manipulable : une habileté majoritairement non systématique

Le peu d'investigations antérieures menées sur cette thématique pourrait sans doute suggérer que la capacité à percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle est considérée comme maîtrisée, voire naturellement acquise. Les résultats obtenus invitent à poser de la nuance par rapport à cette affirmation.

Face à des représentations virtuelles d'objets 3D pouvant être manipulées, les deux études indiquent que la plupart des enfants et des adolescents âgés de 6 à 15 ans arrivent à percevoir plusieurs objets 3D. Les analyses confirment que la quasi-totalité des participants, même tous dans le cadre de la seconde étude, ont perçu adéquatement au moins un des sept objets 3D investigués au départ de sa représentation virtuelle. Un tel constat peut notamment être expliqué par l'expérience riche offerte grâce aux technologies (Chikha *et al.*, 2021) permettant d'offrir des représentations qu'Höffler (2010) décrit comme complètes. En effet, bien que toutes les propriétés de l'objet ne soient pas directement visibles de manière simultanée, le traitement dynamique de l'information permet de traduire progressivement les propriétés de l'objet représenté et donc de fournir des indices relatifs à la troisième dimension. Les enfants, même à six ans, apparaissent capables de percevoir adéquatement la forme d'objets 3D représentés virtuellement, du moins de certains

d'entre eux. Cette observation apparaît en cohérence avec les propos de Levine *et al.* (1999) ou encore Frick *et al.* (2013) qui évoquent que la pensée spatiale dynamique se développe à partir de l'âge de 5 ans.

Pour autant, peu d'enfants et d'adolescents arrivent à percevoir adéquatement les sept objets 3D ici investigués. Les deux études menées mettent en évidence que seul un participant sur quatre, voire moins, perçoit l'ensemble des objets 3D proposés. Si on peut considérer que la pensée dynamique, qui est nécessaire pour comprendre les représentations proposées, est déjà présente chez les enfants âgés de 6 ans, elle n'est pour autant pas toujours suffisamment développée pour percevoir adéquatement tous les objets 3D proposés. Les résultats permettent donc de considérer que la perception de telles représentations d'objets 3D est non systématique chez la plupart des enfants et des adolescents, et ce même si les objets 3D qui ont fait l'objet de l'étude sont « simples ». Ils ont par ailleurs tous pour caractéristique d'être symétriques, ce qui constitue un critère facilitant leur perception (Pizlo *et al.*, 2010) mais malgré cela, des difficultés sont observées. Les deux études ici menées permettent donc d'objectiver les suspicions de difficultés associées à la perception de représentations virtuelles détaillées en deuxième chapitre de ce travail (volume 1), à propos desquelles nous reviendrons dans la suite de la discussion au moment de comprendre les raisons susceptibles d'expliquer des difficultés de perception.

Si Baldy (1988) avait pu, en évaluant la perception d'objets 3D au départ de leur représentation 2D en perspective cavalière auprès d'adultes, décrire la capacité de perception de la troisième dimension comme fonctionnant sur le principe du « *tout ou rien* » (p. 55), il semble que l'étude ici menée ne permet pas de généraliser ces propos pour les enfants et les adolescents au sujet de représentations 2 ½ D. Au contraire, l'habileté est le plus souvent partiellement maîtrisée, même si une majorité d'enfants et d'adolescents réussissent à percevoir adéquatement la plupart des objets 3D proposés. Plus spécifiquement, les analyses des erreurs types réalisées permettent de mieux comprendre ces difficultés observées au départ de représentations virtuelles manipulables.

a. La présence de quelques comportements bidimensionnels

Les résultats obtenus permettent de montrer qu'au départ d'une représentation 2 ½ D manipulable des différents objets ici investigués, plus de 80% des participants choisissent une proposition 3D, qu'ils soient autorisés à sélectionner plusieurs

propositions (1^{ère} étude) ou non (2^e étude). D'ailleurs, au cumul des exercices proposés, il apparaît que plus de la moitié des enfants et des adolescents choisissent une proposition 3D à tous les exercices. Néanmoins, il arrive à certains participants de privilégier des propositions 2D au détriment des propositions 3D. Un tel choix pourrait être associé à un « comportement bidimensionnel », que Pittalis et Christou (2013) ont pu mettre en évidence chez certains individus confrontés à des représentations 2D. De tels comportements semblent donc aussi émerger chez certains enfants et adolescents au départ de représentations virtuelles et ce malgré le caractère dynamique des représentations et l'impression de tridimensionnalité qu'elles peuvent offrir (Bakó, 2003). Ce caractère dynamique permettant de simuler l'objet 3D ne semble pas toujours suffire pour concevoir que l'élément représenté virtuellement est un élément tridimensionnel. Comme le montrent les résultats des deux études, ces comportements n'apparaissent cependant pas chez tous les participants, et lorsqu'ils apparaissent, c'est le plus souvent pour un nombre réduit d'objets 3D. Ces comportements peuvent donc être considérés comme peu récurrents. Cela semble s'inscrire dans la lignée des résultats obtenus par Krylova et Vodyakha (2022), qui, en étudiant de manière exploratoire les capacités d'enfants plus jeunes (4 à 6 ans) à percevoir des objets 3D complexes, ont mis en évidence que les comportements bidimensionnels étaient rares mais possibles. Bien que de tels choix soient parfois observés dans les deux études, aucun participant ne semble concevoir tous les objets présentés comme des objets bidimensionnels. Autrement dit, tous sont capables d'admettre, au moins pour une des représentations virtuelles proposées, que l'élément représenté virtuellement est bien un élément en trois dimensions, qu'il corresponde ou non à l'objet proposé. Même si le support est bidimensionnel, les individus, y compris à 6 ans, sont donc en capacité d'admettre que ce type de support peut permettre de proposer des espaces qui simulent la troisième dimension, même si ce passage à la troisième dimension apparaît parfois problématique. Rappelons que les enfants, dès le plus jeune âge, sont amenés au quotidien et dans le contexte scolaire, à être confrontés à des supports bidimensionnels proposant des représentations d'éléments 3D, qu'elles soient planes (Frick & Newcombe, 2015) ou virtuelles (Marchand, 2006). Lorsque ce cas de figure est observé, il s'agit donc de difficultés à concevoir l'élément dynamique spécifique proposé comme étant un objet 3D que l'on peut faire tourner sur lui-même qu'une conception erronée sur ce que permettent ou non de présenter des supports 2D.

Si nous évoquons que la sélection d'une proposition 2D peut faire écho à un comportement bidimensionnel, la prudence reste de mise dans l'interprétation de ces cas de figure. L'analyse des verbatims utilisés par les enfants et les adolescents participent déjà à affiner quelque peu cette interprétation mais une difficulté d'interprétation reste présente. Nous reviendrons, lors de la discussion générale, sur cette difficulté d'interprétation des choix 2D puisque celle-ci constitue une limite aux études menées. Notons également déjà que les caractéristiques de l'environnement virtuel utilisé (ex. solide en lévitation), sur lesquelles nous reviendrons également dans la discussion générale, sont susceptibles d'avoir engendré des comportements bidimensionnels.

b. La sélection de choix 3D différent(s) de l'objet présenté

La plupart des enfants et des adolescents interrogés semblent concevoir que l'élément présenté virtuellement est la représentation d'un objet en trois dimensions. Ils perçoivent donc les indices relatifs à la troisième dimension offerts par l'environnement virtuel. Pour autant, la perception correcte de la forme de l'objet 3D n'est pas systématique.

Dans la première étude, selon les objets 3D, entre 60% et 90% des participants sélectionnent l'objet 3D correspondant à celui présenté. Pour autant, plusieurs d'entre eux considèrent que l'objet présenté pourrait aussi être un ou plusieurs autres objets 3D différents, ce qui implique qu'ils n'ont pas forcément une perception adéquate de l'objet présenté. Ces enfants et ces adolescents semblent générer plusieurs images mentales au départ de l'objet présenté, ou générer une image mentale qui se transforme, considérant que certaines propriétés ou caractéristiques spatiales de l'objet peuvent être variables dans l'environnement virtuel. Enfin, d'autres enfants et adolescents semblent considérer que l'objet 3D présenté n'est pas l'objet 3D attendu et sélectionnent une ou plusieurs propositions 3D non attendues, sans sélectionner cette dernière proposition. Cela signifie que l'image mentale qu'ils se font de l'objet 3D présenté virtuellement ne correspond pas toujours à l'objet 3D réel présenté. Au total, il apparaît que la part d'individus sélectionnant au moins un objet 3D ne correspondant pas à l'objet présenté initialement peut, selon l'objet 3D, aller jusqu'à 40%.

De la même façon, dans la seconde étude, lorsque le choix est restreint, certains participants dirigent aussi leur choix vers une proposition 3D ne correspondant pas à l'objet présenté, ce qui signifie qu'ils ne se représentent pas correctement l'objet

présenté. Selon l'objet 3D, le pourcentage de participants dans ce cas de figure peut aller jusqu'à 20%.

Pour la plupart des objets 3D, il apparaît que les cas de sélection de propositions 3D sont plus courants quand un choix multiple est proposé (1^{ère} étude) que lorsqu'un choix unique est imposé (2^e étude). Autrement dit, un taux plus élevé de perception inadéquate apparaît le plus souvent dans la première étude. Cela peut être en partie expliqué par le fait que, dans la première étude, une partie des participants ont sélectionné la proposition 3D attendue ainsi qu'une ou plusieurs propositions 3D non attendues en considérant que l'élément proposé pourrait être plusieurs des propositions et notamment celle dont la hauteur a été modifiée. Nous reviendrons d'ailleurs par après sur les raisons susceptibles d'expliquer un tel choix (incompréhension des principes et des propriétés des environnements virtuels, pensée catégorielle...). Sans doute que ces derniers se focaliseraient majoritairement, en cas de choix unique, sur la proposition 3D correcte. Cette suspicion est d'ailleurs confirmée par les pourcentages de sélection de la proposition 3D attendue, qui semblent assez proches dans les deux études. Des investigations complémentaires apparaissent cependant nécessaires pour permettre de vérifier cela, par exemple en contraignant le participant, après un choix multiple, à sélectionner celle qu'il choisirait en cas de choix unique.

Toutefois, il est à noter que la sélection de choix 3D non attendu(s) n'est pas non plus observée chez tous les participants. Dans les deux études, ce type de comportement se produit au moins à une reprise sur les sept exercices proposés pour plus de la moitié des participants. De plus, lorsqu'il se produit, c'est le plus souvent à une reprise même si cette reprise ne concerne pas systématiquement le même objet 3D selon les individus. Les enfants et les adolescents ne semblent donc pas systématiquement capables de prendre en considération l'ensemble des informations planes transitoires diffusées au travers de la représentation virtuelle, de les stocker et de les combiner pour se reconstruire mentalement la troisième dimension, ce qui pourtant est indispensable pour se représenter de manière correcte de telles représentations (Vivian *et al.*, 2014). Krylova et Vodyakha (2022) avaient pu identifier aussi la présence de ce type d'erreurs auprès des enfants âgés de 4 à 6 ans. Toutefois, les auteurs ont observé que cette erreur était bien plus régulière que les cas de comportements bidimensionnels, ce que ne met pas en évidence notre seconde étude. Les différences entre le public cible investigué peuvent sans doute expliquer en partie les différences

de résultats puisque l'observation des résultats obtenus chez les enfants âgés de 6 à 7 ans tend à se rapprocher des observations de Krylova et Vodyakha, avec davantage de sélection de propositions 3D différentes de l'objet présenté que de comportements bidimensionnels. Pour autant, les différences entre ces deux types d'erreur restent faibles en comparaison à l'étude antérieure. Sans doute également que la différence d'objets 3D investigués, plus complexes dans l'étude antérieure, ainsi que les caractéristiques de la tâche proposée (nombre de propositions...) entraîne aussi une plus forte quantité de sélection de choix 3D incorrects.

Plus particulièrement, l'analyse des choix 3D non attendus les plus réalisés dans les deux études permet de mettre en évidence que pour la plupart des objets 3D investigués, les propositions 3D non attendues majoritairement sélectionnées au départ de représentations 2 ½ D sont les propositions d'objet dont la hauteur a été modifiée. Cette proposition est la plus sélectionnée dans l'ensemble des exercices sauf dans l'exercice du cube pour lequel d'autres propositions plus régulièrement choisies. Notons que même si elle reste plus élevée, elle est également très peu sélectionnée pour la sphère. Par ailleurs, cette proposition est davantage observée dans la première étude. C'est la proposition la plus sélectionnée en complément du choix 3D correct pour ceux qui sont dans le cas de perception inadéquate avec sélection de l'objet 3D. C'est aussi, pour tous les objets 3D excepté le cube, l'erreur la plus commise chez ceux n'ayant sélectionné qu'une ou plusieurs propositions 3D différentes de l'objet attendu. Dans la seconde étude, il s'agit également de l'erreur la plus commise pour tous les exercices.

Pourtant, Izard *et al.* (2011) évoquent que déjà en âge préscolaire, les enfants sont sensibles aux propriétés des longueurs. Il semble donc possible de suggérer que cette sensibilité soit moins marquée dans les environnements virtuels. Plusieurs raisons peuvent venir expliquer la sélection majoritaire de la proposition de l'objet 3D dont la hauteur est modifiée :

- De manière générale, la présentation d'informations dynamiques, notamment au travers d'animations, peut entraîner une surcharge cognitive potentielle (Ayres & Paas, 2009 ; Höffler, 2010). Les représentations virtuelles n'échappent pas à la règle dans la mesure où la perception de l'objet 3D représenté exige de pouvoir traiter et retenir les informations transitoires présentées, et en particulier de retenir les informations déterminantes comme les vues de l'avant ou du dessus des objets. Au-delà de retenir ces informations, il s'agit aussi de pouvoir les combiner. Sans se focaliser sur les

représentations virtuelles d'objets 3D, van Gog *et al.* (2008) évoquent que, face à des informations transitoires, les limitations de la mémoire de travail sont susceptibles de poser un problème. En effet, pour pouvoir choisir l'objet 3D attendu et non l'objet 3D dont la hauteur est modifiée, il est nécessaire de retenir les informations relatives à la vue de l'avant et de la compiler avec les autres informations perçues. Par exemple, dans le cadre de l'exercice du cylindre, la vue de l'avant de l'objet est un carré, ce qui sous-entend que la largeur et la hauteur de l'objet 3D sont équivalentes. Cette information, si elle n'est pas correctement prise en considération et intégrée aux autres informations récoltées, peut entraîner la sélection de l'objet 3D dont la hauteur est modifiée.

- Cette difficulté à compiler les informations peut par ailleurs être renforcée par des difficultés de compréhension des informations spatiales métriques. En effet, Frick et Newcombe (2015) ont eu l'occasion de mettre en évidence que des difficultés ont été observées chez les enfants dans la compréhension et l'encodage d'informations spatiales métriques présentes dans des représentations 2D d'objets 3D, notamment dans la comparaison des longueurs et des distances au sein de ces représentations. Les résultats obtenus permettent ici de suspecter que de telles difficultés peuvent être étendues aux représentations 2 ½ D, ce qui expliquerait la sélection d'objets dont les proportions ne sont pas respectées. L'évaluation des processus perceptifs de base permet cependant de mettre en évidence que la sélection de cette erreur type ne semble en revanche pas liée à des difficultés de perception d'égalité de longueurs des segments dans l'espace 2D. Même si les représentations virtuelles contiennent des informations sur les rapports de longueurs des arêtes et des génératrices qui sont importantes à prendre en considération pour la perception adéquate des objets, la capacité à déterminer si des segments sont de même taille ou non ne semble pas influencer la perception adéquate ni le taux de sélection de la proposition 3D dont la hauteur a été modifiée. Cette difficulté se situe donc plutôt au niveau de l'encodage des informations spatiales présentes sur des représentations de l'espace 3D.
- La sélection de telles propositions peut également être renforcée par le phénomène de « perception catégorielle » (Rossielle & Cooper, 2001). Ce phénomène sous-tend que l'individu a tendance à voir le monde en termes de catégories et donc à catégoriser les stimuli. De ce fait, il est possible de considérer que l'enfant ou l'adolescent a sélectionné l'objet 3D dont la hauteur est modifiée parce qu'il appartient à la même catégorie que l'objet 3D initialement présenté (ex. un cylindre droit à base ronde dans le cas de l'exercice du cylindre). Compte tenu de la surcharge précédemment évoquée, il est possible de suspecter que le choix a été fait de se focaliser sur les informations nécessaires pour définir le type de solide géométrique. En lien avec ce phénomène de perception catégorielle, les enfants ne prendraient pas en considération l'information sur la hauteur qui, pour la plupart des objets 3D (en l'occurrence ici tous sauf la sphère et le cube) caractérise l'objet précis mais pas le type de solide. Une telle explication

pourrait d'ailleurs permettre de comprendre pourquoi ce choix 3D non attendu est moins sélectionné pour le cube et la sphère, qui sont deux objets pour lesquels une modification de la hauteur entraînerait une modification de catégorie du solide géométrique (un cube et une sphère ont par définition trois dimensions identiques). Cette explication permettrait aussi de comprendre pourquoi cette erreur est plus observée dans la première étude, dans la mesure où l'individu accepte de sélectionner toutes les propositions 3D appartenant à la catégorie du solide quand le choix multiple est autorisé alors qu'il se focalise plutôt sur l'un des deux choix, probablement le correct, quand un choix unique est imposé.

- Enfin, la sélection de l'objet 3D dont la hauteur est modifiée peut également être renforcée par une possible incompréhension du fonctionnement des environnements virtuels dans le cas de certains enfants et de certains adolescents. Si la validation a permis de vérifier l'utilisabilité de l'environnement et notamment la maîtrise des manipulations, celle-ci n'a pas permis de vérifier la compréhension des fondements de ce type d'environnement. Grâce à certains verbatims récoltés, pourtant, il est possible d'observer que certains participants considèrent que les environnements virtuels ne permettent pas de connaître la taille de l'objet et choisissent donc l'objet dont la hauteur est modifiée, avec ou sans l'objet attendu : « Si ça tombe il est plus grand, vu que c'est un écran on ne sait pas vraiment ça fait quelle taille » (étude 1, participant n° 452, 10 ans). Toutefois, cet argument sous-entend une confusion entre le concept de taille et de proportion dans le cas des enfants et des adolescents, impliquant ainsi une incompréhension du fonctionnement de l'environnement 2 ½ D. S'il est en effet possible d'admettre que l'environnement virtuel ne permet pas de savoir la taille réelle des objets représentés virtuellement, il permet tout de même d'obtenir des informations sur la proportion de l'objet, c'est-à-dire les rapports entre les différentes dimensions de l'objet, notamment en observant l'objet 3D dans différentes positions (ex. observation de l'avant de l'objet, ou encore dessus de l'objet). Toutefois, étonnamment, on devrait alors voir cette erreur se produire pour tous les objets 3D chez les enfants et les adolescents concernés, ce qui ne semble pas être le cas, par exemple pour le cube. À nouveau, cet argument pourrait permettre de comprendre la présence plus importante de ce choix dans l'étude 1, puisque cette absence de maîtrise du principe de l'environnement entraînerait la sélection de l'objet 3D dont la hauteur est modifiée ainsi que celle de l'objet 3D correct, là où l'individu se dirigerait plutôt vers l'un des deux choix, principalement le correct, quand la sélection d'une proposition maximum est imposée.

Il est donc possible de suspecter que c'est le croisement entre cette incompréhension des environnements, une difficulté à combiner les informations et le phénomène de pensée catégorielle qui oriente la sélection de ce type de propositions.

Bien qu'ils soient majoritairement plus rares, d'autres choix 3D ne correspondant pas à l'objet 3D de départ ont été parfois sélectionnés par les enfants et les adolescents. À titre d'exemple, face au prisme droit à base triangulaire, plus d'un participant sur dix considère que l'objet 3D représenté virtuellement pourrait être un prisme penché à base triangulaire (1^{ère} étude). Cette observation permet de confirmer que les difficultés de perception ne se situent pas uniquement au niveau de la compréhension des environnements virtuels ou de la pensée catégorielle. De telles erreurs peuvent être associées à une difficulté à s'imaginer mentalement la forme d'objets lorsqu'ils sont représentés en mouvement (Larios, 2006). D'après Todd (2004), l'observation de ces mouvements peut entraîner des déformations optiques. Ces déformations sont susceptibles de générer des difficultés de perception visuelle des objets 3D. De plus, à nouveau, la présence de ces erreurs indique que les enfants et les adolescents ne sont donc pas forcément capables de mémoriser et de combiner les informations 2D transitoires fournies dans la représentation virtuelle puisque cette capacité entraînerait théoriquement un rejet des propositions 3D avec déformation au profit de la sélection unique de l'objet 3D attendu. La surcharge mentale occasionnée par cette nécessité de mémorisation et de mise en relation des informations est donc une raison permettant d'expliquer des difficultés de perception de représentations virtuelles d'objets 3D.

9.1.3.2. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle manipulable : une habileté qui varie entre les objets 3D

Nous évoquions précédemment que les enfants et les adolescents ne percevaient pas systématiquement l'ensemble des objets 3D et avaient majoritairement une maîtrise partielle de cette capacité. Par ailleurs, nous avons pu pointer notamment des différences au niveau des erreurs types commises selon les objets 3D. Ces éléments suggèrent que les capacités de perception des objets 3D au départ de représentations 2 ½ D varient entre les objets 3D. L'observation des taux de perception associés à chaque objet 3D investigué permet de confirmer de telles différences, certains semblant plus souvent adéquatement perçus que d'autres. Ce résultat s'inscrit donc en cohérence avec les recherches antérieures ayant mis en évidence que les processus perceptifs pouvaient différer selon les objets à observer (Wu & Chiang, 2013) et avec d'autres recherches ayant observé un même constat au sujet d'autres habiletés spatiales (Duroisin, 2015). Plus spécifiquement, Wu et Chiang (2013) avaient pu mettre en évidence que les capacités de compréhension des apparences et des propriétés

d'objets 3D complexes évaluées auprès d'adultes au départ de représentations 2 ½ D d'objets étaient meilleures pour les objets construits par des surfaces obliques ou doublement incurvées, en comparaison aux objets disposant de surfaces normales, inclinées ou cylindriques. En se focalisant sur des objets simples appartenant, selon la classification des auteurs précédemment évoqués, à des objets disposant de surfaces normales (cube, prisme droit à base triangulaire), cylindriques (cylindre, cône et anneau à bord rond) ou doublement incurvées (sphère, anneau rond à bord rond), les résultats obtenus semblent partiellement cohérents avec ceux relevés par les auteurs puisqu'on observe, dans les deux études, que la perception du prisme droit à base triangulaire est plus problématique et se distingue significativement de la perception de la plupart des autres objets 3D. Inversement, la sphère semble être l'un des objets 3D ayant le taux de réussite le plus élevé, même si le taux obtenu pour ce solide est parfois proche de celui observé pour les autres objets 3D, y compris des objets avec surfaces « normales » (au sens de Wu & Chiang, 2013), comme le cube, ou avec surfaces cylindriques. Les divergences entre les résultats obtenus peuvent sans doute être expliquées par le caractère moins complexe et plus familier des objets investigués dans notre étude, mais aussi par la nature différente de la tâche (retrouver une vue de l'objet et non l'objet entier).

D'ailleurs, les différences entre objets 3D pourraient notamment être expliquées par l'expérience des enfants et des adolescents avec les différents objets 3D. Sans doute que les enfants et les adolescents sont moins souvent confrontés à des objets 3D comme le prisme que comme la sphère ou le cube par exemple, ce qui pourrait expliquer la moins bonne perception constatée pour cet objet, surtout chez les plus jeunes participants. La probable plus faible expérience avec ce solide peut sans doute expliquer un tel résultat (Arcavi, 2003 ; Widder *et al.*, 2014). D'ailleurs, les analyses prenant en compte les niveaux scolaires montrent que les taux sont globalement plus élevés dans les niveaux scolaires susceptibles, d'après les référentiels de FWB, d'avoir rencontré cet objet, ce qui incite à considérer cette raison comme une raison susceptible d'expliquer les résultats. Cela ne semble cependant pas être la seule explication à accorder au vu des taux plus élevés observés pour l'anneau droit qui lui aussi est sans doute moins rencontré par les enfants et les adolescents puisqu'il n'est *a priori* pas un objet 3D étudié lors de l'apprentissage de la géométrie 3D au primaire et au secondaire inférieur. De plus, la perception du cube ou de la sphère, même si ce sont des objets 3D rencontrés très tôt dans le parcours scolaire, semble malgré tout

poser des difficultés à certains enfants et certains adolescents, y compris dans les niveaux scolaires plus élevés.

Des difficultés associées à la perception semblent pouvoir aussi être liées à une caractéristique des représentations utilisées, proposant différentes teintes d'une même couleur pour distinguer les faces. L'absence du tracé des limites et des bords au sein des représentations (arêtes uniquement perceptibles par le changement de teintes) est susceptible d'impacter négativement la perception des objets et ce même si cela rend l'objet plus concret (Frick & Newcombe, 2015). En effet, face aux représentations virtuelles manipulables, il apparaît, à l'issue de la première étude, que l'incapacité à distinguer les teintes de couleurs présentes sur la représentation du prisme est liée à la non-maitrise de la perception de ce solide. Un tel résultat invite par ailleurs à poser une réflexion sur les caractéristiques à intégrer dans les représentations virtuelles pour probablement se donner des chances que les objets, en particulier ceux *a priori* plus complexes, soient adéquatement perçus. Ces éléments constituent des pistes qui mériteraient d'être investiguées et sur lesquelles nous reviendrons donc au moment de décrire les prolongements potentiels des études menées.

Plusieurs raisons évoquées en lien avec les erreurs types commises peuvent sans doute aussi aider à expliquer les différences entre la sphère et les autres objets. D'une part, ce solide implique une plus faible quantité d'informations à retenir puisque l'apparence globale de la représentation reste identique, même si des jeux de lumière et les mouvements qu'il fait sur l'écran aident le participant à comprendre qu'il s'agit tout de même d'un élément en train de tourner sur lui-même. D'autre part, la pensée catégorielle incite sans doute à ne pas inclure la sélection d'autres propositions et notamment celle dont la hauteur est modifiée, sous peine de sélectionner un objet n'appartenant plus à la même catégorie.

Les différences entre objets 3D peuvent en outre être expliquées par les conditions d'expérimentation et notamment le nombre de distracteurs proposés qui varient d'un objet à l'autre. Le prisme droit à base triangulaire, qui est l'objet 3D le moins souvent adéquatement perçu est l'objet 3D pour lequel l'exercice contient, au même titre que l'anneau à bord droit, le plus de distracteurs. L'exercice de la sphère, qui fait quant à lui partie des exercices les mieux réussis, propose le moins de distracteurs. Pour autant, ce critère est insuffisant pour pouvoir expliquer l'ensemble des différences entre objets 3D puisque d'autres exercices comme le cube contiennent un nombre de distracteurs élevé. Ces conditions d'expérimentations, qui constituent une limite à l'étude, invitent

à conserver une certaine prudence dans la comparaison des objets 3D. Le choix a été dans les études ici menées de privilégier tant que possible une cohérence entre les caractéristiques des propositions plutôt qu'entre le nombre de propositions par objet 3D. Ce choix, même s'il invite à être précautionneux dans la comparaison entre objets 3D, permet de relever une certaine irrégularité dans les erreurs réalisées par un même participant. Autrement dit, ce n'est pas parce que l'enfant ou l'adolescent effectue une erreur type (ex. sélection d'un objet dont la hauteur a été modifiée) pour un objet qu'il effectuera la même erreur type pour les autres objets 3D, ce qui permet de confirmer que le processus cognitif de perception varie selon les objets 3D à percevoir.

Outre cette irrégularité observée chez les individus au niveau de la perception des différents objets 3D, une variabilité est aussi observée entre les individus. Malgré les tendances susmentionnées quant aux difficultés plus marquées observées pour certains objets 3D, lorsqu'un objet 3D n'est pas adéquatement perçu, il ne s'agit par exemple pas systématiquement du même objet pour tous les enfants et les adolescents. D'ailleurs, les résultats montrent qu'aucun objet n'est systématiquement adéquatement perçu par l'ensemble des enfants et des adolescents et que tous posent donc des difficultés au moins à certains d'entre eux. Cette variabilité entre individus est en cohérence avec les différences individuelles associées au traitement de l'information en mémoire de travail et à la formation des représentations mentales d'objets 3D (Meijer & van den Broek, 2010). Si Neisser (1976, cité par Widder *et al.*, 2019) a pu mettre en évidence que la capacité à percevoir un objet 3D à partir d'une représentation 2D varie entre les individus, il semble possible d'en dire autant de la capacité à percevoir des représentations virtuelles.

9.1.3.3. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle manipulable : une habileté qui n'évolue que partiellement avec l'âge

En prenant en compte la variable âge dans les analyses, les résultats permettent de mettre en évidence que le taux de perception observé pour chacun des objets 3D n'augmente pas forcément avec l'âge. Quand une amélioration est observée, elle reste parfois limitée. Si une augmentation légère à modérée est observée par exemple pour le prisme, le cône ou les anneaux quand un choix multiple est autorisé, ou pour le prisme et la sphère quand le choix est unique, les capacités ne s'améliorent pas avec l'âge pour certains objets 3D. On observe la plupart du temps des évolutions avec l'âge variables entre les objets 3D. On retrouve donc là une illustration supplémentaire de

différences apparaissant entre objets 3D. L'habileté de perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles se développe en partie avec l'âge, comme ce qu'avaient pu mettre en évidence Frick et Newcombe (2015) au sujet de l'observation de représentations 2D d'objets 3D.

Pour autant, les analyses menées sur les enfants les plus jeunes indiquent qu'à l'âge de 6 ou 7 ans, une certaine maîtrise de la perception des objets 3D est déjà observée chez plusieurs enfants. Comme évoqué précédemment, les individus à cet âge semblent conscients que les environnements virtuels permettent de fournir des représentations d'objets 3D. Si pour le prisme, les deux études indiquent que moins de 50% des interrogés perçoivent adéquatement l'objet 3D, ils sont plus de la moitié à percevoir adéquatement chacun des autres objets 3D. La perception de telles représentations à cet âge est donc possible mais n'est pas systématique, comme Krylova et Vodyaha (2020) avaient pu le relever auprès de quelques enfants âgés de 4 à 6 ans, et ce même si l'évaluation ici proposée porte sur des objets 3D plus simples que ceux sur lesquels portait l'étude antérieure.

Pour les objets 3D pour lesquels une amélioration est observée, les résultats montrent que les enfants ont, avec l'âge, moins tendance à sélectionner des propositions 3D ne correspondant pas à l'objet 3D présenté. Ces résultats confirment donc en partie les propos de Vivian *et al.* (2014) qui mentionnaient que les difficultés de reconstitution de la troisième dimension sont particulièrement susceptibles de concerner les enfants plus jeunes. Dans l'environnement virtuel, il semble donc que la perception de certains objets se construit progressivement chez l'enfant, comme c'est le cas dans l'espace sensible (Piaget & Inhelder, 1948). Cette observation d'amélioration de la perception de certains objets 3D semble pouvoir être expliquée par plusieurs facteurs potentiels, notamment en lien avec les possibles explications aux difficultés rencontrées précédemment citées :

- un développement de la pensée spatiale dynamique (Frick *et al.*, 2013 ; Levine *et al.*, 1999) et notamment une amélioration des capacités de rotation mentale. Même si cela fait l'objet de débat (Hegarty & Kriz, 2008 ; Höffler & Leutner, 2011), il semble possible de suspecter que des compétences spatiales développées s'avèrent nécessaires pour comprendre les informations dynamiques (Chikha *et al.*, 2021 ; Hegarty & Kriz, 2008). Plus particulièrement, dans notre cas, il s'agit de considérer que les capacités de rotation mentale pourraient être nécessaires pour comprendre les rotations effectuées par l'objet 3D dans la représentation virtuelle. Si la première étude n'a pas investigué

cette variable secondaire, c'est le cas de la seconde étude. Celle-ci permet d'apporter des éléments de réponse au débat précédemment mis en évidence puisqu'un lien positif semble être constaté entre les capacités de perception de certains objets comme le prisme et de rotation mentale. Au plus le score au test de rotation mentale est élevé, au plus le taux de perception visuelle de certains objets 3D est lui aussi élevé, et ce malgré le fait que le test de rotation mentale utilisé n'a pas été validé pour l'ensemble du public cible, avec le risque de voir un éventuel effet plafond émerger lors de son usage avec des enfants plus âgés et des adolescents (Beauset & Duroisin, 2023d). Ces résultats suggèrent que les représentations virtuelles sont plus adaptées aux enfants et aux adolescents capables de faire preuve de rotation mentale. De ce fait, si Vivian *et al.* (2014) précisait que la perception de représentations virtuelles n'exigeait pas de mettre en œuvre des manipulations mentales, il s'agit tout de même de nuancer quelque peu ces propos puisque la maîtrise de capacités de manipulation mentale et en particulier de rotation mentale est tout de même susceptible d'influencer la perception de représentations virtuelles. Puisque cette habileté spatiale se développe avec l'âge (Hawes *et al.*, 2015a ; Vander Heyden *et al.*, 2016), il est possible de suspecter que cette amélioration des capacités de rotation mentale puisse occasionner de meilleures capacités de perception des objets 3D.

- un développement d'autres processus sous-jacents comme la mémoire de travail et les autres fonctions exécutives (Vander Heyden *et al.*, 2016) susceptibles d'intervenir au départ de représentations virtuelles d'objets 3D comme le montre l'analyse *a priori* préalablement proposée (cf. 7.3.4.2, volume 1);
- un développement des connaissances antérieures et une plus grande expérience face aux représentations des objets 3D, même si les résultats observés sur quelques objets 3D invitent à nuancer ces propos. Les connaissances préalables des individus peuvent venir influencer la perception (Havé *et al.*, 2020 ; Widder *et al.*, 2014). Dans ce contexte, il est logique de considérer que les capacités de perception aux exercices proposés sont influencées par les apprentissages réalisés en géométrie 3D puisque les exercices de perception portent, au moins en partie, sur des objets 3D étudiés en géométrie (cube, cône, cylindre...). Les adolescents et enfants plus âgés ont *a priori* été davantage exposés aux objets 3D faisant l'objet de l'étude, ce qui peut encourager la bonne perception des objets 3D (Leighty *et al.*, 2008). Toutefois, comme susmentionné, les investigations relatives à la variable secondaire se rapportant à l'expérience en géométrie 3D invitent à rester prudent par rapport à cet argument. En effet, les résultats montrent que, sur l'échantillon complet, le fait d'avoir ou non abordé la géométrie lors de l'année scolaire en cours semble donner des résultats statistiquement équivalents, tout comme le fait d'avoir ou non déjà rencontré des représentations virtuelles de solides ou comme le fait d'avoir ou non déjà dû résoudre des exercices similaires évaluant la perception d'objets géométriques. De plus, les capacités de perception ne semblent pas systématiquement augmenter entre les

niveaux scolaires, même si, pour le cas du prisme, il semble possible de suggérer que les résultats sont plus élevés dans les niveaux scolaires susceptibles d'avoir déjà développé des apprentissages sur le solide.

- une meilleure compréhension du fonctionnement des environnements virtuels et de la distinction entre taille et proportion, confirmé par la diminution pour certains objets (ex. prisme) de la sélection de la proposition 3D relative à l'objet dont la hauteur est modifiée.

Malgré l'évolution des capacités de visualisation de certains objets avec l'âge, les résultats semblent indiquer que percevoir les représentations virtuelles des objets pose encore des difficultés à certains participants âgés de 14 et 15 ans. Même si les deux études montrent que tous les objets sont perçus adéquatement par plus de 70% des adolescents, il n'en reste pas moins que les objets représentés virtuellement ne sont pas perçus adéquatement par tous, excepté la sphère dans la seconde étude. Même chez les adolescents, des difficultés de perception des différents objets 3D restent observées, même pour des solides ayant déjà fait l'objet d'un apprentissage scolaire. Le cube, par exemple apparaît perçu adéquatement par moins de 80% des participants dans les deux études, ce qui signifie que plus d'un adolescent sur cinq ne le perçoit pas adéquatement. Les constats relevés par Krylova et Vodyakha (2022) concernant le fait que les enfants sont capables de percevoir adéquatement de telles représentations mais que cette perception n'est pas systématique peuvent donc être élargis aussi aux enfants plus âgés et aux adolescents.

9.1.3.4. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle manipulable, une habileté susceptible d'être influencée par certaines variables secondaires

Si les résultats menés se sont focalisés sur les variables principales que sont la modalité de représentation, l'âge et les objets 3D, l'exploitation d'informations relatives aux variables secondaires investiguées a permis d'apporter des explications potentielles à certains des résultats obtenus. C'est le cas par exemple de la variable relative au niveau de rotation mentale, à la distinction des couleurs, à l'acquisition de certains processus cognitifs de base, au niveau scolaire. En parallèle, d'autres variables ont été aussi investiguées.

Malgré les nombreuses études ayant mis en évidence des différences de genre dans l'acquisition de certaines habiletés spatiales (Linn & Peterson, 1985), des différences de genre ne semblent pas être constatées au niveau de l'acquisition de la perception

de représentations virtuelles, ce qui est cohérent avec les résultats observés par Wu et Chiang (2013), même si cette recherche portait sur des adultes et des objets plus complexes. Elle apparaît aussi en cohérence avec ceux mis en évidence par Frick et Newcombe (2015) au sujet des représentations planes.

De même, si certaines habitudes des enfants et des adolescents sont susceptibles d'impacter le développement de leurs compétences spatiales (Gergelitsová & Holan, 2017 ; Hoyek *et al.*, 2010), les résultats des deux études semblent mettre en évidence ici une absence majoritaire de l'influence des habitudes investiguées sur les capacités de perception.

En revanche, les résultats indiquent que la présence d'un risque de trouble de la coordination chez les enfants et les adolescents est une variable qui semble influencer, au moins pour certains objets 3D, la perception de représentations 2 ½ D. Cela soutient le lien identifié entre les compétences motrices et spatiales (Amorim *et al.*, 2006, Steggemann *et al.*, 2011). Un tel résultat peut notamment être expliqué par le fait qu'un déficit des habiletés motrices peut occasionner des difficultés à mettre en œuvre des rotations mentales (Fernández-Méndez *et al.*, 2020 ; Lehmann *et al.*, 2014) qui, comme nous l'avons mis en évidence précédemment, pourraient influencer la perception adéquate de représentations virtuelles.

9.2. Réponse à la question de recherche 1.2° : impact de la manipulation sur la perception des objets 3D au départ de représentations 2 ½ D

Pour évaluer l'impact de la manipulation dans l'environnement virtuel et ainsi apporter une réponse à la question de recherche 1.2°, les résultats des participants confrontés à des représentations virtuelles devant être observées uniquement, c'est-à-dire ceux répartis dans le deuxième groupe de chacune des études, sont présentés et comparés à ceux obtenus dans les groupes confrontés à des représentations virtuelles manipulables, c'est-à-dire le premier groupe de chaque étude.

9.2.1. Résultats relatifs à la première étude expérimentale (groupe 1 vs groupe 2)

9.2.1.1. Impact de la manipulation sur la perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles (toutes tranches d'âge confondues)

a. Analyses générales

Le Tableau 25¹⁰ présente le taux de perception adéquate obtenu pour chacun des objets 3D face à sa représentation virtuelle à manipuler et face à sa représentation virtuelle à observer uniquement. Il apparaît que les taux de perception obtenus pour tous les objets 3D sauf le prisme et l'anneau droit sont plus élevés au départ de représentations virtuelles à manipuler. Cependant, pour certains objets 3D, à l'instar du prisme, de l'anneau droit et du cône, les différences entre les deux groupes sont minimales. Cela semble être moins le cas pour d'autres objets 3D, particulièrement pour la sphère où un écart de plus de 15% est constaté entre les deux groupes, à l'avantage du premier groupe.

Tableau 25 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G1 : manip. 2½D (N = 158)	71,5%	65,2%	83,5%	48,1%	75,3%	75,3%	67,7%
G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	58,6%	61,1%	67,5%	52,9%	63,1%	66,2%	68,2%

¹⁰ Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

Par ailleurs, les écarts entre les objets apparaissent plus élevés dans le premier groupe, où le taux de perception adéquate varie, selon les objets, entre 48,1% et 83,5%, en comparaison au deuxième groupe où ils varient entre 52,9% et 68,2%. De tels résultats mettent également en évidence qu'aucun objet n'est systématiquement adéquatement perçu au départ de représentations 2 ½ D à manipuler et à observer.

Bien que les écarts entre les objets 3D apparaissent plus faibles dans le deuxième groupe, les tests *Q de Cochran* appliqués entre les sept objets 3D permettent de statuer sur la présence de différences significatives entre les sept objets 3D dans le deuxième groupe ($Q = 16,463$; $p\text{-value} = 0,011$). Autrement dit, des différences de performance sont observées entre les objets 3D quand les enfants sont confrontés à des représentations virtuelles à observer. Ce constat apparaît donc similaire à celui réalisé face à des représentations virtuelles à manipuler ($Q = 68,612$; $p\text{-value} < 0,001$). En plus de ce premier point commun, le prisme est l'objet dont la perception pose le plus de difficultés dans les deux groupes. La sphère pose quant à elle le moins de difficultés de perception face à des représentations virtuelles à manipuler et est l'un des objets 3D en posant le moins dans l'autre groupe. Malgré cela, des divergences sont aussi observées entre les deux groupes quant au sens des différences constatées entre objets 3D. Ces différences sont notamment confirmées par les *tests de McNemar* appliqués dans chacun des groupes pour comparer les taux des paires d'objets 3D (cf. Annexe 20). Ces tests montrent que très peu de différences significatives apparaissent entre les taux de perception adéquate des objets 3D dans le groupe 2. Dans ce groupe, seul le prisme se distingue de plusieurs autres objets 3D. Les autres objets sont perçus de manière statistiquement équivalente. Si, dans le groupe 1, le prisme se distingue aussi de ces objets, et même de tous les autres, d'autres différences significatives apparaissent dans cette modalité. Par exemple, la sphère est l'objet 3D le mieux perçu dans le premier groupe et se distingue significativement de plusieurs autres objets 3D. Des divergences apparaissent donc entre les deux modalités de représentation.

Pour aller plus loin dans les analyses, la Figure 11 présente la répartition des participants selon le nombre d'objets 3D perçus adéquatement. Ce graphique montre de nombreuses similitudes entre les répartitions obtenues auprès des participants confrontés à des représentations virtuelles à manipuler et à observer. Le pourcentage de participants ayant perçu adéquatement l'ensemble des objets 3D est plus faible dans le groupe confronté à des représentations virtuelles à observer (15,9%) que dans le groupe confronté à des représentations virtuelles à manipuler (23,4%). En revanche,

dans les deux groupes, la majorité des individus perçoivent adéquatement cinq, six ou sept des objets 3D. De plus, dans les deux groupes, très peu de participants ne perçoivent adéquatement aucun des sept objets 3D même s'ils sont plus nombreux dans ce cas de figure quand la perception est évaluée au départ de représentations virtuelles ne pouvant être manipulées par le participant (7,0% contre 1,3%). Au vu de ces résultats, la perception adéquate des objets 3D peut être décrite comme majoritairement partiellement acquise même si, le plus souvent, les individus perçoivent une bonne partie des objets 3D présentés. Face à des représentations virtuelles à manipuler et à observer, certains participants ne perçoivent adéquatement qu'un nombre restreint d'objets 3D et sont donc confrontés à des difficultés de perception plus marquées.

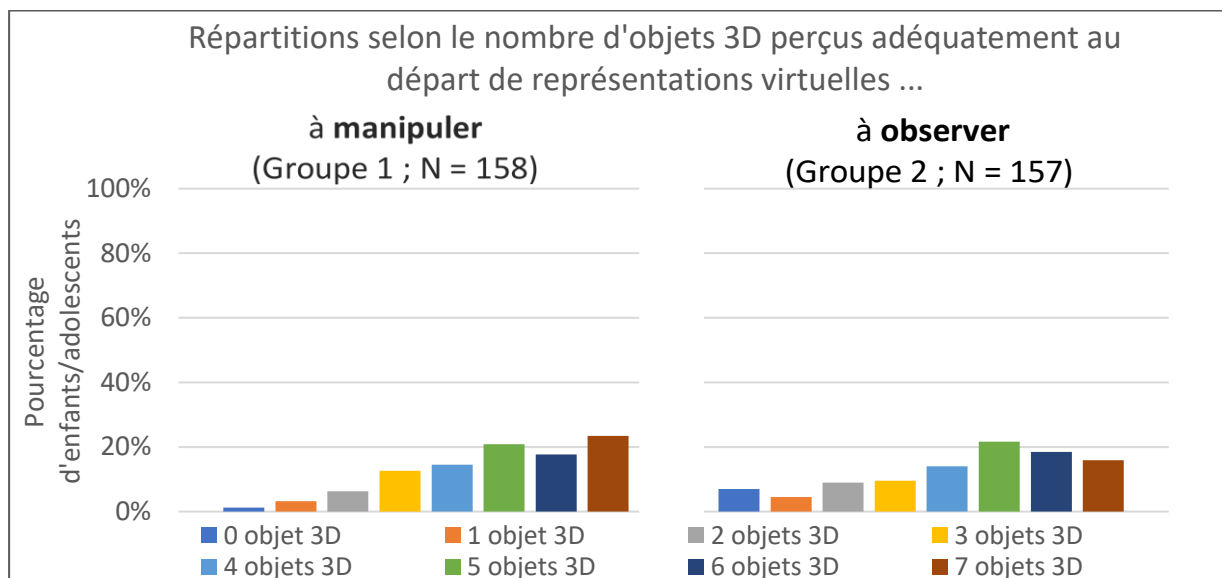


Figure 11 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal (1^{ère} étude)

Les analyses antérieures menées dans le premier groupe (cf. 9.1.1.1) ont permis de pointer une irrégularité entre les participants en ce qui concerne les difficultés rencontrées dans la mesure où ce ne sont pas systématiquement les mêmes objets 3D qui posent des difficultés, bien que certains posent plus régulièrement des difficultés que d'autres. Un même constat semble pouvoir être établi dans le deuxième groupe, comme le présente l'annexe 21. On y observe, par exemple, que quand un seul objet 3D n'est pas adéquatement perçu, il arrive que ce soit n'importe lequel d'entre eux, même si c'est plus rarement l'un des anneaux. *A contrario*, quand un seul objet est adéquatement perçu, il ne s'agit, comme dans le groupe 1, jamais du prisme ou de

l'anneau droit. Il ne s'agit cependant jamais non plus du cube même s'il arrive que ce soit les autres objets 3D.

Concernant les cas de perception inadéquate obtenus dans les deux groupes (Figure 12), des tendances communes apparaissent entre les deux modalités. Un nombre restreint de participants sélectionnent une ou des propositions 3D non attendues pour la sphère, que ce soit au départ de sa représentation virtuelle à manipuler (3,80% de perception inadéquate) ou à observer (5,73% de perception inadéquate). Face aux deux modalités, le cube obtient le deuxième taux de perception inadéquate le plus faible, avec un taux valant respectivement 8,23% et 12,75%. À l'inverse, les participants sont, dans les deux groupes, plus nombreux à sélectionner des propositions 3D non attendues pour le prisme (39,24% pour le groupe 1 et 31,21% pour le groupe 2). C'est cependant pour cet objet 3D que l'écart entre les deux groupes est le plus important. Le cône obtient le deuxième taux de perception inadéquate dans les deux groupes, valant respectivement 26,58% et 29,30%. Pour les trois autres objets, le taux de perception inadéquate varie entre 13% et 21% quand les représentations virtuelles peuvent être manipulées et entre 17% et 21% quand elles ne peuvent l'être.

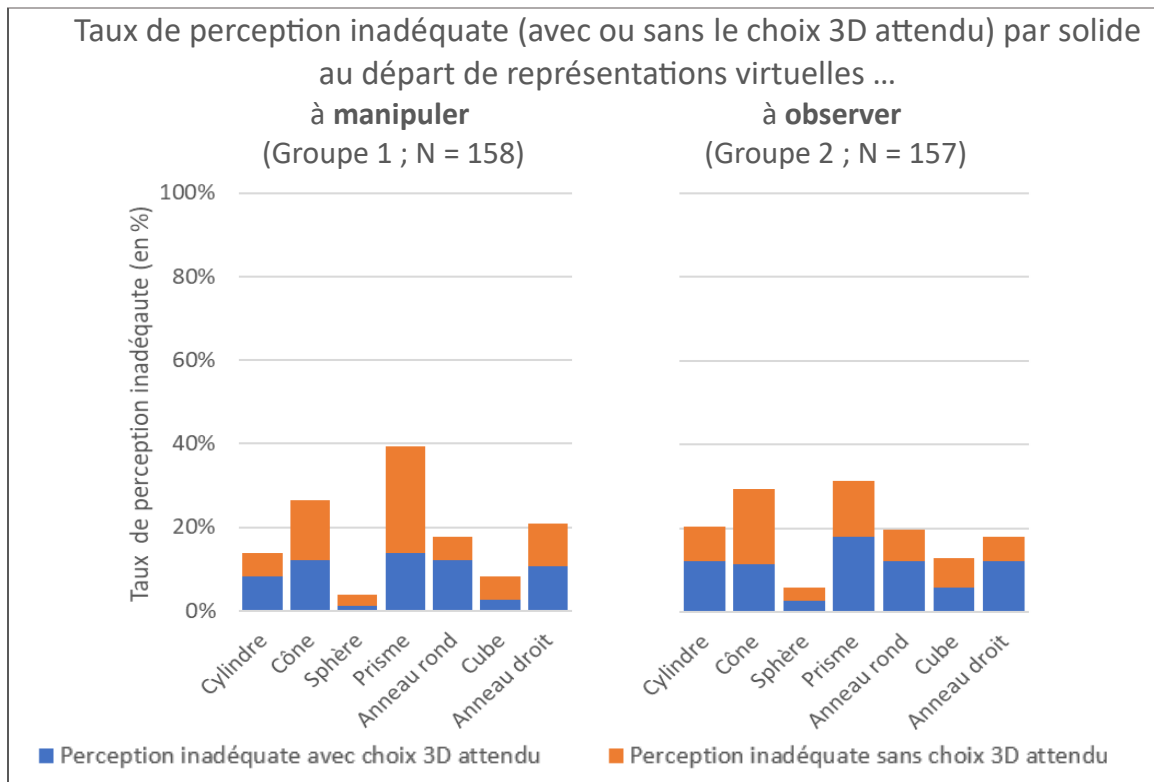


Figure 12 : Taux de perception inadéquate (avec ou sans le choix 3D attendu) au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

Au regard uniquement du taux de participants ayant choisi une ou plusieurs propositions 3D non attendues en plus de la proposition 3D attendue, peu de différences sont observées entre les deux groupes pour les taux relevés pour chaque objet 3D. Les taux associés aux différents objets 3D pour lesquels ce cas de figure est le moins fréquent sont identiques : la sphère et le cube.

Pour le second cas de figure, lorsqu'au moins un objet 3D non attendu est choisi sans l'objet 3D attendu, les résultats sont un peu différents. Dans les deux groupes, le taux le plus faible se rapporte à la sphère. Le taux relatif au prisme est quant à lui le plus élevé, même s'il apparaît plus élevé quand les représentations virtuelles peuvent être manipulées (25,32%) que quand elles ne peuvent l'être (13,38%).

Plus particulièrement, l'annexe 22, qui présente la fréquence de sélection de chacune des propositions 3D non attendues, souligne l'existence de nombreuses similitudes entre les deux modalités. Face aux deux modalités, la sélection de l'objet 3D dont la hauteur est modifiée est la proposition 3D non attendue la plus fréquemment sélectionnée pour le cylindre. Un peu plus d'un participant sur dix sélectionne cette proposition dans les deux groupes alors que les autres propositions 3D sont absentes ou très peu observées. Pour le cône et les anneaux, la proposition 3D dont la hauteur a été modifiée est également celle la plus sélectionnée dans les deux groupes, avec qui plus est des taux proches observés entre les deux groupes, alors que les autres propositions sont à nouveau moins récurrentes, voire absentes. Pour le prisme, pour qui la sélection de propositions 3D est plus fréquente, la sélection de la proposition 3D dont la hauteur est modifiée est aussi la plus récurrente dans les deux groupes même si sa fréquence de sélection apparaît plus élevée dans le premier (21,5% contre 14,6%). Vient ensuite, dans les deux groupes, la sélection de l'objet 3D incliné. À l'inverse, la sélection de l'objet 3D dont la base est déformée est minoritaire dans les deux groupes. Pour la sphère, la sélection de la proposition 3D dont la hauteur a été modifiée est plus choisie mais sa fréquence reste faible dans les deux groupes. Enfin, pour le cube, les différentes propositions 3D sont peu choisies dans les deux groupes mais la proposition de l'objet dont la hauteur a été modifiée ne se distingue pas forcément des autres propositions. Au total, il ressort donc que, dans les deux modalités, la proposition 3D la plus fréquemment choisie parmi les propositions 3D non attendues est quasiment systématiquement celle relative à l'objet dont la hauteur a été modifiée.

Face à des représentations virtuelles à manipuler, comme face à des représentations virtuelles à observer, le taux de perception inadéquate des objets 3D est plus élevé que les taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) pour tous les objets 3D excepté la sphère et le cube. Autrement dit, les participants tendent davantage à considérer que l'objet 3D présenté est un objet 2D ne correspondant pas à l'objet initial plutôt qu'un élément 2D. C'est particulièrement le cas pour le cône et le prisme dans les deux groupes. Concernant les taux de non-perception associés à chaque objet 3D, présentés au sein du Tableau 26¹¹, les résultats obtenus montrent que les écarts entre objets 3D sont plus élevés face à des représentations virtuelles ne pouvant pas être manipulées. En effet, dans cette modalité, le taux de non-perception varie entre 3,8% (pour le cône) et 25,5% (pour la sphère) alors qu'il varie entre 5,1% (pour l'anneau rond) et 13,3% (pour le cube) quand elles peuvent être manipulées. Si, entre les deux groupes, des taux de non-perception sont assez proches pour la plupart des objets 3D, des différences plus importantes sont constatées entre les deux pour la sphère. Les participants sont plus de deux fois plus nombreux à ne sélectionner qu'une ou des propositions 2D face à des représentations à observer en vidéo.

Tableau 26 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G1 : manip. 2½D (N = 158)	10,1%	5,7%	10,8%	9,5%	5,1%	13,3%	10,8%
G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	14,0%	3,8%	25,5%	11,5%	11,5%	14,0%	10,8%

L'annexe 22, qui présente les taux de sélection des différentes propositions 2D, permet de relever de nombreuses similitudes entre les deux modalités. Par exemple, dans les deux groupes, la proposition 2D la plus souvent sélectionnée pour l'ensemble des objets 3D excepté le prisme est la représentation 2D de l'objet en position initiale. Pour la plupart de ces objets 3D, les taux de sélection des propositions 2D sont proches dans les deux groupes.

¹¹ Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

b. Analyses inférentielles comparatives

Précédemment, la présentation des taux de perception obtenus pour chacun des objets 3D a permis de relever la présence de taux de perception proches, parfois même très proches, pour certains objets (ex. anneau droit) entre le groupe autorisé et celui non autorisé à manipuler les représentations virtuelles. Pour d'autres objets, des différences parfois plus importantes ont été observées.

Des analyses inférentielles (*tests du Khi-carré*) permettent d'identifier l'indépendance ou non de la perception de chaque objet 3D au groupe d'appartenance lorsque les groupes 1 et 2 sont pris en considération, autrement dit l'indépendance des capacités de perception à la place accordée à la manipulation (Tableau 27). Les résultats obtenus à ces tests inférentiels comparatifs sont significatifs pour certains objets mais pas pour tous. Au niveau du taux de perception adéquate, des résultats significatifs sont observés pour la sphère ($\chi^2 = 10,954$; $p\text{-value} = 0,001$), pour le cylindre ($\chi^2 = 5,784$; $p\text{-value} = 0,016$) et pour l'anneau rond ($\chi^2 = 5,553$; $p\text{-value} = 0,018$). Pour le cube, les résultats sont proches du seuil de significativité ($\chi^2 = 3,136$; $p\text{-value} = 0,077$). Les analyses descriptives présentées préalablement ont par ailleurs montré que, pour ces objets 3D, les taux obtenus sont systématiquement en faveur des enfants autorisés à manipuler les représentations virtuelles.

Tableau 27 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G2 : Khi-carré (χ^2) et $p\text{-value}$ (p) (1^{ère} étude)

	Taux de perception adéquate	Taux de perception inadéquate	Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims)
Cylindre	$\chi^2 = 5,784$ $p = 0,016^*$	$\chi^2 = 2,312$ $p = 0,128$	$\chi^2 = 1,121$ $p = 0,290$
Cône	$\chi^2 = 0,553$ $p = 0,457$	$\chi^2 = 0,289$ $p = 0,591$	$\chi^2 = 0,610$ $p = 0,435$
Sphère	$\chi^2 = 10,954$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 0,650$ $p = 0,420$	$\chi^2 = 11,510$ $p = 0,001^{**}$
Prisme	$\chi^2 = 0,715$ $p = 0,398$	$\chi^2 = 2,225$ $p = 0,136$	$\chi^2 = 0,326$ $p = 0,568$
Anneau rond	$\chi^2 = 5,553$ $p = 0,018^*$	$\chi^2 = 0,212$ $p = 0,645$	$\chi^2 = 4,262$ $p = 0,039^*$
Cube	$\chi^2 = 3,136$ $p = 0,077$	$\chi^2 = 1,709$ $p = 0,191$	$\chi^2 = 0,035$ $p = 0,852$
Anneau droit	$\chi^2 = 0,007$ $p = 0,935$	$\chi^2 = 0,470$ $p = 0,493$	$\chi^2 = 0,000$ $p = 0,984$

Plus particulièrement, les analyses menées sur les erreurs types permettent de relever que le taux de perception inadéquate de représentations 2 ½ D apparaît

indépendant de la place accordée à la manipulation pour tous les objets 3D car les résultats obtenus à ce sujet apparaissent tous non significatifs. Pour le taux de non-perception, des résultats significatifs sont par contre constatés pour la sphère ($\chi^2 = 11,510$; $p\text{-value} = 0,001$) et l'anneau rond ($\chi^2 = 4,262$; $p\text{-value} = 0,039$) ce qui laisse sous-entendre que les comportements bidimensionnels sont influencés par le fait d'autoriser ou non la manipulation des représentations 2 ½ D pour ces deux objets. Nous reviendrons sur cet aspect en discussion. Pour ces derniers, rappelons que le taux de non-perception est plus élevé dans le groupe devant observer les représentations.

Au regard de ces analyses, il est possible de conclure que la capacité de perception visuelle de certains objets 3D (la sphère, le cylindre et l'anneau rond) est dépendante de la place accordée à la manipulation, avec des résultats en faveur de la manipulation. En particulier, pour ces objets, la sélection de choix 3D non attendus est indépendante de la place accordée à la manipulation mais ce n'est pas le cas des comportements bidimensionnels. C'est donc au niveau de ces comportements que la manipulation semble jouer une influence. Pour tous les autres objets 3D cependant, une indépendance entre perception et place accordée à la manipulation est observée.

9.2.1.2. Impact de la manipulation sur la perception de chaque objet 3D au départ d'une représentation virtuelle selon l'âge

a. Analyses générales

La Figure 13 présente l'évolution du taux de perception adéquate relatif à chaque objet 3D aux différentes tranches d'âge au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer uniquement. Dans la première modalité, comme dans la deuxième, les trajectoires relatives au taux de perception varient entre les objets 3D. De plus, dans un groupe comme dans l'autre, les taux de perception adéquate n'augmentent pas forcément d'une tranche d'âge à la suivante et fluctuent parfois entre augmentations et diminutions. Toutefois, alors que dans le premier groupe, le taux observé à la première tranche d'âge n'est pas systématiquement plus élevé que celui observé à la dernière tranche d'âge, c'est le cas dans le deuxième groupe même si l'évolution reste parfois faible.

Les indices de corrélation *r point bi-sérial*, calculés entre le taux de perception et l'âge (en jour), permettent par ailleurs également de mettre en évidence des

divergences entre objets 3D et de relever aussi des divergences entre les deux modalités (Tableau 28).

Concernant le cylindre, les indices de corrélation indiquent que la corrélation est nulle dans les deux groupes ($r_{pb} = 0,136$ dans le groupe 1 et $r_{pb} = 0,025$ dans le groupe 2). La perception adéquate de cet objet 3D ne semble pas augmenter avec l'âge dans les deux modalités. Même si, à la quasi-totalité des tranches d'âge, des taux plus élevés sont observés dans le premier groupe, l'évolution du taux est marquée par de plus fortes fluctuations entre les tranches dans le premier groupe, en comparaison au second groupe pour qui une certaine stabilité du taux de perception adéquate est observée.

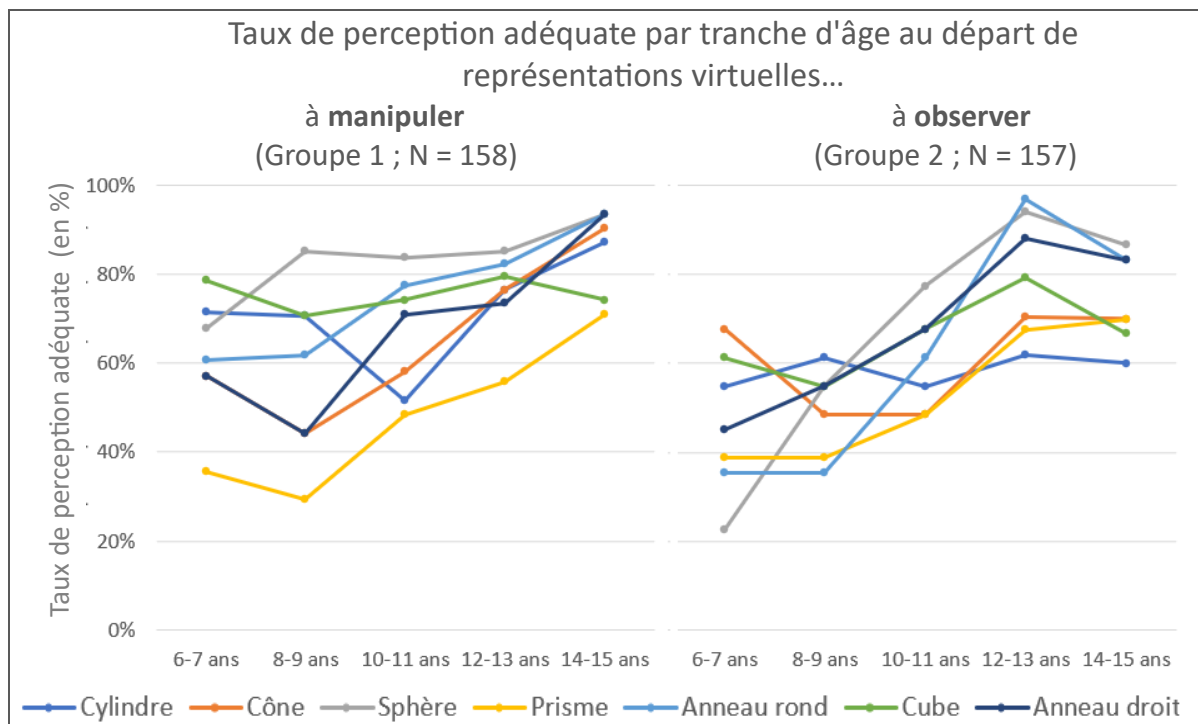


Figure 13 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal pour chacun des objets 3D (1^{ère} étude)

Pour le cône, une diminution du taux est observée entre la première et la deuxième tranche d'âge dans les deux groupes. Cependant, les trajectoires diffèrent ensuite. Le taux croît d'une tranche d'âge à la suivante jusqu'à atteindre 90% quand la représentation virtuelle est manipulée. Ce n'est en revanche pas le cas quand elle ne l'est pas puisque le taux stagne, augmente puis stagne à nouveau. D'ailleurs, les différences dans les indices de corrélation avec l'âge confirment cette trajectoire différente dans les deux groupes puisqu'une corrélation nulle ($r_{pb} = 0,072$) est observée dans le deuxième groupe alors qu'elle est positive et modérée dans le premier ($r_{pb} =$

0,302). Face à la représentation virtuelle manipulée, la sélection de propositions 3D non attendues diminue en fait avec l'âge, en particulier celle de l'objet 3D dont la hauteur est modifiée ($r_{pb} = -0,304$). Cela semble moins être le cas quand elle n'est pas manipulée même si la sélection de la proposition 3D dont la base est déformée semble aussi diminuer avec l'âge dans cette modalité ($r_{pb} = -0,201$).

La perception de la sphère est marquée par une forte amélioration du taux de perception avec l'âge quand la représentation virtuelle n'est pas manipulée ($r_{pb} = 0,515$), ce qui est moins le cas quand elle l'est ($r_{pb} = 0,194$). En effet, les plus jeunes enfants interrogés ont de fortes difficultés à percevoir adéquatement la sphère face à une vidéo de l'objet en rotation (taux de perception adéquate de 23%), ces derniers privilégiant plutôt la sélection d'une proposition 2D uniquement. Avec l'âge, cette difficulté semble progressivement disparaître jusqu'à atteindre un taux de perception proche de 90% dans les deux dernières tranches d'âge, cette évolution étant principalement marquée par une diminution des cas de non-perception. Une telle difficulté ne semble néanmoins pas être observée quand les participants ont le contrôle de la manipulation puisqu'à la première tranche d'âge, 68% d'entre eux perçoivent adéquatement la sphère. Ce taux évolue lui aussi avec l'âge même si cette évolution est par conséquent moins marquée que celle du premier groupe.

Concernant le cas du prisme, le taux de perception adéquate semble globalement augmenter avec l'âge dans les deux groupes, avec des taux assez proches passant d'environ 40% à la première tranche d'âge à environ 70% à la dernière tranche d'âge. L'indice de corrélation calculé entre la capacité de perception adéquate et l'âge indique que la corrélation est positive mais faible dans le premier ($r_{pb} = 0,265$) et dans le deuxième groupe ($r_{pb} = 0,278$). Cette amélioration s'explique notamment dans les deux groupes par une diminution de la sélection de certaines propositions 3D non attendues et en particulier de celle de l'objet 3D incliné, pour qui une corrélation négative non négligeable est observée dans les deux groupes ($r_{pb} = -0,244$ dans le groupe 1 et $r_{pb} = -0,345$ dans le groupe 2).

Pour l'anneau rond, il est possible de constater qu'une amélioration des taux de perception avec l'âge est constatée dans les deux groupes, comme le suggèrent les coefficients de corrélation calculés. Cependant, cette évolution est plus marquée quand la représentation virtuelle n'est pas manipulée ($r_{pb} = 0,462$) que quand elle l'est ($r_{pb} = 0,283$). Cette différence s'explique notamment, comme pour la sphère, par le fait que, dans les deux premières tranches d'âge, de plus fortes difficultés de perception de

l'anneau rond sont observées quand la représentation virtuelle ne peut être manipulée par l'enfant (taux avoisinant 35% contre 60%). Les participants à ces âges sont notamment plus nombreux à avoir des comportements bidimensionnels face aux représentations à observer. Malgré ces différences constatées au départ entre les deux groupes, le taux augmente dans les deux modalités à partir de la deuxième tranche d'âge, ce qui témoigne d'une amélioration des capacités de perception de cet objet 3D. Dans les deux groupes, une diminution de la sélection de deux choix 3D non attendus est constatée d'après les indices de corrélation négatifs et non négligeables obtenus : l'objet dont la hauteur a été modifiée ($r_{pb} = -0,232$ dans le groupe 1 et $r_{pb} = -0,257$ dans le groupe 2) et l'anneau rond à bord droit, c'est-à-dire l'objet 3D dont le bord a été modifié ($r_{pb} = -0,225$ dans le groupe 1 et $r_{pb} = -0,278$ dans le groupe 2). Quand la représentation n'est pas manipulée, les cas de non-perception diminuent avec l'âge ($r_{pb} = -0,248$), ce qui n'est pas le cas quand elle l'est car la manipulation occasionne moins de comportements bidimensionnels.

Pour le cube, le taux de perception adéquate fluctue entre les tranches d'âge, que la représentation virtuelle de l'objet 3D puisse ou non être manipulée. L'évolution du taux de perception adéquate du cube entre les tranches d'âge est assez proche dans les deux modalités : le taux commence par diminuer entre la première et la deuxième tranche d'âge, avant d'augmenter aux deux tranches d'âge suivantes pour enfin diminuer à la dernière tranche d'âge et atteindre un taux finalement assez proche de celui observé à la première tranche d'âge. Toutefois, les baisses et hausses du taux entre les tranches d'âge sont plus marquées quand la représentation virtuelle n'est pas manipulée. Les indices de corrélation confirment cette proximité entre les résultats obtenus dans la première ($r_{pb} = 0,003$) et dans la deuxième modalité ($r_{pb} = 0,115$), où la corrélation est nulle.

Finalement, pour l'anneau droit, il est possible de mettre en avant que, dans les deux modalités, la perception adéquate de l'objet 3D semble globalement évoluer avec l'âge, comme le reflètent les indices de corrélation, pouvant tous deux être considérés comme positifs et modérés ($r_{pb} = 0,318$ et $r_{pb} = 0,361$). D'une tranche d'âge à l'autre, le taux est tantôt plus élevé dans le premier groupe et tantôt plus élevé dans le second. Que la représentation virtuelle soit ou non manipulée, une diminution de la sélection de propositions 3D non attendues est observée. En particulier, dans les deux groupes, la proposition 3D dont la hauteur est modifiée ($r_{pb} = -0,285$ dans le premier groupe et $r_{pb} = -0,263$ dans le deuxième groupe) est, avec l'âge, de moins en moins sélectionnée.

La sélection d'autres propositions 3D diminue aussi de manière non négligeable quand la représentation virtuelle n'est pas manipulée : c'est le cas de la sélection de l'objet 3D qui s'affine ($r_{pb} = -0,213$), de l'objet 3D incliné ($r_{pb} = -0,213$) ou de l'anneau à bord rond ($r_{pb} = -0,249$). Par ailleurs, face à cette modalité, une diminution des comportements bidimensionnels est aussi constatée ($r_{pb} = -0,202$).

Tableau 28 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p) (1^{ère} étude)

		Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Perception adéquate	G1 : manip. 2½D (N = 158)	$r_{pb} = 0,136$ $p = 0,087$	$r_{pb} = 0,302$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,194$ $p = 0,015^*$	$r_{pb} = 0,265$ $p = 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,283$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,003$ $p = 0,970$	$r_{pb} = 0,318$ $p < 0,001^{**}$
	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	$r_{pb} = 0,025$ $p = 0,757$	$r_{pb} = 0,072$ $p = 0,373$	$r_{pb} = 0,515$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,278$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,462$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,105$ $p = 0,192$	$r_{pb} = 0,361$ $p < 0,001^{**}$
Perception inadéquate	G1 : manip. 2½D (N = 158)	$r_{pb} = -0,088$ $p = 0,272$	$r_{pb} = -0,341$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,164$ $p = 0,039^*$	$r_{pb} = -0,193$ $p = 0,015^*$	$r_{pb} = -0,266$ $p = 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,077$ $p = 0,339$	$r_{pb} = -0,321$ $p < 0,001^{**}$
	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	$r_{pb} = 0,019$ $p = 0,815$	$r_{pb} = -0,094$ $p = 0,244$	$r_{pb} = -0,195$ $p = 0,015^*$	$r_{pb} = -0,216$ $p = 0,007^{**}$	$r_{pb} = -0,298$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,093$ $p = 0,246$	$r_{pb} = -0,293$ $p < 0,001^{**}$
Non-perception	G1 : manip. 2½D (N = 158)	$r_{pb} = -0,125$ $p = 0,117$	$r_{pb} = -0,018$ $p = 0,818$	$r_{pb} = -0,158$ $p = 0,047^*$	$r_{pb} = -0,167$ $p = 0,036^*$	$r_{pb} = -0,102$ $p = 0,201$	$r_{pb} = -0,129$ $p = 0,106$	$r_{pb} = -0,091$ $p = 0,254$
	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	$r_{pb} = -0,103$ $p = 0,198$	$r_{pb} = 0,095$ $p = 0,235$	$r_{pb} = -0,424$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,135$ $p = 0,092$	$r_{pb} = -0,248$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = -0,060$ $p = 0,453$	$r_{pb} = -0,202$ $p = 0,011^*$

Les résultats obtenus dans chacun des groupes permettent donc de pointer certaines tendances communes dans les deux modalités mais également de relever des divergences dans l'évolution des capacités de perception avec l'âge, notamment pour la sphère ou le cône.

Par ailleurs, dans les deux groupes, des différences significatives ont été mises en évidence entre les sept objets 3D sur l'ensemble du public cible. L'analyse des différences entre les objets 3D à chaque tranche d'âge permet de pointer une nouvelle divergence entre les deux modalités. Si, face aux représentations virtuelles à manipuler, des différences sont constatées à toutes les tranches d'âge, il n'en est pas de même quand elles ne sont pas manipulées. Dans cette modalité, des différences significatives sont constatées entre les objets 3D à la première ($Q = 25,361$; p -value < 0,001) et à la quatrième tranche d'âge ($Q = 30,876$; p -value < 0,001) mais pas aux autres tranches

d'âge (Tableau 29). Si, dans le groupe 1, le taux de perception le plus faible à toutes les tranches d'âge est celui du prisme, cela n'est pas le cas dans le groupe 2. Le taux de perception adéquate de cet objet 3D fait cependant toujours partie des taux les plus faibles. D'ailleurs, dans le groupe 2, l'objet 3D qui pose le plus de difficultés varie d'une tranche d'âge à l'autre.

Tableau 29 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer sur support horizontal par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (1^{ère} étude)

	6-7 ans	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
G1 : manip. 2½D (N = 158)	Q = 14,030 p = 0,029*	Q = 36,157 p < 0,001**	Q = 20,378 p = 0,002**	Q = 12,808 p = 0,046*	Q = 15,803 p = 0,015*
G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	Q = 25,361 p < 0,001**	Q = 8,227 p = 0,222	Q = 10,632 p = 0,100	Q = 30,876 p < 0,001**	Q = 12,383 p = 0,054

b. Analyses inférentielles comparatives

Précédemment, les analyses inférentielles comparatives ont permis d'affirmer que, toutes tranches d'âge confondues, la place accordée à la manipulation influence la perception de certains objets 3D uniquement. Les évolutions parfois différentes des taux de perception adéquate constatées entre les deux groupes invitent à analyser, pour chaque objet 3D et à chaque tranche d'âge, si une indépendance peut être ou non observée entre perception et place accordée à la manipulation. Les résultats de ces analyses, menées à l'aide du *test du Khi-carré* ou de son alternative (Tableau 30), indiquent que, dans la plupart des cas, la perception apparaît indépendante de la place accordée à la manipulation. La majorité des tests appliqués donne en effet des résultats non significatifs. Toutefois, des résultats significatifs apparaissent parfois pour certains objets 3D à certaines tranches d'âge. Les résultats sont significatifs pour le cylindre ($\chi^2 = 5,785$; *p-value* = 0,016) et le cône ($\chi^2 = 3,985$; *p-value* = 0,046) mais uniquement à la dernière tranche d'âge. Pour la sphère, des résultats significatifs sont constatés seulement aux deux premières tranches d'âge ($\chi^2 = 12,236$; *p-value* < 0,001 / $\chi^2 = 7,271$; *p-value* = 0,007). Enfin, pour l'anneau rond, des résultats significatifs ne sont observés qu'à la deuxième tranche d'âge ($\chi^2 = 4,481$; *p-value* = 0,034). Dans ces différents cas, les analyses descriptives montrent systématiquement des taux de perception adéquate supérieurs dans le premier groupe.

Si pour la majorité des objets 3D et des tranches d'âge, la perception des objets 3D ne dépend pas de la place accordée à la manipulation, ce constat n'est pas

systématique puisque des cas dans lesquels une dépendance est constatée ont pu être identifiés, avec, dans ce cas, des résultats en faveur de la manipulation. L'effet de manipulation observé sur l'échantillon complet pour le cylindre, la sphère et l'anneau rond ne peut dès lors pas être étendu à chacune des tranches d'âge. Il n'apparaît que ponctuellement. De plus, si une absence d'effet de manipulation a été mise en évidence pour le cône sur l'échantillon complet, un effet semble émerger à la dernière tranche d'âge.

Tableau 30 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G2 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) (1^{ère} étude)

	À 6-7 ans	À 8-9 ans	À 10-11 ans	À 12-13 ans	À 14-15 ans
Cylindre	$\chi^2 = 1,732$ $p = 0,188$	$\chi^2 = 1,626$ $p = 0,429$	$\chi^2 = 0,065$ $p = 0,799$	$\chi^2 = 1,722$ $p = 0,189$	$\chi^2 = 5,785$ $p = 0,016^*$
Cône	$\chi^2 = 0,707$ $p = 0,401$	$\chi^2 = 0,119$ $p = 0,730$	$\chi^2 = 0,583$ $p = 0,445$	$\chi^2 = 0,302$ $p = 0,582$	$\chi^2 = 3,985$ $p = 0,046^*$
Sphère	$\chi^2 = 12,236$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 7,271$ $p = 0,007^{**}$	$\chi^2 = 0,413$ $p = 0,520$	Test ex. de F. = 1,433 $p = 0,427$	Test ex. de F. = 0,814 $p = 0,425$
Prisme	$\chi^2 = 0,056$ $p = 0,812$	$\chi^2 = 0,626$ $p = 0,429$	$\chi^2 = 0,000$ $p = 1,000$	$\chi^2 = 0,996$ $p = 0,318$	$\chi^2 = 0,007$ $p = 0,934$
Anneau rond	$\chi^2 = 3,756$ $p = 0,053$	$\chi^2 = 4,481$ $p = 0,034^*$	$\chi^2 = 1,897$ $p = 0,168$	Test ex. de F. = 3,981 $p = 0,105$	Test ex. de F. = 1,566 $p = 0,255$
Cube	$\chi^2 = 2,072$ $p = 0,10$	$\chi^2 = 1,727$ $p = 0,189$	$\chi^2 = 0,313$ $p = 0,576$	$\chi^2 = 0,000$ $p = 1,000$	$\chi^2 = 0,415$ $p = 0,519$
Anneau droit	$\chi^2 = 0,845$ $p = 0,358$	$\chi^2 = 0,746$ $p = 0,388$	$\chi^2 = 0,076$ $p = 0,783$	$\chi^2 = 2,378$ $p = 0,123$	Test ex. de F. = 1,566 $p = 0,255$

9.2.1.3. Influence des variables secondaires sur la perception au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer

a. Le genre

Quand les représentations virtuelles ne sont pas manipulées par les participants, il apparaît que le taux de perception adéquate observé auprès des filles s'avère proche de celui observé auprès des garçons, que ce soit pour le cube, la sphère ou le prisme. Les tests du Khi-carré appliqués pour chaque objet 3D, dont les résultats sont tous non significatifs (Tableau 31) confirment cette proximité et permettent de conclure que les capacités de perception de ces objets 3D ne sont pas dépendantes du genre dans cette modalité.

Tableau 31 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal par genre et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (1^{ère} étude)

	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)			
	Taux de perception adéquate		Khi-carré	p-value
	♀ (N =74)	♂ (N =83)		
Cube	67,6%	65,1%	0,110	0,740
Sphère	63,5%	71,1%	1,022	0,312
Prisme	54,1%	51,8%	0,079	0,778

Les constats réalisés apparaissent semblables à ceux réalisés dans le groupe confronté à des représentations à manipuler (cf. 9.2.2.3a), ce qui suggère que le genre n'influence pas les capacités de perception des objets 3D en environnement virtuel.

b. Le niveau de maîtrise des processus perceptifs de base

Les corrélations calculées entre les scores aux trois subtests de la BORB et la perception adéquate des trois objets 3D investigués au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal (Tableau 32) indiquent qu'une corrélation positive et forte est observée entre la capacité d'association d'orientation et la perception de la sphère ($r_{pb} = 0,411$). De plus, la corrélation est positive mais faible entre le même processus perceptif de base et la perception du prisme ($r_{pb} = 0,269$). Le niveau de maîtrise des autres processus perceptifs de base (distinction des longueurs et des tailles) ne semble quant à lui pas être lié à la perception adéquate des objets 3D.

Ces résultats sont semblables à ce qui a été mis en évidence face à des représentations virtuelles à manipuler (cf. 9.2.2.3b) puisque les seules corrélations non négligeables concernant ce même subtest et ces mêmes objets, même si une corrélation plus marquée est ici observée pour la sphère.

En outre, les corrélations calculées entre les processus perceptifs de base et la sélection de choix 3D non attendus qu'ils sont susceptibles de faire émerger (ex. sélection de l'objet dont la hauteur est modifiée si l'enfant a des difficultés à distinguer les longueurs) permettent de souligner que seuls des liens négligeables sont observés dans le groupe 2. À nouveau, ces résultats sont similaires à ceux identifiés auprès de ceux du groupe 1. Comme face aux représentations virtuelles manipulables, la sélection de la proposition dont la hauteur est modifiée n'est pas forcément liée à une difficulté à distinguer les longueurs.

Tableau 32 : Corrélation entre le score aux subtests de la BORB et la perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme ou la sélection de certaines propositions 3D non attendues au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal : coefficient de corrélation r_{pb} point bi-sérial (r_{pb}) et p -value

		G2 : obs. 2½D H. (N = 157)		
		Cube	Sphère	Prisme
Score au subtest « Association de longueurs » (sur 12) et la perception adéquate	r_{pb}	0,109	0,027	-0,007
	p -value	0,175	0,740	0,928
Score au subtest « Association de tailles » (sur 12) et la perception adéquate	r_{pb}	0,112	0,171	0,053
	p -value	0,164	0,032*	0,511
Score au subtest « Association d'orientations » (sur 12) et la perception adéquate	r_{pb}	0,132	0,411	0,269
	p -value	0,101	< 0,001**	0,001**
Score au subtest « Association de longueurs » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont la hauteur a été modifiée »	r_{pb}	-0,093	-0,070	0,060
	p -value	0,249	0,385	0,457
Score au subtest « Association de longueurs » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont l'inclinaison a été modifiée »	r_{pb}	0,017	/	-0,124
	p -value	0,834	/	0,122
Score au subtest « Association de longueurs » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont la taille de la base supérieure a été rétrécie »	r_{pb}	0,003	/	0,055
	p -value	0,975	/	0,494
Score au subtest « Association de longueurs » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont l'orientation de la base supérieure a été modifiée »	r_{pb}	0,055	/	0,064
	p -value	0,492	/	0,422
Score au subtest « Association de tailles » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont la taille de la base supérieure a été rétrécie »	r_{pb}	-0,075	/	-0,093
	p -value	0,348	/	0,249
Score au subtest « Association d'orientation » (sur 12) et sélection de la proposition « objet 3D dont l'orientation de la base supérieure a été modifiée »	r_{pb}	-0,101	/	-0,157
	p -value	0,210	/	0,050*

c. La perception des teintes de couleurs

Face à une représentation virtuelle du cube à observer sur support horizontal, le taux de perception adéquate obtenu auprès des participants ayant su distinguer les teintes de rouge est similaire à celui observé auprès des quelques participants n'ayant pas su les distinguer, comme le présente le Tableau 33. Toutefois, vu le faible nombre de participants concernés par ce deuxième cas de figure, la comparaison de ces valeurs apparaît peu appropriée. On peut cependant remarquer que l'incapacité de distinction des teintes n'a pas gêné deux des trois participants concernés dans la perception adéquate de l'objet 3D. Pour les deux autres objets 3D, les taux de perception adéquate s'avèrent plus élevés quand les teintes arrivent à être distinguées par le participant. Notons également que peu de participants sont aussi concernés par une incapacité à distinguer les teintes pour la sphère. Pour autant, ce déficit de distinction des teintes

de couleurs présentes dans la représentation virtuelle n'a à nouveau pas empêché certains des participants concernés de percevoir adéquatement l'objet 3D. C'est le cas par exemple pour trois des six participants concernés pour la sphère.

Pour le prisme, les participants sont un peu plus nombreux à ne pas avoir su distinguer les différentes teintes. La comparaison inférentielle des taux de réussite des participants ayant ou n'ayant pas su distinguer les teintes de jaune indique cependant des résultats non significatifs (*Test exact de Fisher* = 2,123 ; *p-value* = 0,165). Ce résultat suggère que la capacité de perception de l'objet 3D est indépendante de la capacité à distinguer les teintes de couleurs présentes sur sa représentation et qu'un déficit de perception des teintes n'occasionne pas forcément un échec de perception de l'objet 3D. Les résultats obtenus auprès du groupe 2 quant à l'influence de cette variable secondaire semblent donc différer de ceux obtenus face à des représentations virtuelles à manipuler (*cf.* 9.2.2.3c) qui suggéraient la présence d'un impact de l'incapacité de distinction des teintes sur la perception de l'objet 3D. Pour autant, rappelons que dans les deux cas, nous observons que le fait de ne pas arriver à distinguer les teintes n'entraîne pas systématiquement une absence de perception adéquate de l'objet 3D.

Tableau 33 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal selon la bonne ou mauvaise perception des teintes de couleurs concernées et comparaison pour le cas du prisme : taux de perception adéquate, test exact de Fisher et p-value

		G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	
		Teintes perçues	Teintes perçues
Cube	Taux de perception adéquate	66,7% (n = 3)	66,2% (n = 154)
Sphère	Taux de perception adéquate	50,0% (n = 6)	68,2% (n = 151)
Prisme	Taux de perception adéquate	38,1,% (n = 21)	55,1% (n = 136)
	<i>Test exact de Fisher</i>	2,123	
	<i>p-value</i>	0,165	

d. Le risque de TDC

L'analyse de la variable secondaire relative au risque de TDC menée auprès du groupe confronté à des représentations virtuelles manipulables avait permis de mettre en évidence un effet négatif de la présence de risque de TDC sur la perception du prisme mais pas des deux autres objets 3D (*cf.* 9.2.2.3d). La même démarche est appliquée cette fois auprès du groupe 2 (Tableau 34). Celle-ci permet de mettre en évidence un résultat similaire puisque les analyses inférentielles menées (*tests du Khi-*

carré) indiquent des résultats significatifs uniquement pour l'exercice du prisme ($\chi^2 = 9,123$; $p\text{-value} = 0,003$). Ces résultats suggèrent alors que, comme face à des représentations virtuelles manipulables, les capacités de perception de cet objet 3D uniquement sont dépendantes des risques de TDC.

Tableau 34 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal chez les enfants/adolescents concernés ou non par un risque de TDC et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (1^{ère} étude)

	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)			
	Taux de perception adéquate		Khi-carré	p-value
	Risque de TDC (N = 128)	Risque de TDC (N = 29)		
Cube	67,2%	62,1%	0,277	0,599
Sphère	68,8%	62,1%	0,481	0,488
Prisme	58,6%	27,6%	9,123	0,003**

e. Les habitudes et pratiques régulières

Afin d'investiguer l'effet de certaines pratiques régulières sur les capacités de perception visuelle observées dans le deuxième groupe, des *tests du Khi-carré* ont été appliqués sur le taux de perception adéquate en prenant en compte chacune des habitudes (Tableau 35). De ces analyses, il ressort que, pour la perception des trois objets 3D, les résultats sont non significatifs pour trois habitudes investiguées. Ces résultats permettent ainsi de relever que les capacités de perception sont indépendantes des habitudes relatives aux jeux vidéo, aux jeux de puzzle et au sport. Notons cependant que des résultats proches du seuil de significativité sont observés pour la perception de la sphère et la variable relative aux jeux vidéo. Pour les trois autres habitudes investiguées, des résultats significatifs sont obtenus pour certains objets mais pas tous. Ainsi, un résultat significatif est observé pour l'habitude relative à l'utilisation des appareils tactiles pour le cube ($\chi^2 = 4,030$; $p\text{-value} = 0,045$) mais pas pour les autres objets 3D, avec des résultats à l'avantage des enfants utilisant régulièrement ce type d'appareil. L'analyse relative à la pratique régulière de jeux de construction indique, à l'inverse, des résultats significatifs pour la sphère ($\chi^2 = 5,976$; $p\text{-value} = 0,015$) et le prisme ($\chi^2 = 4,141$; $p\text{-value} = 0,042$). À nouveau, la dépendance à cette habitude est en faveur des joueurs réguliers. Enfin, pour l'habitude relative à la pratique d'un instrument, des résultats significatifs sont observés que pour le prisme

($\chi^2 = 5,293$; $p\text{-value} = 0,021$) même si le résultat est proche du seuil de significativité pour la sphère.

Au regard de ces résultats, il apparaît que, face à des représentations virtuelles à observer, les habitudes investiguées n'influencent pas les capacités de perception des objets 3D ou n'influencent que celles de certains objets 3D. Ces résultats sont assez semblables à ceux mis en évidence auprès des enfants confrontés à des représentations virtuelles à manipuler (cf. 9.2.2.3e) même si quelques divergences apparaissent puisque quelques rares résultats significatifs constatés dans le premier groupe ne le sont pas ici et inversement.

Tableau 35 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (1^{ère} étude)

		G2 : obs. 2½D H. (N = 157)			
		Taux de perception adéquate		Khi-carré	p-value
		Régulier	Régulier		
Utilisation des appareils tactiles	Cube	43,8%	68,8%	4,030	0,045*
	Sphère	62,5%	68,1%	0,204	0,651
	Prisme	37,5%	54,6%	1,688	0,194
Pratique des jeux vidéo	Cube	65,7%	66,7%	0,017	0,896
	Sphère	59,7%	73,3%	3,254	0,071
	Prisme	46,3%	57,8%	2,042	0,153
Pratique des jeux de construction	Cube	58,5%	70,2%	2,150	0,143
	Sphère	54,7%	74,0%	5,976	0,015*
	Prisme	41,5%	58,7%	4,141	0,042*
Pratique des jeux de type « puzzle »	Cube	64,9%	67,5%	0,115	0,734
	Sphère	66,2%	68,8%	0,113	0,736
	Prisme	48,1%	57,5%	1,406	0,236
Pratique d'un sport	Cube	65,2%	66,7%	0,031	0,861
	Sphère	63,0%	69,4%	0,593	0,441
	Prisme	41,3%	57,8%	3,490	0,062
Pratique d'un instrument de musique	Cube	64,7%	76,2%	1,073	0,300
	Sphère	64,7%	85,7%	3,661	0,056
	Prisme	49,3%	76,2%	5,293	0,021*

f. Le niveau scolaire et l'expérience antérieure en géométrie 3D

Par rapport au niveau scolaire, les taux de perception adéquate du cube varient entre 50,0% (en 2^e primaire) et 92,9% (en 1^{ère} secondaire) dans le groupe 2. Globalement, les taux les plus faibles, tous inférieurs à 60%, sont observés dans les différents niveaux de l'enseignement primaire, excepté en 4^e primaire où le taux atteint

81,3%. Dans l'enseignement secondaire, le taux le plus faible est observé en 3^e secondaire (64,5%). Les capacités ne semblent donc pas s'améliorer entre les niveaux scolaires. Ces constats semblent cohérents avec ceux mis en évidence dans le groupe 1 (cf. 9.2.2.3f). Pour la sphère, des constats semblables au groupe 1 sont observés puisque des écarts importants apparaissent entre niveaux scolaires. Le taux de perception adéquate atteint même 100% en 2^e secondaire. En revanche, on constate que, face à des vidéos à observer, le taux de perception adéquate semble augmenter entre les différents niveaux scolaires, excepté en 3^e secondaire où celui-ci diminue, alors que ce n'était pas spécialement le cas dans la première modalité. Enfin, pour le prisme, face à des représentations virtuelles à observer, les taux obtenus dans les classes de l'enseignement primaire sont tous inférieurs à 60%. Le taux vaut 7,1% en 1^{ère} primaire et correspond au taux le plus faible observé dans les différents niveaux scolaires. En 6^e primaire, le taux ne vaut que 33,3%. En secondaire, en revanche, un taux dépassant toujours 70% est constaté. Si, dans le groupe 1, de meilleurs résultats ont été observés dès la 6^{ème} primaire, l'amélioration des taux apparaît ici plus tardive.

Par ailleurs, concernant l'expérience antérieure en géométrie 3D, les résultats obtenus auprès du groupe 2 (Tableau 36) indiquent que le fait d'avoir déjà abordé la géométrie 3D lors de l'année scolaire n'entraîne pas nécessairement une fréquence plus élevée de perception adéquate des trois objets. Des résultats non significatifs sont observés aux *tests du Khi-carré* appliqués par rapport à cette variable et permettent de considérer que les capacités de perception des trois objets 3D en sont indépendantes. Un même constat peut être dressé concernant le fait d'avoir déjà été confronté antérieurement à des représentations virtuelles. Enfin, il apparaît que les taux de perception sont plus élevés chez les participants ayant une expérience antérieure avec le type d'exercice ici utilisé (tâche de reconnaissance d'objets 3D). Pour autant, des résultats significatifs ne sont observés que pour la sphère. La capacité de perception est donc dépendante de cette variable pour cet exercice mais pas pour les autres. L'ensemble de ces résultats souligne donc que la perception est majoritairement indépendante de l'expérience en géométrie 3D. Ces résultats sont globalement cohérents avec ceux mis en évidence dans le groupe 1 (cf. 9.2.2.3f), qui ont montré une absence d'effet de l'expérience en géométrie 3D sur les capacités de perception.

Tableau 36 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer sur support horizontal chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (1^{ère} étude)

		G2 : obs. 2½D H. (N = 157)			
		Taux de perception adéquate		Khi-carré	p-value
		Non	Oui		
Apprentissage de la géométrie 3D cette année scolaire	Cube	66,9%	63,3%	0,140	0,708
	Sphère	69,3%	60,0%	0,955	0,328
	Prisme	51,2%	60,0%	0,757	0,384
Expérience avec les représentations virtuelles	Cube	64,3%	69,5%	0,446	0,504
	Sphère	63,3%	74,6%	2,148	0,143
	Prisme	49,0%	59,3%	1,581	0,209
Résolution de tâches de reconnaissance similaires	Cube	63,4%	76,5%	2,030	0,154
	Sphère	64,3%	82,4%	4,356	0,037*
	Prisme	52,0%	55,9%	0,158	0,691

9.2.2. Résultats relatifs à la seconde étude expérimentale (groupe 1 vs groupe 2)

9.2.2.1. Impact de la manipulation sur la perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles (toutes tranches d'âge confondues)

a. Analyses générales

Afin de se faire une première idée du niveau de maîtrise de la perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles à observer uniquement, le Tableau 37¹² présente les taux de perception adéquate obtenus pour chacun des objets 3D dans les groupes 1 et 2. Celui-ci permet d'abord de mettre en évidence que, face à la tâche de reconnaissance avec choix unique proposée au départ de représentations virtuelles à observer uniquement, plus de la moitié des participants sélectionnent, pour chaque objet 3D, la proposition 3D attendue et semblent donc percevoir correctement l'objet 3D présenté. En revanche, aucun objet 3D n'est adéquatement perçu par l'ensemble de l'échantillon ce qui montre que la perception de chaque objet 3D peut poser des difficultés, au moins à certains participants. Un tel constat est similaire à ce qui est mis en évidence face à des représentations virtuelles manipulées sur écran tactile par les participants.

Lorsqu'on compare les taux obtenus dans les deux modalités de présentation, il apparaît que, pour plusieurs des objets 3D étudiés, le taux de perception adéquate observé face à des représentations virtuelles manipulées par les participants est proche de celui observé quand les participants n'ont pas le contrôle des manipulations. C'est notamment le cas pour l'anneau droit, pour lequel des taux identiques apparaissent, mais également pour le cylindre, le cône et le cube, où l'écart entre les deux groupes est inférieur à 5%. En revanche, l'écart entre les deux groupes vaut 15% environ pour la sphère et l'anneau rond, en faveur du groupe autorisé à manipuler le matériel.

Si aucun objet n'est perçu adéquatement par tous les participants, tous sont perçus par plus de la moitié des participants. Néanmoins, les résultats montrent que des taux différents sont obtenus entre les objets 3D, certains semblant poser plus de difficultés que d'autres. À ce sujet, des tendances communes entre les deux modalités de représentation des objets 3D peuvent être relevées. Dans les deux groupes, le prisme est l'objet pour qui le taux de perception adéquate est le plus faible. Celui-ci vaut 64,9%

¹² Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

face à des représentations manipulées par l'individu et 58,6% face à des représentations virtuelles non manipulées. En revanche, l'objet 3D posant le moins de difficultés diffère entre les deux groupes puisque la sphère obtient le taux le plus élevé dans le premier groupe (90,1%) alors que c'est l'anneau droit dans le deuxième groupe (77,5%). Pour autant, dans les deux groupes, ces deux objets font partie de ceux posant le moins de difficultés. Ces résultats concernant les objets posant le plus ou le moins de difficultés permettent par ailleurs de relever que l'écart entre ces objets s'avère plus élevé dans le premier que dans le deuxième groupe. Toutefois, dans les deux groupes, des écarts importants restent observés entre les objets 3D.

Tableau 37 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G1 : manip. 2½D (N = 111)	68,5%	71,2%	90,1%	64,9%	84,7%	70,3%	77,5%
G2 : obs. 2½D H. (N = 111)	65,8%	66,7%	75,7%	58,6%	70,3%	73,0%	77,5%

Afin de statuer sur ces différences entre exercices, le test inférentiel *Q de Cochran* est appliqué dans chacun des groupes pour identifier si des différences significatives sont observées entre les taux des sept exercices. Au vu du résultat significatif recensé dans le groupe 2 ($Q = 15,809$; $p\text{-value} < 0,001$) et dans le groupe 1 ($Q = 34,328$; $p\text{-value} < 0,001$), il est possible de considérer que les capacités varient significativement entre les objets 3D dans les deux modalités. Pour autant, les *tests de McNemar* appliqués pour chacune des paires d'objets 3D de chaque groupe (Annexe 26) indiquent que de multiples différences significatives entre objets 3D apparaissent dans le groupe 1 (pour 10 paires d'objets sur 21) alors qu'elles sont beaucoup moins nombreuses dans le groupe 2 (4 paires sur 21). Même si des tendances communes sont observées au niveau des différences entre objets 3D, la situation n'apparaît donc pas exactement la même entre le groupe amené à manipuler et celui amené à observer les objets 3D représentés virtuellement. Dans les deux groupes, le prisme se distingue significativement de la sphère et de l'anneau droit et pas du cylindre et du cône qui obtiennent des taux proches.

Si les résultats obtenus permettent de suggérer quelques différences entre objets 3D, il apparaît pertinent, pour affiner la compréhension de la maîtrise de l'habileté chez

les individus, de vérifier le nombre d'objets 3D perçus adéquatement par les participants. Pour ce faire, la Figure 14 présente, pour chacun des groupes, la répartition des participants selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus. On y remarque des tendances assez similaires dans les deux modalités. Premièrement, très peu d'enfants et d'adolescents ne perçoivent adéquatement aucun ou un seul objet 3D. À l'inverse, dans les deux groupes, le pourcentage de participants percevant adéquatement l'ensemble des objets 3D proposés avoisine 20%. Toutefois, la plupart des participants perçoivent adéquatement cinq, six ou les sept objets présentés. Cela signifie donc que, comme cela avait déjà pu être mis en évidence pour le groupe 1 (cf. 9.1.2.1), la plupart des individus semblent percevoir une bonne partie des objets 3D au départ de représentations virtuelles dont il n'a pas le contrôle de la manipulation mais qu'environ un participant sur cinq seulement perçoit adéquatement l'ensemble des objets 3D proposés dans cette modalité.

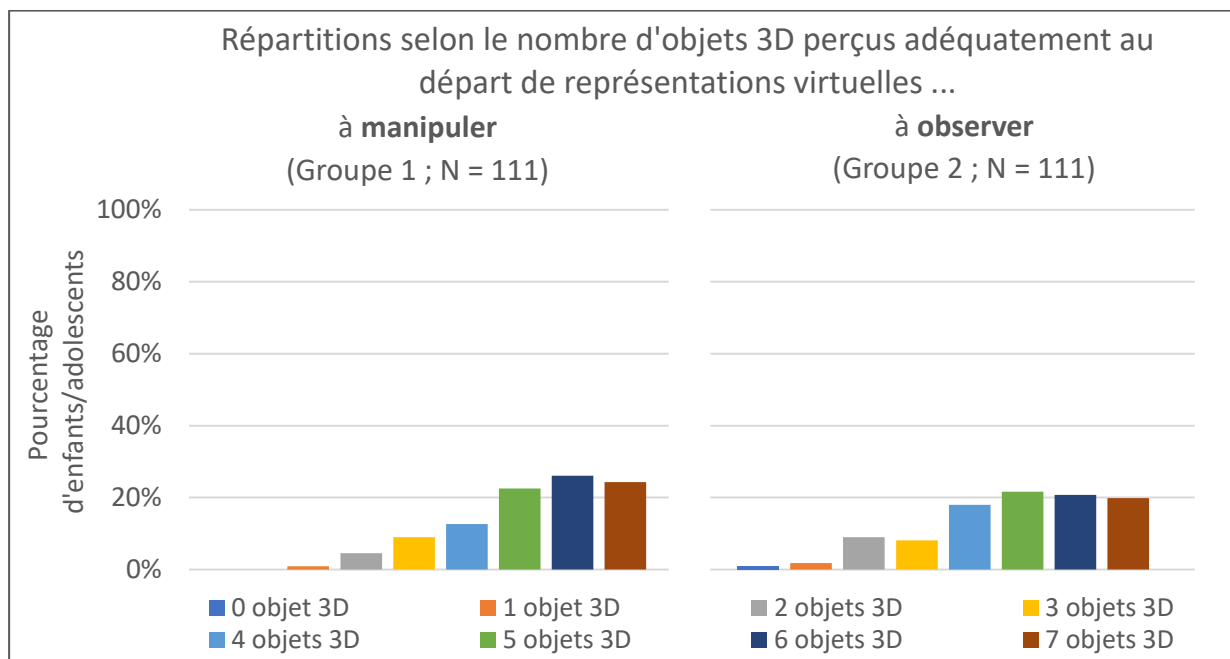


Figure 14 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer (2° étude)

La maîtrise de l'habileté semble partielle pour une grande partie des participants, ce qui signifie que les individus n'ont pas forcément le même type de comportements avec tous les objets 3D. De plus, les résultats présentés préalablement ont permis de souligner la présence de difficultés plus marquées pour certains objets 3D (ex. prisme).

Néanmoins, une certaine irrégularité est observée entre les individus par rapport à ces objets posant des difficultés. Comme le montre l'annexe 27, chez les participants

ayant perçu adéquatement six des sept objets 3D, l'objet sur lequel porte la difficulté n'est pas forcément le même pour tous les participants. Par exemple, dans le groupe 2, les résultats montrent que le cône est toujours adéquatement perçu chez ces derniers, mais que l'objet posant une difficulté varie selon les élèves, entre les six autres objets. Une disparité entre participants est donc constatée, comme nous avons aussi pu le mettre en avant dans le premier groupe (cf. 9.1.2.1).

En ce qui concerne les participants ayant perçu que l'élément proposé virtuellement représentait un objet 3D mais différent de celui qui était pourtant présenté, c'est-à-dire les cas de perception inadéquate, la Figure 15 présente les taux relatifs à ce cas de figure pour chacun des objets 3D observés dans les deux groupes. Des tendances communes semblent se dégager pour plusieurs des objets, où l'écart entre les deux groupes n'excède pas 5%. Par exemple, un nombre restreint de participants sélectionnent une ou des propositions 3D non attendues pour la sphère, que ce soit au départ de sa représentation virtuelle à manipuler (2,70% de perception inadéquate) ou à observer (7,20% de perception inadéquate). À l'inverse, les participants sont, dans les deux groupes, plus nombreux à sélectionner des propositions 3D non attendues pour le prisme (respectivement 22,5% et 24,3%) et ensuite pour le cône (respectivement 15,3% et 19,8%). Néanmoins, pour le cylindre mais surtout pour le cube et l'anneau rond, les différences entre les taux semblent plus marquées. Elles sont en faveur du groupe 1 pour le cylindre et le cube et en faveur du groupe 2 pour l'anneau rond. Les analyses inférentielles ultérieures permettront de statuer sur ces différences.

Au-delà de cette proximité dans la présence de perception inadéquate, il semble également se dégager une similitude dans les deux groupes au sujet des choix 3D non attendus sélectionnés (Annexe 29). En effet, dans le groupe 2, comme dans le groupe 1, on constate qu'en dehors de la proposition 3D attendue, la proposition 3D la plus régulièrement sélectionnée est l'objet 3D dont la hauteur est modifiée pour la plupart des objets 3D. C'est le cas pour le cône et l'anneau rond où cette proposition se distingue de toutes les autres. C'est également le cas pour le cylindre et la sphère même si cette proposition reste peu sélectionnée. Pour le prisme également, cette proposition ainsi que la proposition relative à la sélection de l'objet 3D dont l'inclinaison est modifiée se distinguent des autres propositions. Pour l'anneau droit aussi cette proposition est la plus couramment sélectionnée dans le groupe 2 et obtient la même fréquence que celle observée dans le groupe 1 (4,5%). Enfin, pour le cube, aucune

proposition 3D non attendue ne semble se dégager du groupe 2 puisque toutes sont minoritaires, contrairement au premier groupe dans lequel la proposition relative à l'objet 3D incliné se démarque.

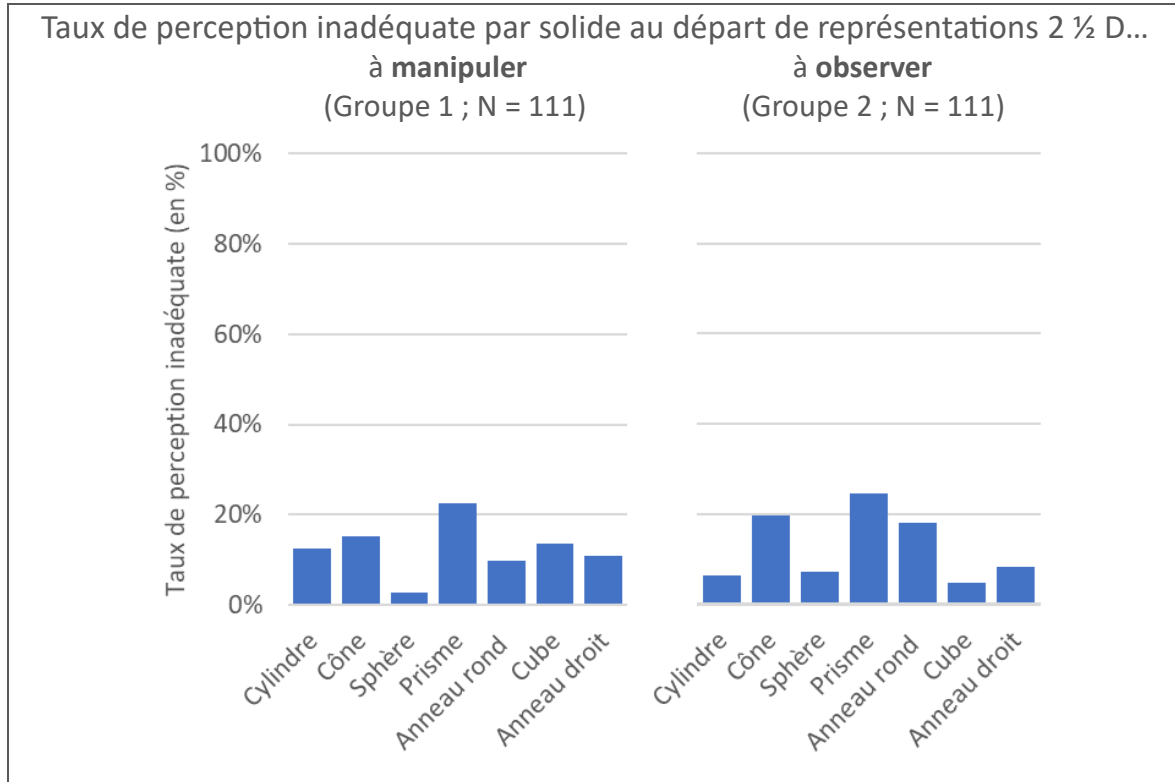


Figure 15 : Taux de perception inadéquate au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)

Enfin, d'autres participants ont privilégié la sélection d'un choix 2D et les verbatims utilisés pour justifier leur choix, dont les analyses sont présentées en annexe (Annexe 30) n'ont pas permis d'affirmer qu'ils avaient conscience que l'élément présenté était en réalité un objet 3D. Les taux associés à ces cas de non-perception de la 3D sont présentés au sein du Tableau 38¹³. La comparaison des taux de non-perception obtenus dans les deux modalités permet de relever que, pour plusieurs objets 3D comme le cône, le cube, le cylindre ou le prisme, des taux proches sont obtenus dans les deux groupes. Ils sont en revanche plus éloignés pour l'exercice de la sphère pour lequel un taux plus élevé est observé dans le deuxième groupe (16,2% contre 6,3%). Néanmoins, dans les deux groupes, l'objet 3D pour lequel ce taux est le plus faible est l'anneau rond et celui pour lequel il est le plus élevé est le cylindre.

¹³ Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

Tableau 38 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G1 : manip. 2½D (N = 111)	18,0%	13,5%	6,3%	9,0%	5,4%	13,5%	9,0%
G2 : obs. 2½D H. (N = 111)	20,7%	11,7%	16,2%	10,8%	9,9%	15,3%	13,5%

b. Analyses inférentielles comparatives

Malgré quelques divergences, de nombreux points communs ont pu être mis en évidence dans les deux groupes par rapport aux résultats présentés jusqu' alors. Les analyses inférentielles comparatives (*Tests du Khi-carré*), présentées au sein du Tableau 39, permettent de confirmer une proximité entre les taux observés dans les deux modalités pour la plupart des objets 3D. Les taux de perception adéquate peuvent être considérés comme indépendants du groupe d'appartenance pour tous les objets sauf pour la sphère ($\chi^2 = 8,128$; $p\text{-value} = 0,004$) et l'anneau rond ($\chi^2 = 6,608$; $p\text{-value} = 0,010$). Ces deux objets 3D obtiennent un taux plus élevé dans le groupe 1.

Pour la sphère, la place accordée à la manipulation influence l'apparition des comportements bidimensionnels, avec davantage de comportements de ce type dans le groupe 2 que dans le groupe 1.

Par ailleurs, pour le cube, le taux de perception inadéquate apparaît dépendant de la place accordée à la manipulation ($\chi^2 = 5,495$; $p\text{-value} = 0,019$), avec davantage de choix 3D non attendus quand la représentation virtuelle peut être manipulée. Un résultat proche du seuil de significativité est observé pour l'anneau rond par rapport à ce même taux ($\chi^2 = 3,037$; $p\text{-value} = 0,081$). Pour la majorité des objets 3D, la perception de l'objet 3D au départ de leur représentation virtuelle apparaît donc indépendante de la place accordée à la manipulation. Pour certains objets 3D, par exemple l'anneau rond ou la sphère, la perception dépend en revanche de la manipulation. Quand cette dernière influence la perception, les résultats sont en faveur de la manipulation.

Tableau 39 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G2 : Khi-carré (χ^2) et p-value (p) (2^e étude)

	Taux de perception adéquate	Taux de perception inadéquate	Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims)
Cylindre	$\chi^2 = 0,184$ $p = 0,668$	$\chi^2 = 2,577$ $p = 0,108$	$\chi^2 = 0,260$ $p = 0,610$
Cône	$\chi^2 = 0,526$ $p = 0,468$	$\chi^2 = 0,778$ $p = 0,591$	$\chi^2 = 0,000$ $p = 0,984$
Sphère	$\chi^2 = 8,128$ $p = 0,004^{**}$	$\chi^2 = 2,391$ $p = 0,122$	$\chi^2 = 5,454$ $p = 0,020^*$
Prisme	$\chi^2 = 0,934$ $p = 0,334$	$\chi^2 = 0,100$ $p = 0,751$	$\chi^2 = 0,202$ $p = 0,653$
Anneau rond	$\chi^2 = 6,608$ $p = 0,010^*$	$\chi^2 = 3,037$ $p = 0,081$	$\chi^2 = 1,593$ $p = 0,207$
Cube	$\chi^2 = 0,199$ $p = 0,655$	$\chi^2 = 5,495$ $p = 0,019^*$	$\chi^2 = 0,146$ $p = 0,702$
Anneau droit	$\chi^2 = 0,000$ $p = 1,000$	$\chi^2 = 0,473$ $p = 0,491$	$\chi^2 = 1,127$ $p = 0,288$

9.2.2.2. Impact de la manipulation sur la perception de chaque objet 3D au départ d'une représentation virtuelle selon l'âge

a. Analyses générales

La Figure 16 présente l'évolution des taux de perception adéquate observés à chaque tranche d'âge dans les deux groupes. Dans le groupe confronté à des représentations virtuelles à observer en vidéo, la manière dont les taux évoluent à chaque tranche d'âge varie entre les objets 3D. Les indices de corrélation calculés avec l'âge en jour, présentés au sein du Tableau 40, confirment, cette disparité entre les objets 3D comme l'indiquent les valeurs différentes de ces coefficients. Par ailleurs, la plupart des taux observés, dans un groupe comme dans l'autre, fluctuent entre les tranches d'âge et une augmentation systématique du taux n'est dès lors pas observée entre les tranches d'âge. En outre, la comparaison de la courbe d'évolution de chaque objet entre les deux groupes permet de relever aussi des divergences, ce que confirment également les indices de corrélation.

Pour le prisme, une corrélation positive mais faible est observée dans le groupe 2 ($r_{pb} = 0,238$), comme dans le groupe 1 ($r_{pb} = 0,289$). Le taux obtenu à la première tranche d'âge s'avère inférieur à celui observé dans la dernière tranche d'âge dans les deux groupes. Ces taux s'avèrent relativement proches dans les deux groupes, même si les courbes d'évolution varient. Cette amélioration est surtout expliquée par une diminution des choix 3D non attendus dans le groupe 1 ($r_{pb} = -0,273$) ce qui n'est pas particulièrement le cas dans le groupe 2 ($r_{pb} = -0,171$).

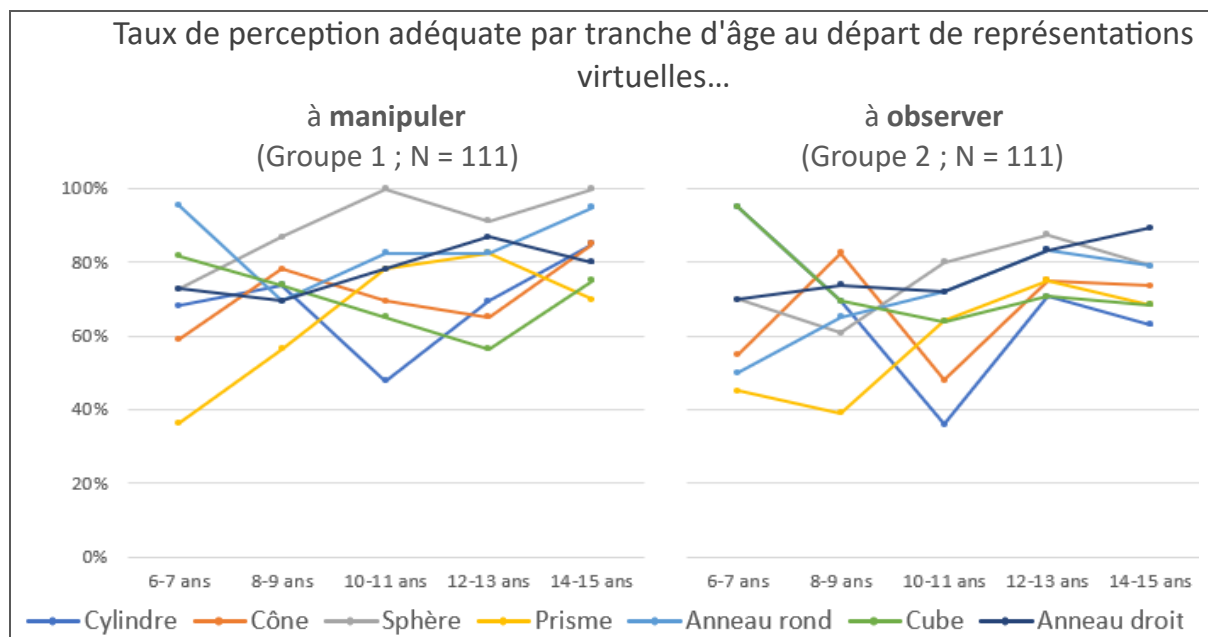


Figure 16 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour chacun des objets (2^e étude)

Pour le cylindre, des trajectoires différentes sont prises par les taux de perception des deux groupes malgré une corrélation négligeable observée dans les deux cas. Cette trajectoire s'explique par un taux nettement plus élevé dans le groupe 1 à la première tranche d'âge. Cependant, le taux diminue fortement à la troisième tranche d'âge dans les deux groupes et est suivi par une forte augmentation.

Pour le cône, la courbe est, dans les deux groupes, d'abord marquée par une augmentation du taux, suivie d'une diminution et d'à nouveau une augmentation, même si ces fluctuations sont plus marquées dans le deuxième groupe. Les indices de corrélation sont négligeables dans les deux groupes malgré le fait que le taux relatif à la première tranche d'âge, avoisinant 60% dans les deux groupes, est plus faible que celui observé à la dernière tranche d'âge, avoisinant 80% dans les deux groupes.

Pour l'anneau droit et le cube, les corrélations avec l'âge sont aussi négligeables dans les deux groupes. Concernant le premier des deux objets 3D, le taux vaut 70% environ dans les deux groupes à la première tranche alors qu'il atteint respectivement 80% et 90% à la dernière tranche d'âge. Dans le deuxième groupe, le taux de perception inadéquate diminue avec l'âge ($r_{pb} = -0,264$) même si la corrélation entre l'âge et le taux reste faible. Concernant le cube, le taux relatif à la première tranche d'âge est plus élevé que celui relatif à la dernière tranche dans les deux groupes, même si cette diminution apparaît plus marquée dans le groupe 2 suite au taux plus élevé observé chez les plus jeunes.

Enfin, pour les deux derniers objets 3D, à savoir l'anneau rond et la sphère, des situations différentes sont observées entre les deux groupes. Pour l'anneau rond, la corrélation apparaît positive mais faible dans le groupe 2 ($r_{pb} = 0,246$) alors qu'elle est négligeable dans le groupe 1 ($r_{pb} = 0,072$). Les trajectoires sont différentes notamment suite au fait qu'à la première tranche d'âge, un taux plus élevé est constaté dans le premier groupe. Cette augmentation du taux avec l'âge dans le groupe 2 est principalement expliquée par une diminution des cas de perception inadéquate ($r_{pb} = -0,267$). Pour la sphère, la situation inverse est observée puisqu'une corrélation positive mais faible apparaît dans le premier groupe ($r_{pb} = 0,292$) alors qu'elle est négligeable dans le deuxième ($r_{pb} = 0,163$). Pourtant, une diminution des cas de perception inadéquate, et en particulier du choix dont la hauteur est modifiée, apparaît dans les deux groupes et est même plus marquée dans le groupe 2 ($r_{pb} = -0,340$) que dans le groupe 1 ($r_{pb} = -0,209$).

Tableau 40 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p) associée (2^e étude)

		Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Perception adéquate	G1 : manip. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = 0,059$ $p = 0,538$	$r_{pb} = 0,098$ $p = 0,308$	$r_{pb} = 0,292$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = 0,289$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = 0,072$ $p = 0,454$	$r_{pb} = -0,079$ $p = 0,410$	$r_{pb} = 0,119$ $p = 0,215$
	G2 : obs. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,156$ $p = 0,102$	$r_{pb} = 0,096$ $p = 0,314$	$r_{pb} = 0,163$ $p = 0,087$	$r_{pb} = 0,238$ $p = 0,012^*$	$r_{pb} = 0,246$ $p = 0,009^{**}$	$r_{pb} = -0,145$ $p = 0,129$	$r_{pb} = 0,171$ $p = 0,073$
Perception inadéquate	G1 : manip. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,051$ $p = 0,596$	$r_{pb} = -0,134$ $p = 0,161$	$r_{pb} = -0,209$ $p = 0,027^*$	$r_{pb} = -0,273$ $p = 0,004^{**}$	$r_{pb} = -0,130$ $p = 0,173$	$r_{pb} = 0,113$ $p = 0,239$	$r_{pb} = -0,186$ $p = 0,050^*$
	G2 : obs. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,069$ $p = 0,471$	$r_{pb} = -0,175$ $p = 0,067$	$r_{pb} = -0,340$ $p < 0,001^*$	$r_{pb} = -0,171$ $p = 0,073$	$r_{pb} = -0,267$ $p = 0,005^{**}$	$r_{pb} = 0,110$ $p = 0,251$	$r_{pb} = -0,264$ $p = 0,005^{**}$
Non-perception	G1 : manip. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,030$ $p = 0,752$	$r_{pb} = 0,012$ $p = 0,902$	$r_{pb} = -0,181$ $p = 0,057$	$r_{pb} = -0,128$ $p = 0,181$	$r_{pb} = 0,058$ $p = 0,548$	$r_{pb} = -0,047$ $p = 0,621$	$r_{pb} = -0,076$ $p = 0,428$
	G2 : obs. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = 0,171$ $p = 0,073$	$r_{pb} = 0,066$ $p = 0,489$	$r_{pb} = 0,013$ $p = 0,889$	$r_{pb} = -0,130$ $p = 0,174$	$r_{pb} = 0,007$ $p = 0,945$	$r_{pb} = 0,028$ $p = 0,768$	$r_{pb} = -0,024$ $p = 0,801$

En plus des divergences observées au niveau des trajectoires, des divergences sont aussi remarquées entre les deux groupes par rapport aux différences entre objets 3D, comme l'indiquent les résultats de *tests Q de Cochran appliqués* à chaque tranche d'âge sur la perception adéquate des sept exercices (Tableau 41). Dans le groupe 2, les résultats sont significatifs uniquement à la première ($Q = 25,463$; p -value < 0,001), à la deuxième ($Q = 14,541$; p -value = 0,024) et à la troisième tranche d'âge ($Q = 16,301$; p -value = 0,012) mais pas dans les deux dernières. Les différences entre objets 3D mises en évidence lorsque toutes les tranches d'âge sont confondues ne semblent donc pas

généralisables¹⁴ à toutes les tranches d'âge puisqu'elles disparaissent à l'adolescence. Ces résultats diffèrent donc en partie de ceux observés dans le premier groupe, où des différences significatives entre objets 3D sont aussi constatées en première et en troisième tranche d'âge mais aussi en quatrième tranche et sont toutefois absentes en deuxième tranche d'âge. Notons par ailleurs que si, toutes tranches d'âge confondues, la perception du prisme pose le plus de difficulté dans les deux groupes, ce n'est en réalité le cas que dans les premières tranches d'âge. Dans les deux groupes, les objets posant le plus et le moins de difficultés varient entre les tranches d'âge.

Tableau 41 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (2^e étude)

	6-7 ans	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
G1 : manip. 2½D (N = 111)	Q = 21,306 p = 0,002*	Q = 7,111 <i>p = 0,311</i>	Q = 20,714 p = 0,002**	Q = 15,739 p = 0,015*	Q = 10,846 <i>p = 0,093</i>
G2 : obs. 2½D H. (N = 111)	Q = 25,463 p < 0,001**	Q = 14,541 p = 0,024*	Q = 16,301 p = 0,012*	Q = 4,320 <i>p = 0,633</i>	Q = 5,531 <i>p = 0,478</i>

b. Analyses inférentielles comparatives

Sans prendre en compte les différentes tranches d'âge, les analyses inférentielles comparatives ont précédemment montré qu'un effet de manipulation n'est observé que pour certains objets 3D. En menant ces mêmes analyses sur chacune des tranches d'âge, il apparaît que, pour chaque objet 3D et à chaque tranche d'âge, la perception des objets 3D est majoritairement indépendante de la place accordée à la manipulation. En effet, les résultats aux *tests du Khi-carré* (ou alternative) sont majoritairement non significatifs (Tableau 42). Des résultats non significatifs sont observés à toutes les tranches d'âge pour le cône, le prisme, le cube et l'anneau droit. Pour les trois autres objets 3D, des résultats significatifs apparaissent occasionnellement entre les deux groupes. C'est le cas pour les enfants âgés de 6 à 7 ans pour le cylindre (*Test exact de Fisher* = 4,886 ; *p-value* = 0,047) et l'anneau rond ($\chi^2 = 11,197$; *p-value* = 0,001). Pour la sphère, cela se produit uniquement chez les enfants âgés de 8 à 9 ans ($\chi^2 = 4,059$; *p-value* = 0,022) et chez les adolescents âgés de 14 à 15 ans ($\chi^2 = 4,692$; *p-value* = 0,047), même si des résultats proches du seuil de

¹⁴ Attention toutefois que les analyses menées à chaque tranche d'âge portent par conséquent sur un échantillon cinq fois plus faible alors que la taille de l'échantillon influence la significativité statistique (Degreave, 2022). Il est important de garder cela à l'esprit pour l'ensemble de l'étude.

significativité sont obtenus à la tranche d'âge constituée des enfants âgés de 10 à 11 ans ($\chi^2 = 5,135$; $p\text{-value} = 0,051$). Sauf pour quelques rares exceptions, il est donc possible de conclure que pour la quasi-totalité des objets 3D et des tranches d'âge, la perception des objets 3D est indépendante de la place accordée à la manipulation du matériel.

Tableau 42 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G2 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p -value (p) (2^e étude)

	À 6-7 ans	À 8-9 ans	À 10-11 ans	À 12-13 ans	À 14-15 ans
Cylindre	Test ex. de F. = 4,886 $p = 0,047^*$	$\chi^2 = 0,107$ $p = 0,743$	$\chi^2 = 0,689$ $p = 0,406$	$\chi^2 = 0,009$ $p = 0,924$	Test ex. de F. = 2,438 $p = 0,155$
Cône	$\chi^2 = 0,072$ $p = 0,789$	Test ex. de F. = 0,138 $p = 1,000$	$\chi^2 = 2,292$ $p = 0,130$	$\chi^2 = 0,537$ $p = 0,464$	Test ex. de F. = 0,765 $p = 0,451$
Sphère	$\chi^2 = 0,038$ $p = 1,000$	$\chi^2 = 4,059$ $p = 0,044^*$	Test ex. de F. = 5,135 $p = 0,051$	Test ex. de F. = 0,179 $p = 1,000$	Test ex. de F. = 4,692 $p = 0,047^*$
Prisme	$\chi^2 = 0,324$ $p = 0,569$	$\chi^2 = 1,394$ $p = 0,238$	$\chi^2 = 1,179$ $p = 0,278$	Test ex. de F. = 0,406 $p = 0,724$	$\chi^2 = 0,011$ $p = 0,915$
Anneau rond	$\chi^2 = 11,197$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 0,099$ $p = 0,753$	$\chi^2 = 0,763$ $p = 0,382$	Test ex. de F. = 0,004 $p = 1,000$	Test ex. de F. = 2,246 $p = 0,182$
Cube	Test ex. de F. = 1,736 $p = 0,346$	$\chi^2 = 0,107$ $p = 0,743$	$\chi^2 = 0,008$ $p = 0,930$	$\chi^2 = 1,042$ $p = 0,307$	$\chi^2 = 0,208$ $p = 0,648$
Anneau droit	$\chi^2 = 0,038$ $p = 0,845$	$\chi^2 = 0,107$ $p = 0,743$	$\chi^2 = 0,250$ $p = 0,617$	Test ex. de F. = 0,122 $p = 1,000$	Test ex. de F. = 0,672 $p = 0,661$

9.2.2.3. Influence des variables secondaires sur la perception de représentations virtuelles à manipuler et à observer

a. Le genre

Face à des représentations virtuelles observées en vidéo, les tests inférentiels du Khi-carré appliqués à chacun des trois objets 3D pour comparer les taux de perception adéquate obtenus auprès des filles et des garçons indiquent tous des résultats non significatifs (Tableau 43). De ce fait, il est possible de conclure que la capacité de perception visuelle de ces trois objets 3D est indépendante du genre. Puisqu'un même constat a pu être réalisé dans le premier groupe (cf. 9.1.2.3), l'absence d'effet de genre

sur les capacités de perception semble donc être valable à la fois face à des représentations virtuelles à manipuler et à observer.

Tableau 43 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer par genre et comparaison : taux, Khi-carré et p-value (2^e étude)

	G2 : obs. 2½D (N = 111)			
	Taux de perception adéquate		Khi-carré	p-value
	♀ (N =59)	♂ (N =52)		
Cube	67,8%	78,8%	1,711	0,191
Sphère	79,7%	71,2%	1,087	0,297
Prisme	59,3%	57,7%	0,030	0,862

b. Le niveau de maîtrise de la rotation mentale

Comme l'indique le Tableau 44, la corrélation calculée entre la perception adéquate de représentations virtuelles à observer uniquement et le score de rotation mentale permet de relever qu'une corrélation positive, bien que faible, est observée pour le prisme ($r_{pb} = 0,262$). Pour les deux autres objets 3D, la corrélation apparaît quant à elle négligeable. Face à cette modalité, la capacité de perception semble être en lien, bien que celui-ci reste faible et ne concerne pas l'ensemble des objets 3D, avec la capacité de rotation mentale. Ce constat relatif à la présence de ce lien entre les capacités de rotation mentale et les capacités de perception de certains objets 3D a déjà pu être relevé au départ de représentations virtuelles à manipuler (cf. 9.1.2.3).

Tableau 44 : Corrélation entre le score au test de rotation mentale (sur 16) et la perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer : coefficient de corrélation r point bi-sériel (r_{pb}) et p-value

	G2 : obs. 2½D (N = 111)		
	Cube	Sphère	Prisme
r_{pb}	-0,78	0,122	0,262
p-value	0,417	0,202	0,006**

c. Le risque de TDC

Le taux de perception adéquate observé dans le deuxième groupe chez les participants susceptibles, au regard des résultats obtenus au DCDQ-FE, d'être porteurs du TDC s'avère plus élevé pour le cube et la sphère que celui observé chez ceux n'étant pas susceptibles de l'être (Tableau 45). Pour autant, les analyses inférentielles menées sur ces taux, c'est-à-dire les tests du Khi-carré ou leur alternative quand les conditions

d'application ne sont pas respectées, s'avèrent non significatifs. Ces résultats suggèrent alors que les capacités de perception des trois objets 3D au départ de représentations virtuelles à observer uniquement sont indépendantes des risques de TDC. Si, pour la sphère et le cube, de tels résultats avaient pu préalablement être mis en évidence dans le groupe confronté à des représentations virtuelles manipulables, il n'en est pas de même pour le prisme où une dépendance avait pu être mise en évidence (cf. 9.1.2.3). Il s'agit donc là d'une divergence entre les deux modalités, même si celle-ci ne concerne qu'un des trois objets 3D.

Tableau 45 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer chez les enfants/adolescents concernés ou non par un risque de TDC et comparaison : taux, Khi-carré (ou son alternative le test exact de Fisher) et p-value (2^e étude)

	G2 : obs. 2½D (N = 111)			
	Taux de perception adéquate		Khi-carré (ou test exact de Fisher)	p-value
	Risque de TDC (N = 96)	Risque de TDC (N = 15)		
Cube	70,8%	86,7%	Test ex.de F. = 1,649	0,347
Sphère	75,0%	80,0%	Test ex.de F. = 0,176	1,000
Prisme	60,4%	46,7%	1,011	0,315

d. Les habitudes et pratiques régulières

L'analyse de la variable secondaire relative aux habitudes menées auprès du groupe confronté à de représentations virtuelles manipulables a préalablement permis de relever une indépendance des capacités de perception du cube, de la sphère et du prisme à l'ensemble des habitudes investiguées (cf. 9.1.2.3). En se focalisant sur la modalité des représentations virtuelles non manipulables, il apparaît que des résultats similaires sont observés à une exception près. Pour les habitudes relatives à l'usage des appareils tactiles, aux jeux vidéo, aux jeux de construction, aux jeux de puzzle et à la pratique d'un instrument, les résultats des analyses inférentielles sont non significatifs pour les trois objets (Tableau 46). De ce fait, le niveau de maîtrise de la perception de représentations virtuelles présentées en vidéo est indépendant de ces habitudes. Pour la pratique d'un sport, des résultats non significatifs sont aussi observés pour le cube et la sphère. Néanmoins, pour le prisme, le résultat est significatif ($\chi^2 = 5,651$; $p\text{-value} = 0,017$), en faveur des joueurs réguliers. Il s'agit là de la seule divergence avec le groupe autorisé à manipuler les représentations.

Tableau 46 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : taux, Khi-carré (ou son alternative) et p-value (2^e étude)

		G2 : obs. 2½D (N = 111)			
		Taux de perception adéquate		Khi-carré (ou test exact de Fisher)	p-value
		Régulier	Régulier		
Utilisation des appareils tactiles	Cube	75,0%	72,7%	Test ex. de F. = 0,028	1,000
	Sphère	66,7%	76,8%	Test ex. de F. = 0,593	0,481
	Prisme	41,7%	60,6%	Test ex. de F. = 1,582	0,230
Pratique des jeux vidéo	Cube	70,0%	75,4%	0,408	0,523
	Sphère	80,0%	72,1%	0,924	0,336
	Prisme	60,0%	57,4%	0,078	0,780
Pratique des jeux de construction	Cube	67,9%	77,6%	1,311	0,252
	Sphère	77,4%	74,1%	0,156	0,693
	Prisme	62,3%	55,2%	0,574	0,449
Pratique des jeux de type « puzzle »	Cube	74,3%	70,3%	0,206	0,650
	Sphère	78,4%	70,3%	0,881	0,348
	Prisme	59,5%	56,8%	0,074	0,785
Pratique d'un sport	Cube	69,2%	74,1%	0,241	0,623
	Sphère	69,2%	77,6%	0,766	0,381
	Prisme	38,5%	64,5%	5,651	0,017*
Pratique d'un instrument de musique	Cube	71,6%	81,3%	Test ex. de F. = 0,649	0,551
	Sphère	74,7%	81,3%	Test ex. de F. = 0,316	0,757
	Prisme	55,8%	75,0%	2,082	0,149

Si les comparaisons des groupes au départ avaient permis de relever la présence de davantage de joueurs réguliers de « jeux de construction » et de « jeux de puzzle » dans le premier groupe (cf. Annexe 17), ce déséquilibre ne semble pas impacter, *a minima* pour les trois objets investigués, les écarts de performance entre les groupes vu l'absence d'effet relatif à ces habitudes sur les résultats observés dans les deux groupes.

e. Le niveau scolaire et l'expérience antérieure en géométrie 3D

Face à des représentations virtuelles observées uniquement, le taux de perception du cube n'augmente pas entre les niveaux scolaires. Il varie entre 50,0% en 6^{ème} primaire et 92,9% en première primaire alors qu'à toutes les autres tranches d'âge, il oscille avec des taux compris entre 65 et 80%. L'absence de croissance des résultats entre les différents niveaux scolaires semble donc correspondre à ce qui a pu être relevé face aux représentations virtuelles manipulables, même si les années scolaires dans lesquelles des difficultés sont le plus ou le moins souvent observées ne sont pas forcément identiques dans les deux modalités (cf. 9.1.2.3). Pour la sphère, les taux de perception adéquate sont tous supérieurs à 70% à partir de la quatrième primaire alors

qu'aucun ne l'est dans les trois niveaux précédents. Pour autant, le taux n'augmente pas systématiquement d'un niveau scolaire à l'autre. D'ailleurs, le plus élevé est observé chez les participants de 1^{ère} secondaire. À nouveau, malgré des divergences sur les niveaux scolaires où le taux est le plus élevé, cette absence de croissance systématique des capacités de perception entre les niveaux scolaires est commune aux deux modalités ici comparées. Enfin pour le prisme, les résultats ne dépassent pas 60% dans les classes inférieures à la sixième primaire alors qu'à partir de la sixième primaire, les taux sont tous supérieurs à ce seuil, en particulier en première secondaire où le taux vaut 90%. On retrouve donc des points communs avec le premier groupe (cf. 9.1.2.3), même si, dans ce dernier, les différences s'observent surtout à partir de la cinquième primaire.

Par ailleurs, les capacités de perception des trois objets 3D au départ de représentations virtuelles à observer sont indépendantes de l'expérience en géométrie 3D, que ce soit par rapport au fait d'avoir abordé la géométrie 3D, d'avoir déjà rencontré des solides virtuels ou d'avoir déjà réalisé ce type d'exercice de reconnaissance. En effet, comme l'indique le Tableau 47, des résultats non significatifs sont observés aux *tests du Khi-carré* (ou alternative) appliqués pour vérifier cette indépendance. Puisque ce même constat a pu être préalablement réalisé pour les représentations virtuelles à manipuler (cf. 9.1.2.3), il apparaît possible de considérer qu'à ce sujet, la situation est équivalente entre les deux modalités.

Tableau 47 : Perception adéquate du cube, de la sphère et du prisme au départ de représentations 2 ½ D à observer chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : taux, Khi-carré (ou son alternative) et p-value (2^e étude)

		G2 : obs. 2½D (N = 111)			
		Taux de perception adéquate		Khi-carré (ou test exact de Fisher)	p-value
		Non	Oui		
Apprentissage de la géométrie 3D cette année scolaire	Cube	73,2%	72,4%	0,006	0,937
	Sphère	75,6%	75,9%	0,001	0,978
	Prisme	61,0%	51,7%	0,756	0,385
Expérience avec les représentations virtuelles	Cube	76,1%	57,9%	2,643	0,104
	Sphère	79,3%	57,9%	Test ex. de F. = 3,927	0,075
	Prisme	62,0%	42,1%		2,557
Résolution de tâches de reconnaissance similaires	Cube	74,4%	69,7%	0,256	0,613
	Sphère	76,9%	72,7%	0,222	0,638
	Prisme	55,1%	66,7%	1,272	0,259

9.2.3. Discussion spécifique à la question 1.2°

Dans une perspective comparative, les deux études ont proposé d'évaluer les capacités de perception de représentations virtuelles quand ces dernières étaient à manipuler sur écran tactile et quand elles ne l'étaient pas (observation de vidéo). De cette façon, la conception de l'approche constructiviste de la perception, qui souligne l'importance de l'action pour la perception (Blavier, 2006) est évaluée dans les simulations virtuelles de l'espace 3D. Il ressort que de nombreux points communs peuvent être relevés entre le niveau de maîtrise de la capacité de perception dans les deux modalités. D'ailleurs, si les éléments qui permettent de statuer sur cette proximité seront mis en avant ci-dessous, les observations communes ne seront ici que très peu discutées au regard de la littérature puisque ces aspects ont déjà fait l'objet d'une discussion par rapport au groupe confronté à des représentations virtuelles manipulables (cf. 9.1.3).

9.2.3.1. Percevoir les objets 3D au départ de vidéo à observer : une habileté majoritairement non systématique qui diffère parfois de la perception de représentations virtuelles manipulables

Comme cela a pu être mis en évidence pour les représentations virtuelles manipulables, la capacité à percevoir les représentations virtuelles d'objets 3D présentées en vidéo apparaît majoritairement non systématique chez les enfants et les adolescents. Si certains d'entre eux arrivent à percevoir adéquatement les sept objets 3D, la plupart ont des difficultés à en percevoir un ou plusieurs. De plus, bien qu'ils soient minoritaires, quelques-uns n'en perçoivent adéquatement aucun des sept. L'habileté est donc le plus souvent partiellement maîtrisée chez les enfants et les adolescents, comme c'était le cas au départ de matériel virtuel à manipuler. Une première divergence est remarquée à ce sujet entre les deux modalités dans la première étude puisque les individus qui ne perçoivent aucun des objets 3D sont plus nombreux face à des représentations à observer. Cela suggère qu'empêcher la manipulation occasionne un risque plus important de difficultés de perception.

Les analyses des taux obtenus à chaque objet 3D suggèrent également que des différences émergent entre les deux modalités. Dans les deux modalités, les deux études nous indiquent que la perception adéquate d'aucun objet n'est systématique dans la mesure où la perception de chaque objet 3D pose des difficultés à certains enfants et à certains adolescents. Malgré cette tendance commune observée quand la

manipulation est ou non autorisée, il apparaît, dans les deux études, que des différences sont constatées entre les deux modalités au niveau de la perception de certains objets 3D. Dans la première étude, il est possible de citer que les taux de perception adéquate diffèrent significativement entre les deux modalités pour le cylindre, l'anneau rond et surtout la sphère alors que, dans la seconde étude, des différences concernent également l'anneau rond et la sphère. Pour tous ces objets, la perception s'avère mieux maîtrisée au départ des stimuli à manipuler, même si cette différence ne concerne pas l'ensemble des tranches d'âge.

De ce fait, en dépit du conflit multisensoriel qu'implique la manipulation de représentations virtuelles d'objets 3D (Krylova & Vodyakha, 2022) et d'éventuelles difficultés pouvant être associées à la manipulation d'environnements virtuels au départ d'une interface 2D (Cohé, 2012 ; Sanandaji *et al.*, 2017), la manipulation des représentations virtuelles semble apporter une plus-value pour favoriser la perception de certains objets représentés virtuellement même si cette plus-value n'est pas systématique. Ces résultats apparaissent cohérents avec les observations réalisées par Harman *et al.* (1999) auprès d'adultes sur des objets complexes puisqu'ils ont observé que l'exploration physiquement « active » de représentations virtuelles, en comparaison à leur exploration physiquement « passive », peut entraîner de meilleurs résultats aux tâches de reconnaissance de vues d'objets. Il s'agit cependant ici d'être plus nuancé en relevant que cet impact n'est pas systématique et ne concerne même qu'un nombre restreint d'objets.

La proposition d'une suite de rotations imposées entraîne donc une capacité de perception tantôt équivalente et tantôt inférieure à des situations dans lesquelles les enfants et les adolescents peuvent manipuler librement des objets 3D. Même si elle intègre des vues de l'objet dans certaines positions considérées comme cruciales pour le stockage visuospatial des informations (James *et al.*, 2001, 2002) ainsi que des pauses à ces moments cruciaux pour favoriser la construction mentale de l'objet 3D (Wu & Chiang, 2013), ces conditions ne suffisent pas pour assurer une équivalence pour chacun des objets 3D. Probablement néanmoins que la présence de ces vues cruciales et de ces pauses a permis d'obtenir des résultats proches entre les deux modalités pour plusieurs des objets 3D. Cela pourrait même permettre d'expliquer la plus faible perception inadéquate constatée pour l'exercice du cube dans la seconde étude. En effet, la manipulation des représentations virtuelles a occasionné une sélection plus élevée de la proposition 3D inclinée. Sans doute que les rotations proposées dans la

vidéo en prenant le temps d'observer la face carrée avant de l'objet, la face carrée du dessus, et en montrant la rotation passant de la première à la deuxième, ont permis de limiter le choix de l'objet 3D incliné.

La manipulation de représentations virtuelles sur de tels supports n'occasionne pas de stimulus sensoriel haptique offrant des informations sur l'objet 3D (Sinclair & Bruce, 2015 ; Žilková & Partová, 2019), qui pourtant, dans l'espace sensible, peuvent aider à la compréhension des formes (Pinet & Gentaz, 2008). De ce fait, il est possible de considérer que la plus-value associée à la manipulation, quand elle est observée, se situe ailleurs. Elle se situe plutôt dans le fait de contrôler les actions réalisées sur le matériel, comme le suggéraient Schnotz et Lowe (2008). Plus précisément, le terme de contrôle est ici entendu pour évoquer le fait de choisir les directions dans lesquelles les rotations sont appliquées. Cela va donc plus loin que le contrôle d'animation tel qu'envisagé par Hegarty et Kriz (2008), qui considèrent comme la possibilité de mettre en pause l'animation ou de revenir en arrière, pour lequel d'ailleurs une absence d'effet a pu être observée par les auteurs. Ce contrôle de mouvement a sans doute pour conséquence une meilleure compréhension des rotations en train d'être effectuées puisqu'elles sont la conséquence d'un geste voulu par l'utilisateur et non d'un mouvement imposé. Cette compréhension peut constituer une aide pour s'imaginer l'objet 3D au départ des représentations virtuelles. Cela suggère que l'explication préalable des rotations qui sont présentées dans les vidéos proposées au groupe confronté à des représentations virtuelles à observer n'est pas toujours suffisante pour assurer cette compréhension de l'objet 3D représenté.

D'ailleurs, les différences de résultats observées pour la sphère, particulièrement élevées dans les deux études, semblent pouvoir être potentiellement expliquées par une difficulté de compréhension des mouvements appliqués sur la représentation virtuelle non manipulée. En effet, quels que soient les mouvements appliqués, l'apparence globale de ce qui est présenté est la même (une forme ronde), bien que des effets de lumière sont intégrés pour que l'élève puisse prendre conscience des mouvements. De ce fait, même si les rotations ont été préalablement expliquées par l'expérimentateur et même si les participants ont été amenés à observer d'autres objets subissant les mêmes rotations préalablement, la compréhension des rotations peut être plus complexe. Elle pourrait être confondue par exemple avec les rotations d'un disque dans le plan, ce qui permet d'ailleurs d'expliquer les comportements bidimensionnels observés pour cet objet, plus élevés face à des représentations

virtuelles à observer qu'à manipuler. En effet, la comparaison des erreurs types réalisées permet d'indiquer que, pour ce solide, on observe, dans les deux études, davantage de cas de non-perception face à des représentations à observer en vidéo que face à des représentations virtuelles. Notons que, pour cet objet 3D, une absence de lien est observée entre capacité de rotation mentale et perception de l'objet. Autrement dit, le déficit de perception de cet objet 3D n'est pas plus observé chez les enfants et les adolescents ayant une mauvaise maîtrise des capacités de rotation mentale. Cela suggère donc bien que les difficultés de perception de cet objet 3D ne sont pas dues uniquement à une difficulté à imaginer l'application de rotations sur des objets 3D mais bien plutôt à identifier quels sont les mouvements appliqués à l'objet 3D présenté. De plus, si la première étude indique que ces difficultés de perception de la sphère au départ de représentations virtuelles à observer, semblent surtout constatées chez les enfants plus jeunes, la seconde étude permet d'observer que la différence entre observation et manipulation, et donc la possible difficulté de compréhension des mouvements appliqués dans la vidéo, se produit aussi parfois chez les enfants plus âgés et les adolescents. Des recherches antérieures avaient permis de relever que, même si ce solide est régulièrement rencontré par les enfants et les adolescents au quotidien et est aussi rencontré très tôt dans les apprentissages scolaires, des difficultés à mener des opérations mentales sur cet objet peuvent être identifiées, notamment s'imaginer leur empreinte (Duroisin, 2015). L'étude permet donc de mettre en évidence d'autres difficultés spatiales spécifiques qui émergent face à cet objet 3D quand il est représenté virtuellement et sans le contrôle des manipulations. Il reste cependant important de mentionner que les caractéristiques de l'environnement, sur lequel nous reviendrons dans la discussion générale, ont pu amplifier la présence de tels comportements.

Par ailleurs, une autre justification à cette plus-value associée à la manipulation peut se rapporter à la nature transitoire des informations, évoquée comme une source de difficulté associée aux représentations 2 ½ D. Si, en offrant le contrôle à l'individu, les informations restent tout de même transitoires, l'individu a davantage de maîtrise sur ces informations transitoires, il peut notamment revoir ces informations, ce qui peut faciliter leur encodage (Schnotz & Lowe, 2008). Pour autant, il est possible d'émettre des réserves par rapport à cette explication, notamment dans le cadre de l'exercice de la sphère compte tenu de la particularité précédemment évoquée de ce solide. Pour cet objet 3D, il y a peu d'intérêt à pouvoir revoir des informations transitoires. Un tel

argument pourrait cependant expliquer l'écart constaté pour les autres objets 3D concernés par un effet de manipulation, notamment l'anneau rond. Si cet objet partage des points communs avec la sphère, notamment le fait d'être doublement incurvé, il n'en reste pas moins qu'il ne possède pas les spécificités évoquées précédemment pour la sphère dans l'environnement virtuel. Les arguments présentés pour la sphère ne semblent donc pas pouvoir être utilisés pour ce solide, ni d'ailleurs pour le cylindre, pour qui un effet de manipulation a aussi pu être relevé dans la première étude.

Inversement, étant donné qu'aucune différence significative à l'avantage des représentations à observer n'est constatée pour les taux de perception adéquate, la présence systématique de vues cruciales pour le stockage visuospatial des informations (James *et al.*, 2001, 2002), qu'on ne retrouve pas nécessairement quand les représentations sont manipulées, n'est pas un critère suffisant pour engendrer de meilleures capacités de perception. Notons toutefois que l'observation des actions de manipulation réalisées sur la tablette permet de relever que la majorité des participants passent par cette récolte d'informations sur les vues cruciales. Il ne s'agit donc pas forcément de remettre en question le caractère crucial de ces vues mis en évidence par les auteurs. Des analyses complémentaires menées sur les différentes vues observées dans le groupe pouvant manipuler librement les représentations devraient permettre de se positionner plus clairement vis-à-vis de cet aspect et de son impact. Une autre piste pour cela serait d'investiguer une nouvelle modalité de présentation virtuelle des objets 3D, une manipulation semi-libre dans laquelle le passage par certaines étapes serait imposé, à l'instar de ce qu'ont envisagé Meijer et van den Broeck (2010), ou ne serait pas autorisé (ex. pas d'accès aux vues sans déformation). Par ailleurs, afin d'affiner la compréhension relative à l'influence de la manipulation et/ou de la compréhension des rotations, une possibilité serait également d'investiguer la perception au départ de représentations virtuelles manipulées par quelqu'un d'autre. En effet, si les mouvements appliqués aux objets virtuels ont été expliqués par l'expérimentateur, il n'en reste pas moins que ces mouvements sont réalisés automatiquement « par l'ordinateur » et non par l'intervention d'un humain sur l'objet 3D que l'enfant ou l'adolescent est en train d'observer. Sans doute que cette vision des mouvements réalisés par un humain sur l'écran et de leur conséquence sur l'apparence de l'objet 3D pourrait générer des performances qui tendraient à se rapprocher dans la modalité dans laquelle l'individu est autorisé lui-même à manipuler l'objet.

Notons par ailleurs, une fois de plus, que les caractéristiques de l'environnement virtuel manipulable, proposant de limiter les manipulations pour simplifier l'association des gestes réalisés sur l'écran et des mouvements en 3D appliqués à l'objet virtuel, peut aussi avoir influencer les résultats obtenus en faveur de la manipulation. Sans doute que des difficultés plus marquées auraient pu émerger dans des environnements plus complexes (Cohé, 2012). Nous reviendrons également sur cet aspect dans la discussion générale.

Si les résultats mettent en évidence des différences dans la maîtrise de la perception entre les deux modalités comparées pour certains objets 3D, il n'en reste pas moins que de nombreuses tendances communes sont tout de même constatées quand le matériel virtuel est à observer ou non.

Comme évoqué précédemment, la perception d'aucun des objets n'apparaît systématique dans les deux modalités. Dans les deux modalités, une apparition de cas de non-perception est observée même si ces derniers restent majoritairement rares, ce qui permet d'élargir le constat relatif à la rareté de ces comportements, mis en évidence par Krylova et Vodyakha (2022) sur des représentations virtuelles manipulables, aux situations dans lesquelles l'individu n'a pas le contrôle de la manipulation dans cet environnement. Comme susmentionné et pour des raisons précédemment évoquées, les deux études montrent que des comportements bidimensionnels apparaissent toutefois plus régulièrement pour certains objets, comme la sphère, face à du matériel à observer. Néanmoins, excepté pour quelques objets, dont la sphère fait évidemment partie, ces cas restent moins fréquents que les cas de perception inadéquate. Face à des vidéos, les enfants et les adolescents continuent aussi à choisir des propositions 3D incorrectes, avec des fréquences majoritairement semblables à celles observées face à des représentations virtuelles à manipuler. De plus, des erreurs types similaires à celles observées dans le premier groupe sont constatées, avec majoritairement la sélection de la proposition 3D dont la hauteur est modifiée. Par rapport à cette erreur, le même constat relatif à la plus faible sélection de ce choix pour les exercices du cube et de la sphère apparaît également. Nous renvoyons donc le lecteur vers les explications potentielles associées à ces erreurs mises en lien avec la littérature (difficultés à retenir et compiler les informations, pensée catégorielle...) (cf. 9.1.3).

9.2.3.2. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer en vidéo : une habileté qui varie également entre les objets

Face aux vidéos de représentations virtuelles à observer, comme c'était le cas face aux représentations à manipuler, des différences sont observées entre les objets 3D, ce qui s'inscrit à nouveau en cohérence avec les observations de recherches antérieures, qui évoquent que les capacités perceptives dépendent des objets à percevoir (Wu & Chiang, 2013). De plus, une même tendance est observée quant aux plus fortes difficultés constatées pour la perception du prisme. À nouveau, nous renvoyons le lecteur vers les explications possibles relatives à cette difficulté mises en évidence au point 9.1.3). En revanche, les plus fortes difficultés constatées au sujet de la sphère face à des représentations virtuelles à observer, qui ont déjà été discutées, permettent de mettre en évidence quelques divergences entre les groupes, notamment puisque la sphère n'est plus l'objet qui pose le moins de difficultés.

Enfin, dans les deux modalités, on retrouve une proximité aussi concernant le manque de régularité des comportements perceptifs ainsi qu'au niveau des différences individuelles constatées.

9.2.3.3. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer en vidéo : une habileté qui n'évolue que partiellement avec l'âge

Globalement, il apparaît que la perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles à observer s'améliore partiellement avec l'âge, comme c'était le cas face à des représentations à manipuler. En effet, une amélioration des capacités de perception est constatée pour certains objets 3D, notamment suite à une diminution des choix 3D non attendus, alors que, pour d'autres, la maîtrise ne semble pas s'améliorer avec l'âge. À nouveau, nous renvoyons le lecteur vers la discussion relative aux représentations manipulables (cf. 9.1.3) pour comprendre les raisons pouvant expliquer cette amélioration (amélioration des capacités de rotation mentale...). Pour la majorité des objets, l'observation relative à la présence ou l'absence d'une évolution de la maîtrise est commune dans les deux modalités. Prenons l'exemple du prisme, pour lequel une amélioration est constatée dans les deux modalités, ou du cube et du cylindre, où ce n'est pas le cas. Des différences s'observent parfois cependant entre les deux modalités. C'est par exemple le cas pour la sphère aussi bien dans la première que dans la seconde étude. Cette différence peut notamment être expliquée par les plus

fortes difficultés de perception constatées face aux représentations virtuelles à observer, précédemment évoquées.

9.2.3.4. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer en vidéo : une habileté susceptible d'être influencée par les mêmes variables secondaires

En plus des nombreuses proximités jusqu'ici mises en évidence entre les résultats des deux modalités, la prise en compte des variables secondaires permet elle aussi de relever de nombreuses similitudes entre ces dernières aussi bien dans la première que dans la seconde étude. C'est le cas concernant l'absence d'effet de genre, l'absence majoritaire d'effet des habitudes et de l'expérience antérieure en géométrie 3D, l'influence partielle de certains processus cognitifs de base. Concernant la variable relative au risque de TDC, il apparaît que, même quand les objets 3D ne sont pas manipulés, la présence de risque de TDC peut impacter la perception de certains objets 3D tels que le prisme, même si dans la seconde étude, les résultats n'apparaissent pas significatifs. Cela suggère que l'influence de cette variable observée face aux représentations virtuelles manipulables n'est pas uniquement liée au fait que cette modalité implique la mise en place de manipulation par l'individu. Cela soutient donc d'autant plus le lien entre les compétences motrices et mises en œuvre d'habiletés spatiales (Steggemann *et al.*, 2011) puisqu'une même influence est observée même quand des mouvements physiques ne doivent pas être réalisés par l'individu. Le lien qui unit rotation mentale et perception est aussi constaté, du moins pour certains objets, ce qui confirme bien que les compétences spatiales développées s'avèrent nécessaires pour comprendre les informations dynamiques (Chikha *et al.*, 2021), que l'individu ait ou non le contrôle sur ces informations dynamiques. Étonnamment en revanche, l'incapacité à distinguer les différentes teintes présentes sur la représentation du prisme n'influence pas significativement la perception de la représentation virtuelle à observer en vidéo alors que c'est le cas quand elle est manipulable. Cependant, dans les deux modalités, l'objet est plus adéquatement perçu chez les individus qui savent distinguer les teintes mais que l'absence de distinction de ces teintes n'entraîne pas systématiquement une perception inadéquate de l'objet 3D.

9.3. Réponse à la question de recherche 1.3° : impact de l'orientation du support sur la perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles

Contrairement aux deux questions de recherche précédentes, rappelons que les éléments de réponse à cette question de recherche sont uniquement issus de la première étude, grâce à la comparaison du deuxième et du troisième groupe, tous deux confrontés à des représentations virtuelles à observer mais sur des supports placés dans des orientations différentes : à l'horizontale et à la verticale.

9.3.1. Résultats relatifs à la première étude expérimentale (groupe 2 vs groupe 3)

9.3.1.1. Impact de l'orientation sur la perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles (toutes tranches d'âge confondues)

a. Analyses générales

Dans le Tableau 48¹⁵, les taux de perception adéquate obtenus, pour chacun des objets 3D, dans les deux modalités comparées sont présentés. On y observe que le taux relatif à chaque objet observé dans le groupe confronté à un support placé à la verticale est supérieur à celui observé dans le groupe confronté à un support placé à l'horizontale, sauf pour le cône où des résultats quasiment similaires sont obtenus. Toutefois, l'ampleur des différences apparaît variable selon les objets 3D. Elles sont par exemple minimales pour l'anneau droit, où elles ne dépassent pas 3% et sont en revanche plus importantes pour le cylindre et la sphère, bien qu'elles ne dépassent pas 20%.

Tableau 48 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G2 : obs. 2½D horizontal (N = 157)	58,6%	61,1%	67,5%	52,9%	63,1%	66,2%	68,2%
G3 : obs. 2½D vertical (N = 166)	76,5%	61,4%	84,3%	57,2%	74,1%	73,5%	71,1%

¹⁵ Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

La comparaison des taux relatifs à chacun des objets, au sein de chaque groupe, permet de mettre en évidence que l'écart entre les objets plus et moins adéquatement perçus est plus important face à un support vertical. Face à cette orientation, le taux varie entre 57,2% et 84,3% alors qu'il varie entre 52,9% et 68,2% face à un support horizontal. Néanmoins, chacun des objets est perçu, dans les deux groupes, par plus de la moitié des participants mais qu'aucun objet n'est systématiquement adéquatement perçu. Les enfants et les adolescents peuvent donc rencontrer des difficultés dans la perception de chacun d'eux. Les résultats au *test Q de Cochran* appliqués dans chacun des groupes permettent de vérifier si ces difficultés sont d'une ampleur semblable ou non. Puisqu'un résultat significatif est observé à la fois face à des supports verticaux ($Q = 49,172$; $p\text{-value} < 0,001$) et horizontaux ($Q = 16,463$; $p\text{-value} = 0,011$), il est possible de considérer que les performances de perception varient entre les objets 3D dans les deux modalités.

Dans les deux groupes, il semble donc que les capacités de perception varient entre les objets à percevoir. Par ailleurs, le prisme est l'objet 3D qui obtient le taux de perception adéquate le plus faible. De même, la sphère est l'un des objets 3D obtenant le taux le plus élevé. Les analyses inférentielles menées entre les objets 3D deux à deux, pour vérifier l'équivalence ou non des exercices (*tests de McNemar*), dont les résultats sont placés en annexe (Annexe 20), permettent cependant de pointer des divergences entre les deux groupes. Les différences significatives entre les objets 3D apparaissent plus nombreuses dans le groupe 3. En effet, dans le groupe 2, les seules différences significatives concernent le prisme qui se distingue significativement de la plupart des autres objets 3D, ce qui signifie que les autres objets 3D obtiennent des taux pouvant être considérés comme équivalents. Dans le groupe 3, si le prisme se distingue lui aussi de la plupart des autres objets 3D, c'est le cas également du cône qui se distingue significativement de la plupart des autres objets 3D avec un taux également faible. Inversement, la sphère se distingue significativement de la quasi-totalité des autres objets avec un taux de perception adéquate plus élevé, ce qui n'est pas le cas dans l'autre groupe.

L'analyse de la répartition des participants selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus dans chacun des groupes (Figure 17) fournit des informations complémentaires sur les similitudes et divergences entre les deux modalités de présentation. On y voit que, dans les deux modalités, légèrement moins de 20% des

participants perçoivent adéquatement l'ensemble des objets 3D. Cela permet de souligner que la perception des représentations virtuelles d'objets 3D n'est pas systématique chez la plupart puisqu'elle pose des difficultés pour au moins un des sept objets 3D, à 80% d'entre eux. Face au support vertical, les participants sont par exemple près de 30% à percevoir six des sept objets, contre 20% environ face au support horizontal. En contrepartie, la part de participants ne percevant adéquatement aucun objet 3D atteint 7% face au support horizontal alors qu'elle est presque nulle dans l'autre cas. Pour autant, elle reste minoritaire dans les deux groupes. La perception de représentations virtuelles, que ce soit sur support vertical ou horizontal, apparaît donc majoritairement partiellement maîtrisée dans la mesure où elle est rarement non acquise et où elle est aussi rarement parfaitement acquise. Bien que l'habileté soit partiellement maîtrisée, la plupart des individus perçoivent adéquatement un grand nombre d'objets 3D, quelle que soit l'orientation du support.

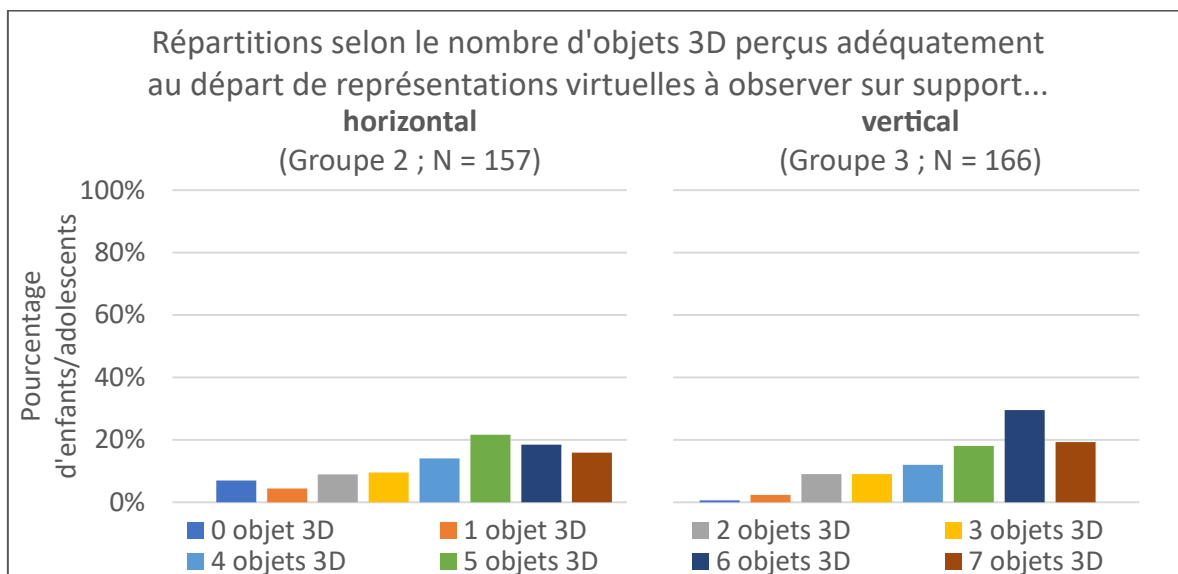


Figure 17 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal ou vertical (1^{ère} étude)

Des irrégularités entre les enfants et les adolescents ont pu être observées dans le deuxième groupe (cf. 9.2.1.1), mettant en évidence que ce n'est pas systématiquement le même objet qui pose des difficultés aux enfants obtenant des scores plus élevés, ou inversement quand un seul objet est perçu adéquatement, celui-ci peut varier selon les individus. Un même constat peut être dressé face aux supports verticaux, comme le montre l'annexe 21. Par exemple, quand un seul objet n'est pas adéquatement perçu,

il s'agit le plus souvent du prisme (26,5%) et du cône (22,4%), même s'il peut aussi s'agir de chacun des autres objets 3D.

Quand les objets ne sont pas adéquatement perçus, les cas de perception inadéquate, c'est-à-dire de sélection de propositions 3D non attendues, sont plus nombreux, pour la quasi-totalité des objets, que les cas de non-perception de la 3^{ème} dimension. C'est le cas pour tous les objets sauf la sphère face à un support vertical. Face à un support horizontal, ce n'est le cas ni de la sphère ni du cube, même si, pour ce dernier, des fréquences proches sont observées entre la perception inadéquate et la non-perception.

La Figure 18 présente les taux de perception inadéquate (avec et sans la sélection du choix 3D attendu) obtenus pour chacun des objets. Au regard uniquement du taux de participants ayant choisi la proposition 3D attendue en plus d'une ou plusieurs propositions 3D non attendues, la sphère et le cube sont les objets 3D pour lesquels ce cas de figure est le moins fréquent dans les deux modalités. Entre les autres objets 3D, il y a finalement peu de différences, même si ce cas de figure est plus fréquent pour le prisme face à un support horizontal et pour le cône et l'anneau droit face à un support vertical. Les taux observés pour chaque objet sont assez proches dans les deux groupes, tantôt légèrement plus élevés dans l'un ou dans l'autre groupe.

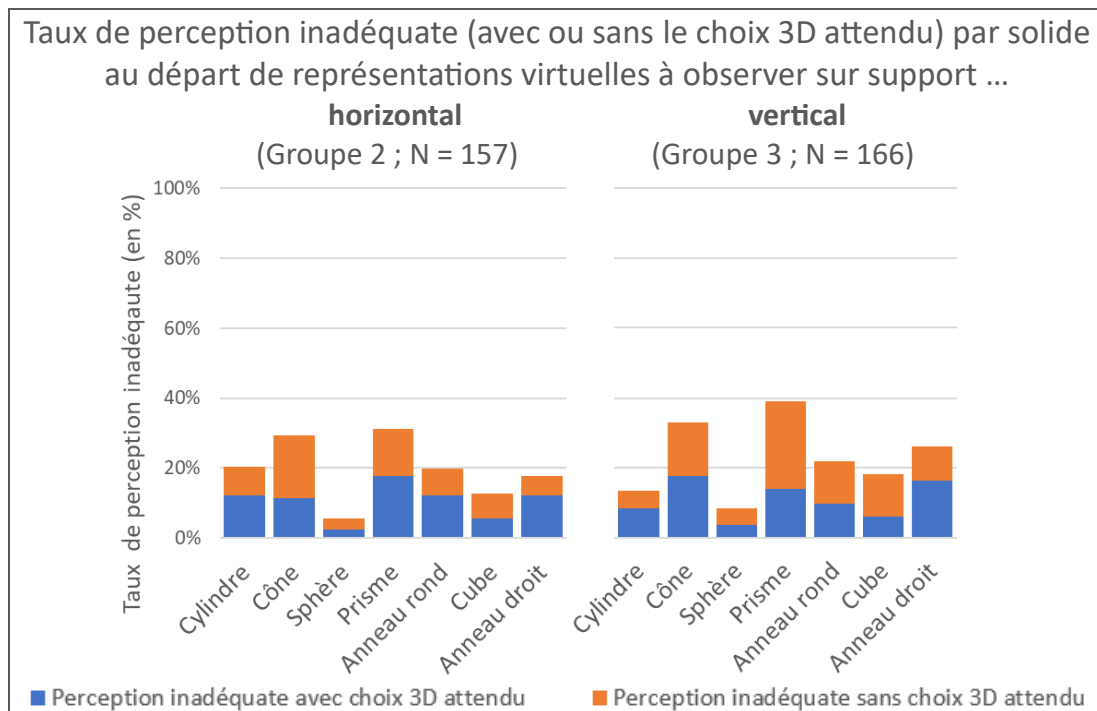


Figure 18 : Taux de perception inadéquate au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical pour chacun des objets 3D: pourcentage (1^{ère} étude)

Concernant le second cas de figure, lorsqu'au moins un objet 3D non attendu est choisi sans l'objet 3D attendu, des résultats un peu différents sont observés. Si la sphère reste l'objet pour lequel ce taux est le plus faible dans les deux groupes, la fréquence de ce cas est plus grande dans le groupe 3 pour chacun des objets 3D excepté le cône et le cylindre.

Au cumul des deux cas de figure, des taux finalement assez proches sont constatés entre les deux groupes. Les analyses inférentielles ultérieures permettront de se positionner quant à cette proximité. Le prisme est, dans les deux groupes, l'objet 3D pour lequel la perception est le plus souvent inadéquate, particulièrement dans le groupe 3 où le taux atteint presque 40% alors qu'il avoisine 30% dans le groupe 2. Vient ensuite le cas du cône, dont le taux avoisine 30% dans les deux groupes. Le cylindre, le cube et les anneaux oscillent eux autour de 20%. Finalement, la sphère obtient le taux le plus faible dans les deux groupes.

Le détail concernant les pourcentages de sélection des différents choix 3D est proposé en annexe (Annexe 23). Face à un support vertical, comme face à un support horizontal, le choix de proposition 3D non attendue le plus fréquent est le même pour tous les objets 3D excepté le cube : la sélection de la proposition 3D dont la hauteur est modifiée. Pour le cylindre, le cône, la sphère et les anneaux, cette proposition domine alors que les autres sont minoritaires. Pour le prisme, elle est également la proposition la plus fréquemment observée et cette fréquence est majoritairement plus importante dans le groupe confronté à des supports verticaux. De plus, environ un enfant sur dix choisit également l'objet 3D incliné. Concernant le cas du cube, la fréquence des différentes propositions reste faible dans les deux groupes.

Enfin, le Tableau 49¹⁶ présente les différents taux de non-perception (avec prise en compte de verbatims) obtenus dans les deux groupes pour chacun des objets 3D. Les résultats indiquent que ces cas de figure, pouvant être rapportés à des comportements bidimensionnels, sont systématiquement moins fréquents dans le groupe confronté à un support vertical. Les différences sont cependant parfois réduites entre les deux modalités, comme c'est le cas pour le cône. En revanche, elles sont parfois plus importantes pour d'autres. C'est le cas notamment pour la sphère où le taux vaut 7,2% dans le groupe 3 alors qu'il atteint 25,5% dans le groupe 2. De manière globale, les cas

¹⁶ Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

de non-perception sont assez rares dans cette modalité pour tous les objets 3D puisqu'ils n'excèdent jamais 9,6% (pour le cylindre) et atteint même une valeur de 1,2% pour le prisme.

Par ailleurs, l'analyse de la répartition de cas de non-perception permet de mettre en évidence qu'aucun participant ne se situe dans le cas de la non-perception pour l'ensemble des objets 3D, que le support soit à la verticale ou à l'horizontale. Tous les participants semblent donc conscients que des objets 3D peuvent être représentés par des représentations virtuelles à observer, quelle que soit l'orientation du support.

Tableau 49 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G2 : obs. 2½D horizontal (N = 157)	14,0%	3,8%	25,5%	11,5%	11,5%	14,0%	10,8%
G3 : obs. 2½D vertical (N = 166)	9,6%	3,0%	7,2%	1,2%	3,0%	4,8%	1,2%

b. Analyses inférentielles comparatives

Comme pour les analyses inférentielles comparatives menées entre les autres groupes, des tests du *Khi-carré* sont appliqués. Ceux-ci permettent de vérifier si les taux de perception de chaque objet 3D sont indépendants ou non de l'orientation du support. Les résultats de ces tests, présentés en Tableau 50, confirment la présence d'un effet de l'orientation pour certains objets 3D mais pas pour tous. La situation est donc variable entre les objets 3D. Des résultats significatifs apparaissent pour trois des sept objets 3D au niveau du taux de perception adéquate : la sphère ($\chi^2 = 12,575$; $p\text{-value} < 0,001$), le cylindre ($\chi^2 = 11,852$; $p\text{-value} = 0,001$) et l'anneau rond ($\chi^2 = 4,575$; $p\text{-value} = 0,032$). Pour ces trois objets, les taux apparaissent plus élevés dans le groupe 3. L'utilisation d'un support à la verticale semble donc favoriser la perception pour ces objets 3D. Pour les autres, les résultats non significatifs permettent de statuer sur une indépendance de la perception adéquate à l'orientation du support.

Les analyses comparatives menées sur les taux de perception inadéquate et de non-perception soulignent que les différences entre les deux groupes se situent davantage au niveau des comportements bidimensionnels que par ceux de perception adéquate. Aucun résultat significatif n'est observé au niveau des taux de perception inadéquate,

Réponse à la question 1.3° (Étude 1)

même si ceux-ci sont proches du seuil de significativité pour le cylindre ($\chi^2 = 2,945$; p -value = 0,086) et l'anneau droit ($\chi^2 = 3,063$; p -value = 0,080).

Les différences sont davantage expliquées par un nombre plus élevé de cas de non-perception face au support placé à l'horizontale, comme en témoignent les résultats aux tests du Khi-carré. Des résultats significatifs par rapport à ce taux sont observés pour tous les objets sauf le cylindre et le cône. Ces cas de figure sont donc dépendants de l'orientation du support pour une grande partie des objets 3D.

Tableau 50 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G2 et G3 : Khi-carré (χ^2) et p -value (p) associée (1^{ère} étude)

	Taux de perception adéquate	Taux de perception inadéquate	Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims)
Cylindre	$\chi^2 = 11,852$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 2,945$ $p = 0,086$	$\chi^2 = 1,487$ $p = 0,223$
Cône	$\chi^2 = 0,003$ $p = 0,956$	$\chi^2 = 0,552$ $p = 0,458$	$\chi^2 = 0,161$ $p = 0,688$
Sphère	$\chi^2 = 12,575$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 0,890$ $p = 0,345$	$\chi^2 = 19,893$ $p < 0,001^{**}$
Prisme	$\chi^2 = 0,621$ $p = 0,431$	$\chi^2 = 2,231$ $p = 0,135$	$\chi^2 = 14,623$ $p < 0,001^{**}$
Anneau rond	$\chi^2 = 4,575$ $p = 0,032^*$	$\chi^2 = 0,185$ $p = 0,667$	$\chi^2 = 8,717$ $p = 0,003^{**}$
Cube	$\chi^2 = 2,019$ $p = 0,155$	$\chi^2 = 1,754$ $p = 0,185$	$\chi^2 = 8,094$ $p = 0,004^{**}$
Anneau droit	$\chi^2 = 0,328$ $p = 0,567$	$\chi^2 = 3,063$ $p = 0,080$	$\chi^2 = 13,497$ $p < 0,001^{**}$

Compte tenu des différences observées entre objets 3D, il est donc possible de considérer que la perception de certains objets 3D ne semble pas dépendante de l'orientation du support (ex. cône) mais que, pour d'autres, une dépendance est observée et s'inscrit en faveur des enfants et des adolescents confrontés à des représentations virtuelles présentées sur un support vertical.

9.3.1.2. Impact de l'orientation sur la perception de chaque objet 3D au départ d'une représentation virtuelle selon l'âge

a. Analyses générales

La Figure 19 présente le taux de perception adéquate relatif à chacun des objets 3D pour chacune des tranches d'âge dans les deux groupes comparés. De manière générale, cette figure permet de relever que, dans les deux groupes, des évolutions

parfois fortement différentes sont observées entre les objets 3D, certains ayant tendance à augmenter, comme l'anneau rond dans le groupe 2 ou comme le cône dans le groupe 3, là où d'autres semblent prendre des trajectoires différentes. Dans les deux modalités, les taux ne semblent pas forcément augmenter entre les tranches d'âge consécutives pour de nombreux objets. La Figure 19, accompagnée des coefficients de corrélation (*r point bi-sérial*) calculés avec l'âge en jour des participants (Tableau 51), permet de souligner des tendances communes, mais également des divergences, dans l'évolution des taux de perception entre les tranches d'âge observés dans les deux groupes.

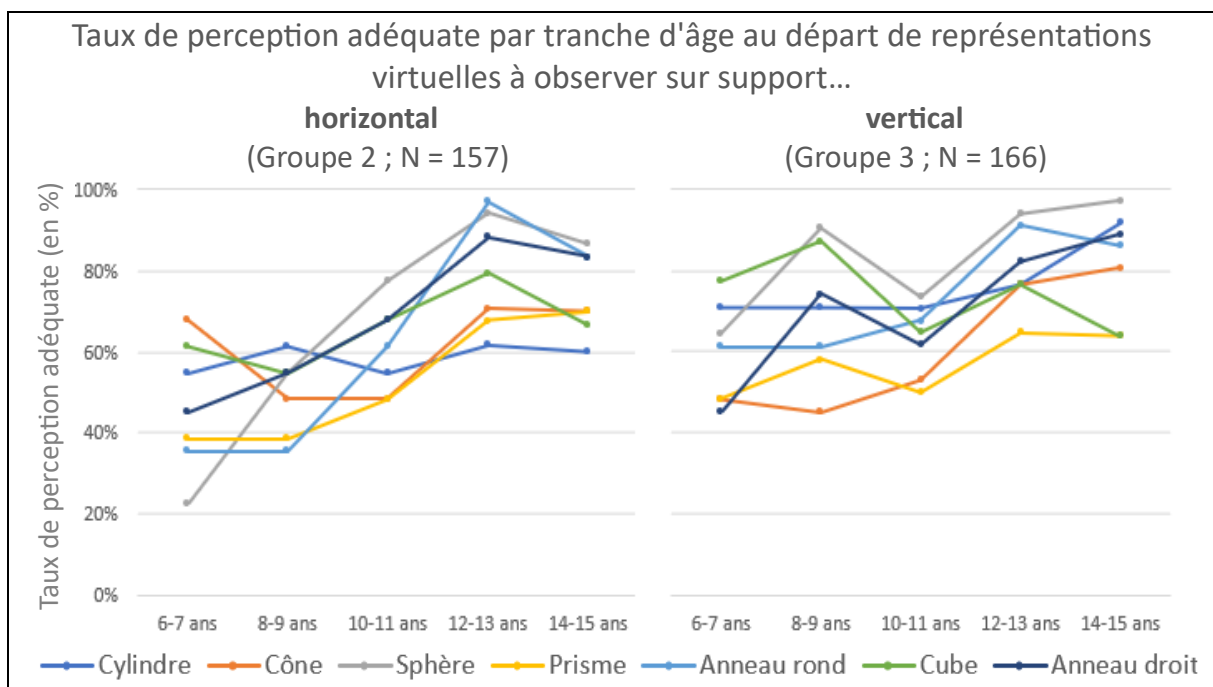


Figure 19 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical pour chacun des objets 3D (1ère étude)

Parmi les tendances communes, il est possible de citer le cas de l'anneau droit, pour qui une corrélation positive modérée du taux avec l'âge est observée dans le groupe 2 ($r_{pb} = 0,361$) comme dans le groupe 3 ($r_{pb} = 0,303$). Dans les deux groupes, les taux relatifs à la première tranche d'âge sont par ailleurs proches (environ 45%), tout comme ceux relatifs à la dernière tranche d'âge (environ 85%). Notons que les deux groupes sont marqués par une diminution des cas de perception inadéquate (respectivement $r_{pb} = -0,293$ et $r_{pb} = -0,264$) pour cet objet et notamment une diminution de sélection de la proposition dont la hauteur est modifiée (respectivement $r_{pb} = -0,263$ et $r_{pb} = -0,287$) ou dont les bords sont modifiés (respectivement $r_{pb} = -0,249$ et $r_{pb} = -0,232$).

Une autre similitude concerne le cas de la sphère. Pour cet objet 3D, une corrélation positive est observée entre perception adéquate et âge, même si cette dernière est plus marquée dans le groupe 2 ($r_{pb} = 0,515$), où elle peut être considérée comme forte, que dans le groupe 3 où elle apparaît modérée ($r_{pb} = 0,300$). Pour cet objet, le taux observé à la première tranche d'âge est plus élevé face à un support vertical (environ 60%) plutôt qu'horizontal (environ 20%). Par ailleurs, au total, l'augmentation semble plutôt être expliquée par une diminution des cas de non-perception dans le groupe 2 ($r_{pb} = -0,424$) et par une diminution des choix 3D non attendus dans le groupe 3 ($r_{pb} = -0,295$), en particulier du choix de l'objet dont la hauteur est modifiée ($r_{pb} = -0,300$)

Comme pour la sphère, une corrélation positive est observée entre l'âge et la perception de l'anneau rond, avec un indice de corrélation plus fort face au support horizontal ($r_{pb} = 0,462$) en comparaison au support vertical ($r_{pb} = 0,271$). De plus fortes différences apparaissent entre les deux groupes à la première tranche d'âge (35% contre 60%) alors que les taux sont plus élevés et proches à la dernière tranche d'âge (environ 85% dans les deux groupes). Si, face à un support vertical, une diminution des cas de perception inadéquate est observée avec l'âge ($r_{pb} = -0,276$), c'est le cas également dans le groupe confronté à un support horizontal ($r_{pb} = -0,298$). Dans les deux groupes, le taux de sélection de l'objet dont la hauteur est modifiée diminue avec l'âge (respectivement $r_{pb} = -0,257$ et $r_{pb} = -0,285$), tout comme celui de l'objet dont les bords sont modifiés (respectivement $r_{pb} = -0,278$ et $r_{pb} = -0,270$). Notons qu'une diminution des cas de non-perception avec l'âge est aussi relevée face à un support horizontal ($r_{pb} = -0,248$) ce qui n'est pas le cas face à un support vertical ($r_{pb} = -0,006$).

Pour le cylindre et le cube, des constats communs sont également réalisés entre les deux groupes par rapport à l'évolution du taux avec l'âge, dans la mesure où des corrélations négligeables sont observées dans les deux groupes. Notons cependant que les courbes d'évolution ne sont pas les mêmes dans les deux modalités.

Enfin, pour les deux derniers objets 3D, les situations des deux groupes sont divergentes. Pour le cône, une corrélation positive mais faible ($r_{pb} = 0,290$) est constatée face à un support vertical alors que la corrélation est négligeable dans l'autre groupe ($r_{pb} = 0,072$). Cette évolution constatée dans le groupe 3 est marquée par une diminution des cas de perception inadéquate ($r_{pb} = -0,235$) et particulièrement du choix 3D dont la hauteur est modifiée ($r_{pb} = -0,203$), ce qui n'est pas le cas dans le groupe 2. Finalement, la situation inverse apparaît pour le prisme, pour qui la corrélation est positive mais faible dans le groupe 2 ($r_{pb} = 0,278$) alors qu'elle est négligeable dans

l'autre groupe. Malgré cette absence de corrélation face à un support vertical, les analyses permettent de relever une diminution de la proposition relative à l'objet incliné ($r_{pb} = -0,382$), comme cela a aussi pu être observé dans le groupe confronté à un support horizontal ($r_{pb} = 0,345$), mais aussi de la proposition relative à l'objet dont la base supérieure est inclinée ($r_{pb} = -0,200$).

Tableau 51 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r_{pb} point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p) (1^{ère} étude)

		Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Perception adéquate	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	$r_{pb} = 0,025$ $p = 0,757$	$r_{pb} = 0,072$ $p = 0,373$	$r_{pb} = 0,515$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,278$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,462$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,105$ $p = 0,192$	$r_{pb} = 0,361$ $p < 0,001^{**}$
	G3 : obs. 2½D V. (N = 166)	$r_{pb} = 0,159$ $p = 0,041^*$	$r_{pb} = 0,290$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,300$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,109$ $p = 0,161$	$r_{pb} = 0,271$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,086$ $p = 0,268$	$r_{pb} = 0,303$ $p < 0,001^{**}$
Perception inadéquate	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	$r_{pb} = 0,019$ $p = 0,815$	$r_{pb} = -0,094$ $p = 0,244$	$r_{pb} = -0,195$ $p = 0,015^*$	$r_{pb} = -0,216$ $p = 0,007^{**}$	$r_{pb} = -0,298$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,093$ $p = 0,246$	$r_{pb} = -0,293$ $p < 0,001^{**}$
	G3 : obs. 2½D V. (N = 166)	$r_{pb} = -0,134$ $p = 0,085$	$r_{pb} = -0,235$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = -0,295$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,145$ $p = 0,062$	$r_{pb} = -0,276$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,043$ $p = 0,583$	$r_{pb} = -0,264$ $p < 0,001^{**}$
Non-perception	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	$r_{pb} = -0,103$ $p = 0,198$	$r_{pb} = 0,095$ $p = 0,235$	$r_{pb} = -0,424$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,135$ $p = 0,092$	$r_{pb} = -0,248$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = -0,060$ $p = 0,453$	$r_{pb} = -0,202$ $p = 0,011^*$
	G3 : obs. 2½D V. (N = 166)	$r_{pb} = -0,054$ $p = 0,489$	$r_{pb} = -0,084$ $p = 0,280$	$r_{pb} = -0,104$ $p = 0,181$	$r_{pb} = 0,001$ $p = 0,993$	$r_{pb} = -0,006$ $p = 0,942$	$r_{pb} = -0,038$ $p = 0,624$	$r_{pb} = -0,105$ $p = 0,179$

Toutes tranches d'âge confondues, les résultats ont permis de précédemment mettre en évidence des difficultés de perception adéquate plus importantes pour le prisme face aux supports horizontaux et verticaux. La Figure 19 permet néanmoins de souligner qu'à chaque tranche d'âge, le prisme n'est pour autant pas systématiquement l'objet 3D qui pose le plus de difficultés même s'il fait partie des objets obtenant le taux le plus faible aux différentes tranches d'âge. De même, dans les deux groupes, l'objet qui obtient le taux de perception adéquate le plus élevé varie entre les tranches d'âge. De ce fait, il s'agit d'être précautionneux dans les constats précédemment réalisés sur l'échantillon complet. Par ailleurs, les tests Q de Cochran réalisés pour vérifier l'existence de différences entre objets 3D à chaque tranche d'âge (Tableau 52) permettent de relever une divergence entre les deux modalités de présentation ici comparées. Des différences significatives sont observées à toutes les tranches d'âge excepté à celle constituée des enfants âgés de 10 à 11 ans ($Q = 8,174$; p -value = 0,226) face à un support vertical, ce qui laisse entendre que la maîtrise de la perception varie entre les objets 3D dans la majorité des tranches d'âge. Toutefois, précisons que les

différences entre objets 3D ne sont pas toujours les mêmes d'une tranche d'âge à l'autre. Par exemple, à la première tranche d'âge, l'objet 3D dont la perception adéquate est la plus maîtrisée est le cube alors qu'il devient un des objets 3D pour lequel la perception adéquate est la moins maîtrisée à la dernière tranche d'âge. Face à un support horizontal, rappelons que les différences entre objets 3D ne s'observent qu'à deux tranches d'âge, à savoir 6-7 ans et 12-13 ans, même si ces différences entre objets 3D varient aussi entre les tranches, comme l'illustre l'exemple de l'anneau rond. Cela illustre donc des divergences supplémentaires entre les deux modalités.

Tableau 52 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et vertical par tranche d'âge: Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (1^{ère} étude)

	6-7 ans	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
G2 : obs. 2½D horizontal (N = 157)	Q = 25,361 p < 0,001**	Q = 8,227 p = 0,222	Q = 10,632 p = 0,100	Q = 30,876 p < 0,001**	Q = 12,383 p = 0,054
G3 : obs. 2½D vertical (N = 166)	Q = 13,956 p = 0,030*	Q = 27,579 p < 0,001**	Q = 8,174 p = 0,226	Q = 14,294 p = 0,027*	Q = 27,143 p < 0,001**

b. Analyses inférentielles comparatives

Les analyses inférentielles comparatives antérieures ont permis de montrer que l'influence de l'orientation du support ne concerne pas l'ensemble des objets 3D lorsque les analyses sont menées sur le public cible entier, toutes tranches d'âge confondues. Le *test du Khi-carré* (ou alternative) est à nouveau appliqué pour comparer les taux de perception adéquate des deux groupes pour chaque objet 3D mais cette fois à chaque tranche d'âge. Les résultats permettent d'observer que finalement, seuls quelques résultats significatifs apparaissent. Comme l'illustre le Tableau 53, les résultats significatifs recensés sont les suivants : pour le cylindre à la dernière tranche d'âge ($\chi^2 = 9,334$; *p-value* = 0,002), pour la sphère à la première ($\chi^2 = 11,088$; *p-value* = 0,001) et à la deuxième tranche d'âge ($\chi^2 = 9,807$; *p-value* = 0,002), pour l'anneau rond également à la première tranche d'âge ($\chi^2 = 4,133$; *p-value* = 0,042) et à la deuxième tranche d'âge ($\chi^2 = 12,236$; *p-value* = 0,042) et enfin pour le cube à la deuxième tranche d'âge ($\chi^2 = 7,828$; *p-value* = 0,005). Pour tous ces cas, les capacités de perception peuvent donc être considérées comme dépendantes de la modalité de représentation et les résultats s'inscrivent systématiquement en faveur de la modalité « verticale ». Pour tous les autres cas, qui sont donc majoritaires, des résultats non significatifs sont constatés entre les deux groupes, ce qui indique que les capacités de

perception adéquate sont indépendantes de la modalité de représentation. Dans la majorité des cas, l'orientation du support ne semble donc pas influencer la perception de chaque objet 3D aux différentes tranches d'âge. Pour autant à certaines tranches d'âge, principalement dans les premières tranches, une dépendance à l'orientation du support est observée pour certains objets par exemple pour la perception de la sphère et l'anneau rond. Lorsque cela se produit, les résultats sont en faveur des enfants et des adolescents confrontés à un support vertical.

Tableau 53 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G2 et G3 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) (1^{ère} étude)

	À 6-7 ans	À 8-9 ans	À 10-11 ans	À 12-13 ans	À 14-15 ans
Cylindre	$\chi^2 = 1,728$ $p = 0,189$	$\chi^2 = 0,648$ $p = 0,421$	$\chi^2 = 1,727$ $p = 0,189$	$\chi^2 = 1,722$ $p = 0,189$	$\chi^2 = 9,344$ $p = 0,002^{**}$
Cône	$\chi^2 = 2,385$ $p = 0,123$	$\chi^2 = 0,065$ $p = 0,799$	$\chi^2 = 0,135$ $p = 0,714$	$\chi^2 = 0,302$ $p = 0,582$	$\chi^2 = 0,993$ $p = 0,319$
Sphère	$\chi^2 = 11,088$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 9,807$ $p = 0,002^{**}$	$\chi^2 = 0,132$ $p = 0,716$	Test ex. de F. = 0,000 $p = 1,000$	Test ex. de F. = 2,604 $p = 0,169$
Prisme	$\chi^2 = 0,590$ $p = 0,442$	$\chi^2 = 2,325$ $p = 0,127$	$\chi^2 = 0,017$ $p = 0,897$	$\chi^2 = 0,066$ $p = 0,798$	$\chi^2 = 0,275$ $p = 0,600$
Anneau rond	$\chi^2 = 4,133$ $p = 0,042^*$	$\chi^2 = 4,133$ $p = 0,042^*$	$\chi^2 = 0,287$ $p = 0,592$	Test ex. de F. = 1,063 $p = 0,614$	Test ex. de F. = 0,098 $p = 1,000$
Cube	$\chi^2 = 1,897$ $p = 0,168$	$\chi^2 = 7,828$ $p = 0,005^{**}$	$\chi^2 = 0,067$ $p = 0,796$	$\chi^2 = 0,086$ $p = 0,770$	$\chi^2 = 0,056$ $p = 0,814$
Anneau droit	$\chi^2 = 0,000$ $p = 1,000$	$\chi^2 = 2,536$ $p = 0,111$	$\chi^2 = 0,253$ $p = 0,615$	$\chi^2 = 0,469$ $p = 0,493$	Test ex. de F. = 0,429 $p = 0,721$

9.3.2. Discussion spécifique à la question 1.3°

Toujours dans une perspective comparative, l'étude a également investigué l'impact de l'orientation dans laquelle la tablette se trouve, en comparant les résultats obtenus lorsque la tablette est placée à l'horizontale et lorsqu'elle est placée verticalement.

Si dans le cadre de la perception et de la reconnaissance d'objets 3D, l'influence de la position dans laquelle les objets sont présentés a pu faire l'objet d'investigations (ex. Larios, 2006 ; Pani *et al.*, 1997; Parzys, 1991 ; Sarfaty & Patkin, 2013), cela ne semble pas être le cas de l'orientation, non pas de l'objet, mais du support sur lequel il est présenté. D'ailleurs, Potvin *et al.* (2012) évoquent, sans spécifiquement aborder le cas de la perception de la 3D ni même d'autres processus perceptifs, que peu d'études se sont intéressées à l'impact de l'orientation des supports dans la réalisation de tâches. Il est donc essentiel de garder à l'esprit que les résultats de cette étude constituent quelques premiers éléments de réponse mais que le peu de recherche ayant investigué cet aspect limite la confrontation des résultats avec d'autres études.

9.3.2.1. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer : une habileté majoritairement non systématique quelle que soit l'orientation du support, malgré un effet de l'orientation pour certains objets

La capacité à percevoir les représentations virtuelles d'objets 3D présentées en vidéo sur support vertical apparaît majoritairement partiellement maîtrisée par les enfants et les adolescents. Cela signifie donc que la plupart des individus ne perçoivent pas adéquatement l'ensemble des objets présentés. Pour autant, ils arrivent tous ou presque à en percevoir certains, voire la plupart. Ces constats rejoignent donc ceux réalisés au départ de représentations virtuelles à observer sur support horizontal et même ceux mis en évidence sur des représentations virtuelles manipulables dans cette recherche et dans les études antérieures ayant investigué cette dernière modalité de représentation (ex. Krylova et Vodyakha, 2022).

Quelle que soit l'orientation du support, les différents objets 3D investigués sont majoritairement adéquatement perçus. Toutefois, aucun n'est perçu systématiquement par tous les enfants et les adolescents, ce qui illustre bien l'existence de difficultés de perception. Pour autant, la comparaison des taux obtenus pour chaque objet entre les deux modalités montre que les enfants et les adolescents sont majoritairement plus nombreux à percevoir adéquatement l'objet 3D lorsque ce dernier est proposé sur support vertical. L'orientation du support semble donc

constituer une variable impactant la perception adéquate des objets 3D ou du moins de certains d'entre eux. Parmi ces derniers, il semble possible de citer la sphère, l'anneau rond et le cylindre. Les différences concernent cependant davantage les enfants plus jeunes, du moins pour les deux premiers objets 3D cités.

En particulier, les analyses complémentaires permettent de mettre en lumière que les différences entre ces deux modalités de représentation concernent surtout la présence de comportements bidimensionnels. Même si ces comportements restent majoritairement rares dans les deux groupes, ce qui est cohérent avec l'impression de tridimensionnalité que cette modalité de représentation apporte (Bakó, 2003) grâce notamment à son caractère dynamique, ils sont plus régulièrement observés quand le support est placé à l'horizontale, en particulier pour la sphère. Néanmoins, malgré ces cas de non-perception de la 3^{ème} dimension plus fréquents face au support horizontal, il n'empêche que, même dans cette orientation, tous semblent conscients que les environnements virtuels permettent de présenter des objets 3D. Il leur arrive, au moins à une reprise, de sélectionner une proposition 3D. De ce fait, cela permet de relever que le problème ne se situe pas dans une conception erronée à l'égard des environnements virtuels.

En revanche, des résultats assez proches sont observés entre les deux modalités en ce qui concerne les cas de perception inadéquate de chaque objet. Une similitude dans les erreurs types commises est également observée, avec majoritairement la sélection de la proposition dont la hauteur a été modifiée. Cela nous permet, à nouveau, de renvoyer le lecteur vers les explications potentielles de ces erreurs, mises en évidence au point 9.1.3.1.

Si, à notre connaissance, aucune recherche n'a investigué l'influence de l'orientation du support sur les processus perceptifs de représentations virtuelles d'objets 3D, les travaux de Worsfold *et al.* (2008) se sont intéressés à l'impact de l'orientation des supports dans la réalisation d'une autre tâche spatiale, à savoir une tâche spatiale de vérification de la compréhension des coordonnées. Les auteurs ont pu relever un effet de l'orientation, en faveur du support vertical, sur la réussite de la tâche spatiale proposée chez les enfants âgés de 5 à 7 ans. Les résultats obtenus concernant l'habileté de perception visuelle des représentations virtuelles d'objets 3D ne paraissent donc pas incohérents avec les résultats de cette recherche antérieure. La présence d'une influence de l'orientation du support sur la réalisation de tâches spatiales n'est donc pas à exclure et mériterait de mener des investigations

supplémentaires, notamment au travers de recherche confirmatoires. Rappelons que l'intention était ici de mener cette recherche dans une perspective exploratoire étant donné le peu d'informations disponibles dans la littérature.

Notons par ailleurs qu'une modification de l'orientation des supports constitue un aménagement raisonnable qu'il est possible de proposer aux élèves atteints de dyspraxie, notamment en leur proposant de travailler sur un support incliné plutôt qu'à l'horizontale. Les résultats relatifs à la variable secondaire du risque de TDC semblent d'ailleurs aller dans ce sens. En effet, les capacités de perception visuelle semblent similaires chez les individus présentant ou non un risque de TDC quand le support est vertical, ce qui n'est pas systématiquement le cas au départ du support horizontal. Ce décalage observé entre les deux supports s'inscrit donc en cohérence avec les observations susmentionnées et renforce l'argument relatif à l'apport d'une modification de l'orientation du support pour certains profils. Selon Patrick (2015, cité par Stienert-Parker & Annan, 2020), la modification de l'orientation du support pour ces élèves est un facteur pouvant encourager leur concentration et diminuer la pression sur les yeux. Cela occasionne une posture différente de la tête, qui peut encourager le flux sanguin vers le cerveau. Il s'agit là d'éléments qui pourraient potentiellement venir expliquer les différences de performance dans les deux orientations. Toutefois, le fait que les observations réalisées sur l'effet de l'orientation ne concernent pas l'ensemble des objets 3D nous invite à rester prudents face à ces possibles explications.

En outre, dans la discussion relative à la deuxième question de recherche (cf. 9.2.3), nous évoquons l'idée que les difficultés de perception de la sphère au départ d'une représentation virtuelle à observer pouvaient être liées à une incompréhension des rotations appliquées dans la vidéo. Les résultats ici obtenus nous invitent à apporter de la nuance par rapport à cette supposition puisque, quand le support est proposé à la verticale, les individus semblent davantage arriver à percevoir l'objet 3D et donc à comprendre ces rotations bien que la manipulation ne soit pas autorisée. Peut-être que l'orientation du support a pu engendrer une différence au niveau de la perception des effets de couleurs présentés sur la représentation en train de tourner sur elle-même. Toutefois, puisque la présence de davantage de comportements bidimensionnels concerne la plupart des objets 3D, nous privilégions la première justification.

De plus, rappelons que les études portent sur des groupes indépendants d'enfants et d'adolescents. Même si ces derniers sont équivalents par rapport à de nombreuses variables investiguées (cf. Annexe 8), les différences observées peuvent évidemment

être expliquées par d'autres différences individuelles. Nous reviendrons sur cette limite à l'occasion de la discussion générale (cf. 9.7.2.4).

9.3.2.2. *Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer : une habileté qui varie entre les objets 3D quelle que soit l'orientation du support*

Face aux représentations virtuelles présentées sur support vertical, les résultats permettent de mettre en évidence que les capacités de perception varient entre les objets 3D. Ce constat rejoint celui réalisé quand le support est proposé à l'horizontale, ce qui vient confirmer les observations. Pour autant, les taux plus élevés observés pour certains objets 3D évoqués précédemment, à l'instar de la sphère, occasionnent la présence de différences plus marquées entre les objets 3D au départ de représentations présentées sur support vertical. De plus, une même tendance est observée quant aux plus fortes difficultés constatées pour la perception du prisme, en comparaison aux autres objets 3D. À nouveau, les possibles explications apportées à ce constat en prenant appui sur la littérature, mises en évidence pour les représentations virtuelles manipulables (cf. 9.1.3), semblent pouvoir être réutilisées pour les représentations virtuelles présentées à la verticale (expérience antérieure avec l'objet 3D...). Enfin, dans les deux modalités, une proximité est aussi observée concernant la présence d'un manque de régularité des comportements perceptifs ainsi que des différences individuelles au sujet des difficultés rencontrées. Comme face à des représentations virtuelles manipulables, ces différences individuelles sont cohérentes avec les propos de Meijer et van den Broek (2010) concernant la formation des représentations mentales d'objets 3D au départ de représentations planes.

9.3.2.3. *Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle à observer : une habileté qui n'évolue que partiellement avec l'âge quelle que soit l'orientation du support*

Globalement, il apparaît que la perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles à observer s'améliore avec l'âge pour certains objets 3D mais pas pour tous, que le support soit placé à la verticale ou à l'horizontale. Malgré cette amélioration partielle, il n'en reste pas moins que la perception des objets 3D représentés continue à poser des difficultés à certains adolescents, même âgés de 14-15 ans. Aucun objet 3D ne semble adéquatement perçu par les adolescents de cette tranche d'âge. En revanche, les raisons de l'amélioration des capacités semblent

différer dans les deux modalités. Face au support vertical, l'amélioration est due à une plus faible sélection de propositions 3D différentes de l'objet, qui peut être expliquée par plusieurs raisons évoquées précédemment (cf. 9.1.3), puisqu'une même évolution a pu être constatée face à des représentations virtuelles manipulables. Face aux représentations virtuelles présentées sur support horizontal, on observe que l'amélioration de la perception est due à une diminution de la sélection de propositions 3D différentes de l'objet initialement proposé, pour des raisons potentiellement similaires. Elle est aussi due à une diminution des cas de non-perception. Cette diminution du taux de non-perception avec l'âge pour la sphère et l'anneau rond dans le groupe confronté à des supports placés horizontalement implique une modification de l'effet de l'orientation du support avec l'âge. En effet, cette diminution des cas de non-perception permet d'observer, à partir de la troisième tranche d'âge, que les taux de perception adéquate sont équivalents entre les deux modalités, aussi bien pour la sphère que pour l'anneau rond. Les difficultés plus importantes observées face à un support horizontal ne semblent donc que s'observer chez les plus jeunes enfants interrogés. Ces résultats s'avèrent en partie cohérents avec les résultats de l'étude de Worsfold *et al.* (2008) précédemment évoquée. En effet, les auteurs ont pu observer que l'effet en faveur du support vertical observé dans la tâche proposée chez les enfants âgés de 5 à 7 ans ne s'observe pas chez les enfants plus âgés. Si les âges auxquels cet effet est ou non observé ne sont que partiellement identiques, on retrouve cette même disparition avec l'âge de l'effet de l'orientation du support à l'avantage du groupe vertical.

9.4. Réponse à la question de recherche 1.4° : perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles et planes

Une partie des résultats de chacune des deux études menées permet d'apporter des éléments de réponse à cette quatrième question de recherche. Pour ce faire, les résultats obtenus dans chacun des groupes auprès des enfants et des adolescents confrontés à des représentations planes (groupe 4 dans la première étude et groupe 5 dans la seconde étude) sont comparés à ceux confrontés à des représentations virtuelles, dont les résultats ont déjà pu être préalablement présentés.

9.4.1. Résultats relatifs à la première étude expérimentale (groupes 1 et 2 vs groupe 4)

9.4.1.1. Différence entre la perception des différents objets 3D au départ de représentations virtuelles et planes (toutes tranches d'âge confondues)

a. Analyses générales

Afin de se faire une première idée des possibles différences au niveau des comportements perceptifs observés au départ de représentations planes et virtuelles, le Tableau 54¹⁷ présente les taux de perception adéquate relatifs à chaque objet 3D pour chacun des groupes concernés. On y observe que, pour tous les objets excepté le cylindre, le taux de perception adéquate recensé au départ de représentations planes s'avère inférieur à celui obtenu au départ de représentations virtuelles. Des écarts particulièrement importants apparaissent notamment pour la sphère où un taux de 20,8% est observé face à sa représentation plane alors que celui-ci atteint une valeur supérieure à 65% face aux représentations virtuelles. Pour le cylindre, par contre, le taux obtenu au départ d'une représentation plane (66,0%) s'avère plus proche de ceux obtenus face à des représentations virtuelles. Il est même plus élevé que celui observé dans le deuxième groupe. Par ailleurs, les résultats semblent permettre de pointer de fortes difficultés de perception des objets 3D au départ de représentations 2D. Pour cinq des sept objets, moins de 50% des participants perçoivent adéquatement l'objet 3D présenté, ce qui n'est pas le cas face aux représentations virtuelles.

¹⁷ Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

Tableau 54 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G1 : manip. 2½D (N = 158)	71,5%	65,2%	83,5%	48,1%	75,3%	75,3%	67,7%
G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	58,6%	61,1%	67,5%	52,9%	63,1%	66,2%	68,2%
G4 : obs. 2D (N = 159)	66,0%	40,3%	20,8%	18,2%	38,4%	52,8%	49,1%

Malgré cette tendance à l'avantage des représentations virtuelles pour la plupart des objets 3D, le groupe confronté à des représentations 2D est marqué par une forte variabilité entre les objets 3D. Le taux de perception adéquate avoisine les 20% pour certains objets 3D (sphère et prisme) et dépasse 50% pour d'autres (cube et cylindre). De ce fait, il est possible de considérer que les capacités de perception varient entre les objets 3D face à ces supports. Le test inférentiel *Q de Cochran* appliqué sur les taux des sept objets 3D permet de confirmer cette observation puisqu'il soulève l'existence de différences significatives entre les objets 3D ($Q = 131,378$; $p\text{-value} < 0,001$). Face à des représentations planes, les capacités de perception sont donc variables entre les objets 3D. Un tel constat rejoint celui préalablement mis en évidence sur la perception de représentations virtuelles puisque des différences significatives entre objets 3D ont été relevées au même test inférentiel, aussi bien dans le groupe 1 ($Q = 68,612$; $p\text{-value} < 0,001$) que dans le groupe 2 ($Q = 16,463$; $p\text{-value} = 0,011$).

Si dans les deux modalités, le prisme est l'objet 3D qui pose le plus de difficultés, des situations différentes sont observées pour certains autres objets. En particulier, la sphère est un des objets 3D investigués posant le plus de difficultés face à des représentations 2D alors que c'est l'inverse face à des représentations 2 ½ D. En revanche, le cylindre, qui est l'un des objets les plus souvent adéquatement perçus dans le groupe 4, ne l'est pas forcément dans les groupes 1 et 2. Dès lors, malgré le fait que la variable relative aux objets 3D impacte l'habileté dans les deux modalités, le sens de cet impact varie entre les représentations virtuelles et planes. D'ailleurs, les tests inférentiels *de McNemar* appliqués dans chaque groupe entre les objets deux à deux pour statuer sur le caractère significatif ou non des différences de taux permettent de pointer des divergences entre les résultats obtenus face à des représentations planes et virtuelles. Les résultats de ces tests sont placés en annexe (Annexe 20). Dans le groupe 4, ils permettent de mettre en évidence que de nombreuses paires d'objets

3D obtiennent des taux pouvant être considérés comme significativement différents (17 sur 21). Tous les objets se distinguent donc les uns des autres excepté le cône et l'anneau rond ($K = 0,070$; $p\text{-value} = 0,791$), le cône et l'anneau droit ($K = 2,561$; $p\text{-value} = 0,0110$), la sphère et le prisme ($K = 0,188$; $p\text{-value} = 0,665$), et enfin le cube et l'anneau droit ($K = 0,417$; $p\text{-value} = 0,519$). La sphère et le prisme, qui obtiennent les taux de perception les plus faibles, se distinguent donc négativement des cinq autres objets 3D. De même, le cylindre, qui obtient le taux le plus élevé, obtient un taux significativement différent de tous les autres objets 3D. Face aux représentations virtuelles, les différences significatives entre objets 3D sont quant à elles beaucoup moins nombreuses, en particulier face à des représentations virtuelles à observer, comme présenté antérieurement (cf. 9.2.1.1). Malgré tout, face aux représentations 2D, comme face aux représentations 2 ½ D, on constate notamment les quelques points communs suivants entre les trois groupes : le prisme se distingue significativement de quelques objets 3D (anneaux et cube) et, à l'inverse, le cône et l'anneau droit mais aussi le cube et l'anneau droit ont des taux statistiquement équivalents.

La Figure 20 présente la part de participants par nombre d'objets 3D perçus adéquatement. Elle permet de mettre en évidence des divergences dans les répartitions des participants selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations planes et virtuelles. Les pourcentages d'enfants et d'adolescents ayant perçu adéquatement l'ensemble des objets 3D sont respectivement de 23,4%, 15,9% pour les représentations virtuelles alors qu'il vaut 1,3% pour les représentations planes. La perception de l'ensemble des objets 3D, qui ne concernait déjà qu'une petite partie de l'échantillon face à des représentations virtuelles, ne concerne quasiment aucun participant face à des représentations planes. Inversement, la part d'enfants et d'adolescents n'ayant perçu adéquatement aucun objet 3D apparaît faible dans les différents groupes puisqu'elle n'excède jamais 10%. Au vu de ces résultats, la perception adéquate des objets 3D face à des représentations planes de ces derniers apparaît partiellement maîtrisée pour plus de neuf enfants sur dix. Cette tendance à la maîtrise partielle s'avère commune à celle réalisée pour la perception au départ de représentations virtuelles, même si cela concerne plutôt moins de huit enfants sur 10 face à cette modalité. De plus, les participants confrontés aux représentations virtuelles perçoivent adéquatement la plupart des objets alors que ce n'est pas le cas face à des représentations 2D. À titre d'indication, plus de 50% des enfants et des adolescents interrogés perçoivent trois objets 3D maximum sur les sept

proposés au départ des représentations 2D alors qu'ils sont plus de 50% à percevoir au moins cinq des sept objets 3D face aux représentations virtuelles à manipuler ou à observer. On peut donc en conclure que la perception des objets 3D au départ de représentations 2D, comme au départ de représentations virtuelles, est non systématique pour la plupart des enfants et les adolescents. Elle peut poser des difficultés à certains d'entre eux qui n'arrivent à percevoir adéquatement qu'un nombre réduit d'objets 3D.

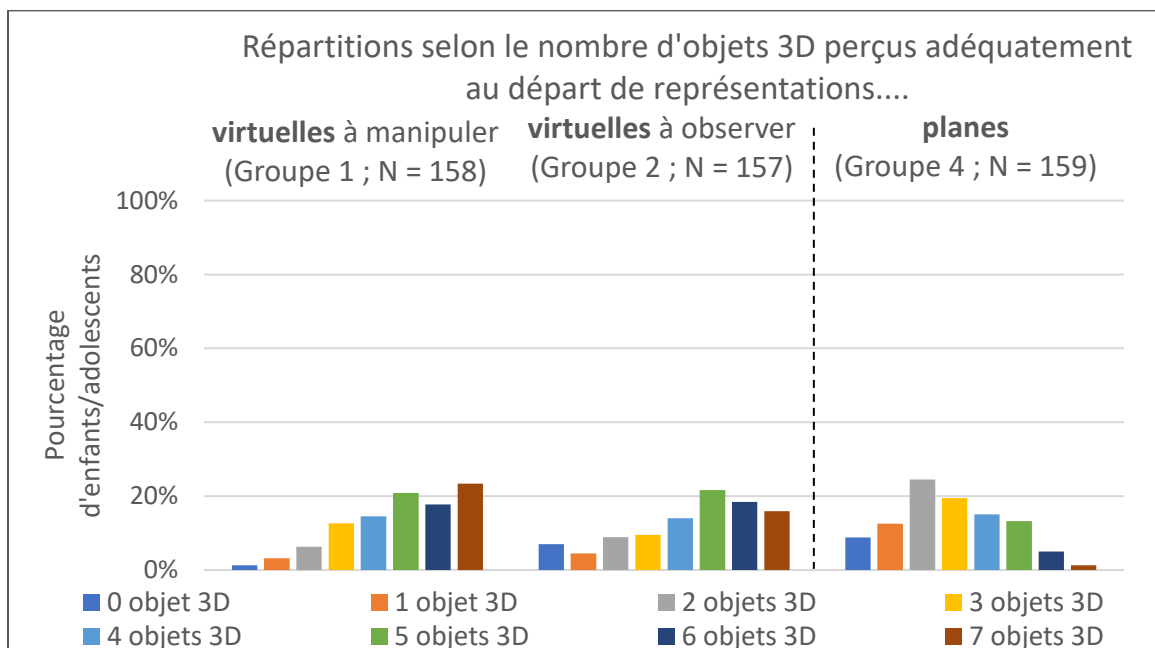


Figure 20 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles et planes (1^{ère} étude)

Comme susmentionné, les résultats permettent de relever que, face aux représentations planes, la perception de certains objets 3D s'avère plus problématique que d'autres. Toutefois, l'observation des cas de participants n'ayant perçu adéquatement qu'un objet 3D face à des représentations planes permet d'identifier que cet objet est le plus souvent le cylindre, dans 45% des cas, alors qu'il ne s'agit jamais du prisme droit à base triangulaire (Annexe 21). À l'inverse, lorsqu'un seul objet 3D pose des difficultés, ce qui arrive rarement, il s'agit majoritairement de la sphère (62,5%) même s'il arrive aussi que ce soit le prisme droit à base triangulaire (25,0%) et l'anneau rond à bord droit (22,5%). De tels résultats illustrent la présence de disparités entre les participants au niveau des difficultés rencontrées face à des représentations 2D, comme c'est aussi le cas face à des représentations virtuelles (cf. 9.2.1.1).

Face à des représentations planes, le taux de perception inadéquate varie entre 20% et 56% selon l'objet 3D, comme l'indique la Figure 21. Ces cas apparaissent plus nombreux que les cas de non-perception pour l'ensemble des objets investigués excepté le cube et la sphère, ce qui est aussi observé face à des représentations virtuelles. Pour chacun des objets 3D, les taux de perception inadéquate sont cependant plus élevés face à des représentations planes que face à des représentations virtuelles. En particulier, ce type de comportement perceptif est quasiment absent pour la sphère face à des représentations virtuelles alors qu'il est présent chez plus de 30% des participants du groupe 4. Pour autant, dans les différentes modalités de présentation, le prisme et le cône sont les objets 3D les plus souvent inadéquatement perçus. En particulier, la comparaison des deux cas de perception inadéquate (avec ou sans le choix 3D attendu) permet de mettre en évidence que cette évolution des choix 3D est due à une augmentation du premier des deux cas pour l'ensemble des objets 3D. Les participants semblent donc plus nombreux à avoir sélectionné une proposition 3D inattendue en plus de la proposition 3D attendue. Pour le deuxième cas, c'est-à-dire le cas de sélection de propositions 3D non attendues uniquement, la situation est variable entre les objets 3D. Ce cas apparaît plus fréquemment face à des représentations 2D que face à des représentations 2 ½ D pour la sphère, le prisme et l'anneau rond mais pas forcément pour les autres objets 3D.

L'analyse de la répartition du cas de perception inadéquate des objets 3D montre des répartitions différentes au départ de représentations virtuelles et planes. Les résultats indiquent que 83,0% des participants confrontés à des représentations 2D ont sélectionné une ou plusieurs propositions 3D non attendues pour au moins un des exercices. Ce comportement est observé au moins dans un des sept exercices pour environ 60% des participants confrontés à des représentations 2 ½ D. *A contrario*, seuls 3,8% des participants confrontés à des représentations planes se situent systématiquement dans ce cas de figure pour les sept exercices et ce cas se produit lui aussi très peu, voire jamais, quand les participants sont confrontés aux représentations virtuelles. Le fait de considérer que l'objet 3D présenté peut être un objet 3D différent de celui que l'on souhaitait faire percevoir constitue donc un comportement perceptif qui est omniprésent chez peu de participants, mais qui reste présent, même de manière occasionnelle, chez une grande partie d'entre eux, particulièrement face à des représentations 2D.

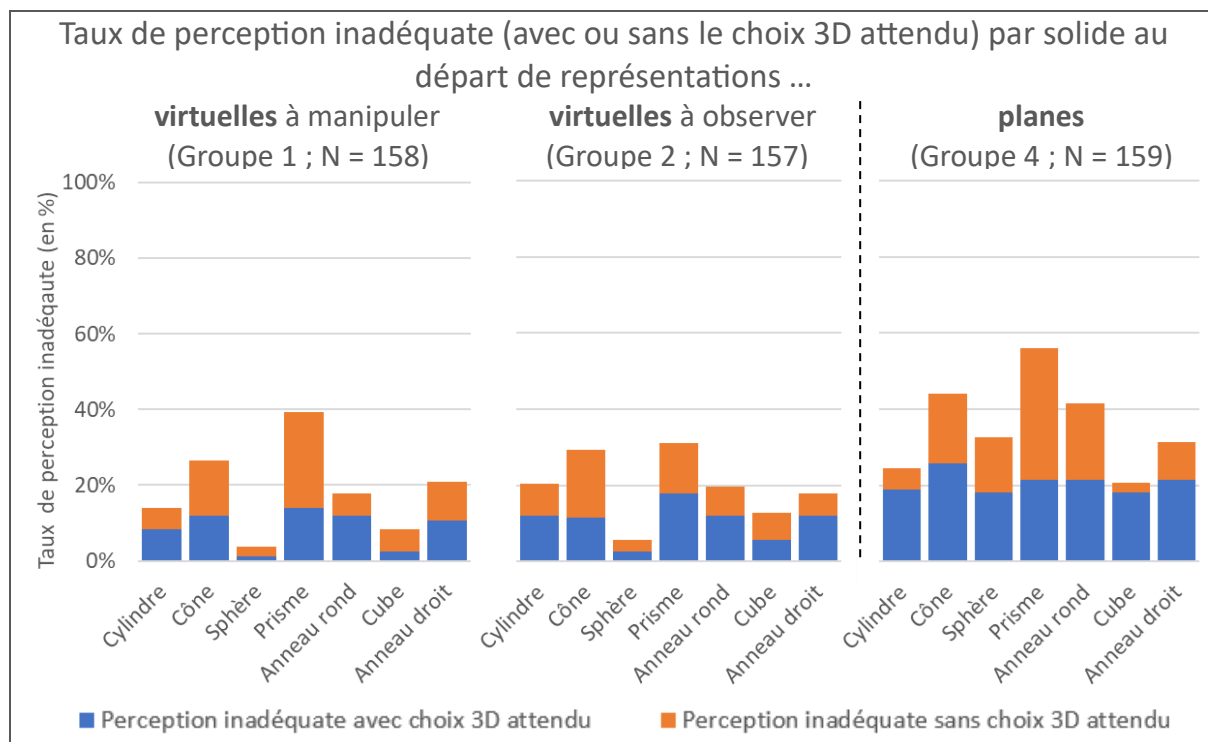


Figure 21 : Taux de perception inadéquate (avec ou sans le choix 3D attendu) au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

En particulier, l'observation des propositions 3D non attendues les plus souvent sélectionnées, dont les fréquences sont présentées en annexe (Annexe 23), montre que les propositions 3D non attendues les plus régulières sont souvent identiques dans les modalités, même si leur fréquence est, assez logiquement, majoritairement plus élevée dans le groupe 4. Celles-ci sont le plus souvent l'objet 3D dont la hauteur est modifiée. C'est le cas par exemple pour le cylindre, pour qui 17,6% des participants ont sélectionné cette proposition face à la représentation plane du solide, alors que les autres propositions sont minoritaires. Concernant le cône, les observations sont assez similaires à celles mises en évidence pour le cylindre, même si la fréquence de sélection de la proposition dont la hauteur est modifiée est nettement plus élevée (30,8%). Si, face à des représentations 2 ½ D, les autres propositions sont rarement choisies, la proposition « objet 3D dont la base a été déformée » est choisie par 16,4% des participants du groupe 4 alors qu'elle est peu observée (< 5%) face à des représentations virtuelles. Concernant la sphère, la proposition relative à l'objet 3D dont la hauteur a été modifiée est davantage choisie en comparaison à l'autre proposition. Elle est cependant nettement plus choisie dans le groupe 4 (32,7%) que dans les autres groupes (< 6%). Pour le prisme, la proposition 3D dont la hauteur a été modifiée est également la plus fréquente dans tous les groupes. Ce choix est réalisé par

environ un enfant sur quatre au sein du groupe 4. Dans les différentes modalités, d'autres propositions obtiennent également des taux plus élevés : l'objet 3D dont l'inclinaison a été modifiée et l'objet 3D dont l'orientation de la base a été déformée. Par ailleurs, la proposition « objet 3D dont les bases ont été déformées » est sélectionnée par environ un participant sur dix dans ce groupe alors qu'elle est quasiment absente face à des représentations virtuelles. Concernant l'anneau rond, le choix 3D non attendu le plus fréquent face à la représentation plane est l'objet dont la forme des bases a été modifiée (23,9%). Ce choix est cependant peu réalisé au départ de représentations virtuelles. La sélection de l'objet 3D dont la hauteur a été modifiée est également un choix qui se distingue dans le groupe confronté à une représentation plane (18,9%) et c'est le choix 3D non attendu le plus réalisé aussi face à des représentations virtuelles. Pour le cube, cette proposition est la proposition 3D non attendue la plus sélectionnée dans le groupe 4 (14,5%) mais pas forcément dans les deux autres groupes. S'en suit ensuite la proposition relative à l'objet dont la base supérieure est inclinée (7,8%) alors que les autres propositions sont moins sélectionnées. Finalement, pour l'anneau rond à bord droit, le choix 3D non attendu le plus fréquent dans tous les groupes est une fois encore celui relatif à l'objet 3D dont la hauteur a été modifiée, les autres choix 3D non attendus étant plus rares.

L'analyse de la sélection des propositions 3D non attendues confirme donc que, face à des représentations 2D, comme face à des représentations virtuelles, l'objet 3D dont la hauteur est modifiée est donc majoritairement la proposition 3D non attendue la plus couramment choisie. Systématiquement (sauf pour la sphère pour qui cette proposition n'existe pas), il apparaît aussi que l'objet 3D dont la base a été modifiée, qui, pour rappel, propose une base modifiée correspondant à la base telle qu'elle apparaît sur la représentation 2D initiale de l'objet 3D (ex. une base ovale pour le cylindre), est plus souvent sélectionnée face à des représentations 2D en comparaison aux représentations 2 ½ D. La sélection de cette proposition reste néanmoins rare pour le cube, l'anneau droit et le cylindre.

Au-delà des choix 3D non attendus témoignant d'une perception inadéquate de la 3D, il arrive également que les choix et verbatims des participants témoignent d'une potentielle absence de perception de la 3D face aux représentations virtuelles et planes des objets 3D (cf. Annexe 25). Les taux se rapportant à ces cas de figure sont présentés dans le Tableau 55. Excepté pour le cylindre, la non-perception de la troisième

dimension est observée de manière plus fréquente face à des représentations planes que face à des représentations virtuelles. C'est particulièrement le cas pour la sphère, qui se distingue fortement des autres avec un taux de non-perception d'environ de 45%. Pour les autres objets 3D, les taux varient entre 8,2% (cylindre) et 21,4% (cube). Par ailleurs, la répartition des nombres de cas de non-perception indique que le cas de non-perception est plus fréquent face à des représentations planes puisqu'il se produit au moins une fois pour 63,5% des participants, alors que ce taux vaut respectivement 34,8% et 47,8% face à des représentations virtuelles à manipuler et à observer uniquement. Toutefois, dans tous les groupes, tous les participants ou presque sélectionnent à au moins une reprise une proposition 3D.

Tableau 55 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (1^{ère} étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G1 : manip. 2½D (N = 158)	10,1%	5,7%	10,8%	9,5%	5,1%	13,3%	10,8%
G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	14,0%	3,8%	25,5%	11,5%	11,5%	14,0%	10,8%
G4 : obs. 2D (N = 159)	8,2%	13,2%	45,3%	20,8%	20,1%	21,4%	17,0%

b. Analyses inférentielles comparatives

Les analyses générales préalablement présentées ont permis de mettre en évidence que, pour la quasi-totalité des objets 3D, la perception adéquate était plus rare au départ de représentations planes en comparaison aux représentations virtuelles, à l'inverse de la perception inadéquate et de la non-perception. Le Tableau 56 présente les résultats des *tests du Khi-carré* qui permettent d'identifier s'il y a, pour chaque objet 3D, une indépendance ou non de la perception et du groupe d'appartenance quand le groupe 1 et le groupe 4 sont pris en considération mais aussi quand c'est le cas du groupe 2 et du groupe 4.

Si on s'intéresse d'abord uniquement aux taux de perception adéquate, des résultats significatifs sont obtenus pour tous les objets 3D excepté le cylindre ($\chi^2 = 1,109$; p -value = 0,292) quand les groupes 1 et 4 sont pris en considération. Il en est de même quand le groupe 2 et le groupe 4 sont comparés ($\chi^2 = 1,862$; p -value = 0,172). Pour les six autres objets, le taux de perception dépend du groupe d'appartenance et donc de

la dimensionnalité des supports, avec des résultats systématiquement en faveur des représentations virtuelles.

Tableau 56 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G4 et G2 et G4 : Khi-carré (χ^2) et p-value (p) (1^{ère} étude)

		Taux de perception adéquate	Taux de perception inadéquate	Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims)
G1-G4	Cylindre	$\chi^2 = 1,109$ $p = 0,292$	$\chi^2 = 5,735$ $p = 0,017^*$	$\chi^2 = 0,363$ $p = 0,547$
	Cône	$\chi^2 = 19,771$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 10,553$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 5,219$ $p = 0,022^*$
	Sphère	$\chi^2 = 125,188$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 44,299$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 46,776$ $p < 0,001^{**}$
	Prisme	$\chi^2 = 31,903$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 8,897$ $p = 0,003^{**}$	$\chi^2 = 7,821$ $p = 0,005^{**}$
	Anneau rond	$\chi^2 = 44,095$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 21,498$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 16,307$ $p < 0,001^{**}$
	Cube	$\chi^2 = 17,400$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 10,025$ $p = 0,002^{**}$	$\chi^2 = 3,619$ $p = 0,057$
	Anneau droit	$\chi^2 = 11,361$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 4,573$ $p = 0,032^*$	$\chi^2 = 2,566$ $p = 0,109$
G2-G4	Cylindre	$\chi^2 = 1,862$ $p = 0,172$	$\chi^2 = 0,780$ $p = 0,377$	$\chi^2 = 2,732$ $p = 0,098$
	Cône	$\chi^2 = 13,798$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 7,373$ $p = 0,007^{**}$	$\chi^2 = 8,906$ $p = 0,003^{**}$
	Sphère	$\chi^2 = 70,108$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 36,892$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 13,453$ $p < 0,001^{**}$
	Prisme	$\chi^2 = 41,397$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 19,695$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 5,037$ $p = 0,025^*$
	Anneau rond	$\chi^2 = 19,270$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 17,590$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 4,449$ $p = 0,035^*$
	Cube	$\chi^2 = 5,896$ $p = 0,015^*$	$\chi^2 = 3,636$ $p = 0,057$	$\chi^2 = 2,944$ $p = 0,086$
	Anneau droit	$\chi^2 = 11,870$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 7,873$ $p = 0,005^{**}$	$\chi^2 = 2,495$ $p = 0,114$

Au niveau du taux de perception inadéquate, des résultats significatifs sont observés pour chacun des objets 3D quand le groupe 1 et le groupe 4 sont pris en compte. Il est donc possible de souligner que, pour tous les solides, les capacités de perception inadéquate sont dépendantes des groupes et donc de la dimension du support. Les taux de perception inadéquate décrits préalablement montraient d'ailleurs des taux toujours plus élevés dans le groupe 4. Quand les groupes 2 et 4 sont comparés, les taux de perception inadéquate sont aussi plus importants dans le groupe 4 mais les résultats

des *tests du Khi-carré* appliqués ne sont pas significatifs pour tous les objets 3D. Ils ne le sont ni pour le cylindre ($\chi^2 = 0,780$; $p\text{-value} = 0,370$) ni pour le cube ($\chi^2 = 3,636$; $p\text{-value} = 0,057$), même si, dans le deuxième cas, ils sont proches du seuil de significativité. Pour ces deux objets 3D, la sélection de propositions 3D non attendues est indépendante du groupe, contrairement à ce qui est observé pour tous les autres objets 3D.

Enfin, concernant la non-perception des objets 3D (avec prise en compte des verbatims), les résultats sont significatifs pour les mêmes objets 3D, que l'on prenne en compte le groupe 1 et le groupe 4 ou le groupe 2 et le groupe 4 : le cône, la sphère, le prisme et l'anneau rond. Pour chacun d'eux, les taux de non-perception sont donc dépendants du groupe d'appartenance et les statistiques descriptives ont permis de souligner des choix 2D plus élevés face à des représentations 2D. Notons que des résultats à la limite de la significativité sont observés pour le cube, que ce soit entre le groupe 1 et le groupe 4 ($\chi^2 = 3,619$; $p\text{-value} = 0,057$) ou entre le groupe 2 et le groupe 4 ($\chi^2 = 2,944$; $p\text{-value} = 0,086$). Il en est de même pour le cylindre entre le groupe 1 et le groupe 2 ($\chi^2 = 2,732$; $p\text{-value} = 0,098$).

Au vu de ces résultats, il semble possible de considérer qu'entre 2D et 2 ½ D, les capacités de perception des objets 3D semblent globalement dépendantes de la dimensionnalité du support, avec le plus souvent davantage de choix 3D non attendus face aux représentations planes notamment, mais aussi davantage de comportements bidimensionnels.

9.4.1.2. Différence entre perception de représentations virtuelles et planes pour chaque objet selon l'âge

a. Analyses générales

La Figure 22 présente l'évolution des taux de perception adéquate à chaque tranche d'âge pour chacun des objets 3D dans les trois groupes ici comparés. Face à des représentations virtuelles, des tendances communes ont pu être mises en évidence dans les groupes 1 et 2 (*cf.* 9.2.1.2), notamment concernant le développement de la perception adéquate avec l'âge pour certains objets (ex. prisme, sphère) mais pas pour d'autres (ex. cylindre, cube). L'analyse des courbes d'évolution menée sur les groupes 1 et 2 a par ailleurs pu relever que les taux de perception adéquate n'augmentent pas systématiquement d'une tranche d'âge à la suivante. Un même constat semble pouvoir être réalisé dans le quatrième groupe. Qui plus est, dans ce groupe, les taux observés

à la première tranche d'âge sont majoritairement proches, voire, pour certains, supérieurs à ceux observés à la dernière, même si les taux fluctuent entre celles-ci.

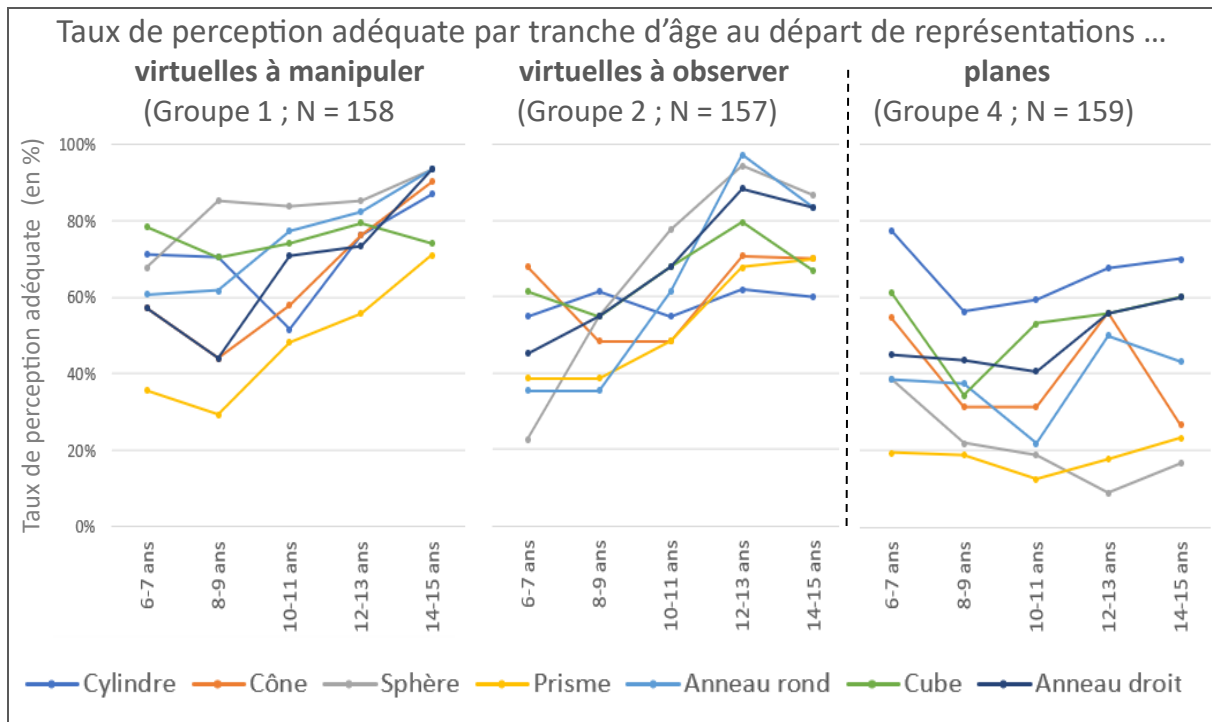


Figure 22 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D (1^{ère} étude)

Les indices de corrélation (r point bi-sériel) entre l'âge et la perception adéquate, présentés en Tableau 57, s'avèrent tous négligeables ce qui confirme l'absence de lien entre perception des représentations planes et âge. Une corrélation pouvant être considérée comme non-nulle mais négligeable est néanmoins relevée pour la sphère ($r_{pb} = -0,187$).

Du fait de l'absence majoritaire de corrélation pour tous les objets 3D dans le groupe 4, que ce soit au niveau du taux de perception adéquate, inadéquate ou de non-perception, des points communs entre ce groupe et les deux autres groupes se situent au niveau des cas du cylindre et du cube. En effet, une absence de lien entre perception et âge est donc observée dans les différentes modalités, même si les valeurs et trajectoires ne sont pas forcément identiques. Pour les autres objets 3D, des différences apparaissent au moins en partie entre les modalités.

Pour le prisme, le taux s'avère faible et relativement stable entre les tranches d'âge face à sa représentation 2D alors qu'il augmente face à sa représentation virtuelle. De même, la sélection de certains choix 3D non attendus diminue face à la représentation virtuelle et pas face à la représentation plane.

Pour les deux anneaux, les indices de corrélation permettent de statuer sur une absence de corrélation de la perception adéquate avec l'âge face à la représentation plane alors qu'une corrélation positive faible à modérée est observée au départ d'une représentation virtuelle. De même, la diminution des choix 3D non attendus constatée et des cas de non-perception au départ de leur représentation virtuelle ne s'observe pas face à leur représentation plane.

Enfin, pour le cône et la sphère, une absence de corrélation entre l'âge et la perception adéquate apparait face à leur représentation plane alors qu'une corrélation positive est observée dans certaines conditions face à leur représentation virtuelle. Notons par ailleurs qu'une légère augmentation de la perception inadéquate ($r_{pb} = 0,253$) et en particulier du choix 3D dont la hauteur est modifiée ($r_{pb} = 0,253$), apparait dans le groupe 4 pour la sphère alors que ce n'est pas le cas dans les deux autres groupes. De même, une augmentation de la proposition 3D relative à l'objet incliné ($r_{pb} = 0,318$) est observée pour le cône alors que ce n'est pas le cas non plus face à sa représentation virtuelle.

Tableau 57 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles et planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sériel (r_{pb}) et p -value (p) (1^{ère} étude)

		Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Perception adéquate	G1 : manip. 2½D (N = 158)	$r_{pb} = 0,136$ $p = 0,087$	$r_{pb} = 0,302$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,194$ $p = 0,015^*$	$r_{pb} = 0,265$ $p = 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,283$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,003$ $p = 0,970$	$r_{pb} = 0,318$ $p < 0,001^{**}$
	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	$r_{pb} = 0,025$ $p = 0,757$	$r_{pb} = 0,072$ $p = 0,373$	$r_{pb} = 0,515$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,278$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,462$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,105$ $p = 0,192$	$r_{pb} = 0,361$ $p < 0,001^{**}$
	G4 : obs. 2D (N = 159)	$r_{pb} = -0,023$ $p = 0,770$	$r_{pb} = -0,100$ $p = 0,211$	$r_{pb} = -0,187$ $p = 0,018^*$	$r_{pb} = 0,017$ $p = 0,832$	$r_{pb} = 0,063$ $p = 0,429$	$r_{pb} = 0,074$ $p = 0,351$	$r_{pb} = 0,114$ $p = 0,153$
Perception inadéquate	G1 : manip. 2½D (N = 158)	$r_{pb} = -0,088$ $p = 0,272$	$r_{pb} = -0,341$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,164$ $p = 0,039^*$	$r_{pb} = -0,193$ $p = 0,015^*$	$r_{pb} = -0,266$ $p = 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,077$ $p = 0,339$	$r_{pb} = -0,321$ $p < 0,001^{**}$
	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	$r_{pb} = 0,019$ $p = 0,815$	$r_{pb} = -0,094$ $p = 0,244$	$r_{pb} = -0,195$ $p = 0,015^*$	$r_{pb} = -0,216$ $p = 0,007^{**}$	$r_{pb} = -0,298$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,093$ $p = 0,246$	$r_{pb} = -0,293$ $p < 0,001^{**}$
	G4 : obs. 2D (N = 159)	$r_{pb} = 0,057$ $p = 0,479$	$r_{pb} = 0,117$ $p = 0,141$	$r_{pb} = 0,253$ $p = 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,091$ $p = 0,254$	$r_{pb} = 0,068$ $p = 0,392$	$r_{pb} = 0,018$ $p = 0,818$	$r_{pb} = -0,027$ $p = 0,736$
Non-perception	G1 : manip. 2½D (N = 158)	$r_{pb} = -0,125$ $p = 0,117$	$r_{pb} = -0,018$ $p = 0,818$	$r_{pb} = -0,158$ $p = 0,047^*$	$r_{pb} = -0,167$ $p = 0,036^*$	$r_{pb} = -0,102$ $p = 0,201$	$r_{pb} = -0,129$ $p = 0,106$	$r_{pb} = -0,091$ $p = 0,254$
	G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	$r_{pb} = -0,103$ $p = 0,198$	$r_{pb} = 0,095$ $p = 0,235$	$r_{pb} = -0,424$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,135$ $p = 0,092$	$r_{pb} = -0,248$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = -0,060$ $p = 0,453$	$r_{pb} = -0,202$ $p = 0,011^*$
	G4 : obs. 2D (N = 159)	$r_{pb} = -0,062$ $p = 0,438$	$r_{pb} = -0,028$ $p = 0,728$	$r_{pb} = -0,118$ $p = 0,140$	$r_{pb} = -0,171$ $p = 0,031^*$	$r_{pb} = -0,161$ $p = 0,043^*$	$r_{pb} = -0,144$ $p = 0,070$	$r_{pb} = -0,134$ $p = 0,092$

Par ailleurs, en ce qui concerne les différences entre objets 3D à chaque tranche d'âge, des différences significatives sont observées à chacune des tranches d'âge entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations

planes, comme l'indiquent les résultats aux tests *Q de Cochran* (Tableau 58). La présence de différences entre objets 3D constatées sur l'ensemble du public cible semble donc pouvoir être élargie à l'ensemble des tranches d'âge, ce qui n'est pas forcément le cas face aux représentations virtuelles, en particulier quand elles ne sont qu'observées. De plus, si l'ordre des taux de perception adéquate des objets 3D est variable entre les tranches d'âge, il ressort cependant que le taux le plus élevé concerne systématiquement le cylindre et le moins élevé concerne systématiquement soit le prisme soit la sphère. Si un constat similaire est observé pour le prisme face aux représentations virtuelles, ce n'est pas le cas pour le cylindre et la sphère. D'ailleurs, dans les groupes 1 et 2, aucun objet 3D ne semble se détacher avec un taux systématiquement plus élevé que les autres.

Tableau 58 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles et planes par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (1^{ère} étude)

	6-7 ans	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
G1 : manip. 2½D (N = 158)	Q = 14,030 p = 0,029*	Q = 36,157 p < 0,001**	Q = 20,378 p = 0,002**	Q = 12,808 p = 0,046*	Q = 15,803 p = 0,015*
G2 : obs. 2½D H. (N = 157)	Q = 25,361 p < 0,001**	Q = 8,227 p = 0,222	Q = 10,632 p = 0,100	Q = 30,876 p < 0,001**	Q = 12,383 p = 0,054
G4 : obs. 2D (N = 159)	Q = 28,309 p < 0,001**	Q = 16,944 p = 0,009**	Q = 27,837 p < 0,001**	Q = 46,784 p < 0,001**	Q = 35,829 p < 0,001**

b. Analyses inférentielles comparatives

Le Tableau 59 présente les résultats de *tests du Khi-carré* utilisés pour identifier la présence d'une dépendance de la perception adéquate de chaque objet 3D au groupe d'appartenance, et ce à chaque tranche d'âge, toujours en comparant le groupe 1 et le groupe 4, mais aussi le groupe 2 et le groupe 4. Les résultats de ces tests inférentiels indiquent des situations différentes entre objets 3D et entre les tranches d'âge puisque des résultats significatifs sont observés à une ou plusieurs tranches d'âge pour tous les objets 3D sauf le cylindre.

Au total, dans environ la moitié des cas analysés, les résultats sont non significatifs ce qui permet de statuer sur une absence de dépendance des taux de perception à la dimensionnalité des supports dans ces différents cas. Dès qu'une dépendance entre perception et groupe d'appartenance est constatée, les taux de perception adéquate apparaissent supérieurs pour le groupe confronté à des représentations 2 ½ D.

Pour la quasi-totalité des objets 3D (tous sauf la sphère), la perception des objets 3D ne semble pas dépendre de la dimensionnalité des supports à la première tranche d'âge puisque des résultats non significatifs y sont observés. À la tranche d'âge suivante, les résultats sont aussi majoritairement non significatifs mais les résultats significatifs constatés sont plus nombreux. De tels résultats sont encore plus fréquemment constatés dans les tranches d'âge suivantes.

Par ailleurs, sous l'angle des objets 3D, les résultats significatifs sont absents pour le cylindre à l'ensemble des tranches d'âge même si les différences sont proches du seuil de significativité ($\chi^2 = 3,528$; $p\text{-value} = 0,060$) à la première tranche d'âge entre G2 et G4. Pour le cône et le cube, des résultats significatifs sont observés au maximum à deux des tranches d'âge ce qui implique qu'à la plupart des tranches d'âge, il y a indépendance des capacités de perception et du groupe d'appartenance. Pour l'anneau droit et le prisme, il n'y a pas de résultat significatif aux deux premières tranches d'âge mais des résultats significatifs sont quasi-systématiquement obtenus aux tranches d'âge suivantes, aussi bien entre G4 et G1 qu'entre G4 et G2. Pour le prisme, des résultats significatifs sont observés aux trois dernières tranches d'âge suivantes même si, entre les groupes 1 et 4, les résultats sont proches de seuil de significativité aux deux premières tranches. Chez les enfants et les adolescents plus âgés, la perception de cet objet 3D est donc dépendante de la dimensionnalité du support. Des résultats similaires sont observés pour l'anneau rond puisque les résultats sont significatifs dans les trois dernières tranches d'âge. En plus, des résultats significatifs apparaissent pour les enfants âgés de 8 à 9 ans et des résultats proches du seuil de significativité sont observés pour ceux âgés de 6 à 7 ans. Enfin, pour la sphère, des résultats significatifs apparaissent à toutes les tranches d'âge, sauf à la première entre les groupes 2 et 4.

Dans l'ensemble, il apparaît donc que l'effet de la dimension du support semble être davantage présent chez les enfants plus âgés et chez les adolescents et que celui-ci semble davantage concerner certains objets, par exemple la sphère ou l'anneau rond que d'autres comme le cylindre.

Tableau 59 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G4 et G2 et G4 : Khi-carré (χ^2) et p-value (p) (1^{ère} étude)

		À 6-7 ans	À 8-9 ans	À 10-11 ans	À 12-13 ans	À 14-15 ans
G1-G4	Cylindre	$\chi^2 = 0,278$ $p = 0,598$	$\chi^2 = 1,465$ $p = 0,226$	$\chi^2 = 0,384$ $p = 0,535$	$\chi^2 = 0,657$ $p = 0,417$	$\chi^2 = 2,657$ $p = 0,103$
	Cône	$\chi^2 = 0,032$ $p = 0,859$	$\chi^2 = 1,160$ $p = 0,281$	$\chi^2 = 4,585$ $p = 0,032^*$	$\chi^2 = 3,219$ $p = 0,073$	$\chi^2 = 25,542$ $p < 0,001^{**}$
	Sphère	$\chi^2 = 5,012$ $p = 0,025^*$	$\chi^2 = 26,742$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 26,717$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 39,903$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 36,527$ $p < 0,001^{**}$
	Prisme	$\chi^2 = 1,992$ $p = 0,158$	$\chi^2 = 1,020$ $p = 0,312$	$\chi^2 = 9,628$ $p = 0,002^{**}$	$\chi^2 = 10,690$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 13,871$ $p < 0,001^{**}$
	Anneau rond	$\chi^2 = 2,850$ $p = 0,091$	$\chi^2 = 3,882$ $p = 0,049^*$	$\chi^2 = 19,437$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 7,950$ $p = 0,005^{**}$	$\chi^2 = 17,926$ $p < 0,001^{**}$
	Cube	$\chi^2 = 2,072$ $p = 0,150$	$\chi^2 = 8,679$ $p = 0,003^{**}$	$\chi^2 = 3,015$ $p = 0,082$	$\chi^2 = 4,300$ $p = 0,038^*$	$\chi^2 = 1,394$ $p = 0,238$
	Anneau droit	$\chi^2 = 0,845$ $p = 0,358$	$\chi^2 = 0,001$ $p = 0,976$	$\chi^2 = 5,871$ $p = 0,015^*$	$\chi^2 = 2,318$ $p = 0,128$	$\chi^2 = 9,704$ $p = 0,002^{**}$
G2-G4	Cylindre	$\chi^2 = 3,528$ $p = 0,060$	$\chi^2 = 0,165$ $p = 0,685$	$\chi^2 = 0,132$ $p = 0,716$	$\chi^2 = 0,064$ $p = 0,800$	$\chi^2 = 0,659$ $p = 0,417$
	Cône	$\chi^2 = 1,088$ $p = 0,297$	$\chi^2 = 1,932$ $p = 0,165$	$\chi^2 = 1,932$ $p = 0,165$	$\chi^2 = 1,581$ $p = 0,209$	$\chi^2 = 11,279$ $p = 0,001^{**}$
	Sphère	$\chi^2 = 1,897$ $p = 0,168$	$\chi^2 = 7,255$ $p = 0,007^{**}$	$\chi^2 = 21,729$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 49,513$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 29,433$ $p < 0,001^{**}$
	Prisme	$\chi^2 = 2,818$ $p = 0,093$	$\chi^2 = 3,074$ $p = 0,080$	$\chi^2 = 9,628$ $p = 0,002^{**}$	$\chi^2 = 17,376$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 13,125$ $p < 0,001^{**}$
	Anneau rond	$\chi^2 = 0,069$ $p = 0,793$	$\chi^2 = 0,028$ $p = 0,868$	$\chi^2 = 10,093$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 19,342$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 10,335$ $p = 0,001^{**}$
	Cube	$\chi^2 = 0,000$ $p = 1,000$	$\chi^2 = 2,671$ $p = 0,102$	$\chi^2 = 1,406$ $p = 0,236$	$\chi^2 = 4,300$ $p = 0,038^*$	$\chi^2 = 0,287$ $p = 0,592$
	Anneau droit	$\chi^2 = 0,000$ $p = 1,000$	$\chi^2 = 0,775$ $p = 0,379$	$\chi^2 = 4,661$ $p = 0,031^*$	$\chi^2 = 8,838$ $p = 0,003^{**}$	$\chi^2 = 4,022$ $p = 0,045^*$

Réponse à la question 1.4° (Étude 1)

9.4.2. Résultats relatifs à la seconde étude expérimentale (groupes 1 et 2 vs groupe 5)

9.4.2.1. Différence entre perception de représentations virtuelles et planes pour chaque objet (toutes tranches d'âge confondues)

a. Analyses générales

Afin d'identifier les éventuelles différences de capacité perceptive des enfants et des adolescents au départ de représentations planes et virtuelles, les taux de perception adéquate observés, dans la seconde étude, dans les groupes confrontés à ces deux modalités sont présentés au sein du Tableau 60¹⁸. Pour chacun des objets 3D, le taux de perception adéquate observé dans le groupe confronté à des représentations planes est inférieur à ceux observés dans les groupes confrontés à des représentations virtuelles. Si les écarts entre ces deux modalités sont parfois modérés, par exemple pour le cylindre, ils sont parfois plus importants, comme pour la sphère où le taux vaut 14,7% dans le groupe 5 alors qu'il excède 75% dans les deux premiers groupes.

Face à des représentations virtuelles, aucun objet 3D n'est perçu adéquatement par l'ensemble des individus. On peut en dire autant quand la perception est évaluée face à des représentations planes. Plus encore, pour chaque objet 3D, moins de la moitié des participants perçoivent adéquatement l'objet au départ de sa représentation 2D, puisque les taux de perception adéquate sont tous inférieurs à 45%. Chaque objet est cependant perçu adéquatement par au moins un participant sur dix au départ de sa représentation plane alors que c'est le cas pour plus de la moitié des participants au départ de sa représentation virtuelle.

Tableau 60 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets : pourcentage (2^e étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G1 : manip. 2½D (N = 111)	68,5%	71,2%	90,1%	64,9%	84,7%	70,3%	77,5%
G2 : obs. 2½D (N = 111)	65,8%	66,7%	75,7%	58,6%	70,3%	73,0%	77,5%
G5 : obs. 2D (N = 109)	45,9%	24,8%	14,7%	11,0%	33,0%	32,1%	47,7%

¹⁸ Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

En dépit de ces plus fortes difficultés constatées au départ de représentations planes, que les analyses inférentielles menées ultérieurement permettront certainement de confirmer, l'observation des résultats de chacun des groupes permet de relever plusieurs similitudes dans les deux modalités. La première relève de fortes différences constatées entre les objets 3D. Si les analyses inférentielles (*Q de Cochran*) ont permis de mettre en évidence que des différences significatives étaient constatées entre les sept exercices au sein des groupes 1 ($Q = 34,328$; $p\text{-value} < 0,001$) et 2 ($Q = 15,809$; $p\text{-value} < 0,001$), un tel constat semble pouvoir également être établi dans le groupe confronté à des représentations planes ($Q = 78,693$; $p\text{-value} < 0,001$). La deuxième similitude relève du fait que le prisme est, dans les deux modalités, l'objet 3D dont la perception pose le plus de difficultés.

Malgré ces similitudes, des divergences peuvent aussi être soulignées entre les deux modalités au niveau des différences entre objets. Par exemple la sphère est l'un des objets 3D pour qui la perception est la mieux maîtrisée dans les groupes 1 et 2, ce qui est loin d'être le cas dans le groupe 5. Les résultats des *tests de McNemar*, utilisés pour évaluer les différences entre les objets 3D au sein de chaque groupe (Annexe 26), permettent d'illustrer ces divergences entre les modalités. En effet, ceux-ci relèvent que les différences entre les objets 3D sont plus nombreuses quand la perception est évaluée au départ de représentations 2D plutôt qu'avec des représentations virtuelles. Dans le groupe 5, les taux relatifs à l'anneau droit et au cylindre, qui sont les plus élevés, se distinguent significativement des cinq autres objets 3D et à l'inverse, les taux relatifs au prisme et à la sphère, qui sont les taux les plus faibles, se distinguent significativement de tous les autres objets 3D ou presque. Même si, face à des représentations virtuelles, les différences entre objets varient selon la modalité dans laquelle ils sont présentés (avec ou sans manipulation), celles-ci sont moins fréquentes.

Si les taux de perception adéquate obtenus pour chaque objet permettent d'observer que la perception des différents objets est peu maîtrisée, l'analyse des répartitions des participants selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus permet d'aller plus loin dans la compréhension des difficultés et des divergences entre les modalités de présentation. La Figure 23, qui présente cette répartition, permet de mettre en évidence que, face à des représentations planes, un quart des participants ne perçoivent adéquatement aucun des objets 3D proposés. Très peu, voire aucun des participants, se situe dans ce cas de figure face aux représentations virtuelles.

Inversement, si plus de la moitié des enfants confrontés à des représentations virtuelles perçoivent adéquatement au moins cinq des sept objets, ils sont un peu plus d'un participant sur dix à être dans le cas face aux représentations planes. Face à ces représentations planes, les participants perçoivent majoritairement un nombre réduit d'objets 3D.

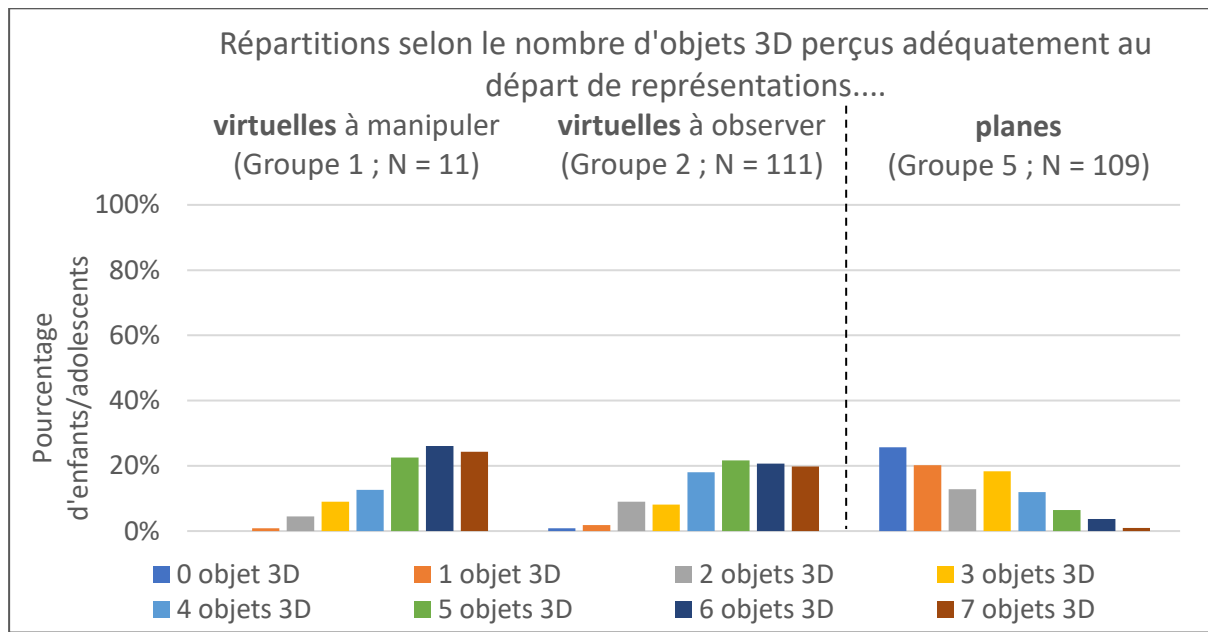


Figure 23 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles et planes (1^{ère} étude)

Les analyses menées sur les représentations virtuelles ont précédemment permis de mettre en évidence que les difficultés sont irrégulières entre les individus (cf. 9.1.2.1) dans la mesure où ce ne sont pas systématiquement les mêmes objets 3D qui posent des difficultés chez les personnes réussissant la plupart des exercices ou en réussissant peu. Une telle irrégularité semble pouvoir aussi être mise en avant dans le groupe confronté aux représentations planes. Comme le présente l'annexe 27, parmi les participants qui n'ont perçu adéquatement qu'un seul objet 3D, on constate que cet objet varie d'un participant à l'autre. S'il arrive, pour 40% des participants concernés, que cet objet soit le cylindre, il arrive aussi que ce soit tous les autres objets sauf la sphère. Inversement, parmi les quelques participants ayant perçu adéquatement six des sept objets, l'objet posant des difficultés diffère donc selon les participants. Même si les disparités entre individus ne vont pas forcément dans le même sens, notamment suite aux différences de difficultés constatées pour certains objets, on constate donc des disparités dans les différentes modalités.

Face aux représentations virtuelles, nous évoquons dans les analyses antérieures (cf. 9.1.2.1) que les comportements consistant à concevoir l'objet 3D comme un objet 3D différent de celui présenté (perception inadéquate) s'avèrent pour plusieurs des objets 3D plus récurrents que les comportements permettant de suspecter une absence de perception de la troisième dimension (non-perception). Dans le groupe 5, des résultats différents sont observés dans la mesure où les taux de non-perception s'avèrent nettement plus élevés que les taux de perception inadéquate pour l'ensemble des objets 3D. Pour le cône, la sphère, le prisme, l'anneau rond et le cube, les cas de non-perception s'avèrent même plus fréquents que les cas de perception adéquate.

Le Tableau 61¹⁹, qui présente les taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims), permet de relever que les taux de non-perception varient entre 37,6% (pour l'anneau droit) et 74,3% (pour la sphère) dans le groupe 5. Ces taux sont systématiquement plus élevés dans le groupe 5 que dans les groupes 1 et 2, avec des écarts parfois très élevés, par exemple pour la sphère.

Tableau 61 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D: pourcentage (2^e étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G1 : manip. 2½D (N = 111)	18,0%	13,5%	6,3%	9,0%	5,4%	13,5%	9,0%
G2 : obs. 2½D (N = 111)	20,7%	11,7%	16,2%	10,8%	9,9%	15,3%	13,5%
G5 : obs. 2D (N = 109)	43,1%	60,6%	74,3%	54,1%	45,0%	57,8%	37,6%

Même s'ils sont plus rares que les cas de non-perception, des cas de perception inadéquate sont aussi constatés face aux représentations planes. La Figure 24 présente les taux de perception inadéquate relatifs à chaque objet 3D. Celle-ci permet de mettre en évidence que, contrairement aux cas de non-perception, des différences mineures sont observées entre les modalités de représentation au sujet des taux de perception inadéquate. Dans le groupe 5, ces taux varient entre 4,6% (pour le cube et le cylindre) et 29,4% (pour le prisme) alors qu'ils varient entre 2,7% (pour la sphère) et 24,3% (pour le prisme) dans les deux autres groupes. Le prisme reste l'objet pour lequel ce type de

¹⁹ Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

comportement perceptif est le plus présent, à la fois face aux représentations planes et face aux représentations virtuelles.

L'analyse des taux de sélection des différentes propositions 3D (Annexe 29) permet de relever que dans le groupe 5, comme dans les groupes 1 et 2, la proposition 3D la plus fréquente est la même pour le cylindre, le cône, la sphère, l'anneau droit : la sélection de l'objet 3D dont la hauteur est modifiée. Pour tous ces objets 3D, les autres propositions sont peu, voire pas du tout, sélectionnées. Pour le prisme, cette proposition est aussi la plus élevée dans les trois groupes comparés, mais la plupart des autres propositions sont aussi sélectionnées, même de manière moins fréquente que la première. Pour l'anneau rond, la proposition 3D non attendue la plus fréquemment sélectionnée dans le groupe 5 est en revanche un anneau de forme ovale avec les bords arrondis, autrement dit, il s'agit de l'objet 3D dont la forme de la base a été modifiée pour correspondre à ce qui est observé sur le dessin en perspective. Cette proposition est sélectionnée par plus d'un participant sur dix dans ce groupe alors qu'elle n'est presque pas sélectionnée dans l'autre modalité. Enfin, pour le cube, différentes propositions ont été choisies, mais uniquement à une ou deux reprises maximum.

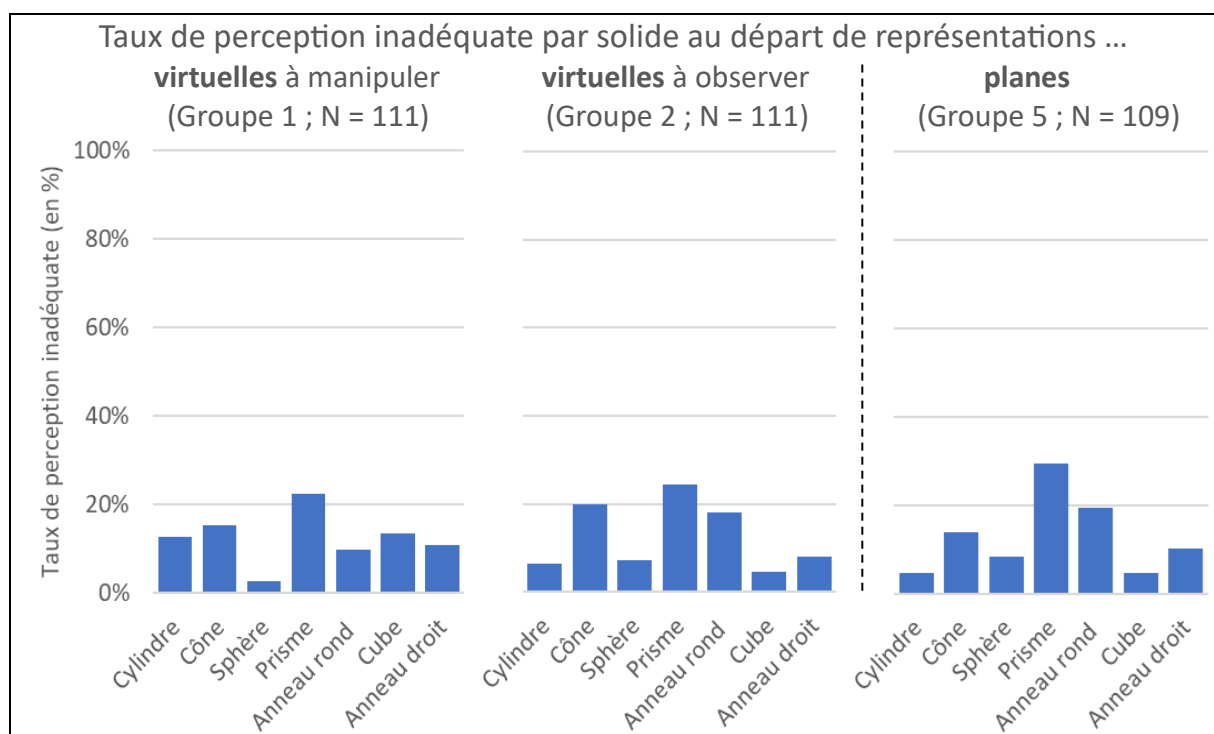


Figure 24 : Taux de perception inadéquate au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)

b. Analyses inférentielles comparatives

Le Tableau 62 présente les résultats aux tests du Khi-carré (ou alternative) comparant, pour chaque objet 3D, l'influence de la dimensionnalité sur les scores de perception obtenus, que ce soit entre le groupe 1 et le groupe 5 et entre le groupe 2 et le groupe 5. Ces tests inférentiels permettent de confirmer les observations précédemment réalisées puisqu'ils mettent en évidence des résultats significatifs pour tous les objets 3D concernant les taux de perception adéquate. La perception adéquate de l'ensemble des objets 3D investigués est donc dépendante de la dimensionnalité du support utilisé quand les représentations planes et virtuelles sont comparées, à l'avantage des représentations virtuelles.

Tableau 62 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3, G2 et G4, G1 et G5 et G2 et G5 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) (2^e étude)

		Taux de perception adéquate	Taux de perception inadéquate	Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims)
G1-G5	Cylindre	$\chi^2 = 11,476$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 4,489$ $p = 0,034^*$	$\chi^2 = 16,360$ $p < 0,001^{**}$
	Cône	$\chi^2 = 47,425$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 0,107$ $p = 0,744$	$\chi^2 = 52,306$ $p < 0,001^{**}$
	Sphère	$\chi^2 = 125,474$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 3,290$ $p = 0,070$	$\chi^2 = 105,975$ $p < 0,001^{**}$
	Prisme	$\chi^2 = 67,580$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 1,339$ $p = 0,247$	$\chi^2 = 0,008$ $p < 0,001^{**}$
	Anneau rond	$\chi^2 = 60,708$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 3,873$ $p = 0,049^*$	$\chi^2 = 45,877$ $p < 0,001^{**}$
	Cube	$\chi^2 = 32,058$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 5,302$ $p = 0,021^*$	$\chi^2 = 47,130$ $p < 0,001^{**}$
	Anneau droit	$\chi^2 = 20,848$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 0,030$ $p = 0,862$	$\chi^2 = 25,271$ $p < 0,001^{**}$
G2-G5	Cylindre	$\chi^2 = 8,830$ $p = 0,003^{**}$	$\chi^2 = 0,315$ $p = 0,575$	$\chi^2 = 12,718$ $p < 0,001^{**}$
	Cône	$\chi^2 = 38,873$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 1,443$ $p = 0,230$	$\chi^2 = 56,997$ $p < 0,001^{**}$
	Sphère	$\chi^2 = 82,529$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 0,085$ $p = 0,771$	$\chi^2 = 74,996$ $p < 0,001^{**}$
	Prisme	$\chi^2 = 54,656$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 0,710$ $p = 0,399$	$\chi^2 = 47,212$ $p < 0,001^{**}$
	Anneau rond	$\chi^2 = 30,552$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 0,056$ $p = 0,812$	$\chi^2 = 34,051$ $p < 0,001^{**}$
	Cube	$\chi^2 = 36,842$ $p < 0,001^{**}$	Test exact de F. = 0,001 $p = 0,977$	$\chi^2 = 42,893$ $p < 0,001^{**}$
	Anneau droit	$\chi^2 = 20,848$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 0,262$ $p = 0,609$	$\chi^2 = 16,835$ $p < 0,001^{**}$

Réponse à la question 1.4° (Étude 2)

Les résultats permettent par ailleurs de confirmer que l'influence de la dimensionnalité se situe davantage au niveau de la non-perception des objets 3D qu'au niveau de la perception inadéquate. Les résultats significatifs ne s'observent que pour quelques objets 3D pour le taux de perception inadéquate (cylindre, anneau rond et cube entre G1 et G5) alors qu'ils s'observent pour tous pour le taux de non-perception.

9.4.2.2. Différence entre perception de représentations virtuelles et planes pour chaque objet selon l'âge

a. Analyses générales

Les taux de perception de chaque objet à chacune des tranches d'âge dans les groupes 1, 2 et 5, présentés en Figure 25, permettent de relever la présence de divergences entre les groupes dans l'évolution des taux de perception adéquate avec l'âge. On y observe que, dans le groupe 5, le taux relatif à la première tranche d'âge s'avère toujours supérieur à celui relatif à la dernière tranche d'âge, même si les écarts sont plus ou moins importants selon les objets 3D. Une tendance à la diminution des taux semble observée dans le groupe 5 et n'est pas forcément observée dans les deux autres groupes. Pour autant, les taux ne diminuent pas systématiquement d'une tranche d'âge à la suivante. Des stagnations ou augmentations des taux sont aussi constatées à certaines tranches d'âge, variables selon les objets 3D.

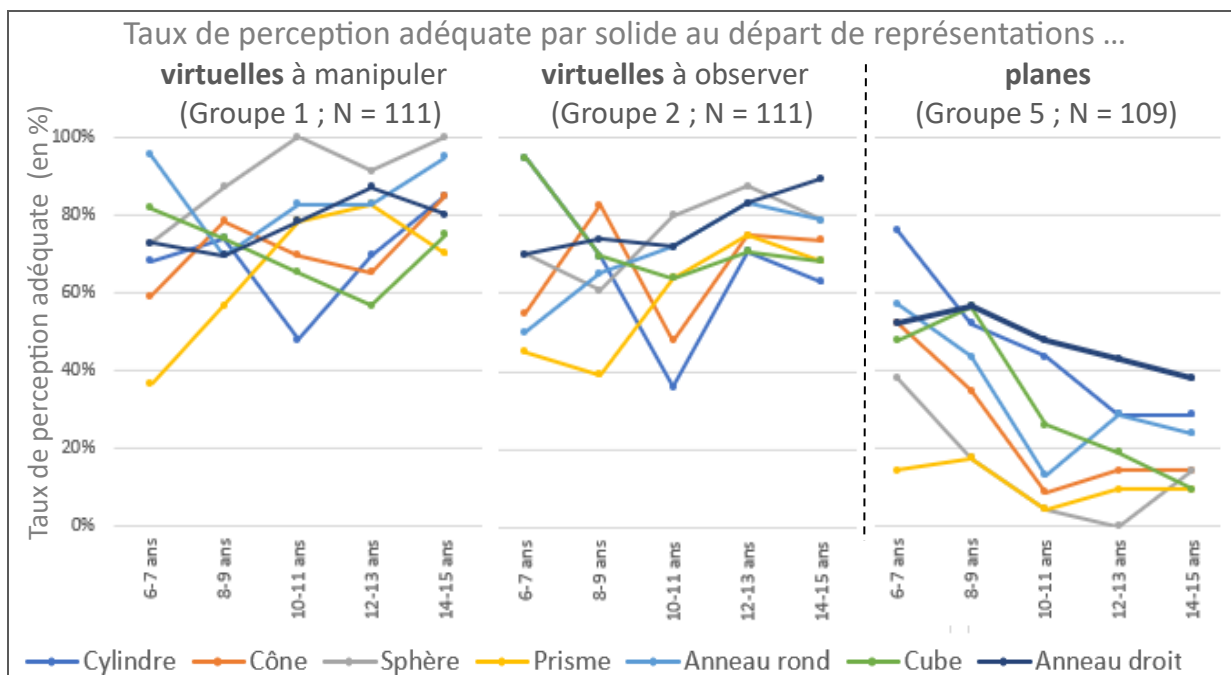


Figure 25 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et planes pour chacun des objets 3D (2^e étude)

Afin de statuer sur cette diminution des taux constatée dans le groupe 5, les indices de corrélation (*r point bi-sérial*) calculés entre l'âge en jour et la perception des objets ont été calculés et sont présentés dans le Tableau 63. Ceux-ci confirment bien la tendance observée au niveau du taux de perception adéquate pour la plupart des objets puisqu'une corrélation négative et modérée est observée pour le cube ($r_{pb} = -0,394$) et le cylindre ($r_{pb} = -0,322$) tandis qu'une corrélation négative et faible apparaît pour trois autres objets : le cône ($r_{pb} = -0,299$), la sphère ($r_{pb} = -0,286$) et l'anneau rond ($r_{pb} = -0,257$). Notons par ailleurs que, pour la sphère, une diminution des cas de perception inadéquate est aussi constatée ($r_{pb} = -0,200$). Pour les deux autres objets 3D, les indices de corrélation sont négligeables, ce qui souligne une absence de lien entre perception et âge. Cependant, pour le prisme, une diminution des cas de perception inadéquate est observée ($r_{pb} = -0,291$), même si cela ne se manifeste pas par la diminution significative d'une proposition 3D. Pour l'anneau droit, les corrélations calculées ne montrent pas de lien entre l'âge et la perception adéquate, la perception inadéquate et la non-perception. C'est d'ailleurs le seul objet 3D pour lequel on ne constate pas une corrélation positive avec les cas de non-perception.

Tableau 63 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles et planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation *r point bi-sérial* (r_{pb}) et *p-value* (p) (2^e étude)

		Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Perception adéquate	G1 : manip. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = 0,059$ $p = 0,538$	$r_{pb} = 0,098$ $p = 0,308$	$r_{pb} = 0,292$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = 0,289$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = 0,072$ $p = 0,454$	$r_{pb} = -0,079$ $p = 0,410$	$r_{pb} = 0,119$ $p = 0,215$
	G2 : obs. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,156$ $p = 0,102$	$r_{pb} = 0,096$ $p = 0,314$	$r_{pb} = 0,163$ $p = 0,087$	$r_{pb} = 0,238$ $p = 0,012^*$	$r_{pb} = 0,246$ $p = 0,009^{**}$	$r_{pb} = -0,145$ $p = 0,129$	$r_{pb} = 0,171$ $p = 0,073$
	G5 : obs. 2D (N = 109)	$r_{pb} = -0,322$ $p = 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,299$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = -0,286$ $p = 0,003^{**}$	$r_{pb} = -0,104$ $p = 0,284$	$r_{pb} = -0,257$ $p = 0,007^{**}$	$r_{pb} = -0,394$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = -0,130$ $p = 0,177$
Perception inadéquate	G1 : manip. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,051$ $p = 0,596$	$r_{pb} = -0,134$ $p = 0,161$	$r_{pb} = -0,209$ $p = 0,027^*$	$r_{pb} = -0,273$ $p = 0,004^{**}$	$r_{pb} = -0,130$ $p = 0,173$	$r_{pb} = 0,113$ $p = 0,239$	$r_{pb} = -0,186$ $p = 0,050^*$
	G2 : obs. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,069$ $p = 0,471$	$r_{pb} = -0,175$ $p = 0,067$	$r_{pb} = -0,340$ $p < 0,001^*$	$r_{pb} = -0,171$ $p = 0,073$	$r_{pb} = -0,267$ $p = 0,005^{**}$	$r_{pb} = 0,110$ $p = 0,251$	$r_{pb} = -0,264$ $p = 0,005^{**}$
	G5 : obs. 2D (N = 109)	$r_{pb} = -0,090$ $p = 0,354$	$r_{pb} = -0,079$ $p = 0,417$	$r_{pb} = -0,200$ $p = 0,037^*$	$r_{pb} = -0,291$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = -0,025$ $p = 0,798$	$r_{pb} = 0,091$ $p = 0,347$	$r_{pb} = -0,171$ $p = 0,075$
Non-perception	G1 : manip. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,030$ $p = 0,752$	$r_{pb} = 0,012$ $p = 0,902$	$r_{pb} = -0,181$ $p = 0,057$	$r_{pb} = -0,128$ $p = 0,181$	$r_{pb} = 0,058$ $p = 0,548$	$r_{pb} = -0,047$ $p = 0,621$	$r_{pb} = -0,076$ $p = 0,428$
	G2 : obs. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = 0,171$ $p = 0,073$	$r_{pb} = 0,066$ $p = 0,489$	$r_{pb} = 0,013$ $p = 0,889$	$r_{pb} = -0,130$ $p = 0,174$	$r_{pb} = 0,007$ $p = 0,945$	$r_{pb} = 0,028$ $p = 0,768$	$r_{pb} = -0,024$ $p = 0,801$
	G5 : obs. 2D (N = 109)	$r_{pb} = 0,295$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = 0,309$ $p = 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,331$ $p < 0,001^{**}$	$r_{pb} = 0,271$ $p = 0,004^{**}$	$r_{pb} = 0,238$ $p = 0,013^*$	$r_{pb} = 0,249$ $p = 0,009^{**}$	$r_{pb} = 0,169$ $p = 0,078$

Excepté peut-être pour le cas de l'anneau droit, tous ces constats observés sur l'évolution des comportements montrent des divergences avec les comportements perceptifs mis en œuvre au départ de représentations 2 ½ D. En effet, dans cette modalité, la diminution des cas de perception adéquate et l'augmentation des cas de non-perception ne sont pas observées.

Au niveau des différences entre objets 3D, les tests *Q de Cochran* appliqués à chaque tranche d'âge (Tableau 64) permettent de relever que des différences significatives sont constatées entre les objets sauf à la dernière tranche d'âge. Les taux relatifs aux différents objets 3D tendent donc à se rapprocher. Une telle tendance est aussi mise en avant dans les autres groupes même s'il arrive, face à des représentations virtuelles, que des différences entre les sept objets 3D ne soient pas significatives à d'autres tranches d'âge. En revanche, dans les deux modalités, des différences significatives sont observées entre les sept objets 3D à la première et à la troisième tranche d'âge.

Tableau 64 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles et planes par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (2^e étude)

	6-7 ans	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
G1 : manip. 2½D (N = 111)	Q = 21,306 p = 0,002*	Q = 7,111 p = 0,311	Q = 20,714 p = 0,002**	Q = 15,739 p = 0,015*	Q = 10,846 p = 0,093
G2 : obs. 2½D (N = 111)	Q = 25,463 p < 0,001**	Q = 14,541 p = 0,024*	Q = 16,301 p = 0,012*	Q = 4,320 p = 0,633	Q = 5,531 p = 0,478
G5 : obs. 2D (N = 109)	Q = 20,536 p = 0,002**	Q = 20,313 p = 0,002**	Q = 29,143 p < 0,001**	Q = 19,017 p = 0,004**	Q = 12,462 p = 0,052

b. Analyses inférentielles comparatives

Le Tableau 65 présente les résultats de *tests du Khi-carré* (ou alternative) utilisés pour comparer la dépendance des taux de perception adéquate à la dimensionnalité des supports pour chacun des objets 3D à chaque tranche d'âge. Si, pour la sphère, des résultats significatifs sont observés à toutes les tranches d'âge, ce qui signifie que la dimensionnalité du support influence à toutes les tranches d'âge la perception visuelle de l'objet 3D, la situation est variable pour les autres objets. Cependant, des résultats significatifs sont *a minima* observés pour tous les objets auprès des adolescents âgés de 12 à 13 ans et de 14 à 15 ans. Auprès des enfants âgés de 10 et 11 ans, les résultats sont significatifs pour la quasi-totalité des objets. Ils sont en revanche moins nombreux dans les deux premières tranches d'âge. Pour l'ensemble des résultats significatifs

constatés, les taux observés sont systématiquement en défaveur du groupe 5. Entre représentations 2 ½ D et représentations 2D, une dépendance de la capacité de perception des objets à la dimensionnalité est donc constatée pour certains objets dans les premières tranches d'âge et pour tous chez les participants plus âgés.

Tableau 65 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3, G2 et G4, G1 et G5 et G2 et G5 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher) et p-value (p) (2^e étude)

		À 6-7 ans	À 8-9 ans	À 10-11 ans	À 12-13 ans	À 14-15 ans
G1-G5	Cylindre	$\chi^2 = 0,343$ $p = 0,558$	$\chi^2 = 2,333$ $p = 0,127$	$\chi^2 = 0,088$ $p = 0,767$	$\chi^2 = 7,379$ $p = 0,007^{**}$	$\chi^2 = 13,244$ $p < 0,001^{**}$
	Cône	$\chi^2 = 0,196$ $p = 0,658$	$\chi^2 = 8,846$ $p = 0,003^{**}$	$\chi^2 = 17,889$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 11,780$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 20,502$ $p < 0,001^{**}$
	Sphère	$\chi^2 = 5,225$ $p = 0,022^*$	$\chi^2 = 22,303$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 42,167$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 36,681$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 30,559$ $p < 0,001^{**}$
	Prisme	$\chi^2 = 2,751$ $p = 0,097$	$\chi^2 = 7,558$ $p = 0,006^{**}$	$\chi^2 = 25,914$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 23,502$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 15,745$ $p < 0,001^{**}$
	Anneau rond	Test ex. de F. = 8,863 $p = 0,004^{**}$	$\chi^2 = 3,185$ $p = 0,074$	$\chi^2 = 22,303$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 13,065$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 21,930$ $p < 0,001^{**}$
	Cube	$\chi^2 = 5,532$ $p = 0,019^*$	$\chi^2 = 1,533$ $p = 0,216$	$\chi^2 = 7,097$ $p = 0,008^{**}$	$\chi^2 = 6,502$ $p = 0,011^*$	$\chi^2 = 18,094$ $p < 0,001^{**}$
	Anneau droit	$\chi^2 = 1,904$ $p = 0,168$	$\chi^2 = 0,840$ $p = 0,359$	$\chi^2 = 4,572$ $p = 0,032^*$	$\chi^2 = 9,501$ $p = 0,002^{**}$	$\chi^2 = 7,411$ $p = 0,006^{**}$
G2-G5	Cylindre	Test ex. de F. = 2,901 $p = 0,184$	$\chi^2 = 1,460$ $p = 0,227$	$\chi^2 = 0,280$ $p = 0,597$	$\chi^2 = 8,006$ $p = 0,005^{**}$	$\chi^2 = 4,821$ $p = 0,028^*$
	Cône	$\chi^2 = 0,028$ $p = 0,867$	$\chi^2 = 10,850$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 8,957$ $p = 0,003^{**}$	$\chi^2 = 16,588$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 14,401$ $p < 0,001^{**}$
	Sphère	$\chi^2 = 4,193$ $p = 0,041^*$	$\chi^2 = 9,127$ $p = 0,003^{**}$	$\chi^2 = 27,859$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 34,453$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 16,851$ $p < 0,001^{**}$
	Prisme	$\chi^2 = 4,668$ $p = 0,031^*$	$\chi^2 = 2,681$ $p = 0,102$	$\chi^2 = 18,636$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 19,446$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 14,764$ $p < 0,001^{**}$
	Anneau rond	$\chi^2 = 0,210$ $p = 0,647$	$\chi^2 = 2,190$ $p = 0,139$	$\chi^2 = 16,920$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 13,768$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 12,130$ $p < 0,001^{**}$
	Cube	$\chi^2 = 11,109$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 0,840$ $p = 0,359$	$\chi^2 = 6,936$ $p = 0,008^{**}$	$\chi^2 = 12,068$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 14,764$ $p < 0,001^{**}$
	Anneau droit	$\chi^2 = 1,336$ $p = 0,248$	$\chi^2 = 1,533$ $p = 0,216$	$\chi^2 = 2,927$ $p = 0,087$	$\chi^2 = 8,008$ $p = 0,005^{**}$	$\chi^2 = 11,235$ $p = 0,001^{**}$

9.4.3. Discussion spécifique à la question 1.4°

Toujours dans une perspective comparative, la perception de représentations virtuelles a été, au travers des deux études, comparée à la perception de représentations planes. De manière générale, si les perspectives comparatives utilisées pour répondre aux précédentes questions de recherche ont permis jusqu'ici de mettre en lumière de nombreuses proximités entre les modalités comparées, la comparaison des capacités de perception au départ de représentations planes et virtuelles permet d'observer davantage de divergences au niveau des scores obtenus, même si des tendances restent communes entre les modalités.

9.4.3.1. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation plane : une habileté non systématique mais posant plus de difficultés que la perception de représentations virtuelles

Malgré le fait qu'ils soient, dès le plus jeune âge, confrontés à des représentations planes d'objets 3D (Frick & Newcombe, 2015), les deux études mettent en évidence des difficultés chez les enfants et les adolescents au niveau des capacités de perception des objets 3D au départ de leur représentation 2D, ce qui confirme que cette capacité est un processus cognitif complexe, comme l'évoquait Pillay (1999).

Face à ces représentations 2D d'objets 3D, de nombreux enfants et adolescents ne semblent pas percevoir adéquatement les objets 3D présentés, qu'ils soient autorisés à sélectionner plusieurs propositions (1^{ère} étude) ou une seule (2^{ème} étude). Dans le premier cas, pour la quasi-totalité des objets 3D, moins de la moitié des participants interrogés perçoivent adéquatement l'objet présenté. Un même constat peut être réalisé pour l'ensemble des objets 3D dans la seconde étude.

Les enfants et les adolescents semblent soit focaliser leur choix uniquement sur une ou des propositions 2D, ce qui pourrait refléter une absence de lecture de la troisième dimension, soit ils envisagent l'objet 3D comme pouvant être un objet différent de celui qu'on souhaitait leur présenter. À ce sujet, même si les deux études permettent de relever que la perception de représentations planes pose des difficultés, une divergence est observée entre elles puisque davantage de cas de perception inadéquate sont observés dans la première étude alors que davantage de cas de non-perception sont observés dans la seconde. Cela suggère une influence de la modalité d'évaluation (choix multiple ou unique) sur le type de comportement perceptif observé au départ des représentations 2D. Nous reviendrons sur cette divergence entre les

études ainsi que sur les raisons permettant de comprendre les difficultés de perception observées au moment de la comparaison avec la perception au départ de représentations virtuelles.

Ces difficultés liées à la perception de représentations 2D sont en cohérence avec la nature même des représentations planes, qui font qu'elles ne permettent pas de traduire toutes les propriétés de l'objet 3D. Ces dernières ne permettent en réalité pas, à moins d'obtenir des informations sur la perspective utilisée et d'en maîtriser les principes, de savoir exactement la forme de l'objet 3D représenté. D'autant que le mode de perspective utilisé dans l'étude, s'il a été choisi par analogie au mode utilisé dans les représentations 2 ½ D, ne correspond pas au mode de représentation couramment rencontré dans les apprentissages scolaires, à savoir la perspective cavalière (Audibert, 1990). Même s'il en partage certaines propriétés telles que la conservation du parallélisme, celui-ci conserve moins de propriétés relatives aux objets 3D puisqu'aucune face n'y est par exemple conservée à l'identique. Il constitue donc un moins bon compromis entre ce qui est vu sur les représentations et les caractéristiques réelles des objets représentés (Parzysz, 1991), en particulier dans le cadre de la représentation des polyèdres. Notons tout de même que les deux études montrent des difficultés à la fois dans la perception des polyèdres et des non-polyèdres.

Par ailleurs, les difficultés associées à la perception de représentations 2D sont en cohérence avec les résultats de recherches antérieures qui se sont notamment intéressées à la capacité de perception des représentations 2D d'objets 3D ou à la lecture d'information sur des représentations 2D (Kondo *et al.*, 2014 ; Widder *et al.*, 2019). Les observations de Frick et Newcombe (2015), qui relevaient que l'interprétation de représentations d'objets 3D constitue un challenge encore à 8 ans, sont donc ici confirmées et peuvent même être étendues pour les enfants plus âgés et les adolescents.

Pour autant, les résultats obtenus montrent que cette capacité à percevoir les objets 3D représentés en 2D, même si elle pose des difficultés, est principalement partiellement maîtrisée par les enfants et les adolescents. Si, dans les deux études, très peu de participants arrivent à percevoir adéquatement l'ensemble des objets proposés, une majorité d'entre eux arrivent à percevoir adéquatement au moins l'un d'eux. C'est le cas de plus de 90% des participants quand un choix multiple est autorisé et de plus de 75% quand un choix unique est imposé. De ce fait, comme pour les représentations 2 ½ D, il est possible de considérer que la perception de la 3^{ème} dimension au départ de

représentations 2D ne fonctionne pas non plus selon le principe du « tout ou rien » pour la majorité des enfants et des adolescents. D'ailleurs, même si on s'intéresse aux enfants de la première tranche d'âge, ils sont aussi capables de se représenter au moins certains objets 3D au départ de leur représentation, ce qui est cohérent avec les observations de Leighty *et al.* (2008) qui évoquaient une acquisition de cette capacité à partir de l'âge de 4 ans. Fournir une représentation 2D se rapportant à une vue à peu près de face et légèrement du dessus, correspondant à une vue plus habituelle de l'objet 3D, a sans doute favorisé la perception des représentations 2D d'objets (Parzysz, 2006 ; Widder *et al.*, 2014). Il est de même avec le fait d'avoir proposé des représentations 2D dans lesquelles les objets apparaissent dans des positions typiques (Sarfaty & Patkin, 2013), par exemple les cylindres debout sur leur base. Les résultats invitent cependant à relever que ce ne sont donc pas des conditions suffisantes pour assurer la perception adéquate de tous les enfants et les adolescents. Cette observation de la caractéristique non dichotomique de la perception de représentations 2D s'inscrit donc en décalage avec les observations mises en avant par Baldy (1988), qui a pu observer que la perception fonctionnait selon le principe du « tout ou rien » chez les adultes. Au-delà des divergences entre le public cible étudié, les divergences entre les objets sur lesquels la perception a été évaluée et sur la perspective utilisée constituent sans doute des raisons aux différences observées.

Puisque la perception des objets 3D au départ de leur représentation plane apparaît majoritairement partiellement maîtrisée, une similitude avec ce qui a pu être mis en évidence face aux représentations virtuelles peut donc être soulignée. Notons toutefois que, face à de telles représentations, nous avons pu relever que la plupart des participants percevaient adéquatement un nombre élevé d'objets 3D présentés alors qu'ici, les participants n'en perçoivent adéquatement que quelques-uns.

D'ailleurs, la comparaison des résultats obtenus à chacun des objets 3D, toutes tranches d'âge confondues, confirme que les cas de perception adéquate sont majoritairement moins nombreux au départ de représentations planes qu'au départ de représentations virtuelles. Des différences significatives entre les taux de perception adéquate des deux modalités sont en effet observées pour chacun des objets dans la seconde étude et pour tous les objets excepté le cylindre dans la première. Un tel constat confirme que les représentations 2D ont, pour la plupart des objets 3D, moins de chance d'aboutir à une image mentale correcte de l'objet 3D que les représentations

2 ½ D. De tels résultats semblent alors aller dans le sens des propos de Claisse (2020) qui évoque que le mouvement constitue une aide précieuse pour une meilleure vision dans l'espace. Ils permettent donc d'objectiver les propos de Mithalal (2010) qui considère que les représentations virtuelles occasionnent une baisse de la complexité de l'examen perceptif en comparaison aux représentations 2D.

Si cette tendance à la meilleure perception au départ de représentations virtuelles en comparaison aux représentations planes est observée dans les deux études, la fréquence des cas de perception inadéquate et de non-perception semble quant à elle différer entre les deux études, comme susmentionné.

Lorsque plusieurs choix leur sont autorisés (1^{ère} étude), on observe davantage de cas de perception inadéquate au départ de représentations planes en comparaison à ce qui est observé au départ de représentations virtuelles, impliquant la sélection de propositions 3D ne correspondant pas à l'objet qu'on souhaitait leur présenter. Un tel résultat peut s'expliquer par la présence d'aberrations visuelles inhérentes aux représentations 2D en perspective (déformation des angles, déformation des rapports de longueurs...), que Widder *et al.* (2014) considéraient comme des *Potentially misleading information*. Celle-ci doit être dépassée par l'individu en s'imaginant mentalement l'objet 3D en mouvement afin d'assurer sa bonne perception (Vivian *et al.*, 2014). Dans les représentations virtuelles, elles disparaissent puisque les mouvements sont externalisés, permettant ainsi notamment d'observer des informations sans déformation lorsque l'objet est placé dans certaines positions. Les représentations virtuelles permettent donc de dépasser certaines ambiguïtés pouvant être associées aux représentations planes (Smallmann *et al.*, 2001 ; Kovárová & Sokolský, 2011).

Comme au départ de représentations 2 ½ D, l'objet dont la hauteur est modifiée est majoritairement la propositions 3D non attendues la plus régulièrement sélectionnée. Une telle observation peut être rapprochée à une difficulté de prise en compte des informations métriques dans la lecture d'informations sur des représentations 2D, constatée par Frick et Newcombe (2015). L'argument relatif à la pensée catégorielle (Rossielle & Cooper, 2001) évoqué pour les représentations 2 ½ D semble ici peu adapté puisqu'on observe que la sélection de l'objet dont la hauteur est modifiée est aussi fortement sélectionnée pour la sphère et le cube.

En revanche, la sélection plus importante de cette proposition, et plus largement du cas de perception inadéquate, peut évidemment s'expliquer par l'argument relatif à l'ambiguïté associée aux représentations 2D, qu'on ne retrouve pas au départ de représentations virtuelles. Celui-ci fait référence à la non-bijectivité qui unit un objet et sa représentation 2D (Audibert & Keita, 1987 ; Pizlo *et al.*, 2010), pouvant être couplée à une non-maitrise des principes du mode de représentation utilisé. En effet, comme évoqué dans le chapitre 1 (volume 1), un même dessin en perspective pourrait par exemple représenter un cube ou un parallélépipède rectangle, tout dépend en réalité des conventions sélectionnées (Bayart *et al.*, 1996), qui ne sont ici pas décrites à l'individu et qui diffèrent en partie de celles qu'il rencontre habituellement en contexte scolaire. Cela inciterait donc, légitimement, les participants à sélectionner plusieurs propositions 3D, considérant que la représentation pourrait être celle de plusieurs éléments. Ce comportement n'est pas forcément le reflet d'un comportement mathématiquement incorrect. Prenons par exemple le cas de la sphère, dont la représentation 2D fournie est un rond. Pour cet exercice, il n'est pas faux de considérer que le rond est aussi une représentation 2D de l'objet 3D dont la hauteur a été modifiée (en l'occurrence une représentation 2D de l'objet 3D vu du dessus).

Même si la proposition 3D dont la hauteur a été modifiée est quasi systématiquement la plus sélectionnée, d'autres propositions 3D sont également sélectionnées avec un taux parfois important face à des représentations 2D, alors que cela ne se produisait pas au départ de représentations 2 ½ D. C'est le cas de la sélection de l'objet 3D dont la forme de la base a été modifiée. Cette proposition apparaît particulièrement sélectionnée pour l'exercice de l'anneau rond pour qui plus d'un participant sur cinq sélectionne un anneau ovale, faisant de cette proposition celle étant la plus sélectionnée. Elle l'est également par plus d'un participant sur dix pour le cône et le prisme. Cette erreur peut, comme pour la sélection d'autres propositions 3D non attendue, être le reflet de l'ambiguïté de la représentation 2D. Il est vrai que rien ne permet à l'individu, au départ uniquement de la représentation 2D de savoir la forme exacte de l'objet. Par exemple, sans connaître les règles de la perspective utilisée et sans avoir d'informations sur cette dernière, rien ne permet de savoir que la base de l'élément conique est ronde, que l'anneau est de forme ronde, ou que le prisme a une base qui est un triangle équilatéral. Pour autant, cette erreur permet de suspecter une difficulté à dépasser la perspective égocentrée (au sens des recherches piagétienne), associée à une dépendance à ses propres perceptions sans prise en compte de la

perspective. En effet, la particularité de ces propositions est que la ou les bases de l'objet 3D correspondent aux formes des bases telles que présentées sur le dessin en perspective. Or, même si rien ne lui permet de dire la forme exacte de la base de l'objet 3D, l'individu qui est capable de dépasser son point de vue devrait *a minima* admettre que la base de l'objet en réalité ne peut pas être exactement la même que celle sur sa représentation en perspective. C'est particulièrement le cas pour le prisme pour qui la forme de la base supérieure est perçue sur la représentation 2D ou pour l'anneau dont la forme ovale de l'objet correspond à la forme ovale de la représentation 2D. Pour le cône, cela est sans doute plus complexe à percevoir puisque la forme de la base n'est pas directement visible sur la représentation 2D. Il y a donc des enfants et des adolescents qui considèrent la représentation 2D comme une bonne représentation de l'objet réel, du moins pour certains d'entre eux, et qui ne sont pas conscients de la perte d'informations ou des transformations d'informations occasionnées par de telles représentations (Gutiérrez, 1996 ; Haj-Yahya, 2021), ce qui semble peu observé face aux représentations virtuelles. Ainsi, face à des représentations 2D, on observe que des enfants en restent au premier niveau du modèle de Kondo *et al.* (2014), marqué par une influence de la représentation (*cf.* 4.1.6, volume 1). Cela ne semble pas être le cas face aux représentations virtuelles, bien qu'ils n'arrivent pas pour autant systématiquement au niveau de pensée le plus élevé.

D'une certaine façon, pour les enfants et les adolescents qui sélectionnent cette proposition au départ de représentations 2D, ce qui est « vu » sur la représentation est assimilé à l'objet 3D. Pour autant, même si le terme « vu » est ici proposé en analogie aux propos de Parzys (1988), il ne s'agit pas ici du conflit évoqué par l'auteur entre le « vu » et le « su » dans la mesure où les tâches proposées ne nécessitent pas de dépasser ce qui est présenté sur une représentation au profit de savoirs géométriques fournis sur ce qui est représenté, mais bien au profit de ce qu'est ou ce que pourrait être l'objet 3D présenté. Ces enfants et adolescents qui sélectionnent cette proposition appréhendent les formes présentes sur la représentation 2D comme des constantes, ce qui rend la perception impossible (Piaget & Inhelder, 1948). Ils n'arrivent en effet pas à s'imaginer l'objet en mouvement et à imaginer le changement que cela occasionnerait sur la forme alors que, d'après les auteurs, cette imagination du mouvement occupe un rôle essentiel pour se créer une image mentale correcte des objets 3D. Il s'agit d'ailleurs là d'une explication à la plus faible sélection de telles propositions 3D au départ de représentations 2 ½ D. Ces représentations externalisent

ces mouvements de l'objet 3D, ce qui constitue sans doute une aide pour éviter cette erreur. La sélection de cette proposition est parfois observée au départ de représentations 2D. Néanmoins, l'irrégularité de cette erreur et son absence presque totale par exemple pour l'exercice du cube (3,8%) et du cylindre (2,5%) indique cependant que la majorité des enfants âgés de 6 à 15 ans sont tout de même capables de dépasser la perspective égocentrée au départ de représentations planes de certains objets 3D. Autrement dit, la recherche indique que, dès 6 ans, la majorité des enfants sont capables d'inhiber ce qui est « vu » sur la représentation dans le cadre de la perception de la forme des objets 3D même s'ils semblent ne pas le faire pour tous les objets 3D représentés. Ils semblent donc capables d'imaginer l'objet 3D en mouvement ou *a minima* d'accepter le caractère non constant des formes présentes sur la représentation 2D. La sélection de propositions 2D différentes de celle correspondant parfaitement à la représentation 2D fournie au départ (ex. sélection de la représentation 2D de l'objet après rotation vers l'avant, l'arrière, la gauche ou la droite), assortie de verbatims permettant de confirmer un passage à la 3^{ème} dimension constitue un autre exemple de cas illustrant cette capacité à s'imaginer l'objet représenté en mouvement.

Même si les cas de perception inadéquate, quelle que soit la proposition choisie, apparaissent légitimes compte tenu de la nature des représentations 2D, il n'en reste pas moins que cela s'avère problématique si on se place dans le cas où on souhaite présenter ou faire découvrir un objet 3D bien précis aux enfants et aux adolescents. Ces derniers peuvent en effet l'envisager comme l'objet qu'on souhaitait leur présenter mais aussi comme un autre objet 3D, ce qui pourrait provoquer des difficultés dans les tâches qui lui seront demandées ensuite. D'autant qu'il arrive aussi que le participant sélectionne un ou plusieurs objets 3D non attendus sans sélectionner l'objet 3D attendu. C'est par exemple particulièrement le cas pour le prisme puisque sur les près de 60% ne percevant pas adéquatement l'objet 3D, plus de la moitié d'entre eux sélectionnent des propositions 3D non attendues sans pour autant l'envisager comme pouvant être l'objet 3D attendu. Un tel constat confirme que les représentations 2D ont, *a minima* pour certains objets 3D, moins de chance d'aboutir à une image mentale correcte et unique de l'objet 3D que les représentations 2 ½ D.

Les cas de perception inadéquate sont les erreurs les plus fréquentes pour la plupart des objets 3D au départ de représentations planes et sont plus observées que face à des représentations virtuelles. Toutefois, davantage de cas de non-perception

apparaissent aussi au départ de représentations planes pour plusieurs des objets 3D, ce qui est cohérent avec ce que Krylova et Vodyakha (2022) ont mis en évidence auprès d'enfants âgés de 4 à 6 ans. Un tel résultat peut aussi être expliqué par les caractéristiques des représentations 2D et des représentations 2 ½ D. En effet, les représentations planes sont moins réalistes que les représentations virtuelles (Sanandaji *et al.*, 2017). Elles offrent, par nature, moins d'informations relatives à la troisième dimension qui doivent alors être reconstruites mentalement par l'observateur. Cela constitue une source de difficultés (Bakó, 2003 ; Haj-Yahya, 2021) absente face à des représentations 2 ½ D, qui, grâce à leur caractère dynamique, permettent à l'individu d'accéder à ces informations manquantes.

Malgré ces fréquences parfois élevées associées au cas de non-perception face à des représentations planes, les résultats de l'étude permettent de relever que la difficulté associée à la sélection de propositions 2D ne se situe pas dans le fait de ne pas concevoir qu'une illustration plane peut permettre de représenter un objet tridimensionnel puisqu'il arrive à chaque participant de sélectionner, au moins à une reprise, une proposition 3D au départ de représentations planes. Le problème ne semble donc pas se situer dans une conception erronée des représentations planes, qui auraient pu être perçues comme des éléments ne permettant pas de représenter des objets 3D, mais bien dans la perception spécifique de certains objets.

Dans la seconde étude, lorsqu'un choix unique est proposé, la fréquence des cas de perception inadéquate observée au départ des représentations 2D est proche de celle observée au départ de représentations virtuelles. On retrouve également une similitude dans les erreurs commises puisque l'objet 3D dont la hauteur est modifiée est la proposition majoritairement sélectionnée. Toutefois, comme dans la première étude, la sélection de la proposition 3D dont la forme est modifiée pour correspondre à ce qui apparaît sur le dessin en perspective est sélectionnée pour certains objets, ce qui peut être expliqué par les raisons apportées précédemment.

Dans cette étude, le plus faible taux de perception adéquate observé entre représentations planes et virtuelles se rapporte majoritairement au cas de non-perception. Pour tous les objets 3D, ce cas de figure est bien plus fréquent au départ de représentations planes ce qui apparaît donc également cohérent avec l'observation de Krylova et Vodyakha (2022). Par ailleurs, comme évoqué précédemment, ce type de comportement est davantage observé quand un choix unique est imposé. Les

comportements bidimensionnels, que Pittalis et Christou (2013) ont pu mettre en évidence, sont donc bel et bien confirmés face à des représentations 2D.

Si des divergences sont observées entre les deux études, celles-ci ne sont cependant pas incohérentes. En effet, il est possible de suspecter que, pour une partie des participants ayant sélectionné le choix 3D, c'est également l'ambiguïté des représentations 2D, qui a incité les participants à sélectionner une proposition 2D quand le choix leur a été restreint. Si, face à un choix multiple, cette ambiguïté les incite à sélectionner plusieurs propositions 3D, y compris des propositions non attendues, le fait de limiter les choix à une proposition pourrait les avoir incités à se rabattre sur une proposition 2D pour ne pas avoir à choisir une seule des propositions 3D. Toutefois, il est possible de suspecter que ce choix n'exclut pas que l'enfant ou l'adolescent puisse considérer que la représentation présentée pourrait être assimilée à un objet 3D. Il s'agit donc à nouveau de rester méfiant dans l'interprétation des cas de non-perception, comme cela a pu être évoqué au départ de représentations virtuelles.

9.4.3.2. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation plane : habileté qui varie entre les objets 3D comme c'est le cas pour les représentations virtuelles

Comme au départ de représentations 2 ½ D, la perception d'objets 3D au départ de représentations 2D est marquée par des différences parfois importantes selon les objets 3D à percevoir. Cela confirme donc bien que la perception de la 3D est dépendante des objets 3D à percevoir, même face à des représentations planes. Les fortes difficultés associées au prisme dans les deux modalités permettent de montrer l'existence de points communs entre celles-ci. Toutefois, les différences entre les objets 3D ne vont pas forcément dans le même sens et l'exemple de la sphère l'illustre bien. En effet, il s'agit d'un objet dont la perception apparaît particulièrement problématique au départ d'une représentation 2D, ce qui était loin d'être le cas au départ de sa représentation 2 ½ D, en particulier à manipuler. D'ailleurs, cela permet d'illustrer à nouveau que le nombre de distracteurs proposés n'est pas une condition suffisante pour expliquer ni le niveau de maîtrise de la perception de l'objet ni les différences entre objets 3D. Si une partie de cette complexité de perception est due à l'ambiguïté, précédemment évoquée, pouvant être associée à la nature même de la représentation 2D, il n'en reste pas moins que, face à un choix multiple, seuls 40% des participants envisagent que la représentation fournie puisse être celle d'une sphère ce qui souligne

la présence d'une difficulté à se représenter mentalement cet objet au départ d'une représentation plane.

Par ailleurs, au-delà d'observer des différences entre objets 3D, des difficultés variables selon les individus, déjà mises en évidence par Christou *et al.* (2005, cités par Widder *et al.*, 2019), sont constatées face à des représentations 2D. Cela constitue donc un point commun supplémentaire avec ce qui est observé dans l'environnement virtuel.

9.4.3.3. Percevoir les objets 3D au départ de leur représentation plane : une habileté proche de la perception de représentations virtuelles chez les plus jeunes enfants mais qui évolue différemment

Si les observations menées sans prendre en compte les différentes tranches d'âge permettent de relever des difficultés de perception face aux représentations planes ainsi que des écarts entre les représentations virtuelles et cette modalité de représentation, la prise en compte de la variable âge permet de nuancer quelque peu ces propos.

La comparaison des résultats aux différentes tranches d'âge permet, dans les deux études, d'observer une plus grande proximité, pour la plupart des objets 3D, entre les taux de perception adéquate obtenus au départ de représentations 2D et de représentations 2 ½ D chez les enfants âgés de 6 à 7 ans voire de 8-9 ans, ce qui est moins observé dans les tranches suivantes. Ces résultats apparaissent donc en partie cohérents avec les observations menées par Krylova et Vodyakha (2022) auprès d'enfants âgés de 4 à 6 ans, qui ont mis en évidence une proximité des capacités de perception au départ de représentations virtuelles et de représentations 2D. Même si les représentations 2 ½ D rendent concrètes les manipulations qui doivent être mises en œuvre mentalement par le sujet au départ de représentations 2D, cela ne suffit donc pas toujours aux enfants plus jeunes pour occasionner de meilleures capacités de perception que les représentations 2D. Nous avons d'ailleurs pu précédemment mettre en avant des arguments permettant d'expliquer les difficultés associées à la perception au départ de représentations virtuelles, en particulier chez les plus jeunes enfants en évoquant les raisons susceptibles d'expliquer l'amélioration des performances de perception avec l'âge (capacité de rotation mentale nécessaire...).

En investiguant la situation des enfants aux tranches d'âge suivantes, les taux de perception adéquate semblent par contre évoluer différemment au départ de

représentations virtuelles et planes, créant ainsi des différences plus importantes entre les deux modalités, à l'avantage des représentations virtuelles. Ainsi, des différences apparaissent pour la majorité des objets entre représentations 2D et 2 ½ D, qu'elles soient à manipuler ou à observer. Les indices de corrélation calculés avec l'âge en sont le reflet. De tels résultats invitent donc à ne pas généraliser les constats de proximité entre perception de représentations 2D et 2 ½ D de Krylova et Vodyakha (2022) à l'ensemble des tranches d'âge et à investiguer ces divergences entre les deux supports. Étant donné cette évolution différente de la perception au départ de représentations 2 ½ D et de représentations 2D, il semble possible de considérer que les représentations virtuelles aident, pour la plupart des objets 3D, les enfants plus âgés et les adolescents, à former des images mentales plus riches des objets 3D qu'avec des représentations 2D, ce qui est en cohérence avec ce que Christou *et al.* (2006) suggéraient.

Comme évoqué dans la discussion relative au groupe 1 (*cf.* 9.1.3), une amélioration des capacités de perception a pu être observée pour certains objets 3D, par exemple le prisme, impliquant ainsi soit une diminution des propositions 3D non attendues, soit une prise de conscience de la 3D. Toutefois, les capacités relatives à d'autres objets ne semblaient pas forcément s'améliorer avec l'âge. Face aux représentations 2D, la première étude montre que les capacités de perception n'augmentent avec l'âge pour aucun des objets 3D. La seconde étude montre même que les cas de perception adéquate diminuent avec l'âge pour la plupart des objets 3D. L'analyse des choix réalisés indique qu'en grandissant, les individus ont moins tendance à choisir une proposition 3D incorrecte face à une représentation 2D, comme c'est d'ailleurs le cas face à des représentations virtuelles d'objets 3D. Pour autant, la sélection d'une proposition 2D augmente quant à elle fortement.

L'évolution constatée dans les études semble permettre de suggérer une modification dans la manière de raisonner chez les enfants et les adolescents. Plus jeune, une partie des enfants semblent davantage prendre appui sur la perception globale de la forme présentée, sans forcément prendre conscience du fait que la représentation pourrait faire écho à d'autres objets que celui perçu au premier regard, ce qui peut être mis en parallèle à la théorie de Duval (2005) et plus particulièrement au mode de visualisation iconique identifié par l'auteur. En grandissant, les individus sont en revanche confrontés à une prise de conscience de l'ambiguïté des représentations 2D précédemment évoquée.

Cette prise de conscience, en cas de choix multiple (étude 1), se manifeste par la tendance à sélectionner davantage de propositions 3D, que ce soit les propositions 3D attendues ou les propositions 3D non attendues, ce qui n'impacte pas ou peu l'évolution des taux de perception adéquate et inadéquate. En cas de choix unique (étude 2), les individus semblent plutôt se diriger vers la sélection d'une proposition 2D, estimant, comme évoqué précédemment, qu'il n'est pas possible de privilégier une seule proposition 3D ou même plus largement que l'ambiguïté de la perception ne permet pas de dire si ce qui est présenté est un objet 3D. Rappelons que cette prise de conscience de l'ambiguïté n'est pas le reflet d'un raisonnement mathématique qui deviendrait moins efficace.

Ce constat relatif à l'évolution du raisonnement sur les représentations 2D se manifeste donc, dans la tâche proposée, par une absence d'amélioration des capacités à percevoir adéquatement les représentations 2D d'objets 3D avec l'âge. Cette conclusion d'absence d'amélioration peut apparaître en contradiction avec les résultats de recherches antérieures ayant mis en évidence une amélioration avec l'âge des capacités à percevoir les objets 3D au départ de leur représentation 2D (Frick *et al.*, 2014 ; Frick & Newcombe, 2015) ou même d'autres tâches impliquant les processus perceptifs (ex. positionnement d'éléments d'une configuration d'objets 3D) au départ de représentations 2D (Brown, 1969). Toutefois, ce décalage peut notamment être expliqué par la façon dont la perception est évaluée et par ce qui est ici considéré ici comme perception adéquate.

9.5. Réponse à la question de recherche 1.5° : perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique

Comme présenté en deuxième partie de ce travail (volume 1), seule la seconde étude participe à l'apport d'éléments de réponse à la cinquième question de recherche. Pour ce faire, les groupes 1 et 3 de cette étude sont comparés de façon à investiguer les différences entre représentations virtuelles et matériel physique quand les supports peuvent être manipulés. Il en va de même avec les groupes 2 et 4 pour identifier ce qu'il en est lorsque la manipulation des supports n'est pas autorisée. Enfin, des comparaisons sont, quand cela s'avère pertinent, réalisées entre les groupes 3 et 4 afin d'identifier si un effet de manipulation peut être suspecté sur le matériel physique. L'éventuel effet de manipulation dans l'espace sensible pourra alors être comparé à celui observé dans l'environnement virtuel (*cf.* question 1.2°) afin de relever des similitudes ou des divergences entre les deux modalités.

9.5.1. Résultats relatifs à la seconde étude expérimentale (groupe 1 vs groupe 3 ; groupe 2 vs groupe 4 ; groupe 3 vs groupe 4)

9.5.1.1. Différence entre perception de représentations virtuelles et de matériel physique pour chaque objet

a. Analyses générales

Le Tableau 66²⁰ présente le taux de perception adéquate observé pour chaque objet 3D au sein des groupes confrontés à des représentations virtuelles et à du matériel physique. Les résultats montrent que les taux de perception adéquate sont systématiquement plus élevés dans les groupes confrontés à du matériel physique que dans le groupe confronté à des représentations virtuelles, à la fois quand le matériel est manipulé et quand il est uniquement observé. Ces résultats invitent à considérer que la perception des différents objets 3D pose plus de difficultés au départ de représentations virtuelles que de matériel physique.

Dans le groupe confronté à du matériel physique, chacun des objets 3D a été perçu par plus de trois quarts des participants et certains sont parfois perçus par la quasi-totalité d'entre eux. Plus particulièrement, face à du matériel physique à manipuler, les taux varient entre 77,8% (pour le prisme) et 95,4% (pour la sphère) et cinq des sept

²⁰ Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

objets ont un taux supérieur à 90%. Face au matériel virtuel à manipuler, rappelons qu'il varie entre 64,9% (pour le prisme) et 90,1% (pour la sphère). Quand le matériel physique est à observer, le taux varie entre 82,2% (pour le prisme) et 97,2% (pour la sphère et le cube) alors que pour le matériel virtuel à observer, il varie entre 58,6% (pour le prisme) et 77,5% (pour l'anneau droit). Il apparaît donc que, face à du matériel physique, la majorité des participants arrivent à percevoir les objets 3D.

Tableau 66 : Taux de perception adéquate de chaque objet 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique : pourcentage (2^e étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G1 : manip. 2½D (N = 111)	68,5%	71,2%	90,1%	64,9%	84,7%	70,3%	77,5%
G3 : manip. 3D (N = 108)	90,7%	88,9%	95,4%	77,8%	92,6%	93,5%	92,6%
G2 : obs. 2½D (N = 111)	65,8%	66,7%	75,7%	58,6%	70,3%	73,0%	77,5%
G4 : obs. 3D (N = 107)	88,8%	96,3%	97,2%	82,2%	87,9%	97,2%	85,1%

Malgré les écarts observés entre les taux des deux modalités, des points communs sont néanmoins constatés entre les groupes confrontés à du matériel physique et virtuel. Comme présenté, l'objet 3D qui pose le plus de difficultés aux participants est le prisme. De plus, les tests *Q de Cochran*, visant à vérifier l'existence de différences entre les taux observés dans les sept exercices, s'avèrent significatifs à la fois dans le groupe 3 ($Q = 34,479$; $p\text{-value} = 0,015$) et dans le groupe 4 ($Q = 30,462$; $p\text{-value} < 0,001$). De ce fait, il est possible de considérer que la maîtrise de la perception visuelle varie entre les objets 3D. Un tel constat est donc similaire à celui réalisé dans les groupes 1 ($Q = 30,328$; $p\text{-value} < 0,001$) et 2 ($Q = 15,809$; $p\text{-value} < 0,001$).

Même si les différences sont significatives dans les quatre groupes, les écarts entre les taux de perception adéquate des objets 3D sont légèrement plus élevés dans le groupe confronté à des représentations 2 ½ D que dans ceux confrontés au matériel physique. De plus, le prisme est l'objet qui obtient le taux le plus faible dans les quatre groupes et la sphère obtient l'un de ceux les plus forts. Ce taux relatif à la sphère apparaît clairement moins élevé dans le groupe 2 en comparaison aux autres groupes.

Les analyses inférentielles utilisées pour identifier les différences entre les objets deux à deux (Annexe 26) indiquent que ces différences sont plus régulières dans le groupe 1 que dans le groupe 3. Elles s'observent uniquement entre le prisme et tous

les autres dans le groupe 3, alors qu'elles apparaissent aussi entre la sphère et la plupart des objets 3D dans le groupe 1. À l'inverse, les différences significatives entre paires d'objets 3D sont plus nombreuses dans le groupe 4 que dans le groupe 2.

Au-delà de l'observation des taux relatifs à chaque objet, l'analyse de la répartition des participants selon le nombre d'éléments adéquatement perçus (Figure 26) permet de mettre en évidence des tendances différentes entre les groupes confrontés à du matériel physique et à des représentations virtuelles. Concernant le matériel physique, il apparaît que, dans les deux groupes, plus de la moitié des enfants et des adolescents ont choisi tous les objets 3D attendus et ont donc perçu adéquatement tous les objets présentés. Le pourcentage d'enfants et d'adolescents dans ce cas de figure est de 65,7% dans le groupe 3 et de 56,1% dans le groupe 4. La part d'enfants et d'adolescents ayant perçu adéquatement six objets sur les sept diminue quant à elle fortement puisqu'elle atteint respectivement 17,6% et 26,2%. Au plus le nombre d'objets adéquatement perçus diminue, au plus le pourcentage d'enfants et d'adolescents concernés diminue également, jusqu'à être quasiment nul pour les cas où trois, deux, un ou aucun objet 3D ne sont perçus adéquatement.

Si une répartition croissante apparaît aussi dans les groupes confrontés à des représentations virtuelles, celle-ci apparaît moins marquée. Comme pour le matériel physique, très peu d'enfants et d'adolescents ne perçoivent adéquatement aucun objet 3D. Pour autant, le taux d'enfants et d'adolescents ayant perçu adéquatement les sept objets 3D n'excède jamais 25% de l'échantillon, même si la majorité des participants confrontés à cette modalité perçoivent adéquatement la plupart des objets 3D proposés. De tels résultats montrent que l'habileté est plus souvent complètement maîtrisée, en tout cas pour les sept objets ici investigués, face à du matériel physique alors qu'elle reste majoritairement partiellement maîtrisée face à des représentations virtuelles.

Même si, face à du matériel physique, la majorité des participants perçoivent adéquatement l'ensemble des objets 3D, il arrive à certains d'entre eux de ne pas percevoir l'un ou l'autre objet 3D. Lorsqu'un seul objet n'est pas perçu adéquatement, l'annexe 27 permet d'identifier qu'il s'agit majoritairement du prisme dans le groupe 3. Toutefois, il arrive, plus rarement, que ce soit le cône, l'anneau droit ou encore le cylindre. Dans le groupe 4, on constate en revanche que, dans ce cas de figure, l'objet 3D qui n'est pas perçu adéquatement n'est jamais le cube mais il arrive que ce soit tous

les autres objets 3D. De tels résultats montrent une certaine irrégularité entre les participants par rapport aux objets leur posant des difficultés. La présence de cette irrégularité constitue un point commun avec ce qui peut être observé au départ de représentations virtuelles.

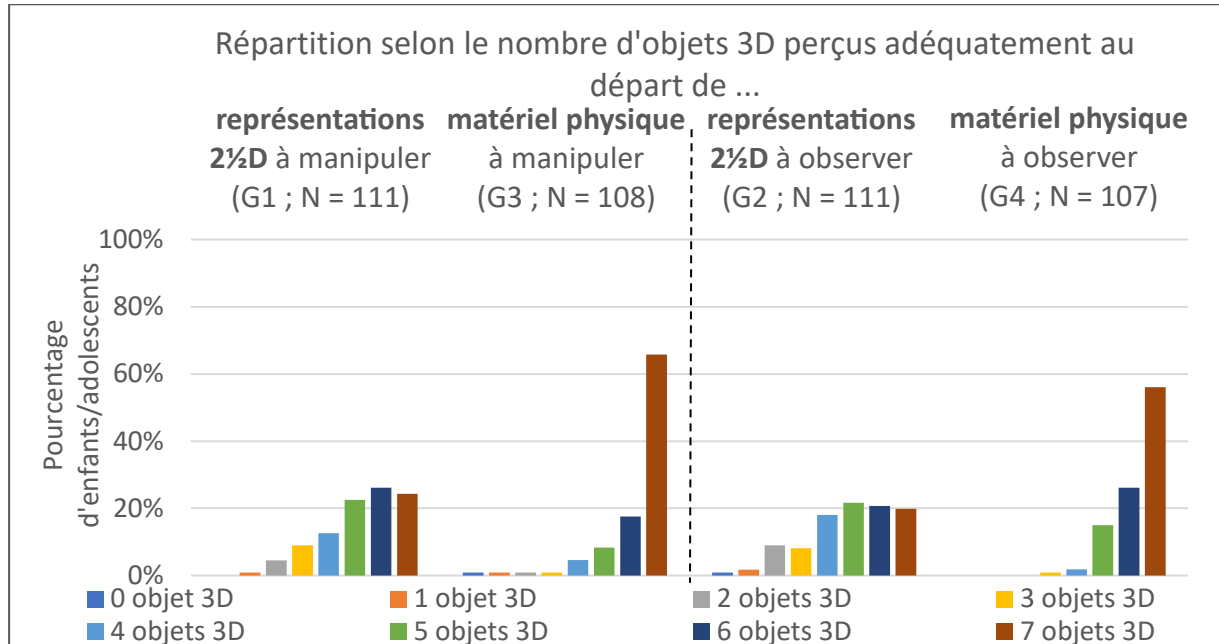


Figure 26 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles et de matériel physique (2^e étude)

Dans les quelques cas où les objets 3D ne sont pas adéquatement perçus au départ du matériel physique, il arrive à certains participants de percevoir de manière inadéquate l'objet 3D en sélectionnant une autre proposition 3D et à d'autres de plutôt se situer dans un cas de non-perception de l'objet 3D. Le Tableau 67²¹ présente la fréquence de ces deux situations pour chacun des objets 3D. Selon les objets 3D, il arrive à l'un ou l'autre des cas d'être plus présent. Par exemple, pour le cylindre, les cas de perception inadéquate sont absents ou presque et les participants qui ne perçoivent pas adéquatement l'objet tendent plutôt à sélectionner une proposition 2D alors que la situation inverse est observée pour le prisme. Cette variabilité entre les objets 3D concernant les types de comportement perceptif peut également être mise en évidence quand les individus sont confrontés aux représentations 2 ½ D. Les résultats relatifs aux deux exemples cités, à savoir le cylindre et le prisme, tendent à aller dans la même direction que pour le matériel physique.

²¹ Dans le tableau, le taux de perception, l'objet obtenant le taux le plus élevé est indiqué en vert alors que celui obtenant le taux le plus faible y est indiqué en orange.

Tableau 67 : Taux de perception inadéquate et de non-perception de chaque objet 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique : pourcentage (2^e étude)

		Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Perception inadéquate	G1 : manip. 2½D (N = 111)	12,6%	15,3%	2,7%	22,5%	9,9%	13,5%	10,8%
	G3 : manip. 3D (N = 108)	0,9%	3,7%	0,0%	11,1%	0,9%	0,9%	1,9%
	G2 : obs. 2½D (N = 111)	6,3%	19,8%	7,2%	24,3%	18,0%	4,5%	8,1%
	G4 : obs. 3D (N = 107)	0,9%	1,9%	1,9%	13,1%	7,5%	0,0%	11,2%
Non-perception (avec prise en compte des verbatims)	G1 : manip. 2½D (N = 111)	18,0%	13,5%	6,3%	9,0%	5,4%	13,5%	9,0%
	G3 : manip. 3D (N = 108)	8,3%	7,4%	4,6%	8,3%	6,5%	5,6%	4,6%
	G2 : obs. 2½D (N = 111)	20,7%	11,7%	16,2%	10,8%	9,9%	15,3%	13,5%
	G4 : obs. 3D (N = 107)	8,4%	1,9%	0,9%	2,8%	3,7%	2,8%	2,8%

Les cas de perception inadéquate sont moins récurrents dans les groupes confrontés à du matériel physique que face à des représentations virtuelles, sauf pour l'exercice relatif à l'anneau droit quand le matériel ne peut être manipulé. On observe par ailleurs que ce type de comportement perceptif est quasiment absent pour tous les objets face à du matériel physique à manipuler sauf pour le prisme (11,1%) Il est même complètement absent pour la sphère. Quand le matériel physique est observé uniquement, ce cas de figure est peu présent pour le cylindre, le cône et la sphère. Il est absent pour le cube mais est en revanche plus fréquent pour l'anneau rond (7,5%), l'anneau droit (11,2%) et le prisme (13,1%).

Plus particulièrement, l'analyse des choix 3D non attendus les plus souvent sélectionnés (Annexe 29) indique que, pour l'anneau rond, la seule proposition sélectionnée face au matériel physique est la sélection d'un objet 3D dont la hauteur est modifiée, comme c'était majoritairement le cas face à des représentations virtuelles. Les rares cas de sélection d'objets 3D non attendus observés pour le cube, le cône, le cylindre et la sphère se rapportent tous à cette proposition. Pour l'anneau droit, c'est la proposition de l'objet dont les bords ont été modifiés (correspondant à un anneau rond à bord rond) qui est la plus sélectionnée face au matériel physique, la proposition relative à la hauteur modifiée étant plus rare (groupe 4), voire absente (groupe 3). Rappelons que, dans l'environnement virtuel, c'était aussi une des erreurs

les plus fréquentes, avec la sélection de l'objet dont la hauteur est modifiée. Enfin, pour le prisme, plusieurs propositions 3D sont sélectionnées comme dans l'environnement virtuel. C'est le cas notamment de la sélection de l'objet incliné et de celui dont la hauteur a été modifiée.

Par ailleurs, on remarque que, pour tous les objets, la sélection de la proposition 3D dont la hauteur est modifiée est moins fréquente que dans l'environnement virtuel, excepté pour le cube où elle était déjà absente.

Concernant les cas de non-perception des objets 3D, les taux observés indiquent que ces cas sont aussi majoritairement moins observés face à du matériel physique que face aux représentations 2 ½ D. Le taux associé à ce cas de figure n'excède 10% pour aucun des objets 3D investigués, contrairement à ce qu'on observe dans l'environnement virtuel.

b. Analyses inférentielles comparatives

Les analyses générales préalablement présentées ont montré que, pour chaque objet, les cas de perception adéquate sont plus fréquents dans les groupes confrontés à du matériel physique, contrairement aux cas de perception inadéquate et de non-perception, majoritairement plus élevés face aux représentations virtuelles. Afin de statuer sur un effet de la dimensionnalité sur la maîtrise de la perception, le Tableau 68 présente les résultats de *tests du Khi-carré* (ou alternative).

Concernant les groupes confrontés à des représentations 2 ½ D et à du matériel physique à manipuler, des résultats significatifs sont observés au niveau de la perception adéquate de tous les objets 3D sauf la sphère ($\chi^2 = 2,254$; $p\text{-value} = 0,133$) et l'anneau rond ($\chi^2 = 3,385$; $p\text{-value} = 0,066$). Pour les cinq autres objets, une influence de la dimensionnalité du support est constatée et les analyses générales présentées préalablement montrent des résultats en faveur du matériel physique. Les différences semblent se situer majoritairement au niveau des taux de perception inadéquate puisque les résultats relatifs à ce taux sont significatifs pour tous les objets 3D, sauf pour la sphère où les choix 3D non attendus sont rares, voire absents dans les deux groupes. Des résultats non significatifs sont en revanche observés au niveau des cas de non-perception de la 3D, sauf pour le cube ($\chi^2 = 3,999$; $p\text{-value} = 0,046$) et le cylindre ($\chi^2 = 4,469$; $p\text{-value} = 0,035$), avec des cas de non-perception plus nombreux face aux représentations 2 ½ D.

Concernant la comparaison des groupes confrontés à des représentations 2 ½ D et 3D mais cette fois sans manipulation, les analyses inférentielles indiquent que la perception adéquate est dépendante de la dimensionnalité du support pour tous les objets 3D sauf l'anneau droit ($\chi^2 = 2,044$; $p\text{-value} = 0,153$). Pour le taux de perception inadéquate, des résultats significatifs ne sont constatés que pour le cône ($\chi^2 = 17,919$; $p\text{-value} < 0,001$), le prisme ($\chi^2 = 4,508$; $p\text{-value} = 0,034$) et l'anneau rond ($\chi^2 = 5,408$; $p\text{-value} = 0,020$). Pour les autres objets 3D, les résultats sont non significatifs, mais parfois proches du seuil de significativité. Pour les taux de non-perception, les résultats significatifs concernent tous les objets 3D sauf l'anneau rond qui obtient des résultats à la limite de la significativité ($\chi^2 = 3,239$; $p\text{-value} = 0,072$).

Tableau 68 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3, G2 et G4, et G3 et G4 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et $p\text{-value}$ (p) (2^e étude)

		Taux de perception adéquate	Taux de perception inadéquate	Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims)
G1-G3	Cylindre	$\chi^2 = 16,653$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 11,718$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 4,469$ $p = 0,035^*$
	Cône	$\chi^2 = 10,703$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 8,513$ $p = 0,004^{**}$	$\chi^2 = 2,171$ $p = 0,141$
	Sphère	$\chi^2 = 2,254$ $p = 0,133$	Test exact de F. = 2,959 $p = 0,247$	$\chi^2 = 0,297$ $p = 0,586$
	Prisme	$\chi^2 = 4,454$ $p = 0,035^*$	$\chi^2 = 5,077$ $p = 0,024^*$	$\chi^2 = 0,032$ $p = 0,859$
	Anneau rond	$\chi^2 = 3,385$ $p = 0,066$	$\chi^2 = 8,531$ $p = 0,003^{**}$	$\chi^2 = 0,114$ $p = 0,736$
	Cube	$\chi^2 = 19,818$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 12,807$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 3,999$ $p = 0,046^*$
	Anneau droit	$\chi^2 = 9,772$ $p = 0,002^{**}$	$\chi^2 = 7,342$ $p = 0,007^{**}$	$\chi^2 = 1,645$ $p = 0,200$
G2-G4	Cylindre	$\chi^2 = 16,333$ $p < 0,001^{**}$	Test exact de F. = 4,447 $p = 0,066$	$\chi^2 = 6,591$ $p = 0,010^*$
	Cône	$\chi^2 = 31,250$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 17,919$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 8,237$ $p = 0,004^{**}$
	Sphère	$\chi^2 = 21,261$ $p < 0,001^{**}$	Test exact de F. = 3,547 $p = 0,102$	$\chi^2 = 15,992$ $p < 0,001^{**}$
	Prisme	$\chi^2 = 14,604$ $p < 0,001^{**}$	$\chi^2 = 4,508$ $p = 0,034^*$	$\chi^2 = 5,452$ $p = 0,020^*$
	Anneau rond	$\chi^2 = 10,114$ $p = 0,001^{**}$	$\chi^2 = 5,408$ $p = 0,020^*$	$\chi^2 = 3,239$ $p = 0,072$
	Cube	$\chi^2 = 24,885$ $p < 0,001^{**}$	Test exact de F. = 4,933 $p = 0,060$	$\chi^2 = 10,235$ $p = 0,001^{**}$
	Anneau droit	$\chi^2 = 2,044$ $p = 0,153$	$\chi^2 = 0,604$ $p = 0,437$	$\chi^2 = 8,249$ $p = 0,004^{**}$

Quand le matériel peut être manipulé, les écarts de perception adéquate constatés pour la majorité des objets 3D entre matériel physique et représentations virtuelles s'expliquent surtout par des cas de perception inadéquate plus faible face au matériel physique. Quand le matériel est uniquement observé, les écarts constatés pour la majorité des objets également s'expliquent davantage par des cas moins nombreux de non-perception face à du matériel physique.

Enfin, pour la comparaison des groupes 3 et 4 (Tableau 69), des résultats significatifs sont observés pour le taux de perception adéquate du cône uniquement ($\chi^2 = 4,242$; $p\text{-value} = 0,039$), avec un taux plus élevé dans le groupe 4. Par ailleurs, les taux de perception inadéquate sont dépendants de la place accordée à la manipulation pour deux des objets 3D : l'anneau rond (*Test exact de Fisher* = 5,751 ; $p\text{-value} = 0,019$) et l'anneau droit ($\chi^2 = 7,740$; $p\text{-value} = 0,005$). Pour ces objets 3D, les taux sont plus faibles dans le groupe 3 que dans le groupe 4. La non-perception de tous les objets 3D peut en revanche être considérée comme indépendante de la place accordée à la manipulation du matériel physique puisque tous les résultats obtenus à ce sujet apparaissent non significatifs.

Si un effet de manipulation au départ du support virtuel a été mis en évidence pour un nombre minoritaire d'objets 3D (cf. 9.2.2.1), il est possible d'en dire autant face au matériel physique même si les objets concernés et le sens des effets ne sont pas identiques.

Tableau 69 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3, G2 et G4, et G3 et G4 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et $p\text{-value}$ (p) (2^e étude)

		Taux de perception adéquate	Taux de perception inadéquate	Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims)
G3-G4	Cylindre	$\chi^2 = 0,224$ $p = 0,636$	<i>Test exact de F.</i> = 0,000 $p = 1,000$	$\chi^2 = 1,121$ $p = 0,290$
	Cône	$\chi^2 = 4,242$ $p = 0,039^*$	$\chi^2 = 0,667$ $p = 0,414$	<i>Test exact de F.</i> = 3,717 $p = 0,101$
	Sphère	<i>Test exact de F.</i> = 0,500 $p = 0,479$	<i>Test exact de F.</i> = 2,038 $p = 0,247$	<i>Test exact de F.</i> = 2,705 $p = 0,212$
	Prisme	$\chi^2 = 0,670$ $p = 0,413$	$\chi^2 = 0,197$ $p = 0,657$	$\chi^2 = 3,119$ $p = 0,077$
	Anneau rond	$\chi^2 = 1,371$ $p = 0,242$	<i>Test exact de F.</i> = 5,751 $p = 0,019^*$	$\chi^2 = 0,833$ $p = 0,361$
	Cube	<i>Test exact de F.</i> = 1,639 $p = 0,332$	<i>Test exact de F.</i> = 0,995 $p = 1,000$	<i>Test exact de F.</i> = 1,015 $p = 0,498$
	Anneau droit	$\chi^2 = 3,086$ $p = 0,079$	$\chi^2 = 7,740$ $p = 0,005^{**}$	<i>Test exact de F.</i> = 0,500 $p = 0,721$

9.5.1.2. Différence entre perception de représentations virtuelles et de matériel physique pour chaque objet selon l'âge

a. Analyses générales

La Figure 27 illustre l'évolution du taux de perception adéquate de chaque objet 3D en présentant les taux observés à chacune des tranches dans les groupes confrontés à du matériel physique et virtuel.

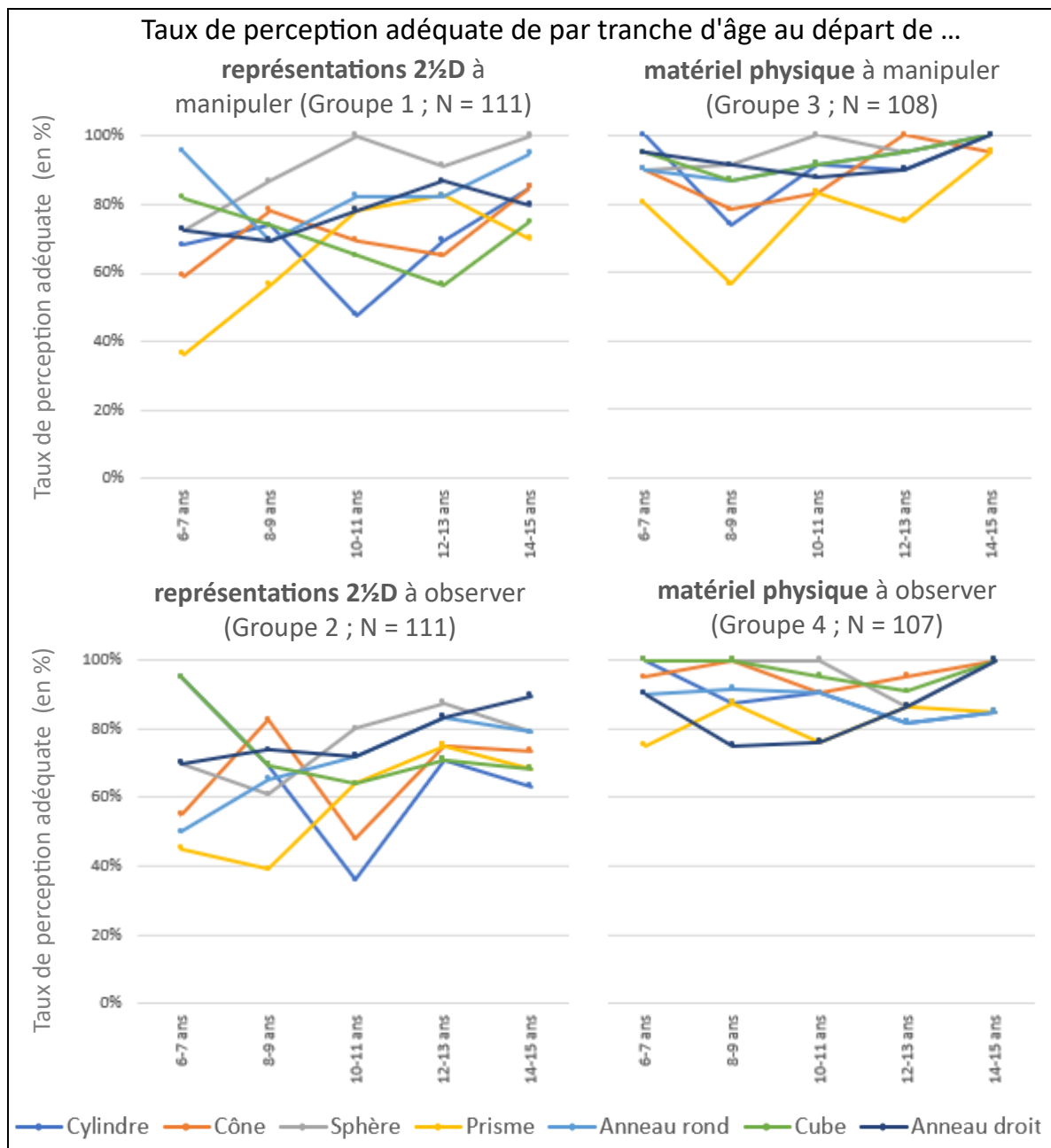


Figure 27 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour chacun des objets 3D (2^e étude)

Les graphiques relatifs aux groupes confrontés à du matériel physique, montrent que les taux observés à la première tranche d'âge sont déjà élevés et qu'il en est de même pour ceux observés à la dernière tranche d'âge. Toutefois, des diminutions sont parfois observées au niveau des tranches d'âge intermédiaires, par exemple pour le prisme dans le troisième groupe.

Face aux représentations virtuelles, les analyses antérieures ont permis de mettre en évidence des courbes d'évolution diverses selon les objets 3D et une absence systématique de l'augmentation du taux entre les tranches d'âge. Les taux obtenus aux premières tranches d'âge semblent mettre en évidence que les taux de perception adéquate observés face à du matériel physique sont, pour la majorité des objets 3D, supérieurs à ceux observés face aux représentations virtuelles. Il semble possible d'en dire autant à la dernière tranche d'âge même si les écarts apparaissent globalement moins élevés.

Les indices de corrélation calculés entre l'âge en jour (*r point bi-sérial*) et les cas de perception, dont les résultats sont présentés dans le Tableau 70, permettent de confirmer une absence globale d'évolution des capacités de perception d'objets 3D avec l'âge quand la tâche est proposée au départ de matériel physique. En effet, des indices de corrélation négligeables sont obtenus dans les groupes 3 et 4 pour tous les objets 3D en ce qui concerne les taux de perception adéquate et inadéquate. C'est également le cas pour les taux de non-perception excepté pour le prisme dans le groupe 3 ($r_{pb} = -0,217$), ce qui permet de suspecter une diminution légère des comportements bidimensionnels avec l'âge.

Ces résultats invitent à pointer des tendances communes avec l'évolution constatée pour la capacité de perception de plusieurs des objets 3D au départ de représentations virtuelles. Les analyses menées sur les groupes confrontés à des représentations virtuelles ont permis de mettre en évidence une absence de corrélation avec l'âge pour le cylindre, le cône, le cube et l'anneau droit. Même si les courbes d'évolution divergent entre ce qui est observé au départ de représentations virtuelles et de matériel physique, la tendance commune relative à une absence d'évolution peut donc être constatée. Pour le prisme, dont les capacités de perception évoluent avec l'âge face à des représentations virtuelles à manipuler ou à observer, une divergence apparaît entre espace sensible et environnement virtuel. C'est le cas aussi pour la sphère quand le matériel peut être manipulé et pour l'anneau rond quand il peut être observé.

Tableau 70 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p) (2^e étude)

		Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Perception adéquate	G1 : manip. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = 0,059$ $p = 0,538$	$r_{pb} = 0,098$ $p = 0,308$	$r_{pb} = 0,292$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = 0,289$ $p = 0,002^{**}$	$r_{pb} = 0,072$ $p = 0,454$	$r_{pb} = -0,079$ $p = 0,410$	$r_{pb} = 0,119$ $p = 0,215$
	G3 : manip. 3D (N = 108)	$r_{pb} = 0,106$ $p = 0,273$	$r_{pb} = 0,183$ $p = 0,059$	$r_{pb} = 0,194$ $p = 0,044^*$	$r_{pb} = 0,182$ $p = 0,059$	$r_{pb} = 0,189$ $p = 0,050^*$	$r_{pb} = 0,161$ $p = 0,095$	$r_{pb} = 0,073$ $p = 0,456$
	G2 : obs. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,156$ $p = 0,102$	$r_{pb} = 0,096$ $p = 0,314$	$r_{pb} = 0,163$ $p = 0,087$	$r_{pb} = 0,238$ $p = 0,012^*$	$r_{pb} = 0,246$ $p = 0,009^{**}$	$r_{pb} = -0,145$ $p = 0,129$	$r_{pb} = 0,171$ $p = 0,073$
	G4 : obs. 3D (N = 107)	$r_{pb} = -0,159$ $p = 0,101$	$r_{pb} = 0,020$ $p = 0,837$	$r_{pb} = -0,095$ $p = 0,333$	$r_{pb} = 0,091$ $p = 0,351$	$r_{pb} = -0,078$ $p = 0,424$	$r_{pb} = -0,065$ $p = 0,507$	$r_{pb} = 0,102$ $p = 0,293$
Perception inadéquate	G1 : manip. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,051$ $p = 0,596$	$r_{pb} = -0,134$ $p = 0,161$	$r_{pb} = -0,209$ $p = 0,027^*$	$r_{pb} = -0,273$ $p = 0,004^{**}$	$r_{pb} = -0,130$ $p = 0,173$	$r_{pb} = 0,113$ $p = 0,239$	$r_{pb} = -0,186$ $p = 0,050^*$
	G3 : manip. 3D (N = 108)	$r_{pb} = -0,044$ $p = 0,649$	$r_{pb} = -0,110$ $p = 0,256$	/	$r_{pb} = -0,051$ $p = 0,603$	$r_{pb} = -0,141$ $p = 0,144$	$r_{pb} = 0,015$ $p = 0,878$	$r_{pb} = 0,053$ $p = 0,588$
	G2 : obs. 2½D H. (N = 111)	$r_{pb} = -0,069$ $p = 0,471$	$r_{pb} = -0,175$ $p = 0,067$	$r_{pb} = -0,340$ $p < 0,001^*$	$r_{pb} = -0,171$ $p = 0,073$	$r_{pb} = -0,267$ $p = 0,005^{**}$	$r_{pb} = 0,110$ $p = 0,251$	$r_{pb} = -0,264$ $p = 0,005^{**}$
	G4 : obs. 3D (N = 107)	$r_{pb} = 0,012$ $p = 0,904$	$r_{pb} = -0,067$ $p = 0,490$	$r_{pb} = 0,063$ $p = 0,522$	$r_{pb} = -0,116$ $p = 0,236$	$r_{pb} = 0,061$ $p = 0,535$	/	$r_{pb} = -0,153$ $p = 0,115$
Non-perception	G1 : manip. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,030$ $p = 0,752$	$r_{pb} = 0,012$ $p = 0,902$	$r_{pb} = -0,181$ $p = 0,057$	$r_{pb} = -0,128$ $p = 0,181$	$r_{pb} = 0,058$ $p = 0,548$	$r_{pb} = -0,047$ $p = 0,621$	$r_{pb} = -0,076$ $p = 0,428$
	G3 : manip. 3D (N = 108)	$r_{pb} = -0,096$ $p = 0,322$	$r_{pb} = -0,140$ $p = 0,150$	$r_{pb} = 0,194$ $p = 0,044^*$	$r_{pb} = -0,217$ $p = 0,024^*$	$r_{pb} = -0,146$ $p = 0,131$	$r_{pb} = -0,180$ $p = 0,063$	$r_{pb} = -0,114$ $p = 0,240$
	G2 : obs. 2½D H. (N = 111)	$r_{pb} = 0,171$ $p = 0,073$	$r_{pb} = 0,066$ $p = 0,489$	$r_{pb} = 0,013$ $p = 0,889$	$r_{pb} = -0,130$ $p = 0,174$	$r_{pb} = 0,007$ $p = 0,945$	$r_{pb} = 0,028$ $p = 0,768$	$r_{pb} = -0,024$ $p = 0,801$
	G4 : obs. 3D (N = 107)	$r_{pb} = 0,114$ $p = 0,241$	$r_{pb} = 0,039$ $p = 0,688$	$r_{pb} = 0,074$ $p = 0,448$	$r_{pb} = -0,001$ $p = 0,993$	$r_{pb} = -0,008$ $p = 0,936$	$r_{pb} = 0,065$ $p = 0,507$	$r_{pb} = 0,014$ $p = 0,888$

Enfin, en ce qui concerne les différences constatées entre les objets 3D, les tests *Q* de Cochran (Tableau 71) appliqués à chaque tranche d'âge permettent de mettre en évidence que des différences significatives entre les sept objets 3D ne sont pas observées à toutes les tranches d'âge face à du matériel physique. Quand celui-ci est manipulé, les différences entre les taux sont significatives uniquement à la 2^{ème} tranche d'âge ($Q = 21,750$; p -value = 0,001). Cela s'explique par un plus faible taux observé pour le prisme à cette tranche d'âge. Quand le matériel physique ne peut pas être manipulé, les différences entre objets 3D ne concernent pas toutes les tranches d'âge. Les différences sont significatives à la première ($Q = 15,333$; p -value = 0,001), à la deuxième ($Q = 15,750$; p -value = 0,001) et à la dernière tranche d'âge ($Q = 11,692$; p -value = 0,044). Les différences significatives mises en évidence toutes tranches d'âge confondues face au matériel physique ne peuvent donc pas être généralisées à chacune des tranches d'âge. Si les analyses menées sur les groupes 1 et 2 permettent aussi de

mettre en évidence ce constat, les tranches d'âge dans lesquelles les performances entre objets sont considérées comme équivalentes ne sont pas les mêmes dans l'espace sensible et dans un environnement virtuel. Quand le matériel (physique ou virtuel) peut être manipulé, on constate pour point commun uniquement l'absence de différences entre objets 3D à la dernière tranche d'âge. Quand il ne peut être manipulé, on observe pour point commun la présence de différences significatives entre les objets 3D dans les deux premières tranches (même si le sens de ces différences n'est pas forcément identique) et l'absence de différence à la quatrième tranche d'âge.

Tableau 71 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (2^e étude)

	6-7 ans	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
G1 : manip. 2½D (N = 111)	Q = 21,306 p = 0,002*	Q = 7,111 <i>p = 0,311</i>	Q = 20,714 p = 0,002**	Q = 15,739 p = 0,015*	Q = 10,846 <i>p = 0,093</i>
G3 : manip. 3D (N = 108)	Q = 10,421 <i>p = 0,108</i>	Q = 21,750 p = 0,001**	Q = 5,721 <i>p = 0,455</i>	Q = 10,800 <i>p = 0,095</i>	Q = 5,000 <i>p = 0,544</i>
G2 : obs. 2½D (N = 111)	Q = 25,463 p < 0,001**	Q = 14,541 p = 0,024*	Q = 16,301 p = 0,012*	Q = 4,320 <i>p = 0,633</i>	Q = 5,531 <i>p = 0,478</i>
G4 : obs. 3D (N = 107)	Q = 15,333 p = 0,018*	Q = 15,750 p = 0,015*	Q = 11,692 <i>p = 0,069</i>	Q = 2,824 <i>p = 0,831</i>	Q = 12,960 p = 0,044*

b. Analyses inférentielles comparatives

Des tests du Khi-carré (ou alternative) sont utilisés pour comparer la dépendance des taux de perception adéquate à la dimensionnalité du support pour chaque objet 3D, mais cette fois à chaque tranche d'âge (Tableau 72).

Au niveau de la comparaison entre représentations 2 ½ D et matériel 3D, des résultats significatifs sont observés pour tous les objets 3D à au moins une tranche d'âge. Toutefois, pour aucun des objets 3D, des résultats significatifs ne sont constatés à l'ensemble des tranches d'âge. Les tranches d'âge marquées par un résultat significatif diffèrent selon les objets 3D. De plus, à aucune des tranches d'âge, des résultats significatifs ne sont observés pour l'ensemble des objets 3D. Par ailleurs, des résultats significatifs sont parfois observés quand les objets 3D présentés peuvent être manipulés et pas quand ils sont uniquement observés, ou inversement. Les résultats de ces tests montrent donc des situations différentes entre objets 3D et entre tranches d'âge.

Néanmoins, si un effet de la dimensionnalité n'est pas systématique pour tous les objets et à toutes les tranches d'âge, l'ensemble des résultats significatifs identifiés s'inscrivent en faveur du matériel physique.

Tableau 72 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3 et G2 et G4 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher) et p-value (p) (2^e étude)

		À 6-7 ans	À 8-9 ans	À 10-11 ans	À 12-13 ans	À 14-15 ans
G1-G3	Cylindre	Test ex. de F. = 7,636 p = 0,009**	$\chi^2 = 0,000$ p = 1,000	$\chi^2 = 10,793$ p = 0,001**	$\chi^2 = 2,699$ p = 0,100	$\chi^2 = 3,399$ p = 0,065
	Cône	$\chi^2 = 5,177$ p = 0,023*	$\chi^2 = 0,000$ p = 1,000	$\chi^2 = 1,242$ p = 0,265	Test ex. de F. = 8,547 p = 0,004**	Test ex. de F. = 1,220 p = 0,343
	Sphère	Test ex. de F. = 2,027 p = 0,243	Test ex. de F. = 0,224 p = 1,000	$\chi^2 = /$ p = /	Test ex. de F. = 0,225 p = 1,000	$\chi^2 = /$ p = /
	Prisme	$\chi^2 = 8,145$ p = 0,004**	$\chi^2 = 0,000$ p = 1,000	Test ex. de F. = 0,195 p = 0,724	Test ex. de F. = 0,374 p = 0,711	Test ex. de F. = 4,609 p = 0,045*
	Anneau rond	Test ex. de F. = 0,470 p = 0,598	$\chi^2 = 2,044$ p = 0,153	Test ex. de F. = 0,865 p = 0,416	Test ex. de F. = 1,598 p = 0,351	Test ex. de F. = 1,076 p = 0,488
	Cube	Test ex. de F. = 1,736 p = 0,346	Test ex. de F. = 1,243 p = 0,459	Test ex. de F. = 4,905 p = 0,036*	$\chi^2 = 8,320$ p = 0,004**	Test ex. de F. = 5,979 p = 0,021*
	Anneau droit	Test ex. de F. = 3,742 p = 0,096	Test ex. de F. = 3,453 p = 0,135	Test ex. de F. = 0,710 p = 0,461	Test ex. de F. = 0,096 p = 1,000	Test ex. de F. = 4,654 p = 0,048*
G2-G4	Cylindre	Test ex. de F. = 1,026 p = 1,000	Test ex. de F. = 2,255 p = 0,168	$\chi^2 = 14,220$ p < 0,001**	$\chi^2 = 0,761$ p = 0,383	Test ex. de F. = 2,438 p = 0,155
	Cône	$\chi^2 = 8,533$ p = 0,003**	Test ex. de F. = 4,562 p = 0,050*	$\chi^2 = 9,370$ p = 0,002**	Test ex. de F. = 3,722 p = 0,098	Test ex. de F. = 6,037 p = 0,020*
	Sphère	Test ex. de F. = 7,059 p = 0,020*	Test ex. de F. = 11,616 p = 0,001**	Test ex. de F. = 4,712 p = 0,054	Test ex. de F. = 0,013 p = 1,000	Test ex. de F. = 4,692 p = 0,047*
	Prisme	Test ex. de F. = 7,059 p = 0,020*	Test ex. de F. = 11,616 p = 0,001**	Test ex. de F. = 4,712 p = 0,054	Test ex. de F. = 0,013 p = 1,000	Test ex. de F. = 4,692 p = 0,047*
	Anneau rond	$\chi^2 = 3,750$ p = 0,053	$\chi^2 = 11,902$ p = 0,001**	$\chi^2 = 0,801$ p = 0,371	Test ex. de F. = 0,942 p = 0,464	Test ex. de F. = 1,509 p = 0,273
	Cube	$\chi^2 = 1,026$ p = 0,311	Test ex. de F. = 8,583 p = 0,004**	Test ex. de F. = 6,546 p = 0,013*	Test ex. de F. = 2,940 p = 0,139	Test ex. de F. = 7,464 p = 0,008**
	Anneau droit	Test ex. de F. = 2,500 p = 0,235	$\chi^2 = 0,007$ p = 0,932	$\chi^2 = 0,104$ p = 0,747	Test ex. de F. = 0,082 p = 1,000	Test ex. de F. = 2,219 p = 0,231
G3-G4	Cylindre	$\chi^2 = /$ p = /	Test ex. de F. = 1,400 p = 0,286	Test ex. de F. = 0,020 p = 1,000	Test ex. de F. = 0,573 p = 0,665	Test ex. de F. = 3,399 p = 0,107
	Cône	Test ex. de F. = 0,360 p = 1,000	Test ex. de F. = 5,839 p = 0,022*	Test ex. de F. = 0,495 p = 0,670	Test ex. de F. = 0,931 p = 1,000	Test ex. de F. = 0,976 p = 1,000
	Sphère	Test ex. de F. = 2,105 p = 0,487	Test ex. de F. = 2,180 p = 0,234	$\chi^2 = /$ p = /	Test ex. de F. = 0,907 p = 0,608	$\chi^2 = /$ p = /
	Prisme	Test ex. de F. = 0,143 p = 1,000	$\chi^2 = 5,633$ p = 0,041*	Test ex. de F. = 0,357 p = 0,713	Test ex. de F. = 0,877 p = 0,445	Test ex. de F. = 1,220 p = 0,343
	Anneau rond	Test ex. de F. = 0,000 p = 1,000	Test ex. de F. = 0,274 p = 0,666	Test ex. de F. = 0,020 p = 1,000	Test ex. de F. = 0,706 p = 0,346	Test ex. de F. = 3,399 p = 0,107
	Cube	Test ex. de F. = 1,026 p = 1,000	Test ex. de F. = 3,344 p = 0,109	Test ex. de F. = 0,230 p = 1,000	Test ex. de F. = 0,264 p = 1,000	$\chi^2 = /$ p = /
	Anneau droit	Test ex. de F. = 0,360 p = 1,000	Test ex. de F. = 2,210 p = 0,245	Test ex. de F. = 0,980 p = 0,443	Test ex. de F. = 0,132 p = 1,000	$\chi^2 = /$ p = /

Concernant les groupes 3 et 4, des résultats significatifs apparaissent uniquement à deux reprises : à la tranche d'âge constituée des enfants âgés de 8 à 9 ans pour le cône ($\chi^2 = 5,839$; $p\text{-value} = 0,022$) et à la même tranche d'âge pour le prisme ($\chi^2 = 5,633$; $p\text{-value} = 0,041$). Des résultats non significatifs sont obtenus dans tous les autres cas, ce qui sous-entend que, majoritairement, pour le matériel physique, la perception est indépendante de la place accordée à la manipulation. Puisque les analyses comparatives menées sur les groupes 1 et 2 ont permis de relever aussi que la perception de représentations virtuelles est majoritairement indépendante de la manipulation pour chaque objet à chaque tranche d'âge (cf. 9.2.1.2), un point commun est à nouveau constaté entre les capacités perceptives dans l'espace sensible et en environnement virtuel. Notons néanmoins que les quelques cas où une dépendance est observée ne sont pas identiques dans les deux modalités.

9.5.2. Discussion spécifique à la question 1.5°

Afin de se situer dans une perspective comparative, les mêmes tâches de perception d'objets 3D ont été proposées, mais cette fois au départ de matériel physique à observer ou à manipuler et non au départ de représentations virtuelles d'objets 3D.

9.5.2.1. Percevoir les objets 3D au départ de représentations virtuelles : une habileté posant plus de difficultés que la perception dans l'espace sensible

Les résultats obtenus au travers des groupes 3 et 4 montrent que les capacités de perception adéquate des objets 3D au départ de matériel physique sont élevées puisque de hauts taux de perception adéquate sont obtenus pour chacun des objets 3D investigués. Les enfants et les adolescents qui perçoivent de manière inadéquate ces objets 3D, ou qui sélectionnent une proposition 2D sont rares face à ce support, même s'il arrive d'en observer pour chacun des objets 3D.

Ces résultats élevés apparaissent peu étonnants puisque la tâche proposée revient à retrouver, parmi plusieurs propositions, l'objet 3D identique à celui présenté. Cela permet donc de confirmer que la perception de la 3D dans l'espace sensible ne pose majoritairement pas de difficultés aux enfants et aux adolescents, ce que revendiquaient déjà Flückiger et Klaue, (1991, cités par Blavier, 2006) en qualifiant la perception de quasi instantanée ou presque et sans effort apparent. De plus, il est en outre cohérent avec les propos de Gordon et Yonas (1976) qui évoquent que, dans l'espace sensible, la perception de la troisième dimension se construit très tôt dans la vie de l'enfant. En effet, même à la première tranche d'âge investiguée, la perception adéquate de chaque objet 3D au départ de matériel physique est déjà maîtrisée par une majorité d'enfants.

Assez logiquement, compte tenu des résultats préalablement présentés à l'égard de la perception de représentations virtuelles, il semble possible de considérer que l'habileté de perception visuelle est globalement mieux maîtrisée dans l'espace sensible qu'au départ de représentations virtuelles. Ces observations rejoignent les propos de Mithalal (2014), présentant la perception comme plus performante avec ce matériel. À titre d'indication, dans l'espace sensible, le nombre d'enfants percevant adéquatement l'ensemble des objets 3D ici investigués apparaît majoritaire. Elle est près de trois fois plus élevée que ce qui a pu être observé en environnement virtuel.

Par ailleurs, les taux de perception adéquate des objets 3D au départ de représentations virtuelles et de matériel physique se distinguent pour la plupart des

objets 3D avec de meilleures capacités de perception au départ de matériel physique, que le matériel puisse être manipulé ou non. Une proximité des taux est toutefois constatée dans le cas des objets 3D dont la perception en environnement virtuel est mieux maîtrisée (ex. la sphère lorsque le matériel virtuel peut être manipulé). Il est donc possible de considérer que, globalement, les capacités de perception sont mieux maîtrisées dans l'espace sensible, même si la perception en environnement virtuel tend parfois à s'en rapprocher. Les premières investigations de Krylova et Vodyakha (2022) sur des plus jeunes enfants, mettant en lumière une possible présence de différences entre perception dans l'espace sensible et en environnement virtuel, semblent donc se confirmer chez les enfants plus âgés et les adolescents, même quand les objets présentés sont familiers pour ces derniers. Ces différences peuvent être expliquées par l'exigence occasionnée par les représentations virtuelles, qui, même malgré l'impression de tridimensionnalité, restent des représentations de l'objet, exigeant alors un travail de reconstruction de la 3^{ème} dimension au départ des informations 2D dynamiques fournies (Bertolo, 2014), tandis que la troisième dimension est effective dans l'espace sensible, et ce même si les images envoyées sur la rétine sont aussi bidimensionnelles. Ces objets physiques sont qualifiés de plus naturels que les représentations de ces objets et offrent des indices visuels plus riches (Frick & Newcombe, 2015). De plus, le mode de représentation utilisé dans l'environnement virtuel, en l'occurrence une projection orthographique, diffère du fonctionnement de la vision dans l'espace sensible dans la mesure où les segments n'y apparaissent pas de plus en plus petits lorsqu'ils s'éloignent de l'œil. Cette divergence pourrait aussi constituer une explication aux différences entre les capacités de perception dans l'environnement virtuel et dans l'espace sensible. D'autant que d'après *Dumas et al.* (2001), la perspective linéaire dans les environnements virtuels constitue un indice relatif à la troisième dimension. Au-delà de cela, s'ajoutent également d'autres caractéristiques des environnements virtuels, comme l'absence d'ombre, susceptible d'influencer la perception dans l'environnement virtuel, notamment en occasionnant davantage de comportements bidimensionnels. Nous reviendrons sur ces aspects en discussion générale, lors de la mise en évidence des limites et prolongements aux études menées.

L'analyse des erreurs types commises permet d'observer, assez logiquement, moins de choix de sélection de propositions 2D au départ de matériel physique en comparaison à ce qu'on observe au départ de représentations virtuelles. Les

différences ne sont néanmoins pas systématiquement significatives puisque ce type de comportement apparaissait parfois rarement dans l'environnement virtuel (par exemple pour l'anneau rond). Toutefois, l'observation de cas de non-perception de la troisième dimension au départ de matériel physique nous confirme la nécessité de rester prudent face à l'interprétation de cette erreur type, déjà évoquée précédemment. Cela renforce l'idée que, même en ayant tenu compte des verbatims dans les analyses, certains choisissent la proposition 2D en tant que représentant de l'objet 3D, ce qui rejoint la confusion possible entre objet et représentation soulignée par Fagot *et al.* (2000). Des analyses complémentaires pourraient sans doute permettre de comprendre les raisons poussant à ce choix, alors même que la proposition 3D figure dans les possibilités de sélection. Toutefois, la présence plus régulière de cas de non-perception au départ de représentations virtuelles pourrait inciter à penser qu'une partie des enfants confrontés à des représentations virtuelles ont tout de même choisi ces propositions en tant qu'élément bidimensionnel, ce que confirment d'ailleurs certains des verbatims (ex. « *C'est déjà une forme ronde et c'est pas en profondeur, c'est comme ce que j'avais vu sur la tablette* », étude 1, élève 162, 12 ans).

Au niveau des cas de perception inadéquate, il apparaît que ces comportements sont peu observés face au matériel physique. Ils sont même parfois absents pour certains objets 3D comme le cube ou la sphère. Ceux-ci apparaissent majoritairement plus réguliers au départ de représentations virtuelles en comparaison au matériel physique, même si des différences non significatives apparaissent quand ces cas de figure étaient rares au départ de représentations virtuelles (ex. pour la sphère). De plus, la sélection du choix 3D dont la hauteur est modifiée obtient une fréquence moins élevée que face à des représentations virtuelles. Cela confirme la bonne sensibilité aux longueurs déjà présente dans l'espace sensible en âge préscolaire (Izard *et al.*, 2011) qui semble donc moins présente dans l'environnement virtuel. Un tel constat est par ailleurs cohérent avec la présence de mésestimation de taille et de distance observée en environnement virtuel (Bhargava *et al.*, 2020 ; Park *et al.*, 2021).

Par ailleurs, en tenant compte de la variable âge, des tendances différentes sont observées entre la perception dans l'espace sensible et au départ de représentations virtuelles. Comme évoqué précédemment, la perception adéquate dans l'espace sensible est déjà majoritairement constatée chez les enfants plus jeunes. Celle-ci ne semble donc globalement pas s'améliorer avec l'âge, comme ont pu le refléter les indices de corrélation. Dans l'environnement virtuel, nous avons en revanche pu

observer que la perception adéquate de certains objets, ceux posant le plus de difficultés, s'améliorait avec l'âge. Des différences significatives ont ainsi pu être mises en évidence entre matériel physique et virtuel pour plusieurs objets 3D. Malgré l'évolution de la perception dans l'environnement virtuel constatée pour certains objets, des différences significatives en faveur du matériel physique continuent d'être observées chez les adolescents âgés de 14 et 15 ans, toujours à l'avantage du matériel physique. Nous évoquions précédemment (cf. 9.1.3) que des facteurs permettant d'expliquer les difficultés de perception de représentations virtuelles, en particulier chez les plus jeunes, ainsi que son amélioration constatée pour certains objets 3D, pouvaient être expliqués par le développement de processus cognitifs sous-jacents à la perception des représentations virtuelles, par exemple la capacité à mettre en œuvre la pensée dynamique (Chicka *et al.*, 2021) permettant de comprendre les mouvements observés ou encore les capacités de stockage des informations transitoires (Vivian *et al.*, 2014). Ces processus, *a priori* moins sollicités face à du matériel physique étant donné les caractéristiques intrinsèques de ce matériel, apparaissent comme des explications potentielles au décalage observé chez les plus jeunes enfants et à la faible évolution constatée face au matériel physique.

Tous ces résultats invitent donc à confirmer l'hypothèse de Rose et Foreman (1999), reprise par Blavier (2006), consistant à considérer que les processus cognitifs et comportements perceptifs mis en œuvre dans l'environnement virtuel peuvent différer de ceux mis en œuvre dans l'espace sensible, aussi bien chez les enfants que les adolescents. Déjà au travers des deux études, sans observer les résultats des groupes 3 et 4 et en se focalisant plutôt uniquement sur ceux confrontés à des représentations virtuelles, les résultats incitaient à accepter cette hypothèse. En effet, la perception dans l'environnement virtuel (stimuli présentés virtuellement) a été évaluée au moyen d'une tâche impliquant la reconnaissance de l'objet dans l'espace sensible (propositions de la tâche de reconnaissance). De ce fait, l'observation de participants sélectionnant des propositions 3D ne correspondant pas à l'objet 3D représenté virtuellement, mais plutôt à des propositions 3D différentes ou à des objets bidimensionnels, même quand le choix dans la tâche de reconnaissance est restreint, pouvait déjà inciter à considérer un décalage entre les capacités de perception dans l'espace sensible et en environnement virtuel. Ce décalage est par ailleurs confirmé et enrichi par les résultats de la comparaison entre les groupes confrontés à du matériel

physique et à du matériel virtuel, dont les résultats viennent d'être mis en avant. Si les différences observées ne sont pas systématiquement significatives pour tous les objets à toutes les tranches d'âges investiguées, elles le sont pour la majorité des objets au total et interviennent au moins à certaines tranches d'âge. De ce fait, il semble possible de considérer que les capacités perceptives peuvent différer dans l'espace sensible et en environnement virtuel.

Ces résultats semblent s'inscrire dans la lignée de recherches antérieures qui ont aussi pu identifier des différences de performance à d'autres tâches spatiales évaluées dans l'espace sensible et en environnement virtuel, telles que celle de Richardson *et al.* (1999) pour l'habileté de navigation spatiale. Ils apparaissent cependant plutôt contradictoires avec les résultats d'autres recherches antérieures ayant évalué des habiletés spatiales dans l'espace sensible et en environnement virtuel. Denis (2016) évoquait par exemple plusieurs études ayant montré que les performances à des tâches ne sont pas foncièrement différentes lorsqu'elles sont proposées en environnement virtuel et dans l'espace sensible. Ce décalage avec les résultats obtenus au travers de nos deux études sur l'habileté de perception peut s'expliquer par plusieurs arguments. D'une part, il est possible de considérer que la perception exacte et adéquate des objets 3D n'est pas toujours indispensable pour la réussite des tâches proposées. Par exemple, si la tâche demandée est une tâche d'empreinte du cylindre, il est possible que la réponse fournie soit bonne alors que l'objet n'est pas adéquatement perçu (cylindre incliné, cylindre dont la hauteur est modifiée...). Nous reparlerons d'ailleurs de cela dans le chapitre 10. D'autre part, il est possible de considérer que les indications ,fournies notamment dans les consignes, permettent par exemple d'orienter les processus de perception. La volonté, dans les tâches de perception proposées, était ici de n'offrir aucune information pouvant guider la perception. Rappelons que les termes « solides » et « objets » ont été évités, tous comme les noms géométriques des figures. Cela pourrait constituer des éléments orientant les capacités de perception, mais également la résolution de tâches spatiales.

9.5.2.2. Percevoir les objets 3D au départ de représentations virtuelles : une habileté qui possède quelques points communs et divergences avec la perception dans l'espace sensible

Malgré la plus faible maîtrise de la perception en environnement virtuel, l'étude permet tout de même de mettre en avant certains points communs entre les résultats observés dans l'espace sensible et en environnement virtuel. Une première tendance commune concerne l'existence de différences entre les objets 3D. En effet, en dépit du fait que la perception de matériel physique est quasi-systématique, des différences significatives sont tout de même constatées entre les objets 3D, comme c'est le cas dans l'environnement virtuel. Les scores plus faibles observés pour le prisme constituent également un point commun. Il en est de même pour les plus fortes facilités observées pour la sphère. Nous renvoyons le lecteur vers des pistes d'explication évoquées pour la perception dans l'environnement virtuel (cf. 9.1.3).

Au niveau de l'influence de la manipulation dans l'espace sensible, les résultats permettent de mettre en avant une absence d'effet de la manipulation pour la quasi-totalité des objets, et ce également aux différentes tranches d'âge. Si la perception haptique est décrite comme pouvant rendre moins ambiguë la perception visuelle (Meijer & van den Broeck, 2010 ; Wijntjes *et al.*, 2009), cela ne semble pas concerner la perception visuelle de la forme des objets 3D simples ici investigués. Qui plus est, le seul effet significatif observé sur l'échantillon complet concerne le cas du cône et s'inscrit en faveur de l'observation. D'après Gentaz *et al.* (2009), la potentielle surcharge cognitive liée à la perception bisensorielle pourrait constituer une raison des différences entre manipulation et observation dans l'espace sensible, mais l'absence d'effet pour la quasi-totalité des objets invitent à être prudent par rapport à cette possible explication. Les résultats obtenus s'inscrivent globalement en cohérence avec les observations réalisées par Krylova et Vodyakha (2022) qui ont observé une absence d'impact de la manipulation du matériel physique sur la capacité de perception d'objets 3D complexes chez les enfants âgés de 4 à 6 ans. Dans l'environnement virtuel, une absence d'effet de la manipulation apparait pour la plupart des objets investigués également. Ces résultats invitent à considérer que l'idée globale et immédiate de l'apparence des objets que permet la perception visuelle (Gori *et al.*, 2024) est la plupart du temps suffisante pour que les enfants et les adolescents puissent se représenter les objets 3D simples tels que ceux ici étudiés aussi bien dans l'espace sensible qu'en environnement virtuel. Toutefois, des résultats en faveur de la

manipulation ont pu être observés sur la perception de certains objets 3D (sphère et anneau), ce qui montre l'existence de divergences entre les deux modalités. Néanmoins, les arguments utilisés préalablement (*cf.* 9.2.3) pour justifier l'apport potentiel de la manipulation, à savoir la possibilité d'une meilleure compréhension des rotations appliquées quand elles sont choisies par l'individu, ne semblent pas pertinents dans l'espace sensible.

9.6. Réponse à la question de recherche 1.6° : perception des objets 3D au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes

Pour apporter des éléments de réponse à la dernière question de recherche relative à la perception visuelle, une comparaison est réalisée entre les résultats obtenus dans la seconde étude expérimentale auprès du groupe 2 et du groupe 6. Pour rappel, il s'agit alors d'évaluer la maîtrise de la perception face à des vidéos d'objets 3D en rotation et face à une succession de représentations 2D. Pour rappel, cette succession offre d'abord une représentation en perspective, suivie successivement des différentes vues en projection orthogonale (vue de l'avant de l'objet 3D, vue du dessus de l'objet 3D, vue du côté de l'objet 3D) avant de finir à nouveau avec la vue en perspective initiale. De cette façon, l'influence de la vision des mouvements, et donc du caractère dynamique des représentations virtuelles, est investiguée.

9.6.1. Résultats relatifs à la seconde étude expérimentale (groupe 6 vs groupes 2)

9.6.1.1. Différence entre perception de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D pour chaque objet (toutes tranches d'âge confondues)

a. Analyses générales

Afin de se faire une première idée des points communs et divergences observées entre les capacités de perception visuelle des objets 3D dans le groupe 2 et le groupe 6, le Tableau 73²² présente les taux de perception adéquate obtenus pour chaque objet 3D dans les deux groupes. On peut y constater que les taux dans le groupe 6 sont, pour tous les objets, inférieurs à ceux dans le groupe 2. Il apparaît cependant que les différences entre les valeurs observées dans les deux groupes s'avèrent parfois très faibles. Même pour l'objet 3D pour lequel les différences les plus marquées sont observées, à savoir pour le prisme, celles-ci n'excèdent pas 12%. Les analyses inférentielles comparatives menées ultérieurement permettront de statuer sur le caractère significatif ou non des différences observées dans les deux groupes.

²² Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

Au-delà de ces écarts parfois réduits entre les taux obtenus auprès des deux groupes, des différences apparaissent entre les objets 3D au sein de chacun des groupes. Dans le groupe 6, les taux de perception adéquate varient entre 47,3% (pour le prisme) et 72,7% (pour le cube). D'ailleurs, le test *Q de Cochran*, vérifiant si des différences significatives sont observées ou non entre les sept objets, confirme que les taux de perception varient entre les objets 3D puisque des résultats significatifs sont observés ($Q = 23,573$; $p\text{-value} = 0,001$). De plus, les résultats indiquent qu'excepté le prisme, tous les autres objets 3D sont perçus adéquatement par plus de la moitié des participants. Pour autant, comme l'indique le taux le plus élevé observé, aucun des objets n'est perçu par plus de trois quarts des participants, ce qui montre bien que la perception de chacun des objets 3D au départ de cette modalité n'est pas systématique et pose parfois des difficultés à de nombreux enfants et adolescents.

Malgré quelques divergences, des tendances communes sont observées avec le groupe 2 puisque, dans ce groupe, le prisme est aussi l'objet 3D posant le plus de difficultés avec un taux de 58,6%. Cela signifie donc que, dans ce groupe, tous les objets 3D sont perçus adéquatement par plus de 50% des participants. À l'inverse, le taux de perception adéquate le plus élevé concerne l'anneau droit, avec une valeur de 77,5%. Si l'objet 3D le mieux perçu n'est pas le même dans les deux groupes, on observe cependant qu'aucun objet n'y est adéquatement perçu par tous les participants, comme dans le groupe 6. Le test inférentiel *Q de Cochran* confirme aussi la présence de différences significatives entre les objets 3D dans ce groupe ($Q = 15,809$; $p\text{-value} < 0,001$).

Tableau 73 : Taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G2 : obs. 2½D (N = 111)	65,8%	66,7%	75,7%	58,6%	70,3%	73,0%	77,5%
G6 : obs. 2D's (N = 110)	61,8%	60,9%	66,4%	47,3%	68,2%	72,7%	65,5%

Les résultats aux *tests de McNemar* appliqués pour statuer sur les différences entre objets deux à deux, présentés dans l'annexe 26, permettent aussi de relever quelques divergences dans les différences entre les objets 3D. Dans le groupe 6, ces analyses inférentielles permettent de relever que le taux obtenu pour le prisme se distingue

significativement de celui relatif à chacun des autres objets 3D sauf le cône. Les autres objets 3D peuvent en revanche tous être considérés comme équivalents entre eux. Dans le groupe 2, le prisme ne se différencie significativement que de quelques objets 3D (sphère, cube et anneau droit). De plus, une différence significative est observée entre l'anneau droit et le cylindre, mais aucune autre différence significative n'est observée entre les autres paires d'objets 3D. L'anneau droit est d'ailleurs l'objet 3D le mieux perçu dans ce groupe, alors que ce n'est pas le cas dans l'autre groupe.

Les analyses mettent en évidence que, pour chaque exercice, un certain nombre de participants n'ont pas perçu adéquatement les objets 3D. Pour aller plus loin dans la compréhension des difficultés rencontrées, les analyses menées s'intéressent à la répartition du nombre d'objets perçus adéquatement, afin d'identifier si ce sont les mêmes participants qui ont des difficultés avec chacun des objets 3D. Les répartitions observées dans les groupes 2 et 6 sont présentées au sein de la Figure 28. Celle-ci permet de relever une certaine proximité entre les répartitions constatées dans les deux groupes. D'une part, moins d'un participant sur cinq a perçu adéquatement l'ensemble des objets 3D. C'est le cas pour 19,8% des participants du groupe 2 et 13,6% du groupe 6. Si la perception de l'ensemble des objets 3D n'est pas acquise pour tous les participants, plus de 50% d'entre eux ont perçu plus de cinq objets 3D sur sept aussi bien au départ de représentations virtuelles qu'au départ de successions de représentations planes. À l'inverse, un nombre restreint de participants n'ont perçu adéquatement aucun des objets 3D. Que ce soit face à des successions de représentations planes ou des représentations virtuelles, les résultats montrent que l'habileté semble majoritairement partiellement maîtrisée même si, le plus souvent, la plupart des objets 3D sont perçus adéquatement.

Par ailleurs, si les analyses déjà menées sur le deuxième groupe ont permis de relever une certaine irrégularité dans les objets posant des difficultés aux participants (*cf.* 9.2.2.1), il est possible d'en dire autant dans le groupe 6. En effet, comme l'illustre l'annexe 27, lorsqu'on observe le cas des participants ayant perçu adéquatement six des sept objets 3D, celui qui pose des difficultés varie selon les participants. Notons que celui-ci est le plus souvent le prisme ou le cylindre. De la même façon, lorsqu'on observe les quelques participants qui n'ont perçu qu'un objet adéquatement, on remarque également que ce n'est pas systématiquement le même objet. Il s'agit le plus souvent du cylindre ou du cône, mais il peut aussi s'agir du cube, du prisme ou de la

sphère. Les objets qui posent des difficultés varient selon les participants, comme cela a aussi pu être décrit face à des représentations virtuelles à observer.

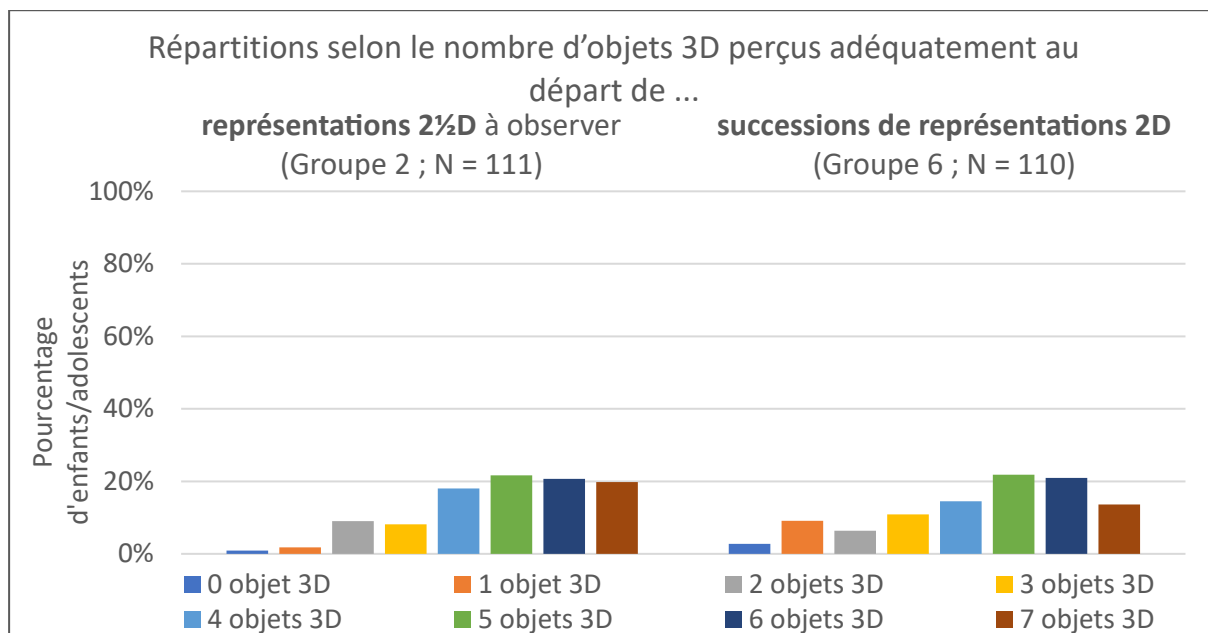


Figure 28 : Répartitions selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes (2^e étude)

Face à des successions de représentations 2D, comme face à des représentations virtuelles à observer, il arrive que des cas de perception inadéquate soient observés, tout comme des cas de non-perception. Selon les objets 3D, l'un ou l'autre cas de figure se produit plus régulièrement. À ce sujet, les situations sont assez proches dans les deux modalités. Face aux deux modalités, les cas de perception inadéquate sont plus fréquents que les cas de non-perception pour le cône et le prisme. La situation inverse est observée pour le cylindre, la sphère, l'anneau droit et le cube. Pour l'anneau rond, en revanche, les cas de perception inadéquate sont plus fréquents dans le groupe 2 mais pas dans le groupe 6.

Concernant les taux de perception inadéquate, des taux assez proches sont observés entre les deux groupes pour chacun des objets 3D, comme en témoigne la Figure 29. Dans les deux groupes, ces difficultés perceptives sont observées davantage pour le prisme, le cône et l'anneau rond. L'analyse des choix 3D non attendus réalisés, dont les résultats sont détaillés en annexe (Annexe 29), permet là aussi de relever certaines similitudes entre les groupes 2 et 6. Concernant le cas du cylindre, où les choix 3D sont rares dans les deux modalités, il apparaît que le choix 3D dont la hauteur a été modifiée est le choix le plus souvent réalisé dans le groupe 2 comme dans le groupe 6. Dans le

groupe 6, une fréquence équivalente entre cette proposition et celle relative l'objet 3D incliné est observée. Concernant le cône, la sphère et les anneaux, une tendance commune est observée puisque, dans les deux groupes, la proposition 3D dont la hauteur est modifiée est la plus choisie. Concernant le prisme, deux propositions 3D ressortent dans les deux groupes, à savoir l'objet 3D dont la hauteur est modifiée et l'objet 3D incliné. Si dans le groupe 2, les deux propositions ont une fréquence de sélection similaire (10,8%), ce n'est pas le cas dans le groupe 6 où la première des deux est plus récurrente (15,5%) que l'autre (5,5%). Finalement, pour le cas du cube, une situation similaire à celle du prisme est observée malgré le fait la fréquence de sélection de ces choix est quasi inexistante dans les deux groupes.

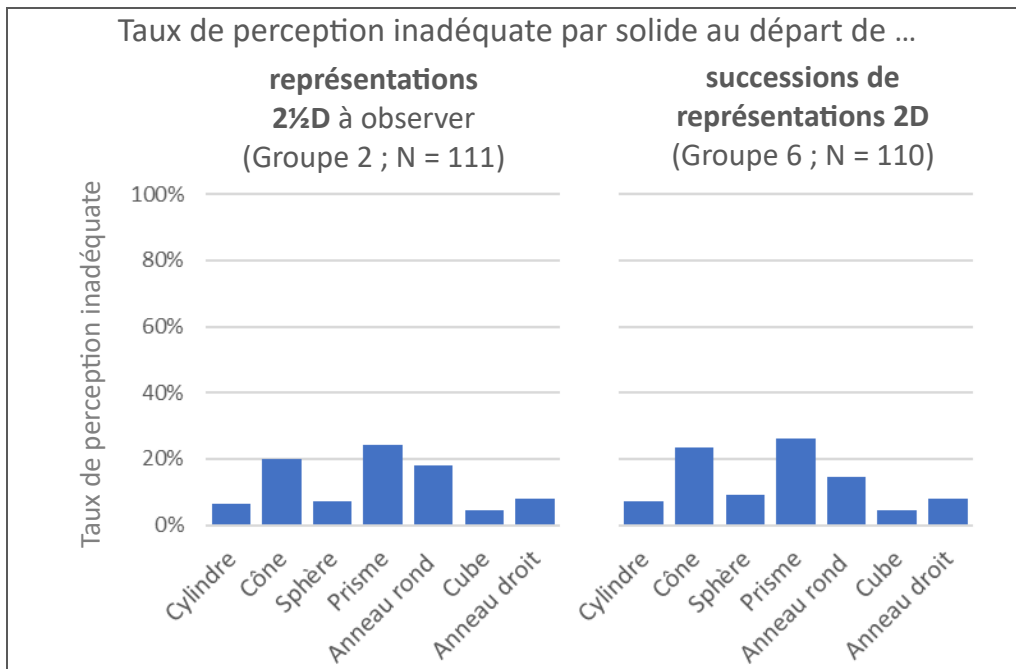


Figure 29 : Taux de perception inadéquate au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour chacun des objets 3D : pourcentage (2^e étude)

Enfin, pour ce qui est des cas de non-perception (Tableau 74²³), les résultats obtenus permettent de mettre en évidence que ce cas de figure varie, selon les objets, entre 9,9% et 20,7% dans le groupe 2 et entre 9,1% et 24,5% dans le groupe 6. Dans les deux groupes, le taux le plus élevé ne porte cependant pas sur le même objet 3D, tout comme le taux le plus faible. Excepté pour le cône, le taux obtenu pour chaque objet est plus élevé dans le groupe 6 que dans le groupe 2, même si les écarts sont parfois peu élevés. Notons par ailleurs que les analyses permettent de constater que, dans les

²³ Dans le tableau, le taux de perception le plus élevé obtenu dans chaque groupe est indiqué en vert alors que le taux le plus faible y est indiqué en orange.

deux modalités, aucun participant ne se situe dans un cas de non-perception pour l'ensemble des objets 3D. Autrement dit, tous arrivent à concevoir, dans les deux modalités, que l'élément représenté, que ce soit dans l'environnement virtuel ou au départ de plusieurs représentations 2D, est un élément tridimensionnel.

Tableau 74 : Taux de non-perception (avec prise en compte des verbatims) au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes : pourcentage (2^e étude)

	Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
G2 : obs. 2½D (N = 111)	20,7%	11,7%	16,2%	10,8%	9,9%	15,3%	13,5%
G6 : obs. 2D's (N = 110)	20,9%	9,1%	21,8%	21,8%	17,3%	19,1%	24,5%

b. Analyses inférentielles comparatives

Pour identifier si les résultats obtenus par les participants des groupes 2 et 6 sont indépendants de la modalité de représentation des objets 3D, des *tests du Khi-carré* (ou alternative) sont utilisés. Les résultats (Tableau 75) invitent à considérer que l'observation générale d'équivalence entre les résultats des deux groupes, réalisée préalablement au regard des taux obtenus, est confirmée pour la majorité des objets 3D. Aucun résultat significatif n'est observé entre les taux de ces deux groupes pour le cylindre, le cône, la sphère, le cube ou encore l'anneau rond. Pour ces objets 3D, la perception apparaît donc indépendante du dynamisme des supports. Toutefois, des résultats significatifs sont obtenus pour l'anneau droit au niveau du taux de perception adéquate ($\chi^2 = 3,919$; $p\text{-value} = 0,048$), avec un score moyen en faveur du groupe 2. La non-perception de cet objet 3D est significativement dépendante du support ($\chi^2 = 4,368$; $p\text{-value} = 0,037$). De plus, des résultats significatifs sont aussi observés au niveau de la non-perception du prisme ($\chi^2 = 4,909$; $p\text{-value} = 0,027$), le caractère dynamique du support engendrant moins de cas de non-perception. Pour cet objet 3D, des résultats à la limite de la significativité sont par ailleurs obtenus au niveau du taux de perception adéquate ($\chi^2 = 2,825$; $p\text{-value} = 0,093$). Bien que pour la quasi-totalité des objets 3D, la perception visuelle des objets 3D est indépendante du caractère dynamique de la représentation, ce constat n'est pas valable pour tous les objets 3D, notamment pour l'anneau droit pour qui la perception au départ de représentations statiques apparaît plus problématique.

Tableau 75 : Vérification de l'indépendance des taux de perception des objets 3D et du groupe d'appartenance en prenant en considération G2 et G6 : Khi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) (2^e étude)

		Taux de perception adéquate	Taux de perception inadéquate	Taux de non-perception des objets 3D (avec prise en compte des verbatims)
G2-G6	Cylindre	$\chi^2 = 0,373$ $p = 0,541$	$\chi^2 = 0,082$ $p = 0,775$	$\chi^2 = 0,001$ $p = 0,972$
	Cône	$\chi^2 = 0,793$ $p = 0,373$	$\chi^2 = 0,473$ $p = 0,491$	$\chi^2 = 0,407$ $p = 0,524$
	Sphère	$\chi^2 = 2,329$ $p = 0,127$	$\chi^2 = 0,262$ $p = 0,609$	$\chi^2 = 1,126$ $p = 0,289$
	Prisme	$\chi^2 = 2,825$ $p = 0,093$	$\chi^2 = 0,121$ $p = 0,727$	$\chi^2 = 4,909$ $p = 0,027^*$
	Anneau rond	$\chi^2 = 0,113$ $p = 0,737$	$\chi^2 = 0,489$ $p = 0,485$	$\chi^2 = 2,553$ $p = 0,110$
	Cube	$\chi^2 = 0,002$ $p = 0,967$	Test exact de F. = 0,000 $p = 1,000$	$\chi^2 = 0,553$ $p = 0,457$
	Anneau droit	$\chi^2 = 3,919$ $p = 0,048^*$	$\chi^2 = 0,000$ $p = 0,984$	$\chi^2 = 4,368$ $p = 0,037^*$

9.6.1.2. Différence entre perception de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D pour chaque objet selon l'âge

a. Analyses générales

La Figure 30 présente les taux de perception obtenus pour chaque objet à chaque tranche d'âge dans le groupe 2 et dans le groupe 6. On y constate que, dans les deux groupes, des courbes d'évolution variées sont observées pour les objets 3D. Cependant, pour la plupart des objets 3D, le taux n'augmente pas systématiquement entre les tranches d'âge successives et est plutôt marqué par des taux qui alternent entre augmentations et diminutions. Dans le groupe 2, le taux observé à la première tranche d'âge s'avère cependant plus faible que celui observé à la dernière tranche d'âge pour la plupart des objets. C'est le cas pour tous les objets sauf le cube et le cylindre. Un même constat d'amélioration du taux entre la première et la dernière tranche d'âge est réalisé dans le groupe 6 pour tous les objets sauf le cylindre, ce qui permet de pointer une proximité dans les deux groupes.

Les indices de corrélation (*r point bi-sérial*) calculés entre la perception de l'objet 3D et l'âge (en jour), présentés au sein du Tableau 76 permettent de pointer à nouveau des tendances communes entre les deux modalités.

Réponse à la question 1.6° (Étude 2)

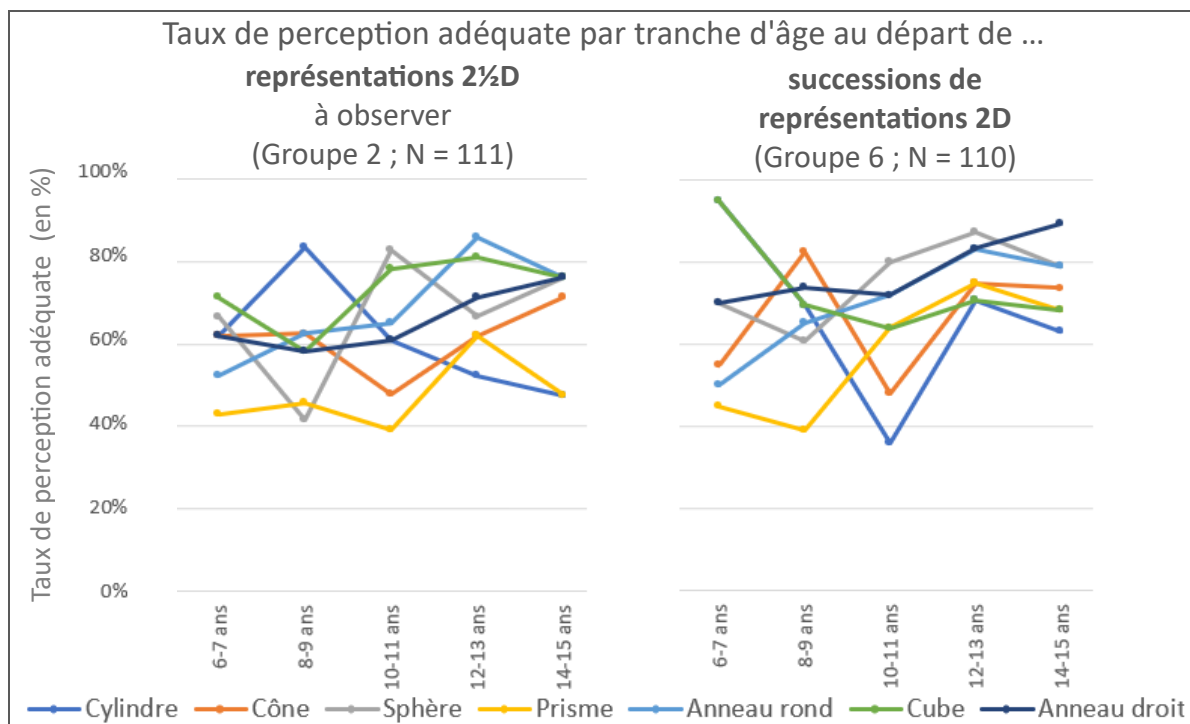


Figure 30 : Évolution du taux de perception adéquate au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour chacun des objets 3D (2^e étude)

Les deux groupes sont marqués par une corrélation positive mais faible entre le taux de perception adéquate de l'anneau rond et l'âge. Celle-ci atteint une valeur de 0,246 dans le groupe 2 et de 0,212 dans le groupe 6. Par ailleurs, pour cet objet 3D, des taux proches sont observés entre les deux groupes à chaque tranche d'âge et une courbe d'évolution similaire, marquée par une croissance entre toutes les tranches d'âge consécutives sauf entre les deux dernières. Pour cet objet 3D, l'amélioration observée est surtout due à une diminution du taux de perception inadéquate dans les deux groupes, comme en témoigne l'indice de corrélation associé à ce cas de figure ($r_{pb} = -0,239$). Plus particulièrement, une diminution de la sélection de la proposition 3D dont la hauteur a été modifiée est constatée dans le groupe 2 ($r_{pb} = -0,257$) comme dans le groupe 6 ($r_{pb} = -0,288$).

Pour le cylindre, mais également pour le cube, des courbes d'évolution du taux de perception adéquate différentes sont observées entre les deux modalités, même si des corrélations négligeables entre les taux de perception et l'âge apparaissent dans les deux groupes.

Pour la sphère, la corrélation entre l'âge et la perception adéquate peut être qualifiée de nulle, comme celle entre non-perception et âge. La corrélation avec le taux de perception inadéquate est toutefois négative. Cette corrélation apparaît plus

marquée dans le groupe 2 ($r_{pb} = -0,340$), où elle est modérée, que dans le groupe 6 ($r_{pb} = -0,215$). Si les taux de perception adéquate observés à la première et à la dernière tranche d'âge sont proches dans les deux groupes, les courbes d'évolution du taux de perception adéquate sont pour autant différentes.

Pour le cône, les taux de perception adéquate observés à la première tranche d'âge dans les deux groupes sont proches. Il en est de même à la dernière tranche d'âge. De plus, dans les deux groupes, des indices de corrélation négligeables sont observés pour le taux de perception adéquate. Les courbes d'évolution diffèrent néanmoins entre les deux modalités. Par ailleurs, une corrélation négative mais faible concerne le taux de perception inadéquate dans le groupe 6 ($r_{pb} = -0,212$) alors qu'elle est négligeable dans le groupe 2 ($r_{pb} = -0,175$).

Pour l'anneau droit, une corrélation négligeable est également observée entre l'âge et le taux de perception adéquate dans les deux groupes avec des courbes d'évolution du taux différentes également. Comme pour le cône, une différence entre les deux groupes apparaît au niveau des cas de perception inadéquate, mais cette fois, la corrélation observée pour ce taux est négligeable dans le groupe 6 ($r_{pb} = -0,194$) alors qu'elle est négative, bien que faible, dans l'autre groupe ($r_{pb} = -0,264$).

Tableau 76 : Corrélations entre les taux de perception par objet 3D au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r_{pb} et p-value (p) (2^e étude)

		Cylindre	Cône	Sphère	Prisme	Anneau rond	Cube	Anneau droit
Perception adéquate	G2 : obs. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,156$ $p = 0,102$	$r_{pb} = 0,096$ $p = 0,314$	$r_{pb} = 0,163$ $p = 0,087$	$r_{pb} = 0,238$ $p = 0,012^*$	$r_{pb} = 0,246$ $p = 0,009^{**}$	$r_{pb} = -0,145$ $p = 0,129$	$r_{pb} = 0,171$ $p = 0,073$
	G6 : obs. 2D's (N = 110)	$r_{pb} = -0,174$ $p = 0,069$	$r_{pb} = 0,065$ $p = 0,500$	$r_{pb} = 0,145$ $p = 0,130$	$r_{pb} = 0,053$ $p = 0,583$	$r_{pb} = 0,212$ $p = 0,026^*$	$r_{pb} = 0,109$ $p = 0,257$	$r_{pb} = 0,124$ $p = 0,196$
Perception inadéquate	G2 : obs. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = -0,069$ $p = 0,471$	$r_{pb} = -0,175$ $p = 0,067$	$r_{pb} = -0,340$ $p < 0,001^*$	$r_{pb} = -0,171$ $p = 0,073$	$r_{pb} = -0,267$ $p = 0,005^{**}$	$r_{pb} = 0,110$ $p = 0,251$	$r_{pb} = -0,264$ $p = 0,005^{**}$
	G6 : obs. 2D's (N = 110)	$r_{pb} = -0,163$ $p = 0,089$	$r_{pb} = -0,212$ $p = 0,026^*$	$r_{pb} = -0,215$ $p = 0,024^*$	$r_{pb} = -0,166$ $p = 0,083$	$r_{pb} = -0,239$ $p = 0,012^*$	$r_{pb} = -0,060$ $p = 0,535$	$r_{pb} = -0,194$ $p = 0,043^*$
Non-perception	G2 : obs. 2½D (N = 111)	$r_{pb} = 0,171$ $p = 0,073$	$r_{pb} = 0,066$ $p = 0,489$	$r_{pb} = 0,013$ $p = 0,889$	$r_{pb} = -0,130$ $p = 0,174$	$r_{pb} = 0,007$ $p = 0,945$	$r_{pb} = 0,028$ $p = 0,768$	$r_{pb} = -0,024$ $p = 0,801$
	G6 : obs. 2D's (N = 110)	$r_{pb} = 0,125$ $p = 0,194$	$r_{pb} = 0,006$ $p = 0,494$	$r_{pb} = 0,046$ $p = 0,634$	$r_{pb} = 0,084$ $p = 0,382$	$r_{pb} = -0,038$ $p = 0,692$	$r_{pb} = -0,044$ $p = 0,646$	$r_{pb} = -0,077$ $p = 0,423$

Réponse à la question 1.6° (Étude 2)

Enfin, pour le cas du prisme, malgré le fait que les taux de perception adéquate observés à la première tranche d'âge sont proches entre les deux groupes, les trajectoires sont ensuite différentes entre les deux groupes. Les indices de corrélation illustrent ces différences dans la mesure où une corrélation positive mais faible est observée dans le groupe 2 ($r_{pb} = 0,238$) alors qu'elle apparaît nulle dans le groupe 6 ($r_{pb} = 0,053$).

Au-delà des proximités et divergences observées dans la manière dont les taux évoluent entre les tranches d'âge, l'observation des différences entre objets 3D à chaque tranche d'âge permet de pointer d'autres proximités et divergences dans les deux modalités. Dans les deux groupes, les *tests Q de Cochran* appliqués à chaque tranche d'âge permettent de relever que les différences entre les objets 3D constatées lorsque le public cible est complet (toutes tranches d'âge confondues) est pris en compte ne s'appliquent pas à toutes les tranches d'âge. Comme l'illustrent les résultats de ces tests, présentés dans le Tableau 77, dans les deux modalités, des différences significatives sont observées à la deuxième et à la troisième tranche d'âge mais pas à la quatrième. Pour la première et la dernière tranche d'âge, des divergences sont observées dans la mesure où des résultats significatifs apparaissent dans le groupe 2 et non dans le groupe 6 à la première tranche d'âge et inversement à la dernière tranche d'âge. Dans les deux groupes, les objets 3D qui posent le plus ou le moins de difficultés varient par ailleurs entre les tranches d'âge.

Tableau 77 : Différence entre les taux de perception adéquate des sept objets 3D au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes par tranche d'âge : Q de Cochran (Q) et p-value (p) (ddl = 6) (2^e étude)

	6-7 ans	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
G2 : obs. 2½D (N = 111)	Q = 25,463 p < 0,001**	Q = 14,541 p = 0,024*	Q = 16,301 p = 0,012*	Q = 4,320 p = 0,633	Q = 5,531 p = 0,478
G6 : obs. 2D's (N = 110)	Q = 5,298 p = 0,506	Q = 16,296 p = 0,012*	Q = 20,051 p = 0,003**	Q = 8,333 p = 0,215	Q = 13,154 p = 0,041*

b. Analyses inférentielles comparatives

Toutes tranches d'âge confondues, des similitudes entre la perception au départ de représentations virtuelles dynamiques et au départ d'une succession de représentations 2D ont été montrées pour la quasi-totalité des objets 3D. En comparant cette fois le groupe 2 et le groupe 6 à chacune des tranches d'âge (Tableau 78), il ressort

que, dans la quasi-totalité des cas, des résultats non significatifs sont observés aux tests *du Khi-carré* (ou alternative) appliqués. Toutefois, un résultat significatif est observé (*Test exact de Fisher* = 6,549 ; *p-value* = 0,020) pour le cylindre à la première tranche d'âge avec un taux de perception adéquate plus élevé dans le groupe 2 que dans le groupe 6. Pour tous les autres objets 3D, les résultats ne sont jamais significatifs, même si certains cas à la limite de la significativité apparaissent. Cela signifie que, excepté pour le cylindre à la première tranche d'âge, la perception adéquate des objets 3D est indépendante du caractère dynamique du support.

Tableau 78 : Vérification de l'indépendance des taux de perception adéquate des objets 3D pour chaque tranche d'âge et du groupe d'appartenance en prenant en considération G2 et G6 : *Khi-carré* (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et *p-value* (*p*) (2^e étude)

	À 6-7 ans	À 8-9 ans	À 10-11 ans	À 12-13 ans	À 14-15 ans
Cylindre	<i>Test exact de F.</i> = 6,549 <i>p</i> = 0,020*	$\chi^2 = 1,242$ <i>p</i> = 0,265	$\chi^2 = 2,969$ <i>p</i> = 0,085	$\chi^2 = 1,622$ <i>p</i> = 0,203	$\chi^2 = 0,973$ <i>p</i> = 0,324
Cône	$\chi^2 = 0,201$ <i>p</i> = 0,654	$\chi^2 = 0,2373$ <i>p</i> = 0,123	$\chi^2 = 0,000$ <i>p</i> = 0,990	$\chi^2 = 0,896$ <i>p</i> = 0,344	$\chi^2 = 0,025$ <i>p</i> = 0,873
Sphère	$\chi^2 = 0,053$ <i>p</i> = 0,819	$\chi^2 = 1,73$ <i>p</i> = 0,188	<i>Test exact de F.</i> = 0,054 <i>p</i> = 1,000	<i>Test exact de F.</i> = 2,813 <i>p</i> = 0,151	<i>Test exact de F.</i> = 0,043 <i>p</i> = 1,000
Prisme	$\chi^2 = 0,019$ <i>p</i> = 0,890	$\chi^2 = 0,216$ <i>p</i> = 0,642	$\chi^2 = 2,969$ <i>p</i> = 0,085	$\chi^2 = 0,896$ <i>p</i> = 0,344	$\chi^2 = 1,766$ <i>p</i> = 0,184
Anneau rond	$\chi^2 = 0,023$ <i>p</i> = 0,879	$\chi^2 = 0,038$ <i>p</i> = 0,846	$\chi^2 = 0,257$ <i>p</i> = 0,613	<i>Test exact de F.</i> = 0,048 <i>p</i> = 1,000	<i>Test exact de F.</i> = 0,043 <i>p</i> = 1,000
Cube	<i>Test exact de F.</i> = 4,020 <i>p</i> = 0,093	$\chi^2 = 0,642$ <i>p</i> = 0,423	$\chi^2 = 1,179$ <i>p</i> = 0,278	$\chi^2 = 0,621$ <i>p</i> = 0,431	$\chi^2 = 0,302$ <i>p</i> = 0,583
Anneau droit	$\chi^2 = 0,299$ <i>p</i> = 0,585	$\chi^2 = 1,270$ <i>p</i> = 0,260	$\chi^2 = 0,668$ <i>p</i> = 0,414	<i>Test exact de F.</i> = 0,918 <i>p</i> = 0,476	<i>Test exact de F.</i> = 1,219 <i>p</i> = 0,412

Réponse à la question 1.6° (Étude 2)

9.6.2. Discussion spécifique à la question 1.6°

Par nature, les deux modalités de représentation comparées pour répondre à cette question de recherche sont différentes. Contrairement à la modalité relative à l'observation d'une représentation virtuelle, la modalité relative à la succession de représentations planes exige de pouvoir coordonner les différentes vues, comme c'est le cas pour la représentation 2D en vues multiples (Audibert, 1990). Pour autant, cette modalité se distingue du mode de représentation en vues multiples dans la mesure où les différentes vues ne sont pas proposées de manière simultanée et dans la mesure où elle offre une indication directe relative à la troisième dimension au travers de la représentation initiale et finale en intégrant directement les trois dimensions ensemble, ce qu'on ne retrouve traditionnellement pas dans les représentations en vues multiples. Cette caractéristique fait certainement de la modalité de représentation ici testée une modalité moins exigeante que la modalité traditionnelle des vues multiples qui exige un effort important de la part de l'individu (Pillay, 1998) et demande un travail de coordination des vues plus important. En effet, comme le précisent St. John *et al.* (2001), une vue 3D est plus utile pour les tâches qui requièrent une compréhension de la forme générale des objets 3D. Cette représentation offre donc des informations conjointes sur toutes les dimensions. Si, seule, elle peut contenir des ambiguïtés et des informations trompeuses (Smallmann *et al.*, 2001), celles-ci sont ici déconstruites à l'aide des représentations successives (différentes vues) fournies ensuite.

Malgré tout, comme le mode de représentation en vues multiples traditionnel, ce mode exige tout de même un travail de coordination des vues présentées, ce qui peut constituer une source de difficultés (Battista & Clements, 1996). Comme pour les représentations virtuelles dynamiques, les différentes informations 2D fournies successivement doivent être maintenues en mémoire de travail et coordonnées en vue de se représenter correctement l'objet 3D.

9.6.2.1. Percevoir les objets 3D au départ de représentations virtuelles : le dynamisme du support n'apporte pas réellement de plus-value

Même si les taux de perception sont toujours légèrement plus élevés au départ de représentations virtuelles dynamiques (2 ½ D) à observer, des différences non significatives sont constatées quasiment pour tous les objets sur l'échantillon complet. Celles-ci s'avèrent uniquement significatives pour l'anneau droit. Cette proximité est

observée aussi à chacune des tranches d'âge au vu de la quasi-totalité des différences non significatives constatées. Wu et Chiang (2013), en travaillant au départ d'objets bien plus complexes et auprès d'adultes, ont pu souligner que des différences entre représentations virtuelles et successions de représentations 2D pouvaient émerger à des tâches nécessitant la perception d'objet 3D. L'auteur a souligné que ces différences allaient en faveur des représentations virtuelles pour des objets possédant des surfaces doublement incurvées, ce qui n'est pas le cas de l'anneau droit. Un décalage est donc observé entre les résultats ici obtenus et ceux de l'auteur. Comme évoqué en discussion 9.1.3., celui-ci peut facilement être expliqué par les objets 3D utilisés par l'auteur, plus complexes, et par la nature de la tâche proposée et les types de distracteur utilisés. On observe par exemple que l'auteur n'a pas intégré dans ses tâches, des distracteurs faisant varier les proportions de l'objet présenté alors que cela constitue l'erreur type majoritaire ici observée.

Au-delà de ça, les résultats ici obtenus permettent de pointer de nombreux autres points communs entre les deux modalités. Au regard de l'ensemble des exercices, il est possible de considérer que la perception d'objets 3D au départ d'une succession de représentations 2D est non systématique chez la plupart des individus. Pour autant, peu d'entre eux n'arrivent à percevoir aucun des objets 3D. Celle-ci apparaît donc partiellement maîtrisée chez la plupart des individus.

Dans les deux modalités, aucun des objets 3D investigués n'est perçu adéquatement par l'ensemble des participants, et ce à chacune des tranches d'âge. Des difficultés sont observées puisque, pour chaque objet, au moins un participant sur cinq ne le perçoit pas adéquatement. De plus fortes difficultés sont par ailleurs observées pour le prisme, pour qui, dans les deux modalités, des difficultés sont constatées pour plus de deux participants sur cinq. Nous renvoyons donc à nouveau le lecteur vers les différentes pistes mises en évidence dans les discussions antérieures (principalement au point 9.1.3). Ces difficultés plus ou moins importantes selon les objets 3D permettent de relever la présence, dans les deux groupes, de différences entre objets 3D. Cela permet de considérer que les capacités perceptives varient selon les objets 3D, comme c'était le cas dans toutes les modalités investiguées dans nos deux études. De plus, la perception de successions de représentations 2D, comme pour les représentations 2 ½ D, est marquée par des irrégularités chez les individus selon les objets à percevoir, mais aussi par des différences individuelles. Les constats mis en évidence par Neisser (1976, cité par Widder *et al.*, 2019) sur la présence de différences individuelles dans les

capacités de perception de représentations planes peuvent donc être généralisées aux successions de représentations 2D, comme aux représentations virtuelles.

L'étude permet par ailleurs de mettre en lumière des fréquences relatives au cas de perception inadéquate similaires dans les deux modalités. On y observe également une même tendance au niveau des propositions 3D non attendues les plus couramment choisies, avec une plus forte sélection de l'objet 3D dont la hauteur est modifiée. Ceci confirme que les difficultés au départ des représentations 2 ½ D ne sont pas dues uniquement à une incompréhension du principe des environnements virtuels évoqués précédemment puisque des difficultés semblables sont observées en dehors de ce type d'environnement. La difficulté à garder en mémoire les informations transitoires 2D successives, déjà mises en évidence au départ de représentations virtuelles, semble en revanche être une raison susceptible d'expliquer les difficultés de perception (van Gog *et al.*, 2008). De même, puisque les choix relatifs à l'objet dont la hauteur est modifiée obtiennent des taux de sélection élevés sauf pour le cube et la sphère, il est possible de suggérer aussi, au départ de représentations planes successives, l'influence de la pensée catégorielle (Rossielle & Cooper, 2001) sur les capacités perceptives (*cf.* 9.1.3).

Par ailleurs, l'observation plus faible de la sélection de l'objet 3D incliné, pour le prisme, peut inciter également à confirmer les arguments relatifs aux difficultés à observer des objets en mouvement (Larios, 2006 ; Todd, 2004). Toutefois, le fait d'observer des taux globalement similaires de perception inadéquate entre les deux modalités, tout comme le fait de quand même observer ce type de choix face à des suites de représentations planes invite à considérer que cet argument ne peut pas, à lui seul, expliquer les difficultés de perception de représentations virtuelles. Ces résultats obtenus encouragent donc à considérer que l'explication principale aux difficultés de perception des objets au départ de leur représentation 2 ½ D se situe dans le fait qu'elles exigent de devoir prendre en considération et combiner l'ensemble des informations 2D fournies. Ces difficultés peuvent être renforcées par les autres arguments évoqués précédemment (pensée catégorielle, rigidité géométrique, incompréhension du principe des environnements virtuels).

Des cas de non-perception de la 3D sont observés face aux successions de représentations 2D comme face à des représentations virtuelles. Des taux de non-perception équivalents sont observés entre les deux modalités pour la plupart des objets 3D, même si ce n'est pas le cas pour le prisme et l'anneau droit. Cela suggère que l'externalisation du mouvement des objets présentés dans les représentations 2D

peut parfois favoriser une prise de conscience plus importante de la troisième dimension de ce qui est présenté. Pour autant, tous les enfants et adolescents arrivent à admettre, pour au moins un des objets 3D, que l'élément présenté par la suite de représentations 2D est un élément tridimensionnel. Cela permet de souligner que les cas de non-perception ne peuvent être expliqués par la présence de conceptions erronées consistant à considérer qu'une suite de représentations 2D ne peut pas permettre de représenter un objet 3D. Il s'agit là d'un point commun supplémentaire avec les représentations virtuelles.

Enfin, une dernière tendance commune pouvant être citée concerne l'évolution de la maîtrise de l'habileté avec l'âge. En effet, dans les deux modalités, les capacités de perception n'augmentent avec l'âge que pour un nombre réduit d'objets, même si une diminution des cas de perception inadéquate est observée pour plusieurs d'entre eux.

Tous ces éléments montrant une proximité entre représentations 2 ½ D et successions de représentations 2D, et en particulier l'absence majoritaire de différences significatives dans les taux observés, invitent à rejeter l'hypothèse d'Höffler (2010) relative à l'apport du dynamisme sur la coordination des vues. En effet, l'auteur mentionne que la coordination entre les informations fournies sur une représentation virtuelle est aidée par le caractère complet et visible des mouvements et changements dans les représentations virtuelles.

De tels résultats sous-entendent que, pour la perception d'objets 3D simples, la plus-value relative aux représentations virtuelles, mise en évidence préalablement par rapport aux représentations 2D uniques, ne se situe pas dans le fait d'externaliser le mouvement en le rendant visible par l'observateur. Elle se situe davantage dans le fait de fournir une succession d'informations relatives à la troisième dimension au lieu d'une information unique, et ce même si la gestion de ces multiples informations est aussi ce qui peut engendrer des difficultés de perception chez certains élèves. Les résultats obtenus invitent donc à nuancer quelque peu les propos de Claisse (2020) qui présente comme argument à la plus-value des représentations virtuelles le fait que le mouvement constitue une aide précieuse pour une meilleure vision dans l'espace.

Cela peut signifier deux choses :

- soit les enfants et les adolescents sont capables au départ des représentations successives, de se représenter mentalement le mouvement entre les représentations 2D successives, c'est-à-dire d'effectuer la connexion entre les

différentes images statiques, ce qui entraîne une équivalence entre les deux supports.

- soit que cette capacité à faire des connexions entre les représentations 2D n'est pas ce qui est déterminant dans la perception de l'objet présenté au départ de successions de représentations 2D, ce qui importe étant la prise en considération des multiples informations présentées.

Les propos d'Höffler et Leutner (2011) soulignent que la capacité à effectuer la connexion entre des images statiques successives nécessite de fortes capacités spatiales. Ceux-ci semblent donc aller dans le sens de cette deuxième hypothèse. À ce sujet, sans doute que les représentations 2D successives présentées ont été déterminantes pour observer cette similitude entre les deux modalités ici comparées. En effet, les successions de représentations 2D, comme les représentations 2 ½ D, incluent l'observation du solide dans des positions qui ne permettent de n'offrir aucune déformation, comme la représentation du dessus de l'objet 3D, contrairement aux représentations en perspective (St John *et al.*, 2001). Harman *et al.* (1999) ont d'ailleurs pu mettre en évidence l'importance de ces vues sur les performances d'adultes à des tâches de reconnaissance de vues d'objets 3D représentés virtuellement. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse qu'au-delà du fait de fournir plusieurs informations et non une seule, la plus-value des représentations virtuelles et des successions de représentations 2D ici testées, en comparaison aux représentations 2D uniques, se situe dans le fait que ces multiples informations fournies donnent accès à des informations sans déformation due à la perspective. Les données récoltées dans l'étude ne permettent pas de vérifier cette hypothèse. Il s'agit pour cela de mettre en place un prolongement, c'est-à-dire l'évaluation de la perception des objets 3D au départ d'autres successions de représentations planes. Il s'agit d'ailleurs d'un prolongement similaire à celui évoqué lors de la comparaison des performances des enfants et des adolescents confrontés à des représentations virtuelles dont ils ont ou non le contrôle, concernant la vérification de l'impact des vues cruciales (*cf.* 9.2.3.1).

9.7. Discussion générale, limites et perspective aux études

Au travers de ces deux études, la maîtrise de la capacité des individus à percevoir et à se construire une image mentale des objets de l'espace 3D est étudiée, ce qui constitue une partie du champ de la cognition spatiale (Hart & Moore, 1973). Plus particulièrement, cette cognition spatiale est étudiée en environnement virtuel et une perspective comparative est utilisée pour affiner son étude.

Bien que les travaux piagétiens ne se soient pas intéressés aux capacités des enfants en environnement virtuel, ces derniers ont pu souligner que, vers l'âge de 7-8 ans, les enfants sont capables de positionner les objets dans un système de coordonnées à trois dimensions. De tels résultats suggèrent qu'ils pourraient donc, à cet âge, être assez matures pour détecter la 2 ½ D et donc être en mesure de percevoir adéquatement des objets 3D au départ de représentations virtuelles.

Les caractéristiques propres à ces représentations virtuelles, simulant les objets de l'espace sensible, invitent toutefois à rester prudent quant à l'acquisition des capacités des enfants et des adolescents à percevoir les objets 3D au départ de telles représentations. En effet, les représentations virtuelles possèdent des caractéristiques propres qui les différencient des objets de l'espace sensible qu'elles représentent (Krylova & Vodyakha, 2022). Elles gardent, par définition, une distance avec l'objet 3D simulé (Bertolo, 2014). Comme cela a pu être évoqué au deuxième chapitre (volume 1), différentes caractéristiques attribuées par plusieurs auteurs à ces représentations permettent de suspecter des difficultés de perception susceptibles de se produire au départ de telles représentations. Vivian *et al.* (2014) expliquent par exemple que ces représentations exigent une reconstitution mentale de la troisième dimension au départ d'informations transitoires devant être stockées et combinées, ce qui peut rendre problématique pour certains individus la capacité à voir dans l'espace au départ d'un environnement virtuel.

Krylova et Vodyakha (2020) ont entamé, de manière exploratoire, l'étude de l'habileté de perception d'objets 3D complexes en environnement virtuel en se focalisant sur les enfants âgés de 4 à 6 ans. Toutefois, nous ne disposons pas d'informations, avant ces études, permettant de vérifier la présence d'éventuelles difficultés de perception d'objets 3D chez les enfants plus âgés et les adolescents, en particulier sur des objets plus simples, tels que ceux rencontrés en contexte d'apprentissage scolaire de la géométrie. C'est donc dans une perspective exploratoire, avec une volonté de

compréhension d'objectivation des potentielles facilités et difficultés de maîtrise de la perception de représentations virtuelles d'objets 3D chez les enfants et les adolescents âgés de 6 à 15 ans que les études ont été menées. Les principaux résultats de ces études, venant d'être détaillés et discutés pour chaque question de recherche, ont permis d'explorer la maîtrise de l'habileté dans l'environnement virtuel en prenant différents points de comparaison, d'une part en variant les modalités dans l'environnement virtuel, et, d'autre part en prenant pour point de comparaison d'autres modalités, notamment les représentations planes et le matériel physique.

Les éléments principaux sont ici discutés au regard de la littérature, mais également en prenant en considération les choix méthodologiques réalisés, ayant pu être justifiés en deuxième partie de ce travail (volume 1). Dès lors, après un retour et une mise en perspective des principaux résultats obtenus, les limites aux études menées ainsi que des prolongements qui en découlent sont proposés.

9.7.1. Retour sur les principaux résultats obtenus

Les deux études menées permettent de mettre en évidence que l'habileté de perception des objets 3D au départ de matériel virtuel semble majoritairement partiellement maîtrisée par les enfants. En effet, il apparaît que, face à de telles représentations, qu'elles puissent ou non être manipulées, la perception des objets 3D n'est pas systématique. Les enfants et les adolescents ne semblent pas tous arriver systématiquement à reconstruire mentalement la troisième dimension de manière correcte au départ des informations dynamiques fournies, comme le suspectaient Vivian *et al.* (2014). Les études permettent de confirmer les observations exploratoires réalisées par Krylova et Vodyakha (2022) auprès d'enfants âgés de 4 à 6 ans. Toutes deux soulignent une perception non systématique des représentations virtuelles d'objets 3D, et ce même si l'évaluation ici proposée porte sur des objets 3D plus simples que ceux sur lesquels portait l'étude antérieure.

Malgré le fait que la pensée dynamique soit déjà développée à l'âge de 5 ans (Frick *et al.*, 2013) et malgré l'impression de tridimensionnalité offerte grâce au caractère dynamique des représentations virtuelles (Bakó, 2003), les résultats des deux études menées permettent de mettre en lumière que les enfants et les adolescents, peuvent être confrontés à des difficultés à percevoir un ou plusieurs objets 3D présentés au sein d'un environnement virtuel, même quand ces derniers sont des objets simples ayant

fait l'objet d'apprentissages scolaires, et même s'ils sont présentés dans un environnement lui aussi voulu le plus simple possible.

Il arrive, bien que cela se produise plutôt rarement, que les enfants et les adolescents ne conçoivent pas l'élément présenté comme un élément en trois dimensions. Ils semblent toutefois tous conscients que ces environnements, comme c'est d'ailleurs le cas aussi pour les représentations 2D et les successions de représentations 2D, peuvent servir à présenter des éléments tridimensionnels. Cela confirme à nouveau les premières observations de Krylova et Vodyakha (2022).

Néanmoins, ce n'est pas parce que les enfants et les adolescents conçoivent que l'objet présenté est en trois dimensions qu'il est systématiquement adéquatement perçu par ces derniers. En effet, les analyses menées montrent qu'il arrive aussi aux enfants et aux adolescents de sélectionner un objet 3D différent de celui présenté dans l'environnement virtuel, ne respectant donc pas l'ensemble des propriétés de l'objet présenté. Si, en cas de choix multiple (étude 1), certains envisageaient que l'élément représenté virtuellement puisse être l'objet attendu, mais aussi éventuellement un autre objet, d'autres l'envisageaient comme un objet différent uniquement. La contrainte d'un choix unique (étude 2) semble par contre avoir permis de montrer majoritairement une fréquence moins élevée de choix différents de l'objet 3D, même si de tels cas de figure restent toujours observés et permettent de confirmer la présence de difficultés de perception. Cette différence entre les deux études suggère ainsi que ceux qui seraient amenés à hésiter entre la proposition correcte et d'autres propositions pourraient davantage se tourner vers le choix correct. Il n'en reste pas moins que les cas de sélection de plusieurs propositions restent interpellant face aux représentations virtuelles puisqu'ils suggèrent alors que les individus se font potentiellement plusieurs représentations mentales de l'objet, ou une image mentale changeante. Un tel constat est incohérent avec l'absence d'ambiguïté relative aux informations fournies sur la troisième dimension au travers des représentations virtuelles. Les informations accessibles via ces représentations ne devraient pas amener d'hésitation, contrairement à ce qu'il pourrait se passer face à des représentations 2D, par nature plus ambiguës (Smallmann *et al.*, 2001), ce qui a d'ailleurs pu être constaté au travers des deux études.

Si cette absence d'ambiguïté devrait normalement générer uniquement des cas de perception adéquate, il semble que, dans les faits, des difficultés sont rencontrées, au moins pour un des objets 3D, par la plupart des participants. L'observation des erreurs

types commises par les participants permet de mieux comprendre les difficultés rencontrées. Différentes explications peuvent être apportées aux difficultés de perception observées par certains participants au départ de représentations virtuelles. La perspective comparative utilisée permet de mettre en avant que l'explication principale aux difficultés de perception des objets au départ de leur représentation virtuelle se situe dans le fait qu'elles exigent de devoir prendre en considération et combiner les informations transitoires fournies. Il n'est cependant pas exclu que d'autres raisons puissent elles aussi expliquer certaines erreurs ou renforcer les difficultés de combinaison des informations transitoires. Les enfants et adolescents, en choisissant majoritairement des objets 3D dont la hauteur est modifiée, semblent ne pas systématiquement prendre en considération les informations récoltées en observant l'avant de l'objet 3D. Cette absence de prise en compte de l'ensemble des informations fournies dans la représentation virtuelle peut par ailleurs être expliquée par une difficulté à prendre en considération toutes les informations métriques, ce que Frick et Newcombe (2015) avaient déjà pu constater sur des représentations 2D. Elles peuvent aussi être expliquées par une possible incompréhension du principe des environnements virtuels combinée à une pensée catégorielle (Rossielle & Cooper, 2001) incitant à ne pas prendre en considération toutes les informations relatives à l'objet 3D, notamment les informations relatives à sa hauteur. Par ailleurs, il arrive aussi, de manière moins régulière, que d'autres erreurs soient commises, telles que la sélection de l'objet 3D incliné. Dans ce cas, la difficulté à reconstruire adéquatement la 3D en combinant les informations transitoires observées peut être renforcée par une difficulté à observer les objets en mouvement, susceptibles de créer une ambiguïté dans ce qui est observé.

Ces difficultés observées aux exercices de perception proposés, nécessitant, comme l'ont envisagé Krylova et Vodyaha (2020), de mettre en correspondance l'objet représenté virtuellement et l'objet réel, tout comme les résultats obtenus au départ de matériel physique (étude 2), permettent de mettre en évidence que la maîtrise de la perception en environnement virtuel diffère majoritairement de la perception dans le monde réel. Il s'agit alors de considérer que la maîtrise des comportements perceptifs dans l'espace sensible et dans les environnements virtuels peut varier, ce qui invite à confirmer l'hypothèse de Rose et Foreman (1999) qui suggéraient que les processus cognitifs et comportements perceptifs pouvaient varier entre les deux modalités.

Néanmoins, en étant menées dans une perspective développementale, les études permettent de mettre en évidence que les capacités de perception visuelle de représentations virtuelles se développent au moins en partie avec l'âge, en particulier pour les objets posant de plus fortes difficultés aux enfants (ex. le prisme droit à base triangulaire). Le niveau de maîtrise de leur perception est, auprès de ce public cible, davantage comparable aux capacités de perception de représentations planes, comme le suggéraient Krylova et Vodyakha (2022). Chez les enfants plus âgés et les adolescents, la maîtrise de ces représentations tend à se distinguer de la maîtrise de représentations 2D ce qui vient donc compléter les résultats de la recherche antérieure. Les représentations virtuelles semblent donc, en grandissant, apporter une plus-value pour la construction des images mentales des objets 3D en comparaison aux représentations planes. Les capacités perceptives de représentations virtuelles tendent, chez les adolescents, à se rapprocher davantage de la perception au départ de matériel physique mais des difficultés de perception parfois importantes continuent d'être observées, y compris chez certains adolescents âgés de 15 ans, et ce même pour des objets 3D simples tels que le cube.

Plus particulièrement, les résultats permettent de suggérer que la plus-value des représentations virtuelles par rapport aux représentations planes uniques se situe davantage au niveau de la multiplicité des informations fournies et certainement à la présence d'informations non déformées par la perspective (vue de l'avant...) plus qu'à leur caractère dynamique, comme le montre la comparaison avec la perception de successions de représentations planes (étude 2). En effet, les enfants et les adolescents arrivent globalement à percevoir de manière similaire les objets 3D au départ de représentations virtuelles, offrant un traitement dynamique de l'information (Osta, 1987) qui permet de traduire progressivement les propriétés, et au départ d'une succession de représentations 2D, contenant elles aussi une suite d'informations mais fournie de manière moins progressive.

Par ailleurs, les études ont investigué l'influence de la manipulation, que ce soit en environnement virtuel ou dans l'espace sensible. Si Meijer et van den Broek (2010) ont suggéré, en prenant appui sur plusieurs études, que les interactions manuelles peuvent impacter positivement la formation des représentations mentales dans l'espace sensible et au départ de représentations virtuelles, les résultats obtenus ne confirment qu'en partie cela pour les représentations virtuelles. Un effet de manipulation n'apparaît que pour certains objets 3D. Dans l'espace sensible en revanche, des

résultats encore plus nuancés sont observés étant donné la forte proximité entre les résultats obtenus dans les groupes confrontés à du matériel à manipuler et à observer. Sans doute que le choix des objets 3D, simples et se rapportant pour la plupart à des objets déjà rencontrés *a minima* dans la scolarité, y est pour quelque chose et qu'il est possible d'émettre l'hypothèse que des résultats différents pourraient être obtenus sur des objets 3D plus complexes.

Enfin, malgré les écarts de niveau de maîtrise de la perception au départ de représentations virtuelles, comme dans les autres modalités investiguées, des différences sont observées entre les objets 3D, certains posant globalement plus de difficultés que d'autres. Les résultats obtenus dans les différentes modalités investiguées permettent notamment d'évoquer les difficultés associées au prisme droit à base triangulaire. Pour autant, les résultats sont également marqués par de fortes différences individuelles, ce qui est cohérent avec la variabilité individuelle soulignée par Piaget au niveau de l'accession aux stades de la pensée spatiale (Pêcheux, 1990, cité par Berthelot & Salin, 1992). Selon les individus, les objets 3D posant des difficultés peuvent ainsi varier. Les résultats sont marqués par une irrégularité chez les individus entre les comportements perceptifs, et notamment entre les erreurs types commises, ainsi que par une évolution pas toujours linéaire des scores aux différents âges. Ces deux constats invitent à considérer que l'habileté fonctionne davantage selon un modèle de développement non linéaire, tel que celui proposé par Siegler ou Van Geert. Ces différences observées chez les individus entre les exercices mais aussi entre les individus peuvent sans doute permettre d'expliquer l'absence de consistance interne de l'évaluation proposée, n'ayant pas permis d'aboutir à un score global évaluant les capacités de perception visuelle des objets 3D. L'observation des résultats par exercice a tout de même permis de dégager certaines tendances permettant d'apporter des éléments de réponse aux différentes questions de recherche. Le Tableau 79 synthétise ces éléments de réponse. Il s'agit cependant de rester prudent par rapport à ces constats réalisés et à leur généralisation compte tenu des spécificités constatées et la forte variabilité observée notamment entre les objets 3D mais aussi aux différentes tranches d'âge.

Tableau 79 : Résumé des réponses aux différentes questions de recherche

	Questions de recherche spécifiques	Réponses synthétiques
1° Les enfants et les adolescents âgés arrivent-ils à percevoir visuellement les objets 3D au départ de leur représentation virtuelle (2 ½ D) ?	1.1° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) manipulable de ces objets ?	Oui, mais cette capacité n'est pas systématiquement maîtrisée. Elle est partiellement maîtrisée par la plupart des enfants et des adolescents, même si, le plus souvent, un nombre élevé d'objets 3D sont adéquatement perçus. Des difficultés à percevoir l'un ou l'autre objet 3D dans l'environnement virtuel sont cependant observées et sont variables selon les enfants et les adolescents.
	1.2° La manipulation de représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D par les enfants ou les adolescents impacte-t-elle leur capacité à percevoir visuellement ces objets ?	Oui, la manipulation impacte partiellement la perception dans la mesure où elle entraîne une perception plus fréquente de certains objets 3D. Ce n'est cependant pas le cas pour tous les objets.
	1.3° L'orientation du support sur lequel les représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D sont présentées aux enfants ou aux adolescents impacte-t-elle leur capacité à percevoir visuellement ces objets ?	Oui, l'orientation du support impacte partiellement la perception dans la mesure où elle entraîne une perception plus fréquente de certains objets 3D. Ce n'est cependant pas le cas pour tous les objets.
	1.4° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ d'une représentation plane (2D) ?	Non, les objets 3D sont majoritairement mieux perçus face à des représentations virtuelles que face à des représentations planes, même si la perception de certains objets 3D au départ des deux modalités tend à se rapprocher, en particulier chez les enfants plus jeunes.
	1.5° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ de matériel physique (3D) ?	Non, les objets 3D sont majoritairement mieux perçus face à du matériel physique que face à des représentations virtuelles, même si une proximité entre les capacités de perception dans les deux modalités est observée pour certains objets 3D.
	1.6° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de percevoir visuellement les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) de ces objets comme au départ d'une succession de représentations planes (2D's) ?	Oui, les objets 3D sont majoritairement aussi bien perçus par les enfants et les adolescents au départ de représentations virtuelles et au départ de successions de représentations planes.

Discussion générale, limites et perspectives

9.7.2. Limites et perspectives aux études menées

Si les études ont permis de relever différents constats exploratoires relatifs à la compréhension du niveau de maîtrise de la capacité à percevoir les objets 3D représentés virtuellement, en comparaison à d'autres modalités de présentation, il est évident que différentes limites peuvent être associées aux études menées. D'ailleurs, certaines d'entre elles ont pu brièvement être évoquées dans les différentes discussions proposées précédemment. Celles-ci peuvent venir impacter les résultats obtenus et débouchent sur l'identification de pistes de prolongement.

9.7.2.1. Des études menées dans un environnement virtuel spécifique

Les études ont notamment permis de relever des difficultés de perception en environnement virtuel ainsi qu'un décalage avec la perception dans l'espace sensible. Il apparaît que les caractéristiques de l'environnement utilisé dans l'étude, si elles permettent de proposer un environnement simple, pourraient avoir influencé les résultats obtenus.

Parmi ces caractéristiques, il est évidemment possible de citer le choix de la perspective utilisée. Dans les deux études menées, l'habileté de perception visuelle d'enfants et d'adolescents a été évaluée au départ de représentations 2 ½ D en projection orthographique et de représentations 2D en projection axonométrique. La représentation 2D, servant par ailleurs de point de départ aux représentations 2 ½ D, correspond à une projection axonométrique légèrement de dessus. Ce type de représentation est considéré comme plus facilement identifiable d'après Parzysz (2006) et correspond à une position offrant une représentation davantage normative au sens de Widder *et al.* (2014). Pour autant, des difficultés ont tout de même été observées chez certains enfants par rapport à la perception de l'objet 3D au départ de représentations 2 ½ D et surtout au départ de représentations 2D. Comme évoqué précédemment, une hypothèse potentielle au décalage entre perception dans l'espace sensible et en environnement virtuel observé pourrait être liée à la projection utilisée puisque la vision dans l'espace sensible se rapproche davantage de la perspective linéaire, dans laquelle les segments sont de plus en plus petits lorsqu'ils s'éloignent de l'œil (Audibert, 1990). Pour autant, malgré le point commun avec la vision dans l'espace sensible, la perspective linéaire ne conserve pas certaines propriétés des objets 3D (cf. chapitre 1, volume 1) ce qui pourrait entraîner des difficultés dans la perception de l'objet 3D et de ses caractéristiques. Afin de vérifier cette hypothèse, un prolongement

pourrait être d'évaluer la capacité de perception mais au départ de représentations, qu'elles soient planes ou virtuelles, en perspective linéaire. La comparaison des capacités perceptives au départ de représentations dans les deux perspectives pourrait permettre de mener une réflexion sur celle étant la plus adaptée au fonctionnement cognitif des enfants : celle se rapprochant de la vision dans l'espace 3D (perspective linéaire) ou celle conservant davantage de propriétés géométriques des objets 3D (perspective axonométrique). Il s'agit évidemment d'une réflexion complémentaire à la réflexion qu'ont les didacticiens de mathématiques quant aux modes de représentations les plus pertinents pour apprendre la géométrie 3D. Le but n'est évidemment pas de contredire les auteurs, tels qu'Audibert (1990), Parzysz (1991) ou Mithalal (2010), qui soulignent que certains modes de représentation, en l'occurrence la perspective cavalière, sont plus pertinents que d'autres pour les apprentissages en géométrie 3D. Néanmoins, mieux connaître comment les objets 3D sont appréhendés dans les différentes perspectives pourrait ouvrir la réflexion sur les supports d'évaluation des compétences impliquant des représentations d'objets 3D, que ce soit en contexte scolaire ou non (épreuves psychométriques, évaluations nationales...). D'autant que les évaluations externes nationales organisées dans les écoles belges francophones proposent différents modes de représentations lorsque des compétences en géométrie 3D sont évaluées alors même que certains d'entre eux ne doivent pas, d'après les prescriptions, faire l'objet d'un apprentissage (Beuset & Duroisin, 2023c). De plus, de nombreux outils virtuels susceptibles d'être utilisés avec les apprenants proposent de passer d'un mode de représentation à l'autre. Les résultats d'un tel prolongement pourraient guider le choix de perspective à utiliser, notamment lors de l'évaluation des habiletés spatiales.

De plus, dans l'environnement virtuel utilisé, les solides sont proposés comme en « lévitation », dans le vide. Cette caractéristique de l'environnement, qui a permis de le rendre épuré, pourrait avoir influencé la perception visuelle en rendant moins facile la perception en limitant les indices relatifs à la troisième dimension. Ce choix implique par exemple l'absence d'une ombre que l'objet 3D pourrait occasionner si celui-ci apparaissait au départ en lévitation, mais au-dessus d'un plan sur lequel serait projetée l'ombre. Or, comme l'indiquent Dumas *et al.* (2001), intégrer une ombre en dessous d'un objet constitue un indice relatif à la troisième dimension. Havé *et al.* (2020) qualifient d'ailleurs cet indice d'efficace pour percevoir la troisième dimension, ce qui pourrait par exemple mener à une diminution des comportements bidimensionnels

constatés dans les études. L'ajout d'indices de profondeur à une scène permet en effet d'aider à la reconnaissance d'objets 3D (Humphrey & Jolicoeur, 1993, cités par St. John *et al.*, 2001). Dans une perspective comparative, répliquer l'expérimentation en adaptant en ce sens l'environnement virtuel devrait permettre de voir à quels points ces indices jouent ou non un rôle sur la perception visuelle en environnement virtuel. Si les caractéristiques de l'environnement utilisé dans nos études peuvent être un facteur d'influence, il est important de garder à l'esprit que l'on retrouve parfois ces mêmes caractéristiques dans certains manipulateurs virtuels ou autres logiciels susceptibles d'être utilisés avec ou par des enfants et des adolescents.

Outre l'ajout d'ombres, un prolongement potentiel pourrait être de proposer, à l'instar de Castro-Alonso *et al.* (2015, 2018) d'intégrer la présence d'une main dans la représentation 2D ou 2 ½ D proposée. L'enfant serait alors confronté à la représentation d'un objet 3D présenté dans la main d'une personne. Les rotations appliquées dans la représentation virtuelle seraient alors des manipulations de l'objet effectuées par la main apparaissant. Comme l'évoque Castro-Alonso *et al.* (2015), cette main est notamment susceptible d'influencer positivement la perception en incitant à des mécanismes incarnés. Par ailleurs, en confirmant que l'objet 3D peut être tenu en main, elle permettrait de guider l'individu dans le passage à la 3D en diminuant les comportements bidimensionnels. Peut-être que cela permettrait aussi d'éviter les choix 3D incorrects comme celui relatif à la hauteur de l'objet 3D puisque la main pourrait constituer un point de comparaison permettant de mieux comprendre la taille ou de concevoir que les propositions des éléments présentés virtuellement sont conservées.

Si les caractéristiques de l'environnement évoquées jusqu'ici sont susceptibles d'avoir complexifié les capacités de perception des enfants et des adolescents, d'autres caractéristiques de l'environnement utilisé peuvent avoir, à l'inverse, favorisé la perception des objets 3D. C'est le cas par exemple de la simplicité d'utilisation et des limitations de manipulation offertes dans l'environnement. Les possibilités de manipulation des objets 3D dans l'environnement virtuel ont ici été limitées (uniquement des rotations dans deux dimensions) en vue de contrôler les actions réalisées par les participants et en vue d'assurer une utilisation simple de l'environnement, qui a d'ailleurs été vérifiée (*cf.* chapitre 6, volume 1). Il semble que la plupart des logiciels impliquant des environnements virtuels 2 ½ D, y compris ceux destinés aux élèves, offrent des environnements plus complexes permettant de réaliser par exemple d'autres rotations sur les objets 3D mais également d'autres actions, ou

encore nécessitant la mise en œuvre de manipulations tactiles diverses. Dès lors, les habiletés spatiales exercées dans ces environnements plus complexes à utiliser pourraient s'avérer plus difficiles à mettre en œuvre, alors même que, dans l'environnement virtuel utilisé, les études ont montré que la perception de la 3D pouvait poser des difficultés. En ne limitant pas les rotations possibles, les utilisateurs risquent d'être davantage confrontés à des difficultés à associer les gestes réalisés sur l'écran 2D avec les mouvements en 3D appliqués à l'objet virtuel (Cohé, 2012). De plus, la limitation des manipulations ici utilisées implique une limitation des positions dans lesquelles l'objet 3D est susceptible d'apparaître. Une suppression de ces limitations impliquerait donc une présentation de l'objet dans des positions moins courantes, voire non standards, ce qui est susceptible d'impacter la capacité des enfants à s'imaginer mentalement les objets 3D (Larios, 2006). Par exemple, en évaluant à nouveau la perception au départ d'un environnement virtuel autorisant d'autres rotations, il est possible de suspecter l'émergence de résultats différents tels que l'augmentation de la proposition 3D « objet 3D penché » qui pourrait être plus importante suite à l'observation de l'objet 3D dans une position oblique.

Enfin, au-delà des caractéristiques de l'environnement virtuel utilisé, les caractéristiques du support et de l'interface de manipulation associée sont-elles aussi susceptibles d'impacter les capacités de perception. Si le choix a ici été fait de travailler avec des environnements virtuels non immersifs manipulables via interface tactile, d'autres modalités d'interaction, par exemple l'utilisation de la réalité augmentée ou de casque de réalité virtuelle, pourraient être envisagées. D'autant que plusieurs recherches se sont intéressées à l'usage de ce type de support pour l'apprentissage de la géométrie 3D (Thamrongrat & Law, 2019 ; Gecu-Parmaksiz & Delialioglu, 2019 ; Demitriadou *et al.*, 2019).

Que ce soit par rapport aux caractéristiques de l'environnement (perspective, indices, manipulation) ou du support utilisé, on observe ici que différents éléments sont susceptibles d'avoir influencé les résultats obtenus. Ces résultats doivent donc être considérés au regard de ces éléments caractéristiques. De cela, débouchent toute une série de prolongements impliquant des répliques de l'étude proposée en faisant varier certaines caractéristiques pour, toujours dans une perspective comparative, mieux comprendre le fonctionnement cognitif en environnement virtuel. Ces investigations pourraient, en plus de compléter ou nuancer les résultats ici obtenus,

permettre d'apporter des recommandations supplémentaires quant aux supports utilisés avec les enfants et les adolescents en contexte scolaire, mais pas uniquement.

9.7.2.2. Des études menées sur des objets spécifiques à l'apparence particulière

Au-delà des caractéristiques de l'environnement, il est évident que les résultats obtenus sont également dépendants des objets 3D investigués. C'est d'autant plus vrai compte tenu des fortes différences constatées entre les objets 3D. Ici, le choix a été fait de se focaliser sur des objets 3D usuels faisant écho, pour la plupart, à des solides géométriques mais aussi d'intégrer deux objets plus complexes, au sens des recherches piagésiennes (les anneaux). Les apprentissages scolaires et l'expérience à l'égard de chacun des objets 3D sont évidemment des facteurs susceptibles d'influencer les résultats. Il n'empêche que les résultats permettent de mettre en lumière que, même pour des objets simples, des difficultés de perception sont identifiées. Toutefois, chaque objet 3D a ici été investigué au travers d'un seul exercice. Sans doute pourrait-il être pertinent d'intégrer plusieurs objets 3D appartenant à la même catégorie mais possédant de proportions différentes (ex. plusieurs cylindres de tailles différentes) en vue d'évaluer avec davantage de certitude les capacités de perception des objets 3D et la récurrence des erreurs types commises. Cela pourrait par ailleurs permettre d'offrir de nouvelles possibilités d'analyses statistiques qui ont dû ici être réalisées uniquement sur des données dichotomiques (l'enfant a ou non perçu adéquatement l'objet 3D). Rappelons cependant qu'il s'agit d'une première étude exploratoire évaluant la maîtrise de l'habileté sur ce type d'objets 3D et avec ce public cible. D'ailleurs, si les études ont permis de mettre en évidence l'existence de différences entre les objets et de relever des spécificités pour certains objets 3D, les données récoltées dans les études et le peu de recherches antérieures sur le sujet ne permettent pas toujours de comprendre et d'interpréter ces différences et spécificités, même si des pistes ont pu être évoquées.

Étant donné les fortes différences constatées entre les objets 3D dans les deux études menées, il pourrait également être pertinent de répliquer les analyses menées sur d'autres objets 3D. D'une part, mener l'étude sur le parallélépipède rectangle ainsi que sur d'autres prismes droits et des pyramides permettrait de poursuivre les investigations sur les objets 3D faisant l'objet des apprentissages en géométrie 3D d'après le référentiel, du moins en ce qui concerne la Belgique francophone (FWB,

2019). Des comparaisons entre objets 3D partageant une série de caractéristiques communes pourraient ainsi être menées (ex. parallélépipède rectangle et autres prismes, pyramide et cône...). D'autre part, il s'agirait de mener des études similaires sur des objets plus complexes, à l'instar de ce qu'ont proposé Wu et Chiang (2013) auprès d'adultes. L'intégration d'objets ne contenant pas de symétrie pourrait permettre de vérifier si la facilité de reconnaissance associée aux formes symétriques (Pizlo *et al.*, 2010) se confirme dans l'environnement virtuel. Enfin, il pourrait aussi être pertinent de mener des expérimentations sur des objets 3D complexes obtenus en assemblant des objets 3D simples, comme Frick et Newcombe (2015) l'ont envisagé au départ de représentations 2D. Un tel choix permettrait alors d'investiguer non pas uniquement la perception des formes des objets, mais aussi la perception des positionnements d'objets dans l'espace les uns par rapport aux autres.

Qui plus est, au-delà des choix d'objets, les choix relatifs à l'apparence des objets dans les environnements (objets pleins et colorés) peuvent sans doute avoir influencé les résultats obtenus, comme le suggère l'influence de la capacité à distinguer les teintes présentes sur le prisme sur la maîtrise de la perception de cet objet 3D. Découle de cet aspect toute une liste de prolongements supplémentaires pour investiguer l'influence de certains aspects relatifs aux caractéristiques des éléments représentés virtuellement. Au même titre que des études antérieures ont comparé les capacités des individus à agir sur différentes formes de représentations planes, il est possible d'en faire autant dans l'environnement virtuel. Vérifier si et comment cette caractéristique peut influencer les processus perceptifs chez les enfants et les adolescents doit permettre de mener une réflexion sur les supports d'évaluation et sur leur influence sur les performances des apprenants. Par ailleurs, dans le cadre scolaire, plusieurs outils virtuels susceptibles d'être utilisés avec les apprenants proposent également de modifier la transparence des solides virtuels. C'est le cas par exemple de l'application *Shapes 3D* évoquée précédemment. Des investigations sur l'impact de la transparence sur la perception devraient notamment permettre de fournir des pistes quant à la pertinence de l'utilisation de telles options avec les enfants et adolescents, que ce soit dans le contexte scolaire ou non.

9.7.2.3. Des études menées au départ d'une tâche de reconnaissance

Une tâche de reconnaissance apparaît adaptée au public cible, comme le rappellent Frick et Newcombe (2015) en prenant appui sur les propos de Piaget *et al.* (1948). Elle correspond d'ailleurs aux types de tâches proposées dans les études antérieures ayant investigué l'habileté de perception visuelle. Pour autant, des limites peuvent leur être associées.

Comme dans toute tâche de reconnaissance, une limite qu'il est possible de mettre en évidence concerne les propositions (distracteurs) qui composent les tâches. En effet, ces distracteurs influencent évidemment les réponses des individus puisque peut-être qu'avec une tâche de production, ces derniers auraient fourni d'autres productions que celles ici proposées. Même si les choix de distracteurs ont été faits en prenant appui sur des études antérieures ayant évalué l'habileté de perception, le peu de recherches ayant évalué cette habileté en environnement virtuel n'a pas permis de disposer d'une liste préétablie de distracteurs pouvant être associée à des erreurs types.

Une piste pourrait être d'investiguer la même habileté en proposant cette fois une tâche de reconstruction de l'objet 3D à l'aide de matériel divers. Ce type de tâche possède cependant d'autres limites comme le fait de requérir des compétences visuo-constructrices supplémentaires (Barisnikov & Pizzo, 2013) susceptibles d'impacter les performances. Peut-être aurait-on pu imaginer également poser des questions sur l'élément présenté pour identifier la façon dont il est perçu (informations sur les faces...), avec la limite que cela risque de solliciter davantage les connaissances géométriques, ce qui n'était pas l'objectif de l'étude.

Plus précisément, une limite relative aux tâches de reconnaissance relève de la comparaison des exercices entre eux. En effet, la quantité de propositions varie entre les exercices, même si la volonté a été de proposer, tant que possible, des distracteurs similaires. De plus, une autre limite associée à la tâche proposée relève du fait que l'ordre des exercices, qui est identique dans toutes les modalités, mais qui est susceptible d'impacter les résultats, notamment suite à un éventuel effet d'apprentissage ou de fatigue. Pour cela, une alternative pourrait être d'inverser l'ordre des exercices auprès de la moitié des participants (Frick & Newcombe, 2015).

Toujours en lien avec la tâche de reconnaissance proposée, il nous apparaît essentiel de revenir sur la limite associée à l'interprétation des cas de non-perception, évoquée dans la discussion relative à la première question de recherche (*cf.* 9.1.3), mais qui

pourrait être élargie aux autres questions de recherche également. En effet, l'observation de la sélection de propositions 2D uniquement dans la première étude nous incite à considérer que le participant se situe dans un cas de non-perception de la 3D, et donc à des comportements bidimensionnels. Néanmoins, la sélection d'aucune proposition 3D pourrait être due au fait qu'aucun des choix 3D proposés ne convient au participant, ce qui peut l'amener à sélectionner par défaut une ou des propositions 2D. De même, dans la seconde étude, exigeant un choix unique, nous avons aussi soulevé l'hypothèse que l'enfant, notamment face à une représentation 2D, se tourne vers ce choix 2D en cas d'hésitation entre plusieurs choix 3D. Il s'agit donc de rester méfiant quant à cette association entre sélection de choix 2D et comportements bidimensionnels, d'autant plus compte tenu du fait que les propositions 2D fournies sont en réalité des représentations planes de l'objet 3D représenté. Étant donné la confusion pouvant exister entre l'objet et sa représentation (Fagot *et al.*, 2000), il est donc possible de suspecter que certains enfants et certains adolescents sélectionnent une proposition 2D en la considérant comme une représentation de l'objet 3D présenté et non comme un élément plat. L'analyse des verbatims semble d'ailleurs aller dans ce sens puisqu'elle permet d'identifier qu'une partie des individus sélectionnent la proposition 2D en tant que représentation de l'objet 3D perçu, comme l'illustre l'exemple de verbatim suivant : « C'est un dessin de cube » (étude 1, participant n° 55, 9 ans). Si la prise en compte de ces verbatims permet de nuancer déjà en partie les taux de non-perception, de nombreux verbatims formulés ne permettent pas de trancher sur le passage ou non à la 3D en cas de sélection d'un objet 2D. Le verbatim suivant en est un exemple : « *c'est la même chose que sur la tablette* » (étude 1, participant n° 19, 7 ans). Cette difficulté à trancher, au regard du verbatim, quant au passage ou non à la 3D constitue une limite qui implique une surestimation potentielle des cas de non-perception dans les analyses menées. Une piste pour contrer cette limite pourrait être d'entamer un échange avec le participant afin de comprendre si le choix réalisé fait écho à un objet bidimensionnel ou à un représentant de l'objet 3D.

Par ailleurs, si les verbatims ont ici été pris en compte et analysés pour mieux statuer sur le passage éventuel à la 3D, des analyses complémentaires pourraient être menées sur l'ensemble des verbatims fournis notamment pour comprendre le type d'arguments utilisés par les enfants et les adolescents. Par exemple, les études menées permettent de mettre en avant une diversité dans les justifications formulées. Certains enfants et adolescents se basent sur une ressemblance globale de la forme choisie avec

ce qui a été présenté (ex. « Il a la même forme » , étude 1, participant n° 292, 6 ans) ou en faisant écho à une ressemblance avec un objet du quotidien (ex. « ça ressemble aussi à un donuts et à une roue » , étude 1, participant n° 34, 11 ans) là où d'autres semblent plutôt prendre appui sur des caractéristiques et propriétés de l'objet observé (ex. « le pic est au milieu de la forme et la base est ronde » , étude 1, participant n° 134, 11 ans). À ce sujet, une analogie peut sans doute être proposée avec la théorie de Duval (2005) et des modes de visualisation, qui s'intéressent au regard porté par les individus en géométrie. De même, des liens pourraient être réalisés avec le modèle de Pegg (1997), présenté au point 4.1.6 (volume 1), qui identifie différents niveaux de pensée utilisés pour la reconnaissance des figures (apparence globale, prise en compte d'une ou plusieurs propriétés...). Il semblerait alors pertinent d'observer comment les arguments évoluent avec l'âge, si la prégnance des différents niveaux de pensée varie selon les modalités de présentations des objets 3D et le lien entre les arguments utilisés et la perception adéquate des objets 3D.

9.7.2.4. Des études menées dans une perspective comparative comparant des groupes indépendants constitués d'un échantillon tout-venant

Au-delà des limites relatives au matériel et aux tâches expérimentales proposées, une autre limite pouvant être évoquée concerne le choix de plan expérimental (comparaison de groupes indépendants) utilisé et des analyses qui en découlent.

Dans une perspective exploratoire, nous avons privilégié, dans les deux études, une succession d'analyses comparatives menées sur plusieurs groupes. Ce choix nous a permis d'investiguer toutes les relations sur lesquelles portent nos hypothèses de travail, mais parfois au détriment de la puissance statistique de nos analyses ainsi qu'au détriment d'analyses générales portant sur l'ensemble des groupes investigués. Les recherches ultérieures devront, dans une perspective confirmatoire, valider les relations mises en évidence dans nos analyses dans le cadre d'études indépendantes (Hubert & Wainer, 2011) planifiées pour se concentrer sur une comparaison expérimentale unique dont la puissance statistique sera, par essence, plus forte (Barker Bausell & Li., 2002). Il s'agit alors, dans ces études ultérieures, de se focaliser sur certaines variables (seules, croisées ou même nichées) contrairement à ce qui a ici été proposé. Pour autant, il s'agit également avant tout d'adapter l'épreuve ici utilisée en proposant sans doute l'intégration de nouveaux exercices évaluant l'habileté de perception en vue notamment d'aboutir à une évaluation possédant une meilleure

consistance interne. Cela permettrait également d'envisager d'autres analyses statistiques que celles ici utilisées. Des pistes ont précédemment pu être mentionnées par rapport à l'ajout d'exercices supplémentaires dans l'évaluation.

Une autre limite se rapportant aux deux études concerne l'utilisation d'une perspective comparative impliquant des groupes indépendants. Même si ce choix est fait dans de nombreuses études menées dans une perspective comparative (par exemple : Baki *et al.*, 2011 ; Bakó, 2003 ; Katsioloudis *et al.*, 2014 ; Krylova & Vodyakha, 2022 ; Wang *et al.*, 2007), dont les objectifs étaient parfois proches de ceux ici visés, cette solution implique de comparer des groupes composés d'individus différents. D'autant que, comme cela a pu être observé dans l'analyse des résultats, l'habileté de perception est marquée par des différences individuelles. Si l'équivalence entre les groupes a pu être vérifiée par rapport à de nombreuses variables susceptibles d'impacter les compétences spatiales, quelques divergences entre groupes ont pu être constatées au départ. De plus, la liste de variables susceptibles d'impacter les compétences spatiales est non exhaustive. Ainsi, les groupes pourraient ne pas être équivalents par rapport à d'autres variables, non prises en compte dans les analyses. Mener des investigations sur ces nouvelles variables constitue un prolongement aux études menées, que ce soit pour vérifier l'équivalence des groupes et donc mieux comprendre les différences entre les résultats des groupes ou pour investiguer un éventuel effet de la variable sur l'acquisition de l'habileté. Nous citerons ici deux exemples. D'une part, le niveau des connaissances géométriques des participants est susceptible d'influencer la capacité de perception puisque l'élève pourrait associer ce qui est présenté à une image mentale de l'objet 3D qu'il a déjà en mémoire grâce au cours de géométrie 3D. C'est d'ailleurs ce que font certains participants, comme l'illustrent les verbatims utilisés par certains pour justifier leur choix, en associant directement l'objet auquel ils sont confrontés à un objet géométrique théorique (ex. « C'est un cube, les autres c'est pas des cubes », étude 1, participant n° 120, 12 ans). Si des informations ont été récoltées auprès des enseignants et des participants sur l'expérience antérieure en géométrie, ces informations restent limitées. Il est difficile de savoir si les enfants ont ou non été confrontés aux objets 3D ici étudiés et plus spécifiquement à ces objets 3D dans la modalité dans laquelle elle a été représentée. Même s'il est possible de prendre appui sur les prescrits en vigueur, la géométrie 3D reste souvent délaissée par les enseignants (Beauset *et al.*, 2024b) et rien ne nous assure de ce qui a été travaillé par les élèves interrogés les années antérieures. D'autant

que le contexte belge francophone est marqué par une réforme des prescrits en cours de mise en œuvre rendant encore plus complexe l'identification des apprentissages censés avoir été réalisés.

D'autre part, la variable relative au niveau de développement de la mémoire visuospatiale des individus constitue une variable non prise en compte, qui pourrait pourtant expliquer des écarts entre les performances individuelles notamment puisque la perception implique de devoir traiter des informations dynamiques (Bujak *et al.*, 2013 ; Höffler, 2010 ; Miyake *et al.*, 2001).

Pour contrer cette limite relative à l'utilisation de groupes indépendants, à l'instar de Krylova et Vodyaha (2020), il est possible d'envisager une étude dans laquelle chaque enfant est évalué dans les différentes modalités. Toutefois, afin d'éviter un effet d'apprentissage, il s'agit alors d'évaluer l'habileté sur des formes différentes pour chacune des modalités. Au vu des résultats obtenus dans nos études, pointant l'existence de fortes différences entre les objets 3D, il s'agit de rester prudent quant à cette alternative. Une piste hybride pourrait être de prendre appui sur les résultats de nos études exploratoires, mettant en évidence une proximité des résultats entre certains objets 3D et d'effectuer les comparaisons sur ces solides. La piste de prolongement évoquée précédemment, consistant à intégrer plusieurs objets 3D de proportions différentes, pourrait aussi être exploitée (à condition d'observer des résultats proches entre ces objets 3D quand ils sont évalués dans une même modalité). Elle permettrait de présenter, pour une même catégorie d'objets, des exercices dans différentes modalités.

Plus particulièrement, la limite relative à la comparaison de groupes indépendants peut aussi s'avérer problématique dans le cadre de la perspective développementale souhaitée. En effet, le choix d'évaluer, à un temps précis, les compétences des enfants et des adolescents et de comparer ces compétences. Une alternative aurait pu être de mener une étude longitudinale sur plusieurs années visant l'étude de l'évolution du niveau de maîtrise de l'habileté auprès de chaque participant. Cela pourrait permettre ainsi de contrôler davantage de paramètres et notamment les apprentissages de géométrie 3D.

Enfin, une dernière limite que nous choisissons ici d'évoquer concerne la sélection d'un échantillon tout-venant de participants d'enfants et d'adolescents scolarisés dans l'enseignement ordinaire. Ce choix implique notamment la conservation d'enfants et d'adolescents présentant des risques de troubles d'apprentissage, susceptibles

d'influencer les performances. Ceux-ci s'avéraient cependant trop peu nombreux pour pouvoir mener des analyses exclusivement sur ces derniers. Si l'intérêt, en n'excluant pas les enfants et les adolescents présentant des troubles, est de se rapprocher au mieux de la réalité des classes, il pourrait être pertinent de mener des analyses en excluant les enfants présentant des troubles, ou de répliquer l'étude en se focalisant exclusivement sur ces enfants.

Chapitre 10. Étude de l'habileté de visualisation spatiale

Chapitre 10. Étude de l'habileté de visualisation spatiale²⁴

Après avoir étudié l'habileté de perception visuelle de la 3D, au sein du chapitre 9, ce dixième chapitre, qui ponctue la troisième partie de ce manuscrit, se focalise sur la deuxième habileté spatiale investiguée : l'habileté de visualisation spatiale. Pour rappel, cette deuxième habileté a été étudiée au travers de la seconde étude expérimentale. Celle-ci a d'abord évalué l'habileté de perception visuelle auprès d'enfants et d'adolescents âgés de 6 à 15 ans avant de poursuivre avec l'investigation de l'habileté de visualisation spatiale en ne conservant que les enfants et les adolescents âgés de 8 à 15 ans. Dans cette deuxième partie de l'étude expérimentale, les enfants et les adolescents ont été invités à résoudre des tâches de dessin de formes d'empreinte et de coupe de différents objets 3D au départ de plusieurs modalités de présentation des exercices, semblables à celles utilisées dans l'évaluation de la perception visuelle. Au total, vingt exercices ont été proposés : un exercice d'empreinte, un exercice de coupe transversale, un exercice de coupe longitudinale et un exercice de coupe oblique pour chacun des cinq objets 3D investigués (cube, cône, sphère, cylindre, anneau rond). Les productions des enfants et des adolescents ont fait l'objet d'un codage (en double aveugle) au regard d'une grille de codage, et chaque réponse jugée correcte permet d'obtenir un point, formant une note totale sur 20.

La structure de la présentation des résultats s'inscrit dans la même logique que celle du chapitre précédent. Après une vérification du caractère paramétrique ou non des données, les résultats sont présentés en se focalisant tour à tour sur chacune des questions de recherche spécifiques. Les résultats relatifs à ces questions sont progressivement présentés en prenant en considération les différentes variables investiguées et sont ensuite discutés. Finalement, une discussion générale est proposée et permet alors de répondre au deuxième objectif du travail de recherche, à savoir caractériser l'évaluation de la maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale en environnement virtuel. Cette discussion est par ailleurs l'occasion de mettre en avant les limites et perspectives de l'étude.

²⁴ Une partie des résultats présentés dans ce chapitre a fait l'objet d'une publication : Beauset *et al.* (2024a).

10.1. Vérification de la normalité des données

Comme pour l'habileté de perception visuelle, des tests inférentiels non paramétriques vont être utilisés. Ce choix se justifie par le fait que les scores de visualisation spatiale (sur 20) obtenus au total et dans la plupart des groupes (tous excepté le groupe 3 et le groupe 5) ne suivent pas une loi normale étant donné les résultats significatifs obtenus aux *tests de Shapiro-Wilk* appliqués (Tableau 80). Comme pour la première habileté, l'ensemble des tests appliqués, dont les résultats sont présentés ci-dessous, sont des tests à deux issues avec un seuil de significativité valant 0,05.

Tableau 80 : Vérification de la normalité des scores de visualisation spatiale (sur 20) au total et par groupe : test de normalité de Shapiro-Wilk et p-value (p)

Échantillon total (N = 529)	G1 : manip. 2½D (N = 88)	G2 : obs. 2½D (N = 90)	G3 : manip. 3D (N = 87)	G4 : obs. 3D (N = 86)	G5 : obs. 2D (N = 88)	G6 : obs. 2D's (N = 90)
0,972 p < 0,001**	0,951 p = 0,002**	0,943 p = 0,001**	0,975 p = 0,085	0,946 p = 0,001**	0,973 p = 0,066	0,969 p = 0,028*

10.2. Réponse à la question de recherche 2.1° : Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables

Pour répondre à cette première question, les résultats relatifs au premier groupe de la seconde étude sont exploités. Il ne s'agit donc pas ici de réaliser des analyses comparatives entre les groupes indépendants, mais uniquement de présenter les analyses menées sur ce premier groupe.

10.2.1. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables (toutes tranches d'âge confondues)

Le score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles (10,45 sur 20) obtenu par le groupe confronté à des représentations virtuelles manipulables semble indiquer une maîtrise partielle de l'habileté de visualisation spatiale. Par ailleurs, de forts écarts de performance sont observés entre les individus, comme l'illustre l'écart type, dont la valeur est de 4,734, mais également la Figure 31. En effet, le score de visualisation spatiale obtenu varie entre 0 et 19 sur 20, même si le nombre de participants obtenant ces valeurs extrêmes reste faible puisqu'un seul d'entre eux obtient une note de 0 et un seul également obtient une note de 20. Malgré

cette large étendue des scores, les médianes calculées permettent de mettre en évidence que 50% des enfants et des adolescents ont un score supérieur ou égal à 12 sur 20. De plus, l'observation des quartiles permet de mettre en évidence que 50% des participants ont un score compris entre 6 et 14 sur 20. Ces indications confirment donc que la maîtrise de l'habileté est partielle pour une bonne partie de l'échantillon malgré la présence d'écart importants entre individus.

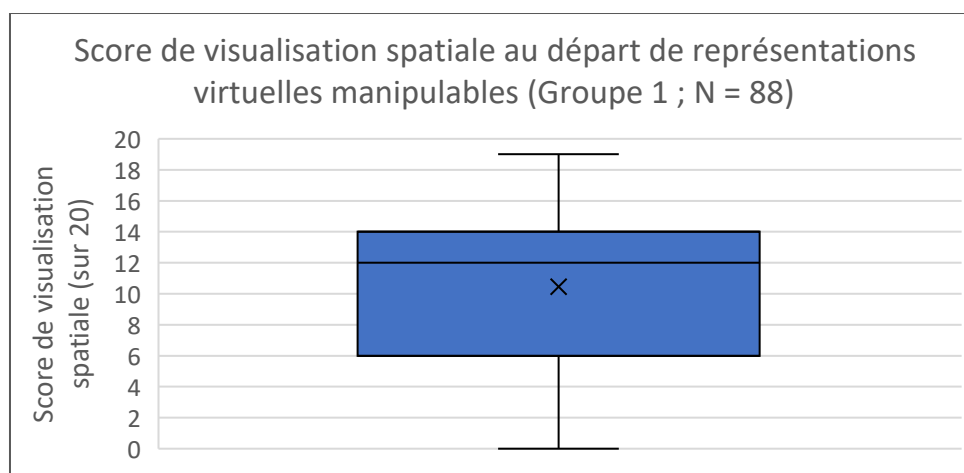


Figure 31 : Répartition du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables

10.2.2. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables selon l'âge

Si de fortes différences individuelles au niveau de l'acquisition de la capacité de visualisation spatiale viennent d'être mises en évidence, l'observation des scores ainsi que leur répartition à chaque tranche d'âge (Figure 32) soulignent la présence d'une évolution globalement positive des scores entre les tranches d'âge. En effet, le score moyen obtenu à chaque tranche d'âge est croissant puisqu'il passe respectivement de 8,04 à 9,74, 10,59 puis 13,62 sur 20. Autrement dit, il apparaît que les capacités à résoudre des tâches de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles évoluent avec l'âge. Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson calculé entre le score de visualisation spatiale (sur 20) et l'âge (en jour), présenté aussi au sein de la Figure 32, confirme cette observation puisqu'un coefficient positif et fort est obtenu, d'une valeur proche de 0,45.

Par ailleurs, malgré ce lien positif entre les capacités de visualisation et l'âge, la répartition des scores obtenus à chaque tranche d'âge souligne la présence de

différences individuelles importantes aux différentes tranches d'âge. Dans la première tranche d'âge investiguée, par exemple, le score moyen est proche de 8 sur 20, mais les scores individuels varient fortement. Certains enfants atteignent un score de 0 sur 20 et d'autres un score de 17 sur 20, avec 50% des individus qui ont un score supérieur à 6 sur 20. À la deuxième tranche d'âge, le score varie cette fois entre 1 et 16 sur 20, la moitié des participants obtenant un score supérieur ou égal à 11 sur 20. Le score des participants de la troisième tranche d'âge varie entre 1 et 19 sur 20 et la moitié des participants ont un score supérieur ou égal à 12 sur 20. Enfin, 50% des adolescents âgés de 14 à 15 ans obtiennent un score supérieur à 14 sur 20 et, au total, les scores varient entre 6 et 18 sur 20 à cette tranche d'âge.

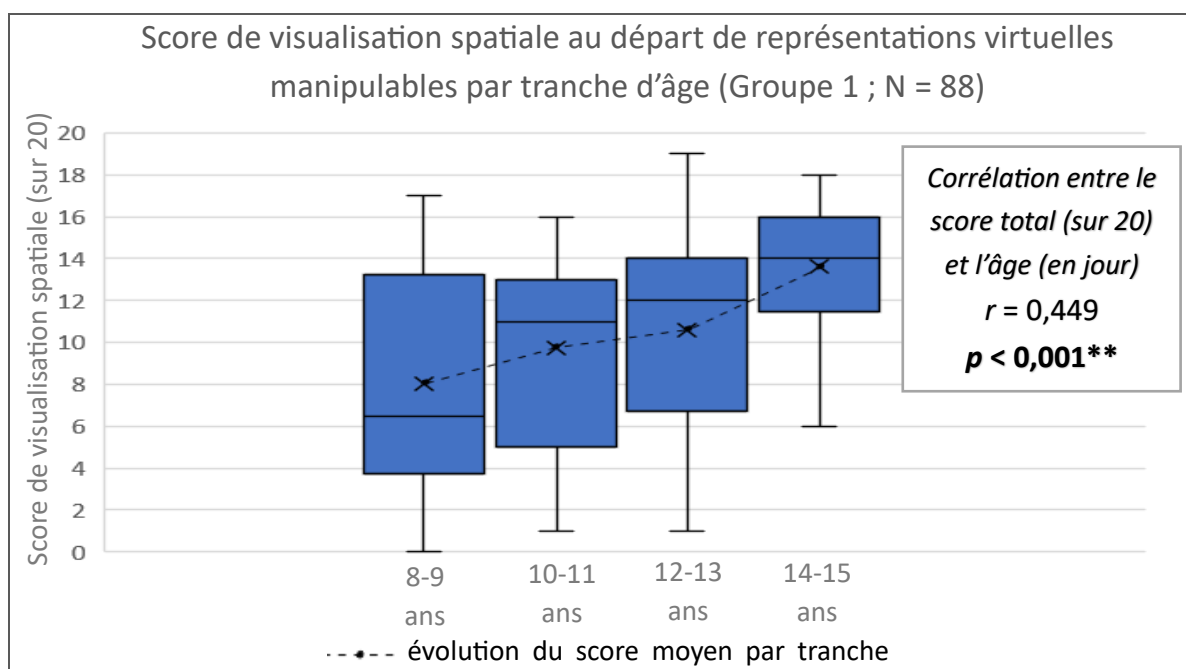


Figure 32 : Évolution de la répartition des scores de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables et corrélation avec l'âge en jour

Ces différentes répartitions observées, si elles permettent de mettre en évidence que la capacité de visualisation se développe avec l'âge, montrent aussi que les écarts entre individus semblent se réduire avec l'âge. Entre les tranches d'âge, une diminution de l'écart entre le premier et le quatrième quartile est par exemple observée. Malgré cette diminution des écarts, la répartition des scores à la dernière tranche d'âge laisse également sous-entendre que l'habileté de visualisation spatiale n'apparaît pour autant pas maîtrisée chez tous les participants âgés de 14 à 15 ans. Si l'habileté de visualisation apparaît en moyenne plus développée chez les adolescents, elle continue à poser des difficultés, parfois importantes, à certains d'entre eux à cette période.

10.2.3. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables selon l'objet 3D

En prenant en considération le score sur 20, la maîtrise partielle et disparate de la visualisation spatiale lorsque celle-ci est évaluée au départ de représentations virtuelles a pu être mise en évidence. Le score moyen obtenu pour chaque objet 3D est présenté au sein du Tableau 81. Les résultats indiquent que l'observation de maîtrise partielle constituée sur l'échantillon total est valable pour l'ensemble des objets 3D puisque les scores moyens obtenus pour chaque objet n'excèdent jamais la note de 2,43 sur 4. Malgré tout, les résultats indiquent que la résolution des exercices de visualisation portant sur l'anneau apparaît plus problématique que celle des autres objets 3D, avec un score de 1,22 sur 4 alors qu'un score moyen systématiquement supérieur à 2 sur 4 est observé pour les autres objets 3D.

Tableau 81 : Score moyen de visualisation spatiale par objet 3D au départ de représentations virtuelles manipulables : score moyen (sur 4) et écart type

Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
2,40 $\sigma = 0,965$	2,43 $\sigma = 1,143$	2,13 $\sigma = 1,500$	2,28 $\sigma = 1,330$	1,22 $\sigma = 0,976$

Le résultat d'un *test de Friedman* appliqué pour vérifier si des différences significatives sont observées entre les scores des cinq objets 3D confirme l'existence de différences entre les cinq objets 3D puisque des résultats significatifs ($Q = 96,067$; $p\text{-value} < 0,001$) sont obtenus à ce test. Pour aller plus loin dans l'identification des différences entre objets 3D, l'annexe 31 présente les résultats de *tests de Wilcoxon* utilisés pour comparer les scores obtenus entre les objets 3D deux à deux. Les résultats de ces tests indiquent que, face à des représentations virtuelles manipulables, des différences significatives apparaissent entre l'anneau et chacun des autres objets 3D, avec des scores plus faibles pour l'anneau. Le cône, qui est l'objet 3D obtenant le score le plus élevé, se distingue quant à lui significativement de la sphère ($Z = -2,361$; $p\text{-value} = 0,018$) en plus de l'anneau, ce qui n'est pas le cas des autres objets 3D.

Par ailleurs, des corrélations (coefficient de Spearman) entre les scores obtenus à chaque objet 3D ont été calculées et les résultats de ces dernières sont compilés en annexe (Annexe 32). Les valeurs de ces indices de corrélation montrent l'existence de nombreux liens positifs entre les scores (sur 4) obtenus pour les différents objets 3D. Si une corrélation positive mais modérée est observée entre le cube et l'ensemble des

autres objets 3D, les corrélations entre toutes les autres paires d'objets 3D apparaissent comme positives et fortes. Une corrélation très forte ($\rho = 0,711$) est même obtenue entre le cylindre et le cône. De tels résultats laissent donc sous-entendre que, malgré les différences entre objets 3D, les capacités de résolutions des tâches impliquant la visualisation spatiale sont liées entre les objets 3D. Pour la plupart d'entre eux, au plus l'enfant ou l'adolescent réussit les exercices relatifs à la visualisation spatiale pour un objet 3D, au plus il réussit les exercices pour les autres objets également. Un tel constat est d'ailleurs cohérent avec la forte disparité des résultats totaux observés. Il confirme l'existence d'enfants et d'adolescents obtenant de faibles performances pour tous les objets 3D, pour qui un score total nul ou très peu élevé est observé, et, inversement, l'existence d'enfants et d'adolescents obtenant de bonnes performances pour tous les objets 3D, à qui le score total observé est relativement élevé.

De plus, les écarts observés entre participants sur le score total se confirment pour l'ensemble des objets 3D comme l'illustrent les graphiques de répartition relatifs à chaque objet 3D, proposés en annexe (Annexe 31). On y observe que le score obtenu pour chaque objet 3D varie entre 0 et 4 sur 4 même si le nombre de participants obtenant une note faible est plus important face à l'anneau et face à la sphère, voire au cylindre, que face au cône ou au cube.

10.2.4. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables selon le type d'exercice

En prenant cette fois en considération non pas les objets 3D mais le type d'exercice de visualisation (Tableau 82), il ressort que le score moyen le plus élevé au départ de représentations virtuelles manipulables est celui relatif aux exercices de coupe transversale, avec un score moyen valant 3,42 sur 5. Viennent ensuite les scores moyens relatifs aux exercices d'empreinte (2,90 sur 5) et aux exercices de coupe longitudinale (2,61 sur 5). Finalement, le score moyen le plus faible concerne les exercices de coupe oblique puisque ce score est de 1,52 sur 5.

Tableau 82 : Score moyen de visualisation spatiale par type d'exercice au départ de représentations virtuelles manipulables : score moyen (sur 4) et écart type

Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
2,90	3,42	2,61	1,52
$\sigma = 1,115$	$\sigma = 1,659$	$\sigma = 1,803$	$\sigma = 1,322$

Même si cela apparaît attendu au vu des scores moyens observés, un test de *Friedman* a été appliqué entre les scores à chaque type d'exercice afin de vérifier si des différences peuvent être constatées entre eux. Puisqu'un résultat significatif est obtenu à ce test ($Q = 92,114$; $p\text{-value} < 0,001$), il est donc possible de considérer que des différences de performance sont observées entre les types d'exercice.

De façon à affiner la compréhension des différences entre les types d'exercice, des tests de *Wilcoxon* ont été appliqués entre les types d'exercice deux à deux pour vérifier entre quelle(s) paire(s) de type d'exercice des différences significatives sont observées (Annexe 34). Les résultats montrent l'existence de différences significatives pour la quasi-totalité des paires de types d'exercice. Les seules différences non significatives recensées concernent le score aux exercices d'empreinte et de coupe longitudinale ($Z = -1,589$; $p\text{-value} = 0,112$). De ce fait, les exercices de coupe oblique, qui pour rappel sont les moins bien réussis, se distinguent significativement de tous les autres types d'exercice. De même, les exercices de coupe transversale, obtenant les scores moyens les plus élevés, se distinguent aussi significativement de tous les autres.

Malgré ces différences significatives marquées entre les types d'exercice, les indices de corrélation calculés entre les scores par type d'exercice (Annexe 35) permettent de souligner la présence de corrélations positives et majoritairement fortes entre la plupart des types d'exercice. Des corrélations positives et fortes sont observées entre les scores de tous les types d'exercice sauf entre les exercices d'empreinte et de coupe transversale ($\rho = 0,387$) et entre les exercices d'empreinte et de coupe oblique ($\rho = 0,303$), entre qui la corrélation est positive mais modérée. Même si des différences sont observées au niveau de la réussite des types d'exercice, il semble donc qu'au plus un élève réussit un type d'exercice, au plus il a des chances de réussir les autres types, en particulier entre les différents types d'exercice de coupe.

Comme pour les analyses menées entre les objets 3D, de tels constats sont cohérents avec la forte disparité observée entre enfants et adolescents au niveau du score total. D'ailleurs, les graphiques de répartition relatifs aux scores obtenus à chaque type d'exercice ainsi que le calcul des médianes, compilés en annexe (Annexe 36), illustrent la présence de divergences entre les types d'exercice dans la manière dont les scores se répartissent. Pour les exercices de coupe transversale, la médiane est de 4 et près de 40% atteignent le score maximal ce qui confirme une bonne maîtrise de ce type d'exercice. Pour autant, quelques participants (8%) obtiennent un score de 0 sur 5. Concernant les exercices de coupe longitudinale, plus d'un participant sur cinq (21%)

ne réussit aucun exercice et que moins d'un participant sur cinq (18%) les réussissent tous. La médiane est plus faible que dans les exercices et vaut 3. La disparité semble par contre moins marquée face aux exercices d'empreinte où la plupart des enfants et des adolescents réussissent partiellement les exercices. Pour ces exercices, 50% des participants arrivent par exemple à réussir au moins trois des cinq exercices proposés et ils sont minoritaires à réussir tous les exercices ou à échouer à tous les exercices. Une plus faible disparité est aussi constatée face aux exercices de coupe oblique où la plupart des participants réussissent une faible quantité d'exercices, voire aucun ou un seul. La médiane calculée permet de relever que 50% des participants ont un score inférieur ou égal à 1 sur 4. Évidemment, un certain nombre de participants (26%) obtiennent un score de 0 sur 5 et ils sont à l'inverse minoritaires à réussir l'ensemble des exercices de coupe oblique.

10.2.5. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables selon l'âge et l'objet 3D

L'observation de l'impact de la variable âge sur le score total obtenu aux exercices de visualisation a permis de mettre en évidence que les capacités de visualisation au départ de représentations virtuelles manipulables se développent avec l'âge. Pour autant, les résultats relatifs à l'évolution des scores pour chaque objet 3D invitent à nuancer cette observation. En effet, si pour tous les objets 3D, les scores semblent évoluer avec l'âge, cette évolution apparaît plus marquée pour certains objets 3D que pour d'autres comme le confirme le Tableau 83. Ce tableau présente les coefficients de corrélation calculés entre l'âge (en jour) et le score par objet 3D (*corrélation de Spearman*). On y observe une corrélation positive et forte avec l'âge pour deux des objets 3D : le cône et l'anneau. Une corrélation positive mais modérée est observée pour la sphère tandis que la corrélation est positive mais faible, bien que non nulle pour les deux derniers objets 3D.

Tableau 83 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par objet (sur 4) au départ de représentations virtuelles manipulables et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)

Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
$\rho = 0,215$ $p = 0,044^*$	$\rho = 0,446$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,372$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,284$ $p = 0,007^{**}$	$\rho = 0,425$ $p < 0,001^{**}$

La Figure 33, qui présente l'évolution du score moyen relatif à chaque objet 3D aux différentes tranches d'âge permet de mettre en évidence que, pour tous les objets 3D,

le score obtenu à la première tranche d'âge est plus faible que celui obtenu à la dernière tranche d'âge. Pour autant, si dans la majorité des cas, le score semble augmenter entre deux tranches d'âge, ce n'est pas systématiquement le cas. On constate ainsi une diminution légère du score entre la première et la deuxième tranche d'âge pour le cylindre et entre la deuxième et la troisième tranche d'âge pour la sphère et le cube. Malgré cette évolution globale des scores constatée pour chaque objet 3D, le score moyen n'excède pas 3 sur 4 à la dernière tranche d'âge pour tous les objets 3D ce qui montre une maîtrise partielle de l'habileté encore à cette tranche d'âge.

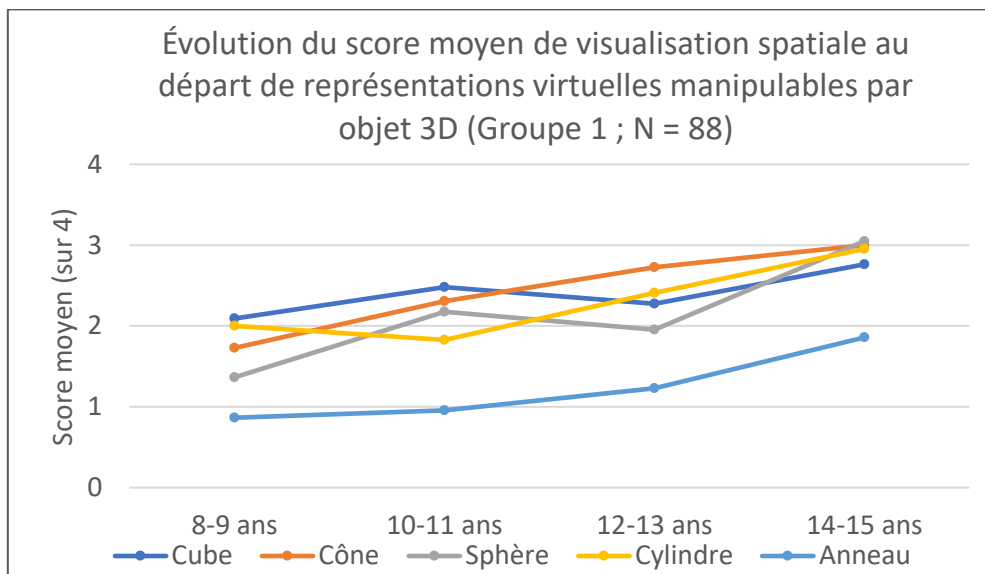


Figure 33 : Évolution du score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des objets 3D

Enfin, l'observation des différences entre les objets 3D à chaque tranche d'âge permet de relever qu'à chacune des tranches d'âge, le score obtenu pour l'anneau est plus faible que celui obtenu pour les autres objets 3D. Ce constat observé sur le score obtenu lorsque toutes les tranches d'âge sont confondues peut donc être généralisé pour chacune des tranches d'âge. L'ordre des scores de réussite des quatre autres objets varie quant à lui d'une tranche d'âge à l'autre, mais les scores de ces quatre objets sont systématiquement assez proches, en particulier à la dernière tranche d'âge.

Les tests de Friedman appliqués à chaque tranche d'âge entre les scores aux objets 3D indiquent que l'existence d'une différence entre objets 3D, déjà constatée sur l'ensemble du public cible, se confirme pour chacune des tranches d'âge. En effet, des différences significatives sont observées entre les cinq scores pour la première ($Q =$

19,417 ; p -value = 0,001), la deuxième ($Q = 32,796$; p -value < 0,001), la troisième ($Q = 35,209$; p -value < 0,001) et la quatrième tranche d'âge ($Q = 27,712$; p -value < 0,001).

10.2.6. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables selon l'âge et le type d'exercice

Concernant cette fois l'évolution des scores aux différents types d'exercice (Tableau 84), calculée à l'aide d'indices de *corrélacion de Spearman*, les résultats indiquent une tendance commune à l'évolution des scores avec l'âge pour les différents types d'exercice de coupe. Celle-ci est plus importante pour les exercices de coupe oblique ($\rho = 0,439$) et transversale ($\rho = 0,445$), pour lesquels des corrélations positives et fortes sont observées avec l'âge (en jour), que pour les exercices de coupe longitudinale, où la corrélation est positive et modérée ($\rho = 0,353$). En revanche, une corrélation nulle est constatée pour les exercices d'empreinte ($\rho = 0,120$) ce qui signifie que la capacité à résoudre ce type d'exercice n'évolue pas avec l'âge.

Tableau 84 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par type d'exercice (sur 5) au départ de représentations virtuelles manipulables et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p -value (p)

Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
$\rho = 0,120$ $p = 0,265$	$\rho = 0,445$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,353$ $p = 0,001^{**}$	$\rho = 0,439$ $p < 0,001^{**}$

La Figure 34 présente l'évolution du score moyen par tranche d'âge relatif à chaque type d'exercice. Elle permet de mettre en évidence une tendance commune dans l'évolution des scores moyens associés aux exercices de coupe transversale et longitudinale puisque, dans les deux cas, le score moyen avoisine la valeur de 2 sur 5 à la première tranche d'âge. Il semble augmenter entre la première et la deuxième tranche d'âge, il semble ensuite stagner avant d'augmenter à nouveau entre la troisième et la quatrième tranche d'âge pour atteindre une note moyenne avoisinant respectivement 4,5 sur 5 et 3,5 sur 5. L'évolution du score associé aux exercices de coupe oblique est quant à elle marquée par une diminution du score entre les deux premières tranches d'âge avant de voir une amélioration du score entre les tranches d'âge suivantes jusqu'à atteindre une note moyenne avoisinant 2,5 sur 5. Enfin, le score moyen relatif aux exercices d'empreinte semble avoisiner la note de 3 sur 5 aux différentes tranches d'âge.

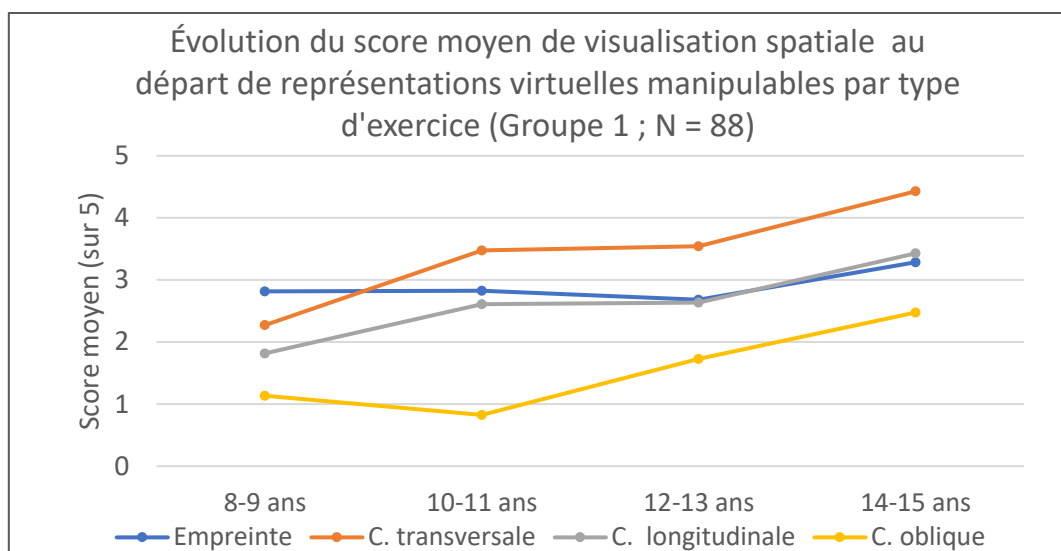


Figure 34 : Évolution du taux de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables pour chacun des types d'exercice

Cette même figure offre également l'occasion d'illustrer que les différences entre types d'exercice observées sur l'échantillon sont constatées aux différentes tranches d'âge. D'ailleurs, les *tests de Friedman* appliqués à chacune des tranches d'âge permettent de confirmer la présence d'une différence significative entre les cinq scores pour la première ($Q = 21,353$; $p\text{-value} = 0,001$), la deuxième ($Q = 36,161$; $p\text{-value} < 0,001$), la troisième ($Q = 22,016$; $p\text{-value} < 0,001$) et la quatrième tranche d'âge ($Q = 27,249$; $p\text{-value} < 0,001$). À toutes les tranches d'âge, le score associé aux exercices de coupe oblique est systématiquement plus faible que celui observé aux autres types d'exercice, ce qui permet d'élargir à chaque tranche d'âge le constat réalisé sur l'échantillon complet. En revanche, si, sur l'échantillon complet, la coupe transversale se distingue des autres objets avec un score plus élevé, il apparaît que ce n'est pas le cas à la première tranche d'âge. De même, la proximité constatée entre les scores associés aux exercices d'empreinte et de coupe longitudinale, préalablement mise en évidence, semble concerner toutes les tranches d'âge sauf la première.

10.2.7. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables selon le type d'exercice et l'objet 3D (résultats par exercice)

10.2.7.1. Analyses des taux de réussite

Les analyses par objet 3D ou par type d'exercice ont permis d'observer des tendances. Elles ont permis de mettre en évidence que certains types d'exercice posent plus de difficultés que d'autres, par exemple les exercices de coupe oblique. Certains

objets 3D, comme l'anneau semblent également poser plus de difficultés que d'autres. Le croisement des deux variables, c'est-à-dire l'observation de chacun des exercices pris individuellement, permet de nuancer de tels propos en mettant en évidence l'existence de spécificités. Pour ce faire, la Figure 35 présente le taux de réussite relatif à chaque exercice dans le premier groupe. On y observe clairement que certains exercices, notamment l'exercice portant sur l'empreinte du cube, sont globalement maîtrisés par une majorité des enfants et des adolescents. Pour ce dernier, un taux de réussite dépassant 90% est par exemple observé et fait de lui l'exercice le mieux maîtrisé. À l'inverse, d'autres exercices semblent poser de très fortes difficultés à la majorité des participants. C'est par exemple le cas de l'exercice de coupe oblique du cube, d'empreinte de l'anneau ou encore de coupe oblique de l'anneau dont le taux de réussite est inférieur à 20%.

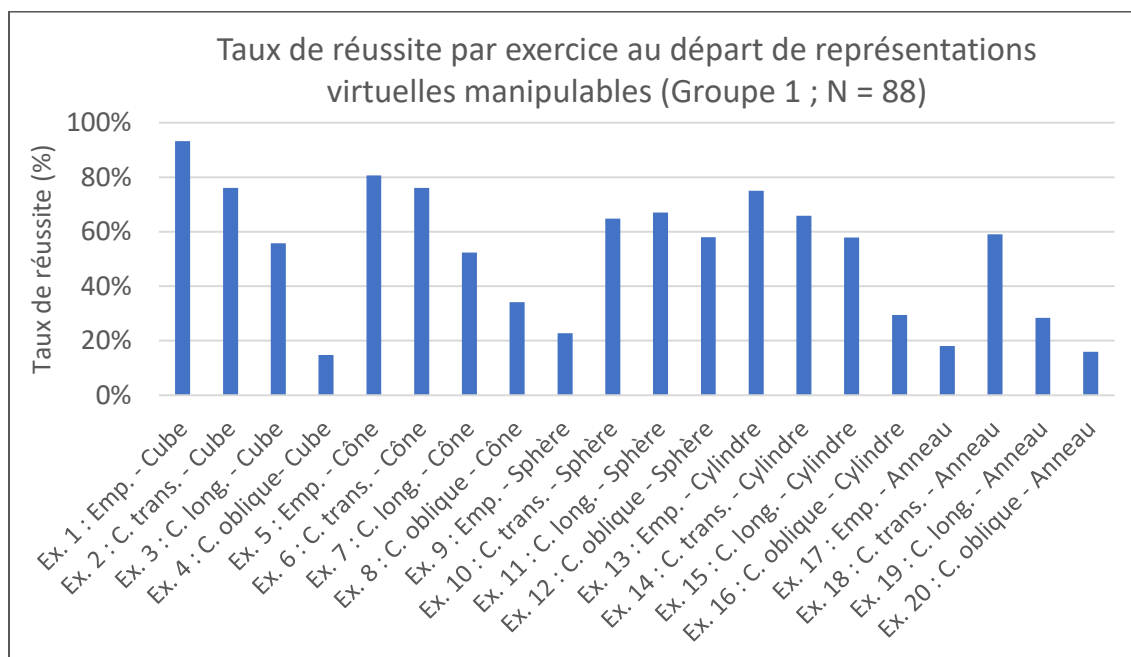


Figure 35 : Taux de réussite à chaque exercice de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables

Afin d'identifier plus clairement les éventuelles tendances et divergences, les taux de réussite obtenus à chaque exercice pour chaque objet 3D et pour chaque type d'exercice sont proposés en annexe (Annexe 37).

Concernant le cube, si les analyses antérieures ont permis de mettre en évidence qu'il s'agit globalement d'un des objets 3D posant le moins de difficultés, les résultats soulignent que des différences importantes sont constatées entre les quatre exercices portant sur cet objet 3D, avec une bonne maîtrise de l'exercice d'empreinte (93,20%),

une maîtrise partielle des exercices de coupe transversale (76,10%) et de coupe longitudinale (55,70%) et une maîtrise minoritaire de l'exercice de coupe oblique (14,80%).

Pour le cône et pour le cylindre, une même tendance peut être observée, même si les écarts entre les taux de réussite sont moins importants. L'exercice le mieux maîtrisé est celui de l'empreinte, qui est réussi par respectivement 80,70% et 75,00% des participants. Ensuite, vient l'exercice de coupe transversale (76,10% et 65,90%), de coupe longitudinale (52,30% et 57,90%) et enfin de coupe oblique (34,10% et 29,50%).

Les tendances sont en revanche différentes pour les deux derniers objets 3D. Pour la sphère, l'exercice d'empreinte pose de fortes difficultés puisqu'il est maîtrisé par seulement 22,80%. Les trois autres exercices semblent partiellement maîtrisés puisque leur taux de réussite varie entre 58,00% et 67,00%. Pour l'anneau, l'exercice d'empreinte pose lui aussi de fortes difficultés puisqu'il obtient un taux de réussite de 18,10%. Il en est de même pour l'exercice de coupe longitudinale (28,40%) et de coupe oblique (15,90%). La maîtrise de l'exercice de coupe transversale avoisine en revanche un taux de réussite de 60%.

Pour chacun des objets 3D, ce ne sont donc pas systématiquement les mêmes types d'exercice, à savoir les exercices de coupe oblique, qui posent le plus de difficultés. Par exemple, l'exercice de la sphère fait partie des exercices les mieux réussis, contrairement à l'exercice d'empreinte qui apparaît nettement moins maîtrisé. Toutefois, quel que soit l'objet 3D, des différences entre les scores obtenus aux types d'exercice, comme en attestent les résultats, tous significatifs aux *tests Q de Cochran* appliqués entre les notes aux différents types d'exercice pour chaque objet 3D (Tableau 85).

En regardant cette fois sous l'angle des différences entre objets 3D pour chaque type d'exercice, la situation est très variable entre objets 3D pour les exercices d'empreinte, notamment suite aux difficultés constatées pour la sphère et l'anneau. Concernant les exercices de coupe transversale, les différences entre objets sont moins marquées puisque les taux varient entre 60 et 80%. Concernant les exercices de coupe longitudinale, le score de l'anneau se distingue de ceux des autres objets 3D qui obtiennent, quant à eux, des scores assez proches. Enfin, concernant les exercices de coupe oblique, un objet 3D semble se distinguer positivement des autres, à savoir la sphère. Inversement les exercices de coupe oblique relatifs au cube et à l'anneau se

distinguent avec des taux de réussite très faibles. À nouveau, pour chaque type d'exercice, des spécificités sont donc observées selon les objets 3D. Les *tests Q de Cochran* appliqués pour chaque type d'exercice en vue d'évaluer la présence de différences entre les taux de réussite des différents objets 3D (Tableau 85) indiquent que des différences significatives sont observées pour tous les types d'exercice.

Tableau 85 : Différence entre les taux de réussite des cinq objets 3D aux exercices de visualisation au départ de représentations virtuelles manipulables pour chaque type d'exercice et des quatre types d'exercice pour chaque objet 3D : Q de Cochran (Q) et p-value (p)

Différence entre objets 3D pour...				
les exercices d'empreinte	les exercices de coupe transversale	les exercices de coupe longitudinale	les exercices de coupe oblique	
Q = 176,262 p < 0,001**	Q = 14,814 p = 0,005**	Q = 48,421 p < 0,001**	Q = 60,561 p < 0,001**	
Différence entre types d'exercice pour ...				
le cube	le cône	la sphère	le cylindre	l'anneau
Q = 123,864 p < 0,001**	Q = 59,297 p < 0,001**	Q = 76,548 p < 0,001**	Q = 56,340 p < 0,001**	Q = 51,279 p < 0,001**







10.2.7.2. Analyses des erreurs types

Si l'occurrence de chaque erreur type réalisée par les enfants et les adolescents est proposée en annexe (Annexe 38), cette partie se focalise sur les erreurs types les plus courantes rencontrées chez les enfants et les adolescents interrogés, c'est-à-dire réalisées par au moins quatre des participants.

Concernant les exercices du cube, les erreurs types principales sont compilées au sein du Tableau 86. On y observe que, pour l'empreinte de cet objet 3D, réussie par plus de neuf participants sur dix, aucune erreur n'est commise par au moins quatre participants. Les quelques erreurs commises sont donc minoritaires. Pour la coupe transversale, comme pour la coupe longitudinale, l'erreur consistant à dessiner un rectangle plutôt qu'un carré est l'erreur type majoritaire. Dans le premier cas elle est commise par 17% des participants alors qu'elle est deux fois plus observée lors de l'exercice de coupe longitudinale, où plus d'un tiers des participants la commettent. Les autres erreurs sont minoritaires. Finalement, pour l'exercice de la coupe oblique, les erreurs types sont plus diversifiées et occupent une place plus importante puisque moins de 20% des participants ont dessiné la bonne réponse, à savoir un rectangle. Quatre erreurs types ressortent des résultats de cet exercice. L'erreur la plus courante est le dessin d'un carré, qui est produite par près d'un tiers des enfants et des











adolescents. Le dessin d'un trapèze rectangle et celui d'un triangle rectangle sont quant à elles réalisées par plus de 15% des participants. Enfin, une dernière erreur courante concerne le triangle quelconque, cette fois non rectangle (6,8 %).

Tableau 86 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles manipulables pour les exercices de visualisation du cube : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)
Ex. 1 : Empreinte – Cube	/	/
Ex. 2 : Coupe transversale –Cube	Rectangle 	17,0%
Ex. 3 : Coupe longitudinale – Cube	Rectangle 	37,5%
Ex. 4 : Coupe oblique – Cube	Carré 	31,8%
	Trapèze rectangle 	18,2%
	Triangle rectangle 	15,9%
	Triangle non rectangle 	6,8%

Concernant les exercices relatifs au cône (Tableau 87), il ressort de l'exercice de l'empreinte du cône que l'erreur type la plus courante concerne le dessin d'un ovale à la place d'un rond (6,8%). Une autre erreur type, observée de manière occasionnelle (4,5%) concerne le dessin d'un triangle isocèle. Pour l'exercice 6, portant sur la coupe transversale du cône, les deux erreurs types décrites pour l'empreinte sont aussi les deux erreurs les plus régulières. Elles ont toutes les deux été réalisées par 4,5% des interrogés. Au niveau de la coupe longitudinale, trois erreurs types ressortent des réponses des enfants et des adolescents. La première erreur type, qui apparaît le plus régulièrement, concerne la réalisation d'un triangle isocèle avec un côté arrondi (12,5%). Une autre erreur type, observée chez 8% des participants, concerne le dessin d'un demi-rond. Le dessin d'un triangle rectangle constitue également une erreur type observée dans les productions des enfants et des adolescents (4,5%). Finalement, concernant la coupe oblique, une erreur type ressort particulière des productions des enfants et des adolescents car elle est commise par un participant sur quatre : le dessin d'un rond. Le dessin d'un triangle quelconque constitue la deuxième erreur type la plus régulièrement commise (14,8%). Enfin, le dessin d'un triangle quelconque avec un côté arrondi est proposé par 4,5% des participants.

Tableau 87 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles manipulables pour les exercices de visualisation du cône : pourcentage d'occurrence










	Erreur type		Dans G1 (N = 88)
Ex. 5 : Empreinte – Cône	Ovale		6,8%
	Triangle isocèle		4,5%
Ex. 6 : Coupe transversale – Cône	Triangle isocèle		4,5%
	Ovale		4,5%
Ex. 7 : Coupe longitudinale – Cône	Triangle isocèle avec un côté arrondi		12,5%
	Demi-rond		8,0%
	Triangle rectangle		4,5%
Ex. 8 : Coupe oblique – Cône	Rond		25,0%
	Triangle quelconque		14,8%
	Triangle quelconque avec un côté arrondi		4,5%

Concernant les exercices de la sphère (Tableau 88), il est possible de constater qu'une erreur type ressort fortement concernant l'exercice de l'empreinte, qui pour rappel est l'un des exercices pour laquelle la bonne réponse apparaît le moins fréquemment. Cette erreur consiste à considérer que l'empreinte de la sphère est un rond²⁵. Cette erreur est réalisée par plus de la moitié des participants. Une autre erreur type, dont la fréquence d'apparition est de 8% est le dessin d'un ovale. Concernant la coupe transversale, deux erreurs types ressortent des productions des enfants et des adolescents. La principale erreur type concerne le dessin d'un demi-rond, observée au total auprès de 14,8% des participants. La deuxième erreur type la plus régulière concerne le dessin d'un ovale (11,4%). Les erreurs types relevées pour l'exercice de la coupe longitudinale de la sphère sont assez logiquement similaires à celles observées pour la coupe transversale du même objet 3D. L'erreur type relative au demi-rond apparaît, comme pour l'exercice précédent, l'erreur la plus fréquente (17,0%). L'autre erreur type, à savoir le dessin de l'ovale, est observée chez un peu plus d'un enfant sur dix. Enfin, pour la coupe oblique, les deux mêmes erreurs types sont à nouveau recensées. L'erreur relative à l'ovale est observée auprès de 12,5% des participants

²⁵ Rappelons qu'un petit rond (maximum 0,5cm de diamètre) était considéré comme une bonne réponse et que les ronds considérés comme « erreur » sont des ronds dont le diamètre est plus grand.












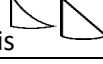

alors que celle relative au demi-rond apparaît pour 14,8% des participants. En plus de ces deux erreurs types, un dessin de demi-ovale a été réalisé par 5,7% des participants.

Tableau 88 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles manipulables pour les exercices de visualisation de la sphère : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)
Ex. 9 : Empreinte – Sphère	Rond 	64,7%
	Ovale 	8,0%
Ex. 10 : Coupe transversale – Sphère	Demi-rond 	14,8%
	Ovale 	11,4%
Ex. 11 : Coupe longitudinale – Sphère	Demi-rond 	17,0%
	Ovale 	9,1%
Ex. 12 : Coupe oblique – Sphère	Demi-rond 	14,8%
	Ovale 	12,5%
	Demi-ovale 	5,7%

Concernant les exercices portant sur le cylindre, dont le Tableau 89 présente un résumé des erreurs types les plus récurrentes, on remarque que deux erreurs types se démarquent concernant l'exercice de l'empreinte : le dessin d'un ovale (12,5%) et celui d'un cylindre (9,1%). Rappelons cependant que cet exercice est réussi par une majorité des participants. Pour l'exercice de la coupe transversale, la même première erreur type, à savoir le dessin d'un ovale, est observée, avec un taux assez proche de celui obtenu à l'exercice de l'empreinte (11,4%). Ce taux fait de cette erreur l'erreur la plus fréquente. S'ajoutent à cela les erreurs suivantes : un demi-cylindre (6,8%) et un rectangle avec côté(s) arrondi(s) (5,7%). Pour la coupe longitudinale, il ressort que l'erreur type la plus fréquente est le dessin d'un demi-rond. Cette erreur type est observée chez 15,9% des participants. Deux autres erreurs types peuvent être citées : le dessin d'un cylindre correspondant à la moitié du cylindre proposé (8,0%) et celui d'un ovale (4,5%). Finalement, pour le dernier exercice portant sur le cylindre, qui pour rappel pose des difficultés à une majorité des enfants et des adolescents, une erreur type semble particulièrement prégnante : le dessin d'un rond à la place d'un ovale. Au total, cette erreur est commise par un participant sur cinq. D'autres erreurs types apparaissent quant à elles de manière plus occasionnelle. C'est le cas par exemple pour le dessin d'un trapèze rectangle (8,0%), d'un triangle rectangle (6,8%), d'un triangle avec côté(s) arrondi(s) (6,8%) et d'un rectangle (4,5%).

Tableau 89 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles manipulables pour les exercices de visualisation du cylindre : pourcentage d'occurrence















	Erreur type	Dans G1 (N = 88)
Ex. 13 : Empreinte – Cylindre	Ovale 	12,5%
	Cylindre 	9,1%
Ex. 14 : Coupe transversale – Cylindre	Ovale 	11,4%
	Demi-cylindre 	6,8%
	Rectangle avec côtés(s) arrondi(s) 	5,7%
Ex. 15 : Coupe longitudinale – Cylindre	Demi-rond 	15,9%
	Demi-cylindre 	8,0%
	Ovale 	4,5%
Ex. 16 : Coupe oblique – Cylindre	Rond 	20,5%
	Trapèze rectangle 	8,0%
	Triangle rectangle 	6,8%
	Triangle avec un ou deux côtés(s) arrondis 	6,8%
	Rectangle 	4,5%

Le Tableau 90 présente finalement les erreurs types relatives aux exercices portant sur l'anneau, qui sont, comme présenté préalablement, des exercices obtenant des taux de réussite assez faibles. Concernant l'exercice de l'empreinte de l'anneau, une erreur type se démarque. Elle est d'ailleurs à rapprocher de l'erreur réalisée pour l'empreinte de la sphère. Il s'agit du dessin de deux ronds concentriques non rapprochés²⁶. Cette erreur type est réalisée au total par près de sept participants sur dix. Une autre erreur type semble également se dégager, même si elle est nettement moins fréquente : un dessin de deux ovales concentriques (9,1%). Pour l'exercice de la coupe transversale, le dessin d'un rond est une erreur type chez près d'un participant sur cinq. Deux autres erreurs types sont observées occasionnellement : le dessin de deux ovales concentriques (9,1%) et celui d'un ovale (4,5%). Pour l'exercice de coupe longitudinale, une erreur type se dégage particulièrement, avec un taux qui se rapproche de 40% : le dessin de deux demi-ronds concentriques fermés par des segments, qui correspond donc à la vue du dessus du demi-anneau (après la coupe). Trois autres erreurs types semblent également se dégager mais de manière

²⁶ À l'instar de la sphère, pour qui un petit rond est considéré comme correct, deux ronds concentriques très rapprochés sont aussi considérés comme une réponse correcte.

occasionnelle. Le dessin d'une seule ligne arrondie (9,1%) et le dessin d'un rond (4,5%). Finalement, pour l'ultime exercice proposé, différentes erreurs types sont commises par les enfants et les adolescents. L'erreur type la plus régulière est le dessin de deux demi-ronds concentriques reliés par des segments. Contrairement à l'interprétation faite pour l'exercice de coupe longitudinale, on ne peut toutefois pas dire que cela correspond à la vue du dessus de l'objet après découpe, même si cela s'en rapproche. Cette erreur est réalisée par 27,3% des participants. Enfin, le dessin d'un rond et le dessin de deux ronds distincts apparaissent toutes deux auprès de 4,5%. La faible fréquence de cette dernière peut paraître étonnante dans la mesure où une erreur similaire (dessin d'un rond au lieu d'un ovale) était par exemple plus régulière dans l'exercice du cône ou du cylindre.

Tableau 90 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles manipulables pour les exercices de visualisation de l'anneau : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)
Ex. 17 : Empreinte – Anneau	Ronds concentriques non rapprochés 	69,3%
	Ovales concentriques non rapprochés 	9,1%
Ex. 18 : Coupe transversale – Anneau	Rond 	18,2%
	Ovales concentriques 	9,1%
	Ovale 	4,5%
Ex. 19 : Coupe longitudinale – Anneau	Deux demi-ronds concentriques reliés par des segments 	38,6%
	Ligne arrondie 	9,1%
	Rond 	4,5%
Ex. 20 : Coupe oblique – Anneau	Deux demi-ronds concentriques reliés par des segments 	27,3%
	Ronds concentriques 	9,1%
	Ovale 	9,1%
	Ligne arrondie 	5,7%
	Rond 	4,5%
	Deux ronds distincts 	4,5%

Au travers de tous ces exercices, différentes tendances dans les erreurs types commises sont remarquées par les enfants et les adolescents. Tous exercices confondus, il semble que l'erreur dominante relève de la forme de l'empreinte de

l'anneau, pour laquelle le dessin proposé par près de 70% des participants est le dessin de deux ronds concentriques non rapprochés, autrement dit d'un rond avec un autre rond à l'intérieur. Cette difficulté est d'ailleurs similaire à celle observée pour l'empreinte de la sphère, pour laquelle près de 65% des participants dessinent un rond. Elle a lieu donc pour les objets dont le point de contact avec le sol n'est pas une face, mais un point de contact (pour la sphère) ou un ensemble de points de contact donnant ainsi une forme (un cercle pour l'anneau).

En parallèle, d'autres erreurs types sont relevées avec des tendances communes d'un exercice à l'autre lors des tâches de coupe. Une tendance à dessiner pour forme de coupe la forme de la vue du solide après la découpe (ou la forme de la face sur laquelle la coupe commence) semble se dégager. C'est ainsi qu'on observe par exemple des dessins d'un rectangle dans le cadre des exercices de coupe longitudinale et de coupe transversale du cube, ou d'un trapèze rectangle pour sa coupe oblique, qui correspondent à la moitié de la face sur laquelle la coupe est réalisée. Ce même type d'erreur est d'ailleurs observé pour la quasi-totalité des exercices de coupe avec des fréquences parfois élevées. C'est le cas par exemple pour la coupe longitudinale de l'anneau (dessin de deux demi-ronds concentriques reliés), pour les coupes de la sphère (dessin d'un demi-cercle), pour la coupe oblique du cylindre (dessin d'un trapèze) ou encore pour la coupe longitudinale d'un cylindre ou d'un cône (dessin d'un demi-rond).

Par ailleurs, les participants ne semblent pas toujours prendre en considération l'ambiguïté des représentations et prennent donc en compte des éléments observés sur la représentation alors que ceux-ci ne s'observent pas en réalité sur l'objet 3D. Cela se matérialise par plusieurs erreurs types, par exemple le dessin d'un ovale comme empreinte ou coupe transversale du cylindre ou du cône, ou encore le dessin de formes avec côté(s) arrondi(s), même si ce segment arrondi correspond à l'intersection du couteau avec une face plane d'un corps rond (ex. dessin d'un triangle avec base arrondie pour la coupe longitudinale du cône, ou d'un carré avec bord(s) arrondi(s) pour la coupe longitudinale d'un cylindre). Cette erreur type n'est par contre pas relevée pour le cube pour qui on n'observe par exemple pas (ou si c'est le cas, avec un taux très faible) le dessin d'un parallélogramme pour son empreinte ou sa coupe transversale.

Une autre difficulté concerne les exercices de coupe oblique, pour lesquelles les dessins de nombreux participants correspondent à la forme attendue pour la coupe

transversale. Les participants ne semblent donc pas prendre en compte le fait que l'orientation du couteau impacte la forme de la coupe. Si cette difficulté n'entraîne pas d'erreur dans le cadre de l'exercice de la sphère et amène à la réponse attendue, cela occasionne des erreurs pour tous les autres objets 3D, avec par exemple le dessin d'un carré comme coupe oblique du cube, ou le dessin du rond comme coupe oblique du cône et du cylindre. Notons en revanche que, si ces erreurs sont récurrentes pour la coupe oblique du cube, le cône et le cylindre, elles le sont moins pour l'anneau.

Parfois, les erreurs types commises peuvent être expliquées par plusieurs de ces difficultés.

10.2.8. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables selon l'âge, le type d'exercice et l'objet 3D

En vue d'observer l'évolution des taux de réussite de chacun des exercices avec l'âge, des coefficients de corrélation de type *r point-biserial* ont été calculés avec l'âge en jour. Ceux-ci sont compilés au sein du Tableau 91.

Si l'analyse de l'évolution du score (sur 5) aux exercices d'empreinte soulignait une absence d'évolution du score avec l'âge, l'évolution des taux de chacun des exercices de ce type va également dans ce sens puisqu'aucune corrélation non nulle n'est observée entre la réussite et l'âge à chacun de ces exercices. Pour les coupes transversales, la tendance à l'évolution positive du score avec l'âge sont présentes pour chacun des exercices. L'évolution apparaît moins marquée pour l'anneau, pour qui une corrélation positive mais faible est observée ($r_{pb} = 0,265$), que pour le cube ($r_{pb} = 0,314$), la sphère ($r_{pb} = 0,358$) et le cylindre ($r_{pb} = 0,367$), pour qui la corrélation est positive et modérée ou pour le cône ($r_{pb} = 0,496$) où elle est positive et forte. En revanche, pour les exercices de coupe longitudinale et de coupe oblique, le constat d'amélioration du niveau de maîtrise avec l'âge, mis en évidence sur le score (sur 5) ne semble pas être valable pour l'ensemble des objets 3D puisque des corrélations qualifiables de nulles sont observées pour certains objets 3D. C'est le cas pour le cube et le cône dans les exercices de coupe longitudinale et pour le cube et le cylindre dans les coupes obliques. Les autres corrélations apparaissent quant à elles positives et modérées. Comme la présentation des coefficients de corrélation le souligne, les liens entre performance et âge obtenus aux exercices d'un même type diffèrent selon les objets 3D. Toutefois, des tendances communes sont observées, comme la présence d'une corrélation nulle pour l'ensemble des exercices d'empreinte, majoritairement réussis par tous (pour le cube,

le cône et le cylindre) ou majoritairement ratés par tous (pour la sphère et l'anneau) quel que soit l'âge. Inversement, une corrélation positive non nulle est observée pour l'ensemble des exercices de coupe transversale. Il apparaît par ailleurs que l'évolution touche parfois des exercices décrits précédemment comme plus complexes (ex. coupe oblique de l'anneau) et des exercices présentés comme plus simples (ex. coupe transversale du cône). L'annexe 39 présente quant à elle l'évolution des erreurs types principales pour chaque tranche d'âge. Pour la plupart des erreurs recensées, l'évolution de l'occurrence entre les tranches d'âge est variable. Cela signifie donc que ces occurrences ne diminuent pas forcément entre les tranches d'âge. Néanmoins, cela semble être le cas pour certaines erreurs, par exemple, le dessin d'un demi-rond pour les coupes de la sphère.

Tableau 91 : Corrélation entre le taux de réussite par exercice au départ de représentations virtuelles manipulables et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation r point bi-sérial (r_{pb}) et p -value (p)

	Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
Empreinte	<i>Exercice 1</i> $r_{pb} = 0,058$ $p = 0,594$	<i>Exercice 5</i> $r_{pb} = 0,141$ $p = 0,189$	<i>Exercice 9</i> $r_{pb} = 0,104$ $p = 0,333$	<i>Exercice 13</i> $r_{pb} = 0,074$ $p = 0,495$	<i>Exercice 17</i> $r_{pb} = -0,042$ $p = 0,697$
Coupe transversale	<i>Exercice 2</i> $r_{pb} = 0,314$ $p = 0,003^{**}$	<i>Exercice 6</i> $r_{pb} = 0,496$ $p < 0,001^{**}$	<i>Exercice 10</i> $r_{pb} = 0,358$ $p = 0,001^{**}$	<i>Exercice 14</i> $r_{pb} = 0,367$ $p < 0,001^{**}$	<i>Exercice 18</i> $r_{pb} = 0,265$ $p = 0,013^*$
Coupe longitudinale	<i>Exercice 3</i> $r_{pb} = 0,112$ $p = 0,298$	<i>Exercice 7</i> $r_{pb} = 0,187$ $p = 0,081$	<i>Exercice 11</i> $r_{pb} = 0,317$ $p = 0,003^{**}$	<i>Exercice 15</i> $r_{pb} = 0,321$ $p = 0,002^{**}$	<i>Exercice 19</i> $r_{pb} = 0,331$ $p = 0,002^{**}$
Coupe oblique	<i>Exercice 4</i> $r_{pb} = 0,099$ $p = 0,358$	<i>Exercice 8</i> $r_{pb} = 0,346$ $p = 0,001^{**}$	<i>Exercice 12</i> $r_{pb} = 0,379$ $p < 0,001^{**}$	<i>Exercice 16</i> $r_{pb} = 0,099$ $p = 0,361$	<i>Exercice 20</i> $r_{pb} = 0,341$ $p = 0,001^{**}$

10.2.9. Impact des variables secondaires sur la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulables

a. Le genre

Concernant la variable secondaire du genre, les résultats indiquent que, face à des représentations virtuelles manipulables, le niveau de maîtrise moyen de visualisation spatiale est légèrement supérieur chez les garçons (10,87 sur 20) que chez les filles (10,10 sur 20). Pour autant, le test inférentiel *U de Mann-Whitney* appliqué pour vérifier le caractère significatif de la différence entre les scores des filles et des garçons indique que cette dernière est non significative ($U = 849,500$; p -value = 0,353). Ces

résultats permettent de considérer que le genre ne semble pas impacter la maîtrise de l'habileté au départ de représentations virtuelles manipulables

b. Le niveau de maîtrise de la rotation mentale

Concernant le lien entre les capacités de visualisation spatiale des objets 3D au départ de représentations virtuelles manipulables et le score obtenu au test de rotation mentale portant lui aussi sur des objets 3D présentés physiquement (matériel physique), les résultats indiquent qu'une corrélation positive mais modérée, d'une valeur de 0,358 (p -value = 0,001), est observée entre ces deux habiletés. Un lien positif semble donc être observé entre les deux habiletés même s'il reste modéré.

c. Risques de TDC

Grâce au questionnaire DCDQ-FE, il a été possible d'identifier deux profils d'enfants et d'adolescents : ceux pour lesquels un risque de TDC peut être envisagé et ceux pour qui ce n'est pas le cas. Les scores de visualisation obtenus pour ces deux profils sont comparés. Un score moyen de 10,57 sur 20 est observé auprès des participants dont le questionnaire ne prédit pas de risque de TDC (N = 76) tandis qu'un score moyen légèrement plus faible, d'une valeur de 9,75 est observé pour les autres (N = 88). Pour autant, le test inférentiel *U de Mann-Whitney* appliqué entre le score des deux profils indique que la différence entre les deux profils n'est pas significative ($U = 415,500$; p -value = 0,621). Il est donc possible de suspecter une absence d'effet de cette variable secondaire sur la visualisation spatiale au départ de représentations 2 ½ D manipulables.

d. Habitudes et pratiques régulières

Des analyses sont ici menées pour comparer les scores de visualisation spatiale selon le profil des enfants et des adolescents vis-à-vis de différentes habitudes au moyen de tests *U de Mann-Whitney* (Tableau 92). Les résultats obtenus montrent que, pour toutes les habitudes investiguées, des différences non significatives apparaissent entre les scores de visualisation spatiale obtenus chez les enfants et les adolescents pour qui l'habitude est observée et de ceux chez qui elle ne l'est pas. Face à des représentations virtuelles manipulables d'objets 3D, les habitudes investiguées ne semblent donc pas impacter les capacités de visualisation spatiale.

Tableau 92 : Score moyen de visualisation au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : score moyen (sur 20), U de Mann-Whitney (U) et p-value

		G1 : manip. 2½D (N = 88)	
		Régulier	Régulier
Utilisation des appareils tactiles	Score (sur 20)	9,20	10,62
	U	331,500	
	p-value	0,441	
Pratique des jeux vidéo	Score (sur 20)	9,91	11,00
	U	852,000	
	p-value	0,332	
Pratique des jeux de construction	Score (sur 20)	9,67	10,80
	U	719,500	
	p-value	0,345	
Pratique des jeux de type « puzzle »	Score (sur 20)	10,31	10,62
	U	915,500	
	p-value	0,708	
Pratique d'un sport	Score (sur 20)	11,65	10,17
	U	512,000	
	p-value	0,332	
Pratique d'un instrument de musique	Score (sur 20)	10,29	11,38
	U	428,000	
	p-value	0,483	

e. Expérience en géométrie 3D

Concernant l'expérience antérieure des enfants et des adolescents, et plus particulièrement le fait d'avoir déjà abordé ou non la géométrie 3D, les analyses (Tableau 93) montrent que la maîtrise de la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles pouvant être manipulées est en moyenne plus faible pour les enfants et les adolescents ayant déjà abordé la géométrie 3D (8,23 sur 20) que pour les autres (11,20 sur 20). Les analyses inférentielles (*U de Mann-Whitney*) menées permettent de mettre en évidence que la différence entre les scores obtenus auprès de ces deux profils est significative ($U = 484,500$; $p\text{-value} = 0,020$). Un tel résultat s'explique par le fait que les élèves qui ont déjà abordé la géométrie 3D sont surtout ceux des niveaux scolaires moins élevés, qui obtiennent le plus souvent des résultats plus faibles.

Concernant le fait d'avoir déjà été confronté, avant l'étude, à la modalité de représentation des objets 3D, le score moyen des enfants et des adolescents avec expérience (12,67 sur 20) est supérieur à celui des autres (10,00 sur 20). Les analyses inférentielles indiquent que la différence entre les scores de ces deux profils est

considérée comme significative ($U = 351,000$; $p\text{-value} = 0,029$). Face à des représentations 2 ½ D à manipuler, le score moyen de visualisation apparaît donc plus élevé chez les élèves ayant déjà de l'expérience avec ce mode de représentation.

Pour ce qui est de l'expérience relative à la résolution antérieure de tâches d'empreinte et de coupe, les analyses inférentielles montrent que les scores aux tâches d'empreinte des enfants et des adolescents ayant déjà été amenés à résoudre ce type de tâche auparavant sont statistiquement équivalents à ceux obtenus par les enfants et les adolescents sans cette expérience ($U = 819,000$; $p\text{-value} = 0,183$). Il en est de même concernant les tâches de coupe ($U = 684,000$; $p\text{-value} = 0,685$).

L'expérience antérieure en géométrie semble donc partiellement impacter les capacités de visualisation.

Tableau 93 : Score moyen de visualisation au départ de représentations virtuelles manipulables chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : score moyen, U de Mann-Whitney (U) et p-value

		G1 : manip. 2½D (N = 88)	
		Non	Oui
Apprentissage de la géométrie 3D cette année scolaire	Score (sur 20)	11,20	8,23
	U	484,500	
	p-value	0,020*	
Expérience avec la modalité de présentation	Score (sur 20)	10,00	12,67
	U	351,000	
	p-value	0,029*	
Résolution de tâches d'empreinte	Score (sur 5)	3,07	2,73
	U	819,00	
	p-value	0,183	
Résolution de tâches de coupe	Score (sur 15)	7,64	7,32
	U	684,000	
	p-value	0,685	

f. Capacités de perception visuelle des objets 3D

Concernant le lien existant entre l'habileté de perception et l'habileté de visualisation spatiale lorsque les deux habiletés sont évaluées au départ de représentations virtuelles manipulables, le Tableau 94 présente pour chacun des objets 3D, le score moyen de visualisation obtenu aux exercices portant sur cet objet 3D chez les enfants et les adolescents ayant perçu adéquatement l'objet 3D et chez les enfants et les adolescents ne l'ayant pas adéquatement perçu. Ces deux scores sont ensuite comparés à l'aide d'un test inférentiel *U de Mann-Whitney*.

D'une part, les statistiques descriptives montrent que le score moyen de visualisation spatiale obtenu auprès des enfants et des adolescents ayant perçu adéquatement l'objet 3D est systématiquement plus élevé que celui observé chez les enfants et les adolescents n'ayant pas perçu adéquatement l'objet 3D. Les statistiques inférentielles indiquent que les seules différences significatives concernent la sphère ($U = 69,500$; $p\text{-value} = 0,009$) et l'anneau ($U = 336,000$; $p\text{-value} = 0,006$). L'absence de différence pour le cube, le cône ou le cylindre explique sans doute que les erreurs de perception le plus souvent commises n'entraînent pas forcément une réponse différente aux tâches de visualisation. Par exemple, pour le cône, le fait de percevoir le cône comme un cône dont la hauteur modifiée n'impacte pas la forme de l'empreinte et des différentes coupes attendues, à savoir un triangle isocèle. Dès lors, même si l'objet 3D est mal perçu, cela n'impacterait pas le fait de fournir les réponses attendues, ou au moins certaines d'entre elles.

Tableau 94 : Score moyen de visualisation spatiale par objet 3D chez les enfants/adolescents ayant ou non perçu adéquatement l'objet 3D : score moyen (sur 4), U de Mann-Whitney (U) et p-value

Perception adéquate de l'objet 3D		G1 : manip. 2½D	
		non	oui
Cube	Score (sur 4)	2,14	2,53
	<i>U</i>	686,500	
	<i>p-value</i>	0,109	
Cône	Score (sur 4)	2,39	2,45
	<i>U</i>	705,500	
	<i>p-value</i>	0,675	
Sphère	Score (sur 4)	0,40	2,23
	<i>U</i>	69,500	
	<i>p-value</i>	0,009**	
Cylindre	Score (sur 4)	2,04	2,39
	<i>U</i>	694,500	
	<i>p-value</i>	0,222	
Anneau	Score (sur 4)	0,63	1,35
	<i>U</i>	336,000	
	<i>p-value</i>	0,006**	

10.2.10. Discussion spécifique à la question 2.1°

Dans la seconde étude, après avoir étudié la maîtrise de l'habileté de perception de représentations virtuelles manipulables d'objets 3D, les enfants et les adolescents âgés de 8 ans et plus ont aussi été interrogés sur leur capacité à faire preuve de visualisation spatiale sur les objets, au travers de tâches de dessin de la forme de l'empreinte et de trois coupes de plusieurs objets 3D au départ des mêmes représentations. De cette façon, il s'agit d'une première exploration des capacités d'enfants et d'adolescents à mettre en œuvre ce type d'opération mentale au sein d'environnement virtuel.

10.2.10.1. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : une habileté pouvant poser des difficultés mais qui se développe avec l'âge

Les résultats obtenus mettent en évidence que les capacités de visualisation sont dans l'ensemble partiellement maîtrisées au départ de représentations virtuelles. Toutefois, ces capacités sont marquées par de fortes différences individuelles.

Des individus obtiennent des scores très faibles et peinent à mettre en œuvre les opérations mentales demandées. Mettre en place ce type d'opération mentale semble donc représenter un réel défi pour eux. Cela rejoint les propos de Larios (2006) qui considère qu'il peut être difficile de mettre en œuvre des manipulations mentales sur des objets en mouvement. Toutefois, de telles difficultés avaient aussi été constatées au départ d'autres types de support, comme au départ de matériel physique. Piaget et Inhelder (1948) ont notamment identifié que les enfants ne parviennent pas toujours à imaginer les résultats d'actions intériorisées avant qu'elles n'aient été exécutées. Ici, cette exécution n'était pas réalisée devant les participants, qui devaient donc se l'imaginer mentalement. Néanmoins, les résultats obtenus montrent que, si certains éprouvent de fortes difficultés, des individus arrivent à mettre en place la quasi-totalité des opérations mentales demandées et que la plupart semblent arriver à mettre en place seulement une partie d'entre elles.

Plus spécifiquement, il apparaît que les enfants dès 8-9 ans, à quelques exceptions, sont déjà capables de faire preuve de visualisation spatiale dans l'environnement virtuel en imaginant, par eux-mêmes, la forme de certaines empreintes et coupes (tâche de dessin et non de reconnaissance). Un tel résultat apparaît cohérent avec les résultats des recherches piagésiennes ainsi qu'avec les résultats d'autres recherches qui, pourtant, ont proposé de résoudre ces exercices sur du matériel physique

(Duroisin, 2015) et non des représentations virtuelles. Pour autant, les résultats indiquent que cette habileté, à cet âge-là, n'est pour autant que partiellement maîtrisée car certaines des manipulations mentales demandées n'arrivent pas à être réussies, ce que mettent aussi en évidence les recherches antérieures. De plus, de fortes différences individuelles sont constatées, même à cet âge, puisque certains arrivent à réussir la quasi-totalité des vingt exercices proposés alors que d'autres sont confrontés à de très fortes difficultés.

Les résultats obtenus tendent à mettre en évidence que les capacités de visualisation se développent avec l'âge en environnement virtuel, ce qui a pu être mis en évidence antérieurement dans l'espace sensible (Davis, 1973 ; Duroisin, 2015, Ratliff *et al.*, 2010). Pour autant, à l'instar de ce qui a pu être mis en évidence par les auteurs cités, certains exercices nécessitant l'habileté continuent à poser de fortes difficultés et ne sont toujours pas maîtrisés ou presque par les adolescents âgés de 14-15 ans. Évidemment, ce sont des exercices qui semblaient déjà poser des difficultés auprès des participants plus jeunes. Cela confirme le caractère complexe de la mise en œuvre de l'habileté, mis en avant par de nombreux auteurs à l'instar de David et Clinciu (2009). À cette tranche d'âge, tous les adolescents arrivent à résoudre au moins quelques exercices impliquant l'habileté, mais aucun ne semble tous les réussir. Si les différences individuelles sont moindres par rapport aux tranches d'âge précédentes, elles continuent d'être observées.

Les disparités constatées entre individus, que ce soit chez les plus jeunes ou chez les plus âgés, peuvent être expliquées par plusieurs raisons :

- Comme le suggèrent Miyake *et al.* (2001) ou plus récemment Cohen et Hegarty (2014), la capacité de mémoire de travail est une source de différences dans la mise en œuvre de l'habileté de visualisation spatiale. Elle est donc susceptible de l'être encore plus lorsque les supports exigent des capacités en mémoire de travail différentes, comme c'est le cas des représentations virtuelles puisqu'elle nécessite de maintenir en mémoire de travail les informations observées sur l'objet 3D et sur la position du couteau. Plus largement, le niveau de développement d'autres processus cognitifs, susceptibles d'impacter les performances aux tâches de coupe, peut expliquer des écarts entre les niveaux de maîtrise constatés. L'analyse *a priori* (cf. 8.3.5.1c, volume 1) des tâches proposées a permis de mettre cela en évidence pour plusieurs fonctions exécutives, notamment l'inhibition et la flexibilité cognitive.
- Un autre facteur de disparité peut concerner l'expérience à l'égard des objets 3D et des opérations mentales demandées. Cohen et Hegarty (2007) évoquent que l'expérience

plus importante à l'égard des coupes mais aussi plus largement des formes 3D est susceptible, que ce soit dans le contexte scolaire ou au quotidien (coupes de fruits et légumes...), d'engendrer des performances plus élevées à ces mêmes tâches. Cette expérience est susceptible d'impacter les souvenirs spatiaux relatifs aux objets 3D et à leur coupe. Notons toutefois que, pour ce qui est de l'expérience avec les exercices d'empreinte et de coupe, les analyses relatives à cette variable secondaire semblent indiquer que cette dernière n'a pas d'effet significatif sur la capacité à résoudre ces mêmes tâches. Cependant, les informations récoltées ne nous permettent pas de savoir si les coupes déjà réalisées par l'enfant dans son expérience antérieure sont les mêmes que celles ici demandées. Pourtant, d'après Cohen et Hegarty (2014), la présence en mémoire à long terme d'images associées aux formes des coupes peut impacter la réussite future à de tels exercices. D'ailleurs, les auteurs évoquent qu'un paradigme pour entraîner les capacités de visualisation est de développer une accumulation accrue d'images mentales, même si cette technique n'occasionne pas de transfert lorsque les stimuli sont différents.

- En ce qui concerne l'expérience antérieure, l'analyse des variables secondaires investiguées permet de relever que le fait d'avoir déjà, en dehors de l'étude expérimentale, été confronté à des représentations virtuelles d'objets 3D occasionne de meilleurs résultats aux tâches de visualisation spatiale. On peut donc suspecter que leur familiarité avec ces représentations peut les inciter à mieux raisonner sur elles.
- Toujours grâce à l'analyse des variables secondaires, il est possible de suspecter que les différences de capacités de rotation mentale expliquent des différences de performance en visualisation spatiale puisqu'une corrélation positive est observée entre les deux habiletés. Une telle observation permet d'ailleurs de confirmer l'hypothèse de Ratliff *et al.* (2010) concernant une possible corrélation positive entre les performances à des tâches de coupe et les capacités de rotation mentale. D'ailleurs, elle apparaît cohérente avec les propos de Cohen et Hegarty (2014) qui considère que de meilleures performances à des tâches de visualisation spatiale peuvent être expliquées par de facilités dans les processus d'imagerie mentale basiques, comme la rotation mentale (capacité à mettre en œuvre des images mentales cinétiques mais pas transformatrices).

Toutes ces raisons ici évoquées pour justifier des possibles écarts individuels pourraient par ailleurs être des facteurs permettant d'expliquer le développement du niveau de maîtrise de l'habileté avec l'âge. En effet, l'expérience à l'égard des objets 3D évolue avec l'âge, notamment grâce aux apprentissages scolaires en géométrie 3D, et les capacités cognitives peuvent aussi se développer avec l'âge, comme c'est le cas pour la rotation mentale (Hawes *et al.*, 2015a).

10.2.10.2. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : une habileté qui varie selon les objets 3D et les types d'exercice

Les résultats permettent de mettre en évidence que, dans l'environnement virtuel, le niveau de maîtrise aux tâches de visualisation spatiale varie entre les objets 3D, même si des corrélations entre les scores obtenus à ces derniers sont observées. De tels constats rejoignent ceux d'autres recherches ayant évalué les capacités de visualisation spatiale au travers de tâches de coupe et/ou d'empreinte proposées dans différentes modalités (Piaget & Inhelder, 1948 ; Davis, 1973 ; Duroisin, 2015 ; Cohen & Bairaktarova, 2018).

Plus précisément, il apparaît que les enfants et les adolescents peinent à mettre en œuvre des opérations mentales sur l'anneau et ont plus de facilité à résoudre les exercices portant sur les autres objets 3D. À ce sujet, Piaget et Inhelder (1948) révèlent que les difficultés à résoudre des tâches de visualisation spatiale subsistent davantage quand celles-ci portent sur des objets avec lesquels les participants sont moins familiers. *A contrario*, Cohen et Bairaktarova (2018), en interrogeant des adultes au travers de tâches de coupe proposées au départ de représentations 2D, ont montré que les résultats ne sont pas systématiquement à l'avantage des objets simples en identifiant que les coupes portant sur des objets simples sont moins bien réussies que celles portant sur des objets complexes, en l'occurrence des solides simples joints ou encastés. Toutefois, ce résultat, qui diffère des autres études, s'explique par la modalité choisie, c'est-à-dire une tâche de reconnaissance. Face à ces objets complexes, les participants prennent davantage appui sur une stratégie analytique sans utiliser l'imagerie mentale, ce qu'ils ne peuvent pas faire face aux représentations d'objets 3D simples.

Dans notre cas, les enfants et les adolescents rencontrent plus de difficultés à mettre en place des opérations mentales sur l'anneau que sur le cube, la sphère, le cylindre et le cône. Ces résultats semblent en adéquation avec les observations des recherches piagésiennes, qui considéraient aussi l'anneau comme un objet plus complexe, avec lequel les enfants sont moins familiers, du moins en contexte scolaire dans la mesure où ce solide ne fait pas l'objet d'un apprentissage en géométrie 3D en primaire et secondaire inférieur. Toutefois, le score relatif à cet objet, comme c'est d'ailleurs le cas pour les autres objets investigués, augmente avec l'âge.

L'absence d'investigations portant sur des objets complexes obtenus par assemblage d'objets 3D simples nous empêche néanmoins de vérifier si les observations de Cohen

et Bairaktarova (2018) sont aussi observées au départ de représentations virtuelles et sur les enfants et les adolescents. Cela peut d'ailleurs constituer un prolongement potentiel à l'étude menée. Étant donné que toutes les recherches n'ont pas porté exactement sur les mêmes objets 3D, il apparaît plus complexe d'effectuer des comparaisons entre celles-ci. Néanmoins, malgré la présence de différences entre objets 3D, nous n'observons pas de différence entre le cône et le cylindre ou entre le cube et le cylindre, contrairement à ce que Davis (1973) a pu identifier.

De même, comme Cohen et Hegarty (2012) le relevaient au départ de représentations 2D, les individus semblent globalement performer différemment selon les opérations mentales demandées sur les objets 3D. Les résultats de l'étude indiquent que ces derniers ont, dans chacune des tranches d'âge, plus de mal à mettre en œuvre des opérations de coupe oblique qu'à réaliser les autres types d'exercice. Un tel résultat apparaît cohérent avec ce que plusieurs recherches antérieures anciennes ou plus récentes ont pu mettre en évidence (Cohen & Hegarty, 2007 ; Davis, 1973 ; Duroisin, 2015 ; Sanandaji *et al.*, 2017), et ce même si elles portaient sur des publics cibles parfois différents, si elles étaient évaluées au départ de différents types de support.

En revanche, si les exercices d'empreinte étaient décrits comme posant moins de difficultés dans l'étude de Duroisin (2015), les résultats ici obtenus ne semblent pas aller dans ce sens lorsqu'on prend en compte l'échantillon complet. Ils sont plutôt ici en faveur des tâches de coupe transversale. Même si, à l'âge de 8-9 ans, le score moyen obtenu aux exercices d'empreinte est en moyenne plus élevé que celui relatif aux trois types d'exercice de coupe, le score moyen obtenu à ce type d'exercice n'augmente pas avec l'âge, contrairement aux trois autres types d'exercice qui évoluent quant à eux. Notons toutefois que les études ne portent pas exactement sur les mêmes objets puisque, contrairement à l'étude de Duroisin (2015), l'anneau a été évalué et de fortes difficultés associées à l'identification de son empreinte sont observées, ce qui peut expliquer que ce type d'exercice n'est pas celui qui est le mieux réussi.

Par ailleurs, malgré ces différences de résultats, il semble possible de souligner que la maîtrise d'un exercice de coupe est corrélée avec la réussite aux autres exercices de coupe. Cela suggère donc qu'une fois qu'on est capable de réaliser un type de coupe, on a plus de chance de réussir les autres, ce qui peut permettre de comprendre les fortes différences individuelles observées.

10.2.10.3. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : une habileté variable selon l'exercice proposé

Même si des différences apparaissent entre les types d'opération mentale mais aussi entre les objets, le croisement des deux variables permet d'observer qu'en réalité, pour chaque opération mentale, des différences sont observées selon les objets 3D et inversement. À titre d'illustration, pour les exercices de coupe oblique, les enfants et les adolescents ont davantage de difficultés à se représenter celle du cube que celle de la sphère. De même, les enfants confrontés au cube, qui est l'objet qui obtient le meilleur score, ont de plus nettes difficultés à imaginer sa coupe transversale que sa coupe oblique. La disparité observée dans les scores par exercice et dans les scores par objet 3D pouvait laisser transparaître cela. Dans ce contexte, les analyses par exercices ont été menées.

Celles-ci permettent d'observer que, sur l'ensemble de l'échantillon, certains exercices semblent réussis par une majorité de participants. Parmi ceux-ci, il est particulièrement possible de citer l'empreinte du cube, que plus de 90% arrivent à dessiner, mais également l'empreinte du cône et du cylindre et les coupes transversales du cône et du cube, dont les taux de réussite avoisinent les 80%. Ce qui peut expliquer une telle réussite concerne le fait que le dessin attendu soit une forme congruente avec la forme de l'objet 3D, par exemple, le cylindre et le cône sont des solides arrondis et la forme de leur empreinte et de leur coupe transversale est un rond. De même pour le cube, qui est un solide de forme carrée, comme la forme de son empreinte et de sa coupe transversale. En effet, d'après Ratliff *et al.* (2010), les exercices de coupe sont mieux réussis quand la forme de la section ne diffère pas de la forme de l'entièreté de l'objet 3D. Pour autant, cela n'est pas une condition suffisante pour occasionner un taux de réussite maximal puisque d'autres exercices dont la réponse est congruente à la forme de l'objet 3D obtiennent des taux un peu plus faibles, avoisinant les 60 %, comme la coupe longitudinale du cube, les trois coupes de la sphère et la coupe transversale de l'anneau ou du cylindre. Néanmoins, les objets dont les dessins attendus ne sont pas congruents avec la forme globale du solide obtiennent des résultats quant à eux plus faibles. Excepté la coupe longitudinale du cône et du cylindre, qui obtiennent des taux compris entre 50 et 60% mais qui restent plus faibles que ceux observés pour leur coupe transversale.

En particulier, certains exercices posent de très fortes difficultés à tous les participants ou presque.

Parmi ceux-ci, il est possible de citer les exercices d'empreinte de la sphère et de l'anneau. Les difficultés à déterminer l'empreinte de la sphère ont déjà été mises en évidence sur du matériel physique (Duroisin, 2015) et les résultats viennent ici confirmer cette observation. L'analyse des erreurs types commises pour cet objet permet de voir se dégager une forte erreur type, qui, elle aussi, est semblable à ce qui a pu être observé dans la recherche antérieure. Il s'agit de proposer comme forme d'empreinte un dessin congruent avec la forme de l'objet 3D, en l'occurrence un rond (qui n'est pas de petite taille). Peu de recherches ont intégré l'anneau rond dans les exercices d'empreinte. Néanmoins, notre étude, en intégrant cet objet doublement incurvé partageant donc une caractéristique commune avec la sphère, permet de confirmer la difficulté à s'imaginer l'empreinte de tels objets.

Si les caractéristiques de l'environnement virtuel, présentant les objets en lévitation sans pouvoir les percevoir sur un « sol », pourraient avoir complexifié la mise en œuvre de l'opération mentale, la présence de cette erreur dans les études antérieures menées sur du matériel physique incite à considérer que ce n'est pas la seule raison permettant d'expliquer les difficultés rencontrées. De plus, comme le suggère la prise en compte de la variable relative à la perception des deux objets, il est possible de considérer que les difficultés de visualisation spatiale sont significativement plus importantes chez les enfants n'ayant pas perçu adéquatement ces deux objets 3D. Il n'en reste pas moins que de nombreux enfants et adolescents ont perçu adéquatement les deux objets 3D sans pour autant arriver à déterminer leur empreinte. Les difficultés de perception ne suffisent donc pas non plus pour expliquer cette forte difficulté observée pour ces deux exercices. Il apparaît que, même en ayant perçu adéquatement l'objet 3D, les enfants et les adolescents ont des difficultés à s'imaginer l'empreinte de ces objets alors qu'ils rencontrent et manipulent des objets de cette forme au quotidien (balles,...). Cela pourrait être expliqué par une tendance à confondre l'empreinte de l'objet avec la vue du dessus ou du dessous de cet objet 3D.

Les dessins de coupe oblique du cube, du cylindre, du cône et de l'anneau constituent également des exercices réussis par une minorité d'enfants et d'adolescents. Pour ces exercices, les participants dessinent le plus souvent la même forme que ce qu'ils proposent pour la coupe horizontale du solide (ex. un carré au lieu d'un rectangle pour le cube, un cercle au lieu d'un ovale pour le cône). Ces derniers ne

semblent pas considérer que la modification de l'orientation du couteau impacte la forme de la coupe obtenue. À nouveau, ce dessin peut être expliqué par la tendance à considérer que la forme de la coupe est congruente à la forme de l'objet (Ratliff *et al.*, 2010). C'est d'ailleurs ce qui peut expliquer des meilleurs taux de réussite pour la coupe oblique de la sphère, qui est, contrairement aux autres coupes obliques investiguées, congruente à la forme de l'objet 3D. Dans ce cas particulier, une des erreurs se situe chez les enfants qui, à l'inverse, considèrent que la forme d'une coupe oblique est systématiquement une déformation de la coupe transversale.

Au total, on observe donc que certains exercices, comme les cinq exercices d'empreinte, sont peu discriminants parce qu'ils sont soit réussis soit ratés par une majorité d'enfants et d'adolescents. D'ailleurs, les taux de réussite relatifs à ces objets n'augmentent pas forcément avec l'âge. D'autres items sont plus discriminants et permettent d'identifier les enfants et les adolescents arrivant le mieux à faire preuve de visualisation. Pour la plupart de ces exercices, des corrélations significatives sont observées avec l'âge.

Si les taux de réussite associés à ces exercices sont variables, les analyses des erreurs types commises permettent elles aussi de montrer une variabilité dans les dessins d'élèves. Pour autant, des tendances sont observées au niveau de l'apparition de certaines erreurs types permettant de comprendre les difficultés rencontrées, en plus de celles venant d'être décrites pour les exercices posant de fortes difficultés.

Une première erreur type spécifique aux exercices de coupe se rapporte au fait d'associer la forme de la coupe (forme accessible à l'intérieur du solide) à la vue de l'extérieur de l'objet 3D après avoir effectué la découpe de ce dernier (que ce soit la vue de l'avant du demi-objet observé ou pour les coupes longitudinales, de la vue du dessus de ce demi-objet). Ces mêmes erreurs types, comme le dessin d'un rectangle pour la coupe transversale du cube, avaient pu être observées face à du matériel physique dans l'étude de Duroisin (2015). Cette erreur peut être associée à une confusion entre le point de vue extérieur de l'objet 3D et le point de vue intérieur de celui-ci (Piaget & Inhelder, 1948). Ils ont donc le reflet de la difficulté à faire appel à une pensée pénétrante, au sens de Pathak *et al.* (2020) et à s'en tenir par conséquent à une pensée non pénétrante. La Figure 36 illustre quelques exemples relatifs à ce type d'erreur, qui est bien souvent la plus observée.

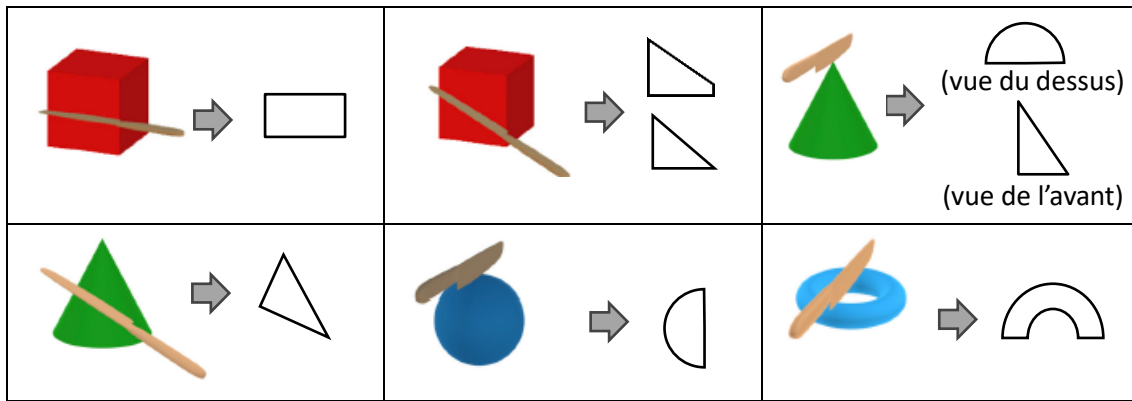


Figure 36 : Illustrations d'erreurs types faisant écho à la confusion entre le point de vue extérieur et intérieur de l'objet 3D

Marmor (1975) évoque qu'une limite aux résultats obtenus dans les recherches piagésiennes, pouvant être associée notamment à cette erreur type, se situe dans une incompréhension de ce qui est attendu de la part des participants. Les résultats ici obtenus permettent de vérifier que, même après une clarification du concept de coupe et une vérification de sa compréhension à l'aide d'un exemple, de telles difficultés restent présentes.

Une autre possibilité d'erreur observée concerne la proposition d'un dessin impliquant une difficulté à prendre en considération la troisième dimension. Ce type d'erreur, principalement observé pour le cylindre, le cône et l'anneau a d'ailleurs pu être observé par d'autres erreurs sur d'autres types de support, par exemple par Duroisin (2015) sur du matériel physique, ou par Cohen et Hegarty (2007) sur des représentations 2D. On peut notamment citer le dessin d'un ovale pour empreinte ou coupe transversale du cône et du cylindre. On peut également citer les dessins de coupe avec un côté courbe correspondant pourtant à l'intersection du plan de coupe avec une face plane, par exemple, le dessin d'un triangle équilatéral avec base arrondie comme coupe longitudinale d'un cône. La Figure 37 illustre ainsi quelques-unes de ces erreurs. Pour les individus confrontés à cette difficulté, le caractère dynamique de la représentation virtuelle n'a pas permis de dépasser les difficultés. Ces types d'erreur peuvent être rapprochés de la pensée préopératoire de Piaget, et ce même si ces difficultés sont aussi observées chez des individus plus âgés. Ces erreurs se rapportent également au premier niveau de pensée du modèle de Kondo *et al.* (2014) et de Fujita *et al.* (2017), décrit dans le chapitre 4 (volume 1), dans la mesure où la pensée est influencée par ce qui est visible sur la représentation 2D fournie au départ et le caractère dynamique ne permet pas de dépasser ce premier niveau. Celle-ci peut être

amenée à une perspective égocentrée dans la mesure où l'individu prend appui sur ce qu'il perçoit sur la représentation proposée (notamment dans la vue en perspective initiale proposée). En outre, pour le cas de dessin de côtés arrondis, Németh *et al.* (2007) évoquent que ce type d'erreur peut être expliqué par le fait que les enfants peuvent considérer que, puisque l'objet est courbe, sa coupe doit être courbe également.



Figure 37 : Illustrations de quelques erreurs faisant écho à une absence de prise en compte de la 3D

Notons également que des erreurs types pouvant être considérées comme un mixte des deux précédentes erreurs peuvent aussi être identifiées, même si leur fréquence reste minoritaire (Figure 38). En effet, certains confondent la vue extérieure et intérieure de l'objet 3D et en plus, ne prennent pas en compte la 3^{ème} dimension en dessinant des côtés courbes alors que la face coupée est plane. De même, on retrouve une autre combinaison de difficultés pour l'empreinte de l'anneau, faisant écho à une difficulté avec l'empreinte de ce type d'objet et une absence de prise en compte de la perspective, occasionnant pour erreur deux ovales concentriques non rapprochés.

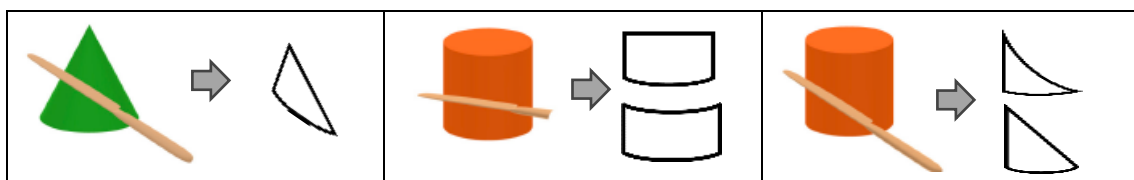


Figure 38 : Illustrations de quelques erreurs combinant confusion entre point de vue intérieur et extérieur et absence de prise en compte de la 3D

En parallèle, d'autres erreurs, souvent minoritaires mais diversifiées, sont observées, en particulier pour l'anneau. Si leur présence indique un déficit dans la capacité de visualisation spatiale, elle ne permet pas de l'expliquer et donc complexifie l'accompagnement des enfants et des adolescents pour le développement de l'habileté. Cela constitue une limite relative à l'étude d'un tel processus, mais qui n'est pas propre à l'évaluation avec des représentations virtuelles car un tel constat semble pouvoir être établi dans d'autres modalités. Parmi ces erreurs types, comme Duroisin (2015) avait aussi pu l'observer sur du matériel physique, certains éléments semblant

représenter un objet en trois dimensions, mais également certains simples dessins de lignes arrondies, permettant à nouveau de mentionner une difficulté à faire appel à la pensée pénétrante.

10.2.10.4. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : quid de l'influence des processus perceptifs ?

Tous les résultats mis ici en évidence auprès des enfants confrontés à du matériel virtuel semblent se rapprocher, comme évoqué précédemment, de constats de recherches antérieures réalisées sur du matériel physique et particulièrement par rapport aux résultats de Duroisin (2015) dont l'étude s'inspire fortement. C'est le cas par exemple de la présence, encore à l'âge de 14-15 ans, de difficultés à mettre en œuvre certaines opérations mentales, mais de la possibilité d'en réaliser certaines déjà à 8 ans ou encore de la présence de plus fortes difficultés à mener certaines opérations et de la présence d'erreurs types semblables. Ceux-ci permettent de suggérer une proximité entre les capacités de perception de représentations virtuelles et entre les mêmes capacités exercées sur du matériel physique, sans pour autant pouvoir prétendre à une maîtrise équivalente de ces capacités. La quatrième question de recherche permettra de vérifier cela.

Cette proximité entre les résultats obtenus peut s'avérer étonnante compte tenu des difficultés de perception pouvant apparaître en environnement virtuel (*cf.* chapitre 9). Si nous avons pu mettre en évidence que tous les objets 3D ne sont pas adéquatement perçus, il apparaît pour autant que le fait d'avoir perçu adéquatement l'objet 3D ne semble pas forcément impacter la réussite, comme le montrent les analyses réalisées sur cette variable secondaire. Si, comme susmentionné, des difficultés de perception ont un effet sur les exercices de visualisation pour la sphère et l'anneau, ce n'est pas le cas pour les autres objets 3D.

Cela peut signifier plusieurs choses. D'une part, le fait de maîtriser la perception n'occasionne pas forcément une réussite aux tâches de coupe. Un tel résultat ne paraît pas étonnant puisqu'il s'agit ici d'habiletés spatiales différentes, exigeant la mise en œuvre d'actions différentes.

D'autre part, une absence de perception adéquate permet tout de même à certains individus de réussir les exercices de coupe. Cette deuxième observation peut apparaître étonnante compte tenu du fait que les capacités perceptives sont à la base de la visualisation (Gal & Linchevski, 2010). Elle peut surtout être expliquée par différentes

raisons. Premièrement, nous avons vu que, face à des représentations virtuelles, certains enfants ne semblaient pas percevoir la 3D en considérant que l'élément présenté était bidimensionnel. Pour autant, dans les exercices d'empreinte et de coupe, nous avons dû préciser aux enfants que la tâche portait sur des objets 3D. De plus, les exercices proposés contiennent des couteaux, qui peuvent aussi avoir aidé les enfants à prendre conscience de la troisième dimension. Deuxièmement, nous avons vu que les erreurs types les plus commises dans l'environnement virtuel semblent être la sélection de l'objet 3D dont la hauteur a été modifiée. Or, pour la plupart des exercices proposés, une telle difficulté n'occasionne pas de réponse différente quand il s'agit de dessiner l'empreinte ou de la coupe demandée. Par exemple, pour le cône, la forme considérée comme correcte pour chacun des exercices est identique, quelle que soit la taille du solide. Les autres erreurs types sont en revanche minoritaires mais peuvent, pour la plupart, entraîner des réponses parfois identiques. Par exemple pour le cube, les réponses attendues si l'objet 3D avait été incliné, ce qui est une des erreurs de perception observée, sont les mêmes que celles obtenues sur le cube.

De ce fait, il ne s'agit pas forcément de rejeter les propos de Gal et Linchevski (2010) sur le lien entre perception et visualisation. En effet, malgré l'absence de lien ici observé entre le niveau de maîtrise des deux habiletés, il reste probable de considérer que les participants ont appliqué l'opération à l'objet tel que préalablement perçu. Toutefois, cela n'empêche que, quelle que soit la manière dont il est perçu, des difficultés à mettre en place les opérations sont observées et la forme obtenue en mettant en œuvre l'opération mentale menée sur l'objet tel que perçu peut être identique à celle observée si l'objet avait été perçu autrement, en l'occurrence adéquatement. Sans doute que d'autres exercices de visualisation pourraient permettre de générer des différences de performance quand la perception est inadéquate.

10.2.10.5. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : une habileté influencée par certaines variables secondaires

Au-delà de la perception, l'influence d'autres variables secondaires sur les capacités de visualisation a aussi été investiguée. Nous avons déjà pu évoquer préalablement le cas de la rotation mentale ou de l'expérience avec les représentations virtuelles d'objets 3D, qui semblent impacter positivement les performances, ce qui n'est pas le cas de la résolution antérieure d'exercices similaires.

En outre, les résultats semblent permettre de relever que les capacités de visualisation spatiale des enfants et des adolescents sont indépendantes du genre quand l'habileté est évaluée en environnement virtuel, comme avaient pu le relever Neubauer *et al.* (2010) ou encore Parsons *et al.* (2004) lorsqu'ils ont évalué la rotation mentale dans le même type d'environnement. Ces résultats diffèrent d'autres recherches ayant pu mettre en évidence un effet du genre sur la résolution d'exercices de coupe, par exemple chez des adultes quand elle est évaluée en version papier-crayon (Németh *et al.*, 2007).

Malgré la présence d'un lien entre compétence motrice et raisonnement spatial (Blank *et al.*, 2012 ; Fernández-Méndez *et al.*, 2020), les capacités de visualisation spatiale ne semblent pas dépendantes de la variable relative à la présence d'un risque de TDC, malgré un score moyen plus faible observé chez les personnes chez qui un TDC peut être suspecté. De même, si l'influence de certaines pratiques régulières sur les capacités spatiales a pu être mise en avant à l'occasion de plusieurs études, par exemple le cas concernant la pratique régulière de jeux vidéo (Gold *et al.*, 2018) ou de la pratique régulière de certains jeux (Levine *et al.*, 2012), les résultats ici obtenus ne semblent pas indiquer la présence d'un effet significatif de ces variables sur les performances spatiales des enfants et des adolescents aux tâches de visualisation spatiale proposées. Elles invitent donc à nuancer les propos de ces recherches antérieures et à mener des investigations supplémentaires sur les données récoltées (ex. prise en compte du type de jeux, observation des effets aux différentes tranches d'âge).

10.3. Réponse à la question de recherche 2.2° : Impact de la manipulation sur la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles

Afin d'évaluer l'impact de la manipulation sur la maîtrise de la visualisation au départ de représentations virtuelles, les performances des groupes 1 et 2 sont comparées.

10.3.1. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer (toutes tranches d'âge confondues)

Une proximité est observée entre le score moyen du premier groupe (10,45 sur 20) et celui du deuxième groupe (10,69 sur 20), ce qui semble indiquer que la maîtrise de l'habileté est partielle dans les deux modalités. Une certaine proximité est également observée dans la répartition des scores obtenus dans les deux groupes, comme l'illustre la Figure 39. Face aux représentations à manipuler, les scores varient entre 0 et 19 sur 20 alors que, face aux représentations à observer, les scores varient entre 1 et 19 sur 20. De forts écarts de performance entre individus sont constatés dans les deux groupes.

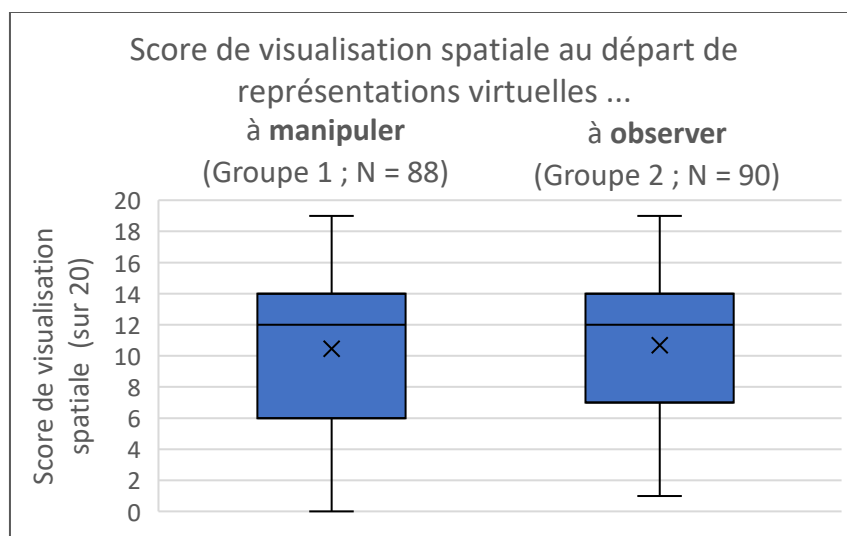


Figure 39 : Répartition du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer

La médiane est identique et vaut 12 sur 20, tout comme le troisième quartile, qui vaut lui 14 sur 20. Le premier quartile est quant à lui légèrement différent entre les deux groupes puisqu'il vaut respectivement 6 et 7. Les écarts types obtenus dans les deux groupes sont quant à eux proches également puisqu'ils valent respectivement 4,734 et 4,234. Ces différents indicateurs confirment que la maîtrise de l'habileté est

majoritairement partielle et que des écarts parfois importants entre individus sont observés quand les représentations 2 ½ D peuvent être manipulées ou non.

Les analyses inférentielles menées pour comparer les scores totaux obtenus dans les deux groupes confirment cette proximité puisqu'une absence de différence est observée entre les deux groupes. En effet, un résultat non significatif est obtenu au test *U de Mann-Whitney* ($U = 3887,500$; $p\text{-value} = 0,832$). En prenant appui sur le score total (tous exercices confondus et toutes tranches d'âge confondues), il semble donc possible de conclure que les enfants et les adolescents arrivent à faire preuve de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles manipulées comme au départ de représentations virtuelles observées uniquement. Par conséquent, la manipulation n'influence pas les capacités de visualisation.

10.3.2. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer selon l'âge

La Figure 40 présente les scores moyens obtenus à chaque tranche d'âge ainsi que les graphiques de type « boîtes en moustaches » qui s'y rapportent. À chaque tranche d'âge, le score moyen obtenu au départ de représentations virtuelles à manipuler et celui obtenu au départ de représentations virtuelles à observer s'avèrent proches. Dans les deux cas, le score moyen avoisine la note de 8 sur 20 à la première tranche d'âge (respectivement 8,05 et 8,41 sur 20), il avoisine ensuite la note de 9,5 sur 20 (respectivement 9,75 et 9,54), puis la note de 11 sur 20 (10,59 et 11,36) et enfin la note de 13,5 sur 20 (13,62 et 13,55). Dans les deux groupes, une même tendance à l'augmentation du score moyen est donc constatée.

Les indices de corrélation calculés entre le score de visualisation spatiale et l'âge (en jour) peuvent être qualifiés de positifs et forts dans le groupe 1 ($r = 0,449$) comme dans le groupe 2 ($r = 0,505$). Il est alors possible de suspecter que les capacités de visualisation spatiale au départ de représentations 2 ½ D évoluent de la même façon avec l'âge lorsque les représentations peuvent être manipulées et lorsqu'elles doivent être uniquement observées. Afin de confirmer cela, l'indice *q de Cohen* (Cohen, 1988) est calculé au départ des coefficients de corrélation des groupes comparés afin d'identifier si un effet du groupe, et donc de la manipulation, peut être suspecté sur la manière dont les performances évoluent avec l'âge ou si la manière dont les scores de visualisation évoluent avec l'âge est semblable entre les groupes. La valeur de la taille d'effet obtenue (0,073) permet de statuer sur l'absence d'effet du groupe sur l'évolution

des performances avec l'âge. Dans l'environnement virtuel, la manipulation n'a pas d'effet sur l'évolution de la visualisation avec l'âge.

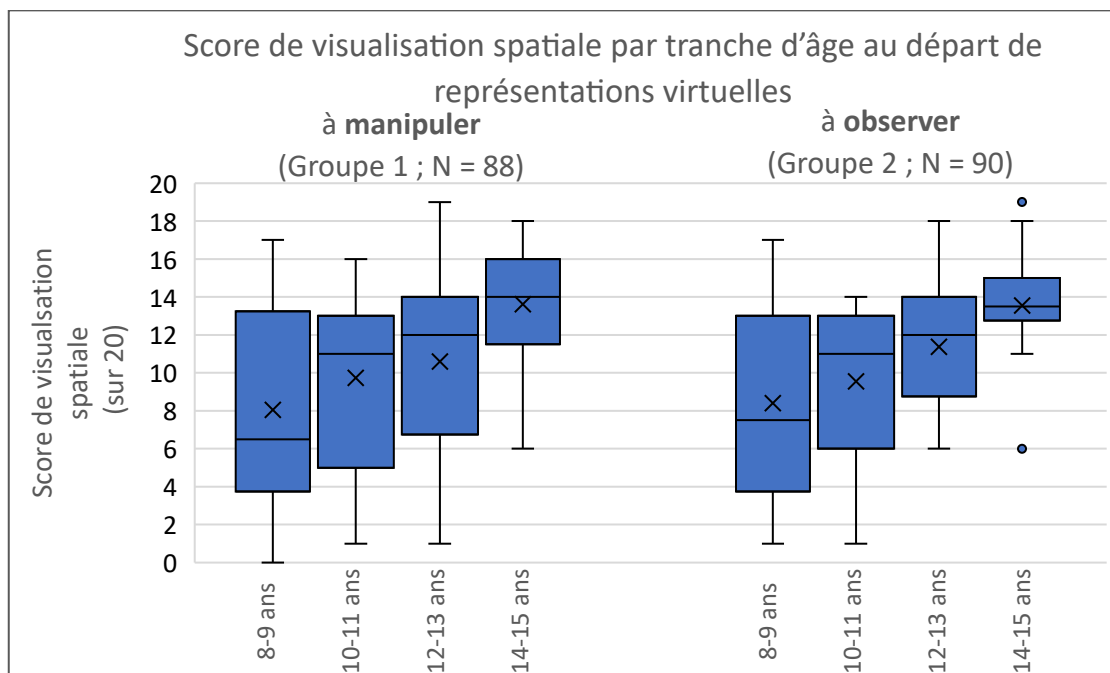


Figure 40 : Évolution des répartitions du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer

Malgré cette évolution des scores moyens constatée dans les deux groupes, des différences individuelles importantes observées sur l'ensemble du public cible sont également présentes aux différentes tranches d'âge. Pour autant, les écarts entre les individus semblent, dans les deux cas, globalement se réduire avec l'âge. Les indices de dispersion des résultats montrent que, aussi bien face à des représentations virtuelles à manipuler que face à des représentations virtuelles à observer, le premier quartile, tout comme le troisième, augmente (ou stagne) entre deux tranches d'âge consécutives et l'écart entre ces deux valeurs diminue. Cela signifie que 50% des participants se situent dans une fourchette qui tend à se réduire et dont les valeurs inférieures et supérieures tendent à augmenter. On constate aussi une augmentation de la médiane entre les différentes tranches d'âge, aussi bien face à des représentations virtuelles à manipuler, où elle passe par exemple de 6,5 sur 20 à la première tranche d'âge à 14 sur 20 à la dernière tranche d'âge, que face à des représentations virtuelles à observer où elle passe de 7,5 sur 20 à 13,5 sur 20. Dans les deux groupes, les scores minimaux observés augmentent ou stagnent entre deux tranches d'âge consécutives. Ces scores valent cependant encore 6 sur 20 à la dernière tranche d'âge dans les deux groupes, ce qui signifie que, même à l'âge de 14-15 ans, certains adolescents ont encore une

maitrise très partielle de l'habileté. L'évolution des scores maximaux entre les tranches d'âge n'est quant à elle pas aussi nette dans la mesure où des diminutions sont observées entre certaines tranches d'âge. Il semble donc possible d'identifier que, face à des représentations virtuelles, qu'elles soient à observer ou à manipuler, les capacités de visualisation tendent à augmenter avec l'âge. Les écarts entre individus semblent quant à eux se réduire avec l'âge, bien qu'ils restent encore importants parfois.

Tous les tests *U de Mann-Whitney* utilisés pour comparer, à chaque tranche d'âge, les scores de visualisation obtenus dans le groupe 1 et dans le groupe 2 confirment la proximité entre les deux groupes puisque des résultats non significatifs sont systématiquement obtenus à ces tests (Tableau 95). Il est alors possible de considérer que, pour chaque tranche d'âge, le niveau de maitrise des enfants et des adolescents aux tâches de visualisation proposées au départ de représentations 2 ½ D peuvent être manipulées est statistiquement équivalent à celui observé aux mêmes tâches proposées sans autoriser la manipulation.

Tableau 95 : Comparaison des scores de visualisation (sur 20) entre G1 et G2 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)

8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
$U = 234,500$	$U = 266,500$	$U = 224,000$	$U = 220,500$
$p = 0,860$	$p = 0,839$	$p = 0,671$	$p = 0,797$

10.3.3. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer selon l'objet 3D

Les analyses inférentielles (*U de Mann-Whitney*) menées sur les scores obtenus pour chacun des objets 3D indiquent que l'ensemble des différences entre les deux groupes sont non significatives (Tableau 96). Le constat relatif à l'absence d'un effet de la manipulation sur le score total (tous objets confondus) peut donc être généralisé à chacun des objets 3D. En conclusion, les capacités de visualisation spatiale par objet 3D peuvent être considérées comme équivalentes lorsque les représentations virtuelles sont manipulées et lorsqu'elles ne le sont pas.

Tableau 96 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G2 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)

Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
$U = 3868,500$	$U = 3958,000$	$U = 3838,500$	$U = 3752,500$	$U = 3564,500$
$p = 0,775$	$p = 0,995$	$p = 0,710$	$p = 0,527$	$p = 0,218$

10.3.4. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer selon le type d'exercice

Les tests *U de Mann-Whitney* appliqués pour comparer les groupes concernés cette fois au sujet des scores relatifs à chacun d'eux (Tableau 97) semblent aussi montrer une proximité entre les modalités. Ils indiquent une absence de différence significative dans tous les cas, que ce soit pour le score relatif aux exercices d'empreinte, de coupe transversale, de coupe longitudinale ou de coupe oblique. Autrement dit, pour chacun des types d'exercice, les enfants et les adolescents arrivent à faire preuve de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler comme au départ de représentations virtuelles à observer uniquement.

Tableau 97 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G2 : *U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)*

Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
$U = 3782,500$ $p = 0,578$	$U = 3787,000$ $p = 0,601$	$U = 3768,000$ $p = 0,571$	$U = 3895,000$ $p = 0,845$

10.3.5. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer selon l'âge et l'objet 3D

Les tests *U de Mann-Whitney* appliqués entre les deux groupes pour les scores de chaque objet à chaque tranche d'âge (Tableau 98) ne montrent aucun résultat significatif. Autrement dit, les résultats mettent en évidence qu'à chaque tranche d'âge et pour chaque objet 3D, les enfants et les adolescents ont un niveau de maîtrise de la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler équivalent à celui observé au départ de ce même matériel à observer uniquement.

Tableau 98 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G2 et entre G3 et G4 à chaque tranche d'âge : *U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)*

	Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
8-9 ans	$U = 213,000$ $p = 0,471$	$U = 228,500$ $p = 0,745$	$U = 234,500$ $p = 0,851$	$U = 207,000$ $p = 0,400$	$U = 199,000$ $p = 0,279$
10-11 ans	$U = 242,000$ $p = 0,433$	$U = 239,500$ $p = 0,411$	$U = 244,000$ $p = 0,462$	$U = 247,500$ $p = 0,531$	$U = 261,000$ $p = 0,717$
12-13 ans	$U = 230,000$ $p = 0,763$	$U = 218,000$ $p = 0,557$	$U = 212,000$ $p = 0,464$	$U = 236,000$ $p = 0,878$	$U = 204,000$ $p = 0,336$
14-15 ans	$U = 213,000$ $p = 0,633$	$U = 198,000$ $p = 0,389$	$U = 188,000$ $p = 0,245$	$U = 203,500$ $p = 0,447$	$U = 224,500$ $p = 0,867$

De ce fait, les observations relatives à l'absence d'effet de la modalité de représentation à chaque tranche d'âge sur le score total peuvent être appliquées à l'ensemble des objets 3D. Inversement, l'absence d'effet de la modalité de présentation observée pour chaque objet pour l'ensemble du public cible peut être élargie à chacune des tranches d'âge.

Cette proximité entre les deux groupes semble confirmée par les indices de corrélation (*de Spearman*) calculés entre les scores et l'âge (en jour) dans chacun des groupes, présentés au sein du Tableau 99. On y constate que des corrélations non nulles sont observées pour chaque objet 3D. Pour certains objets 3D, des indices de corrélation proches sont obtenus auprès du groupe 1 et auprès du groupe 2. C'est le cas par exemple pour le cube et des indices de corrélation non nuls mais faibles sont observés, valant respectivement 0,215 et 0,222. C'est le cas également pour le cône où les indices, d'une valeur de 0,446 et 0,451, peuvent tous deux être qualifiés de positifs et forts. Des écarts un peu plus importants sont constatés pour les trois autres objets 3D, en particulier pour le cylindre.

Tableau 99 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par objet (sur 4) au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)

	Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
G1 : manip. 2½D (N = 88)	$\rho = 0,215$ $p = 0,044^*$	$\rho = 0,446$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,372$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,284$ $p = 0,007^{**}$	$\rho = 0,425$ $p < 0,001^{**}$
G2 : obs. 2½D (N = 90)	$\rho = 0,222$ $p = 0,036^*$	$\rho = 0,451$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,412$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,441$ $p = 0,007^{**}$	$\rho = 0,388$ $p < 0,001^{**}$

L'ensemble des analyses menées pour comparer les deux groupes, qu'elles portent sur le score relatif à chaque objet et à chaque tranche d'âge ou sur la comparaison de l'évolution des scores de chaque objet 3D, permet de confirmer une certaine proximité entre les résultats obtenus quand la manipulation est autorisée ou pas.

10.3.6. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer selon l'âge et le type d'exercice

En suivant la même logique que les analyses inférentielles comparatives précédemment présentées, les scores relatifs à chaque type d'exercice obtenus à chacune des tranches d'âge par les enfants et les adolescents du groupe 1 sont comparés avec ceux obtenus par les enfants et les adolescents du groupe 2 à l'aide de tests *U de Mann-Whitney* (Tableau 100). Les résultats obtenus sont tous non

significatifs. De tels résultats permettent donc de généraliser à chacune des tranches d'âge l'absence d'impact de la manipulation du matériel virtuel observée préalablement pour chacun des types d'exercice. À nouveau, les analyses menées en prenant en compte les types d'exercice et l'âge plaident pour une proximité entre le niveau de maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale exercée au départ de représentations virtuelles manipulables et au départ de représentations virtuelles à observer.

Tableau 100 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G2 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)

	Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
8-9 ans	U = 190,000 p = 0,200	U = 223,500 p = 0,657	U = 208,500 p = 0,424	U = 225,500 p = 0,685
10-11 ans	U = 270,500 p = 0,898	U = 271,000 p = 0,912	U = 227,500 p = 0,294	U = 230,500 p = 0,302
12-13 ans	U = 219,000 p = 0,558	U = 213,000 p = 0,479	U = 212,000 p = 0,474	U = 241,500 p = 0,990
14-15 ans	U = 206,000 p = 0,504	U = 231,000 p = 1,000	U = 213,500 p = 0,658	U = 178,500 p = 0,186

Les indices de *corrélation de Spearman* calculés entre les scores par type d'exercice et l'âge (en jour), proposée au sein du Tableau 101, permettent de confirmer la proximité des observations. Il apparaît que, dans les deux groupes, l'indice de corrélation le plus faible est celui relatif aux exercices d'empreinte. Si nous avons pu déjà mettre en évidence que celui-ci s'avérait nul pour le premier groupe, il apparaît positif mais faible dans le groupe 2. Pour les trois autres types d'exercice, les coefficients de corrélation peuvent être qualifiés de positifs et modérés ou forts.

Tableau 101 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par type d'exercice (sur 5) au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)

	Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
G1 : manip. 2½D (N = 88)	$\rho = 0,120$ $p = 0,265$	$\rho = 0,445$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,353$ $p = 0,001^{**}$	$\rho = 0,439$ $p < 0,001^{**}$
G2 : obs. 2½D (N = 90)	$\rho = 0,293$ $p = 0,005^{**}$	$\rho = 0,391$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,431$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,367$ $p < 0,001^{**}$

10.3.7. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer selon le type d'exercice et l'objet 3D (résultats par exercice)

10.3.7.1. Analyses des taux de réussite

La Figure 41 présente les taux de réussite obtenus au sein des deux groupes à chacun des exercices. Celle-ci met en évidence une proximité entre les taux de réussite obtenus dans les deux groupes à chacun des exercices. En particulier, des taux de réussite égaux ou presque sont obtenus pour les exercices de coupe longitudinale et transversale du cylindre ou encore pour l'exercice d'empreinte du cône. Dès que des différences de taux sont observées, elles sont le plus souvent à l'avantage du deuxième groupe mais il arrive, pour certains exercices, que le score soit plus élevé dans le premier groupe (ex. coupe oblique du cube). La différence la plus importante entre les deux groupes concerne l'exercice de coupe transversale de l'anneau avec un écart d'environ 10% entre les deux groupes, à l'avantage du groupe confronté aux représentations virtuelles à observer.

Les tests du *Khi-carré* (ou alternative) appliqués pour chaque exercice entre le taux de réussite des groupes 1 et 2, dont les résultats sont placés en annexe (Annexe 40), ne montrent la présence d'aucun résultat significatif. Cela permet donc d'observer que le taux de réussite à chacun des exercices n'est pas dépendant du groupe d'appartenance, et donc de la place accordée à la manipulation en ce qui concerne le matériel virtuel.

Par ailleurs, assez logiquement vu la proximité des scores, les résultats obtenus montrent de fortes différences entre les exercices aussi bien dans le premier que dans le deuxième groupe. Certains, comme l'exercice d'empreinte de la sphère ou de l'anneau, mais aussi comme la coupe oblique de l'anneau, du cube ou du cylindre posent des difficultés importantes à une grande partie des participants. D'autres, comme l'exercice d'empreinte du cube ou les exercices de coupe transversale du cube ou du cône semblent mieux maîtrisés dans les deux groupes.

En outre, si des tendances ont pu être précédemment mises en évidence dans les deux groupes concernant les différences de scores entre objets 3D ou entre les types d'exercice, il semble que, pour chaque objet 3D, des différences sont constatées entre les types d'exercice et inversement. Ainsi, on observe par exemple dans le premier groupe, comme dans le deuxième, que, pour le cube, l'exercice de coupe oblique s'avère nettement plus problématique que les trois autres exercices. De même, dans

les deux groupes, l'exercice de coupe oblique pose majoritairement peu de difficultés pour la sphère, mais beaucoup plus pour les autres objets 3D. Ce même constat observé dans les deux groupes, qui invite à rester prudent concernant les scores obtenus par type d'exercice et concernant ceux obtenus par objets 3D, permet de mettre en avant un élément supplémentaire pour attester de la proximité entre les capacités de visualisation au départ de représentations 2 ½ D quand ces dernières peuvent ou non être manipulées.

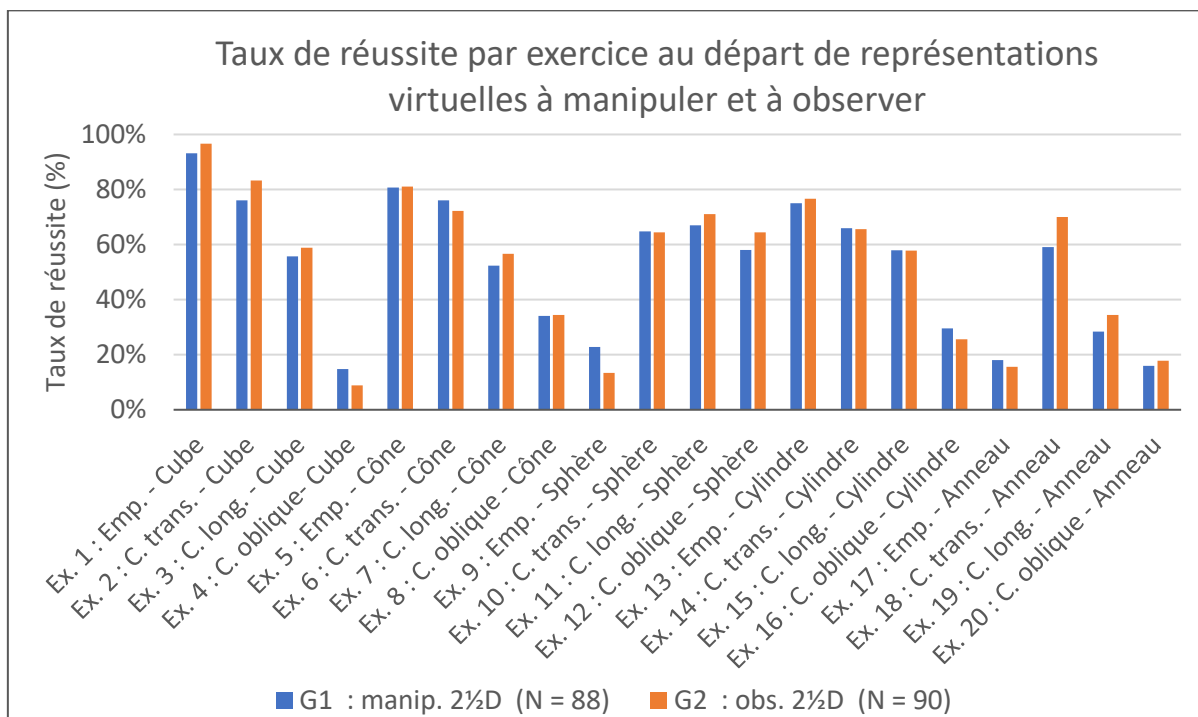


Figure 41 : Taux de réussite à chaque exercice de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer







10.3.7.2. Analyses des erreurs types

Si les analyses précédentes ont permis de souligner une certaine proximité entre le niveau de maîtrise des différents exercices de visualisation face à des représentations 2 ½ D à manipuler et à observer, l'analyse des erreurs types réalisées semble également principalement aller dans ce sens, même si quelques divergences apparaissent. Les analyses ci-dessous se focalisent sur les erreurs types ayant été observées à au moins quatre reprises dans au moins un des deux groupes mais les résultats complets sont proposés en annexe (Annexe 38).

Les résultats relatifs au cube (Tableau 102) montrent des fréquences relativement proches des différentes erreurs types. Dans les deux groupes, aucune erreur type ne se

détache pour l'exercice d'empreinte, réussi par une majorité de participants dans les deux groupes. Le dessin d'un rectangle se détache quant à lui dans les deux groupes pour l'exercice de coupe transversale et pour l'exercice de coupe longitudinale, même si cette erreur s'avère systématiquement au moins deux fois plus fréquente pour la coupe longitudinale. Enfin, pour l'exercice de la coupe oblique, les mêmes erreurs types sont recensées dans les deux groupes avec des fréquences assez proches et un ordre d'occurrence identique. L'erreur la plus fréquente, avec plus de 30% d'occurrence dans chacun des groupes, est le dessin d'un carré. Viennent ensuite le dessin d'un trapèze rectangle et d'un triangle rectangle, avec un taux d'apparition légèrement supérieur à 15%. Enfin, une erreur type moins souvent commise dans les deux modalités concerne le dessin d'un triangle non rectangle.












Tableau 102 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation du cube : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G2 (N = 90)
Ex. 1 : Empreinte – Cube	/	/	/
Ex. 2 : Coupe transversale – Cube	Rectangle 	17,0%	14,4%
Ex. 3 : Coupe longitudinale – Cube	Rectangle 	37,5%	34,4%
Ex. 4 : Coupe oblique – Cube	Carré 	31,8%	37,8%
	Trapèze rectangle 	18,2%	16,7%
	Triangle rectangle 	15,9%	15,6%
	Triangle non rectangle 	6,8%	10,0%

Concernant les exercices du cône, des fréquences proches sont observées au niveau des erreurs types commises par les participants (Tableau 103), même si certaines erreurs apparaissent plus fréquemment dans l'un ou l'autre groupe. Au niveau de l'exercice d'empreinte, deux erreurs types sont relevées dans les deux groupes. À la place de dessiner un cercle, plusieurs participants ont dessiné un ovale, respectivement 6,8% des participants dans le premier groupe et 8,9% des participants dans le deuxième groupe. Par ailleurs, un triangle isocèle semble avoir été dessiné par quelques participants au sein des deux groupes également. Pour le premier exercice de coupe relatif à ce solide, seules deux mêmes erreurs se distinguent dans les deux groupes, à savoir le dessin d'un ovale ou le dessin d'un triangle isocèle. Cependant, la fréquence associée à ces erreurs quand les représentations virtuelles ne peuvent être manipulées










vaut plus du double de la fréquence observée quand elles peuvent l'être (4,5%). En ce qui concerne l'exercice de coupe longitudinale, l'erreur la plus fréquente est la même dans les deux groupes, avec une fréquence avoisinant les 13%. Il s'agit du dessin d'un triangle isocèle avec base arrondie. Deux autres erreurs se distinguent : le dessin d'un demi-rond et le dessin d'un triangle rectangle. Si, dans le premier groupe, le dessin d'un demi-rond est plus fréquent (8,0%) que le dessin du triangle rectangle (4,5%), la situation inverse est observée dans le deuxième groupe. Le dessin d'un triangle rectangle est plus fréquent (11,1%) que dans le premier groupe, alors que le demi-rond est quant à lui légèrement moins fréquent (5,6%). Enfin, pour le dernier exercice du cône, des taux très proches sont obtenus pour trois des erreurs types. Dans les deux groupes, le dessin d'un rond est l'erreur la plus fréquente. Un enfant sur quatre environ commet cette erreur. Ensuite, plus d'un enfant sur dix commet l'erreur de dessiner un triangle quelconque, pouvant correspondre à la vue de face de la partie supérieure du solide coupé. Enfin, quelques-uns font, dans les deux groupes, le dessin d'un triangle quelconque avec un côté arrondi. En plus de ces erreurs, on observe l'apparition d'une erreur type chez 4,4% des participants du groupe 2, alors que celle-ci n'est jamais rencontrée dans le premier groupe : le dessin d'un rectangle.

Tableau 103 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation du cône : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G2 (N = 90)
Ex. 5 : Empreinte – Cône	Ovale 	6,8%	8,9%
	Triangle isocèle 	4,5%	4,4%
Ex. 6 : Coupe transversale – Cône	Ovale 	4,5%	12,2%
	Triangle isocèle 	4,5%	10,0%
Ex. 7 : Coupe longitudinale – Cône	Triangle isocèle avec un côté arrondi 	12,5%	13,3%
	Demi-rond 	8,0%	5,6%
	Triangle rectangle 	4,5%	11,1%
Ex. 8 : Coupe oblique – Cône	Rond 	25,0%	25,6%
	Triangle quelconque 	14,8%	13,3%
	Triangle quelconque avec un côté arrondi 	4,5%	2,2%
	Rectangle 	0,0%	4,4%

Pour ce qui est de la sphère, une proximité est également constatée dans la plupart des erreurs types commises au sein des deux groupes (Tableau 104), même si des différences dans la fréquence de ces erreurs ou dans l'ordre de dominance sont parfois observées entre les deux groupes. Pour l'exercice d'empreinte de la sphère, une erreur dominante est constatée face aux deux modalités de représentation : le dessin d'un rond. Le taux associé à cette erreur vaut 64,7% dans le premier groupe et atteint même près de 80% dans le deuxième. Le dessin d'un ovale est une autre erreur type observée de manière beaucoup moins fréquente dans les deux groupes. Concernant la coupe transversale, deux erreurs, dont les taux d'occurrence sont assez proches, sont relevées dans les deux groupes : le dessin d'un demi-rond et le dessin d'un ovale. Elles sont commises par plus d'un enfant sur 10 dans chaque groupe. Ces deux erreurs sont, assez logiquement, aussi proposées dans l'exercice de coupe longitudinale, même si la deuxième erreur type (dessin d'un ovale) apparaît moins fréquemment que la première erreur et apparaît aussi moins fréquemment que dans le premier exercice. Finalement, pour la coupe oblique, on retrouve les deux mêmes erreurs types également. Dans le groupe 1, le demi-rond est une erreur plus fréquente (14,8%) que l'ovale (12,5%). La situation inverse est observée dans le groupe 2 puisque la fréquence du demi-rond est de 8,9% alors que celle de l'ovale est de 17,8%. Le dessin d'un demi-ovale est également une erreur rencontrée chez quelques participants des deux groupes.









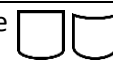






Tableau 104 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation de la sphère : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G2 (N = 90)
Ex. 9 : Empreinte – Sphère	Rond 	64,7%	77,7%
	Ovale 	8,0%	7,8%
Ex. 10 : Coupe transversale – Sphère	Demi-rond 	14,8%	15,6%
	Ovale 	11,4%	13,3%
Ex. 11 : Coupe longitudinale – Sphère	Demi-rond 	17,0%	12,2%
	Ovale 	9,1%	5,6%
Ex. 12 : Coupe oblique – Sphère	Ovale 	12,5%	17,8%
	Demi-rond 	14,8%	8,9%
	Demi-ovale 	5,7%	2,2%

Pour le cylindre, plusieurs divergences semblent apparaître entre les deux groupes, bien que des tendances communes restent observées (Tableau 105). Pour le premier

exercice, l'ovale est l'erreur la plus fréquente dans les deux groupes, avec une fréquence valant respectivement 12,5% et 16,7%. Une autre erreur type observée dans le premier groupe, chez environ 10% des participants, est le dessin d'un cylindre. Cette erreur ne se produit que chez un participant dans le groupe 2. Pour la coupe transversale du cylindre, plusieurs erreurs sont observées dans les deux groupes, même si l'ordre d'importance de celles-ci est variable. Dans le groupe 1 (11,4%), comme dans le groupe 2 (15,6%), l'erreur la plus fréquente est le dessin d'un ovale à la place d'un cercle. Une autre erreur, le dessin d'un rectangle, est commise par 6,7% des participants du deuxième groupe alors qu'elle est minoritaire dans le premier groupe (2,3%). Inversement, les erreurs types relatives au dessin du demi-cylindre et d'un rectangle avec bord arrondi sont réalisées par plus de 5% des participants du groupe 1 mais sont plus rares dans le groupe 2.

Tableau 105 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation du cylindre : pourcentage d'occurrence











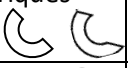






	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G2 (N = 90)
Ex. 13 : Empreinte – Cylindre	Ovale 	12,5%	16,7%
	Cylindre 	9,1%	1,1%
Ex. 14 : Coupe transversale – Cylindre	Ovale 	11,4%	15,6%
	Rectangle 	2,3%	6,7%
	Demi-cylindre 	6,8%	3,3%
	Rectangle avec côtés(s) arrondi(s) 	5,7%	1,1%
Ex. 15 : Coupe longitudinale – Cylindre	Demi-rond 	15,9%	12,2%
	Ovale 	4,5%	6,7%
	Carré ou rectangle avec côtés(s) arrondi(s) 	2,3%	6,7%
	Demi-cylindre 	8,0%	5,6%
Ex. 16 : Coupe oblique – Cylindre	Rond 	20,5%	30,0%
	Triangle rectangle 	6,8%	11,1%
	Trapèze rectangle 	8,0%	6,7%
	Rectangle 	4,5%	5,6%
	Triangle avec un ou deux côtés(s) arrondis 	6,8%	2,2%

Pour l'exercice 15, l'erreur la plus fréquente, à la fois dans le premier (15,9%) et le deuxième groupe (12,2%) est le dessin d'un demi-rond. Parmi les autres erreurs types, qui apparaissent moins fréquemment, il est possible de citer, dans l'ordre d'occurrence observée dans le groupe 2, le dessin d'un ovale, d'un carré ou rectangle avec côté(s) arrondi(s) et enfin le dessin d'un demi-cylindre. Le demi-cylindre est par contre plus fréquent que les deux autres dans le premier groupe. Finalement, pour l'exercice de coupe oblique, le dessin d'un rond à la place d'un ovale est l'erreur type qui se distingue le plus dans les deux groupes, particulièrement dans le deuxième groupe où elle est commise par près d'un tiers des participants. Les autres erreurs types, commises majoritairement par moins d'un participant sur dix, sont observées: le dessin d'un triangle rectangle, d'un trapèze rectangle, d'un rectangle, ou d'un triangle rectangle avec côtés arrondis.

Enfin, le Tableau 106 présente les erreurs types constatées pour les exercices de l'anneau. Comme pour l'empreinte de la sphère, une erreur type domine clairement dans les deux groupes, avec un taux d'occurrence avoisinant les 70% : le dessin de deux ronds concentriques non rapprochés. Avec près de 10% de présence, le dessin de deux ovales concentriques non rapprochés apparaît comme la deuxième erreur type recensée dans les deux groupes. Une troisième erreur type est observée dans le deuxième groupe par quelques participants (4,4%) mais jamais dans le premier groupe : le dessin d'un ovale. Pour l'exercice de coupe transversale de l'anneau, le dessin d'un rond est l'erreur type la plus élevée dans le groupe 1 (18,2%) et dans le groupe 2 (14,4%). Vient ensuite, de manière plus rare, le dessin de deux ovales concentriques et finalement le dessin d'un ovale. Pour la coupe longitudinale, une erreur ressort dans les deux groupes et correspond à la vue du dessus d'une des deux parties du solide, c'est-à-dire le dessin de deux demi-ronds concentriques reliés par des segments. Celle-ci est davantage observée dans le groupe 1 (38,6%) mais est aussi la plus fréquente dans le groupe 2 (26,7%). Viennent ensuite d'autres erreurs types, dont l'ordre d'apparition n'est pas la même dans les deux groupes. Dans le groupe 2, la deuxième erreur la plus fréquente est le dessin de deux lignes arrondies « parallèles ». Cette erreur est par contre quasiment absente dans le premier groupe. Finalement, on retrouve deux autres erreurs types que sont le dessin d'un arc de cercle et le dessin d'un rond, présentes toutes deux un taux d'occurrence valant 6,7% dans le deuxième groupe. La première atteint un taux se rapprochant de 10% dans le premier groupe tandis que la deuxième reste minoritaire (4,5%). Pour ce qui est du dernier exercice,

l'erreur majoritaire dans les deux groupes est similaire à celle observée pour l'exercice de la coupe longitudinale, c'est-à-dire un dessin de deux demi-ronds concentriques reliés par des segments. Cette erreur type apparaît davantage dans le premier (27,3%) que dans le deuxième groupe (18,9%). Le dessin d'un rond est une autre erreur type qui apparaît chez un enfant sur dix dans le groupe 2 alors qu'elle est près de deux fois moins présente dans le premier groupe. De même, le dessin de deux lignes arrondies parallèles est proposé chez quelques participants (7,8%) du groupe 1 alors qu'il n'est commis que par un seul participant dans l'autre groupe. Les erreurs types relatives au dessin d'un ovale ou de deux ronds concentriques sont, elles, présentes avec près de 10% d'occurrence dans le premier groupe alors qu'elles sont moins présentes dans le deuxième groupe. Enfin, l'erreur relative au dessin de deux ronds distincts et celle relative au dessin d'un arc de cercle sont minoritaires dans les deux groupes.

Tableau 106 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation de l'anneau : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G2 (N = 90)
Ex. 17 : Empreinte – Anneau	Ronds concentriques non rapprochés 	69,3%	71,1%
	Ovales concentriques non rapprochés 	9,1%	8,9%
	Ovale 	0,0%	4,4%
Ex. 18 : Coupe transversale – Anneau	Rond 	18,2%	14,4%
	Ovales concentriques 	9,1%	5,6%
	Ovale 	4,5%	3,3%
Ex. 19 : Coupe longitudinale – Anneau	Deux demi-ronds concentriques reliés par des segments 	38,6%	26,7%
	Deux lignes arrondies parallèles 	3,4%	12,2%
	Ligne arrondie 	9,1%	6,7%
	Rond 	4,5%	6,7%
Ex. 20 : Coupe oblique – Anneau	Deux demi-ronds concentriques reliés par des segments 	27,3%	18,9%
	Rond 	4,5%	10,0%
	Deux lignes arrondies parallèles 	1,1%	7,8%
	Ovale 	9,1%	6,7%
	Ronds concentriques 	9,1%	4,4%
	Deux ronds distincts 	4,5%	4,4%
	Ligne arrondie 	5,7%	2,2%

Étant donné la grande proximité observée entre les erreurs types présentes dans les deux groupes et leur fréquence très souvent similaire, nous renvoyons le lecteur vers l'analyse des erreurs types proposées pour les résultats du premier groupe (cf. 10.2.7), en pointant la mise en évidence de tendances communes au niveau des erreurs types commises et des difficultés. Notamment, il est possible de pointer des difficultés liées aux empreintes des objets ne reposant pas sur une face (sphère et anneau), où la forme de l'empreinte proposée est majoritairement congruente à la forme globale de l'objet 3D. Il est également possible de relever la présence d'erreurs relatives à la confusion entre le point de vue extérieur et intérieur de l'objet 3D (association de la forme de la coupe à la forme de la vue extérieure de l'objet après sa découpe). Des difficultés relatives à une absence de prise en compte de la 3D, mais aussi à une absence de conscience de l'impact du caractère incliné du couteau sur la forme de la coupe.

10.3.8. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer selon l'âge, le type d'exercice et l'objet 3D

À nouveau, des tests du *Khi-carré* (ou alternative) sont appliqués entre les deux groupes sur les taux de réussite obtenus à chaque exercice et à chacune des tranches d'âge. Les résultats de ces tests sont placés en annexe (Annexe 41). Même si aucun résultat significatif n'avait été observé sur l'ensemble du public cible, un résultat significatif émerge pour un exercice à la première tranche d'âge, en l'occurrence l'exercice d'empreinte de la sphère (*Test exact de Fisher* = 5,641 ; *p-value* = 0,048). Pour cet exercice, un taux de réussite plus élevé est observé dans le groupe 2 (5 réussites sur 23) que pour le groupe 1 (3 réussites sur 22). Pour tous les autres exercices, les résultats des tests inférentiels sont tous non significatifs. On peut donc conclure que la manipulation des représentations virtuelles n'impacte majoritairement pas la maîtrise de l'ensemble des exercices de visualisation, et ce à l'ensemble des tranches d'âge.

10.3.9. Impact des variables secondaires sur la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer

a. Le genre

Le score moyen de visualisation spatiale obtenu par les filles (10,94 sur 20) est plus élevé mais proche de celui obtenu par les garçons (10,40 sur 20) dans le groupe 2 (Tableau 107). Le test inférentiel *U de Mann-Whitney* appliqué pour vérifier le caractère significatif des différences entre les scores des filles et des garçons indique que cette

différence est non significative ($U = 909,500$; $p\text{-value} = 0,424$). Puisque les analyses antérieures (cf. 10.2.9) avaient montré qu'il en était de même dans le premier groupe ($U = 849,500$; $p\text{-value} = 0,353$), les résultats invitent donc à considérer que le genre ne semble pas impacter la maîtrise de l'habileté au départ de représentations virtuelles, qu'elles soient ou non manipulées par le participant

Tableau 107 : Score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à observer par genre et comparaison : score moyen (sur 20), U de Mann-Whitney (U) et p-value

	G2 : obs. 2½D	
	♀ (N = 48)	♂ (N = 42)
Score (sur 20)	10,94	10,40
<i>U</i>	909,500	
<i>p-value</i>	0,424	

b. Le niveau de maîtrise de la rotation mentale

Concernant le lien entre les capacités de visualisation spatiale des objets 3D et le score obtenu au test de rotation mentale portant lui aussi sur des objets 3D, comme le présente le Tableau 108, des corrélations non nulles et positives sont observées aussi pour le deuxième groupe, comme cela avait été aussi relevé dans le premier groupe (cf. 10.2.9). Pour autant, l'ampleur de ces corrélations varie entre ces groupes. Elle peut être considérée comme faible dans le groupe 2 ($r = 0,286$) et modérée dans le groupe 1 ($r = 0,358$). La taille d'effet obtenue entre le groupe 1 et le groupe 2 est de 0,08, ce qui invite à suspecter l'absence d'un effet du groupe sur la corrélation, et donc l'absence d'un effet de la place accordée à la manipulation sur le lien entre capacités de rotation mentale et de visualisation spatiale au départ de matériel virtuel.

Tableau 108 : Corrélation entre le score au test de rotation mentale (sur 16) et le score de visualisation spatiale (sur 20) au départ de représentations virtuelles à observer : coefficient de corrélation de Bravais-Pearson (r) et p-value

	G2 : obs. 2½D (N = 90)
ρ	0,286
<i>p-value</i>	0,006**

c. Risques de TDC

Comme l'ont indiqué les analyses antérieures (cf. 10.2.9), les scores obtenus aux tâches de visualisation s'avèrent supérieurs auprès des profils d'enfants et d'adolescents pour qui une absence de risque de TDC est observée quand les

représentations virtuelles utilisées dans la tâche de visualisation spatiale peuvent être manipulées. Pour autant, les tests inférentiels *U de Mann-Whitney* appliqués entre les scores des deux profils ont indiqué que la différence entre les deux profils n'est pas significative dans le groupe 1 ($U = 415,500$; $p\text{-value} = 0,621$). Le Tableau 109, qui présente les mêmes analyses mais menées cette fois sur le groupe 2, permet d'observer des résultats semblables. Malgré une même tendance, des résultats non significatifs apparaissent également dans le groupe 2 ($U = 279,500$; $p\text{-value} = 0,251$). Une absence d'impact de la présence de risque de TDC sur les performances de visualisation est donc observée quand l'habileté est évaluée au moyen de représentations 2 ½ D à manipuler et quand elle est évaluée au moyen de représentations 2 ½ D à observer.

Tableau 109 : Score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à observer chez les enfants/adolescents concernés ou non par un risque de TDC et comparaison : score moyen (sur 20), *U de Mann-Whitney* (*U*) et *p-value*

	G2 : obs. 2½D	
	Risque de TDC (N = 81)	Risque de TDC (N = 9)
Score (sur 20)	10,83	9,44
<i>U</i>	279,500	
<i>p-value</i>	0,251	

d. Habitudes et pratiques régulières

Des analyses sont ici menées pour comparer, dans le groupe 2, les scores de visualisation spatiale selon le profil des enfants et des adolescents vis-à-vis de différentes habitudes au moyen de tests *U de Mann-Whitney* (Tableau 110). Les résultats obtenus montrent que, pour toutes les habitudes investiguées excepté la pratique d'un sport, des différences non significatives sont observées aussi dans le groupe 2 entre les scores de visualisation spatiale obtenus chez les enfants et les adolescents pour qui l'habitude est observée et les scores de ceux chez qui elle ne l'est pas. Face à des représentations virtuelles d'objets 3D à manipuler, des résultats non significatifs avaient pu être observés pour toutes les habitudes (cf. 10.2.9).

Il semble donc que, excepté la pratique d'un sport, les habitudes investiguées n'impactent pas les capacités de visualisation spatiale dans les deux conditions.

De ce fait, le déséquilibre observé initialement entre les groupes par rapport à l'habitude relative aux jeux de construction, décrit dans la présentation de l'échantillon (cf. Annexe 18), ne semble pas pouvoir expliquer les écarts de capacité de visualisation spatiale entre groupes.

Tableau 110 : Score moyen de visualisation au départ de représentations virtuelles à observer chez les enfants/adolescents ayant ou non différentes pratiques régulières (plus d'une fois par semaine) et comparaison : score moyen (sur 20), U de Mann-Whitney (U) et p-value

		G2 : obs. 2½D (N = 90)	
		Régulier	Régulier
Utilisation des appareils tactiles	Score (sur 20)	9,43	10,80
	U	227,500	
	p-value	0,340	
Pratique des jeux vidéo	Score (sur 20)	10,91	10,55
	U	928,500	
	p-value	0,777	
Pratique des jeux de construction	Score (sur 20)	10,26	11,09
	U	898,500	
	p-value	0,363	
Pratique des jeux de type « puzzle »	Score (sur 20)	10,34	11,41
	U	693,500	
	p-value	0,098	
Pratique d'un sport	Score (sur 20)	8,33	11,16
	U	348,000	
	p-value	0,020**	
Pratique d'un instrument de musique	Score (sur 20)	10,54	11,50
	U	422,500	
	p-value	0,221	

e. Expérience en géométrie 3D

Le fait d'avoir déjà abordé la géométrie 3D engendre en moyenne des scores plus faibles en visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles qui ne sont pas manipulées par les participants (Tableau 111). Les analyses inférentielles (*U de Mann-Whitney*) menées permettent de confirmer que, dans ce groupe, une différence significative est observée entre les scores des participants ayant déjà abordé la géométrie 3D lors de l'année scolaire et les scores obtenus par ceux ne l'ayant pas encore fait. Il est donc possible de suspecter un effet de cette expérience sur les performances. Des résultats semblables ont par ailleurs pu être mis en évidence dans le groupe 1 (cf. 10.2.9) et la raison évoquée pour la justifier est similaire (les élèves n'ayant pas encore abordé la géométrie 3D sont issus principalement de classes des niveaux scolaires les plus élevés). De ce fait, il est possible d'observer une proximité par rapport à cette variable secondaire quelle que soit la place laissée à la manipulation.

Concernant le fait d'avoir déjà été confronté à la modalité de représentation des objets 3D à laquelle ils ont dû faire face lors des tâches de visualisation spatiale, le score moyen des enfants et des adolescents avec expérience est inférieur à celui des autres

dans le groupe 2. Les analyses inférentielles indiquent quant à elles que des différences significatives ne sont toutefois pas observées entre les scores des deux profils. Il est possible de considérer que, par rapport à cet aspect, l'expérience n'a pas d'impact sur les performances en visualisation puisque les scores des enfants et des adolescents avec et sans expérience sont statistiquement équivalents. Rappelons qu'au niveau du groupe 1, les analyses antérieures (cf. 10.2.9) ont mis en évidence des résultats significatifs par rapport à cette variable ($U = 351,000$; $p\text{-value} = 0,029$), avec un score moyen de visualisation plus élevé chez les élèves ayant déjà de l'expérience avec ce mode de représentation. Cet aspect de l'expérience des participants impacte donc différemment les capacités de visualisation quand celle-ci est mise en œuvre au départ de représentations virtuelles à manipuler et quand elle l'est au départ de représentations virtuelles ne pouvant qu'être observées.

Tableau 111 : Score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer chez les enfants/adolescents ayant ou non des expériences antérieures en lien avec la géométrie 3D et comparaison : score moyen (sur 20), U de Mann-Whitney (U) et p-value

		G2 : obs. 2½D (N = 90)	
		Non	Oui
Apprentissage de la géométrie 3D cette année scolaire	Score (sur 20)	11,40	8,61
	<i>U</i>	519,000	
	<i>p-value</i>	0,019*	
Expérience avec la modalité de présentation	Score (sur 20)	10,92	9,53
	<i>U</i>	447,500	
	<i>p-value</i>	0,211	
Résolution de tâches d'empreinte	Score (sur 5)	2,87	2,77
	<i>U</i>	918,500	
	<i>p-value</i>	0,692	
Résolution de tâches de coupe	Score (sur 15)	7,88	7,79
	<i>U</i>	749,500	
	<i>p-value</i>	0,697	

Pour ce qui est de l'expérience relative aux tâches d'empreinte, les analyses inférentielles montrent que dans le groupe 2, comme c'était le cas dans le groupe 1, les scores aux tâches d'empreinte des enfants et des adolescents ayant déjà été amenés à résoudre ce type de tâche auparavant sont statistiquement équivalents à ceux obtenus par les enfants et les adolescents sans cette expérience. Aucune différence significative n'est observée entre les scores des deux profils d'enfants et d'adolescents, et ce même si le score moyen apparaît légèrement plus élevé chez les participants avec expérience.

L'absence d'impact de cette composante de l'expérience en géométrie 3D est donc semblable dans les deux modalités de résolution de la tâche de visualisation.

Enfin, concernant l'expérience antérieure avec les exercices de coupe, une absence de différence significative est observée dans le deuxième groupe. Cette tendance est donc similaire à ce qui a préalablement pu être relevé dans le groupe 1. Le même constat peut être réalisé concernant une absence d'effet de l'expérience antérieure avec les exercices de coupe, aussi bien sur le score obtenu au départ de représentations virtuelles à manipuler que sur celui obtenu au départ de représentations virtuelles observées uniquement.

f. Capacités de perception visuelle des objets 3D

Comme l'illustre le

Tableau 112, les scores moyens de visualisation obtenus à chaque objet 3D sont plus élevés quand l'objet 3D est perçu adéquatement. Pour autant, les différences de scores ne sont pas significatives pour tous les objets au vu des résultats obtenus aux tests *U de Mann-Whitney* appliqués. Elles le sont uniquement pour la sphère dans le deuxième groupe.

Tableau 112 : Score moyen de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer par objet 3D chez les enfants/adolescents ayant ou non perçu adéquatement l'objet 3D : score moyen (sur 4), U de Mann-Whitney (U) et p-value

Perception adéquate de l'objet 3D		G2 : obs. 2½D (N = 90)	
		non	oui
Cube	Score (sur 4)	2,41	2,51
	<i>U</i>	866,000	
	<i>p-value</i>	0,863	
Cône	Score (sur 4)	2,25	2,53
	<i>U</i>	727,000	
	<i>p-value</i>	0,205	
Sphère	Score (sur 4)	1,48	2,33
	<i>U</i>	497,000	
	<i>p-value</i>	0,021*	
Cylindre	Score (sur 4)	2,08	2,37
	<i>U</i>	817,500	
	<i>p-value</i>	0,180	
Anneau	Score (sur 4)	1,30	1,40
	<i>U</i>	700,500	
	<i>p-value</i>	0,481	

10.3.10. Discussion spécifique à la question 2.2° : la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles, une habileté non impactée par la place accordée à la manipulation

L'influence de l'exploration active (manipulation par l'individu) des stimuli tridimensionnels représentés virtuellement sur les capacités d'adultes à mener ensuite des opérations mentales sur les objets préalablement présentés ne semble pas faire consensus. Meijer et Van den Broek (2010) identifient une absence de différence entre les explorations dites physiquement « passive » et « active » des objets 3D. James *et al.* (2001) soulignaient quant à eux l'impact positif de l'exploration active des stimuli.

Cette exploration, même si elle ne permet pas l'obtention d'informations haptiques des objets et bien qu'elle occasionne même un conflit multisensoriel (Krylova & Vodyakha, 2022), permet de mieux gérer le caractère transitoire des informations présentées (Schnotz & Lowe, 2008) en pouvant choisir les positions dans lesquelles les stimuli sont présentés. Pour autant, Sanandaji *et al.* (2017) suggèrent quant à eux que la manipulation des stimuli dans l'environnement virtuel pourrait aussi impacter négativement la résolution d'exercices tels que ceux de coupe. L'individu, notamment s'il est inexpérimenté avec ce type d'environnement, pourrait se perdre dans la réalisation des actions de manipulation réalisées, notamment pour des raisons déjà évoquées de difficulté de coordination entre gestes en 2D sur l'écran et de rotation dans l'espace 3D. Ces difficultés pourraient alors complexifier la mise en œuvre d'opérations mentales sur les objets 3D.

Pour ce qui est des enfants et des adolescents, aucune recherche n'a, à notre connaissance, évalué cette possible influence. Les résultats obtenus tendent plutôt à se rapprocher des conclusions de Meijer et Van den Broek (2010). En effet, la manipulation, par l'individu, des objets 3D représentés virtuellement ne semble globalement pas permettre d'influencer le niveau de maîtrise de la visualisation dans l'environnement virtuel pour les exercices proposés. Les scores moyens observés sur l'ensemble de l'échantillon et à chacune des tranches d'âge sont proches entre les deux groupes. Ces résultats permettent de montrer, dans les deux cas, une maîtrise majoritairement partielle de l'habileté marquée par de fortes différences individuelles. Ils confirment donc à nouveau que la plupart des enfants âgés de 8 ans sont capables de faire preuve de visualisation spatiale (Duroisin, 2015), mais que ces derniers n'arrivent majoritairement pas à mettre en œuvre toutes les opérations mentales sur les objets 3D. Ils montrent également que cette capacité à mettre en œuvre des

opérations mentales augmente avec l'âge aussi face à des représentations virtuelles à observer et que les écarts entre individus tendent à diminuer avec l'âge, même si la plupart des adolescents âgés de 14 à 15 ans sont encore confrontés à des difficultés pour mettre en place certaines opérations mentales plus complexes. Au-delà de ces grandes tendances communes constatées dans les deux groupes sur les scores totaux, des proximités sont aussi observées entre les deux modalités au niveau des scores relatifs à chaque objet 3D et à chaque type d'opération mentale, que ce soit sur l'ensemble du public cible ou à chaque tranche d'âge. On relève ainsi, dans les deux modalités la présence de différences dans les capacités de visualisation entre les objets 3D et entre les types d'exercice, que ce soit pour l'échantillon total ou à chaque tranche d'âge, mais aussi les difficultés plus importantes associées à l'anneau ou aux coupes obliques. Enfin, la prise en compte de chaque exercice permet elle aussi de relever que le taux de réussite de chacun d'eux est indépendant de la place accordée à la manipulation dans l'environnement virtuel. On retrouve ainsi à nouveau certaines difficultés marquées concernant l'identification des empreintes de la sphère et de l'anneau mais aussi de la plupart des coupes obliques. Un tel résultat suggère donc que le fait d'autoriser l'observation de la vue du dessous de l'objet 3D, ce qui est possible avec les représentations manipulables mais qui n'est pas présent dans les représentations non manipulables (vidéo à observer), n'occasionne pas de résultats supérieurs aux exercices d'empreinte. De nombreuses similarités sont aussi relevées par rapport aux erreurs types commises par les enfants dans les deux modalités, même si les pourcentages qui leur sont associés varient parfois. Enfin, des résultats semblables sont aussi observés au niveau des variables secondaires. C'est le cas pour l'absence d'effet du genre et du risque de TDC, pour l'absence d'effet pour la plupart des habitudes investiguées et de l'expérience antérieure avec les exercices de coupe et empreinte, pour la présence ou l'absence d'effet de la perception sur les performances en visualisation spatiale pour la plupart des objets, ou encore pour la présence d'un lien entre perception et rotation mentale. En revanche, le fait d'avoir déjà été confronté à des vidéos d'objets 3D en rotation ne semble pas impacter les performances, contrairement à ce qui a pu être identifié face aux représentations virtuelles manipulables.

Pour ces nombreux éléments observés dans le deuxième groupe, qui apparaissent donc similaires à ceux mis en évidence dans le premier, nous renvoyons le lecteur vers les éléments de discussion mis en avant par rapport aux résultats obtenus dans le

premier groupe (cf. 10.2.10). Ceux-ci permettront ainsi une mise en relation avec les résultats d'études antérieures ou une interprétation des résultats obtenus (par exemple des erreurs types observées).

Cette proximité observée entre les deux modalités, en plus de paraître alignée avec les observations de Meijer et Van den Broek (2010), rejoint également les observations de Keehner *et al.* (2004) qui ont aussi observé une absence d'effet de la manipulation sur les capacités de visualisation spatiale évaluées au départ de représentations virtuelles chez les adultes. Les résultats obtenus incitent donc à élargir ce constat observé chez les enfants et les adolescents également.

Pour autant, les caractéristiques des représentations virtuelles utilisées sont, comme pour l'étude de l'habileté de perception visuelle de la 3D, susceptibles d'avoir favorisé cette proximité des résultats. D'une part, l'utilisation d'un environnement virtuel simple, dans lequel les manipulations sont limitées, est susceptible d'avoir permis d'éviter les résultats en défaveur de la manipulation identifiés par Sanandaji *et al.* (2017). Cela est d'autant plus vrai que les participants avaient déjà été initiés à l'utilisation de l'environnement virtuel, notamment au travers des exercices de perception de la 3D réalisés préalablement. Ils ont donc tous une expérience avec ce dernier. D'autre part, le fait que les représentations virtuelles non manipulables ont montré l'objet 3D (et le couteau pour les exercices de coupe) vu de face, du dessus et du côté a sans doute également participé à l'obtention d'un score proche de celui obtenu au départ de représentations virtuelles manipulables et non d'un score plus faible comme James *et al.* (2001) l'ont observé. En effet, si ces vues étaient décrites par les auteurs comme cruciales pour reconnaître l'objet 3D, elles le sont aussi sans doute pour opérer mentalement sur lui et notamment pour repérer correctement la position du couteau par rapport à l'objet lors des exercices de coupe. De ce fait, il est possible de suspecter que la proximité constatée soit inhérente aux choix des vidéos présentées et que des performances différentes auraient pu être observées si ces vidéos ne montraient pas ces vues cruciales. Vérifier cela pourrait constituer un prolongement à l'étude ici menée afin d'investiguer les éléments à observer qui favorisent la réussite des exercices de visualisation.

10.4. Réponse à la question de recherche 2.3° : Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes

Si, en apportant des éléments de réponse à la question 2.2°, les groupes 1 et 2 viennent d'être comparés, il s'agit désormais de comparer les résultats de ces deux groupes, tous deux confrontés à des représentations virtuelles, avec ceux du groupe 5, confronté à des représentations planes. De ce fait, il s'agit d'identifier si la maîtrise des exercices de visualisation spatiale est équivalente au départ de représentations virtuelles et planes.

10.4.1. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes (toutes tranches d'âge confondues)

Si une proximité a pu être précédemment observée entre les groupes 1 et 2, que ce soit au niveau des scores moyens, mais aussi au niveau des écarts entre individus, la comparaison de ces deux groupes avec le groupe 5 permet de mettre en évidence quelques divergences. En moyenne, les enfants et les adolescents du groupe 5 réussissent moins de la moitié des exercices (9,62 sur 20), alors que, face à des représentations virtuelles, plus de la moitié des exercices sont réussis (10,45 sur 20 pour le groupe 1 et 10,69 sur 20 pour le groupe 2). Pour autant, au vu de ce score, il semble possible de considérer que la maîtrise de l'habileté est partielle face à des représentations planes, comme face à des représentations virtuelles.

Au niveau de la répartition des scores (Figure 42), les écarts entre participants au sein des groupes sont plus élevés face à des représentations virtuelles que face à des représentations planes, ce que confirment les écarts types qui sont respectivement de 4,734, 4,234 et 4,001. Le score minimal est de 2 sur 20 face à des représentations planes alors qu'il est plus faible dans les groupes 1 et 2. À l'inverse, le score maximal apparaît lui plus faible puisqu'il vaut 18 dans le groupe 5 alors qu'il valait 19 dans les groupes 1 et 2. Il n'en reste pas moins que, comme face à des représentations virtuelles, des écarts importants sont observés entre les participants face à des représentations planes. La valeur de la médiane du groupe confronté à des représentations planes est également plus faible que celle observée dans le groupe confronté à des représentations virtuelles. Si 50% des participants ont un score supérieur ou égal à 12 sur 20 face à des représentations virtuelles, ils sont 50% à avoir un score supérieur à 10 sur 20 face à des représentations planes.

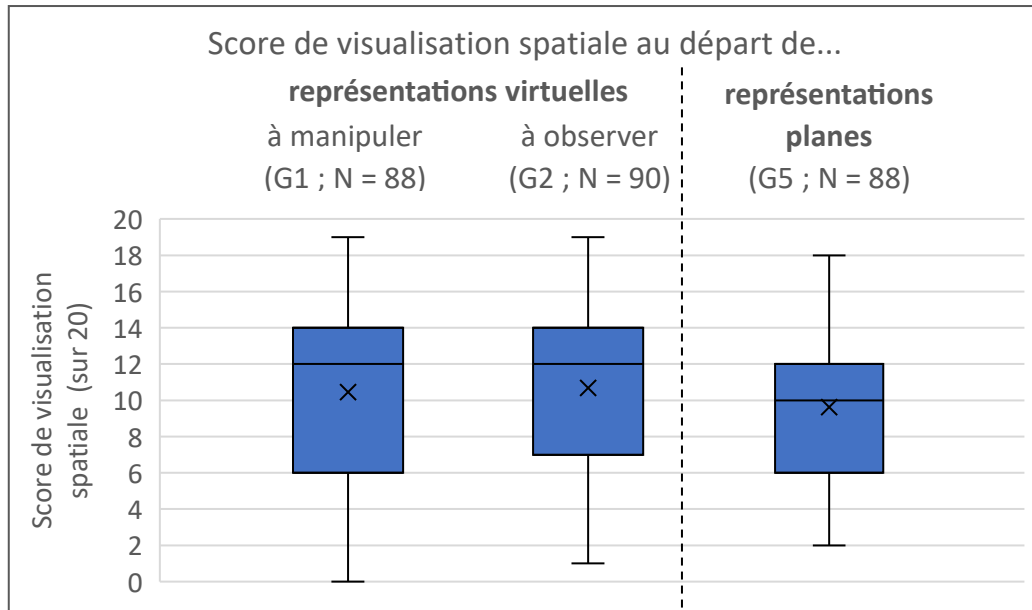


Figure 42 : Répartition du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes

Les tests *U de Mann-Whitney* appliqués pour vérifier le caractère significatif ou non de ces différences indiquent que des différences significatives sont observées entre le score obtenu par les groupes 2 et 5 ($U = 3252,000$; $p\text{-value} = 0,039$). En revanche, les différences entre le groupe 1 et le groupe 5 sont non significatives ($U = 3324,500$; $p\text{-value} = 0,104$). Cela signifie que les enfants et les adolescents n'arrivent pas forcément à faire preuve de visualisation spatiale au départ de représentations 2D comme au départ de représentations 2 ½ D, tout au moins dans certaines conditions.

10.4.2. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes selon l'âge

La Figure 43 présente l'évolution des scores moyens par tranche d'âge dans les groupes 1, 2 et 5 ainsi que la répartition des scores à chacune d'elles. Dans ce graphique, il apparaît que le score moyen obtenu dans le groupe 5 s'avère inférieur à celui observé dans les groupes 1 et 2 à toutes les tranches d'âge sauf à la deuxième tranche d'âge (10-11 ans). À cette tranche d'âge, le score moyen est légèrement plus élevé que celui observé à la même tranche d'âge dans les deux autres groupes. De plus, à cette tranche d'âge, les scores moyens semblent moins dispersés dans le groupe 5 que dans les deux autres groupes.

Par ailleurs, face à des représentations virtuelles, le score moyen de visualisation augmente d'une tranche d'âge à la suivante, ce qui n'est pas systématiquement le cas

face à des représentations planes. En effet, si le score moyen passe de 6,55 à 10,13 sur 20 entre les deux premières tranches, ce dernier diminue ensuite pour atteindre la note de 9,14 avant d'augmenter à la dernière tranche d'âge pour atteindre 12,81. Pour autant, malgré cette baisse entre la deuxième et la troisième tranche d'âge, la valeur du coefficient de corrélation de Bravais-Pearson calculé entre le score moyen et l'âge au sein du groupe 5 atteint une valeur de 0,448 ce qui permet de qualifier la corrélation de positive et forte entre l'âge et la maîtrise de la visualisation spatiale au départ de représentations planes. Cet indice est donc proche de celui observé aux représentations virtuelles à manipuler ($r = 0,449$) et est un peu plus faible que celui obtenu face aux représentations virtuelles à observer ($r = 0,505$). Les q de Cohen calculés, valant respectivement 0,001 et 0,074, permettent tous deux de statuer sur l'absence d'un effet du groupe sur le lien entre capacité de visualisation et âge. La manière dont la capacité de visualisation spatiale évolue avec l'âge peut donc être considérée comme similaire quand les tâches sont proposées au départ de représentations 2 ½ D et 2D. Dans tous les cas, une corrélation forte est observée.

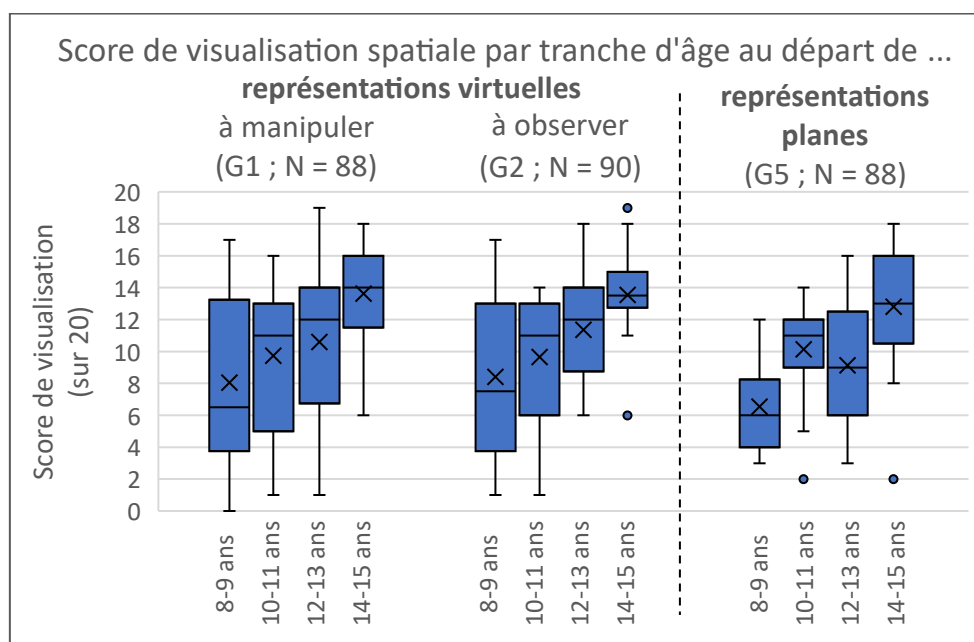


Figure 43 : Évolution des répartitions du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes

L'analyse des répartitions permet par ailleurs de pointer une même tendance, pour la médiane, que ce qui a été observé pour la moyenne. En effet, la médiane obtenue dans les deux premiers groupes augmente d'une tranche d'âge à la suivante, ce qui n'est pas le cas dans le groupe 5. Aussi, il apparaît que les scores maximaux obtenus

dans le groupe 5, tout comme les troisièmes quartiles, sont toujours inférieurs ou égaux à ceux obtenus dans les groupes 1 et 2. Les scores minimaux obtenus sont quant à eux supérieurs à ceux des deux premiers groupes pour les deux premières tranches d'âge, mais pas nécessairement pour les suivantes. Ainsi, l'étendue est plus faible aux deux premières tranches dans le groupe 5 en comparaison aux deux autres groupes.

Malgré la présence d'une différence entre le groupe 2 et le groupe 5 sur l'ensemble du public cible, des résultats non significatifs sont observés aux tests *U de Mann-Whitney* appliqués pour comparer les scores de ces groupes à chacune des tranches d'âge (Tableau 113). Notons cependant qu'un résultat à la limite de la significativité est observé à la troisième tranche d'âge ($U = 165,000$; $p\text{-value} = 0,070$).

Entre le score du groupe 1 et celui du groupe 5, des différences non significatives sont aussi observées à toutes les tranches d'âge. Le constat relatif à l'absence de différence entre ces deux groupes sur l'ensemble du public cible peut donc être généralisé à l'ensemble des tranches d'âge.

Tableau 113 : Comparaison des scores de visualisation (sur 20) entre G1 et G5 et entre G2 et G5 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p) associé

	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
G1-G5	$U = 210,500$ $p = 0,457$	$U = 264,500$ $p = 1,000$	$U = 191,000$ $p = 0,230$	$U = 195,500$ $p = 0,527$
G2-G5	$U = 200,000$ $p = 0,322$	$U = 274,500$ $p = 0,974$	$U = 165,000$ $p = 0,070$	$U = 209,500$ $p = 0,599$

10.4.3. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes selon l'objet 3D

Les résultats des tests *U de Mann-Whitney* (Tableau 114) appliqués pour comparer le score par objet 3D entre les groupes indiquent une différence significative uniquement pour le score relatif à la sphère, que ce soit entre le groupe 1 et le groupe 5 ($U = 3149,500$; $p\text{-value} = 0,026$) et entre le groupe 2 et le groupe 5 ($U = 3241,000$; $p\text{-value} = 0,028$). Une $p\text{-value}$ à la limite de la significativité est par ailleurs observée pour le cube ($U = 3336,500$; $p\text{-value} = 0,053$) lors de la comparaison entre le groupe 2 et le groupe 5. Il apparaît donc que, pour la majorité des objets 3D, les enfants et les adolescents arrivent à faire preuve de visualisation spatiale au départ des représentations 2 ½ D comme au départ de représentations 2D. Seule la sphère semble échapper à cette règle. Pour cet objet, un score moyen plus élevé est obtenu au départ de représentations virtuelles. Celui-ci vaut 2,13 sur 4 dans les deux premiers groupes

alors qu'il atteint 1,66 dans le groupe 5. Ce score reste cependant plus élevé que celui constaté pour l'anneau (1,19 sur 4), ce qui fait de ce dernier objet 3D celui posant le plus de difficulté dans les deux modalités.

Tableau 114 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G5 et entre G2 et G5 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)

	Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
G1-G5	$U = 3396,000$ $p = 0,135$	$U = 3850,500$ $p = 0,947$	$U = 3149,500$ $p = \mathbf{0,026^*}$	$U = 3488,000$ $p = 0,240$	$U = 3825,000$ $p = 0,882$
G2-G5	$U = 3336,500$ $p = 0,053$	$U = 3953,500$ $p = 0,984$	$U = 3241,000$ $p = \mathbf{0,028^*}$	$U = 3707,000$ $p = 0,444$	$U = 3597,500$ $p = 0,254$

10.4.4. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes selon le type d'exercice

Comme en prenant en considération les scores par objet 3D, une analyse inférentielle comparative est proposée au niveau des scores de perception adéquate obtenus dans le groupe 5 et dans les groupes 1 et 2 afin de statuer sur les différences de scores entre les modalités pour chaque type d'exercice. Pour ce faire, des tests *U de Mann-Whitney* sont à nouveau utilisés (Tableau 115). Les résultats de ces tests indiquent que des différences significatives sont observées uniquement pour un type d'exercice : les coupes longitudinales. Cette différence est présente à la fois lorsque le groupe 1 et le groupe 5 sont comparés ($U = 3184,000$; $p\text{-value} = 0,039$) et lorsque le groupe 2 et le groupe 5 sont comparés ($U = 2962,000$; $p\text{-value} = 0,003$) et s'inscrit, dans les deux cas, en faveur des groupes confrontés à des représentations 2 ½ D. Excepté pour ce type d'exercice, les résultats obtenus au départ de représentations planes et virtuelles sont statistiquement équivalents. Les scores obtenus pour les coupes transversales indiquent un score moyen plus faible dans le groupe 5 (2,05 sur 5) que dans les autres groupes (2,61 et 2,79 sur 5). Malgré cela, le score plus faible reste, dans les trois groupes, celui associé aux coupes obliques, qui n'excède jamais 1,52 sur 5.

Tableau 115 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G5 et entre G2 et G5 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)

	Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
G1-G5	$U = 3470,000$ $p = 0,882$	$U = 3850,500$ $p = 0,948$	$U = 3184,000$ $p = \mathbf{0,039^*}$	$U = 3670,500$ $p = 0,537$
G2-G5	$U = 3707,000$ $p = 0,418$	$U = 3745,500$ $p = 0,518$	$U = 2962,000$ $p = \mathbf{0,003^{**}}$	$U = 3657,000$ $p = 0,360$

10.4.5. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes selon l'âge et l'objet 3D

Les tests U de Mann-Whitney (Tableau 116) utilisés pour comparer les scores obtenus pour chaque objet 3D indiquent que des différences significatives n'apparaissent à aucune tranche entre les groupes 1 et 5, même si une différence à la limite de la significativité est observée pour la sphère à la première tranche d'âge ($U = 174,000$; p -value = 0,068). Le constat relatif à l'absence de différence entre les deux groupes aux différentes tranches d'âge peut donc être considéré pour chaque objet 3D.

Tableau 116 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G5 et entre G2 et G5 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p -value (p)

		Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
G1-G5	8-9 ans	$U = 218,000$ $p = 0,554$	$U = 236,00$ $p = 0,885$	$U = 174,000$ $p = 0,068$	$U = 199,000$ $p = 0,299$	$U = 239,000$ $p = 0,937$
	10-11 ans	$U = 210,500$ $p = 0,198$	$U = 217,000$ $p = 0,269$	$U = 241,000$ $p = 0,576$	$U = 221,500$ $p = 0,325$	$U = 253,500$ $p = 0,793$
	12-13 ans	$U = 205,000$ $p = 0,362$	$U = 180,500$ $p = 0,132$	$U = 200,000$ $p = 0,304$	$U = 193,000$ $p = 0,231$	$U = 238,500$ $p = 0,927$
	14-15 ans	$U = 212,000$ $p = 0,817$	$U = 207,000$ $p = 0,709$	$U = 166,000$ $p = 0,144$	$U = 188,500$ $p = 0,395$	$U = 217,000$ $p = 0,926$
G2-G5	8-9 ans	$U = 180,500$ $p = 0,126$	$U = 241,000$ $p = 0,981$	$U = 155,000$ $p = 0,023^*$	$U = 229,000$ $p = 0,752$	$U = 193,500$ $p = 0,194$
	10-11 ans	$U = 252,500$ $p = 0,594$	$U = 187,000$ $p = 0,044^*$	$U = 267,500$ $p = 0,846$	$U = 248,000$ $p = 0,532$	$U = 272,000$ $p = 0,924$
	12-13 ans	$U = 183,500$ $p = 0,140$	$U = 208,500$ $p = 0,414$	$U = 161,500$ $p = 0,052$	$U = 181,000$ $p = 0,129$	$U = 204,500$ $p = 0,326$
	14-15 ans	$U = 224,500$ $p = 0,864$	$U = 211,000$ $p = 0,596$	$U = 207,500$ $p = 0,522$	$U = 222,000$ $p = 0,816$	$U = 214,500$ $p = 0,667$

Entre le groupe 2 et le groupe 5, deux différences significatives émergent et ne concernent ni le même objet 3D, ni la même tranche d'âge : la première concerne le score de la sphère et a lieu à la première tranche d'âge ($U = 155,000$; p -value = 0,023). Le score apparaît plus faible obtenu face aux représentations planes (0,55 sur 4) que face aux représentations virtuelles (1,36 dans le groupe 1 et 1,41 dans le groupe 2). Notons qu'une différence à la limite de la significativité est aussi observée pour cet objet 3D à la troisième tranche d'âge ($U = 161,500$; p -value = 0,052), avec à nouveau un score plus faible face aux représentations planes. La seconde différence significative concerne le cône à la deuxième tranche d'âge ($U = 155,000$; p -value = 0,023). Le score apparaît en revanche cette fois plus élevé au départ de représentations 2D (2,70 sur 4) qu'au départ de représentations virtuelles à observer (2,17 sur 4). Au vu de ces deux

résultats significatifs, il s'agit par conséquent de ne pas généraliser à chaque objet 3D le constat relatif à l'absence de différence de visualisation précédemment mis en évidence à chaque tranche d'âge. Il en est de même concernant le cas des différences observées pour la sphère qui ne peuvent être généralisées à toutes les tranches d'âge.

Malgré les quelques résultats significatifs, il est possible de conclure que, pour la majorité des objets 3D et à la plupart des tranches d'âge, les enfants et les adolescents sont capables de résoudre les tâches de visualisation spatiale proposées au départ de représentations 2 ½ D comme au départ de représentations planes.

Les coefficients de corrélation (Tableau 117) calculés entre les scores et l'âge en jour (*corrélation de Spearman*) révèlent l'existence d'un lien positif entre ces deux variables pour chacun des objets 3D. Si ce lien positif apparaît faible pour le cylindre et le cube, il apparaît modéré pour le cône et fort pour l'anneau et la sphère. Comme cela a pu être observé au départ de représentations 2 ½ D, les capacités de visualisation spatiale augmentent aussi avec l'âge au départ de représentations 2D pour chaque objet 3D.

Tableau 117 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par objet (sur 4) au départ de représentations virtuelles et planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p -value (p)

	Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
G1 : manip. 2½D (N = 88)	$\rho = 0,215$ $p = 0,044^*$	$\rho = 0,446$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,372$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,284$ $p = 0,007^{**}$	$\rho = 0,425$ $p < 0,001^{**}$
G2 : obs. 2½D (N = 90)	$\rho = 0,222$ $p = 0,036^*$	$\rho = 0,451$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,412$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,441$ $p = 0,007^{**}$	$\rho = 0,388$ $p < 0,001^{**}$
G5 : obs. 2D (N = 88)	$\rho = 0,229$ $p = 0,032^*$	$\rho = 0,337$ $p = 0,001^{**}$	$\rho = 0,415$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,258$ $p = 0,015^*$	$\rho = 0,491$ $p < 0,001^{**}$

10.4.6. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes selon l'âge et le type d'exercice

Les résultats des tests *U de Mann-Whitney*, présentés au sein du Tableau 118, indiquent qu'à chacune des tranches d'âge, aucune différence significative n'est observée entre représentations virtuelles et planes concernant les types d'exercice suivants : empreinte, coupe transversale et coupe oblique. Les différences significatives entre les groupes confrontés à des représentations virtuelles et planes ne concernent donc que les exercices de type « coupe longitudinale » et ne s'observent qu'à certaines tranches d'âge. Ces résultats apparaissent à la première tranche d'âge quand les groupes 2 et 5 sont comparés ($U = 130,000$; p -value = 0,006) et à la troisième tranche

d'âge quand les groupes 1 et 5 ($U = 148,500$; $p\text{-value} = 0,025$) et les groupes 2 et 5 ($U = 112,000$; $p\text{-value} = 0,002$) sont comparés.

De ce fait, les différences au niveau des exercices de type « coupe longitudinale » mises en évidence sur l'ensemble du public cible entre les deux modalités de présentation doivent être nuancées puisqu'elles ne s'observent pas à toutes les tranches d'âge. Notons par ailleurs que, dans chaque cas où une différence significative est observée, les scores moyens sont plus faibles dans le groupe 5. Toujours pour ce type d'exercice, des différences à la limite de la significativité sont en outre observées à la première tranche d'âge entre les groupes 1 et 5 ($U = 167,000$; $p\text{-value} = 0,068$). Entre ces deux groupes, une différence proche du seuil de significativité est aussi observée à la dernière tranche d'âge pour le cas des coupes obliques ($U = 154,500$; $p\text{-value} = 0,084$).

Tableau 118 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G5 et entre G2 et G5 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)

		Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
G1-G5	8-9 ans	$U = 176,000$ $p = 0,101$	$U = 219,500$ $p = 0,590$	$U = 167,000$ $p = 0,068$	$U = 223,500$ $p = 0,644$
	10-11 ans	$U = 254,000$ $p = 0,792$	$U = 231,500$ $p = 0,450$	$U = 233,500$ $p = 0,488$	$U = 209,500$ $p = 0,198$
	12-13 ans	$U = 234,500$ $p = 0,388$	$U = 232,500$ $p = 0,818$	$U = 148,500$ $p = 0,025^*$	$U = 227,000$ $p = 0,718$
	14-15 ans	$U = 189,000$ $p = 0,388$	$U = 214,500$ $p = 0,862$	$U = 218,500$ $p = 0,958$	$U = 154,500$ $p = 0,084$
G2-G5	8-9 ans	$U = 234,500$ $p = 0,852$	$U = 235,500$ $p = 0,876$	$U = 130,000$ $p = 0,006^{**}$	$U = 201,000$ $p = 0,309$
	10-11 ans	$U = 257,500$ $p = 0,639$	$U = 241,500$ $p = 0,445$	$U = 259,000$ $p = 0,712$	$U = 263,500$ $p = 0,780$
	12-13 ans	$U = 229,000$ $p = 0,746$	$U = 203,000$ $p = 0,342$	$U = 112,000$ $p = 0,002^{**}$	$U = 226,000$ $p = 0,699$
	14-15 ans	$U = 218,500$ $p = 0,725$	$U = 223,000$ $p = 0,824$	$U = 209,000$ $p = 0,577$	$U = 209,500$ $p = 0,584$

Les indices de *corrélation de Spearman* calculés entre les scores de chaque exercice et l'âge en jour sont présentés au sein du Tableau 119. Ces derniers permettent d'identifier qu'une corrélation positive est observée pour tous les types d'exercice au départ de représentations planes. Comme cela peut être mis en évidence au départ de représentations virtuelles, la corrélation la plus faible se rapporte aux exercices d'empreinte. Pour ce type d'exercice, la corrélation peut être qualifiée de positive mais faible ($\rho = 0,245$). Pour les trois autres types d'exercice, les corrélations calculées peuvent être qualifiées de positives et modérées.

Tableau 119 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par type d'exercice (sur 5) au départ de représentations virtuelles et planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)

	Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
G1 : manip. 2½D (N = 88)	$\rho = 0,120$ $p = 0,265$	$\rho = 0,445$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,353$ $p = 0,001^{**}$	$\rho = 0,439$ $p < 0,001^{**}$
G2 : obs. 2½D (N = 90)	$\rho = 0,293$ $p = 0,005^{**}$	$\rho = 0,391$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,431$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,367$ $p < 0,001^{**}$
G5 : obs. 2D (N = 88)	$\rho = 0,245$ $p = 0,022^*$	$\rho = 0,397$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,390$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,342$ $p = 0,001^{**}$

10.4.7. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes selon le type d'exercice et l'objet 3D (résultats par exercice)

10.4.7.1. Analyses des taux de réussite

Compte tenu des écarts parfois importants observés entre certains objets 3D, mais aussi entre certains types d'exercice, que ce soit face à des représentations planes ou virtuelles, il apparaît légitime de se placer dans une perspective comparative pour chacun des exercices proposés. La Figure 44 présente les taux de réussite associés à chacun des exercices au départ de ces deux modalités, toutes tranches d'âge confondues. Celle-ci indique que les taux de réussite observés dans le groupe 5 ne sont pas systématiquement inférieurs à ceux recensés dans les groupes 1 et 2. Les taux sont d'ailleurs la plupart du temps proches dans les trois modalités. Les écarts les plus importants semblent concerner l'exercice de coupe longitudinale de la sphère, du cylindre, du cube, ou encore de coupe oblique de l'anneau, pour lesquels des écarts qui avoisinent les 20% sont observés.

Cette proximité des taux permet par ailleurs de relever que les fortes différences constatées entre les exercices dans les deux premiers groupes sont aussi présentes dans le groupe 5. D'ailleurs, les mêmes tendances sont identifiées dans les trois groupes au sujet des exercices qui semblent poser le plus de difficultés (ex. coupe oblique de l'anneau et du cube, empreinte de l'anneau et de la sphère) et au sujet de ceux en posant le moins (ex. empreinte du cube, du cône et du cylindre). Par ailleurs, comme face à des représentations virtuelles, des différences entre objets sont constatées pour chaque type d'exercice. À titre d'illustration, dans les trois groupes, les scores aux différents exercices d'empreinte varient entre les objets. Ils sont plus faibles pour la sphère et l'anneau et plus élevés pour le cube, le cylindre ou le cône. Dans la même logique, des différences significatives sont également observées, dans les trois groupes,

entre les quatre types d'exercice pour chacun des objets 3D. Ainsi, on observe par exemple, dans les trois groupes, que pour les exercices portant sur l'anneau, des différences importantes apparaissent entre les exercices d'empreinte, de coupe oblique et de coupe longitudinale, qui sont peu réussis, et l'exercice de coupe transversale, qui pose lui moins de difficultés.

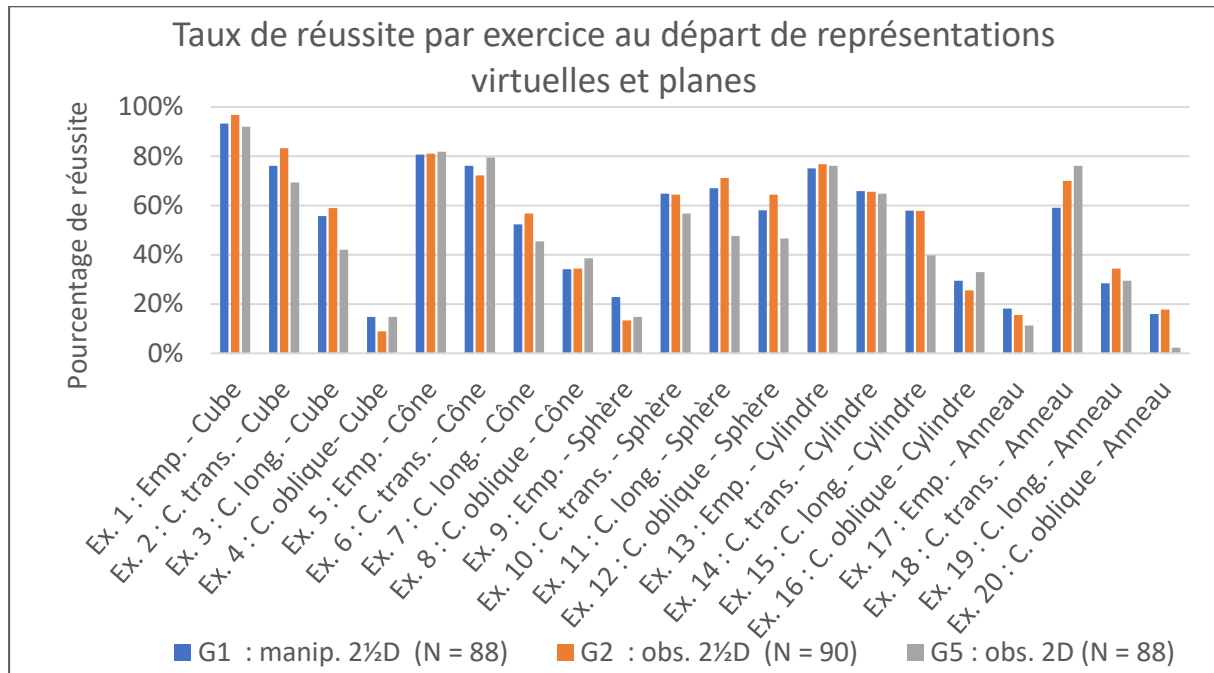


Figure 44 : Taux de réussite à chaque exercice de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes

En vue de statuer sur les proximités et écarts parfois plus importants observés entre le groupe 5 et les deux autres groupes, des tests du Khi-carré (ou des tests exacts de Fisher, quand les conditions d'application du premier ne sont pas respectées) sont appliqués entre les groupes 1 et 5 et entre les groupes 2 et 5. Ceux-ci permettent d'identifier si les taux de réussite de chaque exercice sont dépendants ou non de la dimensionnalité des supports pour les représentations planes et virtuelles. Les résultats de ces tests sont placés en annexe (Annexe 42). Ils permettent de relever qu'entre les groupes 1 et 5, des résultats significatifs sont obtenus pour quatre des vingt exercices : la coupe longitudinale de la sphère ($\chi^2 = 6,715$; $p\text{-value} = 0,010$) et du cylindre ($\chi^2 = 5,821$; $p\text{-value} = 0,016$), la coupe transversale de l'anneau ($\chi^2 = 5,838$; $p\text{-value} = 0,016$) et la coupe oblique de l'anneau ($\chi^2 = 9,900$; $p\text{-value} = 0,002$). Excepté pour le cas de la coupe transversale de l'anneau, les taux de réussite s'avèrent en faveur du groupe confronté à des représentations virtuelles. Pour les seize autres exercices,

Réponse à la question 2.3° (Étude 2)

les résultats sont non significatifs, même s'ils sont proches du seuil de significativité pour l'un d'eux.

Concernant la comparaison des groupes 2 et 5, un résultat significatif est observé pour six des vingt exercices. Comme pour la paire de groupes précédente, c'est le cas de la coupe longitudinale de la sphère ($\chi^2 = 10,100$; $p\text{-value} = 0,001$) et du cylindre ($\chi^2 = 5,773$; $p\text{-value} = 0,016$) et de la coupe oblique de l'anneau ($\chi^2 = 11,768$; $p\text{-value} = 0,001$). En outre, c'est aussi le cas de la coupe transversale du cube ($\chi^2 = 4,848$; $p\text{-value} = 0,028$) et de sa coupe longitudinale ($\chi^2 = 5,505$; $p\text{-value} = 0,025$), et enfin de la coupe oblique de la sphère ($\chi^2 = 5,747$; $p\text{-value} = 0,017$). Pour tous ces exercices, les taux de réussite sont plus faibles dans le groupe 5. Tous ces résultats obtenus invitent à nuancer les résultats des analyses inférentielles comparatives menées en prenant en considération séparément la variable « type d'exercice » ou la variable « objets 3D ». En effet, entre représentations 2 ½ D et 2D, tous les exercices de coupe longitudinale ne sont pas concernés, ni tous les exercices se rapportant à la sphère. De plus, une dépendance est observée pour des exercices relatifs à d'autres objets 3D (ex. cube) et appartenant à d'autres types d'exercice (ex. coupe transversale). Malgré tout, pour une grande partie des exercices de visualisation proposés, la réussite apparaît indépendante de la dimensionnalité du support utilisé, quand on compare les représentations virtuelles et planes.










10.4.7.2. Analyses des erreurs types

Au-delà des taux de réussite, les erreurs types récurrentes commises par les enfants et les adolescents peuvent également être présentées puisqu'elles peuvent participer à la compréhension des difficultés à agir mentalement sur l'objet 3D. On y retrouve des similitudes entre les erreurs commises au départ de représentations planes et virtuelles, mais également quelques divergences.

Les erreurs types principales relatives au cube sont recensées dans le Tableau 120. Concernant l'empreinte du solide, les résultats permettent d'identifier une erreur type qui émerge dans le groupe 5, auprès de 5,7% des participants, alors que celle-ci n'était commise que par un ou deux d'entre eux face aux représentations virtuelles : un rectangle. Pour l'exercice de coupe transversale du cube, le dessin d'un rectangle est la seule erreur qui se distingue dans les trois groupes, même si sa fréquence apparaît plus importante face à la représentation 2D (25,0%) que face aux représentations 2 ½ D (< 17,0%). Cette même erreur type est la seule qui ressort également de l'exercice de

coupe longitudinale, avec ce même constat de fréquence plus élevée dans le groupe 5 (54,5%) que dans les autres groupes (< 38,0%). Enfin, concernant sa coupe oblique, la même erreur type domine les différents groupes : un carré. Celle-ci est commise par plus de 3 participants sur 10. Si le dessin d'un triangle rectangle et d'un trapèze rectangle sont observées également face à des représentations virtuelles avec des fréquences assez proches, supérieures à 15% dans les deux groupes, la première se distingue davantage de l'autre face à une représentation 2D de l'exercice, avec des fréquences valant respectivement 19,3% et 9,1%. On retrouve également, dans les trois groupes, l'erreur type relative au dessin d'un triangle non rectangle. Enfin, deux erreurs types, de fréquences plus faibles, peuvent également être citées dans le groupe 5 : un quadrilatère quelconque (5,7%) et un parallélogramme (4,4%). Ces deux erreurs sont réalisées à moins de quatre reprises face à des représentations 2 ½ D.













Tableau 120 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles à manipuler et à observer pour les exercices de visualisation du cube : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G2 (N = 90)	Dans G5 (N = 88)
Ex. 1 : Empreinte – Cube	Rectangle 	1,1%	2,2%	5,7%
Ex. 2 : Coupe transversale – Cube	Rectangle 	17,0%	14,4%	25,0%
Ex. 3 : Coupe longitudinale – Cube	Rectangle 	37,5%	34,4%	54,5%
Ex. 4 : Coupe oblique – Cube	Carré 	31,8%	37,8%	33,0%
	Triangle rectangle 	15,9%	15,6%	19,3%
	Trapèze rectangle 	18,2%	16,7%	9,1%
	Triangle non rectangle 	6,8%	10,0%	10,2%
	Quadrilatère quelconque 	1,1%	1,1%	5,7%
	Parallélogramme 	2,3%	3,3%	4,5%

Le Tableau 121 présente les erreurs types principales commises pour les quatre exercices relatifs au cône. Pour l'exercice d'empreinte, les résultats indiquent que l'erreur la plus fréquente est, dans les trois groupes, le dessin d'un ovale. Cette erreur est cependant observée plus régulièrement dans le groupe 5 (12,5%) que dans les groupes 1 (6,8%) et 2 (8,9%). L'erreur relative au dessin d'un triangle isocèle intervient chez quelques participants des groupes 1 et 2, mais n'est pas constatée dans le groupe










5. À l'inverse, le dessin d'un triangle avec bord arrondi est observé chez quelques participants du groupe 5 (4,5%) mais est en revanche réalisée par moins de quatre reprises face à des représentations 2 ½ D. Pour l'exercice de coupe transversale du même solide, deux mêmes erreurs types se distinguent dans les trois groupes : le dessin d'un ovale et le dessin d'un triangle isocèle. Pour l'exercice de coupe longitudinale, l'erreur type la plus fréquente dans les trois groupes est le dessin d'un triangle isocèle avec base arrondie. Dans le groupe 5, une fréquence proche est observée pour l'erreur type relative au dessin d'un demi-rond (14,8%) alors que ce dessin est plus rare face à des représentations 2 ½ D. Enfin, une troisième erreur qui peut être citée concerne le dessin d'un triangle rectangle. Finalement, pour l'exercice de coupe oblique, le dessin d'un rond est réalisé par environ un participant sur quatre dans les trois groupes. Vient ensuite le dessin d'un triangle quelconque, même si ce dernier est légèrement moins fréquent dans le groupe 5 (9,1%) que dans les deux autres groupes (14,8% et 13,3%). Le dessin d'un triangle quelconque avec bord arrondi est également réalisé par près d'un participant sur dix dans le groupe 5, mais cette erreur est moins recensée dans les deux autres groupes. Enfin, le dessin d'un rectangle apparaît dans le groupe 2 (4,4%).

Tableau 121 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et planes pour les exercices de visualisation du cône : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G2 (N = 90)	Dans G5 (N = 88)
Ex. 5 : Empreinte – Cône	Ovale 	6,8%	8,9%	12,5%
	Triangle isocèle 	4,5%	4,4%	0,0%
	Cône ou triangle isocèle avec base arrondie 	3,4%	2,2%	4,5%
Ex. 6 : Coupe transversale – Cône	Ovale 	4,5%	12,2%	8,0%
	Triangle isocèle 	4,5%	10,0%	4,5%
Ex. 7 : Coupe longitudinale – Cône	Triangle isocèle avec un côté arrondi 	12,5%	13,3%	15,9%
	Demi-rond 	8,0%	5,6%	14,8%
	Triangle rectangle 	4,5%	11,1%	6,8%
Ex. 8 : Coupe oblique – Cône	Rond 	25,0%	25,6%	26,1%
	Triangle quelconque 	14,8%	13,3%	9,1%
	Triangle quelconque avec un côté arrondi 	4,5%	2,2%	9,1%
	Rectangle 	0,0%	4,4%	2,3%

















Pour les exercices portant sur la sphère (Tableau 122), les erreurs types qui se distinguent sont peu nombreuses, y compris pour l'exercice de coupe oblique. Au niveau de l'empreinte, l'erreur type dominante, réalisée aussi bien dans le groupe 5 (77,3%) que dans les deux autres groupes (64,7% et 77,7%) est le dessin d'un rond. L'erreur relative au dessin d'un ovale est quant à elle beaucoup plus rare face aux représentations planes et virtuelles. En ce qui concerne la coupe transversale de ce solide, des résultats similaires sont observés dans les deux modalités, avec des fréquences assez proches dans les trois groupes concernant les deux erreurs qui se distinguent : d'une part le dessin d'un demi-rond (environ 15%) et d'autre part le dessin d'un ovale (environ 12%). Des mêmes erreurs types semblent assez logiquement émerger pour l'exercice de la coupe longitudinale de la sphère. On observe cependant une fréquence plus importante des deux erreurs types dans le groupe 5 en comparaison aux deux autres groupes. Finalement, concernant la coupe oblique de la sphère, le dessin d'un ovale et le dessin d'un demi-rond se distinguent dans les trois groupes, même si la deuxième erreur apparaît plus fréquente dans le groupe 5 que dans les autres groupes. Le dessin d'un ovale est une autre erreur type qu'il est possible de mettre en avant, bien qu'elle soit rare, dans le premier groupe, alors qu'elle est réalisée à moins de quatre reprises dans les groupes 2 et 5.

Tableau 122 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et planes pour les exercices de visualisation de la sphère : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G2 (N = 90)	Dans G5 (N = 88)
Ex. 9 : Empreinte – Sphère	Rond 	64,7%	77,7%	77,3%
	Ovale 	8,0%	7,8%	6,8%
Ex. 10 : Coupe transversale – Sphère	Demi-rond 	14,8%	15,6%	15,9%
	Ovale 	11,4%	13,3%	11,4%
Ex. 11 : Coupe longitudinale – Sphère	Demi-rond 	17,0%	12,2%	26,1%
	Ovale 	9,1%	5,6%	12,5%
Ex. 12 : Coupe oblique – Sphère	Ovale 	12,5%	17,8%	18,2%
	Demi-rond 	14,8%	8,9%	19,3%
	Demi-ovale 	5,7%	2,2%	2,3%

Les erreurs types recensées pour chacun des exercices relatifs au cylindre sont compilées au sein du Tableau 123. Pour l'exercice relatif à l'empreinte du cylindre, une erreur type émerge dans les deux modalités : le dessin d'un ovale et non d'un cercle. Cette erreur type atteint un taux de près de 20% au départ d'une représentation plane de l'exercice. Dans le premier groupe, une autre erreur émerge avec un taux proche de 10% et se rapporte au dessin d'un cylindre. Cette erreur ne semble que très peu apparaître au départ de représentations 2D. Pour la coupe transversale du même solide, il apparaît que l'erreur type majoritaire est à nouveau le dessin d'un ovale, avec un taux atteignant presque 20%, comme pour l'exercice d'empreinte. Ce taux s'avère légèrement plus faible au départ de représentations virtuelles. Comme face aux représentations virtuelles à manipuler, le dessin d'un demi-cylindre, comme le dessin d'un rectangle avec bord arrondi, est produit par quelques participants (4,5%). L'erreur type relative au dessin d'un rectangle est néanmoins quasiment absente du groupe 5, comme du groupe 1, alors qu'elle est davantage observée dans le groupe 2 (6,7%). Pour la coupe longitudinale du cône, l'erreur type la plus fréquente au départ de la représentation 2D est le dessin d'un demi-rond (19,3%). Il s'agit également de l'erreur type la plus constatée face à une représentation virtuelle de l'exercice, malgré une fréquence moindre. Deux autres erreurs types semblent aussi se distinguer face à la représentation plane : le dessin d'un carré ou rectangle avec bord arrondi et le dessin d'un demi-cylindre. Ces deux erreurs types sont commises par plus d'un participant sur dix et sont plus rares au départ de représentations virtuelles. Viennent enfin deux erreurs types plus rarement commises au départ de représentations planes : le dessin d'un ovale et le dessin d'un demi-ovale. La première est aussi constatée face à une représentation virtuelle de l'exercice, avec une fréquence semblable. La deuxième, assez rare face à la représentation 2D de l'exercice, est encore plus rare face à sa représentation virtuelle. Enfin, pour l'exercice de la coupe oblique du cylindre, le dessin d'un rond est une erreur type qui se distingue dans les trois groupes, avec une fréquence de près de 30% dans le groupe 5. Parmi les autres erreurs, il est possible de citer le dessin d'un triangle rectangle et d'un trapèze. Comme pour la coupe oblique du cube, la deuxième apparaît moins fréquente (2,3%) que la première (8,0%) quand l'exercice est proposé en 2D ce qui n'est pas forcément le cas face à une représentation virtuelle. Enfin, il est également possible de citer l'erreur type relative au dessin d'un triangle contenant un ou deux côté arrondis mais aussi le dessin d'un rectangle.




















Tableau 123 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et planes pour les exercices de visualisation du cylindre : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G2 (N = 90)	Dans G5 (N = 88)
Ex. 13 : Empreinte – Cylindre	Ovale 	12,5%	16,7%	19,3%
	Cylindre 	9,1%	1,1%	2,3%
Ex. 14 : Coupe transversale – Cylindre	Ovale 	11,4%	15,6%	19,3%
	Rectangle 	2,3%	6,7%	1,1%
	Demi-cylindre 	6,8%	3,3%	4,5%
	Rectangle avec côtés(s) arrondi(s) 	5,7%	1,1%	4,5%
Ex. 15 : Coupe longitudinale – Cylindre	Demi-rond 	15,9%	12,2%	19,3%
	Demi-ovale 	2,3%	2,2%	4,5%
	Ovale 	4,5%	6,7%	6,8%
	Carré ou rectangle avec côtés(s) arrondi(s) 	2,3%	6,7%	11,4%
	Demi-cylindre 	8,0%	5,6%	12,5%
Ex. 16 : Coupe oblique – Cylindre	Rond 	20,5%	30,0%	29,5%
	Triangle rectangle 	6,8%	11,1%	8,0%
	Trapèze rectangle 	8,0%	6,7%	2,3%
	Rectangle 	4,5%	5,6%	3,4%
	Triangle avec un ou deux côtés(s) arrondis 	6,8%	2,2%	6,8%

Finalement, pour les quatre exercices portant sur l'anneau, on retrouve à nouveau des similitudes entre les erreurs types commises dans les deux modalités, mais également quelques divergences (Tableau 124). Pour l'exercice d'empreinte, les résultats permettent d'identifier que l'erreur type dominante, avec une fréquence assez proche dans les trois groupes avoisinant les 70%, est le dessin de deux ronds concentriques non rapprochés. Le dessin de deux ovales concentriques non rapprochés est la deuxième erreur type recensée, avec un taux avoisinant les 10% dans chaque groupe. Enfin, le dessin d'un ovale est une erreur type minoritaire dans les groupes 2 et 5, qui est absente du groupe 1. Pour l'exercice 18 (coupe transversale de l'anneau), les résultats montrent que l'erreur type la plus fréquente varie selon la dimension du support utilisé. Si l'erreur type la plus fréquente face à des représentations virtuelles

est le dessin d'un rond, il s'agit plutôt du dessin de deux ovales concentriques face à des représentations planes. Enfin, le dessin d'un ovale est une production réalisée par quelques individus dans les trois groupes. Pour l'exercice de coupe longitudinale, une même erreur type semble se distinguer des autres aussi bien quand l'exercice est évalué au départ d'une représentation virtuelle et d'une représentation plane : le dessin de deux demi-ronds concentriques reliés par des segments. Celle-ci à une fréquence de 38,6% dans le groupe 1, de 26,8% dans le groupe 2 et de 27,3% dans le groupe 5. D'autres erreurs, moins récurrentes, sont aussi observées. C'est le cas du dessin de deux lignes arrondies parallèles, qui est réalisé par plus de 10% des participants des groupes 2 et 5 mais qui est peu observé dans le groupe 1. Il est également possible de citer le dessin d'une ligne arrondie et le dessin d'un rond. Enfin, le dessin d'un demi-rond, même s'il est proposé par un faible nombre de participants, peut être cité dans le groupe 5 alors que cette erreur est réalisée à moins de quatre reprises dans le groupe 2 et est absente du groupe 1. Finalement, dans le dernier exercice, des divergences importantes sont constatées entre les erreurs types dominantes réalisées quand l'exercice est proposé à l'aide d'une représentation virtuelle et à l'aide d'une représentation plane. L'erreur type qui survient en priorité dans les groupes 1 et 2 est le dessin de deux demi-ronds concentriques reliés par des segments alors que cette production apparaît minoritaire dans le groupe 5 (4,5%). À l'inverse, l'erreur type relative au dessin de deux ronds concentriques est l'erreur type la plus fréquente dans le groupe 5, avec une fréquence de 45,5%, alors que cette production est réalisée par moins de 10% des participants. De la même façon, le dessin de deux ovales concentriques est proposé par 13,6% des participants dans le groupe 5 alors qu'il est très peu, voire pas proposé au départ d'une représentation virtuelle. Le dessin d'un ovale, d'un rond, de deux ronds distincts ou encore de deux lignes arrondies parallèles sont d'autres erreurs types qui peuvent être recensées, avec des fréquences variables selon les groupes. Leur fréquence n'excède 10% dans aucun des groupes. Enfin, le dessin d'une ligne arrondie n'apparaît pas dans le groupe 5, mais est réalisée par 5,7% des participants du premier groupe.

Tableau 124 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et planes pour les exercices de visualisation de l'anneau : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G2 (N = 90)	Dans G5 (N = 88)
Ex. 17 : Empreinte – Anneau	Ronds concentriques non rapprochés 	69,3%	71,1%	73,9%
	Ovales concentriques non rapprochés 	9,1%	8,9%	10,2%
	Ovale 	0,0%	4,4%	3,4%
Ex. 18 : Coupe transversale – Anneau	Rond 	18,2%	14,4%	4,5%
	Ovales concentriques 	9,1%	5,6%	9,1%
	Ovale 	4,5%	3,3%	5,7%
Ex. 19 : Coupe longitudinale – Anneau	Deux demi-ronds concentriques reliés par des segments 	38,6%	26,7%	27,3%
	Deux lignes arrondies parallèles 	3,4%	12,2%	14,8%
	Ligne arrondie 	9,1%	6,7%	5,7%
	Rond 	4,5%	6,7%	3,4%
	Demi-rond 	0,0%	2,2%	4,5%
Ex. 20 : Coupe oblique – Anneau	Deux demi-ronds concentriques reliés par des segments 	27,3%	18,9%	4,5%
	Ronds concentriques 	9,1%	4,4%	45,5%
	Ovales concentriques 	0,0%	1,1%	13,6%
	Ovale 	9,1%	6,7%	4,5%
	Rond 	4,5%	10,0%	9,1%
	Deux ronds distincts 	4,5%	4,4%	3,4%
	Deux lignes arrondies parallèles 	1,1%	7,8%	4,5%
	Ligne arrondie 	5,7%	2,2%	0,0%

La présentation des erreurs types commises permet de relever certaines proximités quant à la présence de certaines d'entre elles, que l'exercice soit proposé au départ d'une représentation plane ou virtuelle. Les difficultés précédemment évoquées au regard des erreurs types réalisées dans les groupes 1 et 2 peuvent donc à nouveau être mises en avant. Parmi celles-ci, il est possible de citer la difficulté à différencier la forme de la coupe et la forme de la vue du solide après découpe (ex. dessin d'un demi-cercle pour les coupes de la sphère). Il est également possible de pointer des difficultés relatives à l'absence de prise en compte de la position inclinée du couteau (ex. dessin

d'une sphère pour la coupe oblique du cône ou du cylindre) ainsi qu'une difficulté liée aux empreintes des objets ne reposant pas sur une face (dessin d'un rond pour l'empreinte de la sphère), ou encore une absence de prise en compte de la 3^{ème} dimension. Ces erreurs impliquant cette dernière difficulté semblent par ailleurs plus régulières au départ de représentations planes que virtuelles (ex. dessin d'un ovale pour l'empreinte du cône, dessin d'un carré ou rectangle avec bord arrondi pour la coupe longitudinale d'un cône). En plus de cette première divergence qui apparaît, on observe également une autre différence entre les deux modalités, notamment pour les exercices de coupe oblique et en particulier pour l'exercice de l'anneau. Cette différence entre les deux modalités peut sans doute s'expliquer par une difficulté plus marquée dans la perception de la position du couteau par rapport à l'objet au départ de représentations planes, qui entraîne alors des erreurs types différentes. C'est ainsi que le dessin d'un triangle rectangle plutôt que de trapèze rectangle est aussi davantage observé pour les coupes obliques du cylindre et du cube.

10.4.8. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et planes selon l'âge, le type d'exercice et l'objet 3D

Si précédemment, les analyses inférentielles ont permis de mettre en évidence que pour quelques exercices, une dépendance à la modalité de présentation des objets 3D est observée quand les représentations virtuelles et planes sont comparées (toutes tranches d'âge confondues), il s'agit de vérifier si ces différences peuvent être considérées à toutes les tranches d'âge ou uniquement à certaines d'entre elles. Il est cependant déjà possible de suspecter que ce n'est pas le cas au vu des analyses comparatives antérieures prenant en compte les tranches d'âge, qui ont relevé la nécessité de ne pas généraliser les constats observés sur l'ensemble du public cible. Pour cela, des *tests du Khi-carré* (ou alternative) sont à nouveau appliqués entre les mêmes paires de groupes, mais à chacune des tranches d'âge. Les résultats de ces tests, compilés en annexe (Annexe 43), confirment cette nuance à apporter aux résultats.

Pour ce qui est de la comparaison des groupes 1 et 5, plusieurs résultats significatifs sont identifiés. Celui mis en évidence pour la coupe longitudinale de la sphère sur l'ensemble du public cible se confirme uniquement à la troisième tranche d'âge ($\chi^2 = 7,379$; $p\text{-value} = 0,007$) bien qu'à la première, un résultat proche du seuil de significativité est obtenu. Pour l'exercice de la coupe oblique de l'anneau, un résultat significatif n'est observé qu'à la dernière tranche d'âge (*Test exact de Fisher* = 6,929 ; p -

$value = 0,020$). Pour autant, les analyses sans prise en compte des tranches d'âge ont souligné des résultats significatifs pour l'exercice de la coupe longitudinale du cylindre et pour la coupe transversale de l'anneau, les analyses par tranche d'âge montrent ici que les résultats observés pour chacune des tranches sont tous non significatifs. Notons cependant que des résultats à la limite de la significativité sont observés à ces deux exercices pour la première et la troisième tranche d'âge. Un résultat significatif est aussi constaté pour l'exercice de l'empreinte de l'anneau à la première tranche d'âge (*Test exact de Fisher* = 5,641 ; $p-value = 0,048$). Il en est de même pour l'exercice de la coupe oblique de la sphère mais cette fois à deux tranches d'âge : la première ($\chi^2 = 4,659$; $p-value = 0,031$) et la dernière ($\chi^2 = 4,725$; $p-value = 0,030$). Pour tous les autres cas, des résultats non significatifs sont obtenus, bien que quelques-uns apparaissent à la limite de la significativité.

Plusieurs résultats significatifs sont également identifiés entre le groupe 2 et le groupe 5. Pour la coupe oblique de la sphère, un résultat significatif est observé à la première tranche d'âge, mais pas aux autres ($\chi^2 = 7,333$; $p-value = 0,007$). Concernant la coupe longitudinale de la sphère, les résultats sont significatifs à deux tranches d'âge : à la première ($\chi^2 = 4,956$; $p-value = 0,026$) et à la troisième ($\chi^2 = 11,023$; $p-value = 0,001$). Pour la coupe longitudinale du cube, des résultats significatifs sont seulement obtenus à la troisième tranche d'âge ($\chi^2 = 5,867$; $p-value = 0,015$), bien que le résultat soit proche du seuil de significativité à la première tranche d'âge. Pour tous ces cas, la dépendance du taux de réussite observée pour l'ensemble du public cible ne s'applique donc finalement qu'à un nombre réduit de tranches d'âge. Deux autres résultats significatifs sont recensés, tous deux pour la première tranche d'âge, alors que les résultats apparaissaient significatifs sur l'ensemble du public cible : l'empreinte de l'anneau (*Test exact de Fisher* = 5,641 ; $p-value = 0,048$) et la coupe longitudinale de l'anneau (*Test exact de Fisher* = 5,641 ; $p-value = 0,048$). Pour tous les autres cas, des résultats non significatifs sont calculés. C'est donc le cas pour les exercices de la coupe oblique de l'anneau, de la coupe longitudinale du cylindre et de la coupe transversale du cube, à propos desquels une différence significative a pourtant pu être observée pour l'ensemble du public cible. Notons cependant que quelques résultats proches du seuil de significativité sont observés.

Les différents résultats invitent donc à nuancer les constats antérieurement réalisés concernant la dépendance de la réussite des exercices à la dimensionnalité des supports. Tous les résultats significatifs observés sur l'ensemble du public cible

n'apparaissent qu'à une ou deux tranches d'âge, variables d'un exercice à l'autre. Parfois même, elles ne s'observent à aucune des tranches d'âge. En plus, des dépendances à la dimensionnalité émergent pour certains exercices à certaines tranches d'âge alors qu'elles n'étaient pas constatées sur l'ensemble du public cible. Malgré tout, pour la totalité des exercices de visualisation, la réussite de l'exercice n'apparaît pas dépendante de la dimensionnalité du support dans toutes les tranches d'âge. Pour de nombreux exercices, une indépendance à la dimensionnalité du support à toutes les tranches d'âge peut être relevée. Entre les représentations 2 ½ D et 2D, c'est le cas de chacun des exercices de coupe transversale et c'est aussi le cas pour tous les exercices impliquant le cylindre ou le cône. Toutefois, pour sept des vingt exercices, une dépendance des résultats à la dimensionnalité des supports est constatée, bien qu'elle n'apparaît qu'à une ou deux tranches d'âge. Par ailleurs, quand une dépendance est observée, elle apparaît systématiquement en faveur des représentations 2 ½ D quand elles sont comparées aux représentations 2D.

10.4.9. Discussion spécifique à la question 2.3° : la visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles, une habileté qui diffère en partie de la visualisation spatiale au départ de représentations planes

Lorsque les exercices de visualisation spatiale, en l'occurrence d'empreinte et de coupe, sont proposés à des enfants et des adolescents au départ de représentations 2D, les résultats permettent de souligner que la capacité de visualisation est majoritairement partiellement maîtrisée par les individus et que des différences individuelles sont observées. Même si ce constat apparaît similaire à ce qui est observé au départ des représentations virtuelles, le score moyen obtenu s'avère plus faible au départ de représentations planes, bien que les écarts entre individus semblent moins importants. De tels résultats permettent de suggérer un niveau de maîtrise plus élevé au départ de représentations virtuelles en comparaison aux représentations planes. Ces différences n'apparaissent toutefois significatives que lorsque les représentations virtuelles ne peuvent qu'être observées. De tels résultats apparaissent au moins en partie en accord avec les propos de Christou *et al.* (2006) mais aussi de Gutiérrez (1996), qui considèrent que les individus sont mieux capables de visualiser les représentations virtuelles en comparaison aux représentations statiques des objets.

D'après Barlett *et al.* (2023), cela s'explique par le réalisme des représentations virtuelles, qui peut impacter positivement les performances spatiales des individus. Ces résultats semblent par ailleurs cohérents avec les résultats d'études comparatives antérieures menées auprès d'adultes (Cohen & Hegarty, 2012 ; Sanandaji *et al.*, 2017 ; Tsutsumi *et al.*, 2008), qui ont relevé une meilleure maîtrise de la capacité à mener des opérations mentales sur l'objet perçu au départ de représentations virtuelles en comparaison aux représentations planes. Ils permettent par ailleurs d'objectiver également les témoignages d'enseignants, relayés par Thamrongrat et Law (2019), qui suggèrent que fournir les coupes au départ d'outils virtuels et non au départ de représentations planes pourrait permettre d'aider les adolescents à résoudre les tâches de coupe.

Pour autant, malgré cette tendance globale, les analyses complémentaires permettent de nuancer les propos susmentionnés par les différents auteurs.

D'abord, l'analyse des différences à chacune des tranches d'âge montre une absence de résultat significatif, même si la taille de l'échantillon (logiquement plus faible si on observe les résultats par tranche d'âge) influence la significativité statistique (Degreave,

2022). Les résultats par tranche d'âge permettent de mettre en avant qu'à l'âge de 8-9 ans, les enfants semblent capables de mettre en place au moins certaines opérations mentales sur les objets 3D représentés en 2D mais semblent majoritairement réussir à résoudre un nombre restreint d'exercice proposé. Comme face aux représentations virtuelles, l'habileté est donc possible à mettre en œuvre mais ne reste que partiellement acquise. Même si les différences sont non significatives avec les représentations virtuelles à cette tranche d'âge, aucun enfant n'obtient un score plus élevé que 12 sur 20 alors que c'est le cas de plus d'un quart des interrogés face aux représentations virtuelles. Pour autant, la manière dont les capacités de visualisation évoluent avec l'âge est semblable à celle observée face aux représentations virtuelles et les adolescents âgés de 14-15 ans ont encore des difficultés à mettre en place certaines opérations mentales, même s'ils arrivent à mettre en place une bonne partie d'entre elles.

Ensuite, lorsqu'on s'intéresse aux scores par objets, des scores statistiquement équivalents sont obtenus pour tous les objets sauf la sphère. Mener des opérations mentales sur cet objet 3D face à des représentations planes semble poser plus de difficultés que face aux représentations virtuelles. Cela peut être expliqué par des difficultés plus importantes à concevoir la sphère au départ de la représentation 2D et à la concevoir plutôt comme un objet bidimensionnel (*cf.* chapitre 9), ce qui peut assez logiquement occasionner des difficultés ensuite au moment d'appliquer des opérations mentales sur l'objet.

De même, au niveau des types d'exercice, les différences entre les deux modalités ne semblent concerner que les exercices de coupe longitudinale, et apparaissent en particulier à la première et à la troisième tranche d'âge. Pour les autres types d'exercice, les scores apparaissent statistiquement équivalents, ce qui permet de pointer à nouveau une certaine proximité entre les deux modalités de représentation.

Enfin, lorsqu'on s'intéresse au taux de réussite relatif à chaque exercice, des différences émergent pour certains exercices uniquement. En effet, les taux de réussite obtenus à la majorité des exercices indiquent qu'il n'y a pas de différence significative entre le niveau de maîtrise de l'habileté au départ de matériel virtuel et de représentations 2D. La modalité de représentation de l'exercice de visualisation spatiale ne semble donc que partiellement impacter la maîtrise de l'habileté, en influençant uniquement la réponse à certains exercices. Certes les enfants et les adolescents semblent mieux percevoir et se représenter les objets 3D au départ de représentations

dynamiques qu'au départ de représentations 2D (cf. chapitre 9), pour autant, la capacité de mise en œuvre d'opérations mentales de coupe sur cette représentation mentale, c'est-à-dire la mise en place d'image mentale transformatrice (Piaget & Inhelder, 1947) au départ de représentations 2D n'apparaît quant à elle pas toujours différente de la mise en œuvre de telles images mentales au départ de représentations 2D. Plusieurs raisons, évoquées précédemment (cf. 9.1.3.3) permettent de suspecter que, dans la plupart des exercices proposés, un déficit de perception (compte tenu des difficultés principales observées) est susceptible de ne pas influencer les capacités de visualisation (ex. même réponse attendue malgré la perception inadéquate). D'ailleurs, les analyses menées sur cette variable secondaire semblent aller dans ce sens. En outre, le caractère limité des manipulations proposées dans l'environnement virtuel ayant ici été utilisé peut constituer une raison à la proximité observée entre les scores obtenus au départ de représentations planes et virtuelles. En effet, les environnements virtuels ne proposent que l'application de rotations des stimuli. L'autorisation d'autres manipulations (ex. observer le couteau en mouvement en train de réaliser la coupe) pourrait constituer un soutien à la résolution de tâches de visualisation au départ de représentations virtuelles.

Pour autant, malgré la présence de plusieurs proximités entre les résultats obtenus dans les deux modalités, des niveaux de maîtrise différents sont constatés pour certains exercices. De plus, même si, pour d'autres, des différences significatives ne sont pas constatées pour le niveau de maîtrise, l'observation de certaines erreurs types peut tout de même inciter à considérer que la dimensionnalité du support vient influencer les réponses apportées aux exercices de visualisation.

D'abord, davantage de difficultés à mener des opérations mentales de coupe longitudinale et oblique de la sphère sont observées au départ de représentations planes. Pour ces deux exercices, on observe plus d'erreurs relatives au dessin d'un demi-rond au lieu d'un rond. Comme évoqué 10.2.10, cette erreur peut être expliquée par une confusion entre le point de vue extérieur et le point de vue intérieur de l'objet 3D. Elle peut aussi être renforcée par une difficulté de perception de l'objet 3D, comme susmentionné. En effet, en cas d'absence de prise de conscience du fait qu'il s'agisse d'une sphère et pas d'un rond, les participants ont sans doute privilégié le dessin de la moitié du rond.

Des différences entre représentations virtuelles et planes sont aussi observées pour l'exercice de coupe transversale et longitudinale du cube. Pour ces objets, les erreurs relatives à une confusion entre le point de vue extérieur et intérieur de l'objet 3D (dessin d'un rectangle au lieu d'un carré) sont aussi plus nombreuses face à des représentations planes en comparaison aux représentations virtuelles.

Notons que cette présence plus élevée des cas de confusion entre le point de vue extérieur et intérieur du solide, que Piaget et Inhelder (1948) ont identifié également face à du matériel physique, s'observe aussi pour d'autres exercices de coupe, même si cela n'occasionne pas de différence significative entre les taux de réussite dans les deux modalités. C'est le cas par exemple pour la coupe longitudinale du cône ou du cylindre, pour lesquels le dessin d'un demi-cercle est plus souvent observé. Toutefois, la fréquence de cette erreur n'est pas systématiquement plus élevée face à des représentations planes que face à des représentations virtuelles, comme c'est le cas pour la coupe transversale de la sphère ou du cylindre.

Par ailleurs, des résultats significatifs entre les taux de réussite sont aussi observés pour l'exercice de coupe longitudinale du cône. Comme susmentionné, on observe pour cet exercice davantage d'erreurs relatives à la confusion entre point de vue intérieur et extérieur de l'objet 3D. On observe aussi, pour cet objet 3D, davantage d'erreurs relatives à des difficultés de prise en compte de la troisième dimension (dessin d'un carré/rectangle avec bord(s) arrondi(s) au lieu d'un carré/rectangle). De manière générale, même si on n'observe pas systématiquement de différence significative dans les taux de réussite, davantage d'erreurs se rapportent à une dépendance à ce qui est vu sur la représentation 2D et donc à une absence de prise en compte de la troisième dimension. Cela faisant écho à une perspective égocentrée, au sens de Cohen et Hegarty (2007). Ainsi, le dessin d'un ovale pour l'empreinte et la coupe transversale du cylindre sont davantage observés. Cela peut sans doute être le reflet d'une image mentale incorrecte de l'objet 3D, due à un déficit de perception, considérant que sa base est ovale. On observe aussi davantage de dessins tel qu'un triangle isocèle avec base arrondie pour la coupe longitudinale du cône. Le caractère dynamique des représentations virtuelles semble donc permettre en partie de diminuer l'apparition de ce type d'erreur. D'après Cohen et Hegarty (2007), qui ont évalué l'habileté de visualisation spatiale auprès d'adultes au travers d'une tâche de reconnaissance en format papier-crayon, les erreurs relatives à l'absence de prise en compte de la 3D comme celles sus-présentées sont les erreurs types les plus

fréquemment commises. Les résultats nous invitent à être plus nuancé puisque d'autres erreurs types, autant voire plus commises, sont constatées, par exemple des erreurs relatives à une confusion entre le point de vue extérieur et intérieur de l'objet 3D. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le public cible est différent. Sans doute que des individus plus âgés arrivent à admettre que la forme de la coupe n'est pas spécifiquement congruente à la forme extérieure du solide après découpe. De plus, le fait d'opter pour une tâche de reconnaissance, dans laquelle cette dernière erreur type n'est pas systématiquement proposée parmi les distracteurs constitue un deuxième facteur explicatif.

Enfin, des difficultés plus importantes ont été observées pour l'exercice de la coupe oblique de l'anneau. Une plus forte occurrence du dessin de deux ronds concentriques et de deux ovales concentriques est observée. Cette erreur type peut être associée à une mauvaise perception de la position du couteau par rapport à l'objet 3D, qui peut apparaître ambiguë sur la représentation 2D, ce qu'on ne retrouve pas au départ de représentations virtuelles grâce à son caractère dynamique. En effet, sur la représentation, l'inclinaison du couteau est plus difficilement perceptible, ce qui peut occasionner des réponses différentes de celle attendue. D'ailleurs, même si cela n'impacte pas toujours significativement le niveau de maîtrise des exercices, des décalages entre les erreurs types commises dans les deux modalités peuvent être expliqués par cet argument. Par exemple, le dessin d'un triangle rectangle au lieu d'un trapèze rectangle pour la coupe oblique du cube. Cette difficulté à percevoir la position du plan de coupe par rapport à l'objet 3D au départ d'une représentation 2D est aussi mise en évidence chez les adultes lors de la MCT, qui, pour rappel, propose des tâches de coupe au départ de plan et non au départ d'un couteau (Tsutsumi *et al.*, 2008). Cela est par ailleurs justifié par des difficultés à identifier les positions relatives d'éléments entre eux au sein des représentations planes en perspective (St. John *et al.*, 2001), qui apparaît moins problématique en observant des représentations virtuelles. En ce sens, cette différence entre les deux modalités peut expliquer les écarts de performance observés pour certains exercices.

Au travers de l'observation des erreurs types commises, selon les exercices, différentes raisons peuvent occasionner un décalage, pour certains exercices, entre les résultats obtenus au départ de représentations planes et virtuelles. Toutefois, il est à noter que, même si les ampleurs de ces erreurs ne sont pas toujours identiques entre les modalités, on retrouve des erreurs types similaires face à des représentations

planes et virtuelles, notamment des erreurs types associées à une difficulté à distinguer les points de vue extérieurs et intérieurs, à se détacher de la représentation plane au profit d'une prise en compte de la 3D, à s'imaginer l'empreinte de la sphère et de l'anneau, ou encore à se détacher d'une forme congruente à l'objet 3D quand la coupe est oblique (ex. dessin d'un rond pour la coupe oblique du cylindre).

10.5. Réponse à la question de recherche 2.4° : Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique

Afin d'appréhender les différences entre les capacités de visualisation au départ de représentations virtuelles et de matériel physique, les performances des groupes 1 et 3, tous deux autorisés à manipuler le matériel proposé, sont comparées. Il en est de même pour les groupes 2 et 4, qui ne sont quant à eux pas autorisés à le manipuler. De plus, les résultats des groupes 3 et 4 seront comparés pour voir si un effet de manipulation est observé face à du matériel physique. Les résultats issus de cette dernière comparaison pourront alors être confrontés aux réponses apportées à la question 2.2° afin d'identifier si une proximité est observée quant à l'influence de la manipulation dans l'environnement virtuel et dans l'espace sensible.

10.5.1. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique (toutes tranches d'âge confondues)

Comme l'illustre la Figure 45, les scores moyens obtenus dans les groupes confrontés à du matériel physique atteignent une valeur de 12 sur 20 quand le matériel peut être manipulé et de 11,22 quand il ne l'est pas. Ces deux scores moyens s'avèrent plus élevés que ceux observés au départ de représentations virtuelles, valant respectivement 10,45 et 10,69. Toutefois, il n'en reste pas moins que ces résultats montrent que, même face à du matériel physique, les capacités de visualisation spatiale semblent partiellement maîtrisées.

La répartition des scores obtenus dans chacun des groupes indique par ailleurs que l'écart type obtenu face à du matériel physique à manipuler (3,773) est plus faible que celui observé face à des représentations virtuelles à manipuler (4,734). *A contrario*, lorsque le matériel ne peut être manipulé, l'écart type est légèrement supérieur face à du matériel physique (4,356) par rapport au matériel virtuel (4,234). Les graphiques de type « boîtes à moustaches » (Figure 45) présentent cette répartition des scores. Ce dernier permet de relever une étendue élevée dans les quatre groupes comparés. Le score varie de 0 à 19 sur 20 dans le groupe confronté à du matériel virtuel à manipuler et de 3 à 20 sur 20 dans le groupe confronté à du matériel physique à manipuler. Face au matériel à observer, le score varie entre 1 et 19 sur 20 pour le matériel virtuel et de 0 à 18 sur 20 pour le matériel physique. La médiane est par ailleurs similaire dans les groupes 1 et 3 où elle vaut 12 sur 20. Elle est par contre légèrement supérieure dans le

groupe 4 (12,5) en comparaison au groupe 2 (12,0). Ces analyses permettent donc de souligner que, majoritairement, les capacités de visualisation spatiale ne sont que partiellement acquises à la fois face au matériel physique et face au matériel virtuel et des écarts importants sont observés entre les participants dans les différentes modalités.

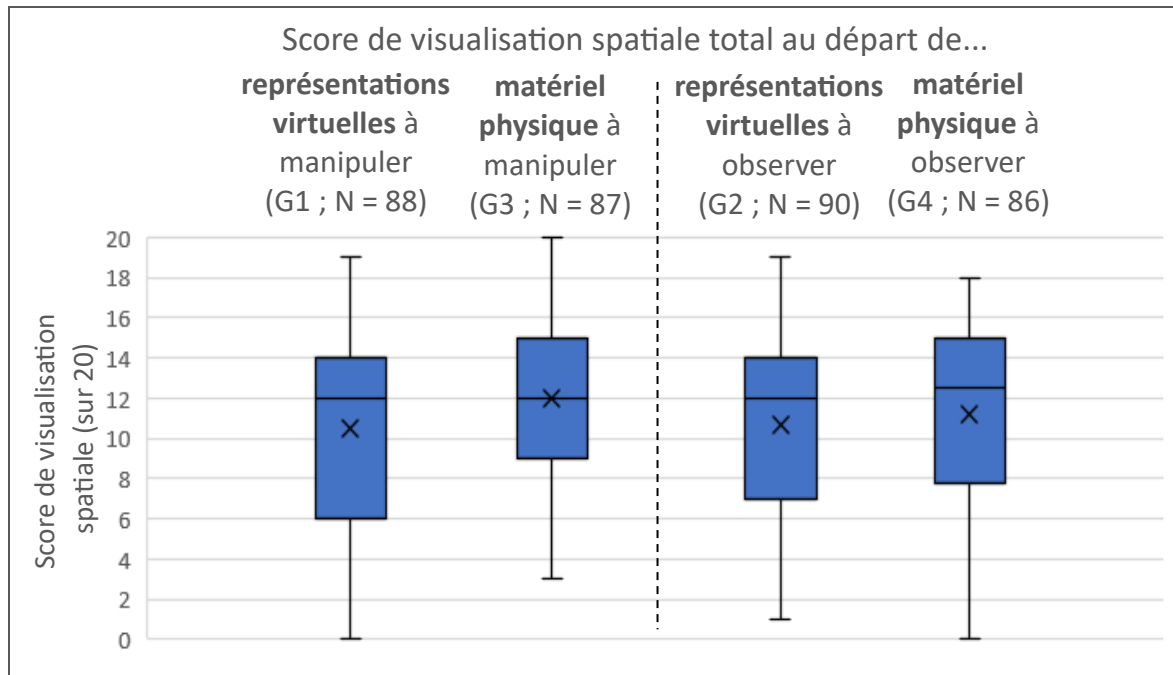


Figure 45 : Répartition du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique

Bien que les analyses descriptives permettent de souligner que les scores moyens des groupes 3 et 4 sont systématiquement plus élevés que ceux obtenus dans le groupe 1 et 2, les résultats de tests *U de Mann-Whitney* appliqués pour comparer de manière inférentielle les scores des groupes indiquent qu'une différence non significative est observée entre les groupes 1 et 3 ($U = 3199,500$; $p\text{-value} = 0,060$). Cette différence s'avère cependant proche du seuil de significativité. Entre le groupe 2 et le groupe 4, la différence s'avère elle aussi non significative ($U = 3504,500$; $p\text{-value} = 0,278$).

Par ailleurs, l'analyse inférentielle comparant les scores des groupes 3 et 4 indique que des différences non significatives sont observées entre les deux groupes ($U = 3470,000$; $p\text{-value} = 0,409$). La manipulation ne semble donc pas impacter la visualisation au départ de matériel physique, ce qui a préalablement pu aussi être mis en évidence dans l'environnement virtuel (cf. 10.3.1).

Au total, il est donc possible de considérer que les enfants et les adolescents ont un niveau de maîtrise de visualisation spatiale similaire au départ de représentations virtuelles et au départ de matériel physique et que, dans les deux cas, la manipulation ne semble pas impacter les capacités de visualisation spatiale.

10.5.2. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique selon l'âge

Afin de prendre en compte la variable âge dans les analyses menées, la Figure 46 présente l'évolution des scores moyens et des répartitions des scores constatés dans les quatre groupes à chacune des tranches d'âge. Il est possible d'y constater que, à chaque tranche d'âge, le score moyen obtenu dans le groupe confronté à des représentations virtuelles s'avère légèrement plus faible que celui constaté dans le groupe confronté à du matériel physique correspondant, même si des écarts faibles sont systématiquement observés. Des analyses inférentielles comparatives seront menées par la suite sur ces scores afin de statuer sur ces différences entre les deux groupes.

Par ailleurs, dans les groupes confrontés à du matériel physique, le score moyen obtenu à chaque tranche d'âge augmente entre les tranches d'âge, comme c'est le cas aussi dans les groupes confrontés à des représentations virtuelles. Dans le groupe 3 comme dans le groupe 4, le score moyen avoisine ainsi la note de 9 sur 20 à la première tranche d'âge alors qu'il vaut 14 sur 20 à la dernière tranche d'âge. Les indices de corrélation calculés entre le score de visualisation et l'âge (en jour) semblent également permettre de statuer sur cette évolution des performances avec l'âge. En effet, un indice de corrélation positif et fort est obtenu dans le groupe 3 ($r = 0,478$) et dans le groupe 4 ($r = 0,503$). De tels résultats se rapprochent de ceux mis en évidence dans les groupes 1 et 2, où les indices de corrélation valaient respectivement 0,449 et 0,505. La taille d'effet (*q de Cohen*) calculée entre les coefficients de corrélation observés dans les groupes 1 et 3, d'une valeur de 0,037, permet de statuer sur l'absence d'un effet du groupe sur la corrélation et donc de confirmer la proximité du lien entre capacité de visualisation et âge dans les deux groupes. Une même tendance est constatée entre les groupes 2 et 4 puisqu'une taille d'effet presque nulle est observée (0,004). La manière dont les capacités de visualisation spatiale évoluent avec l'âge est donc similaire quand les tâches sont proposées au départ de représentations 2 ½ D et au départ de matériel physique. Par ailleurs, la taille d'effet (*q de Cohen*) calculée entre les corrélations

observées dans les groupes 3 et 4 vaut 0,032, ce qui permet de statuer sur l'absence d'un effet de manipulation du matériel physique sur l'évolution du score avec l'âge. Ce constat établi pour le matériel physique est similaire à celui établi pour les représentations virtuelles (cf. 10.3.2).

Même si une évolution des scores moyens est constatée dans les quatre groupes, on observe tout de même que des écarts importants entre individus sont constatés aux différentes tranches d'âge. Face à du matériel virtuel, nous avons pu précédemment mettre en évidence que ces écarts tendaient à se réduire dans les tranches d'âge supérieures. Un même constat semble pouvoir être établi quand le matériel physique est à observer. Ce n'est en revanche pas le cas quand le matériel physique peut être manipulé, même si des écarts moins élevés sont constatés dans ce groupe aux premières tranches d'âge.

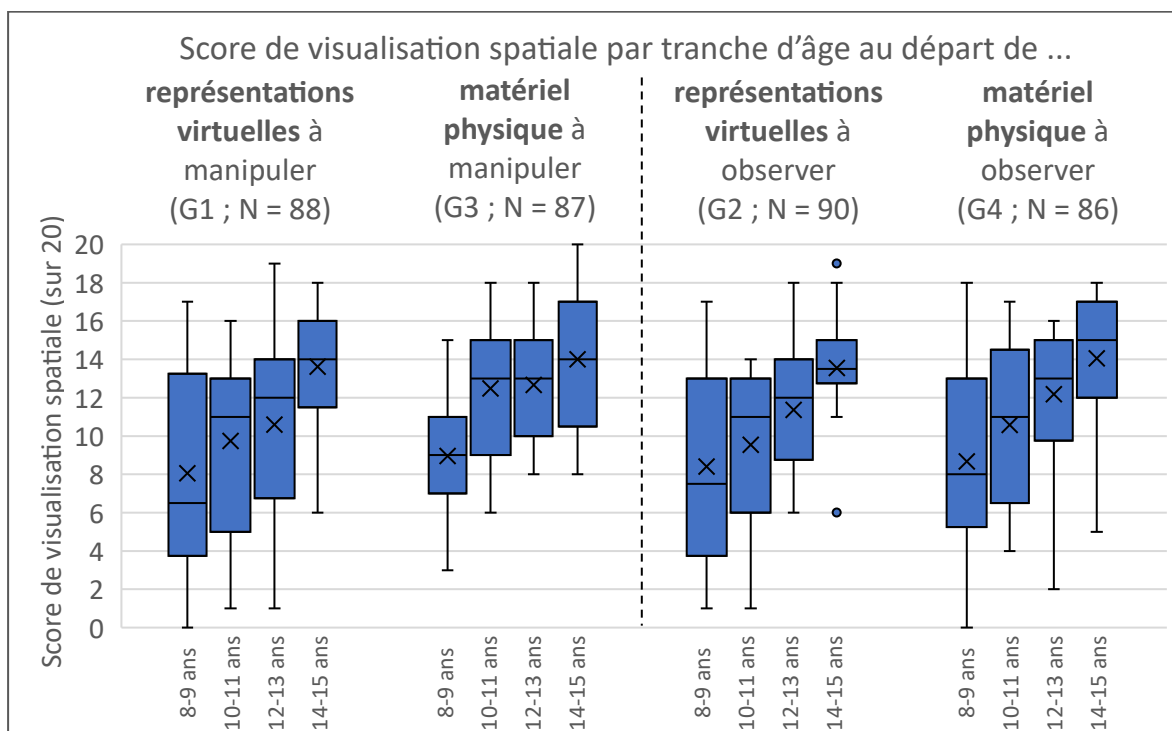


Figure 46 : Évolution des répartitions du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique

En prenant en considération l'ensemble du public cible, toutes tranches d'âge confondues, des différences significatives entre les performances réalisées par les enfants et les adolescents confrontés à du matériel physique ou virtuel n'ont pas été observées. L'analyse des différences entre les groupes à chacune des tranches d'âge permet de nuancer ce propos. Les tests *U de Mann-Whitney* (Tableau 125) appliqués à

chaque tranche d'âge pour comparer les scores totaux des groupes 1 et 3 indiquent que des différences significatives sont observées chez les enfants âgés de 10 à 11 ans ($U = 165,500$; $p\text{-value} = 0,029$), avec un score plus élevé au départ de matériel physique. Pour toutes les autres tranches d'âge, les différences sont non significatives entre ces deux groupes, même si les scores moyens observés dans le groupe 3 sont systématiquement supérieurs à ceux obtenus dans le groupe 1. De la même façon, dans les quatre tranches d'âge, aucune différence significative n'est calculée entre le score moyen obtenu dans le groupe 2 et dans le groupe 4. Cela permet, pour ces deux groupes, de généraliser l'absence de différence observée pour l'ensemble du public cible à chacune des tranches d'âge. Au total, les capacités de visualisation spatiale au départ de matériel physique et virtuel apparaissent majoritairement équivalentes aux différentes tranches d'âge.

En ce qui concerne la comparaison des groupes 3 et 4, les résultats des tests *U de Mann-Whitney* appliqués sur le score total obtenu à chaque tranche d'âge sont tous non significatifs. Cela signifie que la manipulation du matériel physique ne semble pas impacter la maîtrise de la visualisation spatiale aux différentes tranches d'âge, ce qui est un constat similaire à celui réalisé par rapport au matériel virtuel (cf. 10.3.2). Que ce soit au niveau de l'impact de la manipulation sur les scores obtenus aux tranches d'âge ou au niveau de l'effet de la manipulation sur l'évolution du score avec l'âge, une proximité est donc constatée entre l'espace sensible et l'environnement virtuel.

Tableau 125 : Comparaison des scores de visualisation (sur 20) entre G1 et G3, G2 et G4 et entre G3 et G4 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p) associé

	8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
G1-G3	$U = 205,00$ $p = 0,384$	$U = 165,500$ $p = 0,029^*$	$U = 168,000$ $p = 0,123$	$U = 206,500$ $p = 0,723$
G2-G4	$U = 247,000$ $p = 0,708$	$U = 214,000$ $p = 0,385$	$U = 194,000$ $p = 0,257$	$U = 167,500$ $p = 0,273$
G3-G4	$U = 241,500$ $p = 0,619$	$U = 180,500$ $p = 0,150$	$U = 225,000$ $p = 0,883$	$U = 195,500$ $p = 0,913$

10.5.3. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique selon l'objet 3D

Si les analyses antérieures ont indiqué que les participants arrivent à faire preuve de visualisation spatiale au départ de représentations 2 ½ D comme au départ de matériel physique, les différences potentielles entre les objets 3D, mises d'ailleurs en évidence

dans le groupe 1, incitent à vérifier si, pour chacun des objets, les différences observées entre les deux types de support sont ou non significatives. Les tests *U de Mann-Whitney* appliqués sur les scores (sur 4) relatifs à chacun des objets 3D pour comparer les différents groupes concernés (Tableau 126) montrent qu'une différence significative est observée entre les scores du groupe 1 et du groupe 3 pour un seul des cinq objets 3D : le cône ($U = 3183,500$; $p\text{-value} = 0,044$). Une différence à la limite de la significativité est par ailleurs observée pour le cylindre ($U = 3205,500$; $p\text{-value} = 0,052$). Pour les trois autres objets 3D, la différence entre les deux groupes apparaît non significative. Entre le groupe 2 et 4, une différence significative est uniquement observée pour le score associé au cylindre ($U = 3159,000$; $p\text{-value} = 0,029$). Les autres différences sont non significatives. Pour ces quelques objets pour lesquels des différences significatives sont constatées, qu'elles soient entre G1 et G3 ou entre G2 et G4, les analyses montrent des résultats supérieurs dans les groupes confrontés à du matériel physique. En conclusion, il apparaît que pour certains objets 3D, les enfants et les adolescents n'arrivent pas à faire preuve de visualisation spatiale au départ des représentations virtuelles comme au départ de matériel physique (pour le cône ou le cylindre selon que le matériel puisse ou non être manipulé), avec dans ce cas de meilleures performances au départ de matériel physique.

Tableau 126 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G3, G2 et G4 et entre G3 et G4 : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)

	Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
G1-G3	$U = 3470,500$ $p = 0,253$	$U = 3183,500$ $p = 0,044^*$	$U = 3348,000$ $p = 0,133$	$U = 3205,500$ $p = 0,052$	$U = 3538,500$ $p = 0,354$
G2-G4	$U = 3775,000$ $p = 0,761$	$U = 3518,000$ $p = 0,280$	$U = 3568,000$ $p = 0,352$	$U = 3159,000$ $p = 0,029^*$	$U = 3726,000$ $p = 0,646$
G3-G4	$U = 3372,500$ $p = 0,226$	$U = 3493,500$ $p = 0,431$	$U = 3467,000$ $p = 0,388$	$U = 3539,500$ $p = 0,523$	$U = 3696,500$ $p = 0,884$

Concernant la comparaison entre les résultats obtenus par les participants des groupes 3 et 4, les analyses inférentielles (*U de Mann-Whitney*) indiquent l'absence de différences significatives pour le score associé à chacun des objets 3D. Comme cela a pu être constaté avec les représentations virtuelles (cf. 10.3.3), la manipulation du matériel physique ne semble donc pas influencer la maîtrise des exercices relatifs à chaque objet 3D. Cela constitue donc un point commun supplémentaire entre les capacités de visualisation dans les deux modalités.

10.5.4. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique selon le type d'exercice

L'existence d'une différence entre les types d'exercice, constatée à la fois au départ de matériel virtuel, qui semble aussi observé pour le matériel physique, invite à comparer de manière inférentielle les deux modalités pour les scores obtenus à chaque type d'exercice. Pour ce faire, les tests *U de Mann-Whitney* (Tableau 127) sont appliqués d'abord entre les groupes 1 et 3 et les groupes 2 et 4 et ensuite entre les groupes 3 et 4. Ces tests indiquent qu'entre le groupe 1 et le groupe 3, mais aussi entre le groupe 2 et le groupe 4, les seules différences significatives observées concernent les exercices d'empreinte. Ces scores s'avèrent supérieurs face à du matériel physique. Pour les autres types d'exercice, les performances au départ de matériel physique et virtuel, qu'il soit à manipuler ou non, sont équivalentes.

Les résultats des tests *U de Mann-Whitney* réalisés pour comparer les groupes 3 et 4 indiquent une absence de différence significative entre les deux groupes pour le score associé à chacun des types d'exercice. Comme cela a pu être constaté avec les représentations virtuelles (cf. 10.3.4), la manipulation du matériel physique ne semble donc influencer la maîtrise de chaque type d'exercice.

Tableau 127 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G3 et entre G2 et G4 : *U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)*

	Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	Coupe oblique
G1-G3	$U = 2639,000$ $p < 0,001^{**}$	$U = 3301,500$ $p = 0,101$	$U = 3546,500$ $p = 0,393$	$U = 3467,000$ $p = 0,267$
G2-G4	$U = 2883,500$ $p < 0,001^{**}$	$U = 3562,000$ $p = 0,336$	$U = 3632,500$ $p = 0,475$	$U = 3804,500$ $p = 0,841$
G3-G4	$U = 3235,500$ $p = 0,094$	$U = 3734,500$ $p = 0,983$	$U = 3419,500$ $p = 0,321$	$U = 3516,000$ $p = 0,481$

10.5.5. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique selon l'âge et l'objet 3D

Les indices de corrélation (*de Spearman*) calculés entre les scores par objet 3D et l'âge en jour, compilés dans le Tableau 128, permettent de confirmer l'évolution globale des scores constatée précédemment entre les tranches d'âge dans chaque groupe. Ceux-ci permettent de relever que des corrélations positives et non négligeables sont observées pour chaque objet 3D. L'ampleur de ces corrélations semble cependant varier selon les objets 3D. Lorsqu'on compare les corrélations observées dans les

groupes 1 et 3, on observe des indices de corrélation proches pour le cube (0,215 et 0,209), pour qui des corrélations positives mais faibles sont constatées. De même, pour l’anneau (0,425 et 0,426), la corrélation est positive et forte. Pour les autres 3D, des corrélations positives sont observées dans les deux groupes mais leur ampleur varie. Concernant les groupes 2 et 4, des corrélations proches, pouvant être considérées comme positives et fortes, sont observées dans les deux groupes pour le cône (0,451 et 0,437) et pour le cylindre (0,441 et 0,439). Pour les autres objets 3D, l’ampleur des corrélations varie, même si elles restent positives. Quelques divergences sont observées entre le matériel virtuel et physique, bien que des tendances communes restent observées par rapport à l’évolution des scores avec l’âge aux différents types d’exercice. L’évolution des scores avec l’âge, mise en évidence sur le score total, semble donc concerner l’ensemble des objets 3D, aussi bien face à du matériel physique que virtuel.

Tableau 128 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par objet (sur 4) au départ de représentations virtuelles et de matériel physique et l’âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)

	Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
G1 : manip. 2½D (N = 88)	$\rho = 0,215$ $p = 0,044^*$	$\rho = 0,446$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,372$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,284$ $p = 0,007^{**}$	$\rho = 0,425$ $p < 0,001^{**}$
G3 : manip. 3D (N = 87)	$\rho = 0,209$ $p = 0,052$	$\rho = 0,301$ $p = 0,005^{**}$	$\rho = 0,467$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,356$ $p = 0,001^{**}$	$\rho = 0,426$ $p < 0,001^{**}$
G2 : obs. 2½D (N = 90)	$\rho = 0,222$ $p = 0,036^*$	$\rho = 0,451$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,412$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,441$ $p = 0,007^{**}$	$\rho = 0,388$ $p < 0,001^{**}$
G4 : obs. 3D (N = 86)	$\rho = 0,317$ $p = 0,003^{**}$	$\rho = 0,437$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,367$ $p = 0,001^{**}$	$\rho = 0,439$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,466$ $p < 0,001^{**}$

Même si une proximité peut être constatée dans les groupes confrontés à du matériel physique et virtuel au niveau de l’évolution des scores par objet 3D, les quelques différences d’ampleur des corrélations invitent à mener des analyses inférentielles pour comparer les scores obtenus par objet 3D et par tranche d’âge entre les groupes.

Pour ce faire, des tests *U de Mann-Whitney* sont appliqués. Les résultats obtenus (Tableau 129) permettent de souligner l’existence de quelques différences significatives entre les groupes confrontés à du matériel physique et à des représentations virtuelles, même si, dans la majorité des cas, des différences non significatives sont observées. À la première tranche d’âge, les différences sont non significatives pour tous les objets 3D. Ce n’est pas le cas aux autres tranches. Pour les enfants âgés de 10 à 11 ans, une

différence significative est observée pour le cylindre ($U = 159,000$; $p\text{-value} = 0,016$) et des résultats proches du seuil de significativité sont observés pour le cône ($U = 184,000$; $p\text{-value} = 0,062$) et l'anneau ($U = 185,000$; $p\text{-value} = 0,061$). Des résultats proches du seuil de significativité sont aussi relevés pour le cylindre quand le matériel doit uniquement être observé ($U = 179,000$; $p\text{-value} = 0,085$). Pour les adolescents âgés de 12 à 13 ans, une différence significative est aussi observée quand le matériel peut être manipulé, mais uniquement pour les scores de la sphère ($U = 137,500$; $p\text{-value} = 0,013$). Enfin, une seule différence significative apparaît à la dernière tranche d'âge. Celle-ci concerne le cylindre quand le matériel ne peut être manipulé ($U = 131,500$; $p\text{-value} = 0,028$).

Tableau 129 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G1 et G3, G2 et G4 et entre G3 et G4 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)

		Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
G1-G3	8-9 ans	$U = 238,500$ $p = 0,932$	$U = 179,000$ $p = 0,125$	$U = 215,000$ $p = 0,508$	$U = 218,000$ $p = 0,560$	$U = 230,000$ $p = 0,751$
	10-11 ans	$U = 207,500$ $p = 0,164$	$U = 184,000$ $p = 0,062$	$U = 245,500$ $p = 0,653$	$U = 159,000$ $p = 0,016^*$	$U = 185,000$ $p = 0,061$
	12-13 ans	$U = 203,000$ $p = 0,474$	$U = 202,500$ $p = 0,464$	$U = 137,500$ $p = 0,013^*$	$U = 195,000$ $p = 0,352$	$U = 226,500$ $p = 0,905$
	14-15 ans	$U = 204,000$ $p = 0,640$	$U = 210,000$ $p = 0,777$	$U = 212,000$ $p = 0,819$	$U = 201,500$ $p = 0,600$	$U = 213,500$ $p = 0,853$
G2-G4	8-9 ans	$U = 219,000$ $p = 0,292$	$U = 242,000$ $p = 0,618$	$U = 225,500$ $p = 0,380$	$U = 223,500$ $p = 0,358$	$U = 231,000$ $p = 0,416$
	10-11 ans	$U = 240,500$ $p = 0,783$	$U = 213,000$ $p = 0,347$	$U = 250,500$ $p = 0,972$	$U = 179,000$ $p = 0,085$	$U = 245,000$ $p = 0,862$
	12-13 ans	$U = 206,500$ $p = 0,351$	$U = 219,500$ $p = 0,579$	$U = 208,500$ $p = 0,412$	$U = 212,000$ $p = 0,450$	$U = 224,000$ $p = 0,649$
	14-15 ans	$U = 183,500$ $p = 0,447$	$U = 172,500$ $p = 0,296$	$U = 185,000$ $p = 0,491$	$U = 131,500$ $p = 0,028^*$	$U = 198,500$ $p = 0,770$
G3-G4	8-9 ans	$U = 260,000$ $p = 0,926$	$U = 253,500$ $p = 0,810$	$U = 245,000$ $p = 0,667$	$U = 215,500$ $p = 0,261$	$U = 253,000$ $p = 0,768$
	10-11 ans	$U = 185,000$ $p = 0,156$	$U = 172,500$ $p = 0,088$	$U = 190,500$ $p = 0,211$	$U = 220,500$ $p = 0,606$	$U = 195,000$ $p = 0,251$
	12-13 ans	$U = 224,000$ $p = 0,853$	$U = 198,000$ $p = 0,394$	$U = 196,000$ $p = 0,352$	$U = 217,000$ $p = 0,720$	$U = 180,000$ $p = 0,178$
	14-15 ans	$U = 174,000$ $p = 0,401$	$U = 147,000$ $p = 0,124$	$U = 184,500$ $p = 0,666$	$U = 166,000$ $p = 0,327$	$U = 180,500$ $p = 0,589$

Que ce soit pour la comparaison des groupes 1 et 3 ou pour celle des groupes 2 et 4, dès que des différences significatives sont observées, celles-ci s'inscrivent en faveur du matériel physique puisque dans ces cas de figure, les scores moyens sont plus élevés dans les groupes 3 et 4 que dans les groupes 1 et 2. Les constats réalisés préalablement

(toutes tranches d'âge confondues), que ce soit pour les différences de visualisation du cône quand le matériel est manipulé ou du cylindre quand le matériel ne l'est pas, ne semblent donc pas pouvoir être appliqués à chacune des tranches d'âge. De plus, d'autres différences significatives, qui n'ont pas été observées sur l'échantillon complet, semblent émerger à certaines tranches d'âge. Malgré quelques résultats significatifs mis en évidence, il n'en reste pas moins que, pour la majorité des cas, une absence de différence significative est observée.

Les résultats aux tests *U de Mann-Whitney* comparant les scores obtenus par les groupes 3 et 4 pour chaque objet 3D à chaque tranche d'âge apparaissent quant à eux tous non significatifs. Cela signifie que, pour tous les types d'exercice et toutes les tranches d'âge, la manipulation dans l'espace sensible n'impacte pas la maîtrise de la visualisation. Ce constat est identique à ce qui a été mis en évidence dans l'environnement virtuel (cf. 10.3.5) et permet de relever un point commun supplémentaire entre les deux modalités.

10.5.6. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique selon l'âge et le type d'exercice

Si on s'intéresse cette fois à l'évolution avec l'âge des scores relatifs à chaque type d'exercice, les indices de corrélation calculés entre ces différents scores et l'âge en jour (*corrélation de Spearman*), présentés dans le Tableau 130, confirment une évolution des scores dans les quatre groupes puisqu'une corrélation positive, modérée ou forte, est calculée pour les trois exercices de coupe. Même si l'ampleur des corrélations est variable entre les modalités, une tendance commune à l'amélioration des scores avec l'âge est donc constatée. En revanche, l'évolution des scores relatifs aux exercices d'empreinte semble différer de celles constatées pour les autres types d'exercice dans la mesure où l'amélioration des scores apparaît plus faible entre les tranches d'âge. Celle-ci est même négligeable dans le groupe 1 et peut être qualifiée de positive mais faible dans les trois autres groupes. Ces indices de corrélation permettent donc de mettre en évidence que l'évolution positive avec l'âge semble concerner davantage les exercices de coupe que ceux d'empreinte.

Tableau 130 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par type d'exercice (sur 5) au départ de représentations virtuelles et de matériel physique et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p -value (p)

	Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
G1 : manip. 2½D (N = 88)	$\rho = 0,120$ $p = 0,265$	$\rho = 0,445$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,353$ $p = 0,001^{**}$	$\rho = 0,439$ $p < 0,001^{**}$
G3 : manip. 3D (N = 87)	$\rho = 0,294$ $p = 0,006^{**}$	$\rho = 0,377$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,363$ $p = 0,001^{**}$	$\rho = 0,416$ $p < 0,001^{**}$
G2 : obs. 2½D (N = 90)	$\rho = 0,293$ $p = 0,005^{**}$	$\rho = 0,391$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,431$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,367$ $p < 0,001^{**}$
G4 : obs. 3D (N = 86)	$\rho = 0,266$ $p = 0,013^*$	$\rho = 0,414$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,482$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,402$ $p < 0,001^{**}$

Les résultats des tests *U de Mann-Whitney* utilisés pour comparer les scores des deux modalités à chaque type d'exercice et à chaque tranche d'âge sont compilés dans le Tableau 131. Ceux-ci s'avèrent majoritairement non significatifs. Des différences significatives ne sont observées que pour les exercices de type « empreinte », lors de certaines tranches d'âge. Quand le matériel peut être manipulé, une différence significative s'observe à la troisième tranche d'âge ($U = 113,500$; p -value = 0,002) et une différence à la limite de la significativité apparaît à la dernière tranche d'âge ($U = 153,500$; p -value = 0,072). Quand le matériel est observé uniquement, des différences significatives sont présentes à la première tranche d'âge ($U = 177,000$; p -value = 0,044) ainsi qu'à la dernière ($U = 136,500$; p -value = 0,035). Ces différences significatives s'inscrivent systématiquement en faveur des groupes confrontés à du matériel physique. Pour les trois autres types d'exercice, une équivalence entre les performances face aux deux modalités peut être établie, même si quelques résultats à la limite de la significativité sont observés. Au vu de ces résultats, les constats relatifs à l'équivalence des performances au départ de matériel physique et de représentations virtuelles en ce qui concerne les trois types d'exercice de coupe peuvent être généralisés à l'ensemble des tranches d'âge. Cependant, ceux concernant les différences constatées pour les exercices d'empreinte ne doivent être nuancés puisqu'ils ne se produisent pas à toutes les tranches d'âge.

Si une absence d'effet de manipulation a pu être observée dans l'environnement virtuel pour chaque type d'objet et à chaque tranche d'âge (cf. 10.3.6), les tests *U de Mann-Whitney* appliqués entre les groupes 3 et 4 semblent aussi indiquer une absence d'effet de manipulation dans l'espace sensible également. Les différences observées pour chaque type d'exercice à chaque tranche d'âge sont en effet non significatives.

Cela confirme une proximité entre les capacités de visualisation dans les deux modalités.

Tableau 131 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G1 et G3, G2 et G4 et G3 et G4 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)

		Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
G1-G3	8-9 ans	U = 191,000 p = 0,204	U = 178,000 p = 0,127	U = 225,000 p = 0,683	U = 236,500 p = 0,891
	10-11 ans	U = 196,500 p = 0,103	U = 196,000 p = 0,111	U = 206,500 p = 0,194	U = 181,000 p = 0,055
	12-13 ans	U = 113,500 p = 0,002**	U = 200,500 p = 0,441	U = 192,000 p = 0,335	U = 197,500 p = 0,400
	14-15 ans	U = 153,500 p = 0,072	U = 205,500 p = 0,663	U = 216,500 p = 0,917	U = 201,500 p = 0,622
G2-G4	8-9 ans	U = 177,000 p = 0,044*	U = 245,000 p = 0,669	U = 216,500 p = 0,285	U = 254,000 p = 0,818
	10-11 ans	U = 208,000 p = 0,247	U = 210,500 p = 0,320	U = 232,500 p = 0,650	U = 248,000 p = 0,924
	12-13 ans	U = 184,500 p = 0,142	U = 204,000 p = 0,333	U = 238,000 p = 0,924	U = 238,500 p = 0,931
	14-15 ans	U = 136,500 p = 0,035*	U = 191,000 p = 0,588	U = 199,500 p = 0,796	U = 171,500 p = 0,309
G3-G4	8-9 ans	U = 235,000 p = 0,496	U = 246,000 p = 0,683	U = 261,000 p = 0,946	U = 246,500 p = 0,685
	10-11 ans	U = 215,000 p = 0,470	U = 222,500 p = 0,627	U = 159,000 p = 0,047	U = 204,500 p = 0,370
	12-13 ans	U = 184,500 p = 0,215	U = 194,500 p = 0,337	U = 210,500 p = 0,608	U = 197,500 p = 0,389
	14-15 ans	U = 174,000 p = 0,450	U = 199,500 p = 1,000	U = 187,000 p = 0,726	U = 184,500 p = 0,674

10.5.7. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique selon le type d'exercice et l'objet 3D (résultats par exercice)

10.5.7.1. Analyses des taux de réussite

La Figure 47 présente le taux de réussite associé à chaque exercice dans les groupes confrontés à des représentations virtuelles et à du matériel physique. Comme l'illustre cette figure, pour la plupart des exercices, des taux de réussite proches sont observés entre les groupes confrontés à du matériel physique et les groupes confrontés à du matériel virtuel. Toutefois, pour certains d'entre eux, les taux face à du matériel physique sont plus élevés que face à du matériel virtuel. C'est le cas par exemple de l'exercice de coupe transversale et l'empreinte du cône et du cylindre, où encore de

l'empreinte de la sphère. Les analyses inférentielles comparatives réalisées par la suite permettront de vérifier le caractère significatif de ces différences.

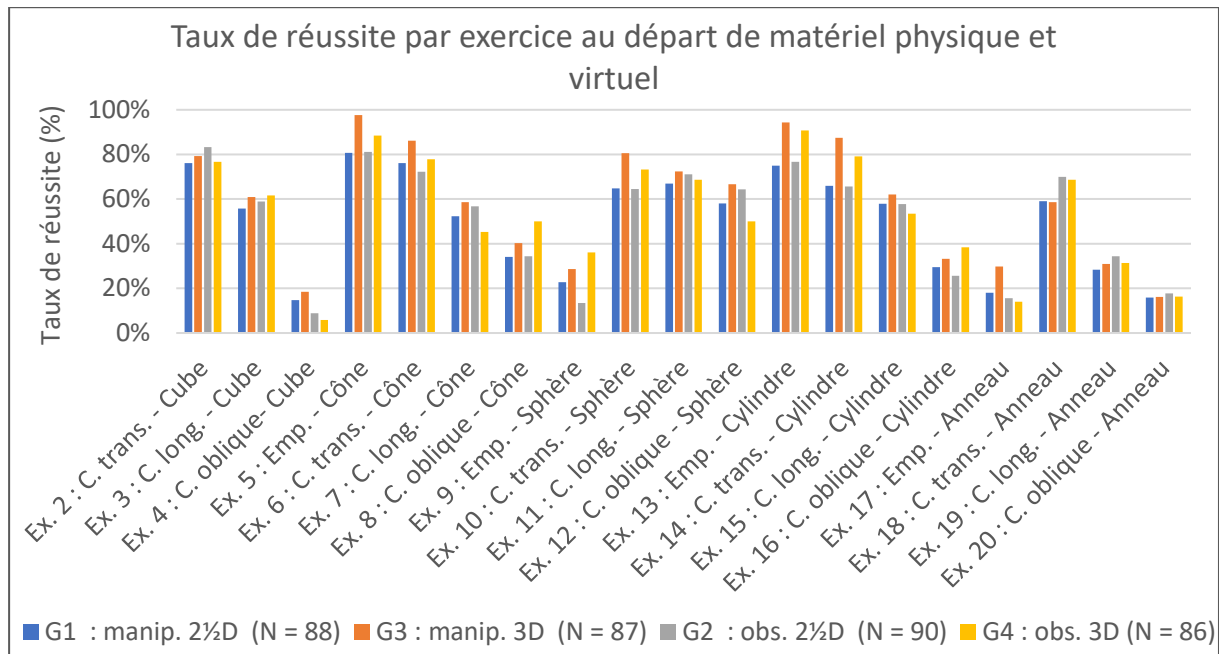


Figure 47 : Taux de réussite à chaque exercice de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique

Malgré ces différences qui semblent apparaître dans certains exercices, une proximité est majoritairement observée entre les taux de réussite des groupes. Cette proximité permet de relever que, dans les différentes modalités, des différences importantes sont observées entre les exercices, certains semblant être réussis par une majorité de participants tandis que d'autres semblent poser des difficultés à la plupart d'entre eux. Les exercices posant le plus de difficultés face aux représentations virtuelles, sont aussi ceux qui posent le plus de difficultés face au matériel physique. Parmi ceux-ci, on peut notamment citer la coupe oblique de l'anneau ou du cube. Inversement, d'autres exercices semblent mieux réussis dans les différentes modalités, par exemple l'empreinte du cube, du cône et du cylindre ou les coupes transversales de ces mêmes solides. Les analyses antérieures ont permis de mettre en évidence que, dans les groupes confrontés à des représentations virtuelles, des différences entre les objets 3D peuvent être mises en évidence pour chaque type d'exercice. Rappelons le cas de l'empreinte par exemple, ou des taux très différents sont obtenus pour le cube, le cylindre et le cône, d'une part, et pour la sphère et l'anneau, d'autre part. Un même constat peut être mis en évidence dans le groupe confronté à du matériel physique à manipuler. De la même façon, des différences significatives entre types d'exercice ont

Réponse à la question 2.4° (Étude 2)

pu être relevées entre chaque type d'exercice pour chaque objet dans les groupes confrontés à du matériel virtuel. Un tel résultat est également observé dans les groupes confrontés à du matériel physique. Dans les quatre groupes, on constate par exemple que, pour le cube, l'exercice d'empreinte est réussi par plus de 90% des participants alors que celui de l'anneau est réussi par moins de 20%.

Afin de vérifier si le taux de réussite de chacun des exercices est dépendant ou non de la modalité de présentation (matériel physique ou représentations virtuelles), le *test du Khi-carré* (ou son alternative) est utilisé entre les groupes 1 et 3 et entre les groupes 2 et 4 pour chaque exercice. Les résultats de ces tests sont placés en annexe (Annexe 44). Ces derniers indiquent que, lorsque le matériel est à manipuler (comparaison des groupes 1 et 3), le taux de réussite est indépendant du groupe d'appartenance pour seize des vingt exercices. Des résultats significatifs sont uniquement obtenus à quatre exercices : l'empreinte du cône ($\chi^2 = 13,093$; $p\text{-value} < 0,001$) et du cylindre ($\chi^2 = 12,428$; $p\text{-value} < 0,001$) et la coupe transversale de la sphère ($\chi^2 = 5,409$; $p\text{-value} = 0,020$) et du cylindre ($\chi^2 = 11,217$; $p\text{-value} < 0,001$). Systématiquement, pour ces exercices, les scores moyens obtenus apparaissent plus élevés dans le groupe 3. Pour tous les autres, les résultats sont non significatifs même s'ils sont parfois proches du seuil de significativité.

Quand les participants ne sont pas invités à manipuler le matériel (comparaison des groupes 2 et 4), des résultats significatifs sont observés pour quatre exercices également. L'empreinte du cylindre ($\chi^2 = 6,291$; $p\text{-value} = 0,012$) et la coupe transversale du cylindre ($\chi^2 = 3,998$; $p\text{-value} = 0,046$) sont à nouveau des exercices pour lesquels les résultats sont significatifs. S'ajoutent à cette liste les exercices de coupe oblique du cône ($\chi^2 = 4,367$; $p\text{-value} = 0,037$) et d'empreinte de la sphère ($\chi^2 = 12,288$; $p\text{-value} < 0,001$). Pour ces exercices, les dépendances du taux de réussite au groupe s'avèrent en faveur du groupe 4 qui obtient un taux de réussite chaque fois plus élevé que le groupe 2. Pour tous les autres, les résultats sont non significatifs même s'il arrive également que certains soient proches du seuil de significativité.

Si, pour une grande partie des exercices de visualisation proposés, la réussite apparaît indépendante de la dimensionnalité du support utilisé quand on compare le matériel 3D et 2 ½ D, ce n'est pas le cas pour tous les exercices et lorsque ce n'est pas le cas, les résultats sont systématiquement en faveur du matériel physique. Tous ces éléments invitent à nuancer les résultats des analyses comparatives menées en prenant

en considération séparément la variable « type d'exercice » ou la variable « objets 3D ». En effet, en comparant les enfants et les adolescents confrontés à des représentations 2 ½ D et 3D, la dépendance ne concerne pas tous les exercices du cône ou du cylindre ni d'ailleurs tous les exercices d'empreinte. De plus, des exercices relatifs à d'autres objets 3D (ex. sphère) ou à d'autres types d'exercice (ex. coupe transversale) sont concernés par la dépendance de la réussite aux supports.

En ce qui concerne la comparaison entre les groupes 3 et 4, les résultats des tests inférentiels montrent une dépendance du score au groupe d'appartenance pour quatre des vingt exercices : l'exercice de la coupe oblique du cube ($\chi^2 = 6,414$; $p\text{-value} = 0,011$) et de la sphère ($\chi^2 = 4,944$; $p\text{-value} = 0,026$), l'exercice d'empreinte du cône ($\chi^2 = 5,831$; $p\text{-value} = 0,016$) et de l'anneau ($\chi^2 = 6,404$; $p\text{-value} = 0,011$). Dans ces quatre exercices, la comparaison des taux de réussite montre un taux plus élevé dans le groupe 3, en faveur donc de la manipulation du matériel. Les seize autres exercices peuvent quant à eux être considérés comme indépendants de la place accordée à la manipulation. Un effet de la manipulation du matériel physique est donc constaté pour quelques exercices alors que dans l'environnement virtuel, nous avons pu précédemment décrire l'absence d'effet de la manipulation sur les taux de réussite obtenus à chacun des exercices de visualisation spatiale (cf. 10.3.7.1). Par cette observation, il est possible de souligner l'émergence de divergences entre les capacités de visualisation dans l'espace sensible et en environnement virtuel.







10.5.7.2. Analyses des erreurs types

Les analyses précédentes ont permis de souligner une certaine proximité, dans la majorité des exercices, quant au niveau de maîtrise de ces derniers lorsqu'ils sont proposés face à des représentations virtuelles et à du matériel physique. L'analyse des erreurs types réalisées par les participants semble principalement aller dans ce sens également, même si des divergences peuvent émerger.

Le Tableau 132 présente les erreurs types identifiées pour les quatre exercices du cube. L'exercice d'empreinte du cube est réussi par la quasi-totalité des participants des quatre groupes. De ce fait aucune erreur type ne semble se distinguer. Dans l'exercice de coupe transversale du cube et dans celui de sa coupe longitudinale, une seule erreur type se distingue dans les quatre modalités, à savoir le dessin d'un rectangle. Si des fréquences proches sont observées entre les quatre groupes pour chacun des exercices, cette erreur type apparaît systématiquement plus fréquente dans l'exercice

de coupe longitudinale que dans celui de coupe transversale. À titre d'indication, elle est observée, dans les quatre groupes, chez un à deux participants sur dix dans l'exercice de coupe transversale et chez trois à quatre participants sur dix dans l'exercice de coupe longitudinale. Enfin, pour l'exercice de coupe oblique, quelques divergences apparaissent selon la dimensionnalité du support. L'erreur relative au dessin d'un carré est l'erreur la plus commise dans les trois premiers groupes. Sa fréquence reste élevée dans le groupe 4 (26,7%) alors qu'elle apparaît moins fréquente que le dessin d'un triangle rectangle (43,0%). Concernant cette dernière erreur type, elle apparaît plus fréquemment dans les groupes confrontés à du matériel physique, en particulier dans le groupe 4, que dans ceux confrontés à du matériel virtuel. La situation inverse est observée pour le dessin d'un trapèze rectangle qui est davantage proposé chez le groupe confronté à du matériel virtuel alors qu'elle est minoritaire face à du matériel physique. Enfin, une dernière erreur type relève du dessin d'un triangle quelconque.














Tableau 132 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour les exercices de visualisation du cube : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G3 (N = 87)	Dans G2 (N = 90)	Dans G4 (N = 86)
Ex. 1 : Empreinte – Cube	/	/	/	/	/
Ex. 2 : Coupe transversale – Cube	Rectangle 	17,0%	19,5%	14,4%	18,6%
Ex. 3 : Coupe longitudinale – Cube	Rectangle 	37,5%	35,6%	34,4%	32,6%
Ex. 4 : Coupe oblique – Cube	Carré 	31,8%	29,9%	37,8%	26,7%
	Triangle rectangle 	15,9%	21,8%	15,6%	43,0%
	Trapèze rectangle 	18,2%	2,3%	16,7%	5,8%
	Triangle non rectangle 	6,8%	19,5%	10,0%	9,3%

Le Tableau 133 présente les erreurs types recensées pour les exercices portant sur le cône. Rappelons d'abord que l'exercice d'empreinte est réussi par la quasi-totalité des participants confrontés à du matériel physique à manipuler. De ce fait, si le dessin d'un ovale à la place d'un rond semble être une erreur qui se distingue dans les trois autres groupes, elle apparaît presque absente dans le groupe confronté à ce type de matériel. Une autre erreur type, à savoir le dessin d'un triangle isocèle, est également observée dans les groupes confrontés à des représentations virtuelles, même si elle est commise par moins de 5% des participants, elle est encore plus rare face à du matériel










physique et est même totalement absente quand ce matériel peut être manipulé. Pour l'exercice de coupe longitudinale, l'erreur type la plus fréquemment observée est identique dans les quatre groupes. Il s'agit de dessin d'un triangle isocèle avec base arrondie et son occurrence varie entre 10,3% et 17,4% selon les groupes. D'autres erreurs types peuvent également être citées pour cet exercice, bien qu'elles soient majoritairement rares : le dessin d'un demi-rond, d'un triangle rectangle, d'un triangle rectangle avec bord arrondi et d'un demi-cône. Notons cependant que l'erreur relative au triangle rectangle est davantage observée dans le groupe 2 (11,1%) est très peu dans le groupe 3. Le dessin d'un triangle rectangle avec bord arrondi et d'un demi-cône sont également très peu observés dans les quatre groupes et sont même recensés moins de quatre fois dans certains des groupes. Enfin, pour le dernier exercice portant sur l'objet 3D, l'erreur type principale observée dans l'ensemble des groupes est le dessin d'un rond. Le dessin d'un triangle quelconque est également une erreur type observée chez plus d'un participant sur dix dans les quatre groupes. Enfin, le dessin d'un triangle quelconque avec côté arrondi et le dessin d'un rectangle sont des erreurs types plus rarement commises dans les quatre groupes.

Tableau 133 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour les exercices de visualisation du cône : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G3 (N = 87)	Dans G2 (N = 90)	Dans G4 (N = 86)
Ex. 5 : Empreinte – Cône	Ovale 	6,8%	1,1%	8,9%	8,1%
	Triangle isocèle 	4,5%	0,0%	4,4%	2,3%
Ex. 6 : Coupe transversale – Cône	Triangle isocèle 	4,5%	3,4%	10,0%	2,3%
	Ovale 	4,5%	5,7%	12,2%	8,1%
Ex. 7 : Coupe longitudinale – Cône	Triangle isocèle avec un côté arrondi 	12,5%	10,3%	13,3%	17,4%
	Demi-rond 	8,0%	6,9%	5,6%	5,8%
	Triangle rectangle 	4,5%	2,3%	11,1%	7,0%
	Triangle rectangle avec un côté arrondi 	2,3%	4,6%	3,3%	5,8%
	Demi-cône 	2,3%	1,1%	0,0%	4,7%
Ex. 8 : Coupe oblique – Cône	Rond 	25,0%	20,7%	25,6%	14,0%
	Triangle quelconque 	14,8%	14,9%	13,3%	10,5%
	Triangle quelconque avec un côté arrondi 	4,5%	2,3%	2,2%	4,7%
	Rectangle 	0,0%	1,1%	4,4%	0,0%

Pour les exercices relatifs à la sphère, les erreurs types recensées sont présentées dans le Tableau 134. Pour l'exercice d'empreinte de ce solide, une même erreur type est dominante dans l'ensemble des groupes : le dessin d'un rond. Cette erreur est commise systématiquement par plus de 50% des participants. Elle apparaît cependant moins souvent dans le groupe confronté à du matériel physique à observer. Une autre erreur recensée dans tous les groupes est le dessin d'un ovale, qui apparaît chez moins d'un participant sur 10. Pour l'exercice de coupe transversale, deux erreurs types peuvent être relevées dans les quatre groupes : le dessin d'un demi-rond et d'un ovale. Ces deux mêmes erreurs types sont aussi identifiées dans les quatre groupes pour l'exercice de coupe longitudinale et pour l'exercice de coupe oblique. De manière plus occasionnelle, le dessin d'un demi-ovale est observé, même si cette erreur est réalisée par moins de 5% des participants dans certains groupes.



















Tableau 134 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour les exercices de visualisation de la sphère : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G3 (N = 87)	Dans G2 (N = 90)	Dans G4 (N = 86)
Ex. 9 : Empreinte – Sphère	Rond 	64,7%	63,2%	77,7%	56,2%
	Ovale 	8,0%	5,7%	7,8%	5,8%
Ex. 10 : Coupe transversale –Sphère	Demi-rond 	14,8%	4,6%	15,6%	10,5%
	Ovale 	11,4%	9,2%	13,3%	8,1%
Ex. 11 : Coupe longitudinale – Sphère	Demi-rond 	17,0%	13,8%	12,2%	17,4%
	Ovale 	9,1%	9,2%	5,6%	11,6%
Ex. 12 : Coupe oblique – Sphère	Ovale 	12,5%	14,9%	17,8%	26,7%
	Demi-rond 	14,8%	8,0%	8,9%	15,1%
	Demi-ovale 	5,7%	1,1%	2,2%	3,5%

Concernant les exercices du cylindre (Tableau 135), rappelons d'abord que l'exercice de l'empreinte apparaît mieux réussi au départ de matériel physique. De ce fait, le dessin d'un ovale à la place d'un rond est moins fréquent dans les groupes confrontés à du matériel physique. Si le dessin d'un cylindre est aussi observé dans le premier groupe, cette erreur est absente face à du matériel physique. Pour l'exercice de coupe transversale, la réussite apparaît aussi plus élevée au départ de matériel physique. Cette différence s'illustre par une plus faible fréquence de l'erreur type principalement commise dans tous les groupes, à savoir le dessin d'un ovale. Celle-ci est environ deux

fois moins fréquente face à du matériel physique. D'autres erreurs types, moins fréquentes dans les différents groupes, peuvent être citées et sont parfois absentes ou presque dans certains groupes : le dessin d'un rectangle, d'un demi-cylindre ou d'un rectangle avec côté arrondi. Pour l'exercice de coupe longitudinale, on observe que le dessin d'un demi-rond est une des erreurs types les plus fréquentes. D'autres dessins peuvent être cités mais semblent moins fréquents que la première dans les autres groupes, sauf dans le groupe 4 : le dessin d'un demi-ovale, d'un ovale, d'un carré avec côté(s) arrondi(s) et d'un demi-cylindre. Une divergence entre les modalités de représentation semble concerner la dernière erreur type citée, qui apparaît moins fréquemment face à du matériel physique que face à des représentations virtuelles.

Tableau 135 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour les exercices de visualisation du cylindre : pourcentage d'occurrence




















	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G3 (N = 87)	Dans G2 (N = 90)	Dans G4 (N = 86)
Ex. 13 : Empreinte – Cylindre	Ovale 	12,5%	1,1%	16,7%	5,8%
	Cylindre 	9,1%	0,0%	1,1%	0,0%
Ex. 14 : Coupe transversale – Cylindre	Ovale 	11,4%	5,7%	15,6%	7,0%
	Rectangle 	2,3%	2,3%	6,7%	3,5%
	Demi-cylindre 	6,8%	3,4%	3,3%	2,3%
	Rectangle avec côtés(s) arrondi(s) 	5,7%	0,0%	1,1%	1,2%
Ex. 15 : Coupe longitudinale – Cylindre	Demi-rond 	15,9%	16,1%	12,2%	7,0%
	Demi-ovale 	2,3%	2,3%	2,2%	4,7%
	Ovale 	4,5%	4,6%	6,7%	10,5%
	Carré ou rectangle avec côtés(s) arrondi(s) 	2,3%	4,6%	6,7%	7,0%
	Demi-cylindre 	8,0%	1,1%	5,6%	2,3%
Ex. 16 : Coupe oblique – Cylindre	Rond 	20,5%	25,3%	30,0%	16,3%
	Rectangle 	4,5%	10,3%	5,6%	3,5%
	Triangle rectangle 	6,8%	3,5%	11,1%	8,1%
	Trapèze rectangle 	8,0%	1,1%	6,7%	4,7%
	Triangle avec un ou deux côtés(s) arrondis 	6,8%	4,6%	2,2%	4,7%
	Demi-cylindre 	1,1%	1,1%	1,1%	4,7%
	Demi-rond 	2,3%	5,7%	2,2%	3,5%

Enfin, pour l'exercice de coupe oblique, l'erreur type relative au dessin d'un rond se distingue dans l'ensemble des groupes. D'autres dessins peuvent également être cités mais sont observés moins fréquemment dans l'ensemble des groupes, le plus souvent chez moins de 10% des participants. Leur fréquence varie cependant parfois entre les groupes et elles sont quasiment absentes dans certains d'entre eux. Parmi ceux-ci, il est possible de citer le dessin d'un rectangle, d'un triangle rectangle, d'un trapèze rectangle, d'un triangle avec côté(s) arrondi(s), d'un demi-cylindre ou encore d'un demi-rond.

Finalement, pour les quatre derniers exercices, qui se rapportent à l'anneau, le Tableau 136 présente les erreurs types observées. Concernant l'empreinte de ce solide, on observe que le dessin de deux ronds concentriques rapprochés est la production la plus fréquente. Cette erreur atteint des fréquences supérieures à 60% dans tous les groupes. Les autres erreurs types recensées sont nettement moins fréquentes car elles possèdent systématiquement une fréquence inférieure à 10%. Parmi celles-ci, il est possible de citer le dessin de deux ovales concentriques, qui semble plus rare face à du matériel physique. De même, il est possible de citer l'erreur type relative au dessin d'un ovale, même si cette dernière est peu observée et est même absente dans certains groupes. Pour l'exercice de coupe transversale, les résultats indiquent qu'une même erreur type est la plus fréquente aussi bien face à du matériel physique que virtuel : le dessin d'un rond. Elle est particulièrement fréquente dans le groupe 3. D'autres erreurs types apparaissent dans les différents groupes de manière moins fréquente : le dessin de deux ovales concentriques et le dessin d'un ovale. Pour l'exercice de coupe longitudinale, l'erreur type relative au dessin de deux demi-ronds concentriques reliés par des segments est la plus fréquente. Elle possède une occurrence de plus de 20% dans l'ensemble des groupes alors que les autres erreurs types recensées sont majoritairement observées chez moins de 10% des participants. Parmi ces autres erreurs types, il est possible de citer le dessin de deux lignes arrondies parallèles, d'une ligne arrondie, d'un rond, d'un demi-anneau ou encore d'un demi-rond. Finalement, pour le dernier exercice, une erreur type semble aussi se distinguer dans l'ensemble des groupes. Elle est d'ailleurs la même que pour l'exercice de coupe longitudinale. Une liste d'autres dessins moins régulièrement commis peut être relevée et leur fréquence est variable entre les groupes. Parmi ceux-ci, on peut citer le dessin de deux ronds concentriques, d'un ovale, d'un rond, de deux ronds distincts, de deux lignes arrondies parallèles et d'une ligne arrondie. Notons que l'erreur relative au dessin de deux ronds

distincts semble être davantage observée sur du matériel physique, où sa fréquence dépasse les 10%, que sur du matériel virtuel.

Tableau 136 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de matériel physique pour les exercices de visualisation de l'anneau : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G1 (N = 88)	Dans G3 (N = 87)	Dans G2 (N = 90)	Dans G4 (N = 86)
Ex. 17 : Empreinte – Anneau	Ronds concentriques non rapprochés 	69,3%	64,4%	71,1%	79,1%
	Ovales concentriques non rapprochés 	9,1%	3,4%	8,9%	3,5%
	Ovale 	0,0%	2,3%	4,4%	2,3%
Ex. 18 : Coupe transversale – Anneau	Rond 	18,2%	32,2%	14,4%	12,8%
	Ovales concentriques 	9,1%	1,1%	5,6%	5,8%
	Ovale 	4,5%	3,4%	3,3%	3,5%
Ex. 19 : Coupe longitudinale – Anneau	Deux demi-ronds concentriques reliés par des segments 	38,6%	24,1%	26,7%	22,1%
	Deux lignes arrondies parallèles 	3,4%	3,4%	12,2%	9,3%
	Ligne arrondie 	9,1%	11,5%	6,7%	4,7%
	Rond 	4,5%	8,0%	6,7%	4,7%
	Deux ronds reliés par deux lignes arrondies parallèles (demi-anneau) 	2,5%	3,4%	3,3%	5,8%
	Demi-rond 	0,0%	5,7%	2,2%	2,3%
Ex. 20 : Coupe oblique – Anneau	Deux demi-ronds concentriques reliés par des segments 	27,3%	18,4%	18,9%	20,9%
	Ronds concentriques 	9,1%	0,0%	4,4%	0,0%
	Ovale 	9,1%	6,9%	6,7%	5,8%
	Rond 	4,5%	10,3%	10,0%	3,5%
	Deux ronds distincts 	4,5%	12,6%	4,4%	14,0%
	Deux lignes arrondies parallèles 	1,1%	4,6%	7,8%	4,7%
	Ligne arrondie 	5,7%	4,6%	2,2%	1,2%

Compte tenu des nombreuses proximités constatées entre les deux groupes, on peut suggérer que les interprétations des erreurs types réalisées sur du matériel physique rejoignent celles proposées sur du matériel virtuel (cf. 10.2.7). Ainsi, face à du matériel physique, de nombreux participants semblent considérer que la forme de la coupe se rapporte à la forme d'une des parties du solide après la découpe, ce qui était déjà observé face à du matériel virtuel. L'erreur type principale observée pour la coupe

longitudinale de l'anneau en est l'illustration, tout comme le dessin d'un demi-cercle pour les coupes longitudinale ou transversale de la sphère, ou le cas du rectangle pour les coupes transversale et longitudinale du cube. Si des difficultés relatives à l'imagination de l'empreinte de la sphère et de l'anneau semblent toujours fortement observées, cette difficulté semble cependant moins élevée face à du matériel physique à observer pour la sphère. De plus, même si elles continuent parfois d'être observées, il apparaît que plusieurs erreurs se rapportant à une absence de prise en compte de la troisième dimension sont moins fréquentes face à du matériel physique. Cela s'illustre notamment pour les exercices d'empreinte et de coupe transversale du cylindre, pour lesquels le dessin d'un ovale apparaît moins observé.

10.5.8. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de matériel physique selon l'âge, le type d'exercice et l'objet 3D

Les analyses menées sur l'entièreté du public cible ont permis de souligner un effet de la modalité de présentation des objets 3D sur la réussite de plusieurs exercices concernant le matériel physique et virtuel. Afin d'affiner cette compréhension des effets du support, le même test a été appliqué mais, cette fois, à chacune des tranches d'âge. Les résultats de ces tests sont proposés en annexe (Annexe 45).

Concernant la comparaison entre groupe 1 et groupe 3, les analyses menées sur l'échantillon complet ont montré une dépendance au groupe pour l'exercice de l'empreinte du cône. Les analyses par tranches d'âge montrent que cette dépendance ne s'observe qu'à la première tranche d'âge qui est la seule à obtenir un résultat significatif (*Test exact de Fisher* = 5,500 ; *p-value* = 0,046). Pour l'empreinte du cylindre, elle n'est confirmée qu'à la troisième tranche d'âge (*Test exact de Fisher* = 5,194 ; *p-value* = 0,046). Celle relative à la coupe transversale de la sphère ne s'observe finalement à aucune tranche d'âge même si les résultats sont proches du seuil de significativité pour la première tranche d'âge et la troisième. Enfin, pour l'exercice de la coupe transversale du cylindre, une dépendance significative est observée à la première ($\chi^2 = 6,286$; *p-value* = 0,012) et à la deuxième tranche d'âge ($\chi^2 = 7,216$; *p-value* = 0,007). S'ajoutent à cela deux résultats significatifs observés pour certains exercices à certaines tranches d'âge mais qui n'ont pas été mis en évidence sur l'ensemble du public cible. C'est le cas pour la coupe oblique du cône à la deuxième tranche d'âge ($\chi^2 = 5,855$; *p-value* = 0,016) et pour la coupe oblique de la sphère à la troisième tranche ($\chi^2 = 9,345$; *p-value* = 0,002). Pour tous les autres cas, il est possible

de considérer que la réussite est indépendante du groupe d'appartenance puisque des résultats non significatifs sont obtenus, même si plusieurs apparaissent à la limite de la significativité. Notons par ailleurs que, pour tous les cas où un résultat significatif est obtenu, les taux de réussite s'avèrent plus élevés dans le groupe 3.

Concernant la comparaison des groupes 2 et 4, la dépendance significative au groupe pour les performances à l'exercice de l'empreinte de la sphère s'observe finalement uniquement à la première tranche d'âge (*Test exact de Fisher* = 7,569 ; *p-value* = 0,010) et à la dernière ($\chi^2 = 6,930$; *p-value* = 0,008). Celle relative à la coupe oblique du cône n'apparaît qu'à la dernière tranche d'âge ($\chi^2 = 5,306$; *p-value* = 0,021). Celle relative à la coupe transversale du cylindre ne s'observe quant à elle qu'à la deuxième tranche ($\chi^2 = 4,087$; *p-value* = 0,043). Enfin, celle relative à l'empreinte du cylindre n'est observée finalement à aucune tranche d'âge, même si les résultats sont proches du seuil de significativité pour la première tranche d'âge. Un résultat significatif a aussi été observé pour un exercice à une tranche d'âge malgré l'absence d'une différence significative pour l'ensemble du public cible. Il s'agit du cas de l'exercice de la coupe oblique du cylindre pour lequel un résultat significatif apparaît à la dernière tranche d'âge ($\chi^2 = 5,299$; *p-value* = 0,021). Pour tous les cas précédemment cités pour lesquels un résultat significatif est obtenu, les taux de réussite s'avèrent plus élevés dans le groupe 4. Dans tous les autres cas des résultats non significatifs sont observés (avec parfois des résultats proches du seuil de significativité), et permettent de considérer une indépendance du taux de réussite au groupe expérimental.

En résumé, les analyses inférentielles comparatives indiquent qu'à la majorité des tranches d'âge, des résultats non significatifs sont observés ce qui indique que les taux de réussite ne sont pas dépendants de la dimensionnalité du support entre matériel virtuel et physique. Des résultats significatifs n'émergent au total que dans sept des vingt exercices et uniquement à une ou deux tranches d'âge, variables d'un exercice à l'autre. De plus, lorsqu'ils sont présents, ils s'avèrent tous en faveur du matériel physique. Pour les treize autres exercices, aucun effet du support sur les taux de réussite aux différentes tranches d'âge n'est constaté. C'est notamment le cas pour l'ensemble des exercices impliquant le cube ou l'anneau mais aussi pour chacun des exercices de coupe longitudinale. De tels résultats invitent à nuancer les observations réalisées antérieurement concernant la dépendance de la réussite des exercices à la dimensionnalité des supports puisque cette dépendance ne peut pas être généralisée à chaque tranche d'âge.

Les analyses inférentielles comparatives menées, à chaque tranche d'âge, entre le groupe confronté à du matériel physique à manipuler et celui confronté à du matériel physique à observer sont placées en annexe (Annexe 44). Elles indiquent que les résultats significatifs obtenus aux *tests du Khi-carré* sont également minoritaires puisqu'ils ne s'observent que dans quatre des vingt exercices et à une seule tranche d'âge, soit à 10-11 ans, soit à 12-13 ans. Si une dépendance des taux de réussite à la manipulation avait pu être mise en évidence sur le public cible complet pour l'exercice de la coupe oblique de la sphère, les analyses par tranche d'âge montrent qu'un résultat significatif apparaît uniquement à la tranche constituée des adolescents âgés de 12 à 13 ans (*Test exact de Fisher* = 5,194 ; *p-value* = 0,046). La dépendance à la manipulation pour cet exercice ne s'observe donc qu'à la troisième tranche d'âge. Pour l'exercice d'empreinte de l'anneau, pour qui un effet de manipulation était aussi constaté sans la prise en compte des tranches d'âge, un résultat significatif est obtenu à la deuxième tranche d'âge (*Test exact de Fisher* = 5,151 ; *p-value* = 0,050). Un résultat proche du seuil de significativité est aussi observé pour la troisième. Pour les deux autres exercices, en l'occurrence celui de la coupe oblique du cube et celui de l'empreinte du cône, des résultats non significatifs s'observent finalement à l'ensemble des tranches d'âge malgré le résultat significatif obtenu sur l'ensemble du public cible. Notons cependant que, pour l'empreinte du cône, un résultat à la limite de la significativité est observé à la première tranche d'âge. Par ailleurs, pour deux exercices pour lesquels un résultat non significatif a été obtenu sur l'ensemble du public cible, des résultats significatifs apparaissent à une des tranches d'âge. C'est le cas de l'exercice de la coupe longitudinale du cône pour lequel un résultat significatif apparaît, mais uniquement à la deuxième tranche d'âge ($\chi^2 = 4,464$; *p-value* = 0,035). C'est également le cas pour la coupe transversale de l'anneau mais cette fois à la troisième tranche d'âge seulement ($\chi^2 = 4,560$; *p-value* = 0,033). Comme cela a pu être présenté plus tôt, des cas de résultats proches du seuil de significativité sont aussi observés. Pour tous les cas de résultats significatifs excepté pour le dernier évoqué (exercice de coupe transversale de l'anneau), les taux de réussite apparaissent plus élevés dans le groupe 3. De tels résultats invitent à considérer qu'à l'ensemble des tranches d'âge, la manipulation du matériel physique impacte minoritairement la réussite aux exercices de visualisation réalisés. Ce constat est donc similaire à celui réalisé face à du matériel virtuel, même si les quelques résultats significatifs ici observés ne sont pas rencontrés face à du matériel virtuel.

10.5.9. Discussion spécifique à la question 2.4°

10.5.9.1. La visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles : une habileté proche de l'habileté exercée dans l'espace sensible

La mise en parallèle des résultats obtenus dans le groupe 1 et de ceux obtenus dans l'étude de Duroisin (2015), a permis d'identifier de nombreuses similitudes dans la maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale dans l'environnement virtuel et dans l'espace sensible. Parmi ces derniers, il est possible d'évoquer la capacité des enfants âgés de 8 ans à mettre en œuvre certaines opérations mentales ainsi que les difficultés observées encore à l'âge de 14 ou 15 ans pour certaines opérations mentales, la présence d'un effet de l'objet 3D ou du type d'opération ou encore la présence de certaines difficultés spécifiques observées pour certains exercices comme l'empreinte de la sphère ou la coupe oblique du cube. Pour autant, les tendances communes observées ne signifient pas forcément l'observation de résultats équivalents.

Les résultats obtenus au travers de cette étude, grâce à la perspective comparative utilisée, semblent aller dans le sens d'une proximité globale entre les capacités de mise en œuvre de cette habileté spatiale dans l'espace sensible et en environnement virtuel. En effet, même si le score moyen obtenu au départ de matériel physique pour l'échantillon complet s'avère supérieur à celui observé face à des représentations virtuelles, la comparaison inférentielle de ces scores permet d'observer une absence de différence significative entre les résultats obtenus dans les deux modalités. Il en est de même lorsqu'on observe les scores obtenus à chaque tranche d'âge pour la quasi-totalité d'entre elles. Les différences entre les deux modalités ne sont donc pas suffisamment marquées, que le matériel soit à observer ou qu'il soit à manipuler. Face à du matériel physique pouvant ou non être manipulé, comme face à des représentations virtuelles, la maîtrise de l'habileté est majoritairement partielle et elle est marquée par des différences individuelles. À l'âge de 8 ans, les enfants arrivent à mettre en place certaines opérations mentales mais ne maîtrisent pas totalement l'habileté. Ces capacités s'améliorent avec l'âge même si, à l'âge de 15 ans, des difficultés à mettre en place certaines opérations mentales restent observées. Tous ces constats apparaissent donc similaires à ceux mis en évidence par les quelques études antérieures ayant évalué l'habileté au départ d'exercices semblables proposés sur du matériel physique auprès d'enfants et/ou d'adolescents (Duroisin, 2015, Ratliff *et al.*, 2010). Nous ne reviendrons pas ici sur les raisons pouvant expliquer ces différences

individuelles ainsi que cette évolution des capacités avec l'âge, déjà évoquées au point 10.2.10.

En dépit de la mise en œuvre d'opérations mentales sur les objets 3D exigeant déjà une certaine charge cognitive (Hawes & Ansari, 2020), les enfants et les adolescents arrivent globalement à mettre en œuvre ces opérations de façon similaire, et ce même si le matériel physique entraîne une charge cognitive moins élevée que le matériel virtuel (Ayres & Paas, 2009). La potentielle surcharge associée à cette modalité de représentation ainsi que la nécessité de reconstruction mentale de la 3D qu'elle occasionne avant de mener l'opération mentale évaluée (Vivian *et al.*, 2014) ne semblent donc globalement pas affecter le niveau de maîtrise de l'habileté. Un tel constat invite, contrairement aux investigations menées par rapport à l'habileté de perception visuelle, à rejeter l'hypothèse de Rose et Foreman (1999) qui suspectait la possible existence de différences entre la mise en œuvre d'opérations mentales dans l'espace sensible et en environnement virtuel. Ce constat rejoint d'ailleurs les observations de Battista et Clements (1996) comparant les résultats à des tâches spatiales menées par des adultes sur du matériel physique et des représentations virtuelles. Notons cependant que, pour des raisons présentées précédemment (*cf.* 10.2.10.4), il est possible de considérer que les difficultés perceptives constatées au départ de représentations virtuelles n'ont pas ou peu d'impact sur la résolution des tâches ici demandées. Il s'agirait alors, afin de confirmer l'hypothèse de Rose et Foreman (1999), de se placer dans une perspective comparative pour d'autres tâches de visualisation spatiale dans lesquelles la perception inadéquate de l'objet 3D, en particulier celle relative à la modification de la hauteur puisque c'est la difficulté la plus couramment observée, occasionne une réponse différente de celle fournie en cas de perception adéquate.

Malgré cette proximité globale au niveau des statistiques inférentielles, les statistiques descriptives indiquent tout de même que les scores observés au départ de matériel physique sont plus élevés que les scores observés au départ de représentations virtuelles, ce qui suit la même tendance que pour l'habileté de perception. De plus, les statistiques inférentielles n'indiquent pas de différences significatives sur les échantillons complets et l'ensemble des exercices, des investigations complémentaires permettent de nuancer ce propos.

Des tendances communes restent observées quelle que soit la dimensionnalité du support. C'est le cas des hauts taux de réussite associés aux empreintes du cube, du

cylindre ou du cône, ou des fortes difficultés observées pour les deux derniers exercices d'empreinte et pour l'exercice de coupe longitudinale de l'anneau ou du cube. Malgré cela, pour quelques exercices et à certaines tranches d'âge, des différences significatives émergent entre les deux modalités, soulignant une dépendance des performances à la dimensionnalité du support. Quand des différences sont observées, elles sont systématiquement en faveur du matériel physique.

En particulier, les analyses inférentielles montrent que les différences semblent concerner l'empreinte du cylindre et sa coupe transversale, que le matériel soit ou non à observer. L'analyse des erreurs types permet de mettre en lumière que les erreurs principales observées pour ces objets 3D face à du matériel virtuel, à savoir le dessin d'un ovale, restent toujours les erreurs principales leur taux est plus faible face à du matériel physique. Cela suggère donc que les enfants et les adolescents arrivent davantage à prendre en considération la troisième dimension face à du matériel physique en comparaison aux représentations virtuelles, et notamment à dépasser la perspective égocentrée (Cohen & Hegarty, 2007). Quand le matériel est manipulé, on observe également des différences au niveau de l'exercice d'empreinte avec une plus forte absence de prise en compte de la 3^{ème} dimension sont plus souvent observées face à des représentations virtuelles que face à du matériel physique, ce qui semble être cohérent avec la nature même du stimulus proposé. Toutefois, ce type de constat ne semble pas pouvoir être généralisé pour l'ensemble des exercices. Il s'agit donc de rester prudent dans la généralisation de ce constat. De plus, cela ne signifie pas que ce type d'erreur est systématiquement absente face à du matériel physique, comme l'avait aussi observé Duroisin (2015). Les études de Gori *et al.* (2024) ou de Ratliff *et al.* (2010) ont aussi intégré cette erreur type dans les propositions des tâches de reconnaissance mais les auteurs n'ont pas présenté les résultats détaillés relatifs à chaque proposition, ce qui nous empêche de vérifier la place qu'occupe ce type de pensée dans l'espace sensible.

Par ailleurs, des différences significatives sont aussi observées, quand le matériel peut être manipulé, à l'exercice de coupe transversale de la sphère. L'erreur relative à la confusion entre le point de vue extérieur (en l'occurrence le dessin d'un demi-cercle) et intérieur (la forme attendue de la coupe) est moins observée face à du matériel physique que face à du matériel virtuel. Cette observation peut aussi être réalisée dans d'autres exercices, même si les différences ne sont pas significatives. Cela suggère que,

face à du matériel physique, les individus pourraient davantage prendre conscience que la forme de la coupe, c'est-à-dire le point de vue intérieur de l'objet 3D n'est pas forcément identique au point de vue extérieur de l'objet 3D. Pour autant, il s'agit de rester prudent vis-à-vis de cette affirmation également puisque ce type d'erreur n'est pas systématiquement moins fréquent face à du matériel physique. Il continue d'être observé face à du matériel physique, comme le mettaient déjà en évidence Piaget et Inhelder (1948), et est même souvent le type d'erreur le plus fréquent.

Quand le matériel ne peut être manipulé, des différences significatives concernant le cas de la coupe oblique du cône sont également observées. Pour cet objet, les participants sont moins nombreux à considérer que la forme de la coupe oblique est un rond, c'est-à-dire une forme similaire à la forme de la coupe transversale et congruente à la forme de l'objet 3D. Voir le matériel physique peut donc avoir aidé certains participants à se rendre compte de ces aspects. On observe d'ailleurs un même résultat pour le cube et le cylindre, même si la réussite de ces deux exercices est indépendante de la dimensionnalité du support. Pour autant, cette erreur type reste observée chez de nombreux participants même au départ de matériel physique, comme avait pu le relever Duroisin (2015). De plus, quand le matériel peut être manipulé, elle est parfois autant voire plus fréquente face à du matériel physique que face à des représentations virtuelles.

Enfin, la dernière différence significative observée se rapporte à l'exercice d'empreinte de la sphère quand le matériel ne peut être manipulé. Cet exercice pose de fortes difficultés dans les deux modalités, mais les enfants sont plus nombreux à se rendre compte que l'empreinte de la sphère est un point ou un petit cercle. À ce propos, il est possible de suspecter que le fait de voir l'objet 3D posé sur un support peut avoir aidé à s'imaginer l'empreinte, ce qui n'est pas le cas dans l'environnement virtuel où le solide est en lévitation. Cette vision du solide sur le support invite à observer son point de contact du solide avec ce dernier et donc de considérer que l'empreinte n'est pas forcément un rond de taille importante mais plutôt un rond très petit, voire un point. Si nous suspicions, au point 10.2.10, que cette forte difficulté pouvait être expliquée par les caractéristiques de l'environnement, il s'agit ici de mettre en avant que cet environnement pourrait avoir en effet engendré davantage de difficultés. Ce type d'opération mentale reste problématique dans l'espace sensible également (Duroisin, 2015). De plus, des difficultés équivalentes sont observées entre les deux types de support pour l'empreinte de l'anneau, sans doute puisque, même au départ de matériel

physique à observer, il est difficile de se rendre compte des points de contact entre l'objet et le support, notamment suite au fait qu'il est difficile de bien observer la surface intérieure de l'anneau.

Sur le score total, il ne semble pas y avoir d'effet de la dimensionnalité du support sur le niveau global de maîtrise. Pour autant, de meilleurs résultats sont observés à certains items quand l'évaluation porte sur du matériel physique. Ces résultats sont en cohérence avec les propos de plusieurs auteurs Ratliff *et al.* (2010) qui considèrent ce type de matériel comme plus adapté lors de l'évaluation de la visualisation spatiale notamment auprès d'enfants, même si les auteurs l'ont comparé avec des représentations planes et n'ont pas investigué le cas des représentations virtuelles. De plus, ils apparaissent cohérents avec les propos de Bakó (2003) portant sur les adolescents, qui, dans leur étude comparative, ont aussi mis en évidence des différences de performances dans l'espace sensible et en environnement virtuel chez les adolescents. Si l'analyse des erreurs types permet de suggérer que ces meilleures performances pourraient être dues à plusieurs raisons (prise en compte plus importante de la 3D, prise de conscience de l'absence d'équivalence entre la vue interne de l'objet et le point de vue extérieur, caractéristiques de l'environnement virtuel...), ceux-ci invitent surtout à rester prudent quant à ces interprétations étant donné qu'elles ne semblent pas systématiquement se généraliser sur les autres objets 3D. Il s'agirait alors d'investiguer de manière approfondie ces différences en interrogeant les enfants sur les stratégies utilisées pour résoudre les exercices dans l'espace sensible ou en environnement virtuel.

10.5.9.2. La visualisation spatiale dans l'espace sensible, une habileté non impactée par la manipulation des stimuli, comme dans l'environnement virtuel

Enfin, pour ce qui est de l'influence de la manipulation dans l'espace sensible, les résultats semblent suivre la même tendance que ceux obtenus dans l'environnement virtuel. Il semble en effet que la manipulation des stimuli n'influence globalement pas les capacités de visualisation spatiale des objets 3D, et ce à chacune des tranches d'âge. Des difficultés à réaliser des tâches de visualisation spatiale ont pu être mises en évidence au départ de matériel physique à observer. De telles difficultés sont aussi confirmées quand le matériel physique est manipulé. Comme le revendique Baroody (1989), la manipulation du matériel n'est pas une condition suffisante pour garantir la réussite de tâches de visualisation.

Les résultats obtenus par Gori *et al.* (2024), soulignant un apport de la manipulation physique des stimuli avant la résolution d'exercices de coupe chez les enfants âgés de 7 à 10 ans, apparaissent donc globalement en contraction avec ceux ici observés. Pour autant, les auteurs ont évalué l'habileté avec des solides coupés par un plan représenté par une feuille épaisse traversant l'objet 3D. De ce fait, la manipulation peut avoir permis de toucher l'intersection entre le plan de coupe et le solide, ce que ne permet pas la modalité ici utilisée, dans laquelle seul un couteau est fourni et doit être déposé contre l'objet 3D.

Malgré cette tendance globale à l'absence d'effet de manipulation, l'analyse des résultats par exercice permet de nuancer cette observation. Pour deux des quinze exercices de coupe, les résultats sont dépendants de la manipulation du matériel physique. C'est le cas pour la coupe oblique du cube et de la sphère. Pour les deux exercices, les participants sont en réalité plus nombreux à être conscients, quand le matériel peut être manipulé, que le point de vue extérieur diffère du point de vue intérieur de l'objet 3D. Pour autant, il ne semble pas possible de généraliser ce constat à l'ensemble des exercices. De plus, pour la sphère, la manipulation semble permettre de rendre davantage conscient du fait que l'orientation du couteau n'impacte pas la forme de la coupe pour cet objet puisque les élèves sont moins nombreux à avoir dessiné un ovale.

Des différences sont par ailleurs observées pour deux exercices d'empreinte, en faveur du groupe autorisé à manipuler le matériel : l'empreinte du cône et de l'anneau. Pouvoir toucher l'objet de ces mains et observer l'objet du dessous (ce qui n'est pas montré dans le groupe confronté à du matériel à observer) peut sans doute avoir aidé à s'imaginer l'empreinte de l'objet. De manière étonnante, un tel résultat n'est pas observé pour la sphère, dont l'empreinte pose de fortes difficultés. Il n'est pas observé non plus pour les deux derniers objets 3D (cube et cylindre), qui, eux, obtiennent des taux de réussite très élevés face à du matériel physique.

10.6. Réponse à la question de recherche 2.5° : Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D

Afin de répondre à cette ultime question de recherche, le niveau de maîtrise de l'habileté au sein du groupe 2, confronté à des représentations virtuelles à observer, est comparé au niveau de maîtrise au départ de successions de représentations 2D.

10.6.1. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D (toutes tranches d'âge confondues)

Comme le présente la Figure 48, le score moyen obtenu au sein du groupe 2 (10,69 sur 20) apparaît plus élevé que celui observé dans le groupe 6 (9,82 sur 20). Pour autant, dans les deux groupes, la disparité des scores est élevée. Les minimums observés valent 1 sur 20 dans les deux groupes et les maximums valent respectivement 19 et 20 sur 20. Malgré cela, il apparaît néanmoins, comme l'illustrent les premiers et troisièmes quartiles, que 50% ont un score compris entre 8 et 14 sur 20 dans le groupe 2 et entre 6 et 14 sur 20 dans le groupe 6. La médiane apparaît elle aussi plus élevée dans le groupe 2 (12 sur 20) que dans le groupe 6 (10 sur 20). Dans les deux modalités, l'habileté est donc le plus souvent partiellement maîtrisée avec une forte hétérogénéité des performances.

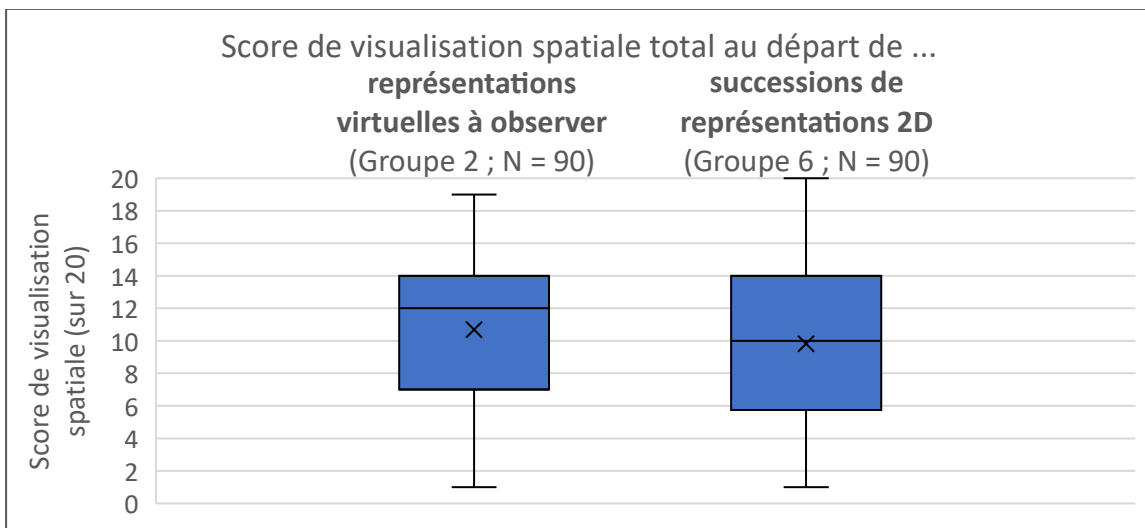


Figure 48 : Répartition du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D

Le test *U de Mann-Whitney* utilisé pour comparer les scores observés dans ces deux groupes indique que les scores de ces derniers peuvent être considérés comme

statistiquement équivalents. Des résultats non significatifs sont obtenus à ce test ($U = 3577,000$; $p\text{-value} = 0,175$). De ce fait, il est possible de considérer que de manière globale, c'est-à-dire sans prendre en compte les types d'exercice ou les objets 3D sur lesquels elle est évaluée, les capacités de visualisation spatiale exercées au départ de représentations virtuelles dynamiques sont statistiquement équivalentes aux mêmes capacités exercées au départ de successions de représentations statiques.

10.6.2. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D selon l'âge

Afin de se faire une première idée de l'évolution des scores de visualisation avec l'âge, la Figure 49 présente les répartitions des scores obtenus (boîtes à moustaches) à chaque tranche d'âge pour les deux groupes concernés ainsi que les scores moyens observés à chacune d'elles. Cette figure permet d'observer que les scores moyens obtenus face à des représentations virtuelles s'avèrent plus élevés que ceux obtenus face aux suites de représentations 2D à chaque tranche d'âge excepté à la deuxième. Les analyses inférentielles menées ci-après permettront de statuer sur ces différences. De plus, dans les deux groupes, une disparité des scores est présente dans les premières tranches d'âge, avec des écarts importants observés entre les scores les plus faibles et les plus forts. Toutefois, comme l'illustre la Figure 49, cette disparité tend à se réduire face à des représentations virtuelles ce qui n'est pas forcément le cas face à des successions de représentations 2D.

De plus, dans les deux groupes, les capacités de visualisation augmentent entre les tranches d'âge, ce qui invite à considérer que, dans les deux modalités, cette capacité se développe avec l'âge. Les indices de corrélation calculés entre le score total de visualisation et l'âge en jour permettent de mettre en évidence des corrélations pouvant être qualifiées de positives et fortes dans les deux modalités. La corrélation apparaît cependant plus élevée dans le groupe 2 ($r = 0,505$) que dans le groupe 6 ($r = 0,411$). Afin de statuer sur la différence de corrélation entre les deux groupes, la taille d'effet (q de Cohen) a été calculée entre les deux indices de corrélation obtenus. D'une valeur de 0,119, cet indice permet de considérer l'existence d'un effet, bien que faible, du groupe, et donc du dynamisme du support d'évaluation, sur la manière dont les performances en visualisation se développent avec l'âge.

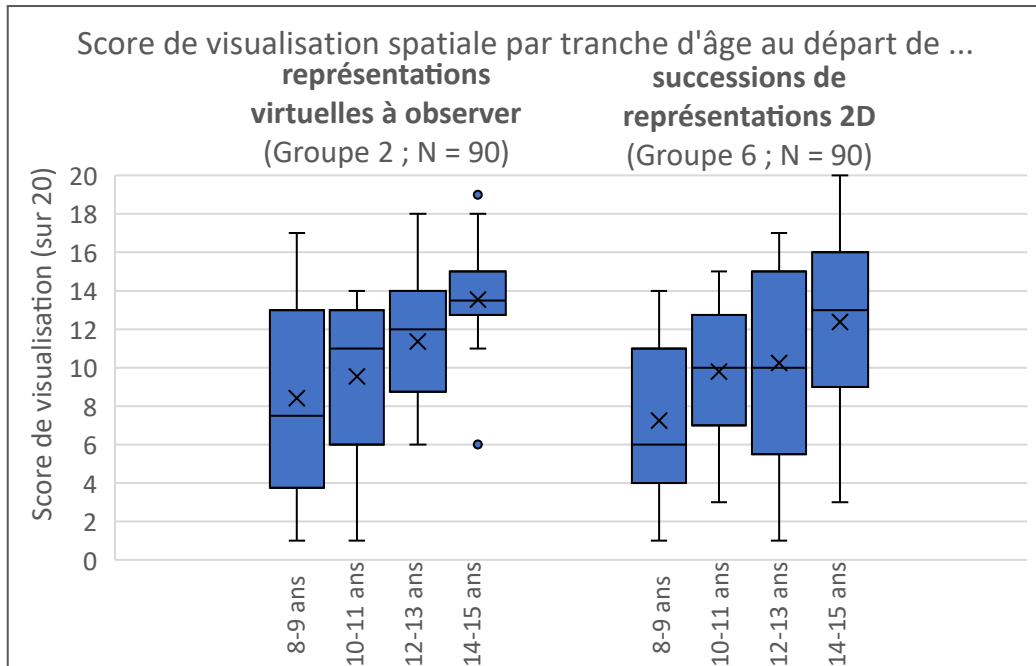


Figure 49 : Évolution des répartitions du score de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles à observer et de successions de représentations 2D par tranche d'âge

Les analyses inférentielles (*U de Mann-Whitney*) appliquées à chacune des tranches d'âge pour comparer les scores de ces deux groupes sont présentées dans le Tableau 137. Ces dernières indiquent que les différences entre les scores des groupes 2 et 6 sont non significatives à chacune des tranches d'âge. Il est constaté que les enfants et les adolescents arrivent, à chacune des tranches d'âge investiguées, à faire preuve de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles dynamiques comme au départ de successions de représentations 2D.

Au vu de ces résultats, il est donc possible de considérer que l'absence de différence entre les groupes 2 et 6, qui permettait de souligner l'absence d'influence du caractère dynamique du support sur la maîtrise de la visualisation, peut être élargie à chacune des tranches d'âge.

Tableau 137 : Comparaison des scores de visualisation (sur 20) entre G2 et G6 à chaque tranche d'âge : *U de Mann-Whitney (U)* et *p-value (p)*

8-9 ans	10-11 ans	12-13 ans	14-15 ans
$U = 227,500$	$U = 285,500$	$U = 207,000$	$U = 208,500$
$p = 0,420$	$p = 0,959$	$p = 0,559$	$p = 0,582$

Réponse à la question 2.5° (Étude 2)

10.6.3. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D selon l'objet 3D

Si le score moyen total observé dans le groupe 6 et dans le groupe 2 a pu être décrit comme équivalent, les résultats des tests *U de Mann-Whitney* (Tableau 138) appliqués sur les scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D pour comparer les deux groupes tendent à montrer cela également. Ces derniers s'avèrent tous non significatifs. Que les tâches de visualisation spatiale portent sur le cube, le cône, la sphère, le cylindre ou l'anneau, les enfants et les adolescents arrivent donc à faire preuve de visualisation spatiale au départ de représentations 2 ½ D, donc dynamiques, comme au départ de successions de représentations 2D.

Tableau 138 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G2 et G6 : *U de Mann-Whitney (U)* et *p-value (p)*

Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
$U = 3752,000$ $p = 0,360$	$U = 3690,000$ $p = 0,289$	$U = 3789,000$ $p = 0,428$	$U = 3786,000$ $p = 0,434$	$U = 3627,500$ $p = 0,187$

10.6.4. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D selon le type d'exercice

Une proximité des scores entre les deux groupes pour chaque type d'exercice est également confirmée par les tests *U de Mann-Whitney* utilisés pour comparer chacun de ces scores entre les deux groupes. Ces tests inférentiels (Tableau 139) indiquent que, pour chaque type d'exercice, une différence non significative est observée entre les scores du groupe 2 et du groupe 6. Une différence à la limite de la significativité est toutefois observée pour le score aux exercices de coupe longitudinale ($U = 3431,000$; $p\text{-value} = 0,072$), avec un score moyen plus faible dans le groupe 6 (2,32 sur 5) que dans le groupe 2 (2,76 sur 5). Le caractère dynamique ne semble donc pas influencer la réussite aux différents types d'exercice évaluant l'habileté de visualisation spatiale.

Tableau 139 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G2 et G6 : *U de Mann-Whitney (U)* et *p-value (p)*

Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	Coupe oblique
$U = 3871,500$ $p = 0,581$	$U = 3826,000$ $p = 0,506$	$U = 3431,000$ $p = 0,072$	$U = 3590,000$ $p = 0,173$

10.6.5. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D selon l'âge et l'objet 3D

Au même titre que des analyses inférentielles ont été réalisées pour comparer les scores par objets 3D obtenus dans les groupes 2 et 6, mettant en évidence une proximité entre les deux groupes pour chaque objet 3D, une même démarche est mise en œuvre en prenant appui sur les scores par tranche d'âge. Les résultats des tests *U de Mann-Whitney* utilisés pour comparer les scores des deux groupes à chaque tranche d'âge sont présentés au sein du Tableau 140. Ces derniers ne montrent aucune différence significative entre les deux groupes. Il est donc possible de considérer que, pour chaque tranche d'âge, les scores obtenus pour chacun des objets 3D par les enfants et les adolescents confrontés à des représentations 2 ½ D à observer sont équivalents à ceux obtenus par les enfants et les adolescents confrontés à des successions de représentations 2D. Dès lors, les résultats observés en prenant en compte uniquement la variable « objets 3D », soulignant que, sur l'ensemble du public cible le caractère dynamique du support n'impacte pas les performances en visualisation spatiale, peuvent être considérés pour chacune des tranches d'âge.

Tableau 140 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque objet 3D (sur 4) entre G2 et G6 : *U de Mann-Whitney (U)* et *p-value (p)*

	Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
8-9 ans	$U = 223,500$ $p = 0,346$	$U = 236,500$ $p = 0,534$	$U = 246,500$ $p = 0,682$	$U = 219,000$ $p = 0,306$	$U = 203,000$ $p = 0,141$
10-11 ans	$U = 275,000$ $p = 0,771$	$U = 281,000$ $p = 0,880$	$U = 286,500$ $p = 0,974$	$U = 257,500$ $p = 0,511$	$U = 273,000$ $p = 0,711$
12-13 ans	$U = 194,500$ $p = 0,339$	$U = 222,500$ $p = 0,831$	$U = 192,000$ $p = 0,323$	$U = 207,500$ $p = 0,546$	$U = 224,500$ $p = 0,865$
14-15 ans	$U = 224,000$ $p = 0,852$	$U = 190,000$ $p = 0,291$	$U = 205,500$ $p = 0,474$	$U = 215,000$ $p = 0,677$	$U = 208,000$ $p = 0,549$

Outre la proximité des scores, les indices de corrélation (*de Spearman*) calculés entre le score relatif à chaque objet 3D et l'âge en jour mettent en lumière, assez logiquement, une proximité dans la manière dont la capacité se développe avec l'âge dans les différentes modalités. Ces indices, présentés dans le Tableau 141, permettent de relever des corrélations positives dans les deux groupes pour chacun des objets 3D. Elles semblent cependant d'une ampleur plus faible pour le cube, qui est l'objet, toutes tranches d'âge confondues, obtenant le score le plus élevé. La figure montre par ailleurs que ce n'est pas forcément le cas à l'ensemble des tranches d'âge et que c'est surtout

à la première tranche d'âge que le score relatif à cet objet se distingue de celui observé pour les autres objets 3D. Si une corrélation positive est observée dans les deux groupes pour chaque objet 3D, son ampleur varie parfois entre les groupes. C'est le cas principalement pour la sphère, pour qui une amélioration plus marquée est observée avec l'âge face à des représentations virtuelles, donc dynamiques ($\rho = 0,412$), que face à une suite de représentations 2D ($\rho = 0,270$).

Tableau 141 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par objet (sur 4) au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p-value (p)

	Cube	Cône	Sphère	Cylindre	Anneau
G2 : obs. 2½D (N = 90)	$\rho = 0,222$ $p = 0,036^*$	$\rho = 0,451$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,412$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,441$ $p = 0,007^{**}$	$\rho = 0,388$ $p < 0,001^{**}$
G6 : obs. 2D's (N = 90)	$\rho = 0,215$ $p = 0,044^*$	$\rho = 0,339$ $p = 0,001^{**}$	$\rho = 0,270$ $p = 0,010^{**}$	$\rho = 0,410$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,441$ $p < 0,001^{**}$

10.6.6. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D selon l'âge et le type d'exercice

Les tests *U de Mann-Whitney* utilisés pour comparer de manière inférentielle les scores obtenus au sein des deux groupes pour chaque type d'exercice indiquent tous des résultats non significatifs (Tableau 142). Les différences suspectées préalablement concernant le cas des exercices de coupe longitudinale ne sont donc pas suffisantes pour être considérées comme statistiquement différentes. Dès lors, le constat antérieur relatif à l'équivalence des performances à chaque type d'exercice sur l'ensemble du public cible peut être admis à chacune des tranches d'âge.

Tableau 142 : Comparaison des scores de visualisation relatifs à chaque type d'exercice (sur 5) entre G2 et G6 à chaque tranche d'âge : U de Mann-Whitney (U) et p-value (p)

	Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	Coupe oblique
8-9 ans	$U = 213,500$ $p = 0,243$	$U = 253,000$ $p = 0,805$	$U = 203,500$ $p = 0,175$	$U = 231,500$ $p = 0,452$
10-11 ans	$U = 267,000$ $p = 0,633$	$U = 282,500$ $p = 0,907$	$U = 257,500$ $p = 0,522$	$U = 250,000$ $p = 0,401$
12-13 ans	$U = 219,500$ $p = 0,766$	$U = 202,000$ $p = 0,461$	$U = 182,500$ $p = 0,231$	$U = 219,000$ $p = 0,764$
14-15 ans	$U = 217,000$ $p = 0,693$	$U = 229,000$ $p = 0,956$	$U = 186,500$ $p = 0,265$	$U = 218,000$ $p = 0,745$

En plus de la proximité entre chaque score, les indices de corrélation calculés entre le score par type d'exercice et l'âge en jour (*corrélation de Spearman*) montrent que, dans les deux groupes, les scores à chaque type d'exercice augmentent avec l'âge. Aucun de ces indices de corrélation, compilés au sein du Tableau 143, ne s'avère négligeable, ni dans le groupe 2, ni dans le groupe 6. L'ampleur de ces corrélations varie cependant parfois entre les groupes. Si elle est positive et modérée pour les exercices de coupe transversale et de coupe oblique dans les deux groupes, elle est plus marquée dans le groupe 2 que dans le groupe 6 pour les exercices de coupe longitudinale et la situation inverse est observée pour les empreintes. Malgré ces divergences, la tendance reste tout de même, dans les deux groupes, à une amélioration des capacités de visualisation avec l'âge quel que soit le type d'exercice.

Tableau 143 : Corrélation entre les scores de visualisation spatiale par type d'exercice (sur 5) au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes et l'âge (en jour) : coefficient de corrélation de Spearman (ρ) et p -value (p)

	Empreinte	C. transversale	C. longitudinale	C. oblique
G2 : obs. 2½D (N = 90)	$\rho = 0,293$ $p = 0,005^{**}$	$\rho = 0,391$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,431$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,367$ $p < 0,001^{**}$
G6 : obs. 2D's (N = 90)	$\rho = 0,358$ $p = 0,001^{**}$	$\rho = 0,391$ $p < 0,001^{**}$	$\rho = 0,270$ $p = 0,010^{**}$	$\rho = 0,333$ $p = 0,001^{**}$

10.6.7. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D selon le type d'exercice et l'objet 3D (résultats par exercice)

10.6.7.1. Analyses des taux de réussite

Finalement, des analyses sont également menées pour chacun des exercices. Ainsi, la Figure 50 présente les taux de réussite obtenus pour chaque type d'exercice dans les deux groupes ici investigués. On y constate que, la plupart du temps, des résultats proches sont observés entre les deux groupes. Quand les différences sont plus importantes, elles sont toujours à l'avantage des participants du groupe confronté à des représentations virtuelles dynamiques. Toutefois, ces différences entre les deux groupes restent majoritairement de faible ampleur car elles ne dépassent pas 10% pour la totalité des exercices, ce que confirmeront les analyses inférentielles ultérieures. Cette proximité des résultats entre les deux groupes permet donc de confirmer, pour le groupe 6, des observations réalisées préalablement sur le groupe 2 (cf. 10.3.7.1).

Parmi celles-ci, il est possible de citer la présence de différences marquées entre exercices, avec des mêmes tendances quant aux exercices posant le moins de difficultés (ex. empreinte du cube) et quant à ceux posant les plus fortes difficultés (ex. coupe oblique du cube et de l'anneau). De plus, dans le groupe 6 comme dans le groupe 2, des fortes différences peuvent être constatées entre les objets pour chaque type d'exercice, mais aussi entre les types d'exercice pour chaque objet.

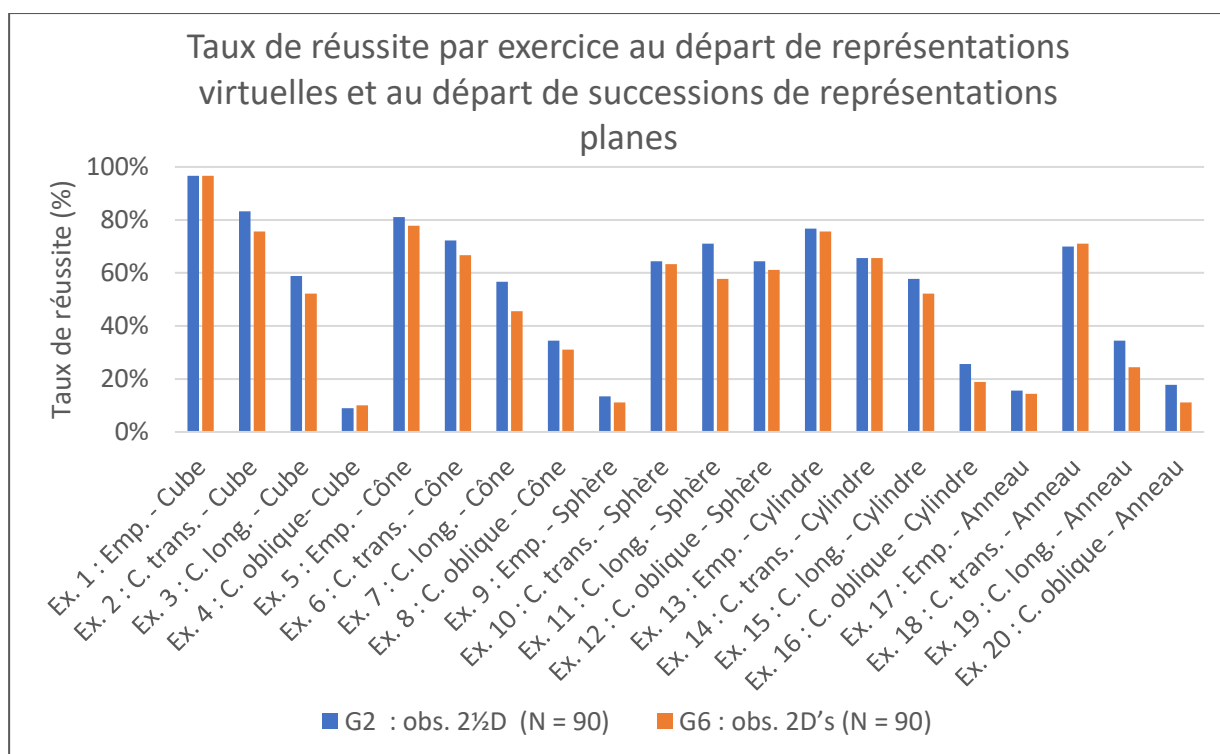


Figure 50 : Taux de réussite à chaque exercice de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes







Afin de vérifier l'indépendance du taux de réussite de chacun des exercices au groupe d'appartenance quand les groupes 2 et 6 sont pris en compte, des *tests du Khi-carré* (ou alternative) sont appliqués. Les résultats des tests inférentiels (Annexe 46) sont tous non significatifs, ce qui signifie que la réussite aux exercices est indépendante du groupe et donc du dynamisme du support utilisé.

10.6.7.2. Analyses des erreurs types

Outre la proximité observée entre les taux de réussite à chaque exercice, l'analyse des erreurs types permet de relever des similitudes entre les deux groupes, mais aussi des divergences.

Le Tableau 144 présente les résultats observés pour le cube. Pour le premier exercice, aucune erreur type ne se distingue dans les groupes 2 et 6 dans la mesure où cet exercice est réussi par la quasi-totalité des participants. Pour l'exercice de coupe transversale, comme pour l'exercice de coupe longitudinale, une seule et même erreur type se distingue dans chacun des groupes : le dessin d'un rectangle. Enfin, pour l'exercice de coupe oblique d'un carré, la même erreur domine dans les deux groupes : le dessin d'un carré. Elle est cependant plus fréquente dans le groupe 6. Elle est commise par au moins trois participants sur 10 dans chaque groupe. D'autres erreurs semblent émerger dans les deux groupes : le dessin d'un trapèze rectangle, d'un triangle rectangle et d'un triangle non rectangle. La première apparaît plus régulièrement dans le groupe 6 (24,4% contre 16,7%). La fréquence de la deuxième est en revanche assez semblable dans les deux autres groupes et avoisine les 15%. La troisième, contrairement à la première, apparaît davantage dans le groupe 2.














Tableau 144 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour les exercices de visualisation du cube : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G2 (N = 90)	Dans G6 (N = 90)
Ex. 1 : Empreinte – Cube	/	/	/
Ex. 2 : Coupe transversale – Cube	Rectangle 	14,4%	20,0%
Ex. 3 : Coupe longitudinale – Cube	Rectangle 	34,4%	40,0%
Ex. 4 : Coupe oblique – Cube	Carré 	37,8%	30,0%
	Trapèze rectangle 	16,7%	24,4%
	Triangle rectangle 	15,6%	16,7%
	Triangle non rectangle 	10,0%	5,6%

Pour les exercices relatifs au cône, les erreurs types recensées sont présentées dans le Tableau 145. Pour son empreinte, il apparaît que, si l'erreur type relative au dessin d'un ovale est la plus régulière dans le groupe 2 (8,9%) en comparaison au triangle isocèle, qui apparaît moins régulière (4,4%), ces deux erreurs types ont une fréquence semblable dans le groupe 6 (7,8%). Le dessin d'un cône est une erreur type peu régulière dans les deux groupes et apparaît même à moins de quatre reprises dans le groupe 2. Pour l'exercice 6, deux erreurs types se distinguent dans les deux groupes : le dessin d'un triangle isocèle et le dessin d'un ovale. Cependant, la fréquence de la










première est plus élevée dans le groupe 6, où elle est l'erreur type la plus observée, que dans le groupe 2. La situation inverse est observée pour le dessin d'un ovale. En ce qui concerne la coupe longitudinale, plusieurs erreurs types sont relevées dans les deux groupes : le dessin d'un triangle isocèle, avec base arrondie, le dessin d'un demi-rond et le dessin d'un triangle rectangle. Dans le groupe 2, la première est la plus fréquente et est plus observée que dans le groupe 6. Dans le groupe 6, c'est la deuxième qui est la plus fréquente. Le dessin d'un triangle rectangle avec un côté arrondi apparaît quant à lui moins régulièrement dans les deux groupes. Finalement, pour la coupe oblique de ce solide, des fréquences proches sont observées entre les deux groupes au niveau des erreurs commises. Une même erreur se distingue dans les deux groupes en étant réalisée par un quart des participants du groupe, le dessin d'un rond. Vient ensuite l'erreur relative au dessin d'un triangle quelconque, commise par plus d'un participant sur dix. Enfin, les erreurs types relatives au dessin d'un triangle quelconque avec un côté arrondi et d'un rectangle sont occasionnelles dans les deux groupes.

Tableau 145 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour les exercices de visualisation du cône : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G2 (N = 90)	Dans G6 (N = 90)
Ex. 5 : Empreinte – Cône	Ovale 	8,9%	7,8%
	Triangle isocèle 	4,4%	7,8%
	Cône 	2,2%	4,4%
Ex. 6 : Coupe transversale – Cône	Triangle isocèle 	10,0%	15,6%
	Ovale 	12,2%	4,4%
Ex. 7 : Coupe longitudinale – Cône	Triangle isocèle avec un côté arrondi 	13,3%	6,7%
	Demi-rond 	5,6%	15,6%
	Triangle rectangle 	11,1%	8,9%
	Triangle rectangle avec un côté arrondi 	3,3%	5,6%
Ex. 8 : Coupe oblique – Cône	Rond 	25,6%	25,6%
	Triangle quelconque 	13,3%	16,7%
	Triangle quelconque avec un côté arrondi 	2,2%	4,4%
	Rectangle 	4,4%	1,1%

Comme le montre le Tableau 146, des erreurs types moins diversifiées sont observées pour la sphère, en comparaison au cône. Pour l'empreinte de ce solide, une erreur type domine dans les deux groupes avec une fréquence semblable avoisinant les 80%. Une autre erreur type observée est le dessin d'un ovale. Pour la coupe transversale, l'erreur type relative au dessin d'un demi-rond obtient une fréquence d'environ 15% dans les deux groupes, faisant de cette erreur type la plus fréquente dans ces deux groupes. Le dessin d'un ovale est une erreur aussi fréquente dans le groupe 2 mais qui n'est quasiment pas observée dans le groupe 6. Ces deux mêmes erreurs types sont recensées pour la coupe longitudinale. La première apparaît la plus régulière dans les deux groupes, mais est davantage présente dans le groupe 6 (20,0% contre 12,2% dans le groupe 2). Une fréquence plus faible, mais proche dans les deux groupes, est observée pour le dessin d'un ovale. Enfin, pour la coupe oblique, le dessin d'un ovale est le plus fréquent dans le groupe 2 (17,8% contre 6,7% dans le groupe 6) alors que le dessin d'un demi-rond est l'erreur la plus fréquente dans le groupe 6 (17,8% contre 8,9% dans le groupe 2). Le dessin d'un demi-ovale est quant à lui peu observé dans les deux groupes.







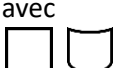








Tableau 146 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour les exercices de visualisation de la sphère : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G2 (N = 90)	Dans G6 (N = 90)
Ex. 9 : Empreinte – Sphère	Rond 	77,7%	78,9%
	Ovale 	7,8%	8,9%
Ex. 10 : Coupe transversale – Sphère	Demi-rond 	15,6%	16,7%
	Ovale 	13,3%	1,1%
Ex. 11 : Coupe longitudinale – Sphère	Demi-rond 	12,2%	20,0%
	Ovale 	5,6%	7,8%
Ex. 12 : Coupe oblique – Sphère	Ovale 	17,8%	6,7%
	Demi-rond 	8,9%	17,8%
	Demi-ovale 	2,2%	4,4%

Pour ce qui est du cylindre (Tableau 147), on constate d'abord qu'une seule erreur type se distingue pour l'empreinte, même si elle est deux fois plus élevée dans le groupe 2 : le dessin d'un ovale. Pour la coupe transversale, le dessin d'un ovale est aussi l'erreur type la plus fréquente dans le groupe 2, où elle se distingue des autres. Dans le groupe 6, elle ne se distingue pas réellement d'autres erreurs comme le dessin d'un

rectangle ou d'un rectangle avec un ou plusieurs côtés arrondis. Pour la coupe longitudinale, l'erreur la plus fréquente dans les deux groupes, davantage observée dans le groupe 6, est le dessin d'un demi-rond. Elle est observée chez plus d'un participant sur dix dans les deux groupes. D'autres erreurs types apparaissent mais moins régulièrement, le dessin d'un ovale, d'un carré ou rectangle avec côté(s) arrondi(s) ou d'un demi-cylindre. Enfin pour la coupe oblique, l'erreur type la plus régulière dans les deux groupes, avec une fréquence supérieure à 20%, est le dessin d'un rond. Les autres erreurs types apparaissent moins régulièrement dans les deux groupes mais leur fréquence varie entre ces deux groupes. Le dessin d'un rectangle et celui d'un trapèze rectangle sont plus observés dans le groupe 6, alors que le dessin d'un triangle rectangle est plus observé dans le groupe 2 mais est quasiment absent du groupe 6. Le dessin d'un triangle avec côté(s) arrondi(s) et celui d'un demi-cercle sont quant à eux peu fréquents, en particulier dans le groupe 2.

Tableau 147 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour les exercices de visualisation du cylindre : pourcentage d'occurrence


















	Erreur type	Dans G2 (N = 90)	Dans G6 (N = 90)
Ex. 13 : Empreinte – Cylindre	Ovale 	16,7%	8,9%
Ex. 14 : Coupe transversale – Cylindre	Ovale 	15,6%	7,8%
	Rectangle 	6,7%	8,9%
	Rectangle avec côtés(s) arrondi(s) 	1,1%	6,7%
Ex. 15 : Coupe longitudinale – Cylindre	Demi-rond 	12,2%	17,8%
	Ovale 	6,7%	3,3%
	Carré ou rectangle avec côtés(s) arrondi(s) 	6,7%	4,4%
	Demi-cylindre 	5,6%	5,6%
	Demi-ovale 	2,2%	5,6%
Ex. 16 : Coupe oblique – Cylindre	Rond 	30,0%	23,3%
	Rectangle 	5,6%	11,1%
	Triangle rectangle 	11,1%	2,2%
	Trapèze rectangle 	6,7%	11,1%
	Triangle avec un ou deux côtés(s) arrondis 	2,2%	5,6%
	Demi-rond 	2,2%	6,7%

Enfin, en ce qui concerne le dernier objet 3D, à savoir l'anneau (Tableau 148), l'analyse des erreurs types permet de mettre en évidence que le dessin de deux ronds concentriques non rapprochés est une erreur type qui se distingue nettement dans les deux groupes. Elle est commise par environ sept participants sur 10 dans les deux groupes. Le dessin de deux ovales concentriques non rapprochés et d'un ovale sont deux erreurs types aussi recensées mais qui sont, elles, nettement moins observées dans les deux groupes. Pour l'exercice de coupe transversale, une même erreur type se distingue dans les deux groupes, avec une fréquence d'environ 15% : le dessin d'un rond. Le dessin de deux ovales concentriques apparaît quant à lui de manière plus rare dans le groupe 2 (5,6%) et est quasiment absent du groupe 6. À l'exercice de coupe longitudinale, une même erreur se distingue des autres dans les deux groupes : le dessin de deux demi-ronds concentriques reliés par des segments. Vient ensuite, de manière moins régulière, le dessin de deux lignes arrondies parallèles puis d'autres erreurs type comme le dessin d'une ligne arrondie, d'un rond, d'un demi-anneau ou d'un demi-anneau vu de face. Cette dernière erreur n'apparaît par ailleurs pas dans le groupe 2. Enfin, pour le dernier exercice, la même erreur principale qu'à l'exercice précédent est observée : le dessin de deux demi-ronds concentriques reliés par des segments. Le dessin de deux ronds concentriques et le dessin d'un ovale sont deux erreurs types qu'on remarque davantage dans le groupe 6 (environ 15%) en comparaison au groupe 2 (environ 5%). Parmi les autres erreurs types observées, il est possible de citer le dessin d'un rond, de deux ronds distincts, ou de deux lignes arrondies parallèles.

Au total, de nombreuses proximités sont donc observées entre les deux groupes au niveau des erreurs types commises. Nous renvoyons donc le lecteur vers les interprétations réalisées précédemment. Si les analyses menées sur les groupes 1 et 2 avaient permis de mettre en évidence une tendance, chez certains participants, à considérer que le dessin de la forme de la coupe est similaire à la vue d'une des deux parties de l'objet après la découpe, cette erreur semble avoir une fréquence qui est la plupart du temps plus élevée. Cela s'observe notamment avec le dessin du trapèze rectangle pour la coupe oblique du cube ou du cylindre, ou encore du dessin de demi-rond pour la coupe longitudinale du cercle, du cône ou encore du cylindre. De plus, dans les deux groupes, des erreurs peuvent aussi être associées à une absence de prise en compte de la troisième dimension. Cependant, ces erreurs types semblent parfois

moins récurrentes dans le groupe 6 en comparaison au groupe 2. À titre d'exemple, il est possible d'évoquer le cas du dessin de l'ovale comme empreinte ou coupe transversale du cylindre ou du cône. Par ailleurs, on constate dans le groupe 6, comme dans le groupe 2, que la forte difficulté associée à l'identification de l'empreinte de la sphère et de l'anneau est à nouveau rencontrée. De même, des difficultés relatives aux exercices de coupe oblique apparaissent dans les deux groupes. On observe une réponse identique à celle attendue pour la coupe longitudinale, sans prendre conscience de la conséquence du positionnement oblique du couteau sur la forme obtenue (ex. dessin d'un rond pour la coupe oblique du cône ou du cylindre et dessin d'un carré pour la coupe oblique du cube).

Tableau 148 : Erreurs types principales au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations planes pour les exercices de visualisation de l'anneau : pourcentage d'occurrence

	Erreur type	Dans G2 (N = 90)	Dans G6 (N = 90)
Ex. 17 : Empreinte – Anneau	Ronds concentriques non rapprochés 	71,1%	71,1%
	Ovales concentriques non rapprochés 	8,9%	5,6%
	Ovale 	4,4%	3,3%
Ex. 18 : Coupe transversale – Anneau	Rond 	14,4%	15,6%
	Ovales concentriques 	5,6%	1,1%
Ex. 19 : Coupe longitudinale – Anneau	Deux demi-ronds concentriques reliés par des segments 	26,7%	31,1%
	Deux lignes arrondies parallèles 	12,2%	7,8%
	Ligne arrondie 	6,7%	1,1%
	Rond 	6,7%	4,4%
	Deux ronds reliés par deux lignes arrondies parallèles (demi-anneau) 	3,3%	5,6%
	Deux ronds reliés par deux lignes droites parallèles (demi-anneau vu de face) 	0,0%	4,4%
Ex. 20 : Coupe oblique – Anneau	Deux demi-ronds concentriques reliés par des segments 	18,9%	18,9%
	Ronds concentriques 	4,4%	15,6%
	Ovale 	6,7%	14,4%
	Rond 	10,0%	6,7%
	Deux ronds distincts 	4,4%	2,2%
	Deux lignes arrondies parallèles 	7,8%	4,4%

10.6.8. Visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D selon l'âge, le type d'exercice et l'objet

Jusqu'à présent, les analyses comparatives ont permis d'observer une équivalence des performances de visualisation spatiale entre les enfants et les adolescents confrontés à des représentations 2 ½ D à observer ou à des successions de représentations 2D. Ces observations ont pu être mises en avant sur le score total aux vingt exercices, mais également sur le score à chaque type d'exercice et à chaque objet 3D, que ce soit sur l'ensemble du public cible ou pour chaque tranche d'âge. De plus, l'analyse par exercice sur l'ensemble du public cible a permis de confirmer cette équivalence, et ce malgré les spécificités relatives à certains exercices mises en évidence dans les analyses générales. Les résultats des *tests du Khi-carré* (ou alternative) appliqués entre les groupes 2 et 6 sur les taux de réussite de chaque exercice à chaque tranche d'âge sont placés en annexe (Annexe 47). Ils montrent que majoritairement, les résultats obtenus aux tests inférentiels sont non significatifs. Des résultats significatifs émergent cependant pour trois des vingt exercices. Pour chacun de ces trois exercices, les résultats significatifs apparaissent à une seule tranche d'âge, la première ou la dernière. Pour la coupe oblique de l'anneau, un résultat significatif est observé uniquement à la première tranche d'âge (*Test exact de Fisher* = 4,779 ; *p-value* = 0,045). À cette tranche d'âge, deux cas de résultats proches du seuil de significativité sont observés à la première tranche d'âge. Concernant la dernière tranche d'âge, un résultat significatif apparaît pour l'exercice de la coupe oblique de la sphère (*Test exact de Fisher* = 5,880 ; *p-value* = 0,021) et un autre pour l'exercice de la coupe longitudinale du cylindre (χ^2 = 4,560 ; *p-value* = 0,033). Dans ces trois cas de résultats significatifs, une dépendance des taux de réussite au groupe, et donc au caractère dynamique ou non du support, peut donc être considérée. Les taux de réussite étant, pour ces trois cas, plus élevés dans le groupe 2 et sont donc en faveur du support dynamique. Au vu de ces résultats, il est possible de considérer que les enfants et les adolescents de chaque tranche d'âge, arrivent à résoudre la majorité des exercices de visualisation spatiale proposés au départ d'une représentation 2 ½ D à observer comme au départ d'une succession de représentations 2D. Toutefois, il arrive, pour quelques rares exercices, que la réussite de l'exercice soit influencée, à une des tranches d'âge, avec davantage de réussite face aux représentations 2 ½ D.

10.6.9. Discussion spécifique à la question 2.5°

De manière globale, la comparaison des performances observées au départ de vidéos d'objets 3D en rotation et au départ de successions de représentations 2D montre une certaine proximité. Que ce soit sur l'échantillon complet ou à chacune des tranches d'âge, les scores obtenus, tous exercices confondus, entre les deux modalités de représentation sont statistiquement équivalents. Ainsi, les observations réalisées au départ de représentations virtuelles à observer, soulignant notamment une maîtrise majoritairement partielle de l'habileté marquée également par de fortes différences individuelles, semblent pouvoir être aussi associées aux capacités de visualisation spatiale au départ de successions de représentations 2D. Il en va de même concernant le fait que la capacité à mettre en œuvre des opérations mentales s'améliore avec l'âge. À l'âge de 8 ans, les enfants sont déjà en capacité de mettre en place quelques opérations mentales et à l'âge de 15 ans, la mise en œuvre de certaines opérations mentales continue à poser des difficultés. En revanche, face à des représentations virtuelles à observer, les différences individuelles tendent à se réduire avec l'âge, ce qui n'est pas forcément le cas face aux successions de représentations planes. Plus encore, l'équivalence est aussi constatée pour les scores relatifs à chacun des objets 3D et à chacun des types d'exercice. Comme pour les représentations 2 ½ D, ce sont des variables qui influencent le niveau de maîtrise de l'habileté. Des difficultés plus élevées sont ainsi observées pour l'anneau ou pour les coupes obliques.

La comparaison des scores de chaque exercice montre que, même si les taux de réussite sont plus souvent plus faibles au départ d'une suite de représentations 2D qu'au départ d'une représentation 2 ½ D à observer, les différences entre les scores apparaissent toutes non significatives sur l'échantillon total. De manière très occasionnelle, des différences sont observées à certaines tranches d'âge pour trois des vingt exercices. Dans ce contexte, de fortes difficultés sont observées pour les mêmes exercices (ex. coupe oblique du cube, empreinte de la sphère), que le support soit dynamique (vidéo) ou non (suite de photographies). Étant donné cette proximité, nous renvoyons le lecteur vers les éléments mis en avant dans la discussion relative à la question 2.2 qui a traité du groupe confronté à des vidéos à observer (cf. 10.3.10).

Cette absence de différence dans les résultats obtenus invite à considérer que l'observation des mouvements de rotation des stimuli avant la réalisation d'une tâche impliquant une opération mentale sur l'objet présenté n'apporte pas de plus-value à la

capacité à générer des opérations mentales sur les objets. Un tel résultat s'inscrit donc dans le prolongement de ceux obtenus au niveau de la capacité de perception visuelle des objets 3D. En effet, à l'issue de l'investigation des résultats à la tâche de perception, un résultat similaire avait pu être observé. Puisque cela a déjà fait l'objet d'une discussion au point 9.6.2 lors de l'évaluation de l'habileté de perception, nous ne reviendrons pas ici de manière détaillée sur les caractéristiques des supports utilisés et qui permettent d'expliquer cette proximité (choix des photographies sélectionnées...). Retenons simplement que les propos de Claisse (2020), considérant que l'externalisation du mouvement constitue la plus-value des représentations virtuelles pour visualiser dans l'espace, sont à nouveau remis en question.

Toutefois, malgré l'observation de taux de réussite statistiquement équivalents, l'analyse des productions d'enfants et des adolescents permet de pointer quelques divergences entre les deux modalités. En effet, les productions semblent indiquer que, face à des successions de représentations 2D, des fréquences majoritairement plus élevées sont observées pour les erreurs associées à une confusion entre le point de vue intérieur de l'objet 3D (forme de la coupe) et le point de vue extérieur (dessin de la vue de l'objet 3D après découpe). Citons par exemple les cas de dessins d'un demi-rond pour les coupes de la sphère. Inversement, les erreurs relatives à une difficulté de prise en compte de la troisième dimension (ex. dessin d'un ovale pour l'empreinte ou la coupe transversale d'un cylindre) semblent globalement moins présentes face à des successions de représentations virtuelles. Notons toutefois, que ces deux types d'erreurs restent tout de même observées, comme Duroisin (2015) l'avait mis en évidence sur du matériel physique pour l'absence de prise en compte de la 3D, et comme Piaget et Inhelder (1948) l'avaient relevé pour la focalisation sur le point de vue extérieur. Ces légères divergences peuvent aisément être associées aux caractéristiques des modalités de représentation. En effet, dans la modalité relative aux successions de représentations 2D, compte tenu des caractéristiques des vues présentées (vue en perspective, vue de l'avant, du dessus et du côté), l'individu est peu confronté à des représentations sur lesquelles des déformations de l'objet dues à la perspective sont proposées. Cela pourrait ainsi entraîner une faible présence des cas de non prise en compte de la 3D. Inversement, face aux vues de face, du dessus ou du côté, l'enfant peut être confronté à plus de difficultés à se projeter à l'intérieur de l'objet 3D au détriment du point de vue extérieur, sur lequel se focalise la succession de vues.

10.7. Discussion générale relative à l'habileté de visualisation, limites et perspectives

Depuis les travaux piagétiens, quelques plus récentes investigations ont été menées pour évaluer les capacités des enfants et des adolescents à faire appel à l'habileté de visualisation spatiale dans l'espace sensible, et plus particulièrement à la mise en place d'opérations mentales sur les objets 3D (Duroisin, 2015 ; Gori *et al.*, 2024 ; Ratliff *et al.*, 2010). Celles-ci restent néanmoins encore limitées malgré le fait que l'importance de cette habileté pour les apprentissages et la réalisation d'actions du quotidien ne soit plus à démontrer. Si certains auteurs, bien que rares, se sont intéressés à la capacité de mise en œuvre de cette même habileté au départ de stimuli présentés au sein d'un environnement virtuel chez les adultes (ex. Battista & Clements, 1996 ; Keehner *et al.*, 2004 ; Meijer & Van den Broek, 2010 ; Sanandaji *et al.*, 2017) ou chez les adolescents plus âgés (Bakó, 2015), la situation des enfants plus jeunes n'a à notre connaissance pas fait l'objet d'investigation. Pourtant, cela constitue, d'après Duroisin (2015) un questionnement légitime afin d'identifier si les enfants et les adolescents arrivent à mettre en place des opérations mentales non plus directement sur des objets de l'espace sensible, mais bien sur des représentations virtuelles de ces objets, notamment puisqu'ils sont de plus en plus confrontés à ce type d'environnement.

Au travers de la seconde étude, qui se veut donc exploratoire, les capacités d'enfants et d'adolescents à mettre en œuvre des opérations mentales sur des représentations virtuelles pouvant ou non être manipulées sont donc étudiées. Plus particulièrement la capacité à s'imaginer la forme de l'empreinte et de plusieurs coupes d'objets 3D est ici étudiée. De plus, les performances d'enfants et d'adolescents confrontés à des représentations virtuelles d'objets 3D ont été comparées à celles obtenues aux mêmes exercices proposés dans d'autres modalités : au départ de représentations planes, au départ de matériel physique et même au départ de successions de représentations planes. Ainsi, grâce à la perspective comparative utilisée, l'étude souhaite apporter une compréhension plus complète de la maîtrise de cette capacité en environnement virtuel.

10.7.1. Retour sur les principaux résultats obtenus

Les résultats obtenus permettent de souligner que les enfants, dès 8 ans, arrivent à résoudre certaines tâches de visualisation spatiale au sein d'un environnement virtuel et sont donc capables de mettre en place certaines images mentales cinétiques et transformatrices, au sens de Piaget et Inhelder (1948), d'objets 3D au départ de leur représentation virtuelle. Pour autant, les enfants n'arrivent pas à mettre en place systématiquement l'ensemble des opérations mentales demandées sur les représentations virtuelles d'objets 3D. Si, en grandissant, les enfants et les adolescents semblent maîtriser davantage la mise en œuvre d'opérations mentales au départ de représentations virtuelles, certaines opérations continuent de poser des difficultés aux adolescents âgés de 15 ans.

Ainsi, il est possible de constater que l'habileté de visualisation spatiale est majoritairement partiellement maîtrisée. Elle est, qui plus est, marquée par de fortes différences individuelles par rapport à son niveau de maîtrise. Ces deux observations s'avèrent proches des constats réalisés par Piaget et Inhelder (1948) et plus récemment par Duroisin (2015) lorsque l'habileté était évaluée sur du matériel physique. Elle permet d'illustrer, grâce à certains exercices d'identification de la forme de certaines coupes (ex. coupe oblique) et d'empreinte (ex. empreinte de la sphère) d'objets 3D, que les enfants et les adolescents peuvent peiner à mettre en place des manipulations mentales sur des objets 3D et notamment à faire appel à une pensée pénétrante (Pathak *et al.*, 2020). D'ailleurs, l'analyse des erreurs types les plus courantes aux exercices de coupe permet notamment de relever une difficulté pour l'enfant à distinguer la forme de la coupe, qui est donc interne à l'objet 3D, du point de vue extérieur qu'il a sur l'objet. On observe également, aux exercices de coupe et d'empreinte, des difficultés à prendre en considération la troisième dimension dans la mise en œuvre de l'opération mentale demandée. Ces erreurs types rejoignent les observations réalisées sur du matériel physique dans les recherches antérieures susmentionnées. D'ailleurs, de telles difficultés sont aussi observées dans cette étude face à ce même type de matériel.

Plus encore, des constats similaires sont également observés quand les exercices sont proposés au départ d'une représentation 2D de l'objet 3D mais aussi au départ d'une succession de représentations 2D. Si les témoignages d'adolescents, tout comme ceux des enseignants, soulignent qu'il peut être difficile de résoudre des exercices de

coupe au départ de représentations 2D et même pour des coupes portant sur des objets géométriques connus (Thamrongrat & Law, 2019), les résultats le confirment, mais soulignent également que c'est aussi vrai au départ d'autres supports, y compris du matériel physique et des supports virtuels.

De la même façon, de nombreuses autres proximités entre les différentes modalités investiguées ont pu être observées. Les résultats obtenus dans l'environnement virtuel ainsi que dans les autres modalités indiquent que le niveau de maîtrise de l'habileté de visualisation varie selon les objets 3D mais aussi selon les opérations mentales réalisées. Toutefois, pour chacun des objets 3D, les performances diffèrent selon les types d'opération mentale demandés et inversement. Plus spécifiquement, quelle que soit la modalité de représentation sur laquelle l'habileté est mise en œuvre, certaines opérations mentales ne posent majoritairement pas de difficultés aux enfants et aux adolescents (ex. empreinte du cube ou du cône, coupe transversale du cube...) alors que d'autres posent de très fortes difficultés à la quasi-totalité des enfants et des adolescents (empreinte de la sphère et de l'anneau, coupe oblique de l'anneau...). Ces items ne semblent donc pas ceux qui sont les plus discriminants pour identifier le niveau de maîtrise de l'habileté.

Malgré ces observations générales semblant se dégager dans les différentes modalités, qui sont par ailleurs cohérentes avec les études antérieures menées sur l'habileté, cela ne signifie pas pour autant que les enfants et les adolescents arrivent systématiquement à mettre en œuvre les opérations mentales dans l'environnement virtuel comme face aux autres modalités. En effet, la comparaison des scores totaux et des taux de réussite aux différents exercices permet d'apporter quelques nuances pour certaines comparaisons. De même, l'observation des erreurs types commises par les enfants et les adolescents souligne aussi, parfois, l'existence de divergences entre les supports, laissant sous-entendre que les capacités à opérer mentalement sur les objets 3D peuvent varier selon les modalités de présentation.

D'abord, il apparaît que la manipulation des représentations virtuelles par l'enfant ou l'adolescent ne semble majoritairement pas avoir d'influence sur le niveau de maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale, comme Meijer et Van den Broek (2010) l'avaient observé sur les adultes. Une même absence d'impact de la manipulation est d'ailleurs aussi observée sur du matériel physique.

Entre le niveau de maîtrise de l'habileté au départ de représentations virtuelles et au départ de représentations planes, des différences semblent observées dans certaines conditions sur le score total, comme cela avait pu être observé chez des adultes (Cohen & Hegarty, 2012). Elles n'apparaissent cependant en réalité pas pour l'ensemble des exercices puisque lorsqu'on regarde le résultat obtenu à chaque exercice, des différences émergent uniquement pour quelques-uns d'entre eux, et, dans ce cas, les résultats s'avèrent en faveur des représentations virtuelles. Il s'agit donc de nuancer les témoignages d'enseignants et d'adolescents suggérant que résoudre les exercices au départ de représentations planes est plus complexe qu'au départ de représentations virtuelles (Thamrongrat & Law, 2019). Néanmoins, ce qui peut occasionner ce ressenti par rapport aux difficultés exprimées face aux représentations 2D, à en observer les erreurs types commises, concerne une difficulté plus forte à se détacher de ce qui est vu sur la représentation 2D au profit d'une prise en compte de la troisième dimension, mais aussi une difficulté à s'imaginer concrètement le plan de la coupe demandée (perception de la position du couteau). Les résultats obtenus indiquent que ces deux difficultés, davantage observées face à des représentations planes, occasionnent parfois des taux de réussite plus faibles que face aux autres modalités, même si ce n'est pas systématiquement le cas. Ces résultats permettent alors de compléter les propos plus généralistes de Barlett *et al.* (2023) qui ont suggéré que c'est le caractère réaliste des représentations virtuelles qui entraîne une plus grande facilité à mettre en place des habiletés sur ce support en comparaison aux représentations 2D.

Entre représentations virtuelles et matériel physique, il ne semble pas y avoir d'effet global de la dimensionnalité du support de présentation sur la capacité à résoudre les tâches proposées, ce que Battista et Clements (1996) avaient mis en avant chez les adultes. Pour autant, des différences apparaissent entre les deux modalités pour quelques exercices. L'analyse des erreurs types permet de suggérer que ces différences pourraient être expliquées par une difficulté plus importante à prendre en considération la troisième dimension dans la réalisation de l'opération mentale face à des représentations 2 ½ D.

Enfin, une proximité est également observée entre le niveau de maîtrise au départ de représentations virtuelles et de successions de représentations 2D. Pour les enfants et les adolescents échouant aux exercices proposés, des tendances différentes sont néanmoins observées au niveau des erreurs types et donc au niveau des difficultés

rencontrées. Malgré ces divergences, la proximité des résultats obtenus dans les deux modalités invite à confirmer les observations réalisées au travers de l'étude de l'habileté de perception de la 3D (chapitre 9) concernant la plus-value pouvant être associée aux représentations virtuelles en comparaison aux représentations planes.

Le Tableau 149 présente une synthèse des réponses globales qu'il est possible d'apporter aux différentes questions de recherche.

Ces proximités observées entre les modalités, et notamment entre matériel physique et virtuel et entre représentations planes et virtuelles, peuvent s'avérer surprenantes, notamment compte tenu des résultats obtenus au sujet de l'habileté de perception visuelle (chapitre 9). Toutefois, la prise en compte de cette variable dans les analyses permet de montrer que les déficits de perception n'ont pas forcément d'impact sur les capacités de visualisation spatiale pour les exercices proposés, puisqu'une perception inadéquate n'entraîne pas forcément une réponse différente de celle obtenue en cas de perception adéquate (ex. l'empreinte d'un cône est la même que le cône soit perçu adéquatement ou qu'il soit perçu avec une hauteur modifiée). Cette faible influence de la première habileté sur la deuxième, dans les tâches proposées, peut permettre de comprendre pourquoi les écarts entre les différentes modalités sont plus marqués pour l'habileté de perception visuelle. Afin de pouvoir mettre en évidence le lien entre les deux habiletés (Gal & Linchevski, 2010) et l'impact négatif que pourrait avoir une absence de maîtrise de la première sur la seconde, il s'avère essentiel de mener des analyses complémentaires sur d'autres types d'exercice requérant l'habileté de visualisation spatiale.

Tableau 149 : Résumé des réponses aux différentes questions de recherche

	Questions de recherche spécifiques	Réponses synthétiques
2° Les enfants et les adolescents arrivent-ils à faire preuve de visualisation spatiale sur des objets 3D au départ de leur représentation virtuelle (2 ½ D) ?	2.1° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) manipulable de ces objets ?	Oui, la plupart des enfants, déjà à l'âge de 8 ans, sont capables de faire preuve de visualisation spatiale puisqu'ils arrivent à résoudre une partie des tâches de visualisation proposées, mais cette maîtrise s'avère partielle et est marquée par de fortes différences individuelles. Le niveau de maîtrise de l'habileté évolue avec l'âge mais des difficultés sont encore observées pour certaines tâches de visualisation à l'âge de 15 ans.
	2.2° La manipulation des représentations virtuelles (2 ½ D) d'objets 3D par les enfants ou les adolescents impacte-t-elle leur capacité à faire preuve de visualisation spatiale sur ces objets ?	Non, la manipulation des représentations virtuelles par l'enfant et l'adolescent n'impacte globalement pas les performances aux tâches de visualisation spatiale.
	2.3° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) comme au départ d'une représentation plane (2D) ?	Partiellement. L'habileté de visualisation spatiale est globalement mieux maîtrisée au départ de représentations virtuelles à observer qu'au départ de représentations planes. Les différences entre les deux modalités ne semblent cependant pas concerner l'ensemble des exercices.
	2.4° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) comme au départ de matériel physique (3D) ?	Oui, l'habileté de visualisation spatiale est globalement aussi bien maîtrisée lorsqu'elle est évaluée au départ de représentations virtuelles que de matériel physique. Des différences émergent cependant pour certains exercices.
	2.5° Les enfants et les adolescents sont-ils capables de faire preuve de visualisation spatiale sur les objets 3D au départ d'une représentation virtuelle (2 ½ D) comme au départ d'une succession de représentations planes (2D's) ?	Oui, l'habileté de visualisation spatiale semble globalement aussi bien maîtrisée au départ de représentations virtuelles d'objets 3D à observer qu'au départ de successions de représentations planes.

Discussion générale, limites et perspectives

10.7.2. Limites et perspectives à l'étude menée

L'investigation menée sur l'habileté de visualisation s'inscrit dans le prolongement des investigations menées sur la perception visuelle de la 3D. Elle partage une série de caractéristiques, par exemple vis-à-vis du plan expérimental utilisé, des groupes comparés et des analyses statistiques qui en découlent, du matériel utilisé (support, environnement virtuel...). Ces caractéristiques débouchent donc sur la présence de limites et de prolongements communs à ceux précédemment cités (*cf.* 9.7.2). Nous ne reviendrons donc pas en détail sur chacun de ces éléments, mais nous aborderons ci-dessous certains de ces aspects en nous focalisant sur les spécificités relatives à l'habileté de visualisation spatiale.

10.7.2.1. Une étude menée dans un environnement virtuel spécifique proposé sur tablette et portant sur des objets spécifiques

Comme pour la perception, le choix de fournir des représentations virtuelles (et planes) de l'objet 3D seul (ou avec son couteau dans le cadre des exercices de coupe) en lévitation dans un environnement virtuel « vide » peut participer à l'explication des difficultés observées dans la résolution de certains exercices de visualisation proposés. Nous avons en effet pu mettre en évidence qu'un tel choix était susceptible d'avoir complexifié l'identification de la forme de l'empreinte de la sphère ou de l'anneau, ce qui peut d'ailleurs expliquer les différences avec les modalités relatives au matériel physique pour ces exercices. À l'inverse, d'autres caractéristiques des représentations virtuelles sont susceptibles d'avoir favorisé la proximité des résultats entre représentations virtuelles et matériel physique. C'est le cas notamment des possibilités de manipulation limitées (rotations restreintes dans deux directions uniquement) dans l'environnement virtuel proposé, qui ont permis de faciliter la manipulation des représentations. C'est le cas également, pour les représentations virtuelles à observer, des choix de vues présentées (vue de face, du dessus et du côté), qui sont sans doute déterminantes pour percevoir la position exacte du couteau par rapport à l'objet 3D, ce qui est une condition importante pour la réussite de tels exercices. Investiguer le niveau de maîtrise de l'habileté après modification de certaines caractéristiques des représentations virtuelles proposées pourrait permettre d'approfondir la compréhension du fonctionnement de l'habileté en environnement virtuel, et notamment de nuancer les résultats ici observés. Au-delà de ces caractéristiques, si Bakó (2003) a pu souligner peu de différences aux tâches de coupe proposées à des

adolescents au départ de représentations 2 ½ D en projection orthographique ou en perspective linéaire, un prolongement pourrait être d'investiguer ces potentielles différences chez les enfants plus jeunes et sur d'autres objets 3D que le cube, afin de poursuivre la réflexion sur le type de perspective semblant le plus adapté au fonctionnement cognitif des enfants.

Par ailleurs, par rapport au choix de support, les tâches de coupe sont des tâches sollicitant déjà une charge mentale importante (Hawes & Ansari, 2020), d'autant plus lorsqu'elles sont proposées au départ de représentations 2 ½ D, qui sont une modalité de représentation entraînant aussi une charge plus élevée (Ayres & Paas, 2009). Dans ce contexte, il est possible de suspecter que les performances d'enfants et d'adolescents au départ d'autres supports virtuels pourraient aussi générer des résultats différents puisque les supports sont susceptibles d'occasionner une charge cognitive différente, notamment avec des modalités d'interactions plus ou moins naturelles (Bujak *et al.*, 2013). Pour autant, l'absence globale de différence de résultats entre la visualisation au départ de représentations 2 ½ D sur tablette et au départ de matériel physique à manipuler, invite à considérer que l'utilisation d'autres types de support virtuel n'occasionnerait pas de résultats significativement différents, même s'ils pourraient diminuer la charge cognitive en comparaison par exemple avec la tablette. Compte tenu des résultats aux exercices de perception, le matériel physique apparaît en effet le moins ambigu pour représenter les objets 3D, et sa manipulation apparaît naturelle et sans conflit multisensoriel contrairement à ce qu'on peut observer avec les supports virtuels (Voiskunskii, 2019). De ce fait, il est possible de suspecter que d'autres supports virtuels ne permettraient pas, en répliquant les mêmes exercices d'obtenir des résultats significativement plus élevés que ceux obtenus avec la tablette.

En outre, nous nous sommes ici focalisés sur des objets 3D pleins dont l'apparence est neutre. Faire varier cette apparence, comme pour la perception visuelle de la 3D, peut permettre d'affiner la compréhension du fonctionnement cognitif. Une piste, déjà envisagée par Yue (2008) auprès d'adolescents et sur des représentations planes, est d'investiguer le caractère réaliste des stimuli en modifiant la texture de la représentation (texture bois). D'après les propos de l'auteur, cela peut impacter les performances de visualisation spatiale au départ de représentations 2D. Il pourrait être intéressant de vérifier s'il en est de même pour les représentations virtuelles qui sont, par nature, déjà plus réalistes que les représentations planes (Sanandaji *et al.*, 2017).

10.7.2.2. Une modalité de présentation des exercices de coupe bien spécifique

En lien avec la limitation de possibilités d'actions autorisées dans l'environnement, il convient également de poser un regard critique sur la manière dont les coupes ont été présentées. En effet, dans les différentes modalités, un couteau était posé contre le solide et le caractère dynamique de l'environnement virtuel ne permettait que de réaliser des rotations des éléments. Cette limitation des possibilités d'actions peut aussi avoir occasionné une plus grande proximité entre les résultats obtenus au départ de représentations virtuelles et planes. En effet, les représentations virtuelles dynamiques utilisées permettent d'observer des rotations de l'objet 3D (et du couteau) mais cet environnement virtuel ne permet pas de visualiser l'action de la découpe proposée dans les exercices, alors que cela pourrait constituer une aide à la réussite d'exercices de coupe au départ de représentations virtuelles en comparaison aux représentations planes. Cela rejoint d'ailleurs les propos des enseignants et élèves interrogés par Thamrongrat et Law (2019) par rapport à l'aide que peuvent apporter les environnements virtuels pour la résolution d'exercices de coupe proposés au départ de représentations planes.

Il pourrait donc être pertinent, en vue de poursuivre la compréhension de la résolution de tâches de coupe, de profiter du caractère virtuel de la représentation pour proposer une animation permettant de visualiser le mouvement du couteau en train de trancher le solide. L'analyse des performances face à cette modalité, en comparaison aux modalités ici investiguées, pourrait permettre de mieux cibler les difficultés rencontrées par les enfants et les adolescents aux tâches de coupe. Cela pourrait en effet permettre d'identifier plus précisément l'origine des difficultés dans la résolution de tels exercices. Autrement dit, il s'agirait d'identifier si cette difficulté se situe au niveau de l'imagination du plan de coupe au départ du couteau posé contre l'objet ou au niveau de la mise en œuvre de la pensée pénétrante. De plus, cela pourrait permettre d'identifier une éventuelle plus-value aux représentations virtuelles en comparaison aux représentations planes, voire même au matériel physique.

10.7.2.3. Une étude menée au départ d'une tâche de dessin

À l'instar des recherches piagétienne mais aussi de Duroisin (2015), nous sommes partis, du postulat selon lequel la réponse graphique fournie par l'enfant aux exercices permet d'avoir accès à l'image mentale, ou du moins en est une approximation graphique de cette dernière pouvant être satisfaisante. Ces tâches n'évaluent


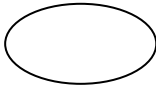

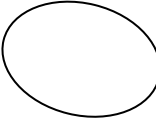
cependant pas forcément l'utilisation de stratégies mais l'évocation de ces stratégies, nécessitant que l'élève invente ou choisisse la stratégie appropriée pour résoudre un problème donné (Marmor, 1977). En outre, il n'en reste pas moins que ces tâches ont pour limite d'être dépendantes des habiletés grapho-motrices qui peuvent être inégales entre les individus (Denis, 1979). Rappelons que les dessins demandés restent cependant simples et que, si la mise en œuvre des images mentales est complexe, cela se traduira aussi sur le plan de l'activité graphique (Denis, 1979).

Au-delà des difficultés au moment de la production du dessin pour le participant, d'autres limites concernent l'analyse des dessins réalisés. À ce sujet, Marmor (1975) souligne que ces tâches impliquent une certaine subjectivité, lors de l'observation et surtout de l'interprétation. Si certains dessins peuvent être interprétés au regard de la littérature, par exemple les dessins congruents à l'objet 3D, une diversité d'erreurs types est observée et leur interprétation n'est pas forcément aisée. D'autant que des difficultés sont liées à la compréhension même des dessins réalisés à main levée par certains élèves. Leur demander de nommer la production peut parfois permettre de lever l'ambiguïté du dessin, et c'est d'ailleurs ce qui a pu être fait ici. Toutefois, cela a pour limite de faire appel à des connaissances géométriques qui ne sont pas toujours maîtrisées par ces derniers, là où le dessin permettait de se focaliser uniquement sur les connaissances spatiales de l'enfant, ce qui constitue ici l'objet d'étude.

De plus, cela amène des cas de figure où le dessin et le nom associé ne semblent pas correspondre, comme l'illustrent deux cas proposés en Figure 51. Rappelons que, dans cette étude, le choix a été fait de se focaliser sur l'interprétation du dessin en prenant appui sur le nom en cas d'hésitation entre les codeurs. Dans le premier exemple illustré en Figure 51, il est possible de suspecter une éventuelle sous-estimation des capacités de visualisation au travers de l'étude. En effet au vu du nom écrit, l'enfant semble arriver à dépasser la deuxième dimension en proposant la bonne réponse. Toutefois, son dessin correspond plutôt quant à lui à une absence de prise en compte de la troisième dimension. Peut-être a-t-il voulu dessiner la forme telle qu'on la voit sur la représentation 2D, tout en étant conscient qu'il s'agit d'un rond dans l'espace 3D. Peut-être également a-t-il eu des difficultés à dessiner un cercle ou peut-être a-t-il un manque de maîtrise des connaissances géométriques mais a réellement voulu dessiner un ovale. À l'inverse, dans le deuxième cas, une surestimation des capacités de visualisation peut avoir lieu puisque le participant dessine une forme ovale

correspondant à ce qui apparaît sur la représentation, qui est une réponse correcte, alors qu'il décrit avoir dessiné un rond.

Figure 51 : Cas de non-correspondance entre le dessin et le nom

<p>Exercice : coupe transversale du cylindre</p> 	<p>Dessin de l'élève : </p> <p>Interprétation du dessin par les chercheurs : un ovale Nom écrit par l'élève : « rond »</p>
<p>Exercice : coupe oblique du cylindre</p> 	<p>Dessin de l'élève : </p> <p>Interprétation du dessin par les chercheurs : un ovale Nom écrit par l'élève : « rond »</p>

Si l'option de dessins instrumentés en remplacement des dessins à main levée pourrait être intéressante, elle semble peu adaptée aux plus jeunes enfants interrogés, étant donné les difficultés qu'ils rencontrent parfois dans la manipulation des instruments. De plus, elle n'est pas la solution à tout dans la mesure où les instruments ne permettent pas d'obtenir certains dessins tels qu'un ovale. Elle risque d'ailleurs d'influencer les dessins proposés.

Dans ce contexte où des difficultés d'interprétation peuvent avoir lieu, proposer de résoudre les exercices à l'occasion d'un entretien dans lequel on demande à l'élève d'expliquer sa réponse pourrait permettre de lever les ambiguïtés présentes dans les situations telles que celles évoquées ci-dessus. Cela pourrait aussi permettre d'identifier les stratégies mises en œuvre et donc de mieux comprendre certaines erreurs types menées. De tels résultats pourraient alors venir compléter les travaux de Yeaman *et al.* (2019), qui se sont quant à eux focalisés sur la compréhension des stratégies utilisées dans les tâches de coupe mais proposées au travers non pas de la production d'un dessin mais bien plutôt d'exercice de choix multiple. Par ailleurs, afin de mieux comprendre les difficultés, il semble pertinent d'évaluer préalablement les connaissances géométriques des participants à l'égard des objets 2D, ce qui devrait permettre d'identifier si les décalages observés sont dû ou non à un déficit au niveau des connaissances géométriques.

Enfin, afin d'éviter les différentes limites susmentionnées, une autre possibilité pourrait être d'envisager une évaluation à l'aide d'une tâche de reconnaissance (p. ex.,

choix multiple) et non de production. Néanmoins, cette modalité entraîne de nouvelles limites (influence de la capacité d'inhibition, facilité plus grande de raisonner à partir de propositions...). Cela est d'autant plus vrai compte tenu de la diversité des erreurs types constatées dans la tâche de production ici proposée. Toutefois, l'observation des erreurs types obtenues lors de cette première exploration pourrait servir de base à la création d'une évaluation par reconnaissance de l'habileté.

10.7.2.4. Une étude menée dans une perspective comparative comparant le niveau de maîtrise des groupes indépendants constitués d'un échantillon tout-venant

Évidemment, nous ne reviendrons pas de manière détaillée sur la limite relative au choix de mener une étude contenant un nombre élevé de groupes non équilibrés par rapport aux variables investiguées (ex. dimensionnalité du support, manipulation) et aux contraintes que cela occasionne dans les possibilités d'analyse statistique. Comme cela a été évoqué pour la perception (cf. 9.7.2.4), un tel choix est cohérent avec la perspective exploratoire envisagée et permet déjà d'apporter des éléments de réponse aux questions de recherche mais nécessite la mise en œuvre d'études confirmatoires se focalisant tour à tour sur un nombre plus restreint de variables.

Nous ne reviendrons pas non plus de manière détaillée sur les limites associées au fait d'avoir comparé des groupes indépendants, malgré leur proximité par rapport à la plupart des variables investiguées, ni sur celles relatives au type d'échantillon utilisé (tout-venant). Toutefois, les résultats obtenus, permettant de montrer des performances proches et fortement liées à certains exercices (ex. empreinte du cône et du cylindre). Ces exercices proches pourraient alors être utilisés, chez un même individu, pour évaluer l'habileté dans différentes modalités afin de statuer sur les différences entre modalités de présentations sans passer par l'utilisation de groupes indépendants.

Par ailleurs, si nous évoquions, pour l'habileté de perception visuelle des objets 3D, des variables potentielles non prises en compte dans les analyses (ex. connaissances antérieures en géométrie) et qui pourraient venir expliquer aussi la présence de différences au départ entre les groupes, d'autres variables en plus de celles citées précédemment pourraient spécifiquement impacter les capacités de visualisation aux tâches proposées.

Parmi celles-ci, il est par exemple possible d'évoquer la prévalence manuelle, qui d'après la méta-analyse de Somers *et al.* (2015), peut influencer significativement les résultats aux tests spatiaux. Dans notre cas, elle pourrait peut-être impacter la résolution de certains exercices de coupe, principalement au départ de représentations 2D, dans la mesure où, selon la position du couteau, les enfants et les adolescents pourraient avoir des difficultés à se projeter en train de réaliser la coupe puisque cela les placerait dans une position peu naturelle. C'est par exemple le cas pour la coupe oblique du cube, si l'enfant s'imagine en train de tenir l'objet 3D de la main droite et de couper l'objet 3D avec la main gauche, en plaçant l'objet contre la face avant du solide. Cette difficulté à s'imaginer en train de réaliser la coupe peut donc impacter une difficulté à imaginer cette coupe.

C'est le cas également des souvenirs spatiaux relatifs aux coupes des objets, que les enfants sont susceptibles de s'être créés au travers d'activités de la vie quotidienne (découpe d'aliments) ou d'activités d'apprentissages scolaires (Cohen & Hegarty, 2007). D'ailleurs, si l'expérience des enfants vis-à-vis des tâches de coupe, par exemple, a été questionnée, il est difficile d'obtenir des informations sur le fait d'avoir rencontré les exercices précis proposés. Or, cela est susceptible d'impacter les performances puisque les images mentales deviendraient des images reproductrices et non anticipatrices, au sens de Piaget.

De même, dans l'analyse *a priori* (cf. chapitre 8, volume 1) des tâches proposées mais également dans la discussion relative à la question 2.1° (cf. 10.2.10), d'autres variables non investiguées ici mais susceptibles d'expliquer les différences individuelles ont été évoquées : les fonctions exécutives. Prendre en compte le niveau d'acquisition de ces processus cognitifs dans les analyses pourrait permettre d'évaluer la manière dont ces derniers influencent la maîtrise de l'habileté en environnement virtuel chez les enfants et les adolescents. Cela pourrait notamment participer à la compréhension de certaines erreurs types. Par exemple, il est possible de suspecter que la présence d'erreurs types relatives à un point de vue égocentré puisse être liée à des difficultés à faire appel au contrôle inhibiteur.

Enfin, en guise de dernier exemple, la présence ou non d'une possible anxiété spatiale, en particulier d'une anxiété spatiale dite « à petite échelle » (Malanchini *et al.*, 2017), pourrait être investiguée. Celle-ci est susceptible d'impacter les performances des enfants et des adolescents à des tâches nécessitant les habiletés spatiales (Fernández-Méndez *et al.*, 2020 ; Ramirez *et al.*, 2012 ; Rodán *et al.*, 2016).

Conclusion de la partie III

Au travers de cette troisième partie, les résultats des deux études expérimentales ont été présentés puis discutés. En effet, les investigations menées pour évaluer la maîtrise des habiletés spatiales de perception visuelle de la 3D et de visualisation spatiale au départ de représentations virtuelles, dans différentes conditions, mais aussi au départ d'autres modalités de présentation, permettent de mieux appréhender la manière dont les enfants et les adolescents arrivent à mettre en place ces habiletés en environnement virtuel.

D'abord, les résultats relatifs à la première habileté spatiale ont été présentés grâce aux résultats des deux études menées. Il ressort de ces résultats que la maîtrise de l'habileté de perception visuelle des objets 3D n'est pas systématique chez la plupart des enfants et les adolescents, même à l'âge de 14-15 ans. Autrement dit, la plupart d'entre eux font face à des difficultés à percevoir un ou quelques objets 3D lorsqu'ils sont représentés virtuellement, et ce même si ce sont des objets 3D simple faisant, pour la plupart, l'objet d'apprentissages scolaires. L'analyse des réponses fournies permet par ailleurs d'affiner la compréhension des difficultés de perception dans l'environnement virtuel. Ces difficultés observées permettent de mettre en évidence que la maîtrise de la perception des objets 3D dans l'environnement virtuel est différente de la maîtrise de la perception du matériel physique, même si des performances proches sont parfois observées, en particulier chez les adolescents. Pour autant, les résultats indiquent également que la perception des objets 3D au départ de leur représentation virtuelle semble globalement poser moins de difficultés qu'au départ de leur représentation plane, en particulier pour les enfants plus âgés et les adolescents.

Malgré ces différences observées dans la maîtrise de l'habileté de perception visuelle, les investigations relatives à l'habileté de visualisation spatiale permettent de souligner une proximité plus importante entre les performances des enfants et des adolescents au départ de représentations virtuelles et au départ de matériel physique ou de représentations planes. Dans les différentes modalités investiguées, il apparaît que les enfants et les adolescents ont une maîtrise partielle de l'habileté. Cette maîtrise semble cependant s'améliorer avec l'âge. Malgré la présence de fortes différences individuelles, les résultats montrent que la mise en œuvre d'opérations mentales au

départ de représentations virtuelles est possible à l'âge de 8 ans mais que des difficultés sont encore constatées chez les adolescents. Un même constat est d'ailleurs observé face aux autres modalités de présentation des objets 3D investiguées. Pour autant, à l'occasion de certains exercices, des différences apparaissent entre les supports, avec des résultats davantage en faveur du matériel physique et en défaveur des représentations planes.

Ces études menées, qui se veulent exploratoires étant donné le peu de recherches antérieures sur le sujet et auprès de ce public cible, peuvent donner suite à nombreuses possibilités de recherches ultérieures. En effet, celles-ci ont porté sur un environnement virtuel bien spécifique dont les caractéristiques influencent sans doute le niveau de maîtrise des enfants et des adolescents. De plus, un regard critique peut par ailleurs être posé sur les évaluations proposées ainsi que sur les plans expérimentaux utilisés dans les études. Les discussions générales relatives à chacune des habiletés ont été l'occasion de mettre en avant les limites de l'étude ainsi que de nombreux prolongements pouvant être envisagés pour poursuivre les investigations et continuer ainsi à développer les connaissances relatives au fonctionnement cognitif spatial des enfants et des adolescents dans les simulations virtuelles de l'espace 3D. Malgré ces limites, les résultats obtenus permettent d'ores et déjà d'apporter des éléments de réflexion pour le domaine de la psychologie, notamment par rapport aux supports utilisés pour évaluer les habiletés spatiales des enfants et des adolescents, mais également pour le domaine des sciences de l'éducation ou de la didactique, entre autres quant à l'utilisation de supports virtuels en contexte scolaire. La quatrième partie sera l'occasion de développer ces apports.

PARTIE IV : ÉTUDES
EXPÉRIMENTALES –
APPORTS DES
RÉSULTATS

Introduction de la partie IV

La troisième partie de ce travail, en présentant et discutant les résultats aux deux études menées, a permis d'évaluer le niveau de maîtrise de l'habileté à percevoir visuellement des objets 3D représentés virtuellement chez les enfants et les adolescents âgés de 6 à 15 ans, et de l'habileté à opérer mentalement sur de telles représentations d'objets 3D chez les enfants et les adolescents âgés de 8 à 15 ans. De plus, dans une perspective comparative, ces deux capacités, se rapportant aux habiletés de perception visuelle de la 3D et de visualisation spatiale, ont été investiguées dans différentes modalités (ex. avec ou sans la manipulation de l'objet 3D représenté virtuellement) mais également au départ d'autres types de support utilisés pour présenter les objets 3D (représentations planes, matériel physique).

Cette quatrième, venant clôturer le second volume, ambitionne de mettre en perspective les résultats obtenus. Ainsi, elle se focalise sur les apports des études menées. Structurée en deux chapitres, cette partie se focalise d'abord, au sein du chapitre 11, sur les apports pour le domaine de la psychologie en apportant notamment une réflexion sur les outils d'évaluation de la cognition spatiale. Ensuite, le chapitre 12 propose de décrire les apports pour l'enseignement-apprentissage. En effet, si ce travail s'inscrit pleinement dans le domaine de la psychologie cognitivo-développementale, la volonté que ces résultats servent la réflexion sur l'enseignement-apprentissage, en particulier l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D, a été clairement revendiquée dès l'introduction de ce manuscrit.

Chapitre 11. Apports pour le domaine de la psychologie

Chapitre 11. Apports pour le domaine de la psychologie

11.1. Apports pour la compréhension du fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents en environnement virtuel

Les environnements virtuels tridimensionnels occupent une place importante dans le quotidien des enfants et des adolescents. Déjà au début de ce siècle, Lowrie (2002) mentionnait que notre société était une société dans laquelle les technologies confrontaient les individus à des stimuli visuels modifiant les frontières entre les objets 3D et leurs représentations. Avec le développement des technologies, ces frontières continuent d'être modifiées, que ce soit parce qu'elles prennent une place de plus en plus importante aussi bien en contextes scolaire, académique, professionnel ou dans la vie quotidienne, ou parce qu'elles se développent en offrant de nouvelles possibilités rapprochant le monde virtuel et réel (ex. réalité augmentée, réalité virtuelle, scanner 3D).

Dans ce contexte, étudier les rapports que les enfants et les adolescents entretiennent avec ces environnements et leur capacité à mettre en œuvre des comportements spatiaux dans ces environnements apparaît comme un enjeu essentiel. C'est en particulier le cas de l'étude de l'habileté de perception visuelle des objets 3D puisque cette habileté est incontournable dès que l'individu est confronté à un objet 3D, quelle que soit sa modalité de présentation. D'une certaine façon, en montrant que la perception au départ de représentations virtuelles n'est pas systématique (étude 1 et étude 2, *cf.* 9.1.3), même pour les adolescents et alors que celle-ci porte sur des objets simples, les investigations menées offrent déjà une piste quant aux potentielles difficultés que peuvent rencontrer les enfants et les adolescents lors de la mise en place d'actions dans de tels environnements. Pour autant, les résultats relatifs à l'habileté de visualisation spatiale montrent que ces déficits de perception n'ont pas systématiquement de conséquence sur la mise en place d'opérations mentales sur des objets 3D (étude 2, *cf.* 10.2.10).

Au-delà d'apporter une meilleure connaissance sur le niveau de maîtrise des habiletés de perception visuelle et de visualisation spatiale en environnement virtuel chez les enfants et les adolescents, la présente recherche vient compléter et nuancer les résultats d'études antérieures ayant soit porté sur des publics différents (ex. Krylova & Vodyakha, 2022, qui ont évalué l'habileté de perception visuelle chez les enfants plus

jeunes (4 à 6 ans), ou Sanandaji *et al.* (2017), qui ont évalué la visualisation spatiale en environnement virtuel auprès d'adultes), des habiletés spatiales différentes (ex. Parsons *et al.*, 2004, qui ont évalué l'habileté de rotation mentale au départ de représentations virtuelles) ou des supports différents (ex. Duroisin, 2015, qui a évalué l'habileté de visualisation spatiale auprès du même public cible mais au départ de matériel physique). Les discussions relatives à chacune des habiletés ont permis de mettre en évidence les similitudes et divergences entre ces études et ainsi d'affiner la compréhension du fonctionnement cognitif en environnement virtuel.

Ainsi, la présente recherche semble permettre d'apporter des éléments de réponse par rapport au débat relatif aux éventuelles différences entre le fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents en environnement virtuel et dans l'espace sensible. En effet, au travers des investigations menées sur l'habileté de perception visuelle (étude 2, *cf.* 9.5.2), les résultats ont permis de soutenir l'hypothèse de Rose et Foreman (1999) concernant l'existence de divergences dans les capacités perceptives dans les deux modalités. Ces divergences semblent par ailleurs observées pour les enfants et pour les adolescents. Les investigations menées sur l'habileté de visualisation spatiale (étude 2, *cf.* 10.5.9) permettent de nuancer quelque peu ces propos en montrant que pour la mise en place d'actions mentales plus complexes sur les objets 3D, même si les résultats sont mieux réussis dans l'espace sensible qu'en environnement virtuel, les différences entre les deux ne sont pas forcément significatives. De plus, les deux études ont aussi permis de mettre en avant certaines proximités entre les constats réalisés dans l'espace sensible et en environnement virtuel, que ce soit pour la première ou la deuxième habileté. Citons par exemple que les performances spatiales varient selon les objets 3D dans les deux modalités et qu'elles sont marquées par la présence de différences individuelles. Citons également certaines mêmes difficultés rencontrées dans les deux modalités, par exemple pour la perception du prisme, ou la réalisation d'exercices de coupe oblique.

11.2. Réflexions sur les supports utilisés lors de l'évaluation de la cognition spatiale chez les enfants et les adolescents

Au-delà d'augmenter les connaissances sur le fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents face à des représentations virtuelles, les résultats expérimentaux ici présentés, grâce à l'approche comparative empruntée dans les études, permettent d'ouvrir une réflexion sur les supports et modalités d'évaluation utilisés lors d'épreuves

psychométriques cherchant à évaluer les rapports de l'individu avec l'espace sensible et sur l'intégration des environnements virtuels dans ces épreuves. Ce type d'épreuve apparaît important pour, d'une part, pouvoir identifier des élèves avec des talents dans les domaines des STEM (sciences, technologie, ingénierie et mathématiques). D'autre part, cela permet de pouvoir proposer aux élèves des interventions et entraînements adaptés à leur développement spatial (Vander Heyden *et al.*, 2016).

11.2.1. Réflexions sur la dimensionnalité des supports utilisés et la numérisation des épreuves

À ce jour, nombreuses sont les épreuves psychométriques qui permettent d'évaluer le sens spatial ou de manière spécifique une ou plusieurs habiletés spatiales auprès d'enfants ou d'adultes (Perichon & Duroisin, 2024). Comme l'évoquent Pathak *et al.* (2020), une grande quantité d'entre elles sont proposées sous un format classique d'épreuve papier-crayon. C'est le cas par exemple pour le *Mental Rotation Test* (MRT) proposé par Shepard et Metzler (1971). Ces épreuves, lorsqu'elles portent sur l'espace 3D, confrontent donc les individus à des représentations 2D d'objets 3D.

Les résultats des investigations menées sur les habiletés de perception visuelle au départ de représentations 2D (études 1 et 2, *cf.* 9.4.3) invitent à la prudence quant à l'utilisation d'épreuves impliquant les représentations 2D. Puisque les deux études menées indiquent que la perception des objets 3D apparaît problématique pour les enfants et les adolescents âgés de 6 à 15 ans, il est possible de considérer que ces difficultés sont susceptibles de rendre plus complexe la résolution des tâches spatiales demandées ensuite au départ de telles représentations, ce que confirment partiellement les résultats obtenus à l'égard de l'habileté de visualisation. Ces représentations exigeraient alors une demande cognitive plus importante et des capacités d'abstraction plus élevées (Hawes *et al.*, 2015a). Dès lors, ce type d'épreuve possède des limites puisque les performances au niveau de l'habileté investiguée seraient impactées par la capacité à lire les représentations fournies. Un déficit dans les résultats aux tâches proposées pourrait alors non pas être dû à une incapacité à mettre en œuvre l'habileté spatiale étudiée dans l'espace sensible, mais bien à une difficulté à percevoir les stimuli présentés. Si elle avait été donnée au départ d'autres supports, cette tâche aurait pu être réussie. Le risque avec ce type d'épreuve est donc d'avoir une mauvaise interprétation des capacités des individus dans l'espace sensible.

Ces observations s'inscrivent d'ailleurs dans la lignée des observations de Hawes *et al.* (2015a) qui considèrent qu'il est préférable d'éviter d'évaluer des compétences 3D au départ de représentations 2D, en particulier avec les enfants. Ils apparaissent également cohérents avec les propos de Jansen *et al.* (2013) qui considèrent que les représentations 2D d'objets 3D exigent une charge cognitive trop importante et que, par conséquent, ce type de support n'est pas adapté pour l'évaluation des habiletés spatiales chez des publics plus jeunes.

Pour Cohen et Hegarty (2012), une des pistes potentielles aux épreuves papier-crayon, pour éviter les limites susmentionnées, concerne l'utilisation de représentations virtuelles en remplacement des représentations 2D. Huang *et al.* (2023) ou encore Liu (2023) considèrent également que des tests proposant des représentations virtuelles pourraient fournir des stimuli plus adaptés que les épreuves traditionnelles de type papier-crayon, grâce notamment à la plus forte transmission d'informations qu'ils offrent sur l'objet 3D et qui sont requises dans les tests visuo-spatiaux. Au-delà d'offrir d'autres modes de représentation, ces alternatives pourraient aussi permettre de tirer profit d'autres avantages relatifs aux épreuves informatisées tels que la possibilité de génération de multiples épreuves, l'augmentation de l'implication et de l'engagement des sujets, la réduction du temps et du coup, la facilité et précision dans l'administration ou encore l'automatisation de la cotation (Perichon & Duroisin, 2024).

Néanmoins, les résultats des deux études menées concernant les capacités de perception des représentations virtuelles invitent à conserver une certaine prudence à l'égard de la recommandation apportée par Cohen et Hegarty (2012). D'une part, chez les enfants âgés de 6 à 7 ans, les études ont permis de montrer que les supports virtuels occasionnent des comportements perceptifs parfois comparables aux représentations 2D, posant des difficultés à de nombreux enfants. À cet âge-là, si l'objectif est d'étudier les capacités cognitives dans l'espace sensible, il semble donc plutôt pertinent d'envisager du matériel physique et non des représentations de ce matériel physique. C'est d'ailleurs ce que recommandent Hawes *et al.* (2015a) ou Jansen *et al.* (2013). D'autre part, pour les enfants plus âgés et les adolescents, les capacités de perception des objets 3D en environnement virtuel s'avèrent plus élevées qu'au départ de représentations planes. L'utilisation de tests informatisés impliquant ces représentations peut donc constituer une piste plus adaptée que les épreuves papier-

crayon. Pour autant, les résultats obtenus ont mis en lumière que la perception des objets 3D, même simples, n'est pas systématique et peut poser des difficultés à certains enfants et adolescents, même à 15 ans. De ce fait, en partant sur le même principe que la critique émise à l'égard des représentations planes, les résultats incitent à considérer que les représentations virtuelles peuvent ne pas être le support optimal si on cherche à évaluer certaines capacités spécifiques des enfants dans l'espace sensible. Face à ces représentations, il est donc possible que des difficultés de perception viennent à nouveau biaiser les performances des individus et donc l'interprétation qui en découle du niveau d'acquisition de l'habileté évaluée. Quand l'objectif est de comprendre le fonctionnement spatial des enfants et des adolescents dans l'espace sensible, il semble optimal d'envisager, encore à cet âge, une résolution de tâches au départ de matériel physique et pas de remplacer ce matériel par d'autres supports.

D'une certaine façon, cette réflexion porte sur le caractère écologique des évaluations dont l'intention est d'étudier le fonctionnement cognitif des individus dans l'espace sensible. Cela n'exclut évidemment pas que mener des études au départ de matériel virtuel reste pertinent. Comme susmentionné, cela constitue un enjeu à poursuivre pour comprendre comment les enfants et les adolescents agissent mentalement sur ces environnements virtuels. Le problème relève plutôt de l'interprétation des éventuelles difficultés rencontrées ainsi que de la généralisation des résultats à l'espace sensible.

Si les résultats obtenus au travers de la seconde étude semblent majoritairement s'inscrire en faveur du matériel physique au détriment des représentations virtuelles et planes, ceux-ci peuvent être nuancés. D'une part, les résultats ont montré que, pour certains objets 3D, la perception de représentations virtuelles est équivalente à la perception de matériel physique (ex. la sphère et l'anneau rond quand le matériel peut être manipulé et l'anneau droit quand il peut uniquement être observé, cf. 9.5.1.1). D'autre part, les résultats obtenus lors des investigations relatives à l'habileté de visualisation spatiale permettent quelque peu de nuancer les propos. En effet, cette habileté qui a été investiguée au travers de tâches de coupe et d'empreinte, a permis de montrer des tendances communes dans le niveau de maîtrise de l'habileté lorsque celle-ci est évaluée au départ de matériel virtuel et de matériel physique, même si des divergences apparaissent pour quelques rares exercices et même si des erreurs types différentes sont aussi parfois observées (étude 2, cf. 10.5). Une proximité est également constatée dans le niveau de maîtrise obtenu au départ de représentations

virtuelles et planes d'objets 3D. Il apparaît donc que, dans certaines tâches spatiales, le fait de ne pas percevoir adéquatement l'objet n'impacte pas la réussite ou l'absence de réussite des tâches.

11.2.2. Réflexions sur d'autres aspects susceptibles d'influencer les performances et d'expliquer les écarts entre études

En plus de poser un regard critique sur le matériel d'évaluation et sur la réflexion quant aux stimuli à proposer, les résultats obtenus aux études menées permettent d'apporter des explications potentielles aux divergences observées dans la littérature par rapport au niveau de maîtrise de certaines habiletés spatiales chez les individus. En effet, pour la rotation mentale à appliquer sur des objets 3D, certaines recherches, comme celle de Hawes *et al.* (2015a), évaluant l'habileté au départ de matériel physique, semblent montrer que les jeunes enfants sont capables de mettre en place des rotations mentales en 3D alors que d'autres recherches, proposant une évaluation avec des représentations 2D d'objets 3D, à l'instar de Hoyek *et al.* (2012) ou de Ruthsatz *et al.* (2017), semblent montrer des résultats différents. Au vu des résultats comparatifs obtenus dans les deux études menées, montrant un effet de la dimensionnalité des supports utilisés sur la maîtrise des capacités perceptives (études 1 et 2, *cf.* 9.4 et 9.5), les divergences de résultats observés entre les auteurs au niveau de la maîtrise des habiletés spatiales peuvent être expliquées par les différents supports utilisés. Pour autant, les résultats obtenus lors de l'évaluation de l'habileté de visualisation spatiale (étude 2, *cf.* 10.4 et 10.5) invitent à considérer que les supports utilisés ne constituent pas systématiquement une raison qui peut expliquer les divergences de résultats entre études.

Au-delà de la dimension des stimuli, les résultats obtenus dans les deux études menées invitent à considérer que d'autres éléments peuvent impacter les performances des individus à des tâches évaluant des habiletés spatiales.

Un premier élément concerne les objets 3D. En effet, les résultats de l'étude, comme le confirment également d'autres études (Duroisin, 2015 ; Wu & Chiang, 2013), permettent de montrer que les performances spatiales varient entre les objets 3D, aussi bien pour l'habileté de perception visuelle de la 3D que pour l'habileté de visualisation spatiale. C'est d'ailleurs ce qui peut expliquer quelques divergences observées entre les résultats obtenus dans la seconde étude au niveau de la

visualisation spatiale et l'étude de Duroisin (2015), notamment suite à l'ajout d'exercices portant sur l'anneau rond.

De même, dans le cadre de l'évaluation de l'habileté de visualisation, les résultats indiquent que les performances varient selon le type d'opération mentale exigée dans l'évaluation. À nouveau, cela peut constituer une raison expliquant les décalages entre les résultats de recherches qui ne proposent pas toujours les mêmes types de tâche pour évaluer la visualisation. Par exemple, selon les tests, différents types de coupe sont proposés. De plus, toujours dans le cadre spécifique de l'évaluation de la visualisation spatiale au travers de tâches de coupe, la manière dont les coupes sont présentées varie selon les épreuves psychométriques ou les études (couteau placé contre l'objet 3D, couteau ayant déjà entamé la coupe, plan de coupe dessiné transparent, plan de coupe coloré...). Ces différentes modalités sont susceptibles elles aussi d'occasionner des performances différentes. Certaines modalités, telles que l'utilisation d'un plan non transparent, constituent sans doute une aide rendant visible l'intersection entre le plan et l'objet 3D (Sanandaji *et al.*, 2017 ; Ratliff *et al.*, 2010). Ici, nous nous sommes focalisés sur une seule modalité mais il pourrait être intéressant d'investiguer, au travers d'une étude comparative, l'impact de cette variable, que ce soit sur du matériel physique, sur du matériel virtuel ou sur des représentations planes. Sans doute que, dans le cadre d'une évaluation destinée aux enfants, certaines modalités sont plus adaptées et permettent aux participants de se représenter mentalement le plan de coupe plus facilement.

Par ailleurs, selon les études, les tâches utilisées sont parfois des tâches de reconnaissance avec distracteurs et parfois des tâches de production, ce qui explique certainement des divergences de résultats constatées entre les études menées. Par exemple, concernant l'impact de la manipulation des stimuli (matériel physique), notre étude a permis de mettre en lumière une absence globale de l'influence de la manipulation des stimuli avant la résolution d'une tâche de coupe alors que Gori *et al.* (2024) semblent eux avoir mis en évidence une influence de la manipulation du matériel physique sur la résolution d'exercices de coupe de solides proposés au travers d'une tâche de reconnaissance et non de production.

Rappelons d'ailleurs que l'utilisation de tâches de production est une raison qui justifie de potentielles sous-estimations de l'acquisition des capacités observées par exemple par Piaget et ses collègues, qui se sont focalisés sur des tâches de production

(Marmor, 1975). Malgré cette limite, nous avons ici, nous aussi, fait le choix d'une tâche de production dans la mesure où peu de recherches antérieures ont évalué cette habileté dans l'environnement virtuel chez les enfants et les adolescents. Dans ce contexte, il nous est apparu pertinent, en guise d'étude exploratoire, de proposer cette tâche de production notamment afin de pouvoir recenser les erreurs types pouvant se produire au départ de représentations virtuelles et les comparer avec celles observées dans les autres modalités. À ce sujet, les résultats obtenus ont permis de montrer une diversité des erreurs types réalisées par les enfants et les adolescents. Une telle constatation invite à prendre du recul par rapport aux épreuves existantes proposant des exercices de reconnaissance (ex. Sanandaji *et al.*, 2017 ; Cohen et Hegarty, 2012 ;...). Ces épreuves incluent certains choix correspondant à des erreurs types identifiées (ex. dessin de la coupe sans prise en compte de la perspective). Pour autant, d'autres erreurs types commises, alors qu'elles apparaissent régulièrement, ne semblent pas incluses dans les propositions de ces épreuves (ex. dessin du point de vue extérieur sur l'objet 3D). Cette absence peut donc entraîner une surestimation des capacités des individus qui pourraient se rabattre « par défaut » sur la proposition correcte. Cela constitue d'ailleurs une limite aux tâches de reconnaissance, dans lesquelles les distracteurs influencent les résultats. Ici, les résultats obtenus au travers de l'investigation de l'habileté de visualisation spatiale, recensant les erreurs types principalement commises, pourraient servir de base à la création d'une épreuve de reconnaissance.

Chapitre 12. Apports pour l'enseignement-apprentissage

Chapitre 12. Apports pour l'enseignement-apprentissage

Dès la première partie de ce travail, et plus particulièrement dans le quatrième chapitre (volume 1), plusieurs enjeux relatifs à l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D et notamment aux supports utilisés par les enseignants ont pu être mis en évidence. En effet, avec le développement des technologies dans les établissements scolaires (TBI, tablettes...), de nouvelles possibilités de supports d'apprentissage semblent offertes aux enseignants. Ces derniers peuvent en effet utiliser des « solides virtuels », qui sont des représentations virtuelles de solides. Pour autant, un manque de recommandations est observé dans les prescrits au sujet des différents supports d'apprentissage et les recherches comparatives portant sur les différents supports d'apprentissage sont également peu nombreuses.

Les investigations sur les pratiques mises en œuvre par les enseignants (Beauset *et al.*, 2024b) permettent de relever une diversité des supports utilisés lors de l'apprentissage de la géométrie 3D entre les niveaux scolaires et entre les enseignants d'un même niveau scolaire, avec le risque que cela occasionne des ruptures dans les parcours d'apprentissage. Si l'usage des supports virtuels reste encore minoritaire, certains enseignants, parfois en charge des premières années de la scolarité, déclarent utiliser ce matériel en remplacement de matériel 3D. De plus, un besoin de formation est exprimé par les enseignants au sujet des supports à utiliser pour développer les apprentissages en géométrie.

Dans la littérature portant sur les supports d'apprentissage en géométrie 3D, il semble que de nombreux auteurs insistent sur l'importance de la manipulation du matériel physique. Parmi ceux-ci, il est par exemple possible de citer Audibert et Bonafé (1986), Douaire *et al.* (2009) ou encore Mithalal (2014). *A contrario*, Sinclair et Bruce (2014) soulignent que, depuis le début des années 2000, une tendance à la remise en question de l'hypothèse selon laquelle les outils « concrets » sont plus appropriés pour les jeunes enfants. Cette revendication prend appui d'une part sur la familiarité entre outils de manipulation physiques et virtuels mais surtout sur les gammes de possibilités offertes par le matériel virtuel par rapport aux manipulations limitées associées au matériel physique alors même que ces actions peuvent promouvoir à la fois des actions mathématiques et des réflexions sur ces actions.

Certains résultats encourageants ont pu être observés quant à l'effet de l'usage de représentations virtuelles par exemple pour l'apprentissage de la géométrie en enseignement primaire (Bertolo, 2014 ; Demitriadou *et al.*, 2019 ; Flores-Bascuñana *et al.*, 2020) ou secondaire (Liu *et al.*, 2018). Néanmoins, peu d'études ont porté sur la comparaison de l'effet des supports sur le développement des apprentissages en géométrie (Thamrongrat & Law, 2019 ; Claisse, 2020) et au sein des quelques études existantes, un consensus ne semble pas se dessiner quant à la plus-value du matériel virtuel en comparaison au matériel physique. Plusieurs recherches, par exemple Rossano *et al.* (2020) ou Althibyani (2023), mettent en avant l'intérêt des outils numériques pour l'engagement et la motivation des élèves en géométrie 3D ou dans d'autres domaines. Pour autant, il apparaît essentiel de garder à l'esprit que ce n'est pas le seul critère à prendre en considération dans le choix du/des supports. Aussi engageant qu'il puisse l'être, un support n'apparaissant pas adapté au fonctionnement cognitif des élèves pourrait générer des difficultés lors des apprentissages. À titre d'exemple, Frick et Newcombe (2015) soulignent que les difficultés des enfants à se représenter les objets 3D au départ de représentations 2D invitent à la prudence au niveau de leur usage avec ce public cible dans le domaine éducatif.

En effet, si nous évoquons qu'un déficit de perception pouvait parfois ne pas impacter la résolution de tâches demandées, ce qui s'est d'ailleurs confirmé au travers de l'étude de la visualisation spatiale (étude 2, *cf.*10.2.9), il semble que dans le cadre des apprentissages en géométrie, qui visent notamment à définir des objets théoriques en fonction de leurs propriétés, cette capacité de perception apparaît indispensable. La maîtrise des capacités à se représenter et à manipuler mentalement les objets participe à l'aisance des élèves en géométrie 3D (Mithalal, 2014) et constitue un prérequis important à la compréhension des concepts dans ce domaine d'apprentissage (Kaur *et al.*, 2018).

Dans ce contexte, investiguer si les performances à des tâches évaluant ces capacités varient selon les supports utilisés permet de fournir des indications sur le caractère adapté ou non des supports au développement cognitif des élèves. Cela participe ainsi à la réflexion sur la pertinence de ces supports. Une telle investigation constitue un prérequis nécessaire avant toute étude évaluant l'impact des supports utilisés en classe sur les apprentissages. En effet, avant d'évaluer les potentielles différences de résultats entre un apprentissage proposé avec ce type de support et avec d'autres supports (modèles 3D, ...), il apparaît essentiel de vérifier si les enfants et les adolescents sont

en capacité de percevoir correctement les solides proposés via ces supports et d'agir mentalement sur ces derniers. Un enfant qui n'arriverait pas à percevoir adéquatement les solides présentés et à agir mentalement sur ces solides pourrait être lésé dans ses apprentissages. Widder *et al.* (2019) s'accordent d'ailleurs pour dire que comprendre les difficultés visuelles des élèves face aux représentations de solides utilisées permet de fournir des recommandations aux enseignants vis-à-vis des supports d'apprentissages à utiliser.

Les deux études expérimentales présentées dans ce travail, en apportant une meilleure connaissance du fonctionnement cognitif des élèves face aux différents supports, notamment face aux supports virtuels, et selon certaines modalités d'utilisation de ces supports (ex. avec manipulation autorisée ou non), peuvent enrichir la réflexion à l'égard de l'utilisation de ces derniers lors de l'apprentissage de la géométrie 3D. Elles peuvent permettre d'anticiper des potentielles difficultés d'apprentissage susceptibles de survenir. De plus, en prenant appui sur les erreurs types réalisées par les élèves, elles permettent de mener une réflexion sur l'accompagnement à fournir aux élèves.

12.1. Les représentations virtuelles de solides : créatrices d'obstacles potentiels, en particulier lors des premiers apprentissages

Même si elle semble le plus souvent en grande partie acquise, les deux études ici menées (*cf.* 9.1.1 et 9.1.2) ont permis de montrer que la perception des solides virtuels est non systématique, en particulier chez les plus jeunes élèves chez qui elle posait davantage de difficultés, mais également encore chez certains adolescents. De tels résultats invitent, comme l'ont fait Frick et Newcombe (2015) à l'égard des représentations 2D, à la prudence au niveau de leur usage avec ce public cible dans le domaine éducatif. En effet, ce matériel est susceptible d'occasionner des obstacles pour les apprentissages s'il est utilisé en remplacement du matériel physique. Il s'agit alors pour les enseignants de ne pas considérer ces deux types de matériel comme équivalents. Si les résultats indiquent que des difficultés de perception sont susceptibles d'intervenir pour les différents objets 3D, les difficultés de perception plus marquées pour le prisme amènent à être particulièrement prudent vis-à-vis de ce solide.

Les obstacles pourraient en priorité intervenir quand les représentations virtuelles des solides sont utilisées dans le début des apprentissages en géométrie 3D, au

moment de découvrir le(s) solide(s) géométrique(s), de se construire des images mentales de ces derniers, permettant ensuite d'apprendre à les reconnaître et les caractériser. En effet, la perception est indissociable et antérieure à l'étape de reconnaissance puisque, pour pouvoir reconnaître et associer l'objet géométrique à sa catégorie, il faut d'abord le percevoir. La perception est d'autant plus dominante que les élèves ne disposent pas de connaissances géométriques sur les objets 3D puisque l'enjeu est justement de les construire. Or, quand ils font face à peu de connaissances géométriques, les élèves prennent évidemment appui sur ce qu'ils perçoivent pour résoudre les tâches (Fujita *et al.*, 2020), ce qui confirme l'importance de la perception sur les premiers apprentissages.

Lorsqu'on présente des objets 3D au départ de leur représentation virtuelle, les deux études ont plus particulièrement montré certains enfants et adolescents ne se les représentent pas comme les objets 3D attendus mais comme des objets 3D possédant des caractéristiques différentes, principalement des objets dont la taille est modifiée, mais aussi parfois d'autres objets 3D, par exemple des objets dont l'inclinaison a été modifiée, dont la base a été inclinée ou rétrécie. En utilisant des environnements virtuels uniquement (en remplacement complet du matériel physique, au moment de la construction des images mentales des solides), le risque est que les images mentales construites des objets théoriques ne respectent pas les propriétés de ces objets. Autrement dit, dans la mesure où les images mentales qui se construisent sont centrées sur les objets préalablement perçus et incluent les propriétés de l'entité (Griva & Raftopoulos, 2014), le risque est que les images mentales se construisent en prenant appui sur des propriétés spatiales différentes de celles que possèdent réellement les objets théoriques, ce qui est susceptible d'impacter les apprentissages ultérieurs et d'entraîner notamment des incompréhensions au moment de formaliser ces propriétés et caractéristiques de l'objet. En effet, les propriétés théoriques des solides que l'élève doit apprendre pourraient entrer en conflit avec l'image mentale qu'il s'est fait du solide qui lui est présenté. Notons cependant que les deux études soulignent qu'une des erreurs les plus fréquentes dans la tâche de perception observée au départ de représentations virtuelles relève de la sélection de l'objet 3D dont la hauteur est modifiée (*cf.* 9.1.1.1 et 9.1.2.1). Un tel déficit de perception n'entraînera pas forcément de répercussion sur la construction des images mentales dans la mesure où les caractéristiques qui permettent de définir le solide ne sont pas impactées. D'autant que cette erreur semble par ailleurs peu observée sur des solides dans les exercices du cube

et de la sphère, pour qui une modification de la hauteur uniquement entraîne une modification des caractéristiques de l'objet 3D. Pour autant, si pour certains objets 3D, une telle erreur n'impactera pas forcément la compréhension des caractéristiques minimales du solide, elle pourrait toutefois impacter la résolution de certains exercices qui s'y rapportent (ex. tâche d'identification des vues du solide, tâche de développement). Notons par ailleurs que d'autres erreurs de perception, bien que moins courantes, sont aussi commises et peuvent, elles, impacter plus fortement les apprentissages.

Les deux études (cf. 9.1.1 et 9.1.2) montrent également qu'il arrive à certains enfants et adolescents de percevoir correctement les objets 3D présentés tout en les envisageant aussi comme pouvant être d'autres objets 3D. À nouveau, une telle situation risque d'occasionner un conflit semblable au conflit précédemment évoqué, voire d'amener les élèves à effectuer des généralisations abusives à propos des caractéristiques des objets 3D, avec le risque de provoquer des difficultés au moment de définir les caractéristiques des solides et d'effectuer des classements entre les différents objets 3D.

S'ajoute à cela le cas des enfants et des adolescents qui en restent à des comportements bidimensionnels et qui semblent ne pas concevoir que ce qui est présenté est un objet tridimensionnel. Ces enfants, eux aussi, risquent inmanquablement d'être confrontés à des difficultés de construction des images mentales des solides géométriques.

Dans toutes ces situations (perception inadéquate ou non-perception de la 3D), une rupture pourrait alors être observée entre l'enseignant et l'élève puisque ces derniers parleraient d'un même objet mais perçu par chacun de façon différente. Les discours de l'un pourraient alors ne pas être compris par l'autre.

Même dans la suite des apprentissages, c'est-à-dire au moment où, normalement, les élèves disposent de connaissances sur les objets géométriques théoriques et se les représentent correctement au départ de leur nom, les solides virtuels s'ils sont utilisés seuls et sans accompagnement préalable, continuent à être susceptible d'occasionner des obstacles d'apprentissage pour certains élèves ayant des difficultés à percevoir les objets 3D. En effet, tout au long des apprentissages, les processus perceptifs continuent à occuper, peut-être à tort, une place importante et les enfants ont des difficultés à se détacher de ce qu'ils voient sur le dessin au profit des savoirs qu'ils possèdent à l'égard

des objets géométriques (Parzysz, 1988), par exemple au profit des connaissances théoriques fournies dans l'énoncé.

Les enfants et les adolescents qui, en observant le solide virtuel, n'arrivent pas à se le représenter comme un objet 3D, risquent d'être confrontés à des difficultés à résoudre les tâches demandées et à développer les apprentissages visés. Pour les élèves qui, en observant le solide virtuel, considèrent que l'objet présenté est plusieurs propositions 3D dont l'objet 3D attendu, les difficultés observées pourraient être moindres puisqu'ils devraient pouvoir prendre appui sur les connaissances géométriques qu'ils possèdent, à condition qu'elles soient correctes, pour conserver uniquement la bonne représentation mentale et se défaire de celles qu'ils envisageaient comme possibles.

Pour ceux qui admettent que l'élément présenté est en trois dimensions mais ne se le représentent pas correctement, un conflit risque d'émerger entre l'image mentale antérieure qu'ils ont du solide (construite avec un autre support d'apprentissage) et celle qu'ils ont suite à la perception inadéquate en environnement virtuel. Ce conflit risque ainsi la déstabilisation des connaissances qu'ils possèdent à l'égard des objets 3D. De plus, cette non-maitrise de la perception est susceptible d'occasionner des difficultés dans la résolution de tâches ultérieures impliquant de telles représentations comme les tâches de lecture d'informations sur des représentations ou encore d'identification de développement de solides. Si, précédemment, nous évoquions que le fait de considérer l'objet 3D comme un objet d'une hauteur différente pouvait potentiellement ne pas impacter négativement la construction de l'image mentale des solides, ce déficit dans la perception peut en revanche impacter la résolution de telles tâches.

La recherche ne porte pas directement sur le conflit entre le « vu » et le « su » mis en évidence par Parzysz (1988). Pour autant, les résultats semblent indiquer qu'au départ de représentations 2 ½ D, le conflit entre le « vu » et le « su » apparaît peu probable. Le caractère dynamique de la représentation permet en effet d'observer des informations en vraie grandeur (en plaçant les informations à lire dans un plan parallèle au plan de projection) permettant aux élèves de dépasser ce qui apparaît sur la représentation en position initiale. La rareté de la sélection des propositions « objets 3D dont la ou les bases ont été modifiées » dans les tâches de perception illustre la capacité des enfants et des adolescents à dépasser ce qui est « vu » sur la représentation de départ. En revanche, puisque la perception de représentations

virtuelles n'apparaît pour autant pas automatique et que d'autres propositions 3D non attendues sont sélectionnées, il est plutôt possible d'envisager chez ces élèves un conflit entre le « perçu » et le « su », c'est-à-dire entre la représentation mentale que l'élève se fait de l'objet 3D au départ de sa représentation, et les informations géométriques théoriques fournies à l'enfant (nom de la figure...).

Les investigations menées par ailleurs au sujet de la perception de représentations 2D mettent en évidence des taux de perception adéquate plus faibles au départ de représentations 2D qu'au départ de représentations 2 ½ D. Cela invite aussi à compléter les propos de Parzyzs concernant le conflit entre le « vu » et le « su » en intégrant la dimension du « perçu ». Face à de telles représentations, le « vu » et le « perçu » peuvent être considérés comme équivalents quand l'élève n'arrive pas à dépasser la perspective égocentrée au moment de se représenter le solide, comme cela a pu surtout se produire pour le prisme, le cône ou l'anneau à bord rond dans la tâche de perception. En revanche, les résultats obtenus pour la perception du cube, par exemple, montrent que la plupart des enfants et des adolescents sont capables de dépasser le « vu » en acceptant que la forme de la face sur l'objet 3D représenté en perspective n'est pas la forme de la face en réalité. Même s'ils sont capables de dépasser ce qui est « vu », cela ne signifie pas qu'ils perçoivent systématiquement adéquatement l'objet 3D puisqu'ils réalisent parfois d'autres choix 3D non attendus. Dans ce contexte, comme au départ de représentations 2 ½ D, un conflit entre le « perçu » et le « su » est susceptible de se produire. Comme les résultats obtenus l'indiquent, il arrive évidemment que l'enfant ou l'adolescent se fasse une image mentale adéquate de l'objet 3D qu'on souhaitait lui présenter. Dans ce cas, le « perçu » se confond avec le « su ».

Que ce soit au départ de représentations 2 ½ D ou de représentations 2D, investiguer ce potentiel niveau supplémentaire « perçu » constitue une piste de prolongement afin de comprendre comment ce niveau peut influencer les performances à des tâches impliquant la lecture d'information sur des représentations 2D.

Comme précédemment évoqué, les résultats obtenus au travers des études menées amènent à une certaine prudence quant à l'utilisation de tels supports, puisque ces derniers sont susceptibles de provoquer des obstacles. Il s'agit d'être encore plus précautionneux compte tenu des caractéristiques de l'environnement virtuel utilisé dans les expérimentations (simplicité d'utilisation, limitation des manipulations...). Les

habiletés spatiales de perception et de visualisation spatiale, qui pourtant ne semblent pas maîtrisées par tous les enfants et les adolescents, pourraient l'être encore moins avec des environnements plus complexes comme ceux susceptibles d'être utilisés lors des apprentissages scolaires. Bien que ces environnements offrent souvent plus d'opportunités de manipulations (agrandissement, déplacement, mise en évidence d'éléments caractéristiques...), qui pourraient en soi apporter une plus-value dans le cadre de certains apprentissages, ils occasionnent aussi des manipulations plus complexes, susceptibles d'augmenter la charge mentale et de poser plus de difficultés. Plus particulièrement, comme évoqué dans les pistes de prolongements aux études menées, la possibilité d'appliquer d'autres rotations que celles, limitées, proposées dans l'application utilisée est susceptible de complexifier la perception.

À l'heure où les technologies occupent une place importante dans les établissements et où une tendance au « tout numérique » est parfois observée, comme si ce type de matériel était systématiquement équivalent voire plus bénéfique que d'autres types de support, l'étude menée permet d'apporter de la nuance dans cette manière d'envisager l'enseignement-apprentissage dans les domaines impliquant l'espace 3D. Cette prise de précaution est d'autant plus importante que les résultats montrent que la perception de représentations 2 ½ D est davantage adaptée aux enfants et aux adolescents étant capables de faire preuve de rotation mentale, et donc pouvant être considérés comme « plus fort » spatialement, tout du moins par rapport à cette capacité (étude 2, cf. 9.1.2.3 et 9.2.2.3). Le danger est donc de proposer un type de support qui risque d'augmenter l'écart entre les élèves plus en difficultés sur le plan des compétences spatiales et les autres.

12.1.1. Les représentations virtuelles de solides : un support à bannir ?

Pour autant, la prudence précédemment évoquée ne signifie pas que le matériel virtuel est sans intérêt, voire à bannir pour l'apprentissage. Il ne s'agit pas en effet de renier les propos d'autres chercheurs, notamment en didactique des mathématiques, à l'instar de Flores-Bascuñana *et al.* (2020), Gutiérrez (1996) ou encore Lai *et al.* (2016), qui considèrent que ce type de matériel peut apporter une plus-value pour les apprentissages. Les manipulateurs virtuels offrent en effet une gamme de possibilités supplémentaires, pas toujours possibles avec du matériel physique (Sinclair & Bruce, 2015).

Au vu du contenu des référentiels, en tout cas en ce qui concerne la Belgique francophone, les représentations virtuelles d'objets 3D ne constituent pas un objet d'apprentissage en tant que tel. Elles doivent dès lors plutôt être envisagées comme un moyen de renforcer les apprentissages attendus. En particulier, au regard de ce que la littérature suggère, elles peuvent constituer une aide au passage des représentations 2D de solides à ces solides (Audibert, 1990 ; Vivian *et al.*, 2014). D'autant que la construction d'une bonne image mentale des objets 3D à partir de leur représentation plane est considérée comme une étape cruciale pour l'apprentissage de la géométrie (Pittalis & Christou, 2013) mais semble particulièrement poser des difficultés comme le confirment les résultats des études menées.

Au-delà d'encourager le passage aux représentations 2D, elles offrent l'opportunité de visualiser rapidement et facilement diverses manipulations sur les objets (coupes de solides, développement...). De plus, leur usage peut permettre d'encourager le développement des habiletés visuo-spatiales (Di & Zheng, 2022) ce qui, rappelons-le, constitue un enjeu important pouvant favoriser le développement des compétences en géométrie.

Dans ce contexte, il s'agit plutôt, au vu des résultats invitant à la prudence dans leur utilisation, de mener une réflexion sur les conditions à rencontrer lors de l'usage des représentations virtuelles avec les enfants et les adolescents dans le cadre des apprentissages scolaires, plutôt que de questionner la légitimité ou non de leur utilisation.

12.1.2. Conscientiser les enseignants sur les difficultés de perception de représentations virtuelles et de manipulation mentale

Une condition essentielle est d'abord que l'enseignant soit conscient que des difficultés de perception des objets 3D dans les environnements virtuels peuvent être rencontrées par les enfants et aussi par les adolescents. En effet, considérer à tort cette habileté comme maîtrisée par les apprenants risque d'occasionner une incompréhension des difficultés d'apprentissage des élèves, voire de générer sans s'en rendre compte, dans ses choix de pratique, la création de ruptures multiples (entre les niveaux scolaires, entre l'enseignant et l'élève...) et donc d'obstacles lors des apprentissages.

Pour autant, si cette simple condition apparaît essentielle, elle ne semble pas suffisante à en croire ce qui est observé dans les pratiques et conceptions enseignantes

en lien avec l'utilisation des représentations 2D de solide. En effet, comme nous avons notamment pu le développer au regard des résultats de l'enquête menée sur les pratiques enseignantes en géométrie 3D (Beuset *et al.*, 2024b), même en étant conscients des difficultés rencontrées par les élèves face aux représentations 2D, les enseignants mettent parfois peu en place des activités pour accompagner les élèves et font des choix de pratiques, notamment en matière d'évaluation, qui ne tiennent pas compte de ces difficultés dont ils ont pourtant conscience. Il s'agit alors, au-delà de développer leur connaissance sur le fonctionnement cognitif des élèves, de pouvoir leur fournir des indications et pistes plus concrètes quant à l'utilisation des supports virtuels lors des apprentissages.

Au-delà d'être conscient que la perception des objets 3D représentés virtuellement n'est pas systématique, il s'agit également d'être conscient que la perception est le plus souvent acquise partiellement. Cela signifie que les élèves peuvent percevoir adéquatement certains objets mais pas forcément d'autres, ce qui invite d'autant plus à la prudence. De même, il s'agit d'être conscient des différences individuelles constatées à ce sujet.

12.1.3. Éviter les représentations virtuelles lors des premiers apprentissages

Au vu des conflits potentiels susmentionnés et des plus fortes difficultés de perception observées chez les jeunes élèves (étude 1, *cf.* 9.1.1.2), les résultats relatifs à l'étude de la perception invitent, comme Krylova et Vodyaha (2020) ont pu le mettre en évidence, à éviter l'utilisation de représentations virtuelles d'objets 3D, du moins présentées sur tablette tactile, avec les enfants tant que ces derniers ne sont pas en mesure de percevoir correctement les caractéristiques basiques des objets 3D présentés. Au même titre que Claisse (2020) évoque qu'un apprentissage exclusivement basé sur des représentations 2D en perspective apparaît inefficace pour certains enfants et adolescents, celui-ci étant susceptible d'occasionner des images mentales incorrectes des objets 3D (Mithalal, 2014), il semble possible, puisque la perception de représentations 2 ½ D n'apparaît pas systématique en environnement virtuel, de tenir des propos similaires concernant les représentations virtuelles, même si le nombre d'élèves en difficultés serait évidemment moindre en comparaison au support 2D. De plus, au même titre que Parzysz (1988), Bonafé et Sauter mais aussi Pillay (1999), suggèrent qu'il est nécessaire d'introduire les représentations 2D une fois

que les images mentales des objets 3D sont réellement mises en place, il semble pertinent d'étendre ce constat aux représentations virtuelles. Il s'agit de considérer que ce matériel ne doit pas être utilisé au début des apprentissages, lors de l'étape de découverte des objets 3D, d'autant que la perception de représentations virtuelles d'objets 3D pose de plus fortes difficultés chez les enfants plus jeunes.

Comme le souligne Bakó (2003), ce type de matériel ne remplace pas tout. D'ailleurs, l'auteur évoque que la manipulation est nécessaire et que c'est l'usage régulier de modèle qui pourrait ensuite rendre possible l'usage de représentations virtuelles. Bien que l'utilisation de manipulateurs virtuels dans les premières années de l'apprentissage semblent revendiquée depuis les années 2000 (Sinclair & Bruce, 2014), ces derniers apportant une gamme de possibilités supplémentaires, il semble qu'il faille rester prudent vis-à-vis de l'utilisation de ce type de matériel dans les apprentissages de la géométrie 3D.

Bien que l'utilisation de matériel physique peut être perçue comme plus contraignante, elle semble essentielle à l'étape fondamentale de construction des images mentales des solides. Le matériel virtuel pourrait dès lors intervenir plus tard dans les apprentissages quand celui-ci est susceptible d'apporter une plus-value, à condition de s'être assuré que les élèves disposent de bonnes images mentales des solides. Nous partageons alors les propos de nombreux auteurs qui considèrent la phase d'utilisation de matériel physique comme une phase essentielle, voire obligatoire, pour l'apprentissage de la géométrie 3D (CREM, 2002 ; Parzysz, 1988).

Néanmoins, les résultats de la seconde étude semblent indiquer, en ce qui concerne les capacités de perception (*cf.* 9.5.1) et de visualisation spatiale (*cf.* 10.5.1), que la manipulation du matériel physique par l'enfant occasionne peu de différences par rapport à l'observation du même matériel, y compris chez les élèves plus jeunes. Pourtant, plusieurs auteurs insistent sur l'importance de la manipulation par l'enfant du matériel physique (Bakó, 2003 ; Douaire *et al.*, 2009 ; Grenier & Tanguay, 2008 ; Mithalal, 2014). Notre optique n'est pas ici de contredire les propos de ces auteurs, il s'agit plutôt de préciser que l'influence de cette variable ne se situe pas au niveau des processus cognitifs de perception visuelle et de visualisation spatiale. Autrement dit, la phase de manipulation par l'élève n'aura pas forcément de conséquence sur sa capacité à se représenter mentalement l'objet 3D présenté ou à agir mentalement sur lui. Pour autant, elle peut impacter d'autres mécanismes importants pour l'apprentissage comme la compréhension de concepts géométriques complexes (Gori *et al.*, 2024) ou

l'encodage des informations nouvelles et à leur réutilisation ultérieure (Marley & Carbonneau, 2015). Il ne s'agit donc pas ici de faire comprendre aux enseignants que la manipulation du matériel physique par l'enfant n'est pas importante. L'étude participe à la meilleure compréhension de ce que cette variable impacte ou, en l'occurrence, n'impacte pas.

En Belgique francophone, puisque la découverte des objets 3D se fait progressivement au cours de l'enseignement primaire, par exemple en cinquième primaire pour le prisme, il s'agit alors d'envisager l'usage de matériel physique dès qu'un nouveau solide s'apprête à être découvert, même si cela se fait dans des niveaux scolaires plus élevés. Cela est d'autant plus important au vu des fortes difficultés de perception observées dans les études pour la représentation virtuelle du prisme, y compris à la tranche d'âge correspond à ce public cible. Cela n'exclut cependant pas qu'à ce niveau scolaire ou même aux niveaux scolaires antérieurs, des représentations virtuelles d'objets puissent être proposées à condition que les images mentales des solides géométriques aient été préalablement construites avec du matériel physique et qu'un accompagnement soit mis en place lors de l'utilisation de tels supports. Attention toutefois qu'au plus l'usage de telles représentations se fait tôt, au plus les risques de mauvaise perception semblent élevés et au plus il est nécessaire de fournir un accompagnement aux enfants.

12.1.4. Anticiper en développant antérieurement les capacités de rotation mentale

Nous l'avons évoqué précédemment, les résultats de la seconde étude mettent en avant le lien entre les capacités de rotation mentale et la perception de représentations virtuelles. Dans ce contexte, il semble que proposer un accompagnement dans le développement des capacités de rotation mentale constitue une piste pouvant avoir des retombées sur la perception de représentations 2 ½ D, susceptible donc de diminuer les ruptures. À ce sujet, la littérature semble fournir plusieurs pistes pour l'entraînement de l'habileté de rotation mentale. Nous renvoyons alors le lecteur vers des propositions d'entraînement de la rotation mentale envisagées par des recherches antérieures à destination des enfants (Cheung *et al.*, 2019 ; Hawes *et al.*, 2017 ; Rodán *et al.*, 2019) et adolescents (Neubauer *et al.*, 2010 ; Rodán *et al.*, 2016).

12.1.5. Proposer un accompagnement lors de leur première utilisation

Une fois que les enfants disposent d'images mentales des objets 3D construites au départ de matériel physique, il est alors possible d'envisager une utilisation des environnements virtuels pour profiter du potentiel qui peut leur être attribué d'après la littérature. Pour autant, étant donné les difficultés de perception observées avec ce matériel, il est nécessaire, comme Parzysz (1988) l'évoque au sujet des représentations 2D, de proposer d'abord une phase d'utilisation des représentations pour permettre à l'individu d'apprendre à agir avec et sur ces représentations. D'une certaine façon, il s'agit de faire en sorte que le fonctionnement cognitif sur ces représentations virtuelles se rapproche de celui mis en œuvre dans l'espace sensible, ce qui ne semble majoritairement pas être le cas à en croire les résultats obtenus. Si au départ des représentations 2D, Bonafé et Sauter (1998) évoquent que cela doit passer par un développement des connaissances des règles relatives à la représentation, les résultats obtenus dans cette étude ainsi que la littérature nous offrent plusieurs pistes quant à la mise en œuvre de cet accompagnement.

12.1.5.1. Un accompagnement technique dont l'ampleur varie selon l'environnement utilisé

Évidemment, il s'agit d'une part de proposer un accompagnement technique dans l'utilisation de l'environnement virtuel. En utilisant un environnement simple limitant les possibilités de manipulation, ces difficultés techniques ont été facilement contrôlées dans le cadre de l'étude. Dans ce contexte, un court accompagnement passant par un temps de familiarisation accompagné de consignes est apparu suffisant.

Pour autant, comme évoqué au moment de choisir l'environnement virtuel utilisé dans l'expérimentation, la plupart des environnements virtuels existant notamment pour un usage dans le contexte scolaire proposent de nombreuses options, qui s'avèrent sans doute pertinentes pour certains apprentissages, mais qui complexifient leur utilisation avec des élèves. Ceux-ci sont alors susceptibles d'être davantage confrontés à des difficultés à associer les gestes réalisés sur l'écran 2D avec les mouvements en 3D appliqués à l'objet virtuel (Cohé, 2012). Puisque la compréhension des rotations appliquées apparaît importante pour assurer la perception des objets 3D, ces difficultés d'utilisation peuvent impacter la perception. Une complexité d'utilisation de l'environnement virtuel est aussi susceptible d'augmenter la charge cognitive lors des activités proposées et donc d'impacter les apprentissages (Bujak *et al.*, 2013). Il

apparaît alors nécessaire d'accompagner les élèves dans l'utilisation de l'environnement virtuel avant d'entamer son utilisation dans le cadre des apprentissages.

12.1.5.2. Un accompagnement sur la compréhension du principe des environnements virtuels

Les résultats obtenus permettent cependant de relever qu'un accompagnement technique focalisé exclusivement sur l'utilisation de l'environnement virtuel n'est pas suffisant pour assurer la perception des objets 3D. Quel que soit l'environnement utilisé et sa complexité d'utilisation, un accompagnement portant sur la clarification du principe même des environnements virtuels apparaît lui aussi important. En effet, la discussion des résultats des deux études a permis de suggérer une difficulté, dans le cas de certains enfants et certains adolescents, à concevoir les principes de fonctionnement des environnements virtuels et notamment le fait que ces derniers offrent des informations sur les trois dimensions d'un objet et permettent ainsi de conserver des proportions des objets 3D présentés (*cf.* 9.1.3.1).

L'observation des erreurs types réalisées et de leur justification lors de l'évaluation de la perception a permis d'identifier que certains enfants et adolescents sélectionnent la proposition 3D correcte ainsi que la proposition 3D dont la hauteur est modifiée, considérant que les environnements virtuels ne donnent pas d'information sur la taille de l'objet 3D et que dans ces environnements, on ne peut donc pas savoir la taille et la hauteur de ces derniers. Au vu de cette observation, il apparaît alors primordial, afin d'éviter que cette conception erronée n'influence la suite des apprentissages, de proposer, avant leur utilisation sur les objets géométriques, une clarification du principe des environnements virtuels qui en réalité offrent des informations sur les trois dimensions des objets 3D et pas uniquement sur deux des trois dimensions. Il s'agit alors de faire comprendre aux élèves que, si l'environnement ne permet pas de savoir la taille de l'objet 3D, il permet tout de même de connaître ses proportions.

Pour accompagner les élèves à ce sujet, nous suggérons de passer par une étape de comparaison d'objets 3D dont les proportions sont conservées ou non. D'abord, nous proposons de commencer par une comparaison de matériel physique. Cela afin de s'assurer de ne pas être confronté à des problèmes de perception au moment de

clarifier²⁷ les notions de taille, de dimension, de proportion. Pour aboutir à cette clarification, plusieurs objets 3D sont présentés aux élèves au travers de matériel physique : un objet de référence, un objet obtenu après modification de la taille de l'objet de référence mais avec conservation de ses proportions, des objets obtenus après modification d'une seule dimension de l'objet de référence (ex. objet dont la hauteur a été modifiée uniquement), des objets obtenus après modification de plusieurs dimensions de l'objet de référence. Lors d'un temps de discussion, nous proposons alors aux apprenants de comparer l'objet 3D de référence avec chacun des autres objets : sont-ils les mêmes ou non ? Qu'est-ce qui les différencie ? De cette façon, un échange peut avoir lieu avec les élèves pour bien clarifier ces concepts.

Ce n'est que dans un second temps que nous proposons de travailler avec une utilisation conjointe de l'environnement virtuel et du matériel physique. Nous suggérons de proposer aux élèves de manipuler un élément présenté dans l'environnement virtuel et de comparer l'élément avec du matériel physique (en l'occurrence un objet 3D présentant les mêmes proportions et la même taille que l'objet présenté virtuellement, un objet 3D ayant les mêmes proportions mais une taille différente de l'objet 3D, et un objet 3D ayant une hauteur différente. Toujours au travers d'un temps d'échanges, nous demandons alors aux élèves quel objet pourrait être l'élément présenté virtuellement. Il s'agit de leur faire prendre conscience que la taille réelle de l'objet reste inconnue (ce qui permet de considérer que l'objet dont les proportions sont conservées pourrait aussi être l'objet présenté virtuellement), mais que l'environnement virtuel donne des informations sur les trois dimensions de l'objet 3D et que ces informations sont toutes les trois importantes puisqu'elles définissent l'objet. Pour faire comprendre que l'objet 3D dont la hauteur est modifiée ne peut pas être l'objet représenté virtuellement, l'enseignant incitera à comparer les observations réalisées sur le matériel physique avec les observations réalisées sur le matériel virtuel. Cette comparaison des supports est d'ailleurs une stratégie revendiquée par Bonafé et Sauter (1998) pour guider le passage de matériel physique aux représentations 2D.

²⁷ Nous sommes conscients que la clarification de ces notions n'est sans doute pas adaptée à tous les âges et qu'il faudra veiller à utiliser du vocabulaire adapté aux enfants plus jeunes. Il s'agit alors, pour les plus jeunes, de simplement leur faire prendre conscience que ce sont des aspects différents qui caractérisent les objets.

12.1.5.3. Un accompagnement passant initialement par un usage conjoint de matériel physique et de représentations virtuelles pour dépasser les obstacles de perception

Si la piste précédemment évoquée a pour objectif initial de faire comprendre aux élèves le principe des environnements virtuels, il n'en reste pas moins que les difficultés observées chez les enfants et les adolescents ne se situent pas uniquement à ce niveau et peuvent avoir d'autres origines et notamment une difficulté à prendre en compte et à combiner les informations 2D fournies (cf. 9.1.3.1). Dans ce contexte, il apparaît nécessaire d'accompagner les élèves dans la manière d'observer les solides représentés virtuellement et de prendre en compte les informations importantes lorsqu'on observe de telles représentations afin de se représenter correctement l'objet 3D. Si Duval et Godin (2005) soulignent l'importance de fournir une éducation au regard face aux dessins en géométrie plane, il s'agit donc d'en faire autant en géométrie 3D face aux représentations virtuelles.

Pour ce faire, il semble pertinent de poursuivre avec cette idée d'utilisation conjointe et de comparaison du matériel physique et virtuel, au moins lors des premières utilisations des supports virtuels, en vue de favoriser le passage du matériel physique aux représentations virtuelles. L'usage combiné des supports est d'ailleurs décrit par plusieurs auteurs comme pertinent pour les apprentissages (Bakó, 2003) ou le développement spatial (Nagy-Kondor, 2017). Il s'agirait alors, lors de la première utilisation de représentations virtuelles de solides, de proposer aux élèves un temps de comparaison des deux supports pour que les élèves puissent mettre en avant les propriétés de l'objet 3D conservées dans l'environnement virtuel.

Plus encore, puisque nous avons pu observer, au travers de la première étude (cf. 9.1.1.1), que plusieurs enfants et adolescents envisagent que les objets virtuels puissent être ceux attendus ainsi que d'autres objets 3D non attendus, il apparaît important de ne pas se concentrer uniquement sur la comparaison de l'objet 3D virtuel et du matériel physique qui lui correspond. Pour ce faire, il est possible d'exploiter du matériel similaire à celui utilisé lors de l'étude expérimentale, en proposant aux élèves une activité de comparaison du solide virtuel et de matériel physique (plusieurs modèles physiques proches de celui présenté virtuellement). Il s'agit alors d'accompagner les élèves dans l'identification des caractéristiques du solide présenté virtuellement qui ne sont pas présentes dans les propositions 3D ou inversement.

En plus d'accompagner les élèves ayant des difficultés de perception, une telle activité offre l'opportunité, même pour ceux sans difficulté de perception, de pouvoir mettre en avant les caractéristiques qui permettent de définir les solides géométriques.

Par ailleurs, puisque certains individus ne conçoivent pas le solide virtuel comme correspondant à un objet en trois dimensions, il s'agirait aussi de leur proposer d'observer des représentations virtuelles d'objets 2D et 3D proches (ex. sphère et rond) et de leur demander de comparer les deux représentations virtuelles afin de pointer des différences entre les deux.

Une fois que l'accompagnement dans l'utilisation des environnements virtuels a permis d'apprendre aux élèves à observer des représentations virtuelles et à faire en sorte que les images mentales créées au départ de représentations virtuelles viennent conforter et pas déconstruire les images mentales construites antérieurement avec du matériel physique, il est alors, selon nous, envisageable d'exploiter les environnements virtuels sans matériel physique pour proposer des activités qui exploitent le potentiel des environnements virtuels mis en évidence dans la littérature (visualisation du développement de solides...).

Comme le montrent les suggestions présentées ci-dessus, il s'agit alors de considérer qu'il est nécessaire d'intégrer progressivement les supports virtuels et non de les envisager comme des supports permettant directement de remplacer le matériel physique. En procédant de cette façon, l'enseignant peut accompagner les élèves dans la perception des représentations virtuelles et peut par ailleurs aussi s'assurer de la maîtrise des connaissances géométriques par les élèves ou y remédier si nécessaire.

12.1.6. Encourager la manipulation face à ce type de matériel

Dans la littérature, on ne retrouve pas de consensus sur l'effet de la place accordée à la manipulation dans le cadre des apprentissages spatiaux menés dans des environnements virtuels (Rodrigues *et al.*, 2010). Les études ici menées ont pu montrer que la manipulation par l'enfant impacte positivement la perception de certains objets 3D représentés virtuellement, par exemple le cylindre et la sphère, même si, pour la plupart des solides investigués et à la plupart des tranches d'âge, aucune différence n'est observée entre manipulation et observation (*cf.* 9.2.1 et 9.2.2). En revanche, pour aucun des solides investigués, la perception est significativement plus efficace au départ de représentations virtuelles à observer plutôt qu'à manipuler.

Dans ce contexte, les résultats tendent à considérer qu'il est pertinent de promouvoir un usage des solides virtuels dans lequel les élèves peuvent manipuler les objets 3D, et non un usage dans lequel ils sont physiquement passifs puisque cela offre davantage de chance que les solides présentés soient adéquatement perçus, au moins pour certains d'entre eux, en particulier pour le cas des apprentissages portant sur la sphère aux premières années de l'enseignement primaire. La discussion des résultats de l'étude a d'ailleurs permis de justifier cet avantage au regard notamment de la littérature et des résultats obtenus. D'autant que, comme l'évoquent Ayres et Paas (2007, cités par Chikha *et al.*, 2021), l'absence de manipulation par l'élève du matériel virtuel est susceptible de venir ralentir l'efficacité de l'apprentissage. Ce résultat apparaît intéressant pour guider les pratiques. D'autant que l'observation des pratiques enseignants a montré que, dans les faits, les solides virtuels sont davantage utilisés sans offrir aux élèves l'opportunité de manipuler le matériel (Beauset & Duroisin, 2021a).

Pour autant, nous souhaitons émettre quelques réserves quant à cette recommandation.

D'abord, celle-ci nous paraît valable dans le cadre des environnements virtuels ici utilisés. En effet, comme évoqué dans les limites de l'étude, les manipulations à exercer sur les objets présentés virtuellement sont adaptées et facilement mises en œuvre par les élèves (naturellement ou après avoir reçu un accompagnement permettant de comprendre la façon dont exercer les manipulations). D'ailleurs, Rodrigues *et al.* (2010) évoquent que les caractéristiques des environnements virtuels sont susceptibles d'occasionner des différences de résultats quant à l'effet de la manipulation sur les apprentissages spatiaux. Les possibles difficultés de manipulation et notamment de compréhension de l'effet des gestes sur les rotations appliquées à l'objet pourraient engendrer des résultats cette fois en défaveur de la manipulation. Nous revenons donc ici sur l'importance du choix d'un environnement adapté et de la mise en œuvre d'un accompagnement nécessaire à la compréhension de l'environnement et de sa manipulation.

Deuxièmement, dans la modalité d'observation des représentations virtuelles, les enfants n'observaient donc pas des manipulations effectuées par quelqu'un d'autre mais par « l'ordinateur » ce qui peut inciter à diminuer la compréhension des actions de rotation appliquées à l'objet 3D. Or, en classe, il est fort probable, en utilisant par exemple le TBI, que les solides virtuels soient manipulés devant la classe, par l'enseignant ou par un autre élève. Des investigations supplémentaires devraient donc

être menées pour davantage investiguer différentes modalités de « passivité » physique.

Troisièmement, les résultats relatifs à l'habileté de visualisation, obtenus dans la seconde étude ne semblent eux pas être marqués par un effet de manipulation (cf. 10.3.1).

Si l'enseignant souhaite intégrer les solides virtuels dans sa pratique mais que la manipulation par l'élève n'est pas possible, par exemple pour des raisons matérielles, il semble que proposer une confrontation au matériel sans manipulation par l'élève, au cours de laquelle on lui laisse l'opportunité d'observer le solide en rotation, tend, tout de même, à entraîner des résultats qui se rapprochent de ceux obtenus quand le matériel est manipulé, en ce qui concerne du moins la capacité à se représenter mentalement certains objets 3D ou à agir mentalement sur eux. Nous souhaitons toutefois préciser que cette affirmation semble vraie quand les rotations présentées sont limitées et quand la présentation inclut les vues de l'avant et du dessus de l'objet 3D, tout en marquant des pauses à ces moments clés. Comme évoqué en discussion des résultats sur l'habileté de perception, des investigations complémentaires apparaissent nécessaires pour pouvoir vérifier l'influence de ces critères sur la capacité des enfants et des adolescents à percevoir les solides virtuels, même si des raisons en lien avec la littérature (James *et al.*, 2001 ; Wu & Chiang, 2013) invitent à considérer que ces critères pourraient être déterminants. Nous recommandons donc à ce stade de veiller à intégrer ces critères clés lorsque des solides virtuels à observer sont présentés aux élèves. Par ailleurs, quand la manipulation n'est pas possible, les résultats tendent à mettre en évidence qu'il est plus pertinent de privilégier la présentation des solides sur un support placé à la verticale plutôt qu'à l'horizontale. Cela semble favoriser la capacité à percevoir adéquatement certains des objets 3D comme la sphère et le cylindre et à diminuer les cas d'enfants et d'adolescents ne percevant pas l'élément présenté comme un objet 3D.

Enfin, la manipulation ne semble qu'avoir un effet partiellement positif sur la perception immédiate des formes d'objets 3D. Il est bien évident que dans le cadre des apprentissages, les capacités perceptives ne constituent qu'une composante de l'apprentissage. Il est donc possible de considérer que la manipulation puisse avoir une influence sur d'autres processus cognitifs notamment en lien avec la mémorisation de ce qui a été présenté (Attree *et al.*, 1996 ; Harman *et al.*, 1999).

12.1.7. Veiller à certains choix concernant l'apparence des objets 3D présentés virtuellement

Dans les études ici menées, la variable relative à l'apparence des objets 3D n'a pas été une variable investiguée dans la mesure où l'apparence des différents objets 3D était similaire pour tous les objets dans les deux études. Pour rappel, afin de se rapprocher de l'espace sensible, les objets intégrés dans l'environnement étant des objets pleins dont les faces sont de teintes différentes d'une même couleur mais dans lesquelles les arêtes ne se sont pas tracées et pouvant donc être distinguées juste par la présence de ces teintes de couleurs. Même si cette variable n'a pas été investiguée, par exemple dans une perspective comparative, la prise en compte dans la première étude de la capacité à distinguer les teintes de couleurs présentes sur la représentation virtuelle a permis de mettre en évidence, tout du moins pour certains objets 3D (en l'occurrence le prisme), qu'un problème de distinction des teintes est susceptible d'engendrer davantage de difficultés de perception de l'objet 3D face à des représentations virtuelles (étude 1, *cf.* 9.1.1.3c). Notons cependant qu'une difficulté de distinction des teintes n'entraîne pas systématiquement une absence de perception de l'objet 3D et qu'inversement, percevoir correctement les teintes n'est pas synonyme d'une perception adéquate. Néanmoins, ces résultats invitent à se prémunir de cette difficulté potentielle en faisant sans doute le choix de proposer des représentations virtuelles d'objets 3D sur lesquelles les faces peuvent être plus distinctement repérées et distinguées, par exemple en y traçant les arêtes ou en privilégiant des couleurs de face plus marquées. Comme évoqué dans les prolongements relatifs à l'habileté de perception, des études complémentaires devraient pouvoir offrir des recommandations plus précises, par exemple par rapport à l'influence de différentes caractéristiques des représentations (solides transparents, solides pleins mais non colorés...) sur les capacités de perception visuelle des objets 3D, ce qui pourrait guider les enseignants quant aux modalités de présentation proposées aux apprenants.

12.1.8. Différencier avec le numérique et lors de l'utilisation du numérique

Si les pistes évoquées précédemment se destinent à la majorité des enfants et des adolescents, il n'en reste pas moins que les deux études ont permis de pointer des différences individuelles importantes entre élèves, que ce soit au niveau des tâches de perception des objets 3D (*cf.* 9.1.1.1 et 9.1.2.1) ou de visualisation spatiale (*cf.* 10.2.1).

Dans ce contexte, il apparaît pertinent d'envisager la mise en place de différenciation lorsque les représentations virtuelles sont utilisées. Par exemple, la piste évoquée précédemment pour dépasser les comportements bidimensionnels ne s'avère pas pertinente pour les enfants n'étant pas confrontés à ce type de difficultés. De même, certains enfants et certains adolescents ne semblent pas confrontés à des difficultés de compréhension des principes des environnements virtuels. Se pose alors l'enjeu de pouvoir identifier les difficultés auxquelles les élèves sont confrontés lorsqu'on leur présente des solides virtuels afin de leur fournir un accompagnement adapté pour éviter que des difficultés de perception notamment viennent impacter les apprentissages face à ce matériel. En particulier, les résultats obtenus par rapport aux élèves présentant des risques de trouble développemental de la coordination invitent à être particulièrement vigilant quant à l'utilisation de ce type de supports avec ces élèves puisque ces derniers semblent davantage touchés par des difficultés à se représenter mentalement les objets 3D face à des représentations virtuelles, en particulier pour les objets plus complexes comme le prisme.

Plus largement, s'il est question de pouvoir différencier lors de l'utilisation des environnements virtuels, il est aussi pertinent d'envisager le matériel virtuel comme un outil de différenciation en lui-même. Il s'agit alors, à l'instar de ce qu'envisagent Akçayır et Akçayır (2017) concernant les supports de la réalité augmentée, de considérer qu'en regard aux différences individuelles, il est adéquat d'envisager qu'un support peut apporter une plus-value pour certains élèves mais pas pour d'autres, voire dans certaines activités mais pas dans d'autres. C'est d'ailleurs cette idée qui est partagée par Hegarty et Kriz (2008) au sujet de l'usage d'animations, en dehors du contexte de la géométrie, en évoquant que différents supports peuvent être efficaces pour différents apprenants. Toutefois, si Haj-Yahya (2021) évoque que des représentations virtuelles pourraient notamment être intéressantes pour les élèves qui ont des capacités spatiales limitées, il s'agit de rester prudent à l'égard de ce constat étant donné le lien positif observé entre capacité de rotation mentale et perception.

12.1.9. Conserver une cohérence entre les supports d'apprentissage et d'évaluation

L'investigation des pratiques enseignantes (Beauset *et al.*, 2024b) a permis de mettre en évidence que les supports d'évaluation utilisés par les enseignants en géométrie 3D sont majoritairement de type papier-crayon, incluant donc des représentations 2D,

alors même que cette modalité de représentation des objets 3D n'a pas forcément été utilisée préalablement lors des apprentissages et n'avait pas fait l'objet d'un apprentissage. Un tel choix de pratique aurait pu apparaître pertinent si les supports utilisés n'avaient pas d'impact sur les capacités de perception des objets 3D, autrement dit si les apprenants étaient capables de percevoir les objets 3D aussi bien au départ de représentations planes que de matériel physique ou de matériel virtuel. Force est de constater que les résultats des deux études ici menées invitent à observer l'influence du support de présentation sur les capacités à percevoir les solides présentés. Il s'agit donc de privilégier une cohérence entre les supports d'apprentissage et d'évaluation utilisés par les enseignants et d'accompagner les enseignants avant l'évaluation, quant à la perception des supports qui seront utilisés lors de l'évaluation.

Au-delà de ces observations sur l'influence du support sur les capacités à percevoir l'objet 3D, les investigations antérieures menées sur la comparaison des pratiques évaluatives mises en œuvre par les enseignants ont mis en évidence que les résultats d'épreuves au départ de supports papier-crayon ou au départ de supports exclusivement numériques n'offrent pas les mêmes possibilités. Bessonneau *et al.* (2015), en comparant les résultats d'élèves évalués sur support numérique et papier-crayon, évoquent, que les supports d'évaluation numériques sont susceptibles de solliciter davantage la mémoire de travail. C'est le cas par exemple dans les tâches pour lesquelles les élèves doivent choisir la bonne réponse parmi plusieurs propositions puisqu'ils n'ont pas l'opportunité de barrer les propositions incorrectes et doivent alors garder en mémoire l'ensemble des étapes de la procédure de résolution s'ils procèdent par élimination. De plus, en version numérique, les élèves sont moins enclins à utiliser un brouillon ce qui pourrait pourtant s'avérer utile pour se faire une représentation imagée de l'exercice à résoudre ou noter des calculs intermédiaires. Le raisonnement reste donc surtout mental et est susceptible d'occasionner un effort de mémorisation plus important et être à l'origine d'erreurs. De la même façon, dans le cas des exercices pour lesquels des dessins sont fournis, comme cela peut être le cas en géométrie 3D avec des représentations d'objets 3D, l'élève n'a pas forcément l'opportunité d'annoter ou d'effectuer des tracés sur ces illustrations (ex. prolongation de segments) ce qui pourtant pourrait également l'aider dans sa résolution. L'utilisation des instruments apparaît également difficile sur support numérique.

Au vu de ces constats, il apparaît donc nécessaire de mener une réflexion sur la manière d'organiser l'évaluation des apprentissages en géométrie 3D, en veillant à :

- garder une cohérence avec les supports utilisés lors de l'apprentissage pour ne pas générer d'obstacles inédits lors de l'évaluation. Par exemple, il s'agit d'éviter une évaluation exclusivement basée sur des représentations planes quand ce type de support n'a pas été utilisé lors de l'apprentissage, notamment puisque percevoir les objets 3D représentés virtuellement peut s'avérer problématique,
- s'assurer que ce qui est évalué est ce qu'on souhaite évaluer. Par exemple, si le but est d'évaluer la capacité des élèves à déterminer le développement d'objets 3D, il s'agit plutôt de proposer cette tâche au départ de matériel physique sinon la capacité à percevoir le solide au départ de la représentation fournie est susceptible d'impacter les résultats,
- fournir des conditions d'évaluation qui ne permettent pas d'entraver la mise en place d'un raisonnement.

Une des pistes pourrait être, comme lors des apprentissages, d'utiliser une combinaison de supports lors de l'évaluation.

12.2. L'utilisation de plusieurs représentations 2D en l'absence de matériel virtuel

Si, tout en gardant certaines précautions, l'utilisation de représentations virtuelles semble pouvoir être envisagée, il n'en reste pas moins que toutes les écoles ne disposent pas toujours du matériel numérique permettant un tel usage. Dans ce contexte, une piste semble pouvoir être envisagée : l'utilisation de plusieurs représentations planes. En effet, les investigations menées à la fois au niveau de l'habileté de perception visuelle (étude 2, cf. 9.6.1) et de visualisation spatiale (étude 2, cf. 10.6.1) semble indiquer que des performances assez similaires sont observées aux tâches évaluées lorsqu'elles sont données au départ de représentations virtuelles à observer et au départ de successions de représentations 2D. Attention toutefois que la succession de vues proposée est constituée d'une vue en perspective permettant d'obtenir une vision globale de l'objet 3D et, d'autre part, les vues de l'avant, du dessus et du côté de l'objet permettant d'obtenir des informations non déformées par la perspective. Sans doute que c'est cette combinaison qui favorise une proximité avec les résultats observés face aux représentations virtuelles.

Il est donc possible de suspecter que l'utilisation de telles représentations 2D multiples puisse être une possibilité pour aider davantage les élèves ayant des difficultés face à des représentations 2D uniques. C'est d'ailleurs ce que met en

évidence Haj-Yahya (2021) par rapport à la réalisation de processus de preuves au regard de concepts en géométrie 3D en enseignement secondaire supérieur. Pour autant, il reste important de mentionner que, face à cette modalité, la perception des objets 3D n'est pas systématique, comme face aux représentations virtuelles et qu'une prudence reste donc de mise par rapport à leur usage.

12.3. L'habileté de visualisation spatiale : une habileté à entraîner quel que soit le support

Les résultats obtenus au niveau des capacités de visualisation (étude 2) montrent l'existence de difficultés dans le chef des enfants et des adolescents à ce sujet, que ce soit lorsque cette habileté doit être mise en place au départ de matériel physique ou au départ de représentations planes ou virtuelles des objets 3D.

Dans ce contexte, et compte tenu de l'importance de l'habileté de visualisation spatiale pour l'apprentissage de la géométrie 3D (Battista *et al.*, 2018) mais aussi de nombreux autres domaines (Buckley *et al.*, 2019 ; Uttal *et al.*, 2013a), il est nécessaire de pouvoir fournir aussi un accompagnement aux enfants et aux adolescents dans le développement de cette habileté, notamment au travers d'activités scolaires. Cela semble être possible étant donné le caractère malléable de l'habileté (Lowrie *et al.*, 2018 ; Uttal *et al.*, 2013a). Ces interventions sont par ailleurs essentielles pour réduire les différences entre individus pour les capacités spatiales (Tzuriel & Egozi, 2010) qui ont pu être confirmées par nos investigations.

Même si l'étude ici menée, en se focalisant sur le niveau de maîtrise de l'habileté de visualisation spatiale, n'a pas permis d'évaluer la manière d'accompagner les enfants et les adolescents dans le développement de l'habileté, l'observation des erreurs types commises permet d'identifier les conceptions erronées qu'il est essentiel de déconstruire chez les enfants et les adolescents. Il apparaît nécessaire de proposer un accompagnement permettant à l'enfant de prendre conscience que la forme de la coupe n'est pas toujours congruente avec la forme de l'objet 3D et surtout qu'elle n'est pas forcément congruente avec le point de vue extérieur de l'objet 3D après découpe. Il s'agit également de l'accompagner dans la prise en compte de la troisième dimension dans la mise en œuvre des opérations mentales.

D'après la littérature, les outils virtuels constituent un vecteur pertinent pour développer les habiletés spatiales des individus (Di & Zheng, 2022 ; Muntazhimah & Miatun, 2018 ; Nurjanah *et al.*, 2020). Dans le cadre de la réalisation d'activités de

coupe, elle peut constituer un outil permettant de simuler et observer le résultat d'une infinité de coupes. Par exemple, il est possible de profiter des supports numériques pour proposer aux élèves de visualiser le résultat d'une diversité de coupes menées sur un solide en vue de les comparer pour observer l'impact du plan de coupe sur la forme de la coupe, ou à l'instar de ce que suggère Bakó (2003) de mettre en place une activité dans laquelle il est demandé à l'élève de tenter de retrouver le plus de formes de coupes différentes possibles. Toutefois, si ce support est utilisé, il s'agit alors de veiller à tenir compte des recommandations et points d'attention évoqués précédemment. Il s'agirait donc de proposer une première observation de coupe réalisée sur du matériel physique. Ensuite, il s'agirait de proposer exactement la même coupe mais cette fois exercée sur un stimulus 2 ½ D et de comparer le résultat obtenu lorsque la coupe est réalisée virtuellement et lorsqu'elle est menée sur du matériel physique. Enfin, les élèves pourraient alors travailler librement sur le matériel virtuel en observant les résultats d'autres coupes afin de résoudre la tâche demandée. Au-delà de ça, d'autres recherches se sont intéressées à la validation de dispositifs d'entraînement spatial destinés aux élèves du primaire ou du secondaire. Parmi ceux-ci, citons par exemple Lowrie *et al.* (2017) ou Burt *et al.* (2017).

L'utilisation d'environnement numérique n'est cependant pas la seule et unique possibilité pour assurer ce développement. Tran *et al.* (2017, cités par Pathak *et al.*, 2020) soulignent par exemple que la mise en place d'interactions physiques avec certains objets 3D peut participer au développement des compétences spatiales. De même, Duroisin (2015) indique qu'il est nécessaire de passer par des phases d'observation, de manipulation et de conceptualisation des objets 3D.

Il semble donc exister des possibilités diverses pour accompagner le développement de l'habileté. Dans ce contexte, mener des études complémentaires visant à comparer l'efficacité de certaines activités et des supports utilisés lors de ces activités constitue un prolongement de recherche essentiel pour guider les enseignants dans l'accompagnement à proposer à leurs élèves. De plus, il s'agit de vérifier le caractère transférable du développement de l'habileté, en vérifiant par exemple si un développement de l'habileté dans l'environnement virtuel peut engendrer un développement de l'habileté au départ de représentations 2D ou de matériel physique.

12.4. Quid du contenu des prescrits en Fédération Wallonie-Bruxelles ?

Les résultats obtenus au travers de l'étude nous invitent à poser un regard réflexif sur le contenu des prescrits belges francophones et plus particulièrement sur le nouveau référentiel du tronc commun.

Nous l'évoquions précédemment, rien n'est mentionné dans le référentiel à l'égard des représentations virtuelles des objets 3D. Autrement dit, les représentations virtuelles ne sont pas envisagées comme un objet d'apprentissage en tant que tel, comme peuvent l'être les représentations planes en perspective cavalière par exemple. À l'heure où le numérique occupe une place importante dans la société, il est légitime de poser un regard réflexif sur cette absence d'attendus à l'égard des représentations virtuelles d'objets 3D. D'autant que les résultats des études menées invitent à mettre en œuvre que la perception des objets 3D par les enfants et des adolescents n'est pas systématique et nécessite un accompagnement. Le risque, en ne faisant pas mention de cela est que les enseignants soient encouragés à considérer ces capacités comme acquises par les enfants et les adolescents et donc à utiliser ce matériel en remplacement du matériel physique, sans réellement considérer que cela nécessite un accompagnement, voire un apprentissage (apprendre à observer les éléments clés qui permettent d'obtenir des informations en vraie grandeur donnant des informations précises sur le solide, apprendre à combiner ces informations importantes). D'autant que, dans la partie décrivant les visées générales des mathématiques, il est mentionné que « L'utilisation du numérique peut constituer une aide précieuse lors des apprentissages » (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2017, p. 18). Il ne faudrait pas que les enseignants, avec de tels propos, considèrent que le tout numérique est une solution naturelle ne provoquant pas de difficulté.

Pour l'apprentissage de la géométrie 3D, le référentiel du tronc commun propose une découverte progressive des objets 3D. Celle-ci, pour rappel, suggère d'abord une découverte du cube, du parallélépipède rectangle, du cylindre et de la sphère. Ensuite, sont intégrés à partir de la 3^{ème} primaire le cône et la pyramide et enfin, à partir de la cinquième primaire, le prisme. Cette découverte plus tardive des prismes apparaît légitime compte tenu des difficultés importantes observées pour la perception de représentations virtuelles ou planes de ce solide chez les plus jeunes enfants. Pour autant, même s'il est intégré à partir de la cinquième primaire, il n'en reste pas moins

que des difficultés de perception de cet objet 3D restent présentes à cet âge-là et par la suite. Il est alors important de les prendre en considération.

En ce qui concerne les capacités à déterminer les formes d'empreinte de solides, les référentiels semblent indiquer qu'un travail sur les empreintes de solide peut être mené dès la première primaire avec les élèves. Ce travail envisage ainsi une articulation entre l'étude des solides et des figures planes, comme le recommande Mathé *et al.* (2020). Les résultats obtenus aux tâches d'empreinte auprès des élèves de 8 ans montrent qu'ils sont majoritairement capables de se représenter l'empreinte du cube, du cylindre ou encore du cône. Toutefois, des difficultés plus importantes sont observées à cet âge, et même plus tard, concernant la détermination de la forme de l'empreinte de la sphère (et de l'anneau à bord rond même s'il n'est pas un des solides devant faire l'objet d'apprentissage), considérant pour la plupart des individus qu'il ne s'agit ni d'un point ni d'un petit cercle mais plutôt d'un cercle de taille plus importante. Il s'agit donc pour les enseignants de pouvoir proposer des activités sur les empreintes qui permettent aux apprenants de dépasser cette conception erronée de l'empreinte de la sphère. S'il était possible de suspecter que le fait, pour l'élève, de prendre en main et manipuler la sphère, en lui permettant alors de poser l'objet sur sa main et donc de ressentir le point de contact unique associé à l'empreinte de la sphère, puisse être suffisant pour appréhender la forme de l'empreinte, les résultats obtenus semblent indiquer que ce n'est pas le cas puisque ces mêmes difficultés ont aussi été observées chez les élèves autorisés à manipuler le solide. Il semble donc nécessaire d'aller plus loin dans l'accompagnement fourni aux élèves. Une piste pourrait être d'utiliser des expériences du quotidien comme le fait d'observer la trace d'une balle lorsqu'elle roule dans une flaque, ou de constater la forme de l'empreinte en observant la trace laissée par le solide après l'avoir trempé dans de l'encre. Il semble que dans ce contexte, il faille plutôt éviter le matériel de type « sable » qui occasionnerait une vision biaisée de l'empreinte renforçant l'erreur type commise. Cela constitue d'ailleurs peut-être une des raisons permettant d'expliquer la présence de cette erreur type. En outre, c'est pour cette raison que le choix a été fait, dans la clarification du concept d'empreinte proposée dans l'étude avant la résolution des exercices, d'utiliser plutôt l'exemple de l'encre et non du sable.

En ce qui concerne les exercices de coupe, le référentiel du tronc commun attend des élèves de fin de deuxième secondaire qu'ils soient capables de déterminer la nature de certaines sections spécifiques (par un plan parallèle à une face ou passant

par au moins trois sommets) d'un cube ou d'un parallélépipède rectangle. Si la présence claire d'attendus visant à développer la visualisation spatiale est intéressante à souligner, nous nous questionnons sur le caractère trop peu ambitieux des attendus ainsi que sur leur caractère sans doute trop tardif de celui-ci dans le parcours scolaire. En effet, les résultats montrent que, pour le cube, les exercices de coupe transversale et de coupe longitudinale, correspondant à ce qui attendu des référentiels sont majoritairement maîtrisés par les enfants et les adolescents.

À l'heure de la réécriture des programmes scolaires en Fédération Wallonie-Bruxelles, qui eux décrivent la manière dont les enseignants doivent développer les savoirs, savoir-faire et compétences définis dans le référentiel, les points d'attention mis en évidence au travers de l'étude des processus cognitifs en environnement virtuel peuvent servir d'appui à la définition des prescriptions à fournir aux enseignants pour aborder la géométrie 3D.

12.5. Quid de la formation des enseignants ?

Si la présence de prescriptions claires fournies par les autorités compétentes est une condition nécessaire à la modification des pratiques enseignantes, elle n'est pas suffisante pour voir les enseignants proposer des pratiques qui tiennent compte du fonctionnement cognitif et qui visent à renforcer les compétences spatiales des élèves. Une autre condition nécessaire relève de la formation des enseignants.

La réforme de la formation initiale des enseignants (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2019) mise en œuvre actuellement en Belgique francophone, impliquant notamment l'intégration d'une quatrième année de formation, offre l'opportunité de mener une réflexion sur l'accompagnement à fournir aux enseignants au cours de cette formation initiale pour les préparer au mieux à l'enseignement complexe de cette discipline. Les résultats des investigations menées sur les pratiques enseignantes (Beauset *et al.*, 2024b) ont d'ailleurs permis de révéler une série d'enjeux comme la nécessité de fournir un accompagnement théorique sur le fonctionnement cognitif des élèves, la nécessité de les sensibiliser à l'importance du développement des habiletés spatiales chez ces derniers ainsi qu'à l'influence de certains choix de pratiques d'enseignement, la nécessité de développer leur réflexivité à l'égard de ces choix ou encore la nécessité de leur fournir des pistes plus concrètes d'activités pour développer les compétences spatiales ou des recommandations quant aux supports à utiliser. D'ailleurs, Lowrie *et*

al. (2017) incluent, dans leur mise en place d'interventions destinées au développement spatial des enfants en contexte scolaire, une formation adressée aux enseignants en amont de la mise en œuvre des activités dans les classes.

Les études ici menées, en développant les connaissances scientifiques par rapport à plusieurs de ces aspects, offrent donc des apports pour le contenu de cette formation. Nous évoquions par exemple précédemment la nécessité de conscientiser les enseignants à l'égard des difficultés de perception de représentations virtuelles observées chez certains élèves, ce qu'il est possible de faire en formation initiale. Présenter les résultats obtenus lors des expérimentations, en s'appuyant sur l'illustration d'erreurs commises par les élèves, que ce soit aux tâches de perception ou de visualisation, peut s'avérer une piste possible pour développer cette prise de conscience. Une autre possibilité pourrait être de proposer aux futurs enseignants de répliquer sur un échantillon réduit, par exemple à l'occasion de leur stage, une partie de l'expérimentation afin d'observer par eux-mêmes les difficultés des élèves. Une telle approche pourrait d'ailleurs par la même occasion s'inscrire dans la dynamique de formation à et par la recherche revendiquée par le décret encadrant la réforme de la formation initiale des enseignants (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2019).

12.6. Des réflexions qui dépassent la discipline de la géométrie 3D

Évidemment, les études ici menées ont porté sur la mise en œuvre des habiletés de perception visuelle et de visualisation spatiale exercées sur des objets géométriques tels que rencontrés dans l'apprentissage de la géométrie 3D (cube, cône...). Les résultats permettent donc de participer directement à la réflexion sur l'enseignement-apprentissage de ce domaine et sur la pertinence et les risques des supports à utiliser dans ce domaine, comme cela a pu être jusqu'ici mis en avant préalablement. Néanmoins, la réflexion sur les supports d'apprentissage et sur la pertinence de l'utilisation de matériel virtuel n'appartient pas exclusivement à la géométrie 3D. En effet, dans les domaines d'apprentissage des sciences ou de la géographie, par exemple, l'utilisation de matériel virtuel constitue une possibilité de support pour représenter des objets ou espace 3D, au même titre que du matériel physique ou des représentations 2D. Dans ces domaines, les habiletés de perception visuelle et de visualisation spatiale interviennent également.

Pour autant, dans ces disciplines, les éléments ont des formes sans doute plus complexes qu'en géométrie 3D. Dans le quatrième chapitre de ce travail (volume 1),

nous citons par exemple la possibilité en sciences d'utiliser des représentations 2 ½ D des molécules ou des organes du corps humain. Cela laisse sans doute imaginer que la perception de ces représentations pourrait s'avérer d'autant plus problématique. Pour autant, bien qu'en géométrie, la perception des propriétés géométriques des objets présentés est essentielle car ces propriétés sont l'objet de l'apprentissage, cela semble être moins le cas dans les deux autres disciplines. En effet, le fait que l'adolescent ne se représente pas parfaitement la forme de l'objet virtuel représenté est sans doute moins problématique en sciences ou en géographie (ex. une représentation sphérique d'un atome pourrait être perçue comme un objet non parfaitement sphérique sans que cela n'impacte négativement sa compréhension des concepts).

Dans ce contexte, il semble nécessaire de mener à bien des études complémentaires à celles ici menées, portant sur d'autres processus que la perception des formes intervenant dans les apprentissages, par exemple sur la perception de positions relatives entre objets 3D qui constitue un élément important, par exemple en géographie.

12.7. Une nécessité de poursuivre les recherches concernant l'impact du support sur les apprentissages et le rôle de l'enseignant pour dépasser les obstacles

Si nous commençons ce chapitre en reprenant les propos de Mithalal (2014) soulignant l'influence des habiletés spatiales sur l'aisance des apprentissages en géométrie 3D, il s'agit, comme l'auteur le mentionne lui aussi, d'admettre que ce n'est pas le seul critère qui entre en jeu dans l'aisance des apprentissages dans ce domaine et d'ailleurs plus largement aussi dans les autres domaines.

Dans ce contexte, la maîtrise des capacités spatiales au départ de différentes modalités n'est pas le seul critère susceptible d'influencer les apprentissages, même s'il permet de comprendre d'éventuelles difficultés susceptibles d'intervenir lors des apprentissages organisés avec des représentations virtuelles ou planes d'objets 3D. La variable relative au choix de support est en effet susceptible d'influencer d'autres aspects que les processus cognitifs de perception visuelle et de visualisation spatiale, qui peuvent aussi impacter les apprentissages. En abordant précédemment l'absence de l'influence de la manipulation du matériel physique, nous évoquons par exemple l'encodage des informations nouvelles et leur réutilisation. Il apparaît donc essentiel, une fois de plus, de garder à l'esprit que, si les résultats permettent de relever des

points d'attention et des pistes mais aussi de comprendre certaines difficultés potentielles, ils ne permettent pas de fournir des recommandations précises quant à un usage de ces outils. Pour cela, il apparaît indispensable de mener des expérimentations complémentaires à celles ici menées. Les deux études ont évalué le niveau de maîtrise, à un temps précis, des deux habiletés, il semble essentiel de mener des études complémentaires dans une perspective longitudinale. Parmi celles-ci, une première piste serait de vérifier l'effet de l'usage des supports, toujours dans une perspective comparative, sur le développement des apprentissages attendus dans les référentiels, à l'instar de ce qu'ont proposé Gecu-Parmaksiz et Delialioglu (2019) en géométrie ou encore en sciences (Zacharia & Olympiou, 2011). Plus encore, il s'agit de pouvoir déterminer pour le développement de quels savoirs, savoir-faire et compétences, en géométrie 3D et dans les autres disciplines, ces supports sont-ils susceptibles d'apporter une plus-value en tant qu'outil d'apprentissage ou en tant que matériel de différenciation.

De même, si les recommandations ont permis de relever des points d'attention ainsi que des pistes pouvant guider les enseignants, il apparaît essentiel aussi de poursuivre des investigations sur l'impact que peut justement avoir l'enseignant et les actions qu'il peut mettre en œuvre pour accompagner les élèves dans le dépassement des obstacles perceptifs rencontrés. Si nous avons ici étudié le niveau de maîtrise des habiletés lorsque l'élève est seul face aux représentations virtuelles, peut-être que l'apport de courtes explications ou d'aides par l'enseignant pourrait déjà l'aider. Il s'agit donc de mener des investigations supplémentaires auprès des enfants et adolescents rencontrant des difficultés à percevoir et à agir mentalement sur les représentations virtuelles d'objets 3D et à tester des interventions permettant de dépasser ces difficultés.

Conclusion de la partie IV

Après avoir présenté, dans la troisième partie, les résultats obtenus aux deux études expérimentales menées et après avoir discuté ces résultats au regard de la littérature, tout en pointant leurs limites et prolongements, la quatrième partie de ce manuscrit a permis de poser un regard plus général sur ces résultats. Au travers des deux chapitres qui la composent, qui viennent clôturer ce manuscrit, les résultats clés des études menées sont repris en vue de souligner leur apport pour le domaine de la psychologie mais aussi et surtout pour l'enseignement-apprentissage notamment de la géométrie.

D'abord, la meilleure connaissance du fonctionnement cognitif des enfants et adolescents en environnement virtuel obtenue via la recherche menée, qui plus est grâce à la perspective comparative utilisée, permet notamment de poser un regard réflexif sur les supports d'évaluation des habiletés spatiales utilisés auprès d'enfants et d'adolescents dans le domaine de la psychologie. En pointant du doigt des divergences dans les comportements perceptifs observés dans l'espace sensible et en environnement virtuel mais aussi des difficultés associées à la perception de représentations 2D, une réflexion a pu être posée sur la prudence à l'égard de l'utilisation des tests papier-cayon ainsi que des alternatives numériques dans le cadre d'études qui ambitionnent de comprendre l'acquisition ou le développement d'habiletés spatiales dans l'espace 3D.

Par ailleurs, les deux études exploratoires menées permettent *in fine* de contribuer à la réflexion sur les supports utilisés lors des apprentissages scolaires. Le chapitre 12, focalisé sur cet aspect, permet alors de rencontrer les intentions mises en avant dès l'introduction de ce manuscrit, concernant l'apport d'éléments de réflexion sur l'utilisation de solides virtuels en contexte scolaire, principalement en géométrie 3D. En prenant appui sur les résultats des études, des recommandations destinées aux enseignants ont pu être mises en avant par rapport à l'utilisation de tels supports. Les résultats obtenus invitent à éviter l'usage de ces derniers lors des premiers apprentissages puisqu'ils sont susceptibles de générer des images mentales incorrectes des solides géométriques. En prenant notamment appui sur les erreurs commises, des points d'attention ainsi que des pistes d'accompagnement quant à leur usage sont formulés. Les éléments présentés dans ce chapitre permettent plus largement d'enrichir la réflexion sur l'enseignement-apprentissage de la géométrie 3D, par exemple sur le contenu des référentiels.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les enfants et les adolescents arrivent-ils à percevoir correctement la forme des objets 3D lorsque ces derniers leur sont présentés dans un environnement virtuel et sont-ils capables d'agir mentalement sur ces derniers comme ils le feraient sur du matériel physique par exemple ?

Le caractère réaliste des représentations virtuelles pourrait évidemment inciter à répondre par l'affirmative à ces deux grandes questions. En effet, eu égard à leur dynamisme, ces représentations peuvent être considérées comme appartenant à un monde en « 2 ½ D » situé à l'intermédiaire du monde réel physique en trois dimensions et du monde graphique en deux dimensions. Elles tendent ainsi à réduire les frontières qui peuvent exister entre les objets de l'espace sensible et leur représentation en offrant une impression de tridimensionnalité. De plus, compte tenu de la place grandissante qu'occupent ces environnements au quotidien, que ce soit en contexte scolaire ou de loisirs, on pourrait également considérer que les enfants et les adolescents sont familiers avec de telles représentations.

Pour autant, des recherches issues de différents domaines, notamment en psychologie cognitive, suggèrent de conserver une certaine prudence quant à cette comparaison entre la mise en œuvre de processus cognitifs dans l'espace sensible et en environnement virtuel. Malgré le fait qu'elles permettent de simuler les objets 3D, ces représentations exigent tout de même une reconstruction de la troisième dimension et occasionnent une charge mentale élevée suite au caractère transitoire des informations qu'elles offrent. Ces éléments sont donc susceptibles de complexifier la mise en œuvre de processus cognitifs en environnement virtuel.

À ce jour, cependant, peu de recherches ont permis d'objectiver la présence de difficultés chez les enfants et des adolescents en ce qui concerne la capacité de perception visuelle des objets 3D au départ de leur représentation virtuelle. Il en est de même pour l'habileté de visualisation spatiale, c'est-à-dire la capacité à mener des opérations mentales sur des objets 3D au départ de ces représentations. Par rapport à la première habileté, Krylova et Vodyakha (2022) ont pu, en guise de recherche exploratoire, s'intéresser à la situation d'enfants âgés de moins de 6 ans, en pointant d'ailleurs chez ces derniers des difficultés à percevoir correctement des objets représentés virtuellement. Toutefois, à notre connaissance, le niveau de maîtrise de cette habileté auprès d'enfants plus âgés et d'adolescents n'a pas été étudié. Il en est

de même pour la seconde habileté qui a pu faire l'objet d'investigations auprès d'adolescents âgés de 14 à 15 ans ou d'adultes mais qui ne semble pas avoir été étudiée, en environnement virtuel du moins, auprès d'enfants et d'adolescents plus jeunes.

La recherche présentée dans ce manuscrit s'est attelée à apporter des éléments de réponse à ses manquements de façon à objectiver les potentielles difficultés identifiées dans la littérature et *in fine* permettre une meilleure compréhension du fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents en environnement virtuel. De manière exploratoire, elle a évalué, d'une part, la capacité à percevoir les objets 3D au départ de représentations virtuelles auprès d'enfants et des adolescents âgés de 6 à 15 ans. Elle a, d'autre part, évalué la capacité des enfants et des adolescents âgés de 8 à 15 ans à mettre en place des opérations mentales au départ de ces mêmes représentations.

Plus particulièrement, en vue d'affiner la compréhension du fonctionnement cognitif en environnement virtuel, la recherche s'est positionnée dans une perspective comparative en évaluant le niveau de maîtrise des deux habiletés dans différentes modalités. Par exemple, afin d'évaluer l'influence de la manipulation des représentations virtuelles par l'enfant ou l'adolescent, les performances obtenues au départ de représentations virtuelles manipulables ont été comparées à celles obtenues au départ de représentations virtuelles ne pouvant qu'être observées. Dans cette même optique, les mêmes habiletés ont été investiguées également au départ de représentations planes mais aussi de matériel physique pour identifier si les capacités des enfants et des adolescents au départ de ces supports de dimension différente tendent ou non à se rapprocher.

D'abord, la première partie du manuscrit a présenté les éléments théoriques nécessaires à la compréhension de la recherche, ayant notamment permis la présentation des résultats d'études antérieures menées sur les mêmes habiletés.

Ces éléments ont permis, dès la deuxième partie de ce manuscrit (volume 1), d'aboutir à la présentation de la problématique, se rapportant notamment aux éléments mentionnés dans l'entame de cette conclusion générale. Cette deuxième partie de manuscrit a ensuite permis de présenter les différentes questions de recherche ainsi que les études mises en œuvre pour y répondre. Les tâches utilisées pour évaluer la maîtrise des habiletés ont alors pu être présentées, tout comme les

environnements virtuels utilisés, à savoir un environnement virtuel proposé sur tablette tactile.

Au total, deux études expérimentales ont été proposées, menées chacune auprès de plus de six cents enfants et adolescents. La première étude expérimentale s'est focalisée uniquement sur l'habileté de perception visuelle des objets 3D. Pour cela, une tâche de reconnaissance d'objets présentés dans plusieurs modalités (représentations virtuelles et planes) a été utilisée. La seconde étude, qui s'est voulue complémentaire à la première, a également investigué cette habileté au travers d'une tâche proche et en s'intéressant à de nouvelles modalités de présentation des objets 3D (matériel physique à manipuler ou à observer, successions de représentations planes) en plus de celles déjà rencontrées dans la première étude. Pour aller plus loin, la seconde étude a également proposé d'évaluer, auprès des mêmes enfants et adolescents, l'habileté de visualisation spatiale dans les mêmes modalités de présentations des objets 3D, au travers de tâches de dessin de formes de coupe et d'empreinte des objets 3D.

Les résultats des deux études menées ont alors pu être présentés puis discutés en troisième partie de ce manuscrit en commençant par l'habileté de perception visuelle, et ensuite en se focalisant sur l'habileté de visualisation spatiale.

Ils ont permis de mettre en avant que la plupart des enfants et des adolescents ne perçoivent pas adéquatement l'ensemble des objets 3D présentés virtuellement. Cela signifie que la perception de telles représentations n'est pas systématique chez ces derniers, qui rencontrent, encore à l'âge de 15 ans, des difficultés à percevoir certains objets, y compris des objets 3D simples tels que le cube. Ils semblent cependant tous capables, déjà à 6 ans, de comprendre que les environnements virtuels permettent une présentation des objets 3D et arrivent le plus souvent à en percevoir plusieurs d'entre eux. Les résultats montrent également que certains objets 3D sont plus complexes à percevoir, même si les difficultés varient selon les enfants et les adolescents. Les difficultés, suggérées dans la littérature compte tenu des caractéristiques des représentations virtuelles, ont donc ici été objectivées. Les erreurs commises ont permis d'affiner la compréhension de ces dernières, notamment en suggérant la présence d'une forte difficulté à combiner l'ensemble des informations offertes par les représentations virtuelles, notamment les informations relatives à la hauteur des objets présentés. L'observation de ces difficultés permet, ainsi, de montrer que la perception de représentations virtuelles se distingue de la perception des objets 3D

dans l'espace sensible. Les résultats ont par ailleurs permis d'observer que, chez les plus jeunes enfants interrogés, la perception des représentations virtuelles tend à se rapprocher de la perception de représentations planes, même si, avec l'âge, les représentations virtuelles semblent apporter une plus-value pour la perception des objets 3D. Plus particulièrement, les résultats permettent de suggérer que cette plus-value ne se situe pas dans le fait d'observer l'objet en mouvement mais bien plutôt dans le fait de fournir plusieurs informations relatives à la troisième dimension, dont certainement des informations non déformées par la vue en perspective.

Pour autant, les résultats obtenus à l'égard de la deuxième habileté permettent de mettre en évidence que, malgré les décalages observés au niveau de la perception, les enfants âgés de 8 ans semblent arriver à mettre en place certaines opérations mentales sur les objets 3D représentés virtuellement. En grandissant, ces capacités se développent, même si certaines opérations mentales, et notamment les exercices de coupe oblique continuent à poser de fortes difficultés aux adolescents. Des résultats proches sont par ailleurs observés dans l'espace sensible et même au départ de représentations planes, bien que quelques divergences apparaissent pour certaines opérations mentales.

Les résultats obtenus peuvent se mettre au service de la réflexion sur les supports utilisés pour évaluer les habiletés spatiales les enfants et les adolescents en vue de comprendre le rapport qu'ils entretiennent avec l'espace 3D. Plus encore, ce travail de recherche s'inscrit dans le champ de la psychologie cognitive et développementale mais les résultats obtenus viennent également enrichir la réflexion sur l'enseignement-apprentissage. En effet, les études ici menées ont investigué des processus cognitifs intervenant notamment dans les apprentissages en géométrie 3D et impactant la compréhension des concepts dans ce domaine. Elles ont par ailleurs évalué ces habiletés sur des objets 3D se rapportant aux solides géométriques étudiés dans le contexte scolaire. Il s'agit alors de considérer que les résultats de ces études, qui apportent une meilleure compréhension du fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents, peuvent guider la réflexion sur les supports d'apprentissage et en particulier sur l'usage de solides virtuels. Cela constitue un enjeu essentiel compte tenu de la place actuelle des technologies dans le milieu scolaire et compte tenu du peu de recommandations fournies aux enseignants par rapport à ces supports. Si certains auteurs suggèrent que l'utilisation de solides virtuels pourrait apparaître comme une

alternative au matériel physique lors de l'apprentissage de la géométrie 3D, les résultats obtenus dans les deux études ici menées invitent à conserver une certaine prudence à cet égard. En effet, en observant la présence de difficultés dans la perception des solides virtuels, il s'agit de considérer que ce type de support n'est pas équivalent au matériel physique et que l'usage de ce matériel pourrait engendrer des obstacles lors des apprentissages. Il peut en particulier générer des difficultés s'il est utilisé dans les premiers apprentissages, au moment de se construire des images mentales des solides géométriques. Par ailleurs, grâce aux études menées et en prenant appui sur les difficultés observées dans les tâches proposées, des pistes d'accompagnement à apporter aux élèves sont présentées aux enseignants si ce matériel est envisagé. La quatrième et ultime partie de ce manuscrit a alors permis de développer ces aspects relatifs à l'apport des études pour le domaine de la psychologie ou pour la réflexion sur l'enseignement-apprentissage.

Les études menées participent à l'amélioration de la compréhension du fonctionnement cognitif des enfants et des adolescents en environnement virtuel. Elles apportent *in fine* des éléments de réflexion à l'égard des supports d'apprentissage ou d'évaluation utilisés en contexte scolaire ou non. Toutefois, leur caractère exploratoire ouvre la porte à de nombreux prolongements, que ce soit dans le domaine de la psychologie (psychologie cognitive et psychologie du développement, par exemple) en modifiant certaines caractéristiques de l'environnement virtuel, ou pour poursuivre la réflexion sur l'enseignement-apprentissage en menant des études longitudinales dans le domaine de la psychologie des apprentissages ou de la didactique visant à évaluer l'effet des supports sur les apprentissages.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A

- Accascina, G., & Rogora, E. (2006) Using Cabri 3D Diagrams for Teaching Geometry. *International journal for Technology in mathematics Education*, 13(1), 11-22.
- Adams, D. M., & Mayer, R. E. (2014). Cognitive consequences approach : What is learned from playing a game. Dans R. E. Mayer (Ed.), *Computer based learning : An evidence-based approach* (pp. 171-224). MIT Press.
- Akçayır, G., & Akçayır, M. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational research review*, 20, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>
- Akilli, M. (2021). Attributes of 3D Computer Models for Learning the Structure of Atom by Undergraduate Science Teacher's Students. *European Journal of Educational Sciences*, 8(2), 85-99 <https://doi.org/10.19044/ejes.v8.no2a85>
- Alibali, M. W. (2005). Gesture in spatial cognition: Expressing, communicating and thinking about spatial information. *Spatial Cognition and Computation*, 5, 307-331. https://doi.org/10.1207/s15427633scc0504_2
- Althibyani, H. A. (2023). An Enrichment Program Based on Using of Augmented Reality Technology for Developing 3D Geometric Shapes Skills for Second Grade Intermediate Students. *Information Sciences Letters*, 12(5), 1743-1752.
<https://doi.org/10.18576/isl/120520>
- Amorim, M., Isableu, B., & Jarraya, M. (2006). Embodied spatial transformations: body analogy for the mental rotation of objects. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135(3), 327-347. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.135.3.327>.
- Andrews, J., & Lord, C. (2017). *Les âges de la vie, Psychologie du développement humain (5^e édition)*. Edition du Renouveau Pédagogique Inc.
- Arcavi, A. (2003). The role of visual representations in the learning of mathematics. *Educational Studies in Mathematics*, 52, 215-241.
<https://doi.org/10.1023/A:1024312321077>
- Ardebili, M. (2006). Using solid modeling and multimedia software to improve spatial visualization skills. Dans *Proceedings of the 2006 American Society for Engineering Education (ASEE) Annual Conference & Exposition*, <https://peer.asee.org/using-solid-modeling-and-multimedia-software-to-improve-spatial-visualization-skills.pdf>
- Astuti, D. P., Sutopo S., & Nurhasanah, F. (2020). An Analysis of Students Geometry Skills with Different Visual-Spatial and Logic-Mathematic Intelligence in Solving

- the Problem of Solid Plane Geometry. *Journal of Mathematics and Mathematics Education*, 10(1), 19-32. 10.20961/jmme.v10i1.37732
- Athias, F. (2015). La géométrie dynamique pour éclairer l'usage du compas. *Education & didactique*, 9(3), 109-125. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.2396>
- Attree, E. A., Brooks, B. M., Rose, F. D., Andrews, T. K., Leadbetter, A. G., & Clifford, B. R. (1996). Memory processes and virtual environments: I can't remember what was there, but I can remember how I got there. Implications for people with disabilities. Dans P. M. Sharkey (Ed.), *Proceedings of the 1st European conference on disability, virtual reality, and associated technologies* (pp. 117 -122). Maidenhead
- Aubrey, J. S., Robb, M. B., Bailey, J., & Bailenson, J. (2019). *Virtual Reality 101: What You Need to Know About Kids and VR*. Common Sense. https://www.common sense media.org/sites/default/files/research/report/csm_vr101_final_under5mb.pdf
- Audibert G., & Keita B. (1987). La perspective cavalière et la représentation de l'espace. Dans G. Vergnaud, G. Brousseau & M. Hulin (Eds.), *Didactique et acquisition des connaissances scientifiques* (pp. 109-126). La pensée sauvage éditions.
- Audibert, G. (1990). La perspective cavalière. *Publication de l'A.P.M.E.P.*, 75.
- Audibert, G. (1992) L'espace en géométrie. *Topologie structurale* 18, 49-62.
- Audibert, G. (1994). Contribution de l'apprentissage de la géométrie à la formation scientifique. Dans D. F. Robitaille, D. H. Wheeler & C. Kieran (Eds.), *Choix de conférences du 7e congrès international sur l'enseignement des mathématiques* (pp. 1-17). Les Presses de l'Université Laval.
- Audibert, G., & Bonafé, F. (1986). Apprentissage de la perspective cavalière. Dans P. Rabardel & A. Weill-Fassina (Eds.), *Le dessin technique : Apprentissage, utilisations, évolutions* (pp. 139-147). Hermes.
- Ayres, P., & Paas, F. (2009). Interdisciplinary perspectives inspiring a new generation of cognitive load research. *Educational Psychology Research*, 21, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10648-008-9090-7>

B

- Baillargeon, R., & DeVos, J. (1991). Object Permanence in Young Infants: Further Evidence. *Child Development*, 62(6), 1227-1246. <https://doi.org/10.2307/1130803>
- Baki, A., Kosa, T., & Guven, B. (2011). A comparative study of the effects of using dynamic geometry software and physical manipulatives on the spatial visualisation skills of pre-service mathematics teachers. *British Journal of*

- Educational Technology*, 42(2), 291-310. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8535.2009.01012.x>
- Bakó, M. (2003). Different projecting methods in teaching spatial geometry. *Proceedings of the Third European Research in Mathematics Education III*, 7, 1-9. http://www.mathematik.tu-dortmund.de/~erme/CERME3/Groups/TG7/TG7_Bako_cerme3.pdf
- Baldy, R. (1988). De l'espace du dessin à celui de l'objet. Une activité de mises en correspondances entre des dessins en perspective cavalière et des objets réels. *Educational Studies in Mathematics*, 19, 43-57. <https://doi.org/10.1007/BF00428384>
- Baldy, R., & Chatillon, J. F. (1992). Comparer des dessins de volumes en perspective cavalière. *Tréma*, 2, 15-27. <https://doi.org/10.4000/trema.2404>
- Baldy, R., Devichi, C., Aubert, F., Munier, V., Merle, H., Dusseau, J., & Favrat, J. (2005). Développement cognitif et apprentissages scolaires : l'exemple de l'acquisition du concept d'angle. *Revue française de pédagogie*, 152, 49-61. <https://doi.org/10.3406/rfp.2005.3363>
- Baraudon, C., Lanfranchi, J.-B., Bastien, J. M. C., & Fleck, S. (2021). Conception d'une échelle française d'évaluation de l'utilisabilité des nouvelles technologies éducatives par l'enfant. *Médiations Et médiatisations*, 5, 44-67. <https://doi.org/10.52358/mm.vi5.174>
- Barisnikov, K., & Pizzo, R. (2013). L'examen des compétences visuo-spatiales. Dans M. P. Noel (Ed.), *Neuropsychologie de l'enfant* (pp. 139-170). Mardaga.
- Barisnikov, K. (2009). Les troubles des fonctions visuo-spatiales. Dans M. Poncelet, S. Majerus & M. van der Linden (Eds.), *Traité de neuropsychologie de l'enfant* (pp. 373-403). Solal.
- Barker Bausell, R., & Li, Y.-F. (2002). *Power Analysis for Experimental Research : a practical guide for the biological, medical and social sciences*. Cambridge University Press.
- Bartlett, K. A., Palacios-Ibáñez, A., & Camba, J. D. (2024). A gamified approach to assessing mental rotation in virtual reality. *Proceedings of the Design Society*, 4, 2805-2814. <https://doi.org/10.1017/pds.2024.284>
- Barrett, T. J., Stull, A. T., Hsu, T. M., & Hegarty, M. (2015). Constrained interactivity for relating multiple representations in science: when virtual is better than real. *Computers & Education*, 81, 69-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2014.09.009>
- Bates, K. E., & Farran, E. K. (2020). Deciphering the format of representations in mental imagery and establishing the relationship between mental imagery and visual working memory in primary school children and adulthood. *PsyArXiv*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/e3jvq>

- Bates, K., Gilligan-Lee, K., & Farran, E. (2021). Reimagining Mathematics: The Role of Mental Imagery in Explaining Mathematical Calculation Skills in Childhood. *Mind Brain and Education*, 15(2), 189-198. <https://doi.org/10.1111/mbe.12281>
- Battista, M. T. (1990). Spatial visualization and gender differences in high school geometry. *Journal for Research in Mathematics Education*, 21(1), 47-60. <https://doi.org/10.2307/749456>
- Battista, M. T., & Clements, D. H. (1996). Students' understanding of Three-Dimensional Rectangular Arrays of Cubes. *Journal for Research in Mathematics Education*, 27(3), 258. <https://doi.org/10.2307/749365>
- Battista, M. T., Frazee, L. M., & Winer, M. L. (2018). Analyzing the relation between spatial and geometric reasoning for elementary and middle school students. Dans K. S. Mix & M. T. Battista (Eds.), *Visualizing Mathematics: the role of spatial reasoning in mathematical thought* (pp. 195-228). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98767-5_10
- Bauer, R. M., Iverson, G. L., Cernich, A. N., Binder, L. M., Ruff, R. M., & Naugle, R. I. (2012). Computerized neuropsychological assessment devices: joint position paper of the American Academy of Clinical Neuropsychology and the National Academy of Neuropsychology. *The Clinical Neuropsychologist*, 26(2), 177-196. <https://doi.org/10.1080/13854046.2012.663001>
- Bayart C., Gos, C., Hindelang, C., Keyling, M. A., Ortlieb, M., Rauscher, J. C., & Roesch, G. (1996). Voir et raisonner : à la conquête de l'espace au collège. *Repères IREM*, 33, 19-36.
- Beauset, R. & Duroisin, N. (2021, 12-14 octobre). *Enseigner la géométrie dans l'espace à l'école primaire : conceptions et pratiques d'enseignants francophones* [Communication]. Colloque L'école primaire au 21e siècle, Cergy.
- Beauset, R. & Duroisin, N. (2022, 12-14 avril). *Quelle place pour la visualisation spatiale au sein des évaluation externes et quelle évolution depuis 2015 ?* [Communication]. Colloque annuel de l'ADMEE- Europe, Guadeloupe.
- Beauset, R., & Duroisin, N. (2023a). Children perception of 3D usual shapes in virtual environments. *Journal of Education and Development*, 7(4), 82-92. <https://doi.org/10.20849/jed.v7i4.1388>
- Beauset, R., & Duroisin, N. (2023b). Problèmes de reproduction de figures en fin d'enseignement primaire : quels avis de la part des enseignants ? *Revue québécoise de didactique des mathématiques*, 4, 37-75.
- Beauset, R., & Duroisin, N. (2023c, 3-5 avril). *L'évaluation de la géométrie 3D dans les épreuves externes certificatives menées en Fédération Wallonie-Bruxelles : quelle place et quel(s) contenu(s) ?* [Communication]. Colloque annuel de l'ADMEE- Europe, Mons.

- Beauset, R., & Duroisin, N. (2023d, 26-27 juillet). Évaluation de la rotation mentale à l'aide du matériel tangible : une alternative aux épreuves papier-crayon pour les enfants de 6 à 10 ans ? [Communication affichée]. 15ème colloque international du RIPSYDEVE, Genève.
- Beauset, R., Lequeu, C., & Duroisin, N. (2024a). Évaluation du processus cognitif de visualisation impliqué dans l'apprentissage de la géométrie. *Mesure et Évaluation en Education*, 47(1), 155-190.
- Beauset, R., & Duroisin, N. (2024). L'évaluation des habiletés spatiales au service de l'enseignement-apprentissage de la géométrie tridimensionnelle : qu'en est-il des environnements virtuels 2 ½ D ? Dans N. Loyer & N. Duroisin (Eds.), *Évaluation des apprentissages et technologies numériques : évolution, nouveautés et défis actuels* (pp. 23-55). Peter Lang.
- Beauset, R., Perichon, N., & Duroisin, N. (2025, à paraître). Les fonctions exécutives dans l'apprentissage de la géométrie : Illustration de deux problèmes en géométrie plane et géométrie 3D. Dans N. Duroisin & J. Clerc (Eds.), *Fonctions exécutives, apprentissages et réussite scolaire*. Dunod.
- Beauset, R., Seha, M., & Duroisin, N. (2024b). Enjeux et besoins de formation des enseignants dans le domaine de la géométrie : enquête quantitative auprès des enseignants francophones belges et français. *Grand N*, 113, 78-104.
- Behrmann, M., & Ewell, C. (2003). Expertise in tactile pattern recognition. *Psychological Science*, 14(5), 480-486. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.02458>
- Belkhodja, M. (2007). *La visualisation en géométrie dans trois et deux dimensions en tant que compétence à développer à l'école* [Thèse de doctorat, Université de Laval]. <https://dam-oclc.bac-lac.gc.ca>
- Bennett, G. K., Seashore, H. G., & Wesman, A. G. (1973). *Differential aptitude tests, forms S and T*. The Psychological Corporation.
- Benton, A. L. (1979). Visuo-perceptual, visuo-spatial, and visuo-constructive disorders. Dans K. M. Heilman & E. Valenstein (Eds.), *Clinical neuropsychology* (pp. 186-232). Oxford University Press.
- Berthelot, R., & Salin, M.-H. (1992). *L'enseignement de l'espace et de la géométrie dans la scolarité obligatoire* [Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I]. HAL. https://theses.hal.science/tel-00414065v1/file/these_Berthelot_Salin.pdf
- Berthelot, R., & Salin, M.-H. (1999-2000). L'enseignement de l'espace à l'école primaire. *Grand N*, 65, 37-59.
- Berthier, J.-L., Borst, G., Desnos, M., & Guilleray, F. (2018). *Les neurosciences cognitives dans la classe. Guide pour expérimenter et adapter ses pratiques pédagogiques*. ESF Sciences Humaines

- Bertolo, D. (2013, 13-15 novembre). *Les Interactions sur Tablettes Multi-touch améliorent-elles l'Apprentissage de la Géométrie dans l'Espace ?* [Communication]. 25ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, IHM'13, Bordeaux.
- Bertolo, D. (2014). *Apports et évaluations des interactions sur tablettes numériques dans le cadre de l'apprentissage de la géométrie dans l'espace* [Thèse de doctorat, Université de Lorraine]. HAL. <https://theses.hal.science/tel-01751774/>
- Bertolo, D. Vivian, R., & Dinet, J. (2015). Évaluation de l'apport d'une utilisation de tablettes numériques dans l'apprentissage de la géométrie dans l'espace à l'école primaire. *MathemaTICE Les nouvelles technologies pour l'enseignement des mathématiques*, 45.
- Bessonneau, P., Arzoumanian, P., & Pastor, J.M. (2015). Une évaluation sous forme numérique est-elle comparable à une évaluation de type « papier-crayon » ? *Éducation & formations*, 86-87 (08), 159-180. <https://doi.org/10.48464/ef-86-87-08>
- Bhargava, A., Lucaites, K.M., Hartman, L.S., Solini, H., Bertrand, J., Robb, A., Pagano, C., & Babu, S. (2020). Revisiting affordance perception in contemporary virtual reality. *Virtual Reality*, 24, 713–724. <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00432-y>
- Bialystok, E., & Craik, F. I. M. (2022). How does bilingualism modify cognitive function? Attention to the mechanism. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29(4), 1246-1269. <https://doi.org/10.3758/s13423-022-02057-5>
- Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. (2015). A survey of augmented reality. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 8(2-3), 73-272. <http://dx.doi.org/10.1561/1100000049>
- Bishop, A.J. (1983). Spatial abilities and mathematical thinking, Dans M. Zweng et al. (Eds.), *Proceedings of the IV I.C.M.E.* (pp. 176-178), Birkhäuser.
- Bizzaro, M., Giofrè, D., Girelli, L., & Cornoldi, C. (2018). Arithmetic, working memory, and visuospatial imagery abilities in children with poor geometric learning. *Learning and Individual Differences*, 62, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2018.01.013>
- Blank, R., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H., & Wilson, P. (2012). European Academy for Childhood Disability (EACD): Recommendations on the definition, diagnosis and intervention of developmental coordination disorder (long version). *Developmental Medicine et Child Neurology*, 54, 54-93. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2011.04171.x>
- Blavier, A. (2006). *Impact des images en 2D ou 3D sur les processus cognitifs impliqués dans le traitement visuel et dans le contrôle de l'action : le cas de la chirurgie minimale invasive* [Thèse de doctorat, Université de Liège]. ORBi-University of Liège. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/28282>

- Bonafé, F., & Sauter, M. (1998). Enseigner la géométrie dans l'espace. *Repères IREM*, 33, 5-18.
- Boot, W. R., Kramer, A. F., Simons, D. J., Fabiani, M., & Gratton, G. (2008). The effects of video game playing on attention, memory, and executive control. *Acta Psychologica*, 129(3), 387-398. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.09.005>
- Bornstein, M., & Stiles-Davhoyis, J. (1984). Discrimination and memory for symmetry in young children. *Developmental Psychology*, 20, 637-649.
- Bova, S. M., Fazzi, E., Giovenzana, A., Montomoli, C., Signorini, S. G., Zoppello, M., & Lanzi, G. (2007). The development of visual object recognition in school-age children. *Developmental Neuropsychology*, 31, 79-102. https://doi.org/10.1207/s15326942dn3101_5
- Boyle, B., & Bragg, J. (2005). No science today: The demise of primary science. *Curriculum Journal*, 16(4), 423-437.
- Bridoux, S., & Nihoul, C. (2015). Difficultés des élèves à interpréter des constructions dans l'espace. Une étude de cas. *Petit x*, 98, 53-76.
- Brissiaud, R. (1994). *J h GS, Livre du maître*, Retz.
- Brousseau, G. (2000). Les propriétés didactiques de la géométrie élémentaire. L'étude de l'espace et de la géométrie. *Actes du Séminaire de Didactique des Mathématiques de Rethymnon*, 67-83. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00515110/fr/>
- Brown, L. B. (1969). The 3D Reconstruction of a 2D Visual Display. *The Journal of Genetic Psychology*, 115(2), 257-262. <https://doi.org/10.1080/00221325.1969.10533893>
- Bruce, C. D., & Sinclair, N. (2014). The role of tools and technologies in increasing the types and nature of spatial reasoning tasks in the classroom. Dans N. Sinclair & C. D. Bruce (Eds.), *Research forum: spatial reasoning for young learners* (pp. 18-199). PME.
- Bruce, V., Green, P. R., & Georgeson, M. A. (2003). *Visual perception : Physiology, psychology, and ecology* (4th ed.). Psychology Press.
- Brunsdon, R., Joy, P., Patten, E., & Burton, K. (2018). Preliminary normative data on the BORB for children aged 3–8. *Applied Neuropsychology: Child*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/21622965.2017.1401478>
- Buckley, J., Seery, N., & Canty, D. (2019). Investigating the use of spatial reasoning strategies in geometric problem solving. *International Journal of Technology and Design Education*, 29(2), 341-362. <https://doi.org/10.1007/s10798-018-9446-3>
- Bujak, K. R., Radu, I., Catrambone, R., MacIntyre, B., Zheng, R., & Golubski, G. (2013). A psychological perspective on augmented reality in the mathematics classroom. *Computers & Education*, 68, 536-544. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.02.017>

- Bulf, C. (2019, 5-10 février). *Professional actions of novice teachers in the context of teaching and learning geometry* [Communication]. Conférence CERME – 11, Utrecht.
- Bulf, C., & Mathé, A.-C. (2018). Agir-parler-penser en géométrie. Un point de vue sémiotique sur l'enseignement et l'apprentissage de la géométrie à l'école primaire. Dans Commission inter-IREM COPIRELEM (Eds.). *Actes du 44e Colloque de la COPIRELEM Épinal les 13, 14 et 15 juin 2017 - Manipuler, représenter, communiquer : quelle est la place de la sémiotique dans l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques ?* (pp. 29-56). ARPEME.
- Bulthoff, H., & Edelman, S. (1992). Psychophysical support for a two-dimensional view interpolation theory of object recognition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89, 60-64. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.1.60>
- Burte, H., Gardony, A. L., Hutton, A., & Taylor, H. A. (2017). Think3d!: improving mathematics learning through embodied spatial training. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 2(13). <https://doi.org/10.1186/s41235-017-0052-9>.

C

- Camou, B. J. (2012). *High school students' learning of 3D geometry using iMAT (integrating Multiperepresentations, Approximations and Technology) engineering* [Thèse de doctorat, Université de Géorgie]. UGA. https://getd.libs.uga.edu/pdfs/camou_bernardo_j_201205_phd.pdf
- Campos, J. J., Langer, A., & Krowitz, A. (1970). Cardiac responses on the visual cliff in prelocomotor human infants. *Science*, 170, 196-197. <https://doi.org/10.1126/science.170.3954.196>
- Cangas, D., Morga, G., & Rodriguez, J. (2019). Geometry teaching experience in virtual reality with NeoTrie VR. *Psychology, Society, & Education*, 11(3), 355-366. <https://doi.org/10.25115/psye.v10i1.2270>
- Cantù, P. (2009). Le concept d'espace chez Veronese. *Philosophia Scientiæ*, 13(2), 129-149. <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.299>
- Carroll, J. B. (1993). *Human cognitive abilities: A survey of factor-analytic studies*. Cambridge University Press.
- Casey, B. M., Andrews, N., Schindler, H., Kersh, J. E., Samper, A., & Copley, J. (2008). The development of spatial skills through interventions involving block building activities. *Cognition and instruction*, 26(3), 269-309, <http://dx.doi.org/10.1080/07370000802177177>.
- Castro-Alonso, J. C., & Jansen, P. (2019). Sex Differences in Visuospatial Processing. Dans J. C. Castro-Alonso (Ed.), *Visuospatial processing for education in health and natural sciences* (pp. 81-110). Springer.

- Castro-Alonso, J. C., Ayres, P., & Paas, F. (2015). Animations showing Lego manipulative tasks: Three potential moderators of effectiveness. *Computers & Education, 85*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.12.022>
- Castro-Alonso, J. C., Ayres, P., Wong, M., & Paas, F. (2018). Learning symbols from permanent and transient visual presentations: Don't overplay the hand. *Computers & Education, 116*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.08.011>
- CEEB (1939). *Special aptitude test in spatial relations*. College Entrance Examination Board.
- Cerrato, A., & Ponticorvo, M. (2017). Enhancing Neuropsychological Testing with Gamification and Tangible Interfaces: The Baking Tray Task. Dans J. M. Ferrández Vicente, J. R. Álvarez Sánchez, F. de la Paz López, J. Toledo Moreo & H. Adeli (Eds.), *Biomedical Applications Based on Natural and Artificial Computing* (pp. 147-156). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59773-7_16
- Chaachoua, A. (1997). *Fonctions du dessin dans l'enseignement de la géométrie dans l'espace. Etude d'un cas : la vie des problèmes de construction et rapports des enseignants à ces problèmes* [Thèse de doctorat, CY Cergy Paris Université]. HAL. <https://hal.science/tel-04097396v2/document>
- Charles, S. (2023). *Habilité spatiale et stratégies de modélisation 3D*. [Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble 1]. HAL. <https://hal.science/tel-02047251/document>
- Chatterjee, A. (2008). The neural organization of spatial thought and language. *Seminars in Speech and Language, 29*, 226-238. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1082886>
- Cheng, Y.-L., & Mix, K. S. (2014). Spatial training improves children's mathematics ability. *Journal of Cognition and Development, 15*(1), 2-11. <https://doi.org/10.1080/15248372.2012.725186>
- Cheung, C.-N., Sung, J. Y., & Lourenco, S. F. (2019). Does training mental rotation transfer to gains in mathematical competence? Assessment of an at-home visuospatial intervention. *Psychological Research, 84*, 2000-2017. <https://doi.org/10.1007/s00426-019-01202-5>
- Chevallard, Y. (1991). *La transposition didactique*. La pensée sauvage.
- Chevallard, Y., & Julien, M. (1991). Autour de l'enseignement de la géométrie au collège. *Petit x, 27*, 41-76.
- Chikha, A. B., Khacharem, A., Trabelsi, K., & Bragazzi, N. L. (2021). The Effect of Spatial Ability in Learning From Static and Dynamic Visualizations: A Moderation Analysis in 6-Year-Old Children. *Frontiers in Psychology, 12*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.583968>

- Christou, C., Jones, K., Mousoulides, N., & Pittalis, M. (2006). Developing the 3dmath dynamic geometry software: theoretical perspectives on design. *International Journal for Technology in Mathematics Education*, 13(4), 168-174.
- Chu, M., & Kita, S. (2008). Spontaneous gestures during mental rotation tasks: Insights into the microdevelopment of the motor strategy. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137, 706-723. <https://doi.org/10.1037/a0013157>
- Chu, M., & Kita, S. (2011). The nature of gestures' beneficial role in spatial problem solving. *Journal of Experimental Psychology: General*, 140(1), 102-116. <https://doi.org/10.1037/a0021790>
- Claisse, E. (2020). Le mouvement au service de la perspective en géométrie dans l'espace. Comparaison entre manipulation physique et virtuelle. *Repères-IREM*, 119, 5-22.
- Clements, D. H. (1999). 'Concrete' manipulatives, concrete ideas. *Contemporary Issues in Early Childhood*, 1(1), 45-60.
- Clements, D. H. (2004). Major themes and recommendations. Dans D. H. Clements & J. Sarama (Eds.), *Engaging young children in mathematics standards for early childhood mathematics* (pp. 7-75). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Clements, D. H., & Battista, M. T. (1992). Geometry and Spatial Reasoning. Dans D. A. Grouws (Ed.), *Handbook of Research on Mathematics Teaching and Learning* (pp. 420-464). Macmillan Publishing Co.
- Clements, D. H., & Sarama, J. (2007). Effects of a preschool mathematics curriculum: summative research on the Building Blocks project. *Journal for Research in Mathematics Education*, 38, 136-163. <https://doi.org/10.2307/30034954>
- Clements, D. H., & Sarama, J. (2021). Learning and teaching early math: The learning trajectories approach (3^e edition). Routledge
- Cogné, M., Taillade, M., N'Kaoua, B., Tarruella, A., Klinger, E., Larrue, F., Sauzéon, H., Joseph, P. A., & Sorita, E. (2015). The contribution of virtual reality to the diagnosis of spatial navigation disorders and to the study of the role of navigational aids: A systematic literature review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 60(3), 164-176. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2015.12.004>
- Cohé, A. (2012). *Manipulation de contenu 3D sur des surfaces tactiles. Interface homme-machine* [Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I]. HAL. https://theses.hal.science/tel-00789111/file/THESE_COHE_AURELIE_2012.pdf
- Cohen, C. A., & Bairaktarova, D. (2018). A Cognitive Approach to Spatial Visualization Assessment for First-year Engineering Students. *Engineering Design Graphics Journal*, 82(3), 1-19.

- Cohen, C. A., & Hegarty, M. (2007). Sources of difficulty in imagining cross sections of 3D objects. Dans D. S. McNamara & J. G. Trafton (Eds.), *Proceedings of the Twenty-Ninth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 179-184). Cognitive Science Society. 10.1016/J.JHSB.2006.11.013
- Cohen, C. A., & Hegarty, M. (2012). Inferring cross sections of 3D objects: A new spatial thinking test. *Learning and Individual Differences*, 22(6), 868-874. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.05.007>
- Cohen, C. A., & Hegarty, M. (2014). Visualizing cross sections: Training spatial thinking using interactive animations and virtual objects. *Learning and Individual Differences*, 33, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2014.04.002>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2^e édition). Routledge.
- Colmez F., & Parzysz B. (1993). Le vu et le su dans l'évolution des dessins de pyramides du CE2 à la 2nd. Dans A. Bessto, P. Verillon & N. Balacheff (Eds.), *Espaces graphiques et graphismes d'espaces* (pp. 35-55). La pensée sauvage éditions.
- Committee on Support for Thinking Spatially (2006). *Learning to think spatially: GIS as a support system in the K-12 curriculum*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11019>.
- Contreras, M. J., Martínez-Molina, A., & Santacreu, J. (2012). Do the sex differences play such an important role in explaining performance in spatial tasks? *Personality and Individual Differences*, 52, 659-663. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2011.12.01>
- Cornu, V., Schiltz, C., Martin, R., & Hornung, C. (2018). Visuo-spatial abilities are key for young children's verbal number skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 166, 604-620. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.09.006>
- Coutat, S., & Vendeira-Maréchal, C. (2022, 9 mai). *Développer la flexibilité du regard géométrique dans les premiers apprentissages* [Communication]. Enseigner la géométrie durant l'enseignement obligatoire : enjeux, réalités, résultats et perspectives, 89e Congrès de l'Acfas, Laval.
- Coutat, S., & Richard, P. (2011). Les figures dynamiques dans un espace de travail mathématique pour l'apprentissage des propriétés géométriques. *Annales de didactique et de sciences cognitives*, 16, 97-126.
- Coutat-Gousseau, S. (2014) Quel espace de travail géométrique pour l'apprentissage des propriétés au primaire ? *Revista latinoamericana des Investigacion en mathematica educativa*, 17(4-1), 121-148. <https://doi.org/10.12802/relime.13.1746>
- Crawford, S. G., & Dewey, D. (2008). Co-occurring disorders: A possible key to visual perceptual deficits in children with developmental coordination disorder?

Human Movement Science, 27(1), 154-169.
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.09.002>

CREM (2002). *Vers une géométrie naturelle*.
<https://www.crem.be/publication/Vers%20une%20g%C3%A9om%C3%A9trie%20naturelle>

Crollen, V., & Noël, M.-P. (2015). Spatial and numerical processing in children with high and low visuospatial abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 132, 84-98. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.12.006>

Cutting, J. E. (1997). How the eye measures reality and virtual reality. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 29(1), 27-36.
<https://doi.org/10.3758/BF03200563>

D

Dancey, C., & Reidy, J. (2004) *Statistics without Maths for Psychology: using SPSS for Windows*. PrenticeHall.

Darken, R., & Sibert, J. (1996). Navigating Large Virtual Spaces. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 8(1), 49-72.
<https://doi.org/10.1080/10447319609526140>

David, L. T., & Clinciu, A. I. (2009). Psychological measures of spatial abilities. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*, 2(51), 93-98.

David, L. T. (2012). Training effects on mental rotation, spatial orientation and spatial visualisation depending on the initial level of spatial abilities. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 33, 328-332.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.01.137>

Davis, E. E., Pitchford, N. J., & Limback, E. (2011). The interrelation between cognitive and motor development in typically developing children aged 4–11 years is underpinned by visual processing and fine manual control. *British Journal of Psychology*, 102, 569-584. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.2011.02018.x>

Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, perceived ease of use and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319-339.
<https://doi.org/10.2307/249008>

Davis, E. J. (1973). A Study of the Ability of School Pupils to Perceive and Identify the Plane Sections of Selected Solid Figures. *Journal for Research in Mathematics Education*, 4(3), 132-140. <https://doi.org/10.2307/748507>

De Koning, B. B., Marcus, N., Brucker, B., & Ayres, P. (2019). Does observing hand actions in animations and static graphics differentially affect learning of hand-manipulative tasks? *Computers & Education*, 141.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103636>

- De Koning, B. B., Tabbers, H. K., Rikers, R. M., & Paas, F. (2011). Attention cueing in an instructional animation: the role of presentation speed. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 41-45. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.05.010>
- Degraeve, B. (2022) . *Statistiques en psychologie et neuropsychologie Méthodes, pratiques et exercices corrigés*. Dunod.
- Delgado, A. R., & Prieto, G. (2004). Cognitive mediators and sex-related differences in mathematics. *Intelligence*, 32, 25-32. [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(03\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(03)00061-8).
- Demitriadou, E., Stavroulia, K. E., & Lanitis, A. (2020) Comparative evaluation of virtual and augmented reality for teaching mathematics in primary education. *Education and Information Technology*, 25, 381-401. <https://doi.org/10.1007/s10639-019-09973-5>
- Denis, M. (2012). Chapitre 3. La cognition spatiale. Dans M. Denis (Ed.), *La psychologie cognitive* (pp. 101-142). Éditions de la Maison des sciences de l'homme. <https://doi.org/10.4000/books.editionsmsmh.14787>
- Denis, M. (2016). *Petit traité de l'espace*. Mardaga.
- Denis, M. (1979). *Les images mentales* (1^{ère} édition). Presses Universitaires de France.
- Dervillez-Bastuji, J. (1982). *Structures des relations spatiales dans quelques langues naturelles*. Droz.
- Di, X., & Zheng, X. (2022) A meta-analysis of the impact of virtual technologies on students' spatial ability. *Educational Technology Research and Development*, 70(17). <https://doi.org/10.1007/s11423-022-10082-3>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual review of psychology*, 64, 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions Shown to Aid Executive Function Development in Children 4 to 12 Years Old. *Science*, 333, 959-964. <https://doi.org/10.1126/science.1204529>
- Diersch, N., & Wolbers, T. (2019). The potential of virtual reality for spatial navigation research across the adult lifespan. *The Journal of Experimental Biology*, 222(1), <https://doi.org/10.1242/jeb.187252>
- Dijkstra, N., Bosch, S. E., & van Gerven, M. A. J. (2019). Shared neural mechanisms of visual perception and imagery. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(5), 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.02.004>
- Douaire, J., Emprin, F., & Rajain, C. (2009). L'apprentissage du 3D à l'école. *Repères*, 77, 23-52.
- Dumas, C., Plénacoste, P., & Degrande, S. (2001). Les indices dynamiques dans les interfaces 3D-au delà des ombres portées. *Actes de la conférence ERGO-*

IHM'2000, 64-68. <https://web.imt-atlantique.fr/x-auto/cdumas/papiers/IHM2000.pdf>

Duroisin, N. (2015). *Quelle place pour les apprentissages spatiaux à l'école ? Etude expérimentale du développement des compétences spatiales des élèves âgés de 6 à 15 ans* [Thèse de doctorat, Université de Mons]. HAL. <https://hal.science/tel-01152392>

Duroisin, N., & Demeuse, M. (2015). What role for developmental theories in mathematics study programmes in French-speaking Belgium? An analysis of the geometry curriculum's aspects, framed by van Hiele's model. *Cogent Education*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2015.1049846>

Duroisin, N., Beauset, R., & Lucchese, J. (2020). Favoriser le passage à la visualisation non iconique par le recours à une ingénierie didactique pour faciliter la transition primaire/secondaire en géométrie. *Annales de Didactique et des Sciences Cognitives*, 25(1), 151-182. <https://doi.org/10.4000/adsc.549>

Duval, R. (2005). Les conditions cognitives de l'apprentissage de la géométrie : Développement de la visualisation, différenciation des raisonnements et coordination de leurs fonctionnements. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, 10, 5-53.

Duval, R. (2013). Commentary: Linking epistemology and semio-cognitive modeling in visualization. *ZDM*, 46(1), 159–170. <https://doi.org/10.1007/s11858-013-0565-8>

Duval, R., & Godin, M. (2005). Les changements de regard nécessaires sur les figures. *Grand N*, 76, 7-27.

E

Ehrlich, S. B., Levine, S. C., & Goldin-Meadow, S. (2006). The importance of gesture in children's spatial reasoning. *Developmental Psychology*, 42(6), 1259-1268. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.42.6.1259>

Ekstrom, R. B., French, J. W., Harman, H. H., & Dermen, D. (1976). *Manuel for kit of factor-referenced cognitive tests*. Educational Testing Service Princeton, New Jersey.

Elia, I., van den Heuvel-Panhuizen, M., & Gagatsis, A. (2018) Geometry Learning in the Early Years: Developing Understanding of Shapes and Space with a Focus on Visualization. Dans V. Kinnear, M. Lai & T. Muir (Eds.), *Forging Connections in Early Mathematics Teaching and Learning. Early Mathematics Learning and Development* (pp. 73-95). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7153-9_5

Eme, E. (2003). *Psychologie différentielle*. Paris : Armand Colin.

Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, *415*(6870), 429-433.
<https://doi.org/10.1038/415429a>

Esplin, J. A., Berghout Austin, A. M., Blevins-Knabe, B., Neilson, B. G., & Corwyn, R. F. (2021). Preschool Mathematics Performance and Executive Function: Rural-Urban Comparisons across Time. *Journal of Research in Childhood Education*, *35*(3), 458-476. <https://doi.org/10.1080/02568543.2020.1736219>

F

Fabiyi, T. R. (2017). Geometry concepts in mathematics perceived difficult to learn by senior secondary school students in Ekiti State, Nigeria. *Journal of Research and Method in Education*, *7*(1), 83-90.

Fagot, J., Martin-Malivel, J., & Dépy, D. (2000). Equivalence between objects and pictures. Dans J. Fagot (Ed.), *Picture perception in animals* (pp. 295-320). Psychology Press.

Fay, E., & Quaiser-Pohl, C. (1999). *Schnitte—Ein Test zur Erfassung des räumlichen Vorstellungsvermögens*. Swets Test Services.

Fédération Wallonie-Bruxelles (2017). Avis n°3 du Groupe Central.
<https://pactepourunenseignementdexcellence.cfwb.be/>

Fédération Wallonie-Bruxelles (2019). *Décret définissant la formation initiale des enseignants (7 février 2019)*. Moniteur belge, 5 mars 2019, p. 23808.

Fédération Wallonie-Bruxelles (2022). Référentiel de mathématiques – Tronc commun. <http://www.enseignement.be/index.php?page=28597&navi=4920>

Felix, M. C., Parker, J. D., Lee, C., & Gabriel, K. I. (2011). Real Three-Dimensional Objects: Effects on Mental Rotation. *Perceptual and Motor Skills*, *113*(1), 38-50.
<https://doi.org/10.2466/03.22.PMS.113.4.38-50>

Feng, J., Spence, I., & Pratt, J. (2007). Playing an action video game reduces gender differences in spatial cognition. *Psychological Science*, *18*(10), 850-855.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01990.x>

Fernández-Méndez, L., Contreras, M., Mammarella, I., Feraco, T., & Meneghetti, C. (2020). Mathematical achievement: the role of spatial and motor skills in 6–8 year-old children. *PeerJ*, *8*. <https://doi.org/10.7717/peerj.10095>.

Ferrara, F., & Mammana, M. F. (2014). Seeing in space is difficult: An approach to 3-D geometry through a DGE. *Proceedings of PME 38 and PME-NA 36*, *3*, 57-64.

Ferrarello, D., Mammana, M.F., & Pennisi, M. (2014). From 2D to 3D geometry: Discovering, conjecturing, proving. Dans A. Rogerson (Ed.), *Proceedings of the 12th International Conference of the Mathematics Education for the Future Project : the future of mathematics education in a connected world*.

- Figueiras, L., & Arcavi, A. (2014). A touch of mathematics: coming to our senses by observing the visually impaired. *ZDM—The International Journal on Mathematics Education*, 46(1), 123-133. <https://doi.org/10.1007/s11858-013-0555-x>
- Flores-Bascuñana, M., Diago, P.D., Villena-Taranilla, R., & Yáñez, D.F. (2020). On Augmented Reality for the Learning of 3D-Geometric Contents: A Preliminary Exploratory Study with 6-Grade Primary Students. *Education Sciences*, 10(1), 4, 1-9 <https://doi.org/10.3390/educsci10010004>
- Freudenthal, H. (1971). Geometry between the devil and the deep sea. *Educational Studies in Mathematics*, 3, 413-435. <https://doi.org/10.1007/BF00302305>
- Freudenthal, H. (1973). *Mathematics as an Educational Task*. Reidel.
- Frick, A., & Newcombe, N. S. (2012). Getting the big picture: Development of spatial scaling abilities. *Cognitive Development*, 27(3), 270-282. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2012.05.004>
- Frick, A., & Newcombe, N. S. (2015). Young Children's Perception of Diagrammatic Representations. *Spatial Cognition & Computation*, 15(4), 227-245. <https://doi.org/10.1080/13875868.2015.1046988>
- Frick, A., Daum, M. M., Walser, S., & Mast, F.W. (2009). Motor processes in children's mental rotation. *Journal of Cognition and Development*, 10, 18-40. <https://doi.org/10.1080/15248370902966719>
- Frick, A., Ferrara, K., & Newcombe, N. S. (2013). Using a touch screen paradigm to assess the development of mental rotation between 31/2 and 51/2 years of age. *Cognitive Processing*, 14(2), 117-127. <https://doi.org/10.1007/s10339-012-0534-0>
- Frick, A., Möhring, W., & Newcombe, N. S. (2014). Picturing perspectives: Development of perspective-taking abilities in 4- to 8-year-olds. *Frontiers in Psychology*, 5, 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00386>
- Fuchs, P., Moreau, G., & Guitton, P. (2011). Introduction to Virtual Reality. Dans P. Fuchs, G. Moreau & P. Guitton (Eds.), *Virtual Reality: Concepts and Technologies* (pp. 3-10). CRC Press.
- Fujita, T., Kondo, Y., Kumakura, H., & Kunimune, S. (2017). Students' geometric thinking with cube representations: assessment framework and empirical evidence. *The Journal of Mathematical Behavior*, 46, 96 –111. <https://doi.org/10.1016/j.jmathb.2017.03.003>
- Fujita, T., Kondo, Y., Kumakura, H., Kunimune, S. & Jones, K. (2020). Spatial reasoning skills about 2D representations of 3D geometrical shapes in grades 4 to 9. *Mathematics Education Research Journal*, 32, 235-255 <https://doi.org/10.1007/s13394-020-00335-w>

G

- Gal, H., & Linchevski, L. (2010). To see or not to see: analyzing difficulties in geometry from the perspective of visual perception. *Educational Studies in Mathematics*, 74(2), 163-183. <https://doi.org/10.1007/s10649-010-9232-y>
- Gecu-Parmaksiz, Z., & Delialioğlu, O. (2019). Augmented reality-based virtual manipulatives versus physical manipulatives for teaching geometric shapes to preschool children. *British Journal of Educational Technology*, 50(6), 3376-3390. <https://doi.org/10.1111/bjet.12740>
- Gentaz, E., Bara, F., Palluel-Germain, R., Pinet, L., & Hillairet de Boisferon, A. (2009). Apports de la modalité haptique manuelle dans les apprentissages scolaires (lecture, écriture et géométrie). *Cahiers Romains de Sciences Cognitives*, 3(3), 1-38.
- Gentaz, E., & Streri, A. (2004). An "Oblique Effect" in Infants' Haptic Perception of Spatial Orientations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(2), 253-259. <https://doi.org/10.1162/089892904322984544>
- Gergelitsová, Š., & Holan, T. (2017) Spatial Orientation and 3D Geometry. Dans M. Auer, D. Guralnick & J. Uhomobhi (Eds.), *Interactive Collaborative Learning. Advances in Intelligent Systems and Computing* (vol 544 ; pp. 285-292). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50340-0_25
- Gillet, P., Chabernaud, C., Batty, M., Barthélémy, C., & Jambaqué, I. (2009). La reconnaissance visuelle des objets chez l'enfant avec autisme : Résultats préliminaires à une adaptation pour enfants de la Birmingham Object Recognition Battery (BORB). *Développements*, 3(3), 35-44. <https://doi.org/10.3917/devel.003.0035>
- Gilligan, K. A., Flouri, E., & Farran, E. K. (2017). The contribution of spatial ability to mathematics achievement in middle childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 163, 107-125. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.04.01>
- Gilligan, K. A., Thomas, M. S. C., & Farran, E. K. (2019). First demonstration of effective spatial training for near transfer to spatial performance and far transfer to a range of mathematics skills at 8 years. *Developmental Science*, 23(4), e12909. <https://doi.org/10.1111/desc.12909>
- Giofrè, D., Mammarella, I. C., Ronconi, L., & Cornoldi, C. (2013). Visuospatial working memory in intuitive geometry, and in academic achievement in geometry. *Learning and Individual Differences*, 23, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.09.012>
- Godart, P. (2020). Des espaces. *Inflexions*, 43, 13-25. <https://doi.org/10.3917/infle.043.0013>

- Gold, A. U., Pendergast, P. M., Ormand, C. J., Budd, D. A., Stempien, J. A., Mueller, K. J., & Kravitz, K. A. (2018). Spatial skills in undergraduate students—Influence of gender, motivation, academic training, and childhood play. *Geosphere*, *14*(2), 1-16. <https://doi.org/10.1130/GES01494.1>
- Goldin-Meadow, S., Cook, S. W., & Mitchell, Z. A. (2009). Gesturing gives children new ideas about math. *Psychological Science*, *20*, 267-272. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02297.x>
- Gonzales, G., & Herbst, P. (2006). Competing arguments for the geometry curse: why were American high school students supported to study geometry in the twentieth century? *International Journal for the History of Mathematics Education*, *1*(1), 7-33.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, *15*(1), 20-25. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(92\)90344-8](https://doi.org/10.1016/0166-2236(92)90344-8)
- Gordon, F. R., & Yonas, A. (1976). Sensitivity to binocular depth information in infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, *22*, 413-422. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(76\)90105-3](https://doi.org/10.1016/0022-0965(76)90105-3)
- Gori, M., Sciutti, A., Torazza, D., Campus, C., & Bollini, A. (2024). The effect of visuo-haptic exploration on the development of the geometric cross-sectioning ability. *Journal of Experimental Child Psychology*, *238*. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2023.105774>
- Gorska, R., & Sorby, S. (2008, 22-25 juin). *Testing instruments for the assessment of 3-D spatial skills* [Communication]. ASEE Annual Conference, Pittsburgh.
- Grégoire, J. (2021). *WISC-V : Examen clinique de l'intelligence de l'enfant: Fondements et pratiques de l'échelle de Wechsler*. Mardaga.
- Grenier, D., & Tanguay, D. (2008). L'angle dièdre, notion incontournable dans les constructions pratiques et théoriques des polyèdres réguliers. *Petit x*, *78*, 26-52.
- Griva, G., & Raftopoulos, A. (2014). Construction of basic geometrical concepts over spatial information obtained by visual perception. *Mediterranean Journal for Research in Mathematics Education*, *14*(1-2), 255-270.
- Guizzo, F., Moè, A., Cadinua, M., & Bertollia, C. (2019). The role of implicit gender spatial stereotyping in mental rotation performance. *Acta Psychologica*, *194*, 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.01.013>
- Gunderson, E. A., Ramirez, G., Beilock, S. L., & Levine, S. C. (2012). The relation between spatial skill and early number knowledge: The role of the linear number line. *Developmental Psychology*, *48*(5), 1229-1241. <https://doi.org/10.1037/a0027433>
- Gutiérrez, A. (1992). Exploring the Links Between Van Hiele and 3-dimensional Geometry. *Topologie Structurale*, *18*, 31-47.

Gutiérrez, A. (1996). Visualization in 3-dimensional geometry: In search of a framework. Dans L. Puig & A. Gutiérrez (Eds.), *Proceedings of the 20th conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education* (vol. 1, pp. 3-19). Universidad de Valencia.

Guzsvinecz, T., Orbán-Mihálykó, E., Sik-Lányi, C., & Perge, E. (2022). Investigation of spatial ability test completion times in virtual reality using a desktop display and the Gear VR. *Virtual Reality*, 26, 601-614 <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00509-2>

H

Ha, O., & Fang, N. (2017). Interactive Virtual and Physical Manipulatives for Improving Students' Spatial Skills. *Journal of Educational Computing Research*, 55(8), 1088-1110. <https://doi.org/10.1177/0735633117697730>

Haj-Yahya, A. (2021). Can a number of diagrams linked to a proof task in 3D geometry improve proving ability? *Mathematics Education Research Journal*, 35, 215-236. <https://doi.org/10.1007/s13394-021-00385-8>

Hancock, M., Carpendale, S., & Cockburn, A. (2007). Shallow-depth 3D interaction: Design and evaluation of one-, two- and three-touch techniques. Dans *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1147-1156). <https://doi.org/10.1145/1240624.1240798>

Hancock, M., Vernier, F., Wigdor, D., Carpendale, S., & Shen, C. (2006). Rotation and translation mechanisms for tabletop interaction. Dans *Proceedings of IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems* (pp. 79-86). IEEE Computer Society.

Harman, K. L., Humphrey, G. K., & Goodale, M. A. (1999). Active manual control of object views facilitates visual recognition. *Current Biology*, 9, 1315-1318.

Harris, J., Newcombe, N. S., & Hirsh-Pasek, K. (2013). New Twist on Studying the Development of Dynamic Spatial Transformations: Mental Paper Folding in Young Children. *Mind, Brain, and Education*, 7, 49-55. <https://doi.org/10.1111/mbe.12007>

Hart, R. A., & Moore, G. T. (1973). The development of spatial cognition: a review. Dans R. M. Downs & D. Stea (Eds.), *Image and Environment: Cognitive Mapping and Spatial Behavior* (pp. 246-288). Aldine Publishing Company.

Hartman, N. W., Connolly, P. E., Gilger, J. W., Bertoline, G. R., & Heisler, J. (2006). Virtual reality-based spatial skills assessment and its role in computer graphics education. Dans *ACM SIGGRAPH 2006 Educators program* (pp 46-53). <https://doi.org/10.1145/1179295.1179342>

Havé, L., Priot, A., & Taffou, M. (2020). Percevoir l'espace. L'expérience du vécu. *Inflexions*, 43, 159-170. <https://doi.org/10.3917/infle.043.0159>

- Hawes, Z. C. K., Gilligan-Lee, K. A., & Mix, K. S. (2022). Effects of spatial training on mathematics performance: A meta-analysis. *Developmental Psychology, 58*(1), 112-137. <https://doi.org/10.1037/dev0001281>
- Hawes, Z., & Ansari, D. (2020). What explains the relationship between spatial and mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Psychonomic Bulletin & Review, 27*(3), 465-482. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01694-7>
- Hawes, Z., Lefevre, J.-A., Xu, C., & Bruce, C. D. (2015a). Mental Rotation With Tangible Three-Dimensional Objects: A New Measure Sensitive to Developmental Differences in 4- to 8-Year-Old Children. *Mind, Brain, and Education, 9*(1), 10-18. <https://doi.org/10.1111/mbe.12051>
- Hawes, Z., Moss, J., Caswell, B., Naqvi, S., & MacKinnon, S. (2017). Enhancing children's spatial and numerical skills through a dynamic spatial approach to early geometry instruction: Effects of a 32-week intervention. *Cognition and Instruction, 35*(3), 236-264. <https://doi.org/10.1080/07370008.2017.1323902>
- Hawes, Z., Tepylo, D., & Moss, J. (2015b). Developing spatial thinking: implications for early mathematics education. Dans B. Davis (Ed.), *Spatial reasoning in the early years: principles, assertions and speculations* (pp. 29-44). Routledge.
- Hegarty, M. (2018). Ability and sex differences in spatial thinking: What does the mental rotation test really measure? *Psychonomic Bulletin & Review, 25*(3), 1212-1219. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1347-z>
- Hegarty, M., & Kriz, S. (2008). Effects of knowledge and spatial ability on learning from animation. Dans R. Lowe & W. Schnotz (Eds.), *Learning with animation: research implications for design* (pp. 3-29). Cambridge University.
- Hegarty, M., & Waller, D. (2004). A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence, 32*(2), 175-191. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2003.12.001>
- Hegarty, M., & Waller, D. (2005). Individual differences in spatial abilities. Dans P. Shah & A. Miyake (Eds.), *The Cambridge handbook of visuospatial thinking* (pp. 121-169). Cambridge University Press.
- Hegarty, M., Keehner, M., Cohen, C., Montello, R., & Lippa, Y. (2007). The Role of Spatial Cognition in Medicine: Applications for Selecting and Training Professionals. Dans G. Allen (Ed.), *Applied spatial cognition, from research to cognitive technology*. Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781003064350>
- Hegarty, M., Mayer, S., Kriz, S., & Keehner, M. (2005). The role of gestures in mental animation. *Spatial Cognition and Computation, 5*, 333-356. https://doi.org/10.1207/s15427633scc0504_3
- Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T., & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test

- performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34(2), 151-176. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2005.09.005>
- Heppe, H., Kohler, A., Fleddermann, M. T., & Zentgraf, K. (2016). The relationship between expertise in sports, visuospatial and basic cognitive skills. *Frontiers in Psychology*, 7, 904. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2016904>
- Herndon, K., van Dam, A., & Gleicher, M. (1994). The challenges of 3D interaction. *SIGCHI Bulletin*, 26(4), 36-43.
- Hershkowitz, R. (1990). Psychological aspects of learning geometry. Dans P. Nesher & J. Kilpatrick (Eds.), *Mathematics and cognition: A research synthesis by the International Group for the Psychology of Mathematics Education* (pp. 70-95). Cambridge University Press.
- Hertanti, A., Retnawati, H., & Wutsqa, D. U. (2019). The role of spatial experience in mental rotation. *Journal of Physics : Conference Series*, 1320. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1320/1/012043>
- Highfield, K., & Mulligan, J. T. (2007). The role of dynamic interactive technological tools in preschoolers' mathematical patterning. Dans J. Watson & K. Beswick (Eds.), *Proceedings of the 30th annual conference of the Mathematics Education Research Group of Australasia* (Vol. 1, pp. 372-381). MERGA.
- Hodgkiss, A., Gilligan-Lee, K. A., Thomas, M. S. C., Tolmie, A. K., & Farran, E. K. (2021). The developmental trajectories of spatial skills in middle childhood. *British Journal of Developmental Psychology*, 39(4), 566-583. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12380>
- Hoe, Z. Y., Lee, I. J., Chen, C. H., & Chiang, K. P. (2017). Using an augmented reality-based training system to promote spatial visualization ability for the elderly. *Universal Access in the Information Society*, 18, 327-342.
- Höffler T. N. (2010). Spatial ability: its influence on learning with visualizations—a metaanalytic review. *Educational Psychology Review*, 22, 245-269. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9126-7>
- Höffler, T. N., & Leutner, D. (2011). The role of spatial ability in learning from instructional animations—Evidence for an ability-as-compensator hypothesis. *Computers in Human Behavior*, 27, 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.07.042>
- Hollebrands, K., & Okumus, S. (2017). Prospective mathematics teachers' processes for solving optimization problems using cabri 3D. *Digital Experiences in Mathematics Education*, 3(3), 206-232. <https://doi.org/10.1007/s40751-017-0033-0>
- Hostetter, A. B., & Alibali, M. W. (2008). Visible embodiment: Gestures as simulated action. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15, 495-514. <https://doi.org/10.3758/PBR.15.3.495>

- Houdement, C., & Kuzniak, A. (1999). Géométrie et paradigme géométrique. *Petit x*, 51, 5-21.
- Hoyek, N., Collet, C., & Guillot, A. (2010). Représentation mentale et processus moteur : le cas de la rotation mentale. *Science & Motricité*, 71, 29-39. <https://doi.org/10.1051/sm/2009013>
- Hoyek, N., Collet, C., Fargier, P., & Guillot, A. (2012). The use of the Vandenberg and Kuse mental rotation test in children. *Journal of Individual Differences*, 33(1), 62–67. <https://doi.org/10.1027/1614-0001/a000063>
- Hsiao, H-S., Chen, J-C., Lin, C-Y., Zhuo, P-W., & Lin, K-Y. (2019). Using 3D printing technology with experiential learning strategies to improve preengineering students' comprehension of abstract scientific concepts and hands-on ability. *Journal of Computer Assisted Learning*, 35, 178-187.
- Huang, Y., Zhang, X., Tang, J., Xia, Y., Yang, X., Zhang, Y., Wei, C., Ruan, R., Ying, H., & Liu, Y. (2023) Vestibular cognition assessment system: Tablet-based computerized visuospatial abilities test battery. *Frontiers in Psychology*, 14:1095777. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1095777>
- Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(6), 435-448. <https://doi.org/10.1038/nrn1684>
- Hubert, L., & Wainer, H. (2011). *A statistical guide for the ethically perplexed*. Routledge, Tayloris & Francis Group.
- Humphrey, G. K., & Humphrey, D. E. (1989). The role of structure in infant visual pattern perception. *Canadian Journal of Psychology / Revue canadienne de psychologie*, 43(2), 165–182. <https://doi.org/10.1037/h0084218>
- I
- İbili, E., Çat, M., Resnyansky, D., Şahin, S., & Billinghamurst, M. (2019). An assessment of geometry teaching supported with augmented reality teaching materials to enhance students' 3D geometry thinking skills. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 1-23. <https://doi.org/10.1080/0020739x.2019.1583382>
- Irani, F. (2011). Visuospatial ability. Dans J. S. Kreutzer, J. DeLuca & B. Caplan (Eds.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (pp. 2656-2656). Springer.
- Izard, V., Pica, P., Dehaene, S., Hinchey, D., & Spelke, E. G. (2011). Geometry as a Universal Mental Construction. Dans E. Brannon & S. Dehaenen (Eds.), *Space, Time and Number in the Brain: Searching for the Foundations of Mathematical Thought, Attention and Performance* (pp. 319-332). Elsevier Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385948-8.00019-0>

J

- James, K. H., Humphrey, K., & Goodale, M. A. (2001). Manipulating and recognizing virtual objects: Where the action is. *Canadian Journal of Experimental Psychology, 55*, 111-120. <https://doi.org/10.1037/h0087358>
- James, T. W., Humphrey, G. K., Gati, J. S., Servos, P., Menon, R. S., & Goodale, M. A. (2002). Haptic study of three-dimensional objects activates extrastriate visual areas. *Neuropsychologia, 40*(10), 1706-1714. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00017-9)
- Jang, S., Vitale, J.M., Jyung, R. W., & Black, J. B. (2017). Direct Manipulation Is Better than Passive Viewing for Learning Anatomy in a Three-Dimensional Virtual Reality Environment. *Computers & Education, 106*, 150-165. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.12.009>
- Jansen, P., & Kaltner, S. (2014). Object based and egocentric mental rotation performance in older adults : the importance of gender differences and motor ability. *Aging, Neuropsychology and Cognition, 21*, 296-316. <https://doi.org/10.1080/13825585.2013.805725>
- Jansen, P., Schmelter, A., Quaiser-Pohl, C., Neuburger, S., & Heil, M. (2013). Mental rotation performance in primary school age children: Are there gender differences in chronometric tests? *Cognitive Development, 28*, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2012.08.005>
- Jansen-Osmann, P., & Fuchs, P. (2006). Wayfinding behavior and spatial knowledge of adults and children in a virtual environment: The role of landmarks. *Experimental Psychology, 53*(3), 171. <https://doi.org/10.1024/1421-0185.66.1.41>
- Jeannerod, M., & Jacob, P. (2005). Visual cognition: A new look at the two-visual systems model. *Neuropsychologia, 43*(2), 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.11.016>
- Jones, K., & Tzekaki, M. (2016). Research on the teaching and learning of geometry. Dans A. Gutiérrez, G. Leder & P. Boero (Eds.), *The Second Handbook of Research on the Psychology of Mathematics Education: The Journey Continues* (pp. 109-149). Sense. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-6300-561-6_4

K

- Kahane, J.-P. (2002). *L'enseignement des sciences mathématiques*. Odile Jacob.
- Kali, Y., & Orion, N. (1996). Spatial abilities of high-school students in the perception of geologic structures. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching, 33*(4), 369-

391. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199604\)33:4<369::AID-TEA2>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199604)33:4<369::AID-TEA2>3.0.CO;2-Q).
- Kalogirou, P., Elia, I., & Gagatsis, A. (2013). The relationship between visualization, spatial rotation, perceptual and operative apprehension. Dans A. M. Lindmeier & A. Heinze. (Eds.), *Proceedings of the 37th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education* (Vol. 3, pp. 129-136). PME.
- Kaplan, B. J., Wilson, B. N., Dewey, D., & Crawford, S. G. (1998). DCD may not be a discrete disorder. *Human Movement Science*, 17, 471-490. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(98\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(98)00010-4)
- Karsenti, T., Fiévez, A., Roy, N., & Dupuis, A. (2013). *L'iPad à l'école : usages, avantages et défis - Résultats d'une enquête auprès de 6057 élèves et 302 enseignants du Québec (Canada), Rapport préliminaire des principaux résultats*. CRIFPE.
- Katsioloudis, P., & Jovanovic, V. (2014). Spatial Visualization Ability and Impact of Drafting Models: A Quasi Experimental Study. *Engineering Design Graphics Journal*, 78(2), 1-11.
- Katsioloudis, P., Jovanovic, V., & Jones, M. (2014). A Comparative Analysis of Spatial Visualization Ability and Drafting Models for Industrial and Technology Education Students. *Journal of Technology Education*, 26(1), 88-101. <https://doi.org/10.21061/jte.v26i1.a.6>
- Kaufman, S. B. (2007). Sex differences in mental rotation and spatial visualization ability: Can they be accounted for by differences in working memory capacity? *Intelligence*, 35, 211-223. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2006.07.009>
- Kaufmann, R., Maland, J., & Yonas, A. (1981). Sensitivity of 5 and 7 month old infants to pictorial depth information. *Journal of Experimental Child Psychology*, 32, 162-168. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(81\)90100-4](https://doi.org/10.1016/0022-0965(81)90100-4)
- Kaur, N., Pathan, R., Khwaja, U., & Murthy, S. (2018). GeoSolvAR: Augmented Reality Based Solution for Visualizing 3D Solids. Dans *2018 IEEE 18th International Conference on Advanced Learning Technologies* (pp. 372-376). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icalt.2018.00093>
- Keehner, M., Montello, D.R., Hegarty, M., & Cohen, C. (2004). Effects of interactivity and spatial ability on the comprehension of spatial relations in a 3D computer visualization. Dans K. Forbus, D. Gentner & T. Regier (Eds.), *ChairThe 26th annual conference of the cognitive science society* (p. 1576). Lawrence Erlbaum Associates.
- Kellman, P. J., & Arterberry, M. A. (2006). Infant visual perception. Dans D. Kuhn & R. S. Siegler (Eds.), *Handbook of child psychology, Volume 2: Cognition, perception, and language* (6^e ed., pp. 109-160). John Wiley & Sons.

- Khatin-Zadeh, O. (2022). The Role of Executive Functions in Solving Geometry Problems. *Journal of Cognitive Education and Psychology, 21*(2), 125.
<https://doi.org/10.1891/jcep-2021-0002>
- Knill, D. C., & Saunders, J. A. (2003). Do humans optimally integrate stereo and texture information for judgments of surface slant? *Vision Research, 43*(24), 2539-2558.
[https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(03\)00458-9](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(03)00458-9)
- Kondo, Y., Fujita, T., Kunimune, S., Jones, K., & Kumakura, H. (2014). The influence of 3D representations on students' level of 3D geometrical thinking. Dans P. Liljedahl, S. Oesterle, C. Nicol & D. Allan (Eds.), *Proceedings of the 38th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education and the 36th Conference of the North American Chapter of the Psychology of Mathematics Education* (Vol 4, pp.25-32). PME.
- Kosslyn, S. M., Margolis, J. A., Barrett, A. M., Goldknopf, E. J., & Daly, P. F. (1990). Age differences in imagery abilities. *Child Development, 61*(4), 995-1010.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1990.tb02837.x>
- Kovárová, A. & Sokolský, M. (2011). Using Virtual Reality for Teaching Solid Geometry. A Case Study for a Cube Section. Dans *2011 IEEE 14th International Conference on Interactive Collaborative Learning* (pp. 428-433). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICL.2011.6059620>
- Kozhevnikov, M., Hegarty, M., & Mayer, R. (1999). Students' use of imagery in solving qualitative problems in kinematics. (Report No. 143).
<http://eric.ed.gov/?id=ED433239>
- Kozhevnikov, M., Motes, M., & Hegarty, M. (2007). Spatial visualization in physics problem solving. *Cognitive Science, 31*, 549-579.
<https://doi.org/10.1080/15326900701399897>
- Kratz, S., Rohs, M., Guse, D., Müller, J., Bailly, G., & Nischt, M. (2012). PalmSpace. Dans *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces* (pp. 181-188). Association for Computing Machinery.
<https://doi.org/10.1145/2254556.2254590>
- Krylova S. G., & Vodyaha Y. E. (2020). An Experimental Study of Perception by Preschoolers: The Computer Models of Real Objects as ThreeDimensional on the Screens of Touchscreen Devices. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research, 437*, 424-431.
- Krylova S. G., Vodyakha Y. E. (2022). Psychological model of the process of preschool children's perception of virtual objects. *Experimental Psychology, 15*(2), 70-81.
<https://doi.org/10.17759/exppsy.2022150206>
- Kwon, O. N. (2003). Fostering Spatial Visualization Ability through Web-Based Virtual-Reality Program and Paper-Based Program. Dans C. W. Chung, C. K. Kim, W. Kim, T. W. Ling & K.H. Song (Eds.), *Web and Communication Technologies and*

Internet-Related Social Issues (pp. 701-706). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45036-X_78

Kwon, O. N., Kim, S. H., & Kim, Y. (2002). Enhancing spatial visualization through virtual reality (VR) on the web : software design and impact analysis. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 21(1), 17-31.

L

Laborde, C., & Capponi, B. (1994) Cabri-géomètre constituant d'un milieu pour l'apprentissage de la notion de figure géométrique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 14(1), 165-210. <https://revue-rdm.com/1994/cabri-geometre-constituant-d-un/>

Laborde, C. (1990). L'enseignement de la géométrie en tant que terrain d'exploration de phénomènes didactiques. *Recherches en didactique des mathématiques*, 9(3), 337-364.

Laborde, C. (1992, 17-23 août) *Enseigner la géométrie : permanences et révolutions* [Communication]. 7ème congrès international sur l'enseignement des mathématiques, ICME 7, Québec

Lai, C., McMahan, R. P., Kitagawa, M., & Connolly, I. (2016). Geometry Explorer: Facilitating Geometry Education with Virtual Reality. Dans S. Lackey & R. Shumaker (Eds.), *Virtual, Augmented and Mixed Reality* (pp. 102-113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39907-2_67

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1) 159-174. <https://doi.org/10.2307/2529310>

Landy, M. S., Maloney, L. T., Johnston, E. B., & Young, M. (1995). Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion. *Vision Research*, 35(3), 389-412. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)00176-M](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)00176-M)

Larios, V. (2006). La rigidez geométrica y la preferencia de propiedades geométricas en un ambiente de geometría dinámica en el nivel medio. *Revista latinoamericana de investigación en matemática educativa*, 9(3), 361-382.

Le H. K., & Kim, J. E. (2017). An augmented reality application with hand gestures for learning 3D geometry. Dans *2017 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing* (pp. 34-41). <https://doi.org/10.1109/bigcomp.2017.7881712>

Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception: a tutorial. *Attention, Perception and Psychophysics*, 71(7), 1439-1459. <https://doi.org/10.3758/APP.71.7.1439>

Lehmann, J., Quaiser-Pohl, C., & Jansen, P. (2014). Correlation of motor skill, mental rotation, and working memory in 3- to 6-year-old children. *European Journal of Developmental Psychology*, 4, 1-14. <https://doi.org/10.1080/17405629.2014.888995>

- Leighty, K. A., Menzel, C. R., & Frigaszy, D. M. (2008). How young children and chimpanzees (*Pan troglodytes*) perceive objects in a 2D display: Putting an assumption to the test. *Developmental Science*, *11*, 778-792. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00729.x>
- Lejeune, M., & Decker, C. (1994). Capacités de rotation mentale dans un espace bi- et tri-dimensionnel chez des enfants de six à dix ans. *L'année psychologique*, *94*(1), 45-62. <https://doi.org/10.3406/psy.1994.28733>
- Leopold, C. (2005). Geometry Education for Developing Visualization Abilities of Engineering Students. *The Journal of Polish Society for Geometry and Engineering Graphics*, *15*, 39-45.
- Levine, S. C., Huttenlocher, J., Taylor, A., & Langrock, A. (1999). Early sex differences in spatial skill. *Developmental Psychology*, *35*, 940-949. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.35.4.940>
- Levine, S.C., Ratliff, K.R., Huttenlocher, J., & Cannon, J. (2012). Early puzzle play : a predictor of preschoolers' spatial transformation skill. *Developmental Psychology*, *48*(2), 530-542. <http://dx.doi.org/10.1037/a0025913>
- Linn, M. C., & Peterson, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: a metaanalysis. *Child Development*, *56*, 1479-1498. <https://doi.org/10.2307/1130467>
- Liu, E., Li, Y., Cai, S., & Li, X. (2018). The effect of augmented reality in solid geometry class on students' learning performance and attitudes. Dans M. Auer & R. Langmann (Eds.), *Smart Industry & Smart Education. LNCS* (vol. 47, pp. 549-558). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95678-7_61
- Liu, Y. (2023) Vestibular cognition assessment system: Tablet-based computerized visuospatial abilities test battery. *Frontiers in Psychology*, *14*:1095777. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1095777>
- Loranger, M., Pepin, M., Cote, M., Boisvert, J.-M., & Blais, M. (2000). Performance Differences Between Adolescent Boys and Girls Assigned Four Visual-spatial Skills Tasks. *Canadian Psychology*, *41*(1), 61-68. <https://doi.org/10.1037/h0086857>
- Lorant-Royer, S., Munch, C., Mesclé, H., & Lieury, A. (2010). Kawashima vs “Super Mario”! Should a game be serious in order to stimulate cognitive aptitudes? *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, *60*(4), 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2010.06.002>
- Lourenco, S. F., Cheung, C. N., & Aulet, L. S. (2018). Is visuospatial reasoning related to early mathematical development? A critical review. Dans A. Henik & W. Fias (Eds.), *Heterogeneity of function in numerical cognition* (pp. 177-210). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811529-9.00010-8>

- Lowe, R. (2008). Learning with animation: Where to look, when to look. Dans R. Lowe & W. Schnotz (Eds.), *Learning with animation: research implications for design* (pp. 49-70). Cambridge University.
- Lowrie, T. (2002). The influence of visual and spatial reasoning in interpreting simulated 3D worlds. *International Journal of Computers in Mathematical Learning*, 7(3), 301-318.
- Lowrie, T. (2012). Visual and spatial reasoning: the changing form of mathematics representation and communication. Dans B. Kaur & T. L. Toh (Eds.), *Reasoning, communication and connections in mathematics: Yearbook 2012, Association of Mathematics Educators* (pp. 149-168). WorldScientific.
- Lowrie, T., Logan, T., & Hegarty, M. (2019). The influence of spatial visualization training on students' spatial reasoning and mathematics performance. *Journal of Cognition and Development*, 20(5), 729-751.
<https://doi.org/10.1080/15248372.2019.1653298>
- Lowrie, T., Logan, T., Harris, D., & Hegarty, M. (2018). The impact of an intervention program on students' spatial reasoning: Student engagement through mathematics-enhanced learning activities. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 3(50), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0147-y>
- Lowrie, T., Logan, T., & Ramful, A. (2017). Visuospatial training improves elementary students' mathematics performance. *British Journal of Educational Psychology*, 87(2), 170-186. <https://doi.org/10.1111/bjep.12142>
- Lu, F., Nanjappan, V., Parsons, P., Yu, L., & Liang, H.-N. (2023). Effect of display platforms on spatial knowledge acquisition and engagement: an evaluation with 3D geometry visualizations. *Journal of Visualization*, 26, 667-686.
<https://doi.org/10.1007/s12650-022-00889-w>
- Lubin, A., Lanoë, C., Pineau, A., & Rossi, S. (2012). Apprendre à inhiber : une pédagogie innovante au service des apprentissages scolaires fondamentaux (mathématiques et orthographe) chez des élèves de 6 à 11 ans. *Neuroéducation*, 1(1), 55-84. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.55>

M

- Malanchini, M., Rimfeld, K., Shakeshaft, N. G., Rodic, M., Schofield, K., Selzam, S., Dale, P. S., Petrill, S. A., & Kovas, Y. (2017). The genetic and environmental aetiology of spatial, mathematics, and general anxiety. *Scientific Reports*, 7, 42218. <https://doi.org/10.1038/srep42218>
- Mammarella, I.C., Giofrè, D., Ferrara, R., & Cornoldi, C. (2013). Intuitive geometry and visuospatial working memory in children showing symptoms of nonverbal learning disabilities. *Child Neuropsychology*, 19, 235-249
<https://doi.org/10.1080/09297049.2011.640931>

- Mangiante-Orsola, C., & Perrin-Glorian, M.-J. (2014). Géométrie en primaire : des repères pour une progression et pour la formation des maîtres. *Grand N*, 94, 47-83.
- Marchand, P. (2006). Comment développer des images mentales liées à l'apprentissage de l'espace en trois dimensions ? *Annales de didactique des mathématiques et des sciences cognitives*, 11, 103-121.
- Marchand, P. (2009). Le développement du sens spatial au primaire. *Bulletin AMQ*, 49(3), 63-79.
- Marchand, P. (2020). Quelques assises pour valoriser le développement des connaissances spatiales à l'école primaire. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 40(2), 135-178.
- Markopoulos, C., Potari, D., Boyd, W., Petta, K., & Chaseling, M. (2015). The Development of Primary School Students' 3D Geometrical Thinking within a Dynamic Transformation Context. *Creative Education*, 6, 1508- 1522. <http://dx.doi.org/10.4236/ce.2015.614151>
- Marley, S. C., & Carbonneau, K. J. (2015). How Psychological Research With Instructional Manipulatives Can Inform Classroom Learning. *Scholarship of Teaching and Learning in Psychology*, 1(4), 412-424. <http://dx.doi.org/10.1037/stl0000047>
- Marmor, G. S. (1975) Development of kinetic images: When does the child first represent movement in mental images? *Cognitive Psychology*, 7, 548-559. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(75\)90022-5](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90022-5)
- Marmor, G. S. (1977). Mental rotation and number conservation: Are they related? *Developmental Psychology*, 13(4), 320-325. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.13.4.320>
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. W.H. Freeman and Co.
- Martín-Dorta, N., Saorín, J. L., & Contero, M. (2008). Development of a fast remedial course to improve the spatial abilities of engineering students. *Journal of Engineering Education*, 97(4), 505-513. <http://dx.doi.org/10.1002/j.2168-9830.2008.tb00996.x>
- Martin-Dorta, N., Saorin, J. L., & Contero, M. (2011). Web-based spatial training using handheld touch screen devices. *Educational Technology & Society*, 14(3), 163-177.
- Mathé, A.-C., Barrier, T., & Perrin-Glorian, M.-J. (2020). *Enseigner la géométrie élémentaire. Enjeux, ruptures et continuités*. L'Harmattan.
- McGee, M. G. (1979). Human spatial abilities: Psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences. *Psychological Bulletin*, 86(5), 889-918. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.86.5.889>

- McWilliams, W., Hamilton, C. J., & Muncer, S. J. (1997). On mental rotation in three dimensions. *Perceptual and Motor Skills*, *85*, 297-298. <https://doi.org/10.2466/pms.1997.85.1.297>
- Meijer, F., & van den Broek, E. (2010). Representing 3D virtual objects: Interaction between visuo-spatial ability and type of exploration. *Vision Research*, *50*, 630-635. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.01.016>
- Merchant, Z., Goetz, E. T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, W., & Davis, T. J. (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis. *Computers & Education*, *70*, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.033>
- Mesquita, A. L. (1998). On conceptual obstacles linked with external representation in geometry. *Journal of Mathematical Behavior*, *17*(2), 183-195. [https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(99\)80058-5](https://doi.org/10.1016/S0364-0213(99)80058-5)
- Ministère de la Communauté Française (1999a). Socles de compétences. Enseignement fondamental et premier degré de l'enseignement secondaire. Enseignement de la communauté française, Administration Générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, Service général des Affaires pédagogiques, de la Recherche en Pédagogie et du Pilotage de l'Enseignement organisé par la communauté française.
- Mithalal, J. (2010). *Déconstruction instrumentale et déconstruction dimensionnelle dans le contexte de la géométrie dynamique tridimensionnelle* [Thèse de doctorat, Université de Grenoble]. HAL. <https://theses.hal.science/tel-00590941>
- Mithalal, J. (2014). Voir dans l'espace : est-ce si simple ? *Petit x*, *96*, 51-73.
- Mix, K. S., Levine, S. C., Cheng, Y. L., Stockton, J. D. S., & Bower, C. (2020). Effects of spatial training on mathematics in first and sixth grade children. *Journal of Educational Psychology*, *113*(2), 304-314 <https://doi.org/10.1037/edu0000494>
- Mix, K. S., Levine, S. C., Cheng, Y. L., Young, C., & Hambrick, D. Z. (2016). Separate but correlated: The latent structure of space and mathematics across development. *Journal of Experimental Psychology: General*, *145*(9), 1206-1227. <https://doi.org/10.1037/xge0000182>.
- Mix, K. S., & Cheng, Y. L. (2012). The relation between space and math : developmental and educational implications. *Advances in Child Development and Behavior*, *42*, 197-243. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394388-0.00006-X>
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(1), 8-14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>

- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, *41*, 49-100.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Rettinger, D. A., Shah, P., & Hegarty, M. (2001). How are visuospatial working memory, executive functioning, and spatial abilities related? A latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*(4), 621-640. <http://doi.org/10.1037/0096-3445.130.4.621>
- Mjenda, M., Mutarutinya, V., & Owiti, D. (2023). Assessing the Effectiveness of Computer-Aided Instructional Techniques in Enhancing Students’ 3D Geometry Spatial Visualization Skills Among Secondary School Students in Tanzania. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, *22*(6), 613-637. <https://doi.org/10.26803/ijlter.22.6.31>
- Moè, A. (2009). Are males always better than females in mental rotation? Exploring a gender belief explanation. *Learning and Individual Differences*, *19*(1), 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2008.02.002>
- Moè, A. (2016a). Does experience with spatial school subjects favour girls’ mental rotation performance? *Learning and Individual Differences*, *47*, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2015.12.007>
- Moè, A. (2016b). Teaching motivation and strategies to improve mental rotation abilities. *Intelligence*, *59*, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2016.10.004>
- Mohler, J.L. (2008a). Examining the Spatial Ability Phenomenon from the Student’s Perspective. *Engineering Design Graphics Journal*, *72*(3), 1-15.
- Mohler, J.L. (2008b). A review of spatial ability research. *Engineering Design Graphics Journal*, *72*(3), 19-30.
- Molina-Carmona, R., Pertegal-Felices, M. L., Jimeno-Morenilla, A., & MoraMora, H. (2018) Virtual reality learning activities for multimedia students to enhance spatial ability. *Sustain*, *10*, 1074-1086. <https://doi.org/10.3390/su10041074>
- Montello, D. R. (2001). Spatial Cognition. Dans N. J. Smelser & P. B. Baltes (Eds.), *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences* (pp. 14771-14775). Elsevier
- Montello, D. R., & Raubal, M. (2012). Functions and applications of spatial cognition. Dans D. Waller & L. Nadel (Eds.), *The APA handbook of spatial cognition* (pp. 249-264). American Psychological Association.
- Moreau, D. (2012). The role of motor processes in three-dimensional mental rotation: shaping cognitive processing via sensorimotor experience. *Learning and Individual Differences*, *22*, 354-359. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.02.003>.
- Moreau, D., Mansy-Dannay, A., Clerc, J., & Guerrien, A. (2011). Spatial ability and motor performance: assessing mental rotation processes in elite and novice athletes. *International Journal of Sport Psychology*, *42*, 525-547.

- Moustaki, F., & Kynigos, C. (2011). Engineering students' visualization and reasoning processes while interacting with a 3-D digital environment. Dans B. Ubuz (Ed.), *Proceedings of the 35th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education* (Vol. 3, pp.257-264). PME.
- Moyer, P., Bolyard, J., & Spikell, M. (2001). Virtual manipulatives in the K-12 Classroom. Dans A. Rogerson (Ed.), *Proceedings of the International Conference on New Ideas in Mathematics Education* (pp. 184-187). Autograph.
- Moyer, P. S., Bolyard, J. J., & Spikell, M. A. (2002). What are virtual manipulatives? *Teaching Children Mathematics*, 8(6), 372-377.
- Moyer, P. S., Salkind, G., & Bolyard, J. J. (2008). Virtual Manipulatives Used By K-8 Teachers for Mathematics Instruction: Considering Mathematical, Cognitive, and Pedagogical Fidelity. *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, 8(3), 202-218.
- Moyer-Packenham, P. S., & Bolyard, J. J. (2016). Revisiting the definition of a virtual manipulative. Dans P. S. Moyer-Packenham (Ed.), *International perspectives on teaching and learning mathematics with virtual manipulatives. Mathematics education in the digital era* (Vol 7, pp. 3-25). Springer.
- Mulligan, J., Woolcott, G., Mitchelmore, M., & Davis, B. (2018). Connecting mathematics learning through spatial reasoning. *Mathematics Education Research Journal*, 30(1), 77-87. <https://doi.org/10.1007/s13394-017-0210-x>
- Muntazhimah, & Miatun, A. (2018). Cabri 3D - assisted collaborative learning to enhance junior high school students' spatial ability. *Journal of Physics: Conference series*, 948(1), 1-6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/948/1/012042>

N

- Nagy-Kondor, R. (2010). Spatial Ability, Descriptive Geometry and Dynamic Geometry Systems. *Annales Mathematicae et Informaticae*, 37, 199-210.
- Nagy-Kondor, R. (2014). Importance of Spatial Visualization Skills in Hungary and Turkey: Comparative Studies. *Annales Mathematicae et Informaticae*, 43, 171-181.
- Nagy-Kondor, R. (2017). Spatial Ability: Measurement and Development. Dans M. S. Khine (Ed.), *Visual-spatial Ability in STEM Education* (pp. 35-58). Springer.
- National Council of Teachers of Mathematics. (2000). *Principles and Standard for School Mathematics*. NCTM.
- National Council of Teachers of Mathematics. (2006). *Curriculum Focal Points for Prekindergarten through Grade 8 Mathematics*. NCTM.

- Németh, B., Sörös, C., & Hoffmann, M. (2007). Typical mistakes in Mental Cutting Test and their consequences in gender differences. *Teaching Mathematics and Computer Science*, 5, 385–392. <https://doi.org/10.5485/TMCS.2007.0169>
- Neubauer, A. C., Bergner, S., & Schatz, M. (2010). Two-vs. three-dimensional presentation of mental rotation tasks: sex differences and effects of training on performance and brain activation. *Intelligence*, 38, 529-539. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2010.06.001>
- Newcombe, N. S., & Shipley, T. F. (2015). Thinking About Spatial Thinking: New Typology, New Assessments. Dans J. Gero (Ed.), *Studying Visual and Spatial Reasoning for Design Creativity* (pp. 179-192). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9297-4_10
- Newcombe, N. S., & Stieff, M. (2012). Six myths about spatial thinking. *International Journal of Science Education*, 34(6), 955-971. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.588728>
- Nguyen, N., Nelson, A. J., & Wilson, T. D. (2012). Computer visualizations: Factors that influence spatial anatomy comprehension. *Anatomical Sciences Education*, 5, 98-108. <https://doi.org/10.1002/ase.1258>
- Nielsen, J. (1994). *Usability engineering*. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Nolte, N., Fleischer, J., Spoden, C., & Leutner, D. (2024). Cross-disciplinary impact of spatial visualization ability on study success in higher education. *Journal of Educational Psychology*. Advance online publication. <https://dx.doi.org/10.1037/edu0000847>
- Nurjanah, Latif, B., Yuliardi, R., & Tamur, M. (2020). Computer-assisted learning using the Cabri 3D for improving spatial ability and self- regulated learning. *Heliyon*, 6(11), e05536. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05536>
- Nys, M. (2015). *Développement des représentations spatiales d'itinéraires virtuels : composantes cognitives et langagières* [Thèse de doctorat, Université Paris Descartes - Paris Sorbonne]. HAL. https://theses.hal.science/tel-01410035/file/va_Nys_Marion.pdf

O

- O'Meara, N., Johnson, P., & Leavy, A. (2019). A comparative study investigating the use of manipulatives at the transition from primary to post-primary education. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 1-23. <https://doi.org/10.1080/0020739x.2019.1634842>
- O'Regan, J. K. & Noe, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 939-1011. <https://doi.org/10.1017/s0140525x01000115>

- Okamoto, Y. (2014). How is spatial reasoning related to mathematical thinking and how important is early exposure to spatial activities? Dans N. Sinclair & C.D. Bruce (Eds.), *Research forum: spatial reasoning for young learners* (pp. 4-7). PME.
- Olkun, S. (2003) Comparing computer versus concrete manipulatives in learning 2D geometry. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 22(1), 43-56. <https://doi.org/10.1501/0000984>
- Osta, I. (1987). Analyse d'une séquence didactique. Représentations graphiques à l'aide d'un ordinateur comme médiateur dans l'apprentissage de notions de géométrie de l'espace. Dans G. Vergnaud, G. Brousseau & M. Hulin (Eds.), *Didactique et acquisition des connaissances scientifiques* (pp. 165-184). La pensée sauvage editions.
- Ouramdane, N., Otmane, S., & Mallem, M. (2009). Interaction 3D en Réalité Virtuelle - Etat de l'art. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série TSI : Technique et Science Informatiques*, 28(8), 1017-1049. <https://doi.org/10.3166/tsi.28.1017-1049>
- Owens, K. (2020). Transforming the established perceptions of visuospatial reasoning: integrating an ecocultural perspective. *Mathematics Education Research Journal*, 32, 257-283. <https://doi.org/10.1007/s13394-020-00332-z>

P

- Pacurar, E., Magot, C.-A., Cabassut, R., & Solon, Y. (2020). Virtual manipulatives in inquiry-based approach of 3d problems by french 5th graders. *Teaching mathematics and computer sciences*, 18(4), 229-240. <https://doi.org/10.5485/TMCS.2020.0507>
- Pani, J. R., Zhou, H., & Friend, S. M. (1997). Perceiving and imagining Plato's solids: The generalized cylinder in spatial organization of 3D structures. *Visual Cognition*, 4(3), 225-264.
- Papadaki, C. (2015). Working with visually impaired students: strategies developed in the transition from 2D geometrical objects to 3D geometrical objects. Dans K. Krainer & N. Vondrová (Eds.), *Proceedings of the Ninth Congress of the European Society for Research in Mathematics Education* (pp. 564-570). Charles University in Prague, Faculty of Education and ERME
- Park, H., Faghihi, N., Dixit, M., Vaid, J., & McNamara, A. (2021). Judgments of Object Size and Distance across Different Virtual Reality Environments: A Preliminary Study. *Applied Sciences*, 11(23), 1-15. <https://doi.org/10.3390/app112311510>
- Parsey, C. M., & Schmitter-Edgecombe, M. (2013). Applications of Technology in Neuropsychological Assessment. *The Clinical Neuropsychologist*, 27(8), 1328-1361. <https://doi.org/10.1080/13854046.2013.834971>

- Parsons, T. D., Larson, P., Kratz, K., Thiebaut, M., Bluestein, B., Buckwalter, J. G., & Rizzo, A. (2004). Sex differences in mental rotation and spatial rotation in a virtual environment. *Neuropsychologia*, 42(4), 555-562. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.08.014>.
- Parzys B. (1989). *Représentations planes et enseignement de la géométrie de l'espace au lycée* [Thèse de doctorat, Université Paris 7]. HAL. <https://theses.hal.science/tel-01251157>
- Parzys, B. (1988). "Knowing" vs "seeing". Problems of the plane representation of space geometry figures. *Educational Studies in Mathematics*, 19(1), 79-92. <https://doi.org/10.1007/BF00428386>
- Parzys, B. (1991). Representation of space and students conceptions at High School level. *Education Studies in Mathematics*, 22, 575-593. <https://doi.org/10.1007/BF00312716>
- Parzys, B. (2006). La géométrie dans l'enseignement secondaire et en formation. *Quaderni di Ricerca in Didattica*, 17, 121-144.
- Pasqualotti, A., & Freitas, C. M. D. S. (2002). MAT3D: A virtual reality modelling language environment for the teaching and learning of mathematics. *CyberPsychology & Behavior*, 5(5), 409-422. <https://doi.org/10.1089/109493102761022832>
- Pathak, A., Chang, J.S.K., Resch, G., Doucette, A., Yeboah, G., Welsh, T.N., Nitsche, M., & Mazalek, A. (2020). Thinking Through the Box: Evaluating a 3D Game to Engage Penetrative Thinking. *Frontiers in Virtual Reality*, 1:569674. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.569674>
- Pegg, J. (1997). Broadening the Descriptors of van Hiele's Levels 2 and 3. Dans *Proceedings of the 20th Annual Meeting of the Mathematics Education Research Group of Australasia* (pp. 391-396). MERGA.
- Peng, P., Namkung, J., Barnes, M., & Sun, C. (2016). A meta-analysis of mathematics and working memory: Moderating effects of working memory domain, type of mathematics skill, and sample characteristics. *Journal of Educational Psychology*, 108, 455-473. <https://doi.org/10.1037/edu0000079>
- Perichon, N., & Duroisin, N. (2024). Potentiels et défis liés à l'évaluation neuropsychologique des compétences visuo-spatiales par les outils d'évaluation numériques. Dans N. Loye & N. Duroisin (Eds.), *Évaluation des apprentissages et technologies numériques : évolution, nouveautés et défis actuels* (pp. 291-326). Peter Lang.
- Perrin-Glorian, M.-J., & Godin, M. (2018). *Géométrie plane : pour une approche cohérente du début de l'école à la fin du collège*. <https://hal.science/hal-01660837v2>

- Perrin-Glorian, M.-J., Mathé, A.-C., & Leclercq, R. (2013). Comment peut-on penser la continuité de l'enseignement de la géométrie de 6 à 15 ans ? Le jeu sur les supports et les instruments. *Repères IREM*, 90, 5-41.
- Petersson, H., Sinkvist, D., Wang, C., & Smedby, O. (2009). Web-based interactive 3D visualization as a tool for improved anatomy learning. *Anatomical Sciences Education*, 2(2), 61-68.
- Petit, M. (2013). Comparing Concrete to Virtual Manipulatives in Mathematics Education. *ScienceLib*, 5.
- Piaget, J. (1937). *La construction du réel chez l'enfant*. Delachaux et Niestlé.
- Piaget, J. (1972). *La transmission des mouvements*. Presses Universitaires de France.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1948). *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Presses Universitaires de France.
- Piaget, J., Inhelder, B., & Szeminska, A. (1948). *La géométrie spontanée de l'enfant*. Presses Universitaires de France.
- Pillay, H. (1998). Cognitive processes and strategies employed by children to learn spatial representations. *Learning and Instruction*, 8(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(97\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(97)00030-3)
- Pinet, L., & Gentaz, E. (2008). Évaluation d'entraînements multisensoriels de préparation à la reconnaissance de figures géométriques planes chez les enfants de cinq ans : étude de la contribution du système haptique manuel. *Revue française de pédagogie*, 162, 29-44.
- Pittalis, M., & Christou, C. (2010). Types of reasoning in 3D geometry thinking and their relation with spatial ability. *Educational Studies in Mathematics*, 75(2), 191-212. <https://doi.org/10.1007/s10649-010-9251-8>
- Pittalis, M., & Christou, C. (2013). Coding and decoding representations of 3D shapes. *The Journal of Mathematical Behavior*, 32(3), 673-689. <https://doi.org/10.1016/j.jmathb.2013.08.004>
- Pitta-Pantazi, D., & Christou, C. (2009). Cognitive styles, dynamic geometry and measurement performance. *Educational Studies in Mathematics*, 70(1), 5-26. <https://doi.org/10.1007/s10649-008-9139-z>
- Pitta-Pantazi, D., & Christou, C. (2010). Spatial versus object visualisation: The case of mathematical understanding in three-dimensional arrays of cubes and nets. *International Journal of Educational Research*, 49(2-3), 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2010.10.001>
- Pizlo, Z. (2008). 3D Shape. Its unique place in visual perception. *The MIT Press*.
- Pizlo, Z., Sawada, S., Li, Y., Kropatsch, W., & Steinma, R. (2010). New approach to the perception of 3D shape based on veridicality, complexity, symmetry and volume. *Vision Research*, 50(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.09.024>

- Postma, A. (2017). A Sense of Space. Dans A. Postma & I. J. M. van der Ham (Eds.), *Neuropsychology of Space : Spatial functions of the human brain* (pp. 1-34). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801638-1.00001-X>
- Potvin, B., Swindells, C., Tory, M., & Storey, M.-A. (2012). *Comparing Horizontal and Vertical Surfaces for a Collaborative Design Task. Advances in Human-Computer Interaction, 1-10.* <https://doi.org/10.1155/2012/137686>
- Putri, A. H. (2017). Pengaruh Kemampuan Spasial Terhadap Kemampuan Geometri Pada Peserta Didik Kelas VII SMP Swasta Di Kecamatan Kebomas Gresik. *Jurnal Pemikiran Pendidikan, 23*(2), 114-121.

Q

- Quintero, E., Salinas, P., Gonzalez-Mendivil, E., & Ramírez, H. (2015). Augmented reality app for calculus: A proposal for the development of spatial visualization. *Procedia Computer Sciences, 75*, 301-305. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.251>

R

- Rahe, M., & Quaiser-Pohl, C. (2023). Protective effects of education on the cognitive decline in a mental rotation task using real models: a pilot study with middle and older aged adults. *Psychological Research, 87*, 1284-1292 <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01719-2>
- Ramful, A., Lowrie, T., & Logan, T. (2017). Measurement of spatial ability: construction and validation of the spatial reasoning instrument for middleschool students. *Journal of Psychoeducational Assessment, 35*(7), 709-727. <https://doi.org/10.1177/0734282916659207>
- Ramirez, G., Gunderson, E.A., Levine, S.C., & Beilock, S.L. (2012). Spatial anxiety relates to spatial abilities as a function of working memory in children. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 65*, 474-487. <https://doi.org/10.1080/17470218.2011.61621>
- Ratliff, K. R., McGinnis, C. R., & Levine, S. C. (2010). The development and assessment of cross-sectioning ability in young children. Dans S. Ohlsson & R. Camtrabone (Eds.), *Proceedings of the Thirty-second Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 2816-2821). Cognitive Science Society.
- Ray-Kaesler, S., Thommen, E., Martini, R., Jover, M., Gurtner, B., & Bertrand, A.M. (2019). Psychometric assessment of the French European Developmental Coordination Disorder Questionnaire (DCDQ-FE). *PLoS One, 14*(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217280>
- Resnick, I., Newcombe, N. S., & Jordan, N. C. (2019). The relation between spatial reasoning and mathematics achievement in children with mathematics learning

- difficulties. Dans P. Rasanen (Ed.), *International handbook of mathematical learning difficulties* (pp. 423-436). Springer.
- Richardson, A. E., Montello, D. R., & Hegarty, M. (1999). Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments. *Memory & Cognition*, *27*(4), 741-750.
- Riddoch, M. J., & Humphreys, G. W. (1993). Birmingham Object Recognition Battery (BORB). LEA.
- Robert, M., & Chevrier, E. (2003) Does men's advantage in mental rotation persist when real three-dimensional objects are either felt or seen? *Memory & Cognition*, *31*, 1136-1145.
- Rodán, A., Gimeno, P., Elosúa, R., Montoro, P., & Contrer, M. J. (2019). Boys and girls gain in spatial, but not in mathematical ability after mental rotation training in primary education. *Learning and Individual Differences*, *70*, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2019.01.001>
- Rodán, A., Contreras, M. J., Elosúa, R., & Gimeno, P. (2016). Experimental But Not Sex Differences of a Mental Rotation Training Program on Adolescents. *Frontiers in Psychology*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01050>.
- Rodrigues, J., Sauzéon, H., Wallet, G., & N'Kaoua, B. (2010). Transfer of spatial knowledge from virtual to real environment: effect of active/passive learning depending on a test-retest procedure and the type of retrieval tests. *Journal of Cybertherapy and Rehabilitation*, *3*, 275-283.
- Rodríguez, J. L., Romero, I., & Codina, A. (2021). The Influence of NeoTrie VR's Immersive Virtual Reality on the Teaching and Learning of Geometry. *Mathematics*, *9*, 2411. <https://doi.org/10.3390/math9192411>
- Rohendi, D., & Wihardi, Y. (2020). Learning Three-Dimensional Shapes in Geometry Using Mobile-Based Augmented Reality. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, *14*(09), 48. <https://doi.org/10.3991/ijim.v14i09.13035>
- Rose, D., & Foreman, N. (1999). Virtual reality. *Psychologisât*, *12*(11), 550-554.
- Rossano, V., Lanzilotti, R., Cazzolla, A., & Roselli, T. (2020). Augmented Reality to Support Geometry Learning. *IEEE Access*, *8*, 107772–107780.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000990>
- Rossielle, L. J., & Cooper, E. E. (2001). Categorical perception of relative orientation in visual object recognition. *Memory & Cognition*, *29*(1), 68-82.
- Royal Society and Joint Mathematical Council (2001). *Teaching and Learning Geometry 11-19*.
https://royalsociety.org/~media/royal_society_content/policy/publications/2001/9992.pdf

- Royer, F. (1981). Detection of symmetry. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 1186-1210. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.7.6.1186>
- Rozenwajn, E., & Dumay, X. (2014). Les effets de l'évaluation externe sur les pratiques enseignantes : une revue de la littérature. *Revue française de pédagogie*, 189, 105-138. <https://doi.org/10.4000/rfp.4636>
- Ruthsatz, V., Neuburger, S., Rahe, M., Jansen, P., & Quaiser-Pohl, C. (2017). The gender effect in 3D-Mental-rotation performance with familiar and gender-stereotyped objects – a study with elementary school children. *Journal of Cognitive Psychology*, 29(6), 717–730. <https://doi.org/10.1080/20445911.2017.1312689>

S

- Salin, M.H. (2014) Quelques remarques autour des finalités de l'enseignement de la géométrie à l'école primaire. Dans *Enseignement de la Géométrie à l'École. Enseignement de la Géométrie à l'École. Enjeux et perspectives. Actes du 40ème colloque COPIRELEM* (pp. 32-43).
- Salin, M-H. (2008). Enseignement et apprentissage de la géométrie à l'école primaire et au début de collège : le facteur temps. *Bulletin de l'APMEP*, 478, 647-671.
- Samsudin, K., Rafi, A., & Hanif, A. S. (2011). Training in mental rotation and spatial visualization and its impact on orthographic drawing performance. *Educational Technology & Society*, 14(1), 179-186. <https://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.14.1.179>
- Sanandaji, A., Grimm, C., & West, R. (2017). Inferring cross-sections of 3D objects: a 3D spatial ability test instrument for 3D volume segmentation. Dans *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception* (pp.1-4). <https://doi.org/10.1145/3119881.3119888>
- Saralar-Aras, I., & Ainsworth, S. (2020, 13-17 juillet). *A categorisation of middle school students' errors in representing three-dimensional shapes* [Communication]. EARLI JURE 2020 Conference: Generation Change: The Future of Education in a Diverse Society.
- Sarama, J., & Clements, D. H. (2009). *Early childhood mathematics education research: learning trajectories for young children*. Routledge.
- Sarfaty, Y., & Patkin, D. (2013). The ability of second graders to identify solids in different positions and to justify their answer. *Pythagoras*, 34(1), 1-10. <https://doi.org/10.4102/pythagoras.v34i1.212>
- Schnotz, W., & Lowe, R. (2008). A unified view of learning from Animated and Static Graphics. Dans R. Lowe & W. Schnotz (Eds.), *Learning with animation: research implications for design* (pp. 304-356). Cambridge University.

- Schwartz, R. (2004). *Perception*. Blackwell Publishing (Blackwell Readings in Philosophy).
- Scionti, N., Cavallero, M., Zogmaister, C., & Marzocchi, G. M. (2020). Is Cognitive Training Effective for Improving Executive Functions in Preschoolers? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Psychology, 10*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2019.02812>
- Seha, M., & Duroisin, N. (2021, 12-14 octobre). *Comment la géométrie est-elle enseignée en primaire ? Étude comparative entre des enseignants belges et français* [Communication]. Colloque L'école primaire au 21e siècle, Cergy.
- Seha, M., Beuset, R., & Duroisin, N. (2023). Une géométrie qui fait sens. *Cahiers Pédagogiques, 586*, 31-32.
- Shah, P., & Miyake, A. (1996). The separability of working memory resources for spatial thinking and language processing: An individual differences approach. *Journal of Experimental Psychology: General, 125*, 4-27. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.125.1.4>
- Shepard, R. N., & Feng, C. (1972). A chronometric study of mental paper folding. *Cognitive Psychology, 3*, 228-243.
- Shepard, R.N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three dimensional objects. *Science, 171*, 701 –703.
- Simms, V., Clayton, S., Cragg, L., Gilmore, C., & Johnson, S. (2016). Explaining the relationship between number line estimation and mathematical achievement: The role of visuomotor integration and visuospatial skills. *Journal of Experimental Child Psychology, 145*, 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.12.004>
- Simons, D. J. (1996). In Sight, Out of Mind: When Object Representations Fail. *Psychological Science, 7*(5), 301-305. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1996.tb00378.x>
- Sims, V. K., & Mayer, R. E. (2002). Domain specificity of spatial expertise: The case of video game players. *Applied Cognitive Psychology, 16*, 97-115. <https://doi.org/10.1002/acp.759>
- Sinclair, N., & Bruce, C. D. (2014). Research forum: spatial reasoning for young learners. Dans P. Liljedahl, C. Nicol, S. Oesterle & D. Allan (Eds.), *Proceedings of the joint meeting of PME 38 and PME-NA*, 36 (Vol. 1, pp. 173-203). PME.
- Sinclair, N., & Bruce, C. D. (2015). New opportunities in geometry education at the primary school. *ZDM Mathematics Education, 47*(3), 319-329. <https://doi.org/10.1007/s11858-015-0693-4>
- Smallmann, H. S., St. John, M., Oonk, H. M., & Cowen, M. B. (2001). Information availability in 2D and 3D displays. *IEEE Computer Graphics and Applications, 21*, 51–57. <https://doi.org/10.1109/38.946631>

- Sophocleous, P., & Pitta-Pantazi, D. (2011). Creativity in three-dimensional geometry: How an interactive 3D-geometry software environment enhance it? Dans M. Pytlak, T. Rowland & E. Swoboda (Eds.), *Proceedings of Seventh Conference of the European Research in Mathematics Education* (pp. 1143-1153). University of Rzeszów.
- Somers, M., Shields, L. S., Boks, M. P., Kahn, R. S., & Sommer, I. E. (2015). Cognitive benefits of right-handedness: A meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *51*, 48-63. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.01.003>
- Sorby, A. S. (1999). Developing 3-D Spatial Visualization Skills. *Engineering Design Graphics Journal*, *63*(2), 21-32.
- Soury-Lavergne, S. (2020). *La géométrie dynamique pour l'apprentissage et l'enseignement des mathématiques*. Cnesco.
- Soury-Lavergne, S., & Maschietto, M. (2015). Articulation of spatial and geometrical knowledge in problem solving with technology at primary school. *ZDM The International Journal on Mathematics Education*, *47*(3), 435-449. <https://doi.org/10.1007/s11858015-0694-3>
- St-Jean, C., April, J., Bigras, N., Maïano, C., & Dupuis-Brouillette, M. (2022). Développement du raisonnement spatial d'enfants à la maternelle quatre ans temps plein au Québec. *Formation et profession*, *30*(3), 1-15. <https://doi.org/10.18162/fp.2022.715>
- St. John, M., Cowen, M. B., Smallman, H. S., & Oonk, H. M. (2001). The use of 2D and 3D displays for shape-understanding versus relative-position tasks. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *43*, 79-98. <https://doi.org/10.1518/001872001775992534>
- Steggemann, Y., Engbert, K., & Weigelt, M. (2011). Selective effects of motor expertise in mental body rotation tasks: comparing object-based and perspective transformations. *Brain and Cognition*, *76*(1), 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.02.013>
- Stienert-Parker, S. & Annan, J. (2020). Supporting Children/Students with Learning Conditions. *Positively Psychology/True Potential Psychology*.
- Stull, A. T., & Hegarty, M. (2016). Model manipulation and learning: Fostering representational competence with virtual and concrete models. *Journal of Educational Psychology*, *108*(4), 509–527. <https://doi.org/10.1037/edu0000077>
- Sümen, Ö.Ö. (2018). Enhancing Mental Rotation Skills through Google SketchUp. *Universal Journal of Educational Research*, *6*(11), 2586-2596. <https://doi.org/10.13189/ujer.2018.061124>.
- Suydam, M.N. (1985). The Shape of Instruction in Geometry: Some Highlights from Research. *Mathematics Teacher: Learning and Teaching PK–12*, 78.

- Swain, M., Joy, P., Bakker, K., Shores, E. A., & West, C. (2009). Object-based visual processing in children with spina bifida and hydrocephalus: A cognitive neuropsychological analysis. *Journal of Neuropsychology*, 3(2), 299-244. <https://doi.org/10.1348/174866408X399438>
- Swan, P., & Marshall, L. (2010). Revisiting mathematics manipulative materials. *Australian Primary Mathematics Classroom*, 15(2), 13-19.
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). Measuring cognitive load. Dans J. Sweller, S. Kalyuga & P. Ayres (Eds.), *Cognitive load theory* (pp. 71-85). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4_6

T

- Tahta, D. (1980). About geometry. For *the Learning of Mathematics*, 1(1), 2-9.
- Tarr, M. J., & Pinker, S. (1989). Mental rotation and orientation-dependence in shape recognition. *Cognitive Psychology*, 21(2), 233-282. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(89\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0010-0285(89)90009-1)
- Tartre, L. (1990). Spatial skills, gender, and mathematics. Dans E.L.G. Fennema (Ed.), *Mathematics and gender* (pp. 27-59). Teachers College Press.
- Tepylo, D., Moss, J., & Hawes, Z. (2014). The malleability of spatial reasoning and its relationship to growth in competence. Dans N. Sinclair & C. D. Bruce (Eds.), *Research forum: spatial reasoning for young learners* (pp. 16-17). PME.
- Terlecki, M.S., & Newcombe, N.S. (2005). How important is the digital divide ? Relating computer and video game usage to spatial ability. *Sex Roles* 53, 433-441. <https://doi.org/10.1007/s11199-005-6765-0>
- Thamrongrat, P., & Law, E. L.-C. (2019). Design and Evaluation of an Augmented Reality App for Learning Geometric Shapes in 3D. Dans D. Lamas, F. Loizides, L. Nacke, H. Petrie, M. Winckler & P. Zaphiris (Eds.) *Human-Computer Interaction. Interact 2019* (vol 11749, pp. 364-385). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29390-1_20
- Thompson, G. (1975). Discrimination of mirror-image shapes by young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 19, 165-176. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(75\)90157-5](https://doi.org/10.1016/0022-0965(75)90157-5)
- Todd, J. T. (2004). The visual perception of 3D shape. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 8 (3), 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.01.006>
- Tolar, T. D., Lederberg, A. R., & Fletcher, J. M. (2009). A structural model of algebra achievement: Computational fluency and spatial visualization as mediators of the effect of working memory on algebra achievement. *Educational Psychology*, 29(2), 239-266. <https://doi.org/10.1080/01443410802708903>
- Tricot, A. (2020, 13 janvier). Quinze moyens d'alléger la charge cognitive [Interview]. Dans *L'expresso*. Café pédagogique.

<http://www.cafepedagogique.net/lexpresso/Pages/2020/01/13012020Article637144954119584961.aspx>

- Tsutsumi, E., Shiina, K., Suzaki, A., Yamanouchi, K., Saito, T., & Suzuki, K. (1999). A Mental Cutting Test for Female Students Using a Stereographic System. *Journal for Geometry and Graphics*, 3(1), 111-119.
- Tuvi-Arad, I., & Gorsky, P. (2007). New visualization tools for learning molecular symmetry: a preliminary evaluation. *Chemistry Education Research and Practice*, 8(1), 61-72
- Tversky, B. (2011). Visualising thought. *Topics in Cognitive Science*, 3, 499-535. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2010.01113.x>
- Tzuriel, D., & Egozi, G. (2010). Gender Differences in Spatial Ability of Young Children: The Effects of Training and Processing Strategies. *Child Development*, 81(5), 1417-1430. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01482.x>

U

- Urhahne, D., Nick, S., & Schanze, S. (2009). The effect of three-dimensional simulations on the understanding of chemical structures and their properties. *Research in Science Education*, 39(4), 495-513. <https://doi.org/10.1007/s11165-008-9091-z>
- Uttal, D. H., Meadow, N. G., Tipton, E., Hand, L. L., Alden, A. R., Warren, C., & Newcombe, N. S. (2013a). The malleability of spatial skills : A meta-analysis of training studies. *Psychological Bulletin*, 139(2), 352-402. <https://doi.org/10.1037/a0028446>
- Uttal, D. H., Miller, D. I., & Newcombe, N. S. (2013b). Exploring and enhancing spatial thinking: Links to achievement in science, technology, engineering, and mathematics? *Current Direction in Psychological Science*, 22(5), 367-373. <https://doi.org/10.1177/0963721413484756>

V

- Van Asselen, M., Kessels, R. P. C., Neggers, S. F. W., Kappelle, L. J., Frijns, C. J. M., & Postma, A. (2006). Brain areas involved in spatial working memory. *Neuropsychologia*, 44(7), 1185-1194. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.10.005>
- Van de Walle, J.A. (2001). Geometric Thinking and Geometric Concepts. Dans J. A. van de Walle, K. S. Karp & J. M. Bay-Williams (Eds.), *Elementary and Middle School Mathematics: Teaching Developmentally* (4^e ed., pp. 306-312). Allyn and Bacon.
- Van den Heuvel-Panhuizen, M., & Buys, K. (2008). *Young Children Learn Measurement and Geometry*. Sense Publishers.

- Van der Ham, I., & Ruotolo, F. (2017). On Inter- and Intrahemispheric Differences in Visuospatial Perception. Dans A. Postma & I. J. M. van der Ham (Eds.), *Neuropsychology of Space : Spatial functions of the human brain* (pp. 35-76). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801638-1.00002-1>
- Van Der Stoep, N., Postma, A., & Nijboer, T. (2017). Multisensory Perception and the Coding of Space. Dans A. Postma & I. van der Ham (Eds.), *Neuropsychology of Space : Spatial functions of the human brain* (pp. 123-158). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801638-1.00004-5>
- Van Hiele, P. M. (1959). The Child's Thought and Geometry. Dans D. Fuys, D. Geddes, & R. Tischler (Eds.) *English Translation of Selected Writings of Dina van Hiele-Geldof and Pierre M. van Hiele* (pp. 243-252).
- Van Geert, P. (1998). A dynamic systems model of basic developmental mechanisms: Piaget, Vygotsky, and beyond. *Psychological Review*, 105(4), 634-677. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.105.4.634-677>
- Van Gog, T., Paas, F. Marcus, N., Ayres, P., & Sweller, J. (2008). The mirror-neuron system and observational learning: Implications for the effectiveness of dynamic visualizations. *Educational Psychology Review*, 21, 21-30. <https://doi.org/10.1007/s10648-008-9094-3>.
- Vander Heyden, K. M., Huizinga, M., Kan, K.-J., & Jolles, J. (2016). A developmental perspective on spatial reasoning: Dissociating object transformation from viewer transformation ability. *Cognitive Development*, 38, 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2016.01.004>
- Vasilyeva, M., & Lourenco, S. F. (2012). Development of spatial cognition. Wiley interdisciplinary reviews. *Cognitive science*, 3(3), 349-362. <https://doi.org/10.1002/wcs.1171>
- Verdine, B. N., Golinkoff, R. M., Hirsh-Pasek, K., Newcombe, N. S., Filipowicz, A. T., & Chang, A. (2013). Deconstructing Building Blocks: Preschoolers' Spatial Assembly Performance Relates to Early Mathematical Skills. *Child Development*, 85(3), 1062-1076. <https://doi.org/10.1111/cdev.12165>
- Verdine, B. N., Golinkoff, R. M., Hirsh-Pasek, K., & Newcombe, N. S. (2014). Finding the missing piece: blocks, puzzles, and shapes fuel school readiness. *Trends in Neuroscience & Education*, 3, 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2014.02.005>
- Verdine, B. N., Golinkoff, R. M., Hirsh-Pasek, K., & Newcombe, N. S. (2017). Links between spatial and mathematical skills across the preschool years. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 82(1), 7-30. <https://doi.org/10.1111/mono.12280>
- Verdine, B. N., Troseth, G. L., Hodapp, R. M., & Dykens, E. M. (2008). Strategies and correlates of jigsaw puzzle and visuospatial performance by persons with prader-willi syndrome. *American Journal on Mental Retardation*, 113(5), 343-355. <https://doi.org/10.1352/2008.113:342-355>

- Vivian, R., Bertolo, D., & Dinet, J. (2014). Interactions tactiles sur tablettes pour l'apprentissage de la géométrie dans l'espace : présentation et premières évaluations. *Revue des Interactions Humaines Médiatisées*, 15(1), 51-90.
- Voiskunskii, A. E. (2019). Cyberpsychological approach to the analysis of multisensory integration. *Konsul'tativnaia psikhologiya i psikhoterapiia*, 27(3), 9–21. <https://doi.org/10.17759/cpp.2019270302>
- Voltolini, A. (2013). A la découverte des triangles : de la manipulation de segments dans un logiciel de mathématiques dynamiques à la construction à la règle et au compas. Dans *Enseignement de la géométrie à l'école : enjeux et perspectives, Actes du XLème Colloque COPIRELEM* (pp. 111-116). <https://arpeme.fr/documents/7EE7515454437E3525FA.pdf>
- Voyer, D. (2011). Time limits and gender differences on paper-and-pencil tests of mental rotation: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 267-277. <https://doi.org/10.3758/s13423-010-0042-0>
- Voyer, D., & Jansen, P. (2017). Motor expertise and performance in spatial tasks: a metaanalysis. *Human Movement Science*, 54, 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.04.004>

W

- Wai, J., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2009). Spatial ability for STEM domains: Aligning over 50 years of cumulative psychological knowledge solidifies its importance. *Journal of Educational Psychology*, 101(4), 817-835. <https://doi.org/10.1037/a0016127>
- Wainman, B., Wolak, L., Pukas, G., Zheng, E., & Norman, G. R. (2018). The superiority of three-dimensional physical models to two-dimensional computer presentations in anatomy learning. *Medical Education*, 52, 1138-1146. <https://doi.org/10.1111/medu.13683>
- Waller, D., & Nadel, L. (2013). *Handbook of spatial cognition*. American Psychological Association. [https://doi.org/10.1037/13936-000\\$](https://doi.org/10.1037/13936-000$)
- Wallet, G., Sauzéon, H., Larrue, F., & N'Kaoua, B. (2013). Virtual/Real Transfer in a Large-Scale Environment: Impact of Active Navigation as a Function of the Viewpoint Displacement Effect and Recall Tasks. *Advances in Human-Computer Interaction*, 1-7.
- Wang, L. (2017). Various Spatial Skills, Gender Differences, and Transferability of Spatial Skills. Dans M. S. Khine (Ed.), *Visual-spatial Ability in STEM Education* (pp. 85-105). Springer
- Wang, H.-C., Chang, C.-Y., & Li, T.-Y. (2007). The comparative efficacy of 2D- versus 3D-based media design for influencing spatial visualization skills. *Computers in Human Behavior*, 23, 1943-1957. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2006.02.004>

- Wann, J. P., Rushton, S., & Mon-Williams, M. (1995). Natural Problems for Stereoscopic Depth Perception in Virtual Environments. *Vision Research*, 35(19), 2731-2736. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00018-U](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00018-U)
- Webb, R. M., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2007). Spatial ability: a neglected dimension in talent searches for intellectually precocious youth. *Journal of Educational Psychology*, 99(2), 397-420. <http://dx.doi.org/10.1037/0022-0663.99.2.397>
- Welchman, A. E., Deubelius, A., Conrad, V., Bühlhoff, H. H., & Kourtzi, Z. (2005). 3D shape perception from combined depth cues in human visual cortex. *Nature Neuroscience*, 8(6), 820-827. <https://doi.org/10.1038/nn1461>
- Whitehead, H. L., & Hawes, Z. (2023). Cognitive Foundations of Early Mathematics: Investigating the Unique Contributions of Numerical, Executive Function, and Spatial Skills. *Journal of Intelligence*, 11(12), 221. <https://doi.org/10.3390/jintelligence11120221>
- Widder, M., & Gorsky, P. (2013). How students use a software application for visualizing 3D geometric objects to solve problems. problems in spatial geometry while using a software application for visualizing 3D geometric objects. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 32(1), 89-120.
- Widder, M., Berman, A., & Koichu, B. (2014). Dismantling visual obstacles to comprehension of 2-D sketches depicting 3-D objects. Dans *Proceedings of the Joint Meeting of the 38th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education and the 36th Conference of North American Group for the Psychology of Mathematics Education* (Vol. 5, pp. 369–376).
- Widder, M., Berman, A., & Koichu, B. (2019). An A Priori Measure of Visual Difficulty of 2-D Sketches Depicting 3-D Objects. *Journal for Research in Mathematics Education*, 50(5), 489-528. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc.50.5.0489>
- Wijntjes, M., Volcic, R., Pont, S., Koenderink, J., & Kappers, A. (2009). Haptic perception disambiguates visual perception of 3D shape. *Experimental Brain Research*, 193, 639-644. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1713-9>
- Wimmer, M. C., Maras, K. L., Robinson, E. J., Doherty, M. J., & Pugeault, N. (2015). How visuo-spatial mental imagery develops: Image generation and maintenance. *PLoS One*, 10(11), 1-20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142566>
- Worsfold, N., Davis, A., & De Bruyn, B. (2008). The effect of horizontal versus vertical task presentation on children's performance in coordinate tasks. *Perception*, 37(11), 1667-1676. <https://doi.org/10.1068/p5890>

Wright, R., Thompson, W. L., Ganis, G., Newcombe, N. S., & Kosslyn, S. M. (2008). Training generalized spatial skills. *Psychonomic Bulletin & Review*, *15*(4), 763-771. <https://doi.org/10.3758/PBR.15.4.763>

Wu, C. F., & Chiang, M. C. (2013). Effectiveness of applying 2D static depictions and 3D animations to orthographic views learning in graphical course. *Computers & Education*, *63*, 28-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2012.11.012>

Wu H-K., & Shah P. (2004). Exploring visuospatial thinking in chemistry learning. *Science Education*, *88*, 465-492. <https://doi.org/10.1002/sce.10126>

X

Xie, F., Zhang, L., & Chen, X. (2020). Is Spatial Ability Related to Mathematical Ability: a Meta-analysis. *Educational Psychology Review*, *32*, 113-155. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09496-y>

Y

Yang, W., Liu, H., Chen, N., Xu, P., & Lin, X. (2020). Is early spatial skills training effective? A meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, *11*, 1938. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01938>

Yeaman, A., Bairaktarova, D., & Wright Knott, T. (2019, 15-19 juin). *A Qualitative Investigation of Students' Problem Solving Strategies in a Spatial Visualization Course* [Communication]. 2019 ASEE Annual Conference & Exposition, Tampa. <https://doi.org/10.18260/1-2--31985>

Yeh, A., & Nason, R.A. (2004a). Knowledge building of 3d geometry concepts and processes within a virtual reality learning environment. Dans L. Cantoni & C. McLoughlin (Eds.), *Proceedings of ED-MEDIA 2004 World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications* (pp. 2175-2182). *Association for the Advancement of Computing in Education*.

Yeh, A., & Nason, R.A. (2004b) VRMath: A 3D Microworld for Learning 3D Geometry. Dans L. Cantoni & C. McLoughlin (Eds.), *Proceedings of ED-MEDIA 2004 World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications* (pp. 2183-2191). *Association for the Advancement of Computing in Education*.

Yu, L., Ouwerling, J., Svetachov, P., van Hoesel, F., van Ooijen, P., & Kosinka, J. (2022). A 3D virtual reality tool for CT-based anatomy teaching and training. *Journal of Visualization*, *25*, 293-306. <https://doi.org/10.1007/s12650-021-00790-y>

Yue, J. (2006). Spatial Visualization by Isometric Drawing. Dans *Proceedings of the 2006 IJME - INTERTECH Conference*. https://ijme.us/cd_06/PDF/IT%20302-031.pdf

Yue, J. (2008). Spatial Visualization by Realistic 3D Views. *Engineering Design Graphics Journal*, *72*(1), 28-38.

Z

- Zacharia, Z. C., & Olympiou, G. (2011). Physical versus virtual manipulative experimentation in physics learning. *Learning and Instruction, 21*(3), 317-331. [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.learninstruc.2010.03.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.learninstruc.2010.03.001)
- Zacks, J. M. (2008). Neuroimaging studies of mental rotation: A meta-analysis and review. *Journal of Cognitive Neuroscience, 20*(1), 1-19. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20013>
- Zbiek, R. M., Heid, M. K., Blume, G. W., & Dick, T. P. (2007). Research on technology in mathematics education: The perspective of constructs. Dans F. K. Lester (Ed.), *Second handbook of research on mathematics teaching and learning* (Vol. 2, pp. 1169-1207). Information Age Publishing Inc.
- Zhang, X., Koponen, T., Räsänen, P., Aunola, K., Lerkkanen, M. K., & Nurmi, J.E. (2014). Linguistic and spatial skills predict early arithmetic development via counting sequence knowledge. *Child Development, 85*, 1091–1107. <https://doi.org/10.1111/cdev.12173>
- Žilková, K., & Partová, E. (2019). Virtual manipulatives with cubes for supporting the learning process. Dans J. Novotna & H. Moraova (Eds.), *Proceedings of the International Symposium Elementary Maths Teaching. SEMT'19* (pp. 427-437). Charles University, Faculty of Education.

Liste des abréviations et acronymes

- 2 ½ D : Utilisé en référence à Bertolo (2014) pour évoquer les environnements virtuels simulant l'espace 3D. Cette abréviation est dans ce travail pour caractériser les représentations virtuelles d'objets 3D.
- 2D : Deux dimensions
- 2D's : Abréviation utilisée dans ce travail pour caractériser la succession de représentations 2D
- 3D : Trois dimensions
- 3D-MRBT : 3D Mental Rotation Block Task
- AFNOR : Association Française de Normalisation
- BORB : Birmingham Object Recognition Battery (épreuve psychométrique)
- DCDQ-FE : Developmental Coordination Disorder Questionnaire French European (questionnaire destiné aux parents)
- Dim. : Dimensionnalité (abréviation de la variable dans certains tableaux)
- Dyn. : Dynamisme (abréviation de la variable dans certains tableaux)
- EEC : évaluations externes certificatives
- EENC : évaluations externes non certificatives
- FWB : Fédération Wallonie-Bruxelles
- G1 : Groupe 1 (abréviation dans certains tableaux)
- G2 : Groupe 2 (abréviation dans certains tableaux)
- G3 : Groupe 3 (abréviation dans certains tableaux)
- G4 : Groupe 4 (abréviation dans certains tableaux)
- G5 : Groupe 5 (abréviation dans certains tableaux)
- G6 : Groupe 6 (abréviation dans certains tableaux)
- ISE : Indice socio-économique
- Manip. : Manipulation (abréviation de la variable dans certains tableaux)
- MCT : Mental Cutting Test
- MRT : Mental Rotation Test
- Obs. : Observation (utilisé pour résumé les modalités des groupes expérimentaux)
- PHI : Potentially helpfull information (informations présentes sur une représentation d'objet 3D qui peuvent aider dans la perception de l'objet 3D)
- PMI : Potentially misleading information (informations présentes sur une représentation d'objet 3D qui peuvent occasionner des difficultés de perception de l'objet 3D)
- SBST : Santa Barbara Solids Test
- STEM : Sciences, technology, engineering, and mathematics (ensemble de disciplines)

- TBI : Tableau blanc interactif
- TDC : Trouble développemental de la coordination
- *Test ex. de F.* (ou test exact de F.) : *Test exact de Fisher*
- χ^2 : Khi-carré

ANNEXES

Liste des annexes

- Annexe 20 : Résultats au test de McNemar (K et p-value associée) comparant le taux de perception adéquate entre les objets 3D deux à deux (1^{ère} étude expérimentale)*
- Annexe 21 : Pourcentage d'enfants/adolescents percevant adéquatement l'objet 3D selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus (1^{ère} étude expérimentale)*
- Annexe 22 : Corrélation entre les taux de perception adéquate des objets 3D (1^{ère} étude expérimentale)*
- Annexe 23 : Taux de sélection de chacune des propositions (1^{ère} étude expérimentale)*
- Annexe 24 : Répartition du nombre de fois que chaque proposition 3D non attendue a été sélectionnée selon le nombre d'objets 3D inadéquatement perçus (1^{ère} étude expérimentale)*
- Annexe 25 : Détail des résultats de l'analyse des verbatims (1^{ère} étude expérimentale)*
- Annexe 26 : Résultats au test de McNemar (K et p-value associée) comparant le taux de perception adéquate entre les objets 3D deux à deux (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 27 : Pourcentage d'enfants/adolescents percevant adéquatement l'objet 3D selon le nombre d'objets 3D adéquatement perçus (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 28 : Corrélation entre les taux de perception adéquate des objets 3D (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 29 : Taux de sélection de chacune des propositions (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 30 : Détail des résultats de l'analyse des verbatims (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 31 : Test de Wilcoxon (Z) comparant les scores de visualisation (sur 4) entre les objets 3D 2 à 2 par groupe : note Z et p-value (p) associée (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 32 : Corrélation (coefficient de Spearman et p-value associée) entre les scores de visualisation (sur 4) aux différents objets 3D par groupe (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 33 : Graphiques en « Boîtes à moustaches » relatifs aux scores de visualisation spatiale par objet 3D et par groupe (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 34 : Test de Wilcoxon comparant les scores (sur 4) entre les types d'exercices 2 à 2 par groupe (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 35 : Corrélation (Coefficient de Spearman et p-value associée) entre les scores (sur 5) aux différents types d'exercices par groupe (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 36 : Graphique en « Boîtes à moustaches » relatifs aux scores de visualisation spatiale par type d'exercice et par groupe (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 37 : Graphiques des taux de réussite de chaque objet 3D par type d'exercice et inversement (2^e étude expérimentale)*
- Annexe 38 : Détails des réponses aux exercices de visualisation spatiale toute tranche d'âge confondue*

Annexe 39 : Evolution des erreurs types principales aux exercices de visualisation spatiale : taux d'occurrence des erreurs principales par tranche d'âge

Annexe 40 : Vérification de l'indépendance des taux de réussite pour chaque exercice de visualisation spatiale et du groupe d'appartenance pour les différentes paires de groupe comparé en prenant en considération G1 et G2 : Chi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) associée (2^e étude expérimentale)

Annexe 41 : Vérification de l'indépendance des taux de réussite pour chaque exercice de visualisation spatiale et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G2 par tranche d'âge : Chi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) associée (2^e étude expérimentale)

Annexe 42 : Vérification de l'indépendance des taux de réussite pour chaque exercice de visualisation spatiale et du groupe d'appartenance pour les différentes paires de groupe comparé en prenant en considération G1 et G5 et G2 et G5 : Chi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) associée (2^e étude expérimentale)

Annexe 43 : Vérification de l'indépendance des taux de réussite pour chaque exercice de visualisation spatiale et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G5 et G2 et G5 par tranche d'âge : Chi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) associée (2^e étude expérimentale)

Annexe 44 : Vérification de l'indépendance des taux de réussite pour chaque exercice de visualisation spatiale et du groupe d'appartenance pour les différentes paires de groupe comparé en prenant en considération G1 et G3, G2 et G4 et G3 et G4 : Chi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) associée (2^e étude expérimentale)

Annexe 45 : Vérification de l'indépendance des taux de réussite pour chaque exercice de visualisation spatiale et du groupe d'appartenance en prenant en considération G1 et G3, G2 et G4 et G3 et G4 par tranche d'âge : Chi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) associée (2^e étude expérimentale)

Annexe 46 : Vérification de l'indépendance des taux de réussite pour chaque exercice de visualisation spatiale et du groupe d'appartenance pour les différentes paires de groupe comparé en prenant en considération G2 et G6 : Chi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) associée (2^e étude expérimentale)

Annexe 47 : Vérification de l'indépendance des taux de réussite pour chaque exercice de visualisation spatiale et du groupe d'appartenance en prenant en considération G2 et G6 par tranche d'âge : Chi-carré (χ^2) ou son alternative le test exact de Fisher et p-value (p) associée (2^e étude expérimentale)

Les annexes sont disponibles en cliquant sur le QR Code ci-dessous.

