

Caractérisation du comportement
mécanique des interfaces
cuvelage/ciment des puits d'injection
dans le contexte du stockage
géologique de CO₂

Étude expérimentale et modélisation numérique

Travail de fin d'études
Présenté en vue de l'obtention du grade de Master ingénieur civil
des mines et géologue

Caroline DUBOIS



Sous la direction de Monsieur le Professeur
Jean-Pierre TSHIBANGU

Juin 2010

RÉSUMÉ

La durée du stockage géologique du CO₂ exige notamment de garantir l'étanchéité des puits d'injection sur des milliers d'années. Celle-ci est théoriquement assurée par la cimentation de l'espace annulaire entre le cuvelage en acier et la formation rocheuse, et par un bouchon cimentant l'intérieur du cuvelage. Durant sa vie, le puits est soumis à différentes sollicitations qui peuvent provoquer sa rupture. La qualité des interfaces entre les différents matériaux du puits (ciment, acier et roche) apparaît donc comme un point crucial qui doit être étudié en détail. Actuellement, le déroulement des événements à l'origine de la perte d'étanchéité par décohésion aux interfaces et/ou rupture de l'annulaire cimenté n'est pas encore clairement identifié.

A ce jour, peu de recherches ont été menées sur les propriétés mécaniques de ces interfaces. Pour cette raison, dans le cadre de ce travail de fin d'études, nous avons réalisé des essais sur des assemblages ciment/acier afin de tester mécaniquement les interfaces entre les composants. Plusieurs configurations d'assemblages ont été expérimentées dans différentes conditions de chargement mécanique (cisaillement et traction), d'une part sur des assemblages sains (non exposés au CO₂) et d'autre part sur des assemblages vieilliss (ciment exposé au CO₂). Nous avons ainsi établi un protocole expérimental permettant de soumettre ces interfaces à des conditions de chargement mécanique susceptibles de se produire durant chaque phase de la vie du puits. Il en est ressorti que les essais de cisaillement se prêtent bien à l'étude des interfaces ciment/acier à condition que l'assemblage et le chargement soient symétriques mais que, par contre, les essais de traction ne sont pas adaptés pour tester ces interfaces.

Pendant ce travail de fin d'études, nous avons également commencé la modélisation du comportement mécanique des interfaces. Le but de cette démarche est d'implémenter dans un modèle aux éléments finis, une loi de comportement pour les interfaces ciment/acier dont les paramètres sont déterminés expérimentalement à partir des essais tels que ceux évoqués précédemment. Une loi de la bibliothèque du code de calcul Abaqus™ a été testée mais elle ne permettait pas de reproduire le comportement adhérent frottant des interfaces. Pour remédier à ce problème, nous avons alors implémenté, dans une procédure utilisateur, une loi d'interface de la littérature (Cangémi 1997). Bien que la loi ne soit pas encore totalement fonctionnelle, les résultats déjà obtenus sont prometteurs et encourageants.

Mots Clefs :

Dioxyde de carbone, cimentation des puits, interface, essai de cisaillement, modélisation du puits.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été réalisé à l'IFP dans les directions "Mécanique Appliquée" et "Chimie et Physico-chimie Appliquées". Cela m'a permis de découvrir une structure de recherche industrielle. J'y ai côtoyé des personnes ayant des formations et des spécialités différentes, ce qui fût très enrichissant tant sur le plan personnel que pour la réalisation de ce travail.

Durant ce travail de fin d'études, de nombreuses personnes m'ont apporté un appui considérable par leurs remarques, leurs conseils ou encore leur soutien. Je tiens ici à les en remercier.

Je voudrais tout d'abord remercier mes promoteurs Monsieur le Professeur J.-P. TSHIBANGU et Mademoiselle le Dr. Ir. F. DESCAMPS pour avoir dirigé ce travail de fin d'études.

J'exprime également toute ma reconnaissance à Madame le Dr. N. BRUSSELLE-DUPEND, ma responsable à l'IFP, pour m'avoir guidée dans ce travail par ses conseils et sa grande disponibilité à mon égard.

Je tiens à remercier Monsieur le Dr. E. LECOLIER de m'avoir éclairée de ses connaissances scientifiques sur les ciments, ainsi que Monsieur le Dr. X. LEFEBVRE qui m'a aidée tout au long du processus expérimental.

La qualité des résultats expérimentaux doit beaucoup à Monsieur A. RIVEREAU et Madame N. FERRER grâce à leur expérience technique qu'ils m'ont fait partager. Un grand merci pour l'aide apportée et les conseils prodigués.

Mes remerciements vont également à Messieurs les Dr. L. CANGEMI et Ir. O. VINCKE de m'avoir intégrée et associée à leur programme de recherche.

Merci aussi à tous les membres de la Direction Mécanique Appliquée de l'IFP de m'avoir permis d'évoluer dans d'excellentes conditions de travail scientifiques, administratives et humaines.

J'associe également à ces remerciements Monsieur le Dr. F. DUBOIS du LMGC de l'Université de Montpellier pour m'avoir accueillie et fait découvrir son code de calcul le LMGC90.

Merci aux rapporteurs de ce travail pour avoir lu ce rapport.

J'adresse enfin mes remerciements aux membres du jury pour leur participation à la défense orale de ce travail de fin d'études.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1	INTRODUCTION.....	1
1.1	PROBLEMATIQUE DU STOCKAGE GEOLOGIQUE DU CO ₂	1
1.2	PRESENTATION DU TRAVAIL.....	2
CHAPITRE 2	ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
2.1	CHARGEMENT MECANIQUE ET INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT CHIMIQUE SUR LA TENUE MECANIQUE DE LA ZONE PROCHE DU PUIITS.....	3
2.1.1	Les différents composants du puits.....	3
2.1.2	Chargement mécanique subi au niveau des interfaces pendant la vie du puits.....	5
2.1.3	Influence de l'environnement chimique CO ₂ sur la tenue mécanique des différents composants du puits.....	6
2.2	CARACTERISATION MECANIQUE DU COMPORTEMENT AUX INTERFACES.....	8
2.2.1	Les différents modes de rupture d'une interface.....	8
2.2.2	Essais mécaniques de caractérisation des interfaces : Etat de l'art.....	10
2.3	NOTIONS D'ADHERENCE ET DE RUPTURE.....	14
2.3.1	Adhérence et frottement.....	14
2.3.2	Endommagement, fissuration et rupture.....	16
2.3.3	Interface et interphase.....	16
2.4	DESCRIPTION DE LA FISSURATION AUX INTERFACES PAR LES MODELES DE ZONE COHESIVE (MZC).....	17
2.4.1	Les MZC.....	17
2.4.2	Loi d'adhérence de Cangémi (1999 _[12]) : un modèle corrélant adhérence et frottement.....	17
2.4.3	Méthodes numériques associées.....	20
CHAPITRE 3	MODÉLISATION AUX ÉLÉMENTS FINIS DE L'ESSAI <i>PUSH-OUT</i>	25
3.1	PRESENTATION DU MODELE AUX ELEMENTS FINIS (M.E.F).....	26
3.1.1	Géométrie.....	26
3.1.2	Conditions aux limites.....	26
3.1.3	Matériaux.....	26
3.2	UTILISATION D'UNE LOI D'INTERFACE ABAQUS™.....	27
3.2.1	Caractéristiques de la loi utilisée.....	27
3.2.2	Résultats.....	28
3.2.3	Sensibilité des paramètres.....	31
3.3	IMPLEMENTATION DE LA LOI D'INTERFACE CANGEMI _[12] COUPLANT FROTTEMENT ET ADHERENCE.....	35
3.4	BILAN DE LA M.E.F. DE L'ESSAI DE <i>PUSH-OUT</i>	36
CHAPITRE 4	MISE AU POINT D'ESSAIS SUR ASSEMBLAGES ACIER/CIMENT.....	37
4.1	CARACTERISATION DES PROPRIETES MECANIQUES DU CIMENT MASSIF.....	37
4.2	PRESENTATION DES ESSAIS DE CISAILLEMENT.....	39
4.2.1	Les assemblages à tester en cisaillement.....	39
4.2.2	Dispositif et principe des essais de cisaillement.....	41
4.3	RESULTATS DES ESSAIS DE CISAILLEMENT.....	41
4.3.1	Essais de cisaillement simple.....	41
4.3.2	Essais de cisaillement double.....	44
4.4	BILAN DES ESSAIS DE CISAILLEMENT.....	48

4.5	PRESENTATION DE L'ESSAI DE TRACTION.....	49
4.5.1	Les assemblages à tester en traction.....	49
4.5.2	Dispositif et principe de l'essai de traction.....	50
4.6	RESULTATS DES ESSAIS DE TRACTION.....	50
4.7	BILAN DES ESSAIS DE TRACTION.....	50

CHAPITRE 5 CONCLUSIONS 51

5.1	BILAN DE CE TRAVAIL	51
5.2	PERSPECTIVES FUTURES	51

ANNEXES

ANNEXE A UTILISATION DU LOGICIEL ABAQUS™ POUR LA MODELISATION DE ZONES COHESIVES 53

A.1	PRESENTATION DU CODE DE CALCUL DE STRUCTURE ABAQUS™	53
A.2	EXEMPLE D'UN FICHIER D'ENTREE (EXTENSION .INP) UTILISANT DES ELEMENTS COHESIFS AXISYMETRIQUES – ESSAI <i>PUSH-OUT</i>.....	54
A.3	ANALYSE DES RESULTATS DE L'ESSAI <i>PUSH-OUT</i> DEPUIS ABAQUS VIEWER	59
A.3.1	Variables Standards.....	60
A.3.2	Variables propres aux éléments cohésifs.....	62

ANNEXE B PROPRIETES MECANIQUES DU CIMENT MASSIF 65

B.1	CIMENT A 7 JOURS DE PRISE.....	65
B.2	CIMENT A 7 JOURS DE PRISE ET 4 SEMAINES DE VIEILLISSEMENT DANS L'EAU	69
B.3	CIMENT A 7 JOURS DE PRISE ET 4 SEMAINES DE VIEILLISSEMENT DANS L'EAU SATUREE EN CO₂	72
B.4	RECAPITULATIF DES PROPRIETES MECANIQUES DU CIMENT.....	76

ANNEXE C RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES INTERFACES ACIER/CIMENT 77

C.1	ESSAIS DE CISAILLEMENT A SIMPLE RECOUVREMENT.....	77
C.2	ESSAIS DE CISAILLEMENT A DOUBLE RECOUVREMENT	78

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Table des figures

Figure 1.1 : Schéma d'un puits et des composants assurant l'étanchéité	1
Figure 2.1 : Schéma de la zone proche puits (Gray 2009 _[18])	3
Figure 2.2 : Coupe verticale d'un puits d'injection (Brasseur 2009 _[10])	4
Figure 2.3 : Evolution de la porosité du ciment carbonaté (Rimmele 2008 _[25])	7
Figure 2.4 : Échantillons de ciment Portland après attaque au CO ₂ pendant 2 jours et après 3 semaines à 90°C et 280 bars et cinétique de la dégradation (Barlet-Gouedard 2006 _[6])	7
Figure 2.5 : Évolution en fonction du temps de la résistance à la compression du ciment portland sur des échantillons ayant été soumis au CO ₂ (Barlet-Gouedard 2007 _[5])	8
Figure 2.6 : Modes de propagation d'une fissure dans un matériau pouvant être transposés à la rupture d'une interface (I) ouverture (II) glissement plan (III) glissement anti-plan (Tshibangu 2009 _[32]) ...	9
Figure 2.7 : Schémas des différents essais d'ouverture adaptés au cas des assemblages ciment/acier.....	9
Figure 2.8 : Schémas des différents essais de traction	10
Figure 2.9 : Schémas des différents essais de cisaillement	11
Figure 2.10 : Schémas des différents essais de flexion	13
Figure 2.11 : Courbes effort-déplacement de l'essai de flexion 4 points (A) sans pré-entaille, (B) avec pré-entaille (Therry 2007 _[28])	14
Figure 2.12 : Rupture (a) adhésive, (b) cohésive ou (c) mixte	17
Figure 2.13 : Illustration de l'importance du couplage entre l'adhérence et le frottement (Cangémi 1997 _[12]).....	18
Figure 2.14 : Géométrie d'un élément joint 2D (Beer 1992 _[8])	21
Figure 2.15 : Géométrie d'un élément cohésif 3D (Abaqus TM 2009 _[1])	23
Figure 2.16 : Discrétisation du problème d'évolution (Dubois 2007 _[16])	24
Figure 3.1 : Courbe effort-déplacement obtenue par essai de cisaillement de l'interface	25
Figure 3.2 : Modélisation de l'essai <i>push-out</i>	26
Figure 3.3 : Maillage du modèle.....	26
Figure 3.4 : Réponse de l'essai <i>push-out</i> d'un modèle où la zone interfaciale n'est pas représentée	27
Figure 3.5 : Éprouvette déformée après l'essai	28
Figure 3.6 : Déformation des éléments du maillage pendant l'essai	28
Figure 3.7 : Evolution de la variable d'endommagement le long de l'interface.....	29
Figure 3.8 : Courbe effort appliqué vs déplacement obtenue par M.E.F. du <i>push-out</i>	29
Figure 3.9 : Graphique des énergies	31
Figure 3.10 : Influence de l'épaisseur normale de la zone cohésive (modules constants).....	31
Figure 3.11 : Influences des modules normal (K_m) et tangentiels (K_{ss} , K_{tt})	32
Figure 3.12 : Évolution des contraintes maximales et de décohérence en fonction du module tangentiel	32
Figure 3.13 : Influence de la valeur des paramètres d'endommagement.....	33
Figure 3.14 : Graphiques Effort-Déplacement pour différents critères d'initiation et de propagation.....	34
Figure 3.15 : Evolution des énergies mises en jeu pour chacun des critères utilisés à la Figure 3.14.....	34
Figure 3.16 : Courbe effort-déplacement de l'essai <i>push-out</i> (a) avec loi d'interface utilisateur, (b) expérimentale.....	35
Figure 4.1 : Évolution des propriétés mécaniques du ciment en fonction des conditions de prise et de vieillissement	38
Figure 4.2 : Plot de ciment ayant subi une carbonatation au CO ₂ (a) avant et (b) après rupture.....	38
Figure 4.3 : Comparaison des courbes de compression simple pour les différentes conditions de prise	39
Figure 4.4 : Assemblage acier/ciment simple recouvrement.....	39
Figure 4.5 : Assemblage acier/ciment double recouvrement	39
Figure 4.6 : Analyse de la rugosité des plaques d'acier	40
Figure 4.7 : Vue des boîtes parallélépipédiques dans lesquelles sont fabriqués les assemblages (a) simple recouvrement et (b) double recouvrement	40
Figure 4.8 : Dispositif des essais de cisaillement	41
Figure 4.9 : Moment de flexion induit dans un essai à simple recouvrement	42

Figure 4.10 : Courbes force-déplacement de la première série d'essais de cisaillement à simple recouvrement	42
Figure 4.11 : Moments de flexion induits dans un essai à double recouvrement.....	44
Figure 4.12 : Courbes force-déplacement de la première série d'essais de cisaillement à double recouvrement	45
Figure 4.13 : Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la vitesse de pilotage de l'essai	46
Figure 4.14 : Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la surface d'interface.....	47
Figure 4.15 : Etat de l'interface après essai mécanique de l'assemblage vieilli 4 semaines dans le CO ₂ .	48
Figure 4.16 : Evolution de la contrainte tangentielle en fonction des conditions de prise	48
Figure 4.17 : Eprouvette pour l'essai de traction au plot collé.....	49
Figure 4.18 : Moule de fabrication des assemblages de traction au plot collé	49
Figure 4.19 : Dispositif des essais de traction	50
Figure 4.20 : Modification des découpes en acier pour le moulage des rondelles de ciment.....	50
Figure A. 1 : Fenêtre principale (Abaqus™ 2009 _[1])	53
Figure A. 2 : <i>Model Tree</i> (Abaqus™ 2009 _[1])	54
Figure A. 3 : <i>Result Tree</i> (Abaqus™ 2009 _[1]).....	54
Figure A. 4 : Modèle de l'essai <i>push-out</i>	55
Figure A. 5 : Effort de compression axiale en fonction du temps	59
Figure A. 6 : Orientation d'un élément cohésif axisymétrique	59
Figure A. 7 : Répartition de la force verticale dans l'essai <i>push-out</i>	60
Figure A. 8 : Répartition du champ de contraintes normales et tangentielles dans l'interface de l'essai <i>push-out</i>	60
Figure A. 9 : Répartition du champ de déformations normales et tangentielles dans l'interface de l'essai <i>push-out</i>	61
Figure A. 10 : Pression au contact entre l'échantillon, l'interface et le casing.....	61
Figure A. 11 : Contrainte de cisaillement au contact	62
Figure A. 12 : Évolution de la variable Status dans l'interface cohésive.....	62
Figure A. 13 : Évolution de l'endommagement dans l'interface cohésive.....	63
Figure A. 14 : Évolution du critère d'initiation de la rupture dans l'interface cohésive	64
Figure B. 1 : Schéma de principe de l'essai de traction	65
Figure B. 2 : Courbes effort-déplacement des essais de traction brésilienne sur des échantillons à 7j de prise	66
Figure B. 3 : Schéma de principe de l'essai de compression simple.....	66
Figure B. 4 : Courbe type de la contrainte exercée sur l'échantillon en fonction de sa déformation axiale	67
Figure B. 5 : Courbes effort-déplacement des essais de compression simple sur des échantillons à 7j de prise	67
Figure B. 6 : Courbes effort-déplacement des essais de chargement-déchargement [(a) 15MPa, (b) 30 MPa] sur des échantillons à 7j de prise.....	68
Figure B. 7 : Représentation du critère de rupture dans le plan de Mohr [MPa].....	69
Figure B. 8 : Courbes effort-déplacement des essais de traction brésilienne (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)	70
Figure B. 9 : Courbes effort-déplacement des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)	71
Figure B. 10 : Courbes effort-déplacement des essais de chargement-déchargement(prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau).....	72
Figure B. 11 : Plot de ciment ayant subi une carbonatation au CO ₂ (a) avant et (b) après rupture.....	73
Figure B. 12 : Courbes effort-déplacement des essais de traction brésilienne (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO ₂)	73
Figure B. 13 : Courbes effort-déplacement des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO ₂)	74
Figure B. 14 : Courbes effort-déplacement des essais de chargement-déchargement (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO ₂).....	75

Figure C. 1 : Courbes force-déplacement de la première série d'essais de cisaillement à simple recouvrement	77
Figure C. 2 : Courbes force-déplacement de la première série d'essais de cisaillement à double recouvrement	78
Figure C. 3 : Comparaison des courbes force-déplacement pour les séries 1, 2 et 3 de cisaillement double	79
Figure C. 4 : Comparaison des courbes force-déplacement pour les séries 1 et 4 de cisaillement double	80
Figure C. 5 : Comparaison des courbes force-déplacement pour les séries 5 et 6 de cisaillement double	81

Table des tableaux

Tableau 3.1 : Paramètres représentatifs des courbes expérimentales _[20] et du modèle	30
Tableau 3.2 : Critères d'initiation et d'évolution de la rupture	33
Tableau B. 1 : Résultats des essais de traction brésilienne (prise 7 jours)	66
Tableau B. 2 : Résultats des essais de compression simple (prise 7 jours)	67
Tableau B. 3 : Résultats des essais de chargement-déchargement (prise 7 jours).....	68
Tableau B. 4 : Propriétés du ciment (prise 7 jours).....	69
Tableau B. 5 : Résultats des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)	70
Tableau B. 6 : Résultats des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)	71
Tableau B. 7 : Résultats des essais de chargement-déchargement (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)	71
Tableau B. 8 : Propriétés du ciment (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau).....	72
Tableau B. 9 : Résultats des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO ₂)	73
Tableau B. 10 : Résultats des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO ₂)	74
Tableau B. 11 : Résultats des essais de chargement-déchargement (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO ₂)	75
Tableau B. 12 : Propriétés du ciment (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO ₂)	75
Tableau B. 13 : Récapitulatif des propriétés du ciment massif selon les différentes conditions de prise et de vieillissement	76
Tableau C. 1 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement simple	77
Tableau C. 2 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (référence).....	78
Tableau C. 3 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (vitesse de 0.5 mm/min)	79
Tableau C. 4 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (vitesse de 0.1 mm/min)	79
Tableau C. 5 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (interface réduite)	80
Tableau C. 6 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (vieillissement aqueux)	81
Tableau C. 7 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (vieillissement CO ₂)	81

Chapitre 1 INTRODUCTION

1.1 Problématique du stockage géologique du CO₂

(Baele 2009^[4], Total 2007^[30])

La consommation mondiale d'énergie s'élève actuellement à plus de 10 GTep¹, dont 80% proviennent des combustibles fossiles. D'ici 2050, on estime que cette consommation aura doublé et que, malgré les efforts faits pour promouvoir les énergies alternatives, elle restera dominée par les énergies fossiles. Pour cette raison et afin de lutter contre le réchauffement climatique, il est important de développer des techniques permettant de diminuer les quantités de CO₂ relâchées dans l'atmosphère. A l'heure actuelle, une des techniques les plus prometteuses est la séquestration géologique du CO₂.

Au préalable, le CO₂ doit être récupéré mais, pour des raisons pratiques et économiques, il n'est pas possible de capter le CO₂ déjà présent dans l'atmosphère car sa concentration y est trop faible. Le captage doit donc être réalisé au niveau des rejets des installations de grande consommation d'énergie fossile (telles que les centrales thermiques, les cimenteries, etc). Une fois prélevé, le CO₂ est lavé de ses impuretés (vapeur d'eau, azote, etc) puis transporté par canalisation jusqu'à la zone de stockage.

Le CO₂ est comprimé pour atteindre son état supercritique afin d'occuper un volume minimum. Il est alors injecté dans le sol à l'aide d'un puits d'injection. Toutes les formations géologiques ne se prêtent pas au stockage du CO₂. Elles doivent être suffisamment perméables pour permettre la circulation du fluide au sein de la formation mais elles doivent également être recouvertes de formations imperméables qui empêchent le gaz de remonter vers la surface. Usuellement, on utilise des champs d'hydrocarbures épuisés ou en fin d'exploitation, des aquifères salins ou encore des veines de charbon non exploitées.

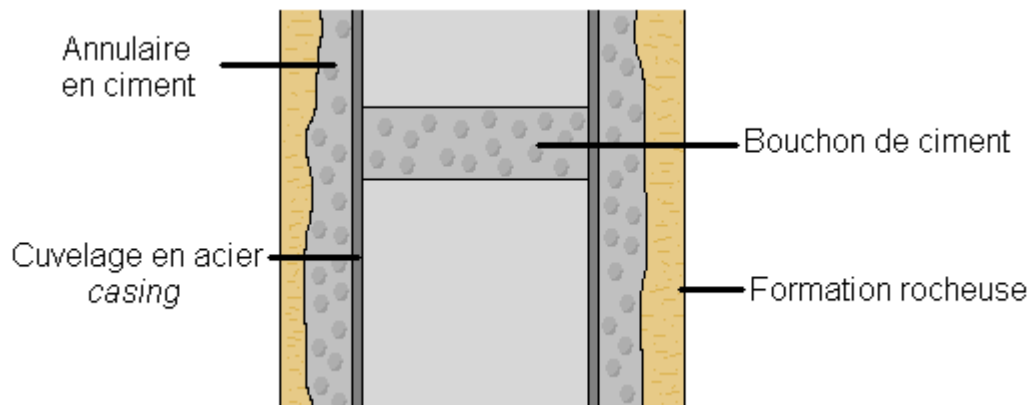


Figure 1.1 : Schéma d'un puits et des composants assurant l'étanchéité

Un des principaux challenges est de garantir l'étanchéité des puits d'injection sur le long terme (typiquement 1 000 ans). Celle-ci est théoriquement assurée d'une part, par la cimentation de l'espace annulaire entre leur cuvelage en acier et la formation rocheuse et d'autre part, par un bouchon cimentant l'intérieur du cuvelage (Figure 1.1). Le point le plus critique par rapport à l'étanchéité apparaît comme étant les interfaces entre les différents matériaux du puits. Mais, les modes de perte d'étanchéité par décohéation aux interfaces et/ou rupture de l'annulaire cimenté ne sont pas clairement identifiés. C'est dans le but d'approfondir ces questions que cette étude est menée.

¹ Tep : Tonne équivalent pétrole

1.2 Présentation du travail

Ce travail de fin d'études est consacré à l'étude du comportement mécanique des interfaces ciment/acier des puits d'injection de CO₂. Dans un premier temps, j'ai effectué une analyse bibliographique. Elle a pour but d'introduire les notions abordées dans ce rapport, ainsi que de faire état des connaissances déjà acquises dans ce domaine (Chapitre 2).

J'ai ensuite mené une modélisation numérique pour simuler le comportement des interfaces face à une sollicitation en cisaillement, sur la base de précédents travaux expérimentaux (essais push-out, Kenga_[20]) et de modélisation (Roguet_[26]) menés à l'IFP. Cette modélisation vise l'implémentation d'une loi d'interface dans un code de calcul de structures (AbaqusTM notamment). Elle est présentée dans le Chapitre 3 avec les premiers résultats obtenus.

En parallèle, j'ai effectué une caractérisation expérimentale du comportement d'assemblages ciment/acier en cisaillement et en traction. Le but de ces essais est de tester des conditions mécaniques de chargement susceptibles de se produire dans le puits. Dans ce volet expérimental, l'incidence d'une carbonatation du ciment sur les propriétés mécaniques des interfaces a commencé à être étudiée. La configuration (géométrie, protocole de fabrication, instrumentation) des assemblages ciment/acier testés y est examinée. Le Chapitre 4 reprend ainsi l'analyse des résultats des essais mécaniques réalisés sur des assemblages sains (i.e. non exposés au CO₂) et sur des assemblages exposés au CO₂. Pour terminer ce chapitre, une configuration d'assemblage de traction a été élaborée et testée.

Je terminerai ce rapport par une synthèse du travail effectué dans le cadre de ce projet et par de nouvelles perspectives de recherches qui pourraient être abordées dans des travaux futurs (Chapitre 5).

Chapitre 2 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre est consacré à l'introduction de notions essentielles dans le cadre de ce projet. Il sert donc de point de départ à la réalisation de cette étude en reprenant les connaissances déjà acquises dans le domaine des interfaces ciment/acier et de leur vieillissement au CO₂. Il propose ensuite une liste non exhaustive, d'essais de caractérisation mécanique des interfaces et il présente enfin des modèles numériques d'interfaces.

2.1 Chargement mécanique et influence de l'environnement chimique sur la tenue mécanique de la zone proche du puits

2.1.1 Les différents composants du puits

(Gray 2009_[18])

Le CO₂ est injecté dans une formation géologique au niveau d'un puits d'injection. C'est une installation qui permet de rejoindre la zone de stockage à partir de la surface. La [Figure 2.1](#) illustre les composants du puits dont le comportement est couplé et qui interagissent entre eux pendant le forage, la complétion et les opérations de production. Ce sont eux qui déterminent la vie d'un puits pétrolier (sa longévité et sa productivité). En partant du centre vers l'extérieur, ces différents composants sont : le cuvelage en acier (*casing*), la gaine de ciment, un dépôt de boue (*mudcake*) qui recouvre partiellement ou totalement l'intérieur du puits, une zone où la formation rocheuse est plastifiée et finalement la formation rocheuse principale à comportement élastique. Pendant la construction du forage ainsi que pendant les opérations ultérieures, ces composants interagissent en réponse aux événements du fond du puits.

Les conditions mécaniques et thermiques sont bien connues sur la frontière intérieure grâce à une mesure continue au sein du puits et une bonne documentation du comportement mécanique du casing. Mais à partir et au-delà de l'interface casing/ciment, les contraintes, déplacements, transports de fluide et les autres phénomènes comportementaux sont souvent méconnus. Très peu d'informations sont disponibles pour quantifier les interactions entre ces différents composants d'autant plus que les paramètres et les conditions de couplage changent continuellement avec l'état de chargement du puits.

La gaine de ciment est le cœur de tout forage pétrolier. Son rôle est de fournir l'isolation mécanique et thermique entre le tubage et la formation, pour tous les horizons de production du début de la construction du puits à la fin de sa vie.

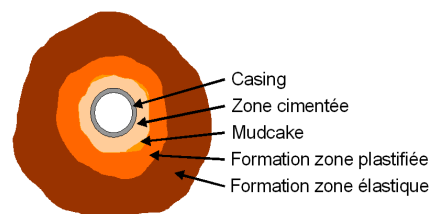


Figure 2.1 : Schéma de la zone proche puits (Gray 2009_[18])

- **Les aciers des casings**

(Ropital 2009_[27])

Dans le puits, les tubages en acier ont pour rôle de consolider des parois de la formation pour éviter une fracturation hydraulique de celles-ci ou une rupture par écrasement, ainsi que de présenter une surface interne lisse afin de limiter les pertes de charge dues au transport du fluide.

L'industrie pétrolière utilise différents types d'acier pour tuber les puits de forage. Le choix de l'acier dépend entre autres des conditions de température et de pression auxquelles il doit tenir, mais également des fluides en présence. Les principales caractéristiques sur lesquelles se basent les pétroliers pour choisir la nuance d'acier sont la tenue à la fatigue ainsi qu'à la corrosion, l'état de surface et la résilience.

- **La gaine de ciment**

(Barlet-Gouedard 2007^[5], Bourissai 2008^[9], [13], Nelson 1990^[23])

La gaine de ciment a pour rôle d'assurer l'isolation zonale et l'intégrité du trou pendant le forage et la vie du puits.

Le ciment est un liant hydraulique. Il se présente sous la forme d'une poudre pulvérulente qui, au contact de l'eau, s'hydrate en formant une pâte à consistance plastique qui se solidifie au cours du temps pour donner un matériau solide quasiment insoluble, aux propriétés mécaniques remarquables.

Bien qu'il soit employé depuis l'antiquité, le phénomène de prise du ciment n'est pas encore parfaitement compris et connu. En effet, c'est un matériau complexe (polyphasique et poreux) dont la constitution et les propriétés évoluent dans le temps.

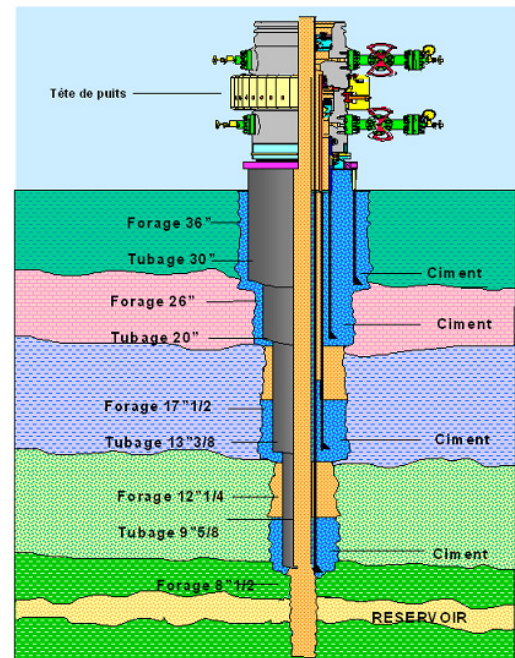


Figure 2.2 : Coupe verticale d'un puits d'injection (Brasseur 2009^[10])

L'hydratation du ciment est un phénomène exothermique. Elle se fait en deux temps :

- **La prise** : elle débute dès que le ciment anhydre est mis en contact avec l'eau. Pendant la prise, la pâte liquide de ciment voit sa viscosité augmenter progressivement pour devenir un matériau solide à la fin de la prise. La vitesse de prise varie essentiellement en fonction de la nature du ciment, de la finesse de broyage et de la température. Il faut en moyenne quelques heures pour qu'un ciment prenne.
- **Le durcissement** : lorsque la prise du ciment est faite, l'hydratation se poursuit, entraînant une amélioration des propriétés mécaniques du matériau. Cette étape prend plusieurs semaines, voire plusieurs mois pour que l'hydratation soit totale.

- **Le mudcake**

(Brasseur 2009^[10])

Pendant le forage du puits, la boue de forage est pompée à travers le train de tiges et en sort par la tête de forage qu'elle a refroidit. Elle remonte ensuite dans l'annulaire en emportant les débris de roche issus du forage. Lorsqu'elle circule le long de la formation, une partie de l'eau de la boue est absorbée par les roches et les éléments solides contenus dans le fluide viennent former un dépôt sur les parois du trou. C'est ce qu'on appelle le *mudcake*.

- **La zone plastifiée de la formation dans la zone proche puits**

(Brasseur 2009^[10])

L'état de contrainte initial de la formation rocheuse est dans un premier temps perturbé par le forage du puits, puis est à nouveau modifié par la circulation de fluides dans le trou. Les conséquences de ces variations répétées de l'état de contrainte entraînent bien souvent l'endommagement, voire la fracturation des formations aux alentours du puits et dans le réservoir.

- **La formation rocheuse**

Au-delà de la zone perturbée par le puits de forage, on retrouve la formation rocheuse saine.

2.1.2 Chargement mécanique subi au niveau des interfaces pendant la vie du puits

(Gray 2009^[18])

Les différents composants du puits, ainsi que les interfaces qui les connectent sont soumis à des états de contraintes locaux qui évoluent tout le long de la vie du puits.

- **État initial non perturbé**

Avant le début des travaux de forage, la formation rocheuse est déjà soumise à un état de contrainte tridimensionnel dû, d'une part, au poids des terrains sur-incombants et du confinement horizontal, et d'autre part, à l'histoire géologique qu'a subi la région.

- **Forage**

Pendant le forage, un volume cylindrique de formation est enlevé. Le trou résultant étant soumis à l'état de contrainte initial, les parois de la formation environnante ont tendance à s'effondrer. Une fois le volume enlevé, la réaction sur les parois est assurée par la pression hydrostatique du fluide de forage. Celui-ci est toutefois rarement capable de maintenir en place les parois du puits. Elles se déforment jusqu'à rétablir l'équilibre.

- **Placement des tubages et cimentation**

Pour l'étape de tubage, des tubes en acier sont descendus dans le trou. Bien qu'un effort soit fait pour centrer le cuvelage dans le puits, il est difficile de contrôler précisément sa trajectoire à partir de la surface, d'autant plus que le forage s'est déformé suite à la pression des terrains. L'acier est soumis à la pression hydrostatique de la boue de forage depuis l'intérieur du tube mais aussi depuis l'annulaire qu'il forme avec les parois de la formation. Ces pressions ne sont pas toujours égales : il peut y avoir un gradient dû au frottement de la boue sur les parois. Lorsque la boue est remplacée par le lait de ciment, cela entraîne une nouvelle modification des contraintes à cause des différences de densité, ce qui conduit à la déformation du cuvelage d'acier et de la zone proche du puits.

- **Durcissement et retrait**

Comme le ciment provient d'un fluide, il n'y a pas de cisaillement dans son état de contrainte une fois solidifié. La phase de durcissement ne provoque pas de déformation du ciment, par contre il subit une réduction de volume à cause du retrait. Tant que les liens entre le ciment et l'acier ainsi que le ciment et la formation tiennent, la déformation du ciment conduit à celle du casing et de la formation rocheuse, ce qui peut les faire rentrer en plasticité, voire les amener à la rupture. Une plastification et un endommagement peuvent également se développer dans le ciment. Si un de ces liens rompt, il y a une redistribution de l'état de contrainte en fonction du moment et de l'endroit de rupture.

- **Production**

Durant la production, le puits continue à subir la pression des terrains avoisinants. A cause des phénomènes tectoniques, les contraintes engendrées sont souvent anisotropes, ce qui a pour effet de provoquer une ovalisation du puits et d'induire des contraintes de cisaillement entre les différents composants. Pour cette raison, la rupture en cisaillement des interfaces sera plus particulièrement examinée dans la suite de ce travail.

2.1.3 Influence de l'environnement chimique CO₂ sur la tenue mécanique des différents composants du puits

• Corrosion du casing

(Ropital 2009_[27])

Les environnements favorisant la corrosion des aciers dans le domaine de production des hydrocarbures sont multiples : eau liquide + CO₂, eau liquide + H₂S, eau + chlorures, acides concentrés (HCL, H₂SO₄, HF), alcools, eau + bactéries, ... Dans le cadre de ce travail, nous nous limiterons à l'étude de la corrosion par le CO₂.

Ce problème concerne essentiellement les aciers au carbone et faiblement alliés. Les types de corrosion provoqués par le CO₂ sont au nombre de quatre : corrosion généralisée (attaque de surface provoquant la formation de carbonate de fer), corrosion par piqûre (corrosion localisée intervenant à faible vitesse de circulation de l'eau), *mesa attack* (corrosion localisée due à l'instabilité de la couche de carbonate de fer) et corrosion localisée sous écoulement (arrachement des dépôts de corrosion).

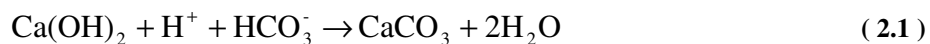
Lorsque le CO₂ se dissout dans l'eau, il forme de l'acide carbonique qui réagit avec l'acier pour former des carbonates et des hydrogencarbonates de fer. La corrosion des aciers au carbone et faiblement alliés est influencée par des facteurs chimiques, physiques et métallurgiques tels que la composition de l'eau, les conditions hydrodynamiques, la pression partielle en CO₂ et la présence éventuelle d'H₂S, la température ou encore la métallurgie des aciers.

L'oxydation de l'acier a de fortes conséquences sur la tenue mécanique des interfaces. En effet, le volume des produits de corrosion est supérieur au volume des réactifs de départ. En milieu confiné tel que le puits, cela a pour conséquence de générer des contraintes locales supplémentaires. Si cet état de contrainte devient trop important, il peut conduire à la fissuration de l'interface.

• Carbonatation du ciment

(Barlet-Gouedard 2006_[6], Barlet-Gouedard 2009_[7], Cailly 2005_[11])

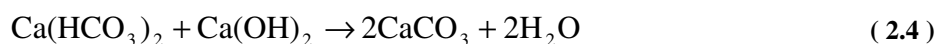
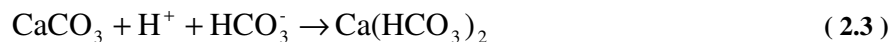
La dégradation chimique du ciment par le CO₂ entraîne des réactions de carbonatation c'est-à-dire la transformation au contact du CO₂ et en présence d'humidité de la portlandite (Ca(OH)₂ – phase hydratée du ciment) en carbonate de calcium (CaCO₃) et en eau :



Le CO₂ réagit également avec le C-S-H-gel² pour former du gel de silice (SiO₂.nH₂O) et du carbonate de calcium :



S'il y a du CO₂ en excès, celui-ci dissout le CaCO₃ précédemment formé pour créer du bicarbonate de calcium (Ca(HCO₃)₂), lui-même susceptible de réagir avec la portlandite pour former de nouveaux carbonates de calcium et de l'eau :



L'Equation (2.1) représente la phase de précipitation des carbonates de calcium (*sealing stage*), qui a pour effet de provoquer un bouchage des pores du matériau car le volume occupé par les carbonates est plus important que celui occupé par la portlandite. Par la suite les carbonates formés

² Le C-S-H-gel est un hydrate amorphe de calcium et de silice (CaO-SiO₂-H₂O). Il est issu de l'hydratation du ciment et constitue jusqu'à 70% en masse du ciment Portland hydraté.

seront dissous (*dissolution stage*) par la présence du CO₂ en excès (Equation (2.3)), ce qui ré-augmentera la porosité du matériau (Figure 2.3).

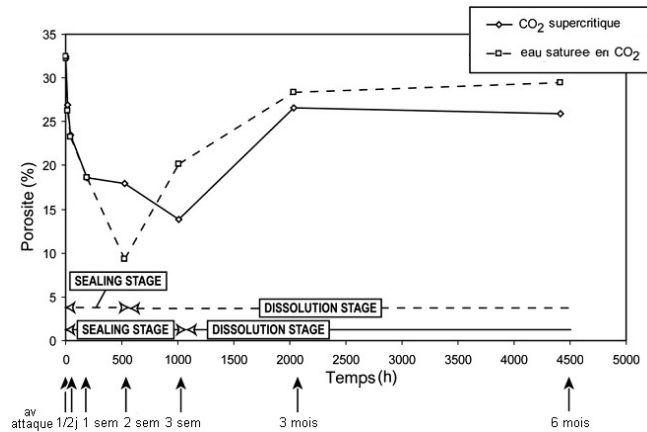


Figure 2.3 : Evolution de la porosité du ciment carbonaté (Rimmele 2008_[25])

On dénombre deux types de détériorations du ciment causées par l'injection de CO₂ au sein du puits :

- une détérioration mécanique pendant et après l'injection : des dépôts géochimiques se forment dans les pores du ciment, ce qui génère des contraintes et peut induire des fissures ;
- une détérioration chimique aux contacts ciment/acier et ciment/formation :
 - l'infiltration du CO₂ cause la carbonatation du ciment ;
 - le CO₂ injecté en excès forme des bulles de gaz fortement concentrées qui adsorbent de l'eau avec laquelle elles forment des produits qui peuvent altérer le ciment si les bulles remontent au contact du puits.

Dans le puits où la gaine de ciment se trouve au contact de l'acier du casing, la carbonatation directe du ciment par le CO₂ n'est pas seule responsable de l'altération. Celle-ci est également provoquée par les interactions entre :

- l'interface d'acier et les produits de dégradation du ciment ;
- l'interface de ciment et les produits de dégradation de l'acier.

En outre, la modification des contraintes causée par les variations de volume peut conduire au décollement entre le ciment et le casing.

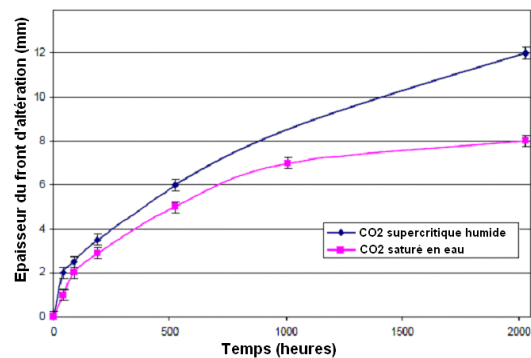
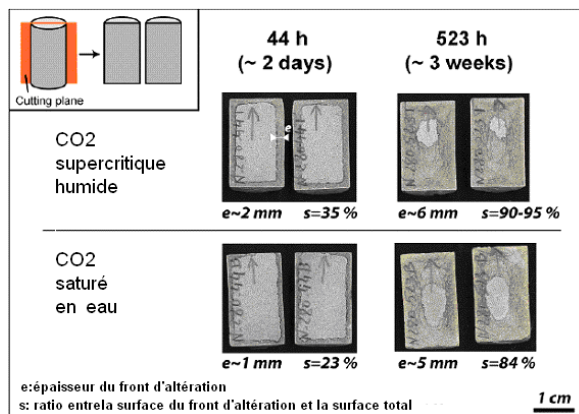


Figure 2.4 : Échantillons de ciment Portland après attaque au CO₂ pendant 2 jours et après 3 semaines à 90°C et 280 bars et cinétique de la dégradation (Barlet-Gouedard 2006_[6])

Les travaux de Barlet-Gouedard (2006_[6]) montrent qu'en conditions de puits (haute température, haute pression et contexte CO₂), une exposition de quelques jours est suffisante pour former une couche

millimétrique de carbonate de calcium à la surface du plot de ciment. Par la suite, le front de dégradation avance avec une cinétique illustrée à la Figure 2.4.

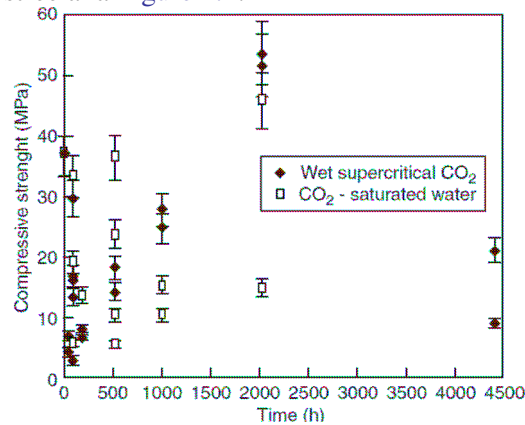


Figure 2.5 : Évolution en fonction du temps de la résistance à la compression du ciment portland sur des échantillons ayant été soumis au CO₂ (Barlet-Gouedard 2007_[5])

L'influence de l'environnement CO₂ sur le ciment a donc déjà été largement étudiée d'un point de vue physico-chimique. Bien que cette connaissance soit nécessaire, elle n'est toutefois pas suffisante pour permettre la caractérisation complète du ciment et prévoir son comportement dans le puits. C'est pour cela que des études mécaniques doivent être menées en parallèle. Barlet-Gouedard (2006_[6]) ont par exemple établi que les propriétés du ciment carbonaté sont très différentes de celles du ciment sain (Figure 2.5 pour résistance à la compression)

2.2 Caractérisation mécanique du comportement aux interfaces

Alors que les propriétés physico-chimiques des interfaces ont déjà été largement étudiées, peu de caractérisations de leur comportement mécanique ont été faites dans le cas des assemblages ciment/acier. Cette section passe en revue les différents essais (géométrie, mise en œuvre, avantages, inconvénients et adaptabilité au cas des interfaces acier/ciment) permettant de quantifier la tenue mécanique des interfaces en général.

2.2.1 Les différents modes de rupture d'une interface

(Darque-Ceretti 2003_[15], Duncan 2001_[17], Tshibangu 2009_[32])

Pour caractériser les interfaces ciment/acier, les méthodes utilisées consistent à couler une couche de ciment sur une plaque d'acier et à soumettre l'assemblage à diverses sollicitations. L'analyse du décollement de l'interface peut être menée en réalisant une analogie avec la mécanique de la rupture fragile et en utilisant l'approche globale de Griffith. Cette approche présume que les matériaux sains sont constitués de micro-fissures. Tant que l'énergie élastique accumulée dans le matériau ne dépasse pas un certain seuil, les micro-fissures sont stables, mais au-delà il y a fissuration du matériau. L'approche de Griffith est facilement transposable au cas de la rupture des interfaces.

Les modes de propagations de la rupture de l'interface peuvent être assimilés aux trois principaux modes de propagation d'une fissure (Figure 2.6) :

Mode I : ouverture ;

Mode II : glissement plan ;

Mode III : glissement anti-plan.

Pour provoquer la rupture par un de ces modes, il faut que l'énergie de Griffith correspondante G_i ($i = I, II$ ou III) accumulée dans le matériau soit supérieure à l'énergie critique d'avancement G_{iC} . Les tests décrits ci-dessous tentent de déterminer ce paramètre intrinsèque du matériau.

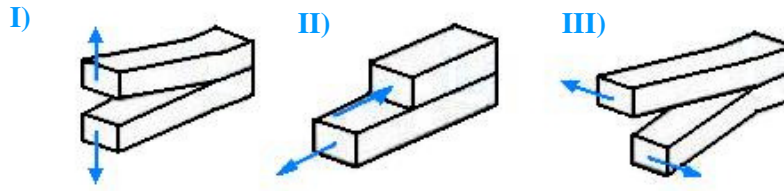


Figure 2.6 : Modes de propagation d'une fissure dans un matériau pouvant être transposés à la rupture d'une interface (I) ouverture (II) glissement plan (III) glissement anti-plan (Tshibangu 2009_[32])

- **Exemple d'essai en mode I et calcul nécessaire à la propagation de la rupture**

Pour tester le mode I de rupture, l'éprouvette est illustrée à la Figure 2.7 (a). Un point d'amorce est réalisé pour permettre une propagation statique de la rupture. L'énergie critique nécessaire à la propagation de la rupture en mode I est donnée par l'Equation (2.5).

$$G_{IC} = \frac{4 P^2}{E} \cdot \frac{3 a^2 + h^2}{b^2 h^3} \quad (2.5)$$

avec P : la charge appliquée ;
E : le module de Young du ciment ;
b : la largeur de l'éprouvette ;
h : l'épaisseur de ciment ;
a : la longueur de la fissure.

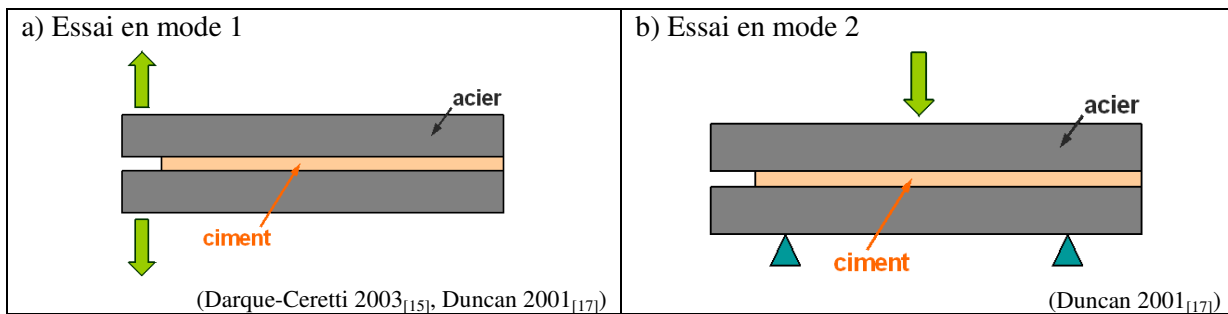


Figure 2.7 : Schémas des différents essais d'ouverture adaptés au cas des assemblages ciment/acier

- **Exemple d'essai en mode II et calcul nécessaire à la propagation de la rupture**

L'essai du mode II de rupture est présenté à la Figure 2.7 (b). L'énergie critique nécessaire à la propagation de la rupture en mode II est donnée par l'Equation (2.6).

$$G_{IIc} = \frac{9 P^2}{16 E} \cdot \frac{a^2}{b^2 h^3} \quad (2.6)$$

- **Les essais mécaniques en général**

Il est très difficile de mettre au point des essais de mode pur. C'est pour cette raison que la plupart des essais mécaniques pour tester la résistance d'une interface, travaillent en mode mixte, c'est-à-dire qu'ils associent plusieurs modes. Toute la difficulté réside alors à déterminer, de manière analytique, et à maîtriser, au cours de l'essai, la proportion de chaque mode mis en jeu.

Pour caractériser complètement une interface il faudrait pouvoir exploiter chaque essai afin d'en tirer les contraintes normales σ et tangentielles τ associées. Chaque type d'essai fournirait un couple (σ, τ) , ce qui permettrait de tracer la courbe caractéristique de l'interface dans le plan (σ, τ) .

2.2.2 Essais mécaniques de caractérisation des interfaces : Etat de l'art

(Charalambides 1989^[14], Darque-Ceretti 2003^[15], Duncan 2001^[17], Kenga 2005^{[19][20]}, Therry 2007^[28], Thomann 2005^[29])

De nombreux essais mécaniques servant à tester les interfaces ont été décrits dans la littérature. Cette section comporte un inventaire de quelques tests existants. Ils sont regroupés en fonction des efforts qu'ils mettent en œuvre (cisaillement, traction et flexion).

- **Tests de traction : prédominance du mode I**

Les phénomènes de traction ont peu d'occurrence dans le puits ; ils sont cependant utiles, car leur configuration est telle que le mode de rupture est essentiellement du mode I pur.

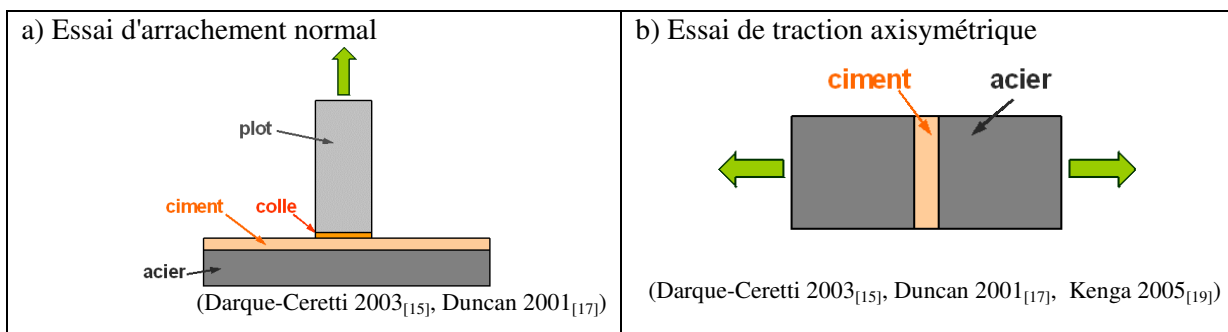


Figure 2.8 : Schémas des différents essais de traction

Essai d'arrachement normal - Figure 2.8 (a)

C'est un test facile à réaliser, mais il faut prendre garde à bien aligner le plot et la force de traction perpendiculairement à l'interface. Cet essai nécessite que la résistance à la traction de la colle soit supérieure à la force exercée. Il a été mis au point pour caractériser l'adhérence d'un film adhésif sur un substrat quelconque.

Essai de traction axisymétrique - Figure 2.8 (b)

L'essai nécessite un alignement parfait des efforts et des échantillons pour limiter tout moment. La distribution de contraintes au sein du joint n'est pas uniforme ce qui rend difficile l'interprétation des résultats. La rupture s'initiera au point de plus faible résistance du joint, ce qui peut être en plein milieu du ciment, un décollement à l'interface ou une rupture mixte ciment/interface. Il est alors malaisé de déterminer le type de rupture (cohésive ou adhésive). Cet essai a été conçu pour mesurer l'adhérence d'un film adhésif sur de l'acier.

- **Tests de cisaillement : prédominance du mode II**

Les essais de cisaillement sont les plus utilisés pour étudier les interfaces, car en conditions réelles, la rupture adhésive se produit le plus souvent par cisaillement. C'est un mode de sollicitation très présent dans le puits. Seules quelques configurations d'essais permettent de tester le mode II pur, la plupart contiennent également une proportion plus ou moins élevée de mode I.

Essai de cisaillement direct - Figure 2.9 (a)

Ce test permet de bien mettre en évidence les effets de volume (la rupture peut se produire à l'interface, dans la matrice de ciment ou être mixte). Cet essai a été développé pour tester une éprouvette de ciment coulée entre deux tôles d'acier ou deux blocs de ciments. Il s'applique donc parfaitement au cas ciment/acier.

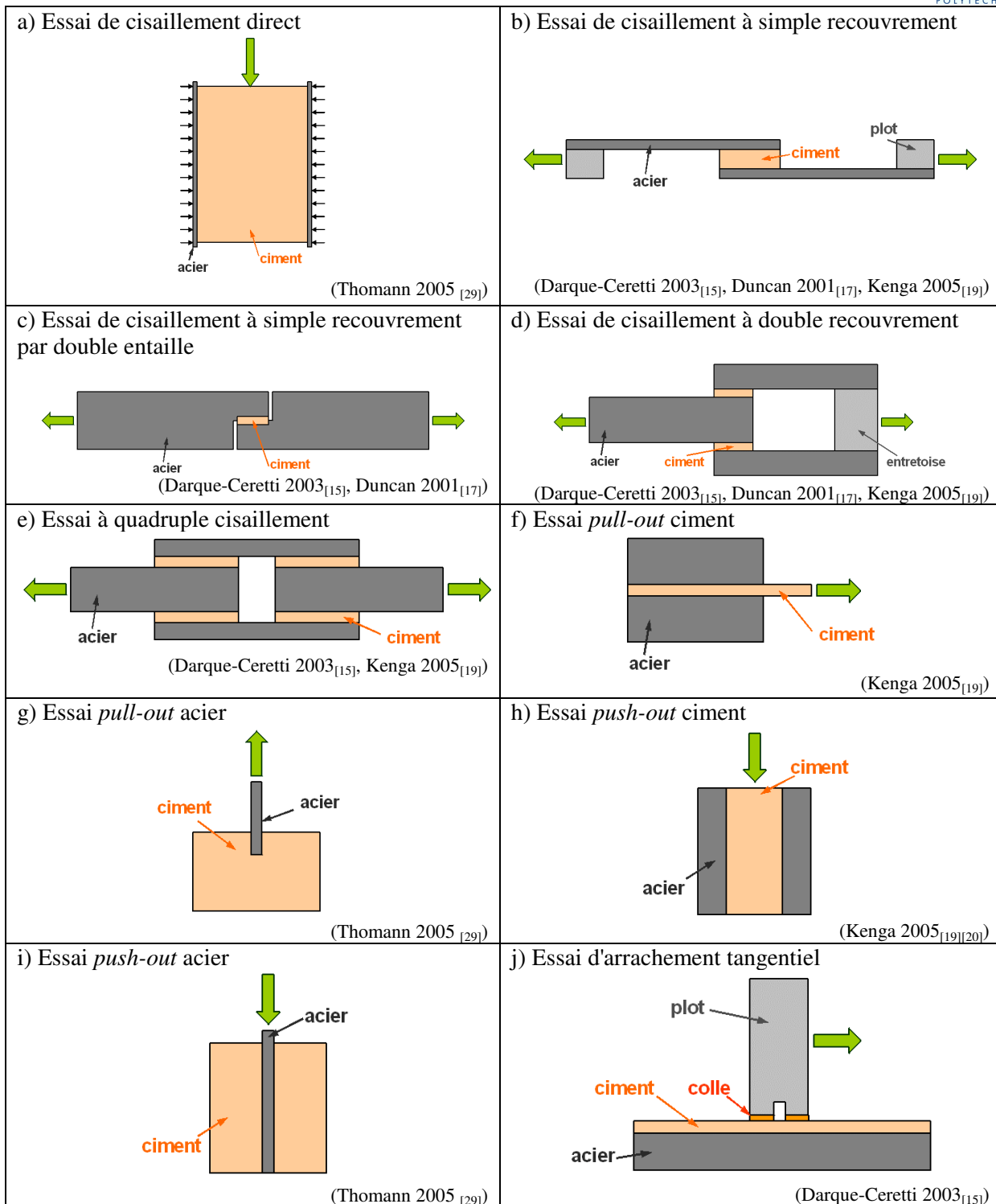


Figure 2.9 : Schémas des différents essais de cisaillement

Essai de cisaillement à simple recouvrement - Figure 2.9 (b)

C'est l'essai dont la préparation et la mise en œuvre sont les plus simples. Il peut être réalisé sur une machine de traction classique. Son principal défaut est que les efforts de traction exercés ne sont pas dans un même plan. Il impose donc un moment de flexion à chaque adhérent, et induit des contraintes normales élevées à l'interface. Pour réduire la flexion, une possibilité est de rajouter des plots afin d'aligner les forces de traction. D'autres géométries ont été mises au point pour diminuer la flexion (Figure 2.9 (c), Figure 2.9 (d) et Figure 2.9 (e)). Ces essais ont été conçus pour tester des joints adhésifs tels que des joints de colle, entre des plaques d'acier. Ils peuvent facilement être adaptés au cas

ciment/acier. On observe un pic de contrainte sur les bouts du chevauchement. C'est là que s'initie la rupture, près d'une interface.

Essai de cisaillement à simple recouvrement par double entaille - Figure 2.9 (c)

Il permet d'appliquer les efforts de traction dans un même plan. Tout en gardant une mise en œuvre simple, il est préféré à l'essai précédent car il réduit les contraintes normales. Celles-ci sont cependant toujours présentes aux extrémités du recouvrement. La rupture s'initie sur la ligne d'adhérence et s'y propage tout le long du recouvrement.

Essai de cisaillement à double recouvrement - Figure 2.9 (d)

C'est le principal dispositif utilisé pour éliminer le chargement excentré, le moment est ainsi supprimé. Cependant une flexion supplémentaire peut être induite si les bras d'acier sont sollicités par un effort qui n'est pas de la traction pure. Cette flexion est responsable de contraintes normales de traction et de compression dans le joint. Pour minimiser cet effet, il est recommandé d'y placer une entretoise rigide. Ce test permet d'éliminer une partie des inconvénients de l'essai à simple recouvrement, mais il est plus onéreux et plus compliqué à préparer.

Essai à quadruple cisaillement - Figure 2.9 (e)

C'est l'essai de cisaillement qui présente la meilleure répartition des contraintes et dont le moment global appliqué est nul. Son inconvénient est une mise en œuvre délicate et onéreuse.

Essai pull-out ciment - Figure 2.9 (f)

À l'origine conçu pour tester les matériaux composites (extraire une fibre d'une matrice polymère), cet essai ne se prête pas à la caractérisation des interfaces ciment/acier. En effet, le ciment n'ayant qu'une faible résistance en traction, verra sa ruine survenir avant la décohesion.

Essai pull-out acier - Figure 2.9 (g)

La rupture passe d'abord par l'interface ciment/acier, puis se propage latéralement dans le ciment. Cet essai a été créé pour le cas d'une plaque d'acier enchâssée dans un bloc de coulis de ciment.

Essai push-out ciment - Figure 2.9 (h)

Cet essai a été conçu pour tester des matériaux composites (effort appliqué sur une fibre d'une matrice polymère), mais a déjà été adapté au cas ciment/acier (Kenga 2005_[20]).

Essai push-out acier - Figure 2.9 (i)

Cet essai a été élaboré pour le cas d'une plaque d'acier fixée dans un bloc de ciment.

Essai d'arrachement tangentiel - Figure 2.9 (j)

Cet essai nécessite que la résistance au cisaillement de la colle soit supérieure à la force exercée. Cet essai a été mis au point pour caractériser l'adhérence d'un film adhésif sur un substrat quelconque.

- **Tests de flexion : modes I et II en proportions équivalentes**

Avec le cisaillement, la flexion aux interfaces est un trajet de chargement mécanique privilégié du point de vue des sollicitations locales dans la zone proche puits. La flexion fait intervenir les modes de rupture I et II, dans des proportions équivalentes.

Une partie des assemblages pour essais de flexion présentés ci-dessous, sont pourvus d'une pré-entaille. Celle-ci a pour but de supprimer, ou tout du moins de limiter, l'effet dynamique de la propagation des fissures le long de l'interface.

Essai de flexion 3 points - Figure 2.10 (a)

Cet essai a pour but de provoquer la rupture de l'interface en déformant le barreau d'acier. Il est plus complexe et plus complet que les essais de cisaillement car le ciment se voit affecté à la fois en traction et en compression, ce qui peut provoquer une fissuration, voire un décollement du ciment par

rapport au substrat. Cet essai sert à tester l'adhérence d'une mince couche d'adhésif moulé sur un prisme en béton. Il peut aisément être adapté au cas ciment/acier.

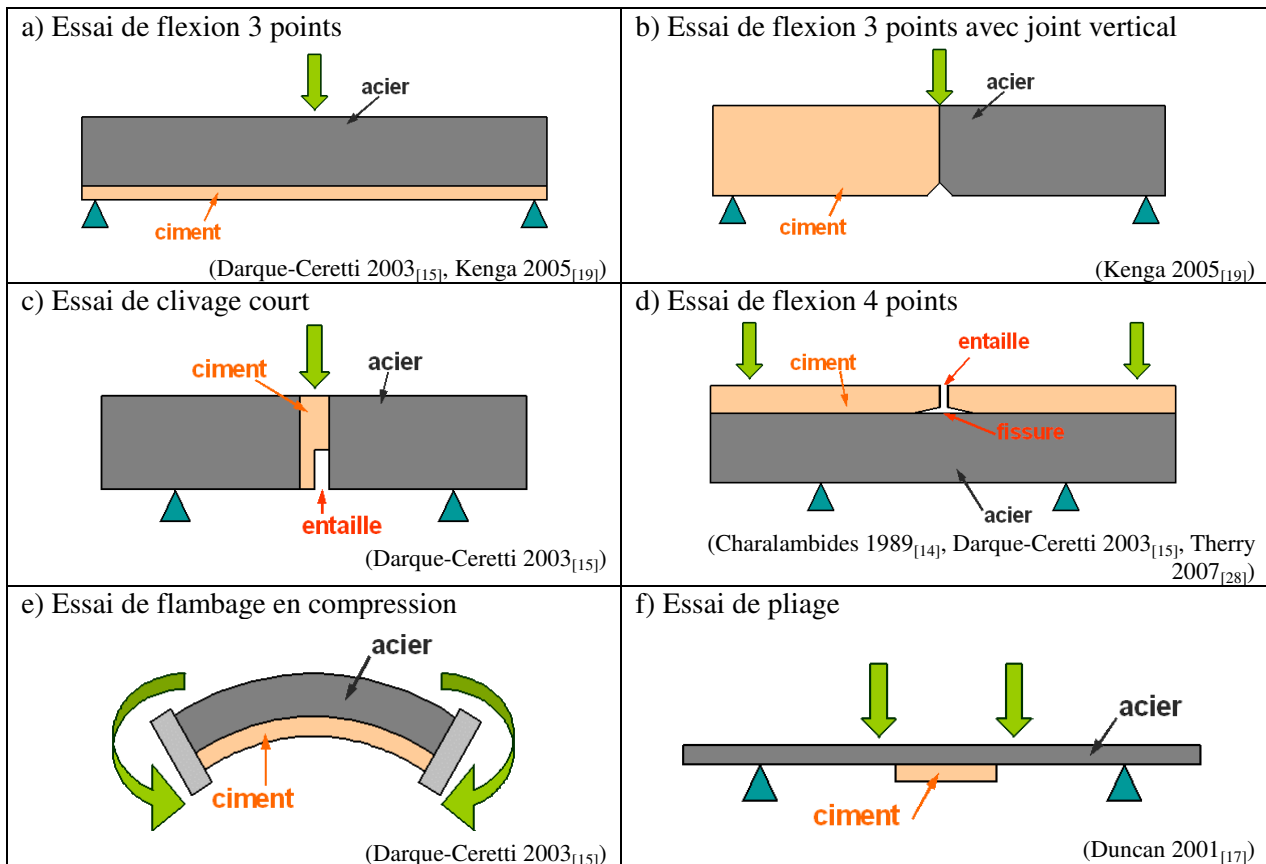


Figure 2.10 : Schémas des différents essais de flexion

Essai de flexion 3 points avec joint vertical - Figure 2.10 (b)

Le joint vertical permet d'obtenir le long de l'interface, un chargement mécanique différent par rapport à l'essai de flexion 3 points et une pré-entaille peut être réalisée pour faciliter l'initiation de la rupture. Cet essai a été élaboré pour tester la résistance de deux prismes d'acier collés par un adhésif. Il est facilement transposable au cas ciment/acier.

Essai de clivage court - Figure 2.10 (c)

Une pré-entaille est réalisée dans le ciment pour initier la rupture interfaciale. L'élaboration de l'entaille est une opération très délicate qui conditionne la suite de l'essai. Cet essai a été conçu pour tester un film adhésif réunissant deux tôles minces.

Essai de flexion 4 points - Figure 2.10 (d)

Deux efforts sont exercés sur les extrémités de l'échantillon pour provoquer la propagation de la fissure le long de l'interface. Cet essai permet de tester la résistance à la fracturation d'une interface en la sollicitant à la fois normalement et en cisaillement.

La Figure 2.11 met en évidence l'importance de la pré-fissure. Lorsque l'échantillon n'est pas préalablement entaillé (A), il subit une surcharge qui entraîne une propagation catastrophique de la fissuration. Par contre, si une entaille a auparavant été réalisée (B), on observe une propagation stable de la fissure qui se traduit par un plateau de la force.

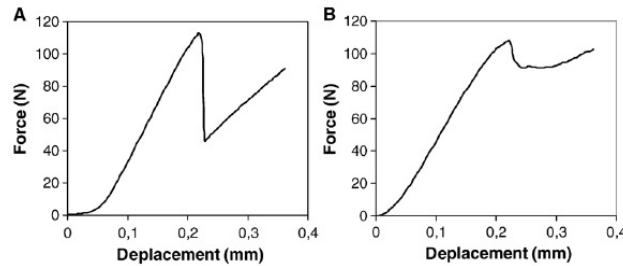


Figure 2.11 : Courbes effort-déplacement de l'essai de flexion 4 points (A) sans pré-entaille, (B) avec pré-entaille (Therry 2007_[28])

Essai de flambage en compression - Figure 2.10 (e)

Cet essai est particulièrement adapté à l'adhérence des dépôts fragiles (= le ciment) sur un substrat ductile (= l'acier). Il diffère d'un essai de flexion 4 points par l'absence de points d'appuis.

Essai de pliage - Figure 2.10 (f)

Deux efforts sont exercés sur la tôle aux extrémités du ciment. C'est un essai de flexion 4 points.

- **Conclusion de la présentation des essais mécaniques servant à caractériser les interfaces**

La liste d'essais présentée ci-dessus est non exhaustive, et il faut rester conscient qu'ils ne sont pas tous applicables au cas des interfaces ciment/acier. Bien qu'ils essayent de ne faire intervenir qu'un mode pur de rupture, ils travaillent le plus souvent en mode mixte. Pour cette raison, les résultats sont souvent difficiles à analyser car on ne maîtrise pas parfaitement le chemin de chargement.

Comme déjà évoqué ci-dessus, les sollicitations du système ciment-casing sont principalement de type cisaillement. Pour cette raison, dans la suite de ce travail, les essais sélectionnés seront essentiellement des essais de cisaillement. La modélisation numérique se fera à partir des résultats obtenus à l'IFP lors de projets précédents (Y. Kenga_[20]) sur une configuration de *push-out*. Des essais mécaniques de cisaillement à simple et double recouvrement seront également menés. Ces configurations d'assemblages ont été choisies pour débiter l'étude de caractérisation mécanique des interfaces ciment/acier, car les éprouvettes sont faciles et peu onéreuses à réaliser d'autant plus que le dispositif d'essai est simple à mettre en œuvre.

2.3 Notions d'adhérence et de rupture

Ce paragraphe précise des notions qui seront utilisées dans la suite du rapport, car elles prêtent parfois à confusion : adhérence et frottement, interface et interphase, ainsi que endommagement, fissuration et rupture.

2.3.1 Adhérence et frottement

(Cangémi 1997_[12], Darque-Ceretti 2003_[15])

- **Adhérence**

De nombreuses recherches ont été menées pour analyser, comprendre et quantifier les phénomènes qui assurent le contact entre des corps solides distincts (= adhérence). Plusieurs théories ont été mises au point pour expliquer les phénomènes d'adhésion. L'adhérence entre deux solides résulte de la combinaison de plusieurs de ces phénomènes. Ces théories bien que basées sur des approches différentes, sont complémentaires et ne s'invalident pas les unes des autres.

Théorie mécanique (Mac Bain et Hopkins 1925)

Lors de sa mise en place, l'adhésif liquide épouse la surface du substrat. Lorsqu'il durcit, il se produit un ancrage mécanique entre l'adhésif et l'adhéré. L'adhésion s'améliore donc quand la rugosité

augmente. Toutefois, il ne faut pas dépasser un certain seuil au-delà duquel le mouillage de l'adhésif sur l'adhéré devient mauvais.

Théorie de l'adsorption thermodynamique (Eley D.D. 1961)

Le mouillage d'un adhésif sur la surface de l'adhérent induit des liaisons de type intermoléculaire. L'adhésion est alors assurée par l'énergie libre de surface. Expérimentalement, l'énergie de rupture est beaucoup plus élevée car le phénomène d'adhésion n'explique pas tout.

Théorie électrostatique (École russe : Deryagin 1955)

Des charges de signe opposé existent sur les surfaces respectives de l'adhésif et du substrat. Elles seraient dues à un transfert électronique entre les surfaces des matériaux de nature différente. L'interface formerait alors un condensateur plan.

Théorie des couches de faible cohésion (Bikerman 1968)

L'adhésion entre deux corps n'est jamais purement interfaciale : il existe une zone de transition (= interphase) de nature chimique différente de celle des deux corps constituant le système adhésif/substrat. L'hypothèse fondamentale est que la cohésion intrinsèque de la zone de transition est plus faible que l'adhésion à l'interface. La rupture adhésive se situera alors préférentiellement au sein de l'interphase.

Dans la suite de ce travail nous utiliseront systématiquement la notion d'adhérence, car c'est un concept physique macroscopique dont la valeur est déterminée expérimentalement par des essais mécaniques. L'adhérence est un "phénomène d'attraction locale de deux corps solides en contact due à l'action des forces moléculaires"³. Pour maintenir un système assemblé, elle fait intervenir l'énergie d'adhésion, mais également d'autres phénomènes tels que des dissipations d'énergie.

La nature de l'adhérence entre deux surfaces dépend des matériaux. Les forces d'adhésion ne sont pas encore clairement identifiées et les assimiler aux forces de cohésion⁴ n'est pas toujours justifié. Il ressort cependant que la plupart des forces adhésives sont de type intermoléculaire (type *Van Der Waals*).

- **Frottement**

Le frottement est la "résistance qui freine ou empêche le mouvement relatif de deux corps en contact"³. Il est le résultat d'un ensemble de phénomènes mécaniques et physiques ce qui rend difficile l'élaboration d'un modèle unifié.

Les lois classiques du frottement s'énoncent sous la forme :

$$|F| = \mu \cdot N \tag{2.7}$$

avec F : la force tangentielle qui s'oppose au glissement ;

³ Définitions provenant du "Grand dictionnaire terminologique" [24]

⁴ La cohésion est la " force qui unit les unes aux autres les molécules d'une substance "³. Les forces assurant la cohésion des matériaux, appartiennent à deux catégories faisant intervenir des niveaux de liaisons différents : les liaisons interatomiques et les liaisons intermoléculaires.

Types de liaisons		Énergie (KJ/mole)	Distance d'interaction (Å)
Liaisons interatomiques	Ionique	160 – 600	1 – 2
	Covalente	300 – 800	1 – 2
	Métallique	300 – 800	1 – 2
Liaisons intermoléculaires Van Der Waals	Hydrogène	8 – 40	< 2
	Dispersion	< 10	3 – 5
	Orientation	< 10	3 – 5
	Induction	< 10	3 – 5

Forces de cohésion (Roche 1991)

- N : la force normale de pression ;
- $\mu = \tan \theta$: le coefficient de frottement qui est fonction de la rugosité de la surface
(indépendant de N et de l'aire apparente de contact) ;
- θ : l'angle d'inclinaison d'une aspérité.

La principale critique est que ces modèles sont non-dissipatifs alors que le frottement est un phénomène dissipatif.

La théorie adhésive du frottement attribue trois causes principales au frottement :

- la contrainte d'écoulement plastique p des aspérités en contact, soumises à la pression normale;
- la formation de jonctions adhésives entre les surfaces de ces aspérités, où un contact intime est établi ;
- la contrainte de cisaillement limite s du matériau le moins résistant.

Le coefficient de frottement s'écrit alors : $\mu = \frac{s}{p}$; il est dû à l'indentation des aspérités du matériau le plus dur sur la surface du plus mou.

"L'origine du frottement dépend du degré d'intimité du contact existant entre les surfaces. La nature de celui-ci dépend des matériaux en présence, de la morphologie et de la géométrie des surfaces, ainsi que de l'environnement immédiat." (Cangémi 1997_[12])

2.3.2 Endommagement, fissuration et rupture

(Lemaitre et Chaboche 1985_[22])

- **Endommagement**

Dans le ciment, il existe des micro-fissures initiales présentes avant toute sollicitation. Elles se développent par des mécanismes de rupture fragile lorsque le matériau est soumis à un effort. On différencie trois stades d'endommagement qui ont lieu à volume constant :

1. pour de faibles sollicitations, les déformations engendrées sont quasi réversibles et peuvent être considérées comme élastiques avec une faible viscosité ;
2. pour des sollicitations supérieures à la limite d'élasticité du matériau, les micro-fissures commencent à se propager et conduisent à un niveau macroscopique des déformations permanentes ;
3. pour des sollicitations encore plus importantes, les micro-fissures s'orientent par rapport à la sollicitation et l'endommagement devient fortement anisotrope.

- **Fissuration**

Au delà des trois stades d'endommagement cités ci-dessus, si la sollicitation augmente encore, des fissures macroscopiques apparaissent. La contrainte nécessaire pour provoquer de nouvelles déformations diminue et le volume spécifique augmente

- **Rupture**

La rupture finale du matériau intervient lorsque les fissures macroscopiques se rejoignent pour former une surface de discontinuité au travers du matériau : un matériau est rompu, c'est-à-dire totalement endommagé, lorsqu'une fissure macroscopique est amorcée et le traverse de part en part.

2.3.3 Interface et interphase

(Cangémi 1997_[12])

Dans la réalité, l'interface ne se réduit pas à une simple surface de discontinuité entre les deux matériaux. Les procédés d'élaboration d'assemblage peuvent conduire à une modification chimique des

deux matériaux en présence et créer ainsi une zone interfaciale d'épaisseur non nulle, l'interphase, où se concentrent les défauts.

Les différentes notions à connaître pour étudier et prévoir la rupture d'une interface sont la qualité mécanique des différentes phases (matériaux sains et interphase) et l'adhésion surfacique faisant intervenir la notion d'interaction superficielle. Il faut également prendre en compte le frottement résiduel après décohéation dont l'existence a été mise en évidence expérimentalement mais qui est rarement pris en compte dans les modèles existants.

- **Rupture adhésive / cohésive**

La rupture peut être soit adhésive (aux interfaces interphase/matrice ou interphase /ciment), soit cohésive (au sein même de l'interphase), voire un mixte entre ces deux modes (Figure 2.12).

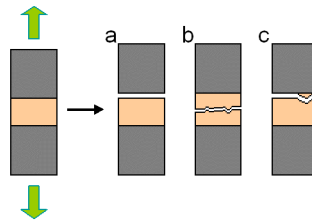


Figure 2.12 : Rupture (a) adhésive, (b) cohésive ou (c) mixte

2.4 Description de la fissuration aux interfaces par les modèles de zone cohésive (MZC)

2.4.1 Les MZC

(Laverne 2010_[21])

Les modèles de zone cohésive (MZC) sont utilisés pour réaliser des simulations numériques en mécanique de la rupture. D'après Laverne_[21], ils sont en général préférés aux approches numériques classiques pour décrire les phénomènes de fissuration car ils permettent d'intégrer d'une part des critères d'amorçage (taux de restitution d'énergie ou critères en contrainte) et d'autre part une mécanique continue de l'endommagement. Les MZC sont par exemple employés dans des applications de rupture fragile ou ductile, de propagation par fatigue, d'évolution dynamique de fissures, ...

Il existe diverses méthodes numériques permettant de représenter les MZC. Parmi celles-ci, on retrouve notamment les éléments finis d'interface, les éléments à discontinuité interne, les conditions aux limites mixtes, les approches multi-échelles ou encore les éléments finis étendus. Certaines de ces méthodes seront exposées plus longuement au paragraphe 2.4.3.

2.4.2 Loi d'adhérence de Cangémi (1999_[12]) : un modèle corrélant adhérence et frottement

(Cangémi 1997_[12])

Plusieurs lois d'adhérence ont été développées pour modéliser le comportement des interfaces. La plupart adaptent aux interfaces, la loi de Coulomb qui couple la cohésion au frottement pour les matériaux fragiles. L'une d'entre elles est le modèle d'interface proposé par L. Cangémi_[12]. Il s'agit d'une loi couplant adhérence et frottement, dont les paramètres sont les coefficients de complianc⁵ caractéristiques de la surface et de la densité d'énergie d'adhésion de Dupré.

⁵ "Capacité du système mécanique à s'ajuster aux contraintes et aux forces qui s'exercent sur lui." _[24]

• **Importance du couplage adhérence/frottement**

Dans sa thèse sur les matériaux composites, Cangémi^[12] a réalisé des simulations de micro-indentation d'une fibre dans une matrice. Il a testé diverses lois d'interface (une loi frottante, une loi adhérente et une loi couplant le frottement à l'adhérence) qu'il a ensuite comparées à ses résultats expérimentaux (Figure 2.13). La courbe d'adhésion correspond à la décohésion de la fibre qui a perdu toute adhérence au niveau du plateau. La courbe de frottement correspond au glissement de la fibre hors de la matrice. L'essai réel est une combinaison de ces phénomènes. Il en ressort l'importance d'utiliser une loi couplant frottement et adhérence pour modéliser l'entièreté du comportement de la rupture d'une interface.

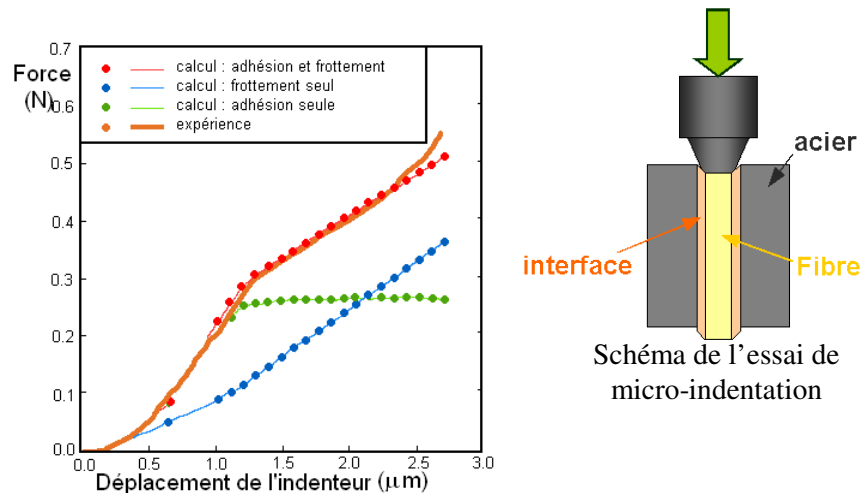


Figure 2.13 : Illustration de l'importance du couplage entre l'adhérence et le frottement (Cangémi 1997^[12])

• **Variables intervenant dans la loi**

L'interphase est assimilée à une interface Γ_C mettant en contact deux corps Ω^1 et Ω^2 , d'épaisseur nulle et qui possède un comportement thermodynamique spécifique.

$$\beta \left\{ \begin{array}{l} : \text{représente l'intensité d'adhésion ;} \\ \bullet \text{ traduit la proportion de liens adhésifs actifs ;} \\ \bullet \text{ p peut être assimilé à une variable d'endommagement d'interface } D : \\ = 1 - D \quad \text{avec } D = \frac{\text{aire endommagée}}{\text{aire totale}} \\ \in [0, 1] \left\{ \begin{array}{l} \beta = 0 \quad \text{pas d'adhérence} \\ 0 < \beta < 1 \quad \text{adhérence partielle} \\ \beta = 1 \quad \text{adhérence totale} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$[u]$: le déplacement relatif d'une particule de Γ_C .

$\left. \begin{array}{l} C_N \\ C_T \end{array} \right\}$: les coefficients de compliance caractéristiques de la surface.

β et $[u]$ sont reliés par une loi de compliance : pour une valeur donnée des coefficients C_N et C_T ainsi que pour un état adhésif β donné, l'interface est capable d'emmagasiner une énergie élastique

proportionnelle au saut de déplacement entre les deux bords en contact de Ω^1 et Ω^2 . L'introduction de cette loi de compliance permet d'obtenir un passage continu de l'état adhésif à l'état frottant.

w : la densité d'énergie d'adhésion de Dupré.

$\left. \begin{matrix} R_N \\ R_T \end{matrix} \right\}$: les forces de réaction de contact associées à $[u_N]$ et $[u_T]$.

μ : le coefficient de frottement associé à un frottement de type Coulomb.

Il permet de rendre compte d'un effet de résistance au cisaillement, proportionnel au niveau de pression R_N présent à l'interface.

$\left. \begin{matrix} \lambda \\ > 0 \end{matrix} \right\}$: le multiplicateur plastique

Le multiplicateur plastique est déterminé par la condition de consistance qui fait le lien entre la vitesse de déplacement plastique $[\dot{u}^p]$ à la force associée R : $\dot{u}^p = \lambda \frac{\partial Q}{\partial R}$ avec Q le potentiel plastique.

b : le coefficient de viscosité pour modéliser un comportement adhésif de type visqueux

• **Loi d'interface**

La loi d'interface de Cangémi_[12] se décompose en trois parties :

- une loi normale – adhésive (Equation (2.8)) qui reproduit le comportement normal de l'interface ;
- une loi adhésive – frottante (Equation (2.9)) qui représente le comportement tangentiel de l'interface ;
- une loi d'adhérence irréversible (Equation (2.10)) qui régit la dégradation de l'adhérence du contact.

C'est un modèle d'interface avec comportement tangentiel frottant et les processus adhésifs mis en jeu sont irréversibles et dissipatifs. L'évolution de l'interface ne peut aller que vers un décollement sans possibilité de recollement.

Loi normale-adhésive

$$\begin{cases} R_N - C_N \cdot [u_N] \cdot \beta^2 \geq 0, [u_N] \leq 0 & (1) \\ (R_N - C_N \cdot [u_N] \cdot \beta^2) \cdot [u_N] = 0 & (2) \end{cases} \quad (2.8)$$

Mécaniquement, cette loi signifie que tant que l'adhérence est active ($\beta \neq 0$)

- si la situation est compressive, $R_N \geq 0$ l'équation (1) est satisfaite et l'équation de complémentarité (2) donne $[u_N] = 0$: les bords de l'interface ne subissent pas de déplacement relatif normal ;
- si c'est une situation de traction, $R_N = C_N \cdot [u_N] \cdot \beta^2 < 0$, alors par l'équation de complémentarité (2) $[u_N] < 0$: les bords de l'interface s'éloignent l'un de l'autre.

Par contre, lorsque l'adhérence est rompue ($\beta = 0$), la loi (2.8) est équivalente à une loi de contact

normal unilatéral classique $\begin{cases} R_N \geq 0, [u_N] \leq 0 & (1) \\ R_N \cdot [u_N] = 0 & (2) \end{cases}$

Loi adhésive-frottante

Il s'agit d'une loi de frottement de type Coulomb avec une résistance supplémentaire due à l'adhérence :

$$\begin{cases} g_N = C_N \cdot [u_N] \cdot \beta^2 & , & g_T = C_T \cdot [u_T] \cdot \beta^2 \\ |R_T - g_T| \leq \mu \cdot |R_N - g_N| \\ |R_T - g_T| < \mu \cdot |R_N - g_N| \Rightarrow [\dot{u}_T] = 0 \\ |R_T - g_T| = \mu \cdot |R_N - g_N| \Rightarrow \exists \lambda > 0 / [\dot{u}_T] = \lambda \cdot (R_T - g_T) \end{cases} \quad (2.9)$$

Le terme $R_x - C_x \cdot [u_x] \cdot \beta^2$ représente l'effort réel exercé sur l'interface dans les directions normale ($x=n$) et tangentielle ($x=t$).

- Lorsque l'interface subit un effort de traction, la loi normale adhésive (2.8) donne $R_N = C_N \cdot [u_N] \cdot \beta^2$ et ce qui implique pour le comportement tangentiel : $R_T = C_T \cdot [u_T] \cdot \beta^2$. La résistance tangentielle est principalement due à la présence de liaisons adhésives et il n'y a pas de frottement.
- Dans une situation de compression, la loi de comportement normal (2.8) donne $[u_N] = 0$.
Lorsque l'adhérence est active ($\beta \neq 0$),

- tant que le seuil de Coulomb n'est pas atteint $|R_T - C_T \cdot [u_T] \cdot \beta^2| < \mu \cdot |R_N|$, la force tangentielle n'est pas suffisante pour vaincre le frottement, et il n'y a pas de déplacement relatif tangentiel des bords de l'interface $[\dot{u}_T] = 0$;
- si le seuil de Coulomb est atteint $|R_T - C_T \cdot [u_T] \cdot \beta^2| = \mu \cdot |R_N|$, une résistance frottante se développe et s'oppose au glissement. Les bords de l'interface glissent l'un sur l'autre avec une vitesse positive $[\dot{u}_T] > 0$.

Après que l'adhérence soit rompue ($\beta = 0$), les glissements macroscopiques interviennent et l'évolution est alors régie par une loi de frottement de Coulomb classique : $|R_T| \leq \mu \cdot |R_N|$.

Adhérence irréversible

La loi d'évolution adhésive est donnée par :

$$\begin{cases} \beta(0) = \beta_0 \in [0, 1[\\ b\dot{\beta} = -[w - (C_N \cdot [u_N]^2 + C_T \cdot [u_T]^2) \cdot \beta] \end{cases} \quad (2.10)$$

L'expression (2.10) signifie que tant que l'expression $(C_N \cdot [u_N]^2 + C_T \cdot [u_T]^2) \cdot \beta$ reste inférieure à la valeur seuil d'énergie w , $\dot{\beta} = 0$ et dès qu'elle dépasse w , $\dot{\beta}$ diminue : le matériau subit un endommagement.

La faiblesse de cette loi est qu'il n'existe pas d'essais mécaniques qui permettent directement de trouver la valeur des paramètres C_N , C_T et w . Il est nécessaire de réaliser une analyse paramétrique afin de caler les résultats de la modélisation sur les résultats expérimentaux. Il faut toutefois faire attention à la vraisemblance des propriétés ainsi déterminées car différents jeux de paramètres peuvent mener à une même réponse du modèle.

2.4.3 Méthodes numériques associées

(Tshibangu 2008_[31])

Selon le logiciel de modélisation employé, les discontinuités telles que les interfaces peuvent être représentées de manière différente : éléments joints, éléments cohésifs ou interfaces cohésives. Ces éléments s'intègrent dans des codes de calculs aux éléments finis. La méthode des éléments finis est une méthode de résolution numérique d'équations aux dérivées partielles sur un domaine. Avec les conditions initiales du problème et les conditions aux limites du domaine, la méthode aux éléments finis fournit une solution approchée en discrétisant un problème initialement continu. La discrétisation a pour but de réduire le nombre de calcul. Elle est à la fois spatiale et temporelle :

- le domaine continu est maillé et les équations aux dérivées partielles sont résolues aux points de Gauss des éléments ;

■ les équations continues sont discrétisées dans le temps, elles ne sont résolues qu'à certains instants.

• **Les éléments joints**

(Beer 1992_[8], Tshibangu 2008_[31])

Les éléments joints sont préférentiellement utilisés dans les codes de géomécanique (UDEC, BEFE, FLAC, ...). Ils servent à représenter les fractures et les joints, mais peuvent être adaptés à tous les types d'interfaces.

Les éléments joints permettent de connecter deux éléments qui voient un déplacement discontinu l'un par rapport à l'autre. Un élément joint linéaire possède quatre nœuds qui sont connectés à un élément *top* et un élément *bottom* (Figure 2.14). Au début de l'analyse, les nœuds en vis-à-vis (1 avec 2 et 3 avec 4) sont confondus. Par la suite, on leur affecte des valeurs de déplacement différentes, ce qui provoque la déformation de l'élément joint. Le mouvement relatif entre les éléments *top* et *bottom* conduit à deux modes de déplacements différents :

Δ_n ouverture
 Δ_t glissement

(avec *n* et *t* respectivement direction normale et direction tangentielle)

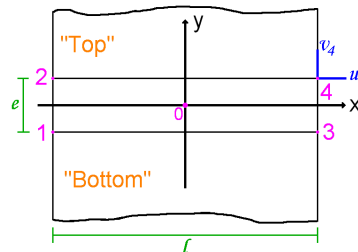


Figure 2.14 : Géométrie d'un élément joint 2D (Beer 1992_[8])

Calcul de la matrice de rigidité

Dans le repère *x*, *y*, la matrice de déplacement relatif d'un point de la discontinuité se définit comme suit :

$$\{\Delta\} = \begin{Bmatrix} \Delta_n \\ \Delta_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v \\ u \end{Bmatrix}_{top} - \begin{Bmatrix} v \\ u \end{Bmatrix}_{bot} \quad (2.11)$$

avec *u* : le déplacement tangentiel du point correspondant ;
v : le déplacement normal du point correspondant.

Le vecteur force par unité de surface $\{F\}$ agissant en un point de l'élément joint :

$$\{F\} = [K] \cdot \{\Delta\} \quad (2.12)$$

où $[K]$ est la matrice de rigidité du joint :

$$K = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 \\ 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

avec K_{nn} : Rigidité normale du joint
 K_{tt} : Rigidité tangentielle du joint \rightarrow La raideur représente le module d'élasticité du joint divisé par son épaisseur : $K = E/e$

Les propriétés du joint peuvent être introduite dans une modélisation aux éléments finis.

Endommagement : comportement non linéaire

Mode ouverture :

Dans les problèmes d'ouverture de discontinuité, la raideur normale du joint passe d'une valeur infinie lorsqu'il est complètement fermé, à zéro quand il est ouvert.

Pour un joint en compression $\Delta_n < 0$:
$$K_{mn} = \frac{1}{(\Delta_{n \max} + \Delta_n)^2} \quad (2.14)$$

ce qui donne :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{pour } \Delta_n = -\Delta_{n \max} & \rightarrow K_{mn} \mapsto \infty \\ \text{pour } \Delta_n = 0 & \rightarrow K_{mn} = \frac{1}{\Delta_{n \max}^2} \end{array} \right.$$

Pour l'implémentation numérique, il est impossible de définir une raideur infinie, K_{mn} est alors limité à une valeur pic K_{mn}^P .

Pour un joint en traction $\Delta_n > 0$:
$$K_{mn} = 0 \quad (2.15)$$

Pour l'implémentation numérique, on garde une valeur résiduelle de la raideur K_{mn}^R .

Mode cisaillement :

En cisaillement, la variation de la raideur est très rapide, le déplacement sera très faible jusqu'à ce que la contrainte critique de cisaillement soit atteinte. Le glissement se produit quand le critère (par exemple la condition de Mohr-Coulomb) est rencontré :

$$|F_t| = -F_n \cdot \tan \phi + c \quad (2.16)$$

avec ϕ : l'angle de frottement ;

c : la cohésion.

Avant le critère, le glissement est élastique et réversible et la raideur tangentielle est infinie. Une fois atteint, la raideur chute à zéro. Pour des raisons numériques, la raideur tangentielle est bornée entre une valeur pic K_{tt}^P et une valeur résiduelle K_{tt}^R .

- **Les éléments cohésifs (Abaqus™)**

(Abaqus™ 2009_[1], Tshibangu 2008_[31])

Les éléments cohésifs sont utilisés par le logiciel de modélisation mécanique Abaqus™ avec lequel toutes les simulations présentées dans ce travail ont été réalisées.

Les éléments cohésifs ont été développés pour modéliser le comportement de joints adhésifs, d'interfaces dans les milieux composites ainsi que d'autres situations où l'intégrité et la résistance des interfaces sont essentielles. Deux comportements cohésifs sont possibles : le premier permet de représenter des adhésifs de type colle dont les propriétés telles que la raideur et la résistance peuvent être mesurées expérimentalement ; le second implique des situations où l'interface a une épaisseur très faible, voire nulle. L'analyse est alors régie par ses paramètres de rupture tels que l'énergie nécessaire à la fracturation. Ces comportements permettent de modéliser le chargement initial, l'endommagement initial et sa propagation jusqu'à la rupture du matériau. Avant l'initiation de l'endommagement, le comportement de l'interface est considéré comme élastique linéaire vis-à-vis de la dégradation de la raideur sous chargement en tension ou en cisaillement, mais celle-ci n'est pas affectée par de la compression pure.

Il faut correctement définir l'orientation des éléments cohésifs (Figure 2.15) : c'est elle qui impose la direction de l'épaisseur de l'interface et permet de différencier les comportements tangentiels et normaux. Dans l'épaisseur, la zone cohésive ne peut être maillée que par un seul élément. Contrairement aux éléments de type joint, les éléments cohésifs ont une épaisseur initiale non nulle.

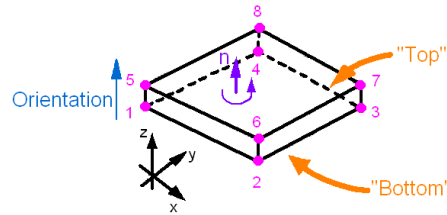


Figure 2.15 : Géométrie d'un élément cohésif 3D (Abaqus™ 2009_[1])

Calcul de la matrice de rigidité

Le comportement élastique de l'interface est décrit par :

$$\{t\} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{nt} \\ K_{tn} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} = K\varepsilon \quad (2.17)$$

avec $\{t\}$: le vecteur des contraintes nominales $\rightarrow t_n = \frac{F_n}{A}$ et $t_t = \frac{F_t}{A}$

avec F : la force appliquée sur l'élément ;
 A : l'aire de départ de l'élément ;

$\{\varepsilon\}$: le vecteur des déformations nominales le long de l'interface

$$\rightarrow \varepsilon_n = \frac{\Delta_n}{e} \text{ et } \varepsilon_t = \frac{\Delta_t}{e}$$

avec Δ : le déplacement relatif des bords de l'élément ;
 e : l'épaisseur de départ de l'élément ;

$[K]$: la matrice constitutive élastique des rigidités

$$\rightarrow K = \frac{E}{e} \quad (E : \text{Module d'élasticité})$$

K_{nt} et K_{tn} valent 0 s'il n'y a pas de couplage (thermique ou autre)
 n et t : respectivement la direction normale et la direction tangentielle.

Endommagement

Au-delà du comportement linéaire de la zone cohésive, il est possible de modéliser une évolution progressive de l'endommagement en définissant un ou plusieurs mécanismes d'initiation de la rupture, de propagation de l'endommagement ainsi qu'en choisissant un mode d'enlèvement des éléments qui ont atteint la ruine totale

Critère d'initiation :

L'initiation de l'endommagement correspond au début de la détérioration du comportement du matériau. La dégradation commence quand les contraintes ou les déformations atteignent une valeur critique d'initiation spécifiée par l'utilisateur.

Critère de propagation :

Les lois d'évolution de l'endommagement décrivent le taux de dégradation de la raideur du matériau lorsque le critère d'initiation correspondant est atteint. Une variable D représente l'endommagement global du matériau ($D=0$: matériau sain; $D=1$: matériau totalement endommagé). Les contraintes sont fonctions de D :

$$t_n = \begin{cases} (1-D) \cdot \bar{t}_n & \bar{t}_n \geq 0 \\ \bar{t}_n & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{pas d'endommagement de la raideur normale}) \quad (2.18)$$

$$t_s = (1-D) \cdot \bar{t}_s \quad (2.19)$$

avec \bar{t}_n et \bar{t}_s : les contraintes prédites par le comportement élastique sans endommagement.

L'évolution de l'endommagement peut être régie de plusieurs manières. Elle est basée sur :

- la proportion relative entre la déformation normale et la déformation tangentielle ;
- le déplacement effectif ($\Delta_m = \sqrt{\langle \Delta_n \rangle^2 + \Delta_s^2}$) atteint à la ruine totale ;
- l'énergie dissipée par le processus d'endommagement.

Ces évolutions peuvent avoir une allure linéaire ou exponentielle.

Dégradation maximale :

Il est possible de contrôler la dégradation des éléments fortement endommagés. Par défaut, la limite supérieure de la variable d'endommagement globale est mise à $D_{\max} = 1$ mais elle peut également être réduite. Il est également possible de spécifier le comportement des éléments cohésifs ayant atteint cette limite; ils peuvent, par exemple, être supprimés si aucun de leurs nœuds n'est en compression.

• **Les éléments finis d'interfaces (LMGC 90)**

(Dubois 2007_[16])

Dans le cadre de ce travail, j'ai eu l'occasion de me rendre à l'Université de Montpellier dans le Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil pour découvrir LMGC-90, un code de calcul mis au point en interne et qui représente les interfaces en tant que loi de contact à assigner à une interface et pas en tant que paramètre matériau à affecter à tout un élément.

Le LMGC-90 a pour but la modélisation des milieux divisés, dont la physique du problème est essentiellement décrite par des lois d'interactions entre les différents corps. Celles-ci doivent donc être rigoureusement choisies en fonction du problème. Ces lois locales peuvent décrire du contact (unilatéral, élastique, visco-élastique, ...), du frottement (Tresca, Coulomb, ...), de la cohésion, de la dilatance, de l'usure, de l'endommagement ... La philosophie est de transformer les lois d'interaction pour les formuler comme des lois de contact avec frottement standard :

Contact : condition de complémentarité en déplacement (loi de Signorini)

$$g \geq 0, R_N \geq 0, g \cdot R_N = 0 \quad (2.20)$$

avec g : la distance entre deux points ;

R_N : la force de contact normal.

L'Equation (2.20) signifie que tant qu'il n'y a pas de contact entre deux points : $g > 0$, donc $R_N = 0$ mais dès que les points entrent en contact : $g = 0$ et $R_N \geq 0$.

Frottement de Coulomb : loi seuil

$$\|R_t\| \leq \mu \|R_N\|$$

Si $\begin{cases} \|R_t\| < \mu \|R_N\| \Rightarrow U_T = 0 \\ \|R_t\| = \mu \|R_N\| \Rightarrow U_T = -\lambda \cdot R_T \end{cases} \quad (2.21)$

avec R_T : la force de contact tangentielle ;

μ : le coefficient de frottement ;

U_T : la vitesse tangentielle du nœud.

Les stratégies de résolution sont basées sur une discrétisation du problème d'évolution (Figure 2.16) :

1. la détection des contacts ;
2. la résolution des forces de contact ;
3. le mouvement des éléments composant le milieu.

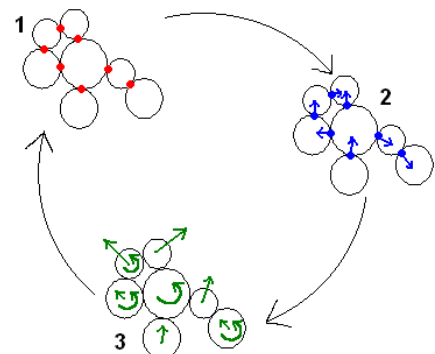


Figure 2.16 : Discrétisation du problème d'évolution (Dubois 2007_[16])

Chapitre 3 MODÉLISATION AUX ÉLÉMENTS FINIS DE L'ESSAI *PUSH-OUT*

La première partie du travail réalisé a servi à créer un Modèle aux Éléments Finis (M.E.F.) de l'essai *push-out*. Il a été choisi parmi tous les tests de cisaillement présentés au paragraphe 2.2.2 car l'IFP disposait des résultats d'une campagne d'essai *push-out* menée précédemment par Y. Kenga_[20]. Pour rappel, cet essai consiste à pousser à l'aide d'un piston, un cylindre de ciment préalablement coulé dans un tube d'acier, afin de provoquer la perte d'adhérence du ciment sur l'acier. Cette modélisation a été menée pour simuler le comportement des interfaces soumises à un effort de cisaillement. Deux lois de comportement mécanique ont été testées pour modéliser le comportement à l'interface ciment/acier : une loi d'interface issue de la base de données Abaqus™ a été testée et une loi de la littérature a été implémentée. Pour valider le modèle, les résultats ont été comparés aux résultats expérimentaux obtenus par Y. Kenga_[20].

Dans ses travaux, Y. Kenga_[20] a réalisé des essais de *push-out* sur des échantillons de ciment coulé dans des tubes d'acier. La Figure 3.1 présente la courbe caractéristique effort-déplacement de compression obtenues par Kenga (échantillon n°40). La courbe se compose de 5 phases successives :

1. une phase non-linéaire correspondant à la mise en charge initiale de l'échantillon du ciment et du système environnant ;
2. un comportement linéaire de l'éprouvette ; sur certains essais, à la fin de la zone linéaire, la courbe comporte un crochet de décohéation induit par une propagation instable de fissures (phénomène de *pop-in* (Adouani 2007_[3])) ;
3. une rupture de pente : le changement de pente définit l'effort à partir duquel la décohéation interfaciale a lieu, puis la charge continue d'augmenter jusqu'à sa valeur maximale ; cette augmentation traduit la propagation du front de fissuration le long de l'interface et le pic correspond à la décohéation totale de l'interface ;
4. une phase de post-rupture avec chute brutale de la charge qui s'accompagne d'une phase de glissements saccadés ;
5. la stabilisation des glissements saccadés : l'effort ne revient pas à zéro car le glissement est accompagné d'un phénomène de frottement.

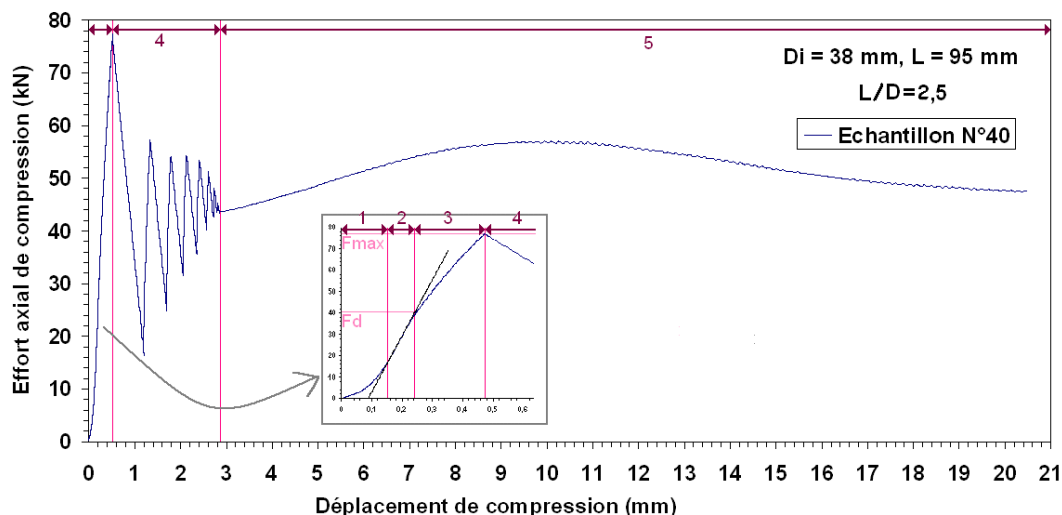


Figure 3.1 : Courbe effort-déplacement obtenue par essai de cisaillement de l'interface

Le M.E.F. a été réalisé à l'aide du code de calcul Abaqus™ qui permet de concevoir des modèles et de générer des simulations mécaniques (cf. Annexe A). L'interface est représentée à l'aide d'éléments cohésifs comme expliqué dans la section 2.4.3.

3.1 Présentation du modèle aux éléments finis (M.E.F)

3.1.1 Géométrie

Au vu de la symétrie du système, le modèle construit est de type axisymétrique. Il se compose de trois parties : "Échantillon", "Interface" et "Casing" (Figure 3.2).

Les parties "Échantillon" et "Casing" sont composées d'éléments solides continus tandis que l'"Interface" est représentée à l'aide d'éléments cohésifs. Les éléments cohésifs sont utilisés pour modéliser le comportement de joints adhésifs, d'interfaces dans les matériaux et dans d'autres situations où l'intégrité de l'interface est jugée importante (par exemple : les failles rocheuses).

Le modèle a pour but de représenter l'échantillon n°40 de Y.Kenga [20]. L'éprouvette mesure 10 cm de haut sur 2 cm de rayon. Le rapport L/D vaut donc 2.5, ce qui permet de s'affranchir des effets de bord. L'épaisseur de la zone interfaciale a été arbitrairement fixée à 0.1 mm. Le casing est large de 0.5 cm.

Le maillage est régulier sur toute la hauteur de l'éprouvette. En largeur, il se densifie au niveau de l'interface. Il n'y a qu'une maille dans l'épaisseur de la zone interfaciale (Figure 3.3).

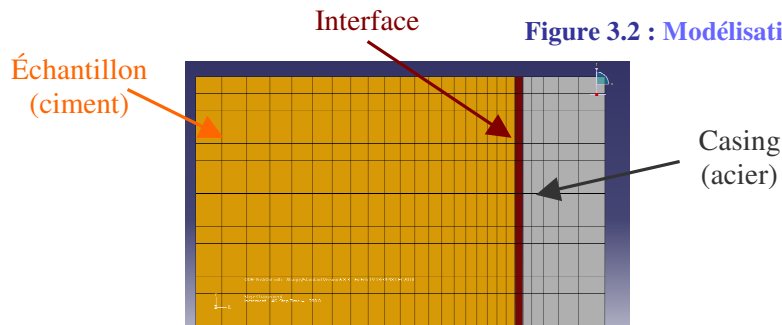
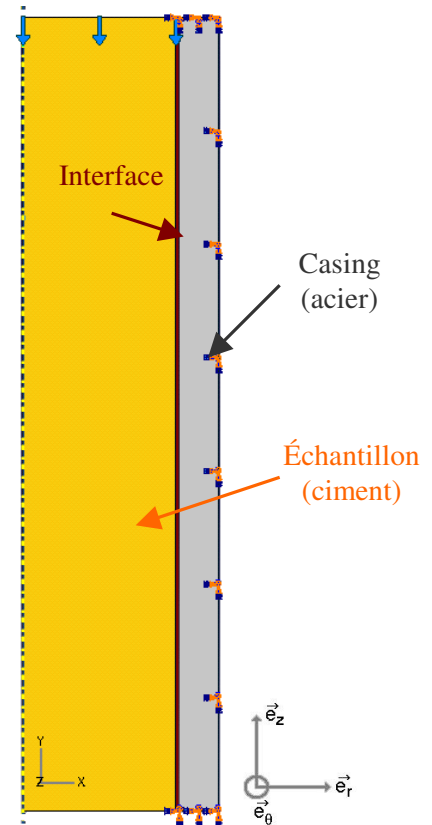


Figure 3.3 : Maillage du modèle

Figure 3.2 : Modélisation de l'essai *push-out*

3.1.2 Conditions aux limites

Le casing est supposé ne subir aucune déformation pendant l'essai. Sa face extérieure est considérée encastree, les nœuds sont bloqués en déplacement et en rotation.

L'essai consiste à appliquer une force sur la surface supérieure de l'échantillon de ciment pour désadhérer le ciment du tube en acier. L'essai est contrôlé en vitesse de déformation : on impose aux nœuds de la face supérieure du cylindre de ciment de se déplacer de 1mm/min. Cette vitesse a été choisie pour correspondre aux essais de Kenga.

3.1.3 Matériaux

Trois matériaux ("Acier", "Ciment" et "Interface") ont été créés et affectés aux différentes parties.

- **Acier**

Les propriétés de l'acier proviennent de la littérature (Ropital 2009_[27]) et ont été affectées à la partie "Casing" :

- Propriétés mécaniques élastiques : $\left\{ \begin{array}{l} \text{Module de Young } E = 210\,000 \text{ MPa} \\ \text{Coefficient de Poisson } \nu = 0.27 \end{array} \right.$

- **Ciment**

Les propriétés du ciment correspondent au ciment utilisé par Kenga_[20] pour réaliser ses essais de *push-out*. Elles ont été affectées à la partie "Ciment" :

- Propriétés mécaniques élastiques : $\left\{ \begin{array}{l} \text{Module de Young } E = 12\,000 \text{ MPa} \\ \text{Coefficient de Poisson } \nu = 0.2 \end{array} \right.$
- Critère de rupture de Mohr-Coulomb : $\left\{ \begin{array}{l} \text{Angle de frottement } \varphi = 30^\circ \\ \text{Angle de dilatance } \psi = 20^\circ \\ \text{Cohésion } C = 18 \text{ MPa} \end{array} \right.$

- **Interface**

La Figure 3.4 présente le résultat d'un M.E.F. où l'interface n'a pas été modélisée à l'aide d'éléments cohésifs. Dans ce cas, la réponse du système, n'est pas physiquement compatible avec la réalité. Le ciment reste collé au casing et le déplacement imposé ne se reporte pas à tout l'échantillon. Ce comportement confirme le bien fondé d'utiliser des éléments cohésifs

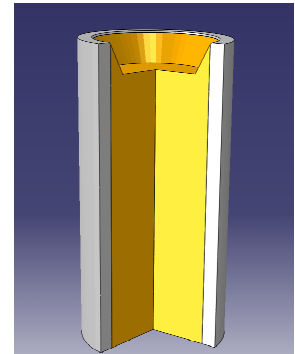


Figure 3.4 : Réponse de l'essai *push-out* d'un modèle où la zone interfaciale n'est pas représentée

Dans un premier temps, pour modéliser l'interface ciment/acier, la loi utilisée fut une loi d'interface disponible dans la base de données d'AbaqusTM (section 3.2). Dans un second temps, la loi d'interface de Cangémi_[12] couplant frottement et adhérence, a été implémentée (section 3.3).

3.2 Utilisation d'une loi d'interface AbaqusTM

3.2.1 Caractéristiques de la loi utilisée

Dans un premier temps, les propriétés de l'interface ont été définies à l'aide des lois de comportement standards proposées par AbaqusTM. Les critères et les valeurs des paramètres ont été arbitrairement choisis. Ils seront par la suite modifiés pour réaliser une analyse paramétrique et étudier leur influence.

- Propriétés mécaniques élastiques :
Modules de déformabilité :

- Direction normale : $K_{NN} = E \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = 13\,333 \text{ MPa}$

- directions tangentielles : $K_{SS} = K_{TT} = E \frac{1}{2(1+\nu)} = 5\,000 \text{ MPa}$

(avec E et ν du ciment)

- Le critère d'initiation de la rupture choisi est écrit en terme de déformations :
Déformations normales et tangentielles à partir desquelles l'endommagement débute : 10^{-3}

$$\max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^o}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^o}, \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^o} \right\} \begin{cases} < 1 : \text{le critère d'initiation de l'endommagement n'est pas satisfait} \\ \geq 1 : \text{le critère d'initiation de l'endommagement est satisfait} \end{cases}$$

(Abaqus™ permet également d'utiliser un critère d'initiation de type "contraintes")

- Le critère de propagation de la rupture choisi est écrit en déplacement :

Déplacement atteint à la ruine du matériau : $d = 5 \text{ mm}$

(Abaqus™ permet également d'utiliser un critère de propagation de type "énergie") :

Le but de la zone cohésive est de représenter une zone interfaciale d'épaisseur infiniment faible et donc de raideur infinie. Numériquement, cela n'est cependant pas représentable sous peine de difficultés de convergence, voire de non convergence des calculs. Il faut donc que l'épaisseur de la couche cohésive soit la plus petite possible dans les limites acceptables de résolutions numérique du code de calcul. Ces limites sont fonction des dimensions du modèle. En choisissant une zone cohésive de faible épaisseur, sa raideur normale est largement supérieure à celle des autres éléments. Toutefois, dans le cas d'un essai de cisaillement, c'est la raideur tangentielle qui est importante et comme il le sera démontré plus tard, la valeur de la raideur normale n'a pas d'importance sur le résultat de la modélisation de l'essai *push-out*.

Le détail et l'explication du fichier INPUT servant à réaliser la simulation se trouve à l'Annexe A.2.

3.2.2 Résultats

- Évolution du dispositif

La Figure 3.5 représente l'éprouvette à la fin de l'essai. On constate bien que le déplacement imposé sur la face supérieure se reporte sur tout l'échantillon et que la déformation du système se fait essentiellement dans la zone cohésive.

La déformation des éléments de la zone d'interface suite au chargement est illustrée à la Figure 3.6.

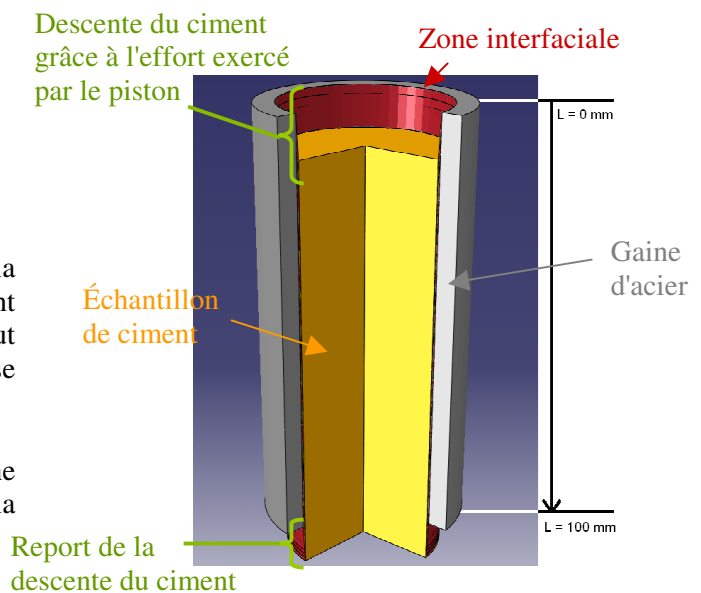


Figure 3.5 : Éprouvette déformée après l'essai

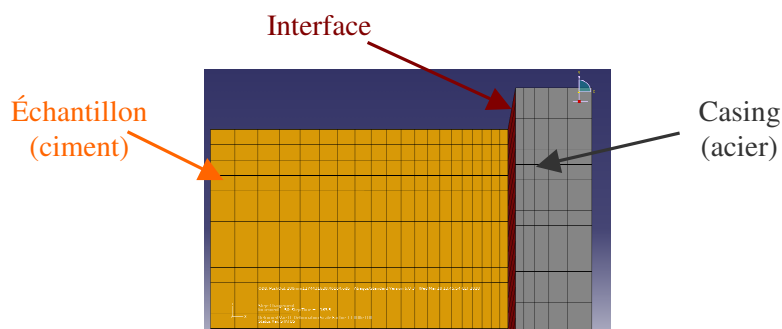


Figure 3.6 : Déformation des éléments du maillage pendant l'essai

⁶ L'explication du critère se trouve à l'Annexe A.3.2 p.62

• **Sorties du modèle**

Endommagement

Le graphique de la Figure 3.7 montre la valeur de la variable d'endommagement D le long de l'interface pour différents instants de la simulation. On constate que malgré la lenteur de mise en charge (1 mm/min), l'interface atteint sa ruine complète en moins de 20 secondes.

$\left\{ \begin{array}{ll} D = 0 & \text{Matériau sain} \\ 0 < D < 1 & \text{Matériau partiellement endommagé} \\ D = 1 & \text{Matériau totalement endommagé} \end{array} \right.$

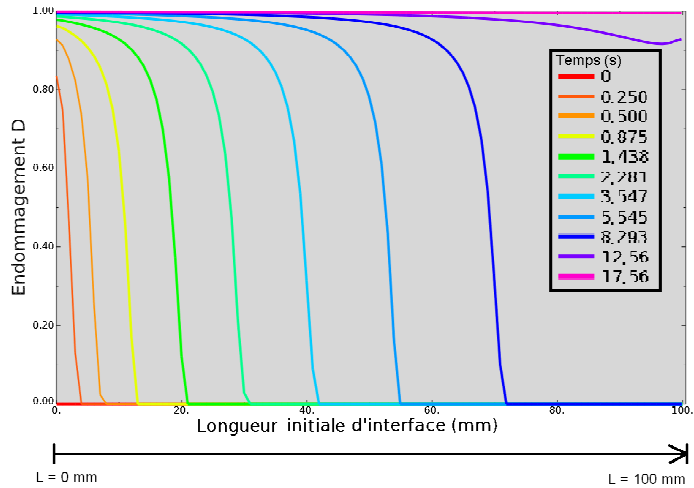


Figure 3.7 : Evolution de la variable d'endommagement le long de l'interface

Évolution Effort-Déplacement

La courbe effort-déplacement (Figure 3.8) montre que la force de compression augmente jusqu'à atteindre la décohesion des éléments cohésifs (pic de décohesion), puis elle diminue linéairement pour s'annuler lorsque la ruine totale du matériau est atteinte (conformément au critère d'évolution de l'endommagement employé). Après la ruine, l'échantillon glisse sans frottement, dans la matrice d'acier. Avec les paramètres de cette simulation, la rupture totale est atteinte après un déplacement de 5 mm, soit 300 secondes.

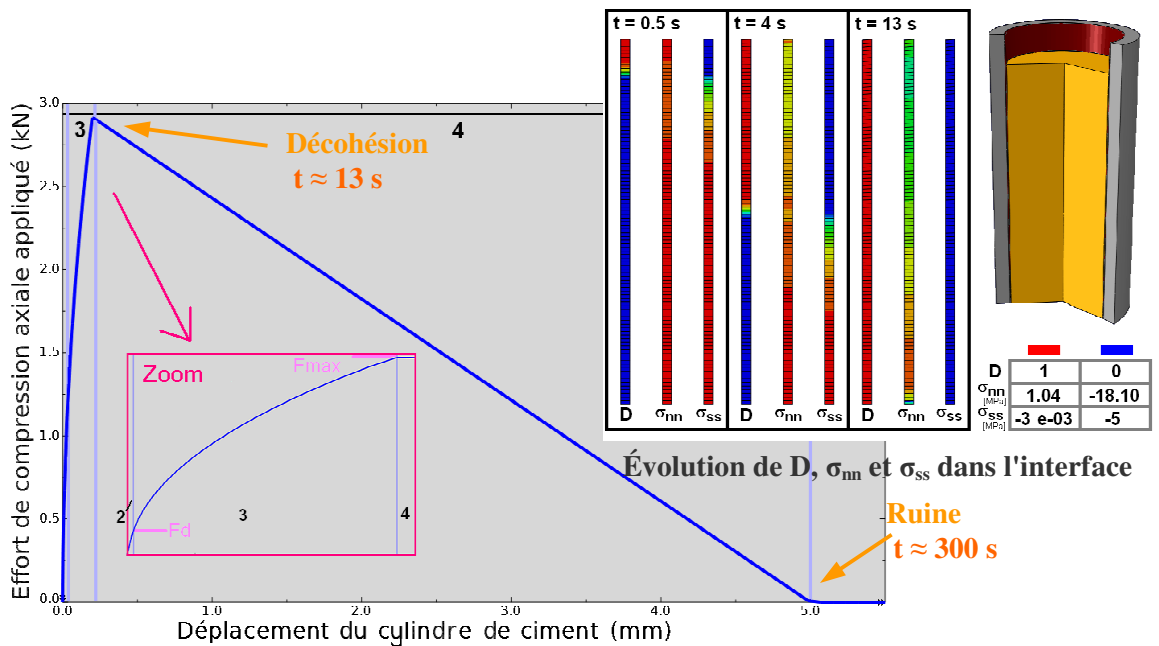


Figure 3.8 : Courbe effort appliqué vs déplacement obtenue par M.E.F. du push-out

Confrontation du modèle et des résultats expérimentaux

La modélisation de l'essai *push-out* devrait être représentative de la réalité. Le modèle ne sera validé que lorsqu'il permettra de représenter les mêmes phénomènes qu'un essai classique (Figure 3.1). Jusqu'à présent, le modèle ne permet de reproduire qualitativement que les phases 2, 3 et une partie de la phase 4. Il est normal que la phase 1 ne soit pas présente dans le cas d'une simulation numérique. Contrairement aux résultats des essais, la modélisation montre que la phase 2 n'a pas un comportement linéaire. Les glissements saccadés de la phase 4 n'existent pas. Dans la réalité ils sont dus au frottement, mais dans le modèle, le comportement de l'interface ne prend pas en compte le frottement. Pour la même raison, en phase 5, l'effort retombe à zéro au lieu de garder une valeur résiduelle. Dans la suite de ce chapitre, d'autres lois d'interface seront testées afin de se rapprocher du comportement réel de l'interface.

L'endommagement s'amorce dans un élément à partir du moment où le critère est atteint (ici, quand la déformation de l'élément dépasse 10^{-3}). L'endommagement total de l'élément se produit alors de manière quasi instantanée (Figure 3.7 et Figure 3.8). L'allure non linéaire de la courbe force appliquée – déplacement résulte de l'évolution de D au cours du temps, ce qui affecte la raideur globale tangentielle de l'interface $(1-D) \cdot K_{SS}$

Au vu des géométries très proches de l'échantillon ($L = 95$ mm, $D = 38$ mm) et du modèle ($L = 100$ mm, $D = 40$ mm), les efforts déployés dans les deux cas peuvent directement être comparés l'un à l'autre. Il est cependant plus exact de comparer les contraintes mises en jeu. Les contraintes de décohesion et de rupture interfaciale sont respectivement calculées à partir des mesures de F_d et F_{max} à l'aide des expressions suivantes :

$$\tau_d = \frac{F_d}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (3.1) \quad \text{et} \quad \tau_{max} = \frac{F_{max}}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (3.2)$$

Tableau 3.1 : Paramètres représentatifs des courbes expérimentales_[20] et du modèle

	Force de décohesion F_d (kN)	Force maximale F_{max} (kN)	Contrainte de décohesion τ_d (MPa)	Contrainte maximale τ_{max} (MPa)	Raideur C (kN/mm)
Expérimental	38	78	3.35	6.87	240
Modèle	0.98	2.9	0.08	0.23	33

L'effort déployé pour atteindre la rupture dans le modèle est beaucoup plus faible que dans le cas expérimental (Tableau 3.1). Les paramètres choisis initialement ne permettent pas d'atteindre les valeurs souhaitées. Des études paramétriques sont menées dans la sections 3.2.3 pour analyser l'influence des paramètres. L'ensemble des sorties du modèle sont illustrées à l'Annexe A.3.

Graphique des énergies

La Figure 3.9 représente les énergies mobilisées lors de la simulation. Les énergies mises en œuvre sont assez faibles. On peut appliquer le principe de conservation à l'énergie totale du système :

$$dW_{tot} = dW_{ext} = dW_{elast} + dW_s \quad (3.3)$$

- avec dW_{tot} = ALLIE : l'énergie totale de déformation du modèle ;
- dW_{ext} = ALLWK : le travail des forces extérieures ;
- dW_{elast} = ALLSE : l'énergie élastique ;
- dW_s = ALLDMD : l'énergie consommée par la fissuration.

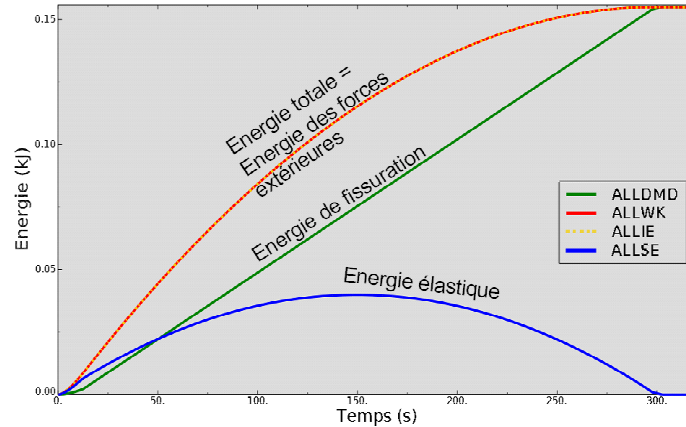


Figure 3.9 : Graphique des énergies

3.2.3 Sensibilité des paramètres

Cette section traite de l'influence des différents paramètres régissant la loi d'interface utilisée.

- **Influence de l'épaisseur de la zone cohésive**

L'épaisseur de la zone cohésive influence directement la raideur du matériau (Equation (3.4)). Théoriquement, une interface d'épaisseur nulle a une raideur infinie mais pour des raisons de convergence, cela n'est pas représentable lors de calculs numériques. Il est donc préconisé de considérer l'épaisseur "la plus faible possible" qui permet aux calculs de converger.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= K_x \cdot \varepsilon_x \\ &= K_x \cdot \left(\left[\frac{u_x}{e} \right] \right) = \frac{K_x}{e} \cdot [u_x] = C_x \cdot [u_x]\end{aligned}\quad (3.4)$$

avec σ_x : la contrainte dans la direction x ($x = n, s$ ou t) ;

ε_x : la déformation dans la direction x ;

u_x : le déplacement dans la direction x ;

K_x : le module de déformabilité dans la direction x ;

$$K_x = E_x \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (E_x : \text{Module de Young, } \nu : \text{coefficient de Poisson})$$

e : l'épaisseur initiale de la zone cohésive ;

C_x : la raideur dans la direction x .

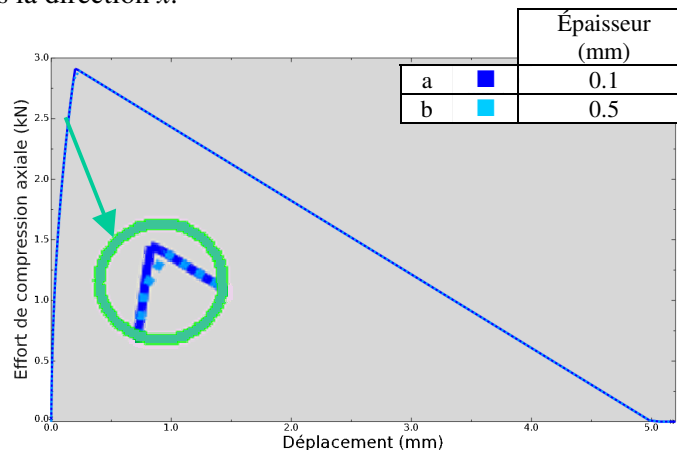


Figure 3.10 : Influence de l'épaisseur normale de la zone cohésive (modules constants)

La Figure 3.10 montre l'évolution effort vs déplacement pour des épaisseurs de zone cohésive valant respectivement 0.1 et 0.5 mm. Les réponses sont pratiquement identiques. En effet, seules les composantes tangentielles interviennent en cisaillement. La modification de l'épaisseur n'entraîne donc aucun changement de la raideur tangentielle. La pente est toutefois légèrement plus marquée au niveau du pic de décohésion, pour l'interface la plus épaisse.

• **Influence des modules de déformabilité de la zone cohésive**

La seconde manière d'augmenter la raideur de l'interface est d'augmenter les valeurs des modules de déformabilité des éléments cohésifs (Eq.(3.4)). Cette étude démontre clairement (courbes a et f sur la Figure 3.11) que la valeur du module normal n'a aucune influence dans le cas d'une rupture par cisaillement. Plus le module tangentiel est élevé par contre, plus la raideur de l'interface est grande et plus l'effort nécessaire à sa décohésion doit être grand. Cependant, lorsque le module devient trop important, la simulation numérique n'arrive pas à son terme à cause de problèmes de convergence. De plus, augmenter le module a également pour effet de retarder le moment de la rupture, et donc le déplacement atteint à cet instant.

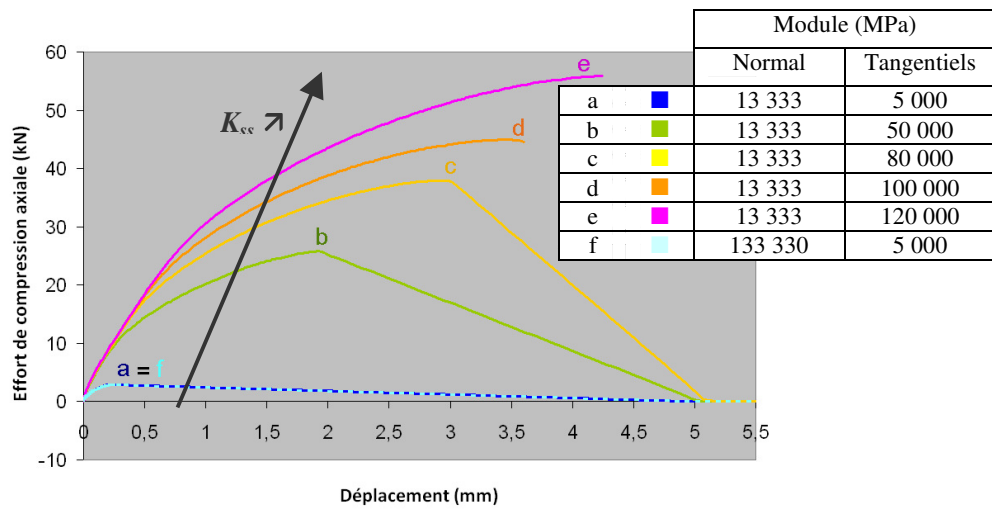


Figure 3.11 : Influences des modules normal (K_{nn}) et tangentiels (K_{ss}, K_{tt})

Faire varier le module ne permet donc pas d'approcher la courbe expérimentale (Figure 3.1) car en se rapprochant des contraintes souhaitées, on s'éloigne de la valeur en déplacement. La raideur initiale de l'interface est constante quelque soit le module et la valeur des contraintes maximales τ_{max} et de décohésion τ_d varient linéairement en fonction du module tangentiel. (Figure 3.12)

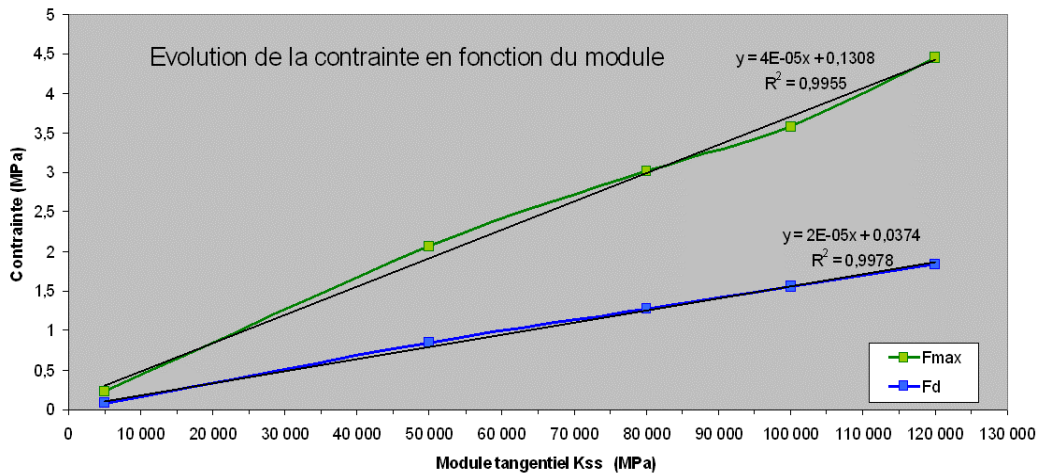


Figure 3.12 : Évolution des contraintes maximales et de décohésion en fonction du module tangentiel

- **Influence des valeurs du critère d'initiation et de propagation de l'endommagement**

Les valeurs des critères d'endommagement n'ont pas d'influence sur la pente du graphique effort-déplacement (Figure 3.13). La valeur du critère d'initiation de l'endommagement fixe le déplacement atteint au moment du pic de décohésion tandis que le critère d'évolution de l'endommagement détermine le déplacement auquel l'effort de compression retombe à zéro. Augmenter la valeur du critère d'initiation, accroît le déplacement parcouru au moment du pic de décohésion, mais allonge la phase de comportement élastique de l'interface, ce qui donne un de l'effort de décohésion plus grand.

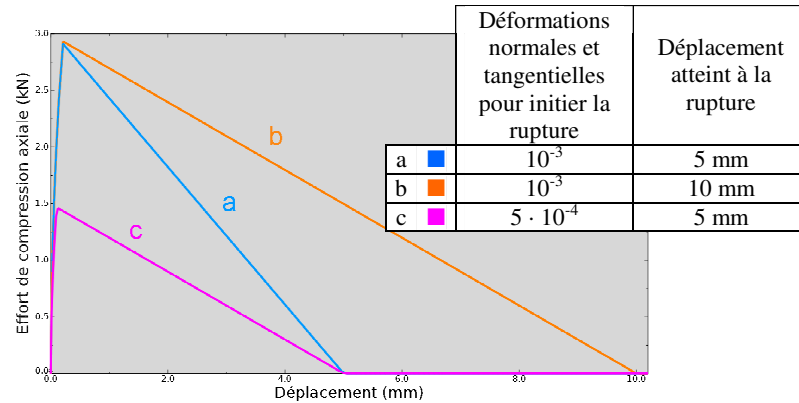


Figure 3.13 : Influence de la valeur des paramètres d'endommagement

- **Influence du choix du critère d'initiation et d'évolution de la rupture**

Plusieurs types de critères d'initiation et d'évolution de la rupture proposés par Abaqus™ ont été testés afin de déterminer leur influence sur l'allure des courbes effort-déplacement :

Critères d'initiation :

MAXE : déformations normales et tangentielles à partir desquelles l'endommagement débute

$$\rightarrow \max \left\{ \frac{\langle \epsilon_{nn} \rangle}{\epsilon_{nn}^0}, \frac{\epsilon_{ss}}{\epsilon_{ss}^0}, \frac{\epsilon_{tt}}{\epsilon_{tt}^0} \right\}$$

QUADE : déformations normales et tangentielles à partir desquelles l'endommagement débute, critère quadratique

$$\rightarrow \left(\frac{\langle \epsilon_{nn} \rangle}{\epsilon_{nn}^0} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{ss}}{\epsilon_{ss}^0} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{tt}}{\epsilon_{tt}^0} \right)^2$$

Critères d'évolution de la rupture :

DISPLACEMENT : déplacement atteint à la ruine du matériau

ENERGY : énergie dissipée par l'endommagement (= aire sous la courbe effort-déplacement, entre le pic de décohésion et la ruine totale du matériau)

Tableau 3.2 : Critères d'initiation et d'évolution de la rupture

	Initiation		Evolution		
a	Maxe	10^{-3}	Displacement	5 mm	linéaire
b	Quade	10^{-3}	Displacement	5 mm	linéaire
c	Maxe	10^{-3}	Energy	$2 \cdot 10^{-3} \text{J}$	linéaire
d	Maxe	10^{-3}	Energy	$2 \cdot 10^{-3} \text{J}$	exponentielle

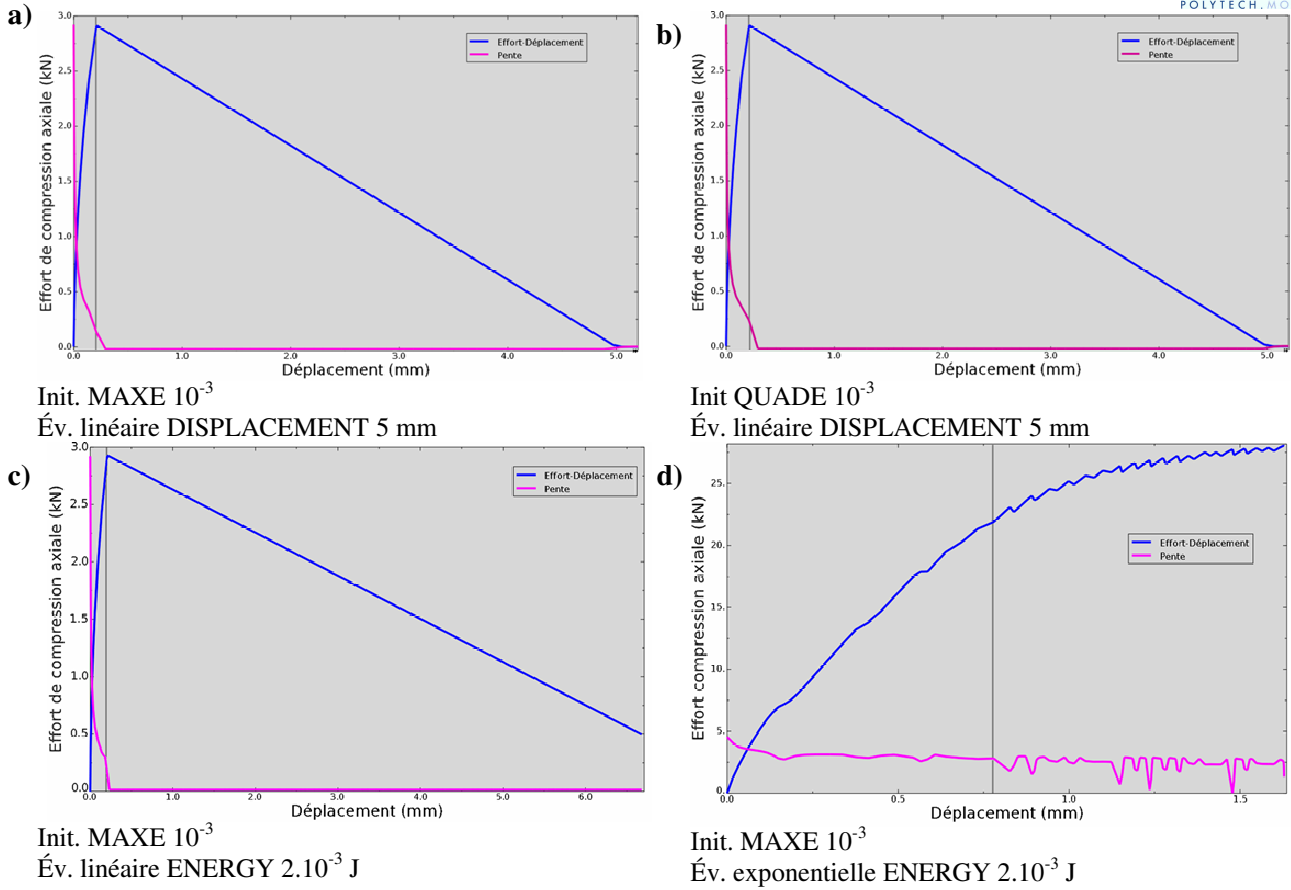


Figure 3.14 : Graphiques Effort-Déplacement pour différents critères d'initiation et de propagation

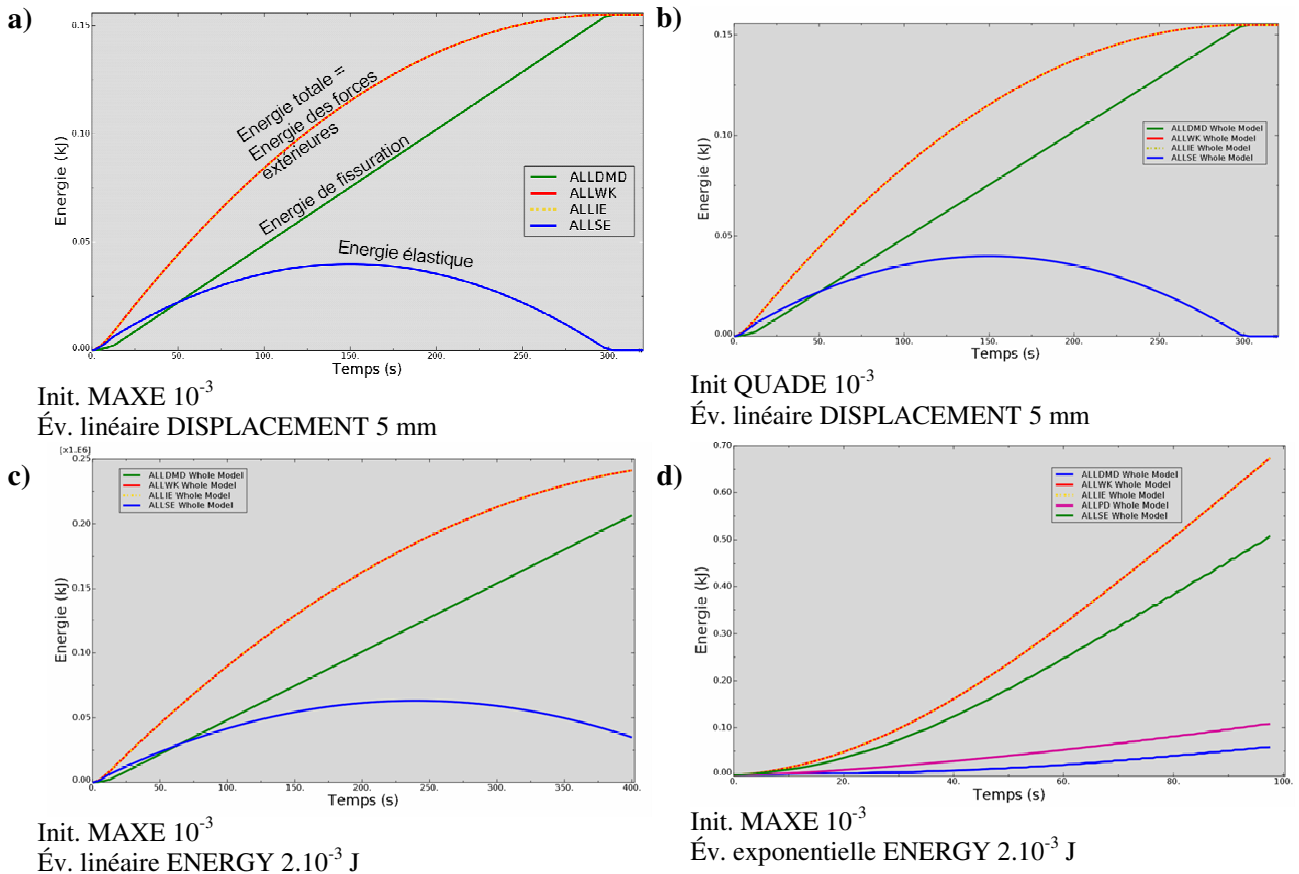


Figure 3.15 : Evolution des énergies mises en jeu pour chacun des critères utilisés à la Figure 3.14

La Figure 3.14 (b) fournit la même réponse que la Figure 3.14 (a), les critères d'initiation *Maxe* et *Quade* conduisent, dans ce cas ci au même résultat. La phase 2 est identique sur les figures (a), (b) et (c), mais la phase 3 de la figure (c) mène à un effort de compression plus élevé. La phase 4 de la figure (c) présente une chute de résistance. La pente est alors telle que l'aire sous-tendue par la courbe vaut l'énergie dissipée par la déformation. Pour le cas (d), bien que le critère d'initiation soit le même que précédemment, la courbe a une allure très différente : elle est constituée de plusieurs segments linéaires et conduit à des valeurs de compression beaucoup plus élevées. La phase 4 ne présente pas de décroissance : l'effort continue à augmenter de manière saccadée.

La Figure 3.15 (a) et la Figure 3.15 (b) sont identiques et les énergies du cas (c) présentent également la même allure. L'évolution des énergies de la figure (d) est exponentielle, comme spécifié dans les paramètres. Il y a une énergie supplémentaire mise en œuvre : l'énergie dissipée par le taux de déformation plastique (ALLPD).

Les lois proposés par Abaqus™ ne permettent pas de reproduire le comportement adhérent frottant d'une interface. De plus, les critères qu'Abaqus™ propose pour régir le comportement des éléments cohésifs sont tels que les simulations menées ne sont pas prédictives. En effet, le moment où la ruine complète du matériau est atteinte ($t = 300$ s sur la Figure 3.8) n'est pas prédite par le calcul mais est directement imposé par le critère de propagation de la rupture.

3.3 Implémentation de la loi d'interface Cangémi_[12] couplant frottement et adhérence

Dans la section précédente, nous avons pu constater que les critères cohésifs proposés par Abaqus™ ne permettent pas de modéliser correctement le comportement de l'interface ciment/acier caractérisé lors de l'essai *push-out*. Pour cette raison, un comportement mécanique spécifique de l'interface a été implémenté dans Abaqus™ grâce à une loi matériau utilisateur (UMAT), codée en Fortran.

La loi d'interface implémentée est celle de Cangémi (1999_[12]) qui couple comportement frottant et adhérent. Pour créer la loi matériau, je suis partie d'une autre loi matériau utilisateur déjà implémentée à l'IFF par E. Roguet_[26], que j'ai modifiée et adaptée. L'implémentation de la loi d'interface n'a toutefois pas été aisée. En effet, cette loi a été conçue pour décrire une zone interfaciale. Elle a donc dû être transposée pour être appliquée aux éléments cohésifs d'épaisseur e . Une autre difficulté fut de décrire le comportement tangentiel frottant de l'interface.

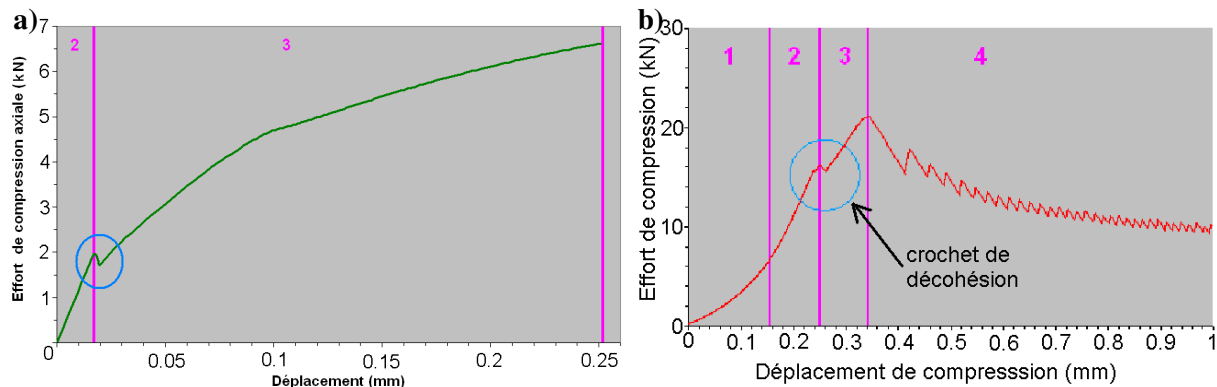


Figure 3.16 : Courbe effort-déplacement de l'essai *push-out* (a) avec loi d'interface utilisateur, (b) expérimentale

Avec les difficultés rencontrées, la procédure UMAT n'est pas complètement fonctionnelle à l'issue de ce travail. Toutefois, les résultats qui ont été obtenus sont prometteurs. L'allure du début de la courbe effort-déplacement de l'essai *push-out* (Figure 3.16 (a)) correspond à ce qui a été observé

expérimentalement (Figure 3.16 (b)). La simulation numérique permet de représenter le crochet de décohéation de fin de la zone linéaire (2). Ce crochet est dû au phénomène de *pop-in* induit par la propagation instable de fissure due à la présence d'une zone locale fragile (Adouani 2007^[3]). Après, la zone linéaire se trouve une zone de rupture de pente (3) qui correspond à la décohéation progressive de l'interface. La zone 1 n'est pas modélisée car elle représente la mise en charge initiale qui n'est qu'un phénomène transitoire. Les valeurs de l'effort de compression générées avec la loi d'interface utilisateur sont du même ordre de grandeur que celles déterminées expérimentalement.

A l'issue de ce travail de fin d'étude, le calcul ne dépasse pas la zone 3 pour des problèmes de convergence. Lorsque la loi d'interface sera complètement et correctement implémentée, la fin de la courbe devrait montrer une chute de l'effort jusqu'à une valeur résiduelle correspondant au frottement. Les paramètres caractéristiques de l'interface ne sont pas facilement accessibles, aucun essai mécanique ne permet de les déterminer directement. Il faudra mener une analyse paramétrique et rapprocher au mieux les résultats expérimentaux par le modèle. Il est toutefois nécessaire de garder un esprit critique quant à la vraisemblance du jeu de paramètres qui sera ainsi déterminé car des jeux de paramètres différents peuvent mener à une même réponse du modèle.

3.4 Bilan de la M.E.F. de l'essai de *push-out*

Dans ce chapitre, une modélisation aux éléments finis d'un essai *push-out* a été réalisée. La première partie a consisté à utiliser les lois matériaux fournies par Abaqus™. Il en est ressorti que les lois d'interfaces d'Abaqus™ ne sont pas prédictives, et ne permettent pas de rendre compte du comportement frottant observé expérimentalement.

Pour y remédier, une loi d'interface couplant frottement et adhérence a commencé à être implémentée dans une procédure utilisateur appelée UMAT. Il s'agit d'un travail de grande ampleur qui nécessite encore de résoudre les problèmes de convergence actuellement rencontrés, pour que la procédure soit opérationnelle. Les résultats obtenus sont néanmoins prometteurs.

Les perspectives futures concernant cette loi consistent à l'insérer dans des modèles d'assemblages ciment/acier soumis à diverses sollicitations (cisaillement, traction, flexion, ...), afin de déterminer, à l'aide d'analyses paramétriques, les propriétés de l'interface. A cette fin, il est indispensable de disposer de suffisamment de données expérimentales sur les interfaces, en fonction du mode de sollicitation auxquelles elles sont soumises. Dans le Chapitre 4, des essais mécaniques sont réalisés sur de nouvelles configurations d'assemblages ciment/acier pour compléter la base de données des interfaces.

Chapitre 4 MISE AU POINT D'ESSAIS SUR ASSEMBLAGES ACIER/CIMENT

Une partie de ce travail a été consacrée à la mise au point d'assemblages ciment/acier afin de tester la tenue mécanique des interfaces. Le but de ces essais est de mettre en place une méthodologie (géométrie, protocole de fabrication des assemblages, instrumentation, protocole de mise en charge et de dépouillement des essais) qui permettra d'analyser les interfaces et d'enrichir la base de données expérimentales les interfaces ciment/acier. Des essais de *push-out* ayant précédemment été réalisés (Y. Kenga_[20]), de nouvelles configurations d'assemblages (cisaillement simple, cisaillement double et traction au plot collé) seront testées dans ce chapitre.

Tout d'abord, une caractérisation mécanique des propriétés du ciment massif a été réalisée afin de servir de référence à l'interprétation des résultats sur assemblages.

La tenue mécanique en cisaillement des assemblages ciment/acier a ensuite été testée. Les essais de cisaillement simple et de cisaillement double ont été pris comme point de départ grâce à leur simplicité de géométrie et de mise en œuvre. Ils ont ensuite été modifiés pour représenter les conditions de chargement mécanique présentes dans les puits de forage et obtenir ainsi des résultats plus réalistes. Dans un premier temps, les essais ont été réalisés sur des assemblages sains ; ils ont ensuite été menés sur des assemblages vieilliss (carbonatation partielle du ciment suite à une exposition au CO₂).

Pour finir, une configuration d'assemblage pour l'essai de traction au plot collé a été mise au point et testée afin de mieux caractériser les interfaces ciment/acier. Il a pour but de quantifier la résistance à la traction de l'interface. Cet essai d'arrachement a été choisi parmi les essais de traction (cf. 2.2.2) pour sa simplicité de mise en œuvre et le peu d'inconvénient qu'il génère.

4.1 Caractérisation des propriétés mécaniques du ciment massif

Avant de réaliser des essais de cisaillement sur les interfaces acier/ciment, les propriétés mécaniques du ciment utilisé⁷ ont été mesurées (cf. Annexe B) dans les différentes conditions pour lesquelles les essais de cisaillements seront menés :

- a) 7 jours de prise (température ambiante, pression atmosphérique) ;
- b) 7 jours de prise (température ambiante, pression atmosphérique) et 4 semaines en cellule de vieillissement dans l'eau (T = 80°C, P = 40 bars) ;
- c) 7 jours de prise (température ambiante, pression atmosphérique) et 4 semaines en cellule de vieillissement dans l'eau saturée en CO₂ (T = 80°C, P = 40 bars).

Les échantillons sont cylindriques : diamètre 25 mm, hauteur 50 mm. Cette étape est essentielle, car la résistance à la compression est la seule caractéristique mécanique du ciment vieilli au CO₂ disponible dans la littérature (Kenga_[20], Nelson_[23]).

Les résultats des essais sont comparés avec les propriétés du ciment, disponibles dans la littérature, à 28 jours de prise, (Figure 4.1). A partir de 7 jours d'hydratation l'étape de "prise" proprement dite est terminée ; on se trouve alors dans la phase de durcissement où le ciment voit ses propriétés mécaniques s'améliorer. Il est communément admis que ses propriétés se stabilisent vers 28 jours. Ce renforcement des propriétés mécaniques est bien visible pour la résistance à la traction (R_t), la résistance à la compression (R_c) et la cohésion (C), alors que le module de Young (E) semble déjà avoir atteint sa valeur limite après 7 jours. Faire subir aux échantillons un vieillissement dans l'eau ne semble affecter significativement le ciment. Une pression de 40 bars était appliquée dans l'enceinte de

⁷ Le ciment employé est le ciment pétrolier *Portland Class G* : il contient les produits de base (carbonates et alumino-silicates) ainsi qu'un peu de gypse pour réguler la prise et également de l'anti-mousse pour éviter la formation de bulles d'air qui affaibliraient sa tenue mécanique.

vieillessement, ce qui aurait dû améliorer la résistance du ciment par effet de confinement. La diminution de la qualité du ciment peut alors sans doute être imputée à l'effet des hautes températures.

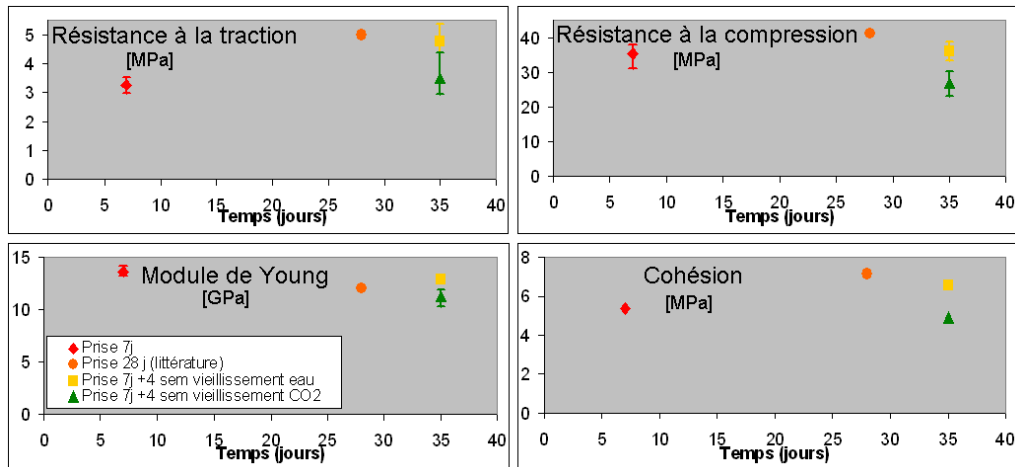


Figure 4.1 : Évolution des propriétés mécaniques du ciment en fonction des conditions de prise et de vieillissement

La présence de CO_2 fait fortement chuter la qualité du ciment suite à sa dégradation par le phénomène de carbonatation. De plus, les échantillons vieillis au CO_2 présentent une très forte dispersion, car ils sont devenus hétérogènes. La Figure 4.2 montre un échantillon de ciment après un séjour de 4 semaines dans le CO_2 , on y constate deux phénomènes :

- une altération du matériau sur une épaisseur de quelques millimètres est vraisemblablement due à la carbonatation dans la masse du ciment. Pour s'en assurer, une analyse physico-chimique serait nécessaire ;
 - des cristaux de calcite qui rendent la surface de l'échantillon hétérogène ; ils proviennent probablement d'une re-précipitation de la calcite à partir de la solution saturée en ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} .
- La combinaison de ces phénomènes a provoqué une augmentation moyenne de 4.5% du volume des échantillons entre le moment de leur entrée et celui leur sortie de la cellule de vieillissement. Dans le puits, cela entraînerait l'apparition de contraintes internes de compression supplémentaires, car le ciment n'a a priori pas la possibilité de se dilater.

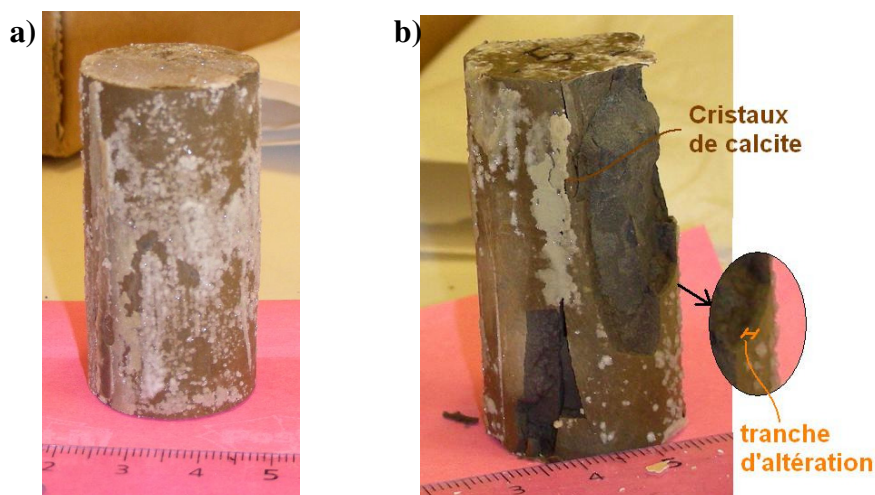


Figure 4.2 : Plot de ciment ayant subi une carbonatation au CO_2 (a) avant et (b) après rupture

Pour finir, les faces des cylindres ont perdu leur parallélisme à cause de la cristallisation de la calcite, ce qui remet en cause la qualité des résultats. En effet, comme le montre la Figure 4.3, la courbe de compression simple a un pied très étendu avant d'arriver dans la zone linéaire. Cette zone reflète la mise en contact du plateau de la presse avec l'échantillon, par le broyage de la calcite et de la zone

carbonatée. La mise en charge de l'échantillon a réellement lieu après cette zone, ce qui signifie qu'on ne teste alors que ce qui reste de ciment sain.

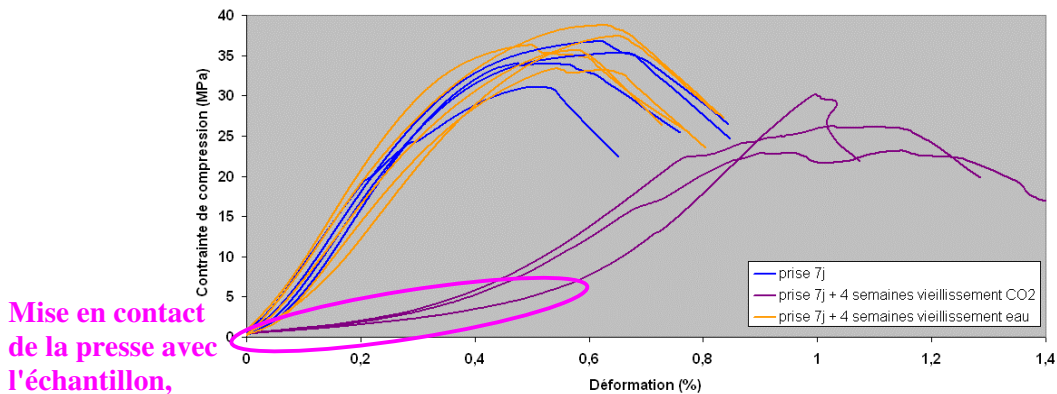


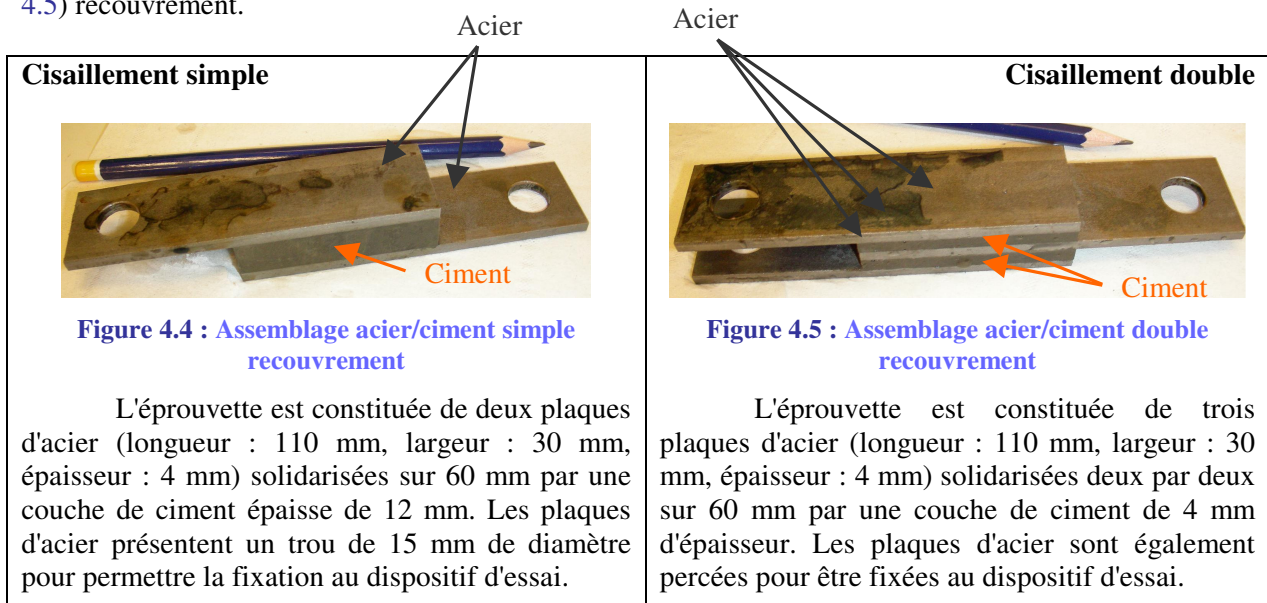
Figure 4.3 : Comparaison des courbes de compression simple pour les différentes conditions de prise

4.2 Présentation des essais de cisaillement

4.2.1 Les assemblages à tester en cisaillement

- **Géométrie des assemblages**

Les éprouvettes de cisaillement consistent en 2 ou 3 plaques d'acier solidarisiées par une couche de ciment. Deux configurations d'assemblages ont été testées : simple (Figure 4.4) et double (Figure 4.5) recouvrement.



- **Fabrication des échantillons**

Le ciment

Le ciment employé pour tous les essais est un ciment pétrolier : ciment Portland ClassG. Il contient les produits de base (carbonates et aluminosilicates) ainsi qu'un peu de gypse pour réguler la prise et également de l'anti-mousse pour éviter la formation de bulles d'air qui affaibliraient sa tenue mécanique. Au vu des délais imposés pour la réalisation de ce projet, les temps de prise du ciment ont été réduits à 7 jours. Deux séries d'essais permettront également de tester l'interface après un mois de vieillissement en conditions CO₂, ainsi que de vieillissement dans l'eau pour obtenir des échantillons témoins.

La procédure d'hydratation de la poudre est normalisée⁸. Le ciment est mélangé à l'eau avec un rapport massique $E/C = 0.44$ pour obtenir une densité de 1.9 ; cette étape doit être réalisée en 15 s. Le laitier de ciment est alors agité à grande vitesse pendant 35 s pour permettre une hydratation massive de la poudre. Il est ensuite malaxé plus lentement pendant 20 minutes pour parfaire l'hydratation et éviter que le gel de silice ne se forme trop rapidement. Il est finalement coulé dans un moule où il prend pendant 7 jours, dans l'eau, à pression atmosphérique et à température de 20°C. Après la prise, les échantillons sont démoulés. Pour les essais vieillis pendant 4 semaines, après la prise, les éprouvettes sont placées dans des cellules de vieillissement à 80°C et 40 bars (dans l'eau ou dans l'eau saturée en CO₂).

Les plaques d'acier

Les plaques servant de substrat au ciment pour l'essai de cisaillement sont constituées d'un acier étiré doux, nuance X18 (= acier fortement allié présentant un pourcentage de carbone de 0.18) E24 (= acier de construction d'usage général, de limite élastique minimale de 240 MPa). Une analyse de leur rugosité⁹ montre que la taille des aspérités de surface est de l'ordre du micromètre (Figure 4.6).

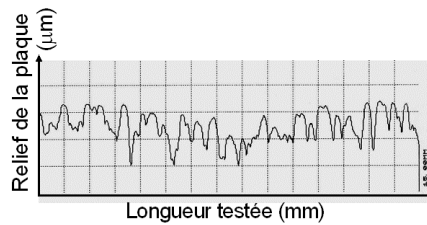


Figure 4.6 : Analyse de la rugosité des plaques d'acier

Les assemblages

Les échantillons sont fabriqués par lot de 4, dans des boîtes parallélépipédiques faisant 160 x 40 mm de côté et 30 mm de haut. Les plaques d'acier sont maintenues à l'aide d'un système de cales. Au vu du faible espace entre les plaques d'acier, la mise en place du ciment doit être faite très méticuleusement à l'aide d'une seringue pour ne pas piéger de bulles d'air. Les éprouvettes sont ensuite laissées à prendre pendant 7 jours, dans l'eau, à pression atmosphérique et à température de 20°C. Les assemblages sont alors sortis des boîtes et testés mécaniquement. (Figure 4.7)

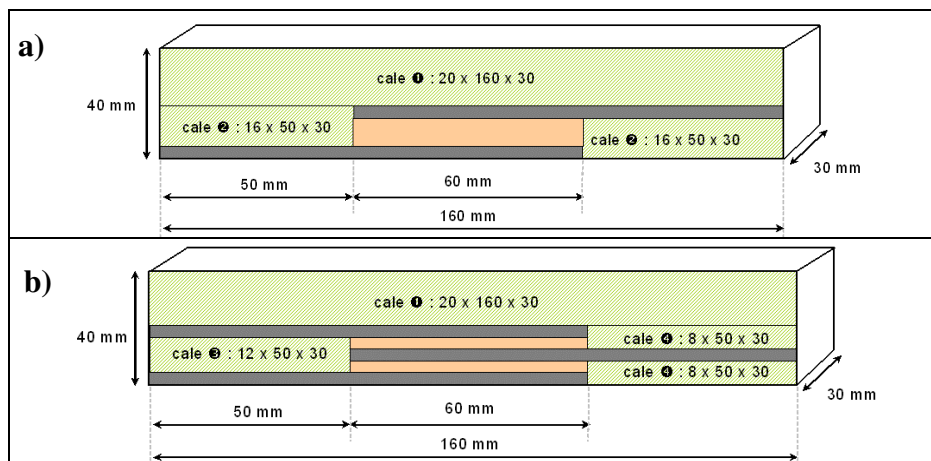


Figure 4.7 : Vue des boîtes parallélépipédiques dans lesquelles sont fabriqués les assemblages (a) simple recouvrement et (b) double recouvrement

⁸ La norme relative à l'hydratation de la poudre de ciment est la norme "ISO 10426-2" chapitre 5.

⁹ La rugosité d'une surface est mesurée à l'aide d'une très fine pointe qui se déplace sur une longueur de 15 mm, et qui trace le profil de la surface (Appareil de mesure : Hommel Tester T200)

4.2.2 Dispositif et principe des essais de cisaillement

Les assemblages sont fixés aux mors de la machine d'essais grâce à des goupilles (Figure 4.8). Le système de fixation sert également de cale pour limiter la flexion de l'échantillon. La capacité maximale de la cellule de charge est de 5 tonnes. Le plateau inférieur de la cellule est mobile et, grâce à une pression d'huile, impose le chargement dont la direction est illustrée à la Figure 4.8. Le déplacement relatif des plaques d'acier est mesuré à l'aide de deux extensomètres. Les extensomètres sont fixés au dispositif à l'aide d'un système d'aimants et d'élastiques. L'acquisition des données (force appliquée, déplacement des plaques : extenso1, extenso2) se fait avec le logiciel "BlueHill".

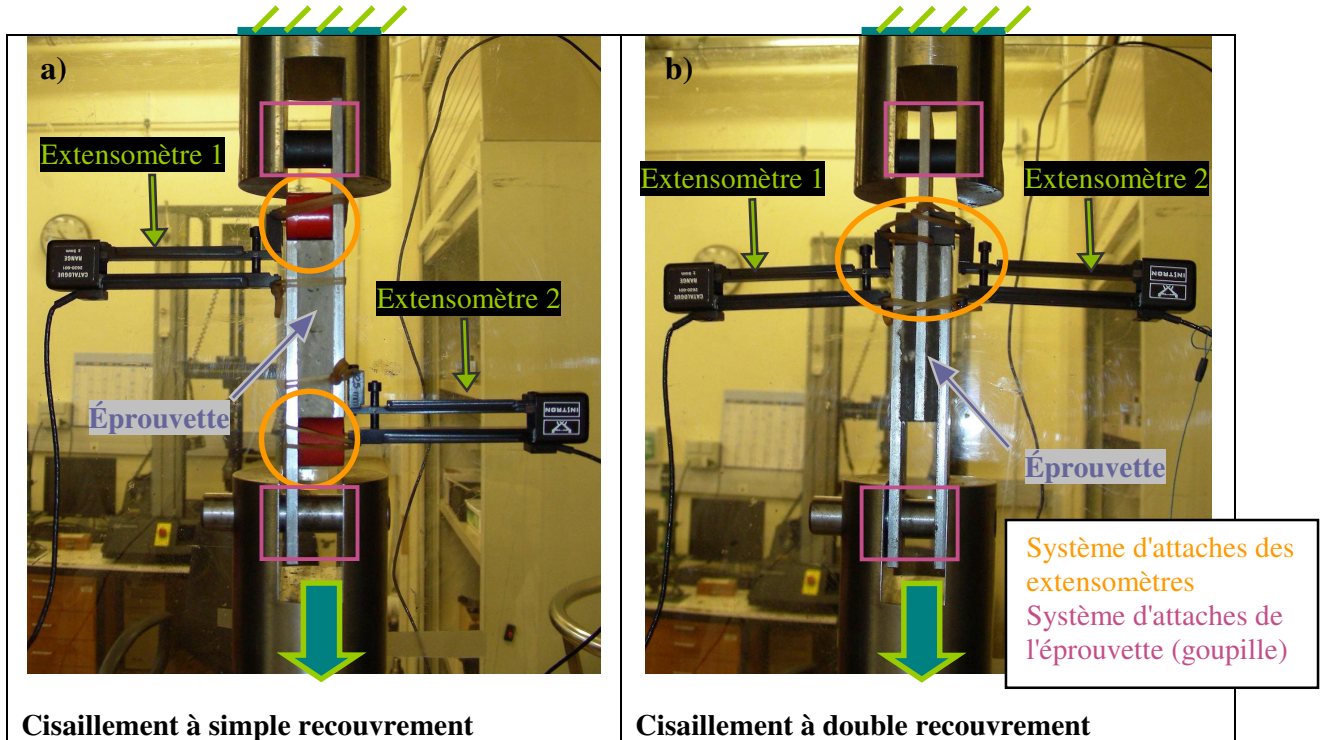


Figure 4.8 : Dispositif des essais de cisaillement

Le bout supérieur de l'éprouvette est maintenu à l'aide du dispositif d'attache, tandis que l'autre côté est soumis à une force de traction imposée par le déplacement du plateau de la presse. L'essai est piloté en vitesse de déplacement transverse de 1mm/min. Tous les essais sont réalisés à température ambiante et pression atmosphérique.

4.3 Résultats des essais de cisaillement

L'ensemble des résultats est présenté à l'Annexe C.

4.3.1 Essais de cisaillement simple

(Annexe C.1)

- **Première série d'essais de cisaillement simple**

Pour la première série d'essais de cisaillement à simple recouvrement, trois éprouvettes ont été préparées. Cependant, la première n'a pu être testée car l'interface a rompu pendant la mise en place de l'échantillon. Cette rupture a été parfaitement adhésive. La très faible résistance des éprouvettes est principalement due à leur manque de symétrie. En effet, cet essai est conçu pour tester le mode II (cisaillement pur \leftrightarrow) or les forces exercées sur l'échantillon n'étant pas dans le même plan, un moment de flexion est induit (Figure 4.9). La rupture n'intervient donc plus exclusivement en mode II mais également en mode I (ouverture normale \downarrow) et, étant donné la faible résistance du ciment vis-à-vis de la

traction, la grande proportion de mode I affaiblit fortement l'assemblage. Cette tendance s'est vérifiée lors des essais (Figure 4.10).

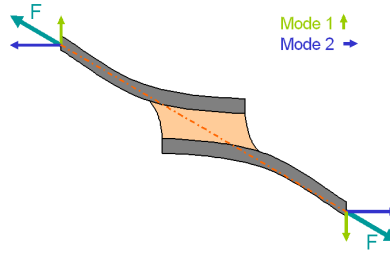


Figure 4.9 : Moment de flexion induit dans un essai à simple recouvrement

Les deux essais de cisaillement simple ont donné lieu à une rupture parfaitement adhésive de l'une des deux interfaces. Pour l'éprouvette n°2, c'est l'interface du côté du plateau mobile qui s'est rompue, tandis que pour l'éprouvette n°3, c'est celle liée au plateau fixe. Cela démontre que le sens de l'éprouvette n'a pas d'importance et que les efforts sont bien transmis au sein de l'échantillon.

La Figure 4.10 représente les courbes effort-déplacement mesurées par les 2 extensomètres. Bien que n'ayant été réalisé que deux fois, l'essai semble reproductible. La force nécessaire à la rupture est très faible, environ 125 N, ce qui est dû à l'effet de pelage (ouverture en mode I). Les valeurs mesurées par les extensomètres ne sont pas identiques ; cela peut s'expliquer d'une part par le fait que le déplacement ne se fait pas uniquement à l'interface, le corps du ciment et les plaques d'acier sont également soumises à une déformation élastique, et d'autre part par le fait que le chargement n'est pas parfaitement parallèle aux interfaces.

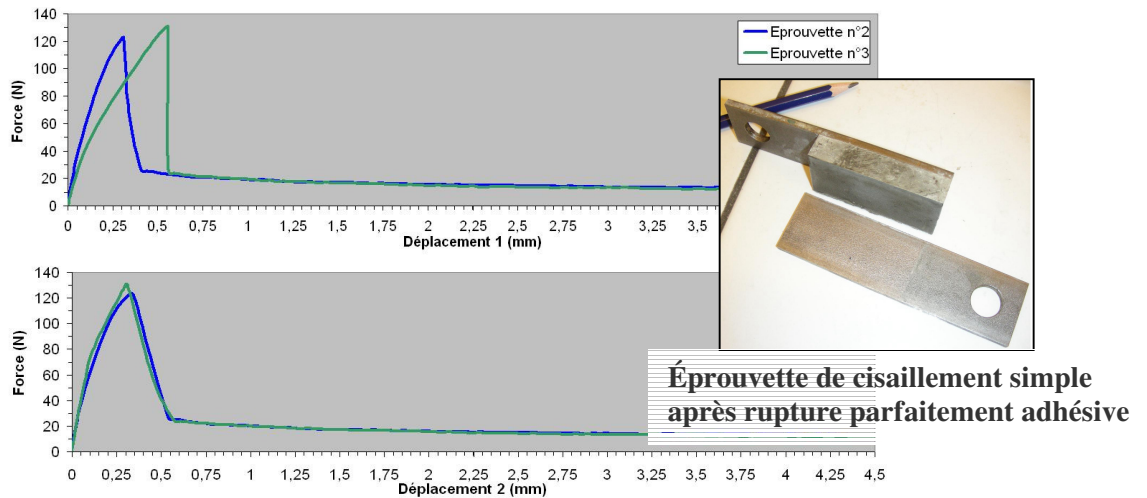


Figure 4.10 : Courbes force-déplacement de la première série d'essais de cisaillement à simple recouvrement

Après la rupture, la force tombe à une valeur résiduelle. Il faut toutefois rester très prudent quant à l'interprétation de cette donnée. En effet, il est possible que cette valeur résiduelle soit due au frottement du bloc de ciment contre la plaque d'acier mais il est plus probable que ce soit un artefact induit par le dispositif d'essai : les élastiques servant à fixer les extensomètres maintiennent également l'assemblage fermé provoquant ainsi un frottement artificiel.

Pour pouvoir comparer les différents types d'essais entre eux, il est nécessaire de convertir les forces en contraintes (Eq.(4.1)). La force moyenne appliquée par le système à la rupture vaut $F = 126.5 \text{ N}$, ce qui correspond à une contrainte tangentielle maximale de $\tau_{\max} = 70.3 \text{ kPa}$. En réalité, la contrainte calculée n'est pas exactement la contrainte tangentielle à cause de l'ouverture en mode I.

$$\text{Contrainte [MPa]} = \frac{\text{Force [kN]}}{\text{Aire d'interface [mm}^2\text{]}} \Rightarrow \tau = \frac{F}{L \cdot b} \quad (4.1)$$

avec F : la force de cisaillement appliquée ;
 τ : la contrainte tangentielle de scission ;
 L : la longueur de l'interface (60 mm) ;
 b : la largeur de l'interface (30 mm).

Le cisaillement n'est pas uniforme vu :

- d'une part, l'élongation élastique¹⁰ des plaques d'acier soumises à la traction ;
- d'autre part, la contrainte normale qui n'est pas négligeable.

Il est alors possible d'estimer le moment de flexion (Equation (4.2)) auquel est soumis le ciment^[15]. Le moment induit par l'essai de cisaillement est important et perturbe fortement les résultats de l'essai.

$$M = M^* \cdot M_r = 239.6 \text{ N mm} \quad (4.2)$$

avec M : le moment de flexion effectif appliqué à l'adhésif (ciment) ;
 M_r : le moment résiduel appliqué par un adhérent (acier) indéformable :

$$M_r \approx \tau \frac{L \cdot b \cdot h}{2} = 253.0 \text{ N mm}$$

avec h : l'épaisseur de l'acier (4 mm) ;

M^* : le facteur de réduction du moment de flexion dû à l'élasticité de l'adhérent :

$$M^* = \frac{1}{1 + \alpha + \frac{\alpha^2}{6}} = 0.947 \text{ et } \alpha = \sqrt{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \tau \cdot L^3}{E \cdot h^3}} = 0.056$$

(analyse de Hart-Smith)

avec E : le module de Young de l'acier (210 Gpa) ;
 ν : le coefficient de Poisson de l'acier (0.27).

Des études ont été menées afin d'estimer l'état de contrainte moyen dans l'adhésif : dissocier la contrainte normale σ de la contrainte tangentielle τ , et interpréter la force de rupture. L'analyse de Bigwood et Crocombe (1989^[15]) est présentée ci-dessous.

$$\text{Contrainte de scission maximale : } \tau_M = \frac{\tilde{l}}{2} \cdot \tau + \frac{3}{4} \cdot t + 3 \cdot \tilde{l} \cdot m = 138.6 \text{ kPa} \quad (4.3)$$

$$\text{Contrainte normale maximale : } \sigma_M = \sqrt{r_a \cdot \tilde{l} \cdot \frac{h}{l} \cdot t + r_a \cdot \tilde{l} \cdot m} = 180.6 \text{ kPa} \quad (4.4)$$

avec \tilde{l} : la longueur réduite de recouvrement :

$$\tilde{l} = L \sqrt{\frac{\mu_a}{2 \cdot E \cdot h \cdot h_a}} = 1.006$$

μ_a : le module de cisaillement élastique de l'adhésif :

$$\text{avec } \mu_a = \frac{E_a}{2 \cdot (1 + \nu_a)} = \frac{13.6}{2 \cdot (1 + 0.2)} = 5.67 \text{ GPa}$$

h_a : l'épaisseur de l'adhésif (12 mm) ;

t : la contrainte apparente associée à l'effort tranchant :

$$t = M^* \cdot \alpha \cdot \tau = 3.7 \text{ kPa}$$

m : la contrainte apparente associée au moment :

¹⁰ Dans certains cas, il arrive que l'adhérent entre en plastification si le critère $F \geq b \cdot h \cdot R_e$ est atteint. Ici :
 $b = 30 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $R_e = 240 \text{ MPa} \rightarrow$ il n'y a pas eu plastification des plaques d'acier car $F < 28800 \text{ N}$.

$$m = M^* \cdot \frac{\tau}{2} = 33.3 \text{ kPa}$$

$$r_a = \sqrt{\frac{12 \cdot E_a}{\mu_a}} = 5.36$$

La contrainte normale maximale est largement supérieure à la contrainte de cisaillement, ce qui fausse totalement l'interprétation des résultats. En effet, la résistance en traction de l'interface est beaucoup plus faible que sa résistance au cisaillement.

L'analyse de Ferlund et Spelt (1994_[15]) complète cette étude en définissant les taux de restitution d'énergie dans les différents modes. On en déduit alors la valeur critique du taux de restitution de l'énergie associée à l'énergie de rupture, ainsi que l'angle de mixité de mode :

$$\text{Taux de restitution d'énergie en mode I : } G_I \approx \frac{h_a}{2} \frac{\sigma_m^2}{E_a} = 14430 \text{ J/m}^2 \quad (4.5)$$

$$\text{Taux de restitution d'énergie en mode II : } G_{II} \approx \frac{h_a}{2} \frac{\tau_m^2}{\mu_a} = 20339 \text{ J/m}^2 \quad (4.6)$$

$$\text{Taux de restitution critique de l'énergie : } G_C = G_I + G_{II} = 34770 \text{ J/m}^2 \quad (4.7)$$

$$\text{Angle de mixité de mode : } \psi = \arctan \sqrt{\frac{G_{II}}{G_I}} = 49.9^\circ \quad (4.8)$$

La première série d'essais de cisaillement simple nous a permis de mettre en évidence l'influence de la non-symétrie de l'éprouvette. Les résultats ont montré que la proportion de rupture par ouverture n'est pas négligeable. Étant donné le but de cette étude qui est d'analyser le mode II de rupture, nous n'avons donc pas poursuivi l'examen des essais de cisaillement à simple recouvrement.

4.3.2 Essais de cisaillement double

(Annexe C.2)

- **Première série d'essais de cisaillement double**

Trois éprouvettes ont été testées pour la première série d'essais de cisaillement double. Le but de cette géométrie d'éprouvettes est de rétablir la symétrie de chargement et d'éviter ainsi l'apparition d'un moment de flexion. L'essai n'étant pas parfait, il y aura toujours un moment résultant (Figure 4.11). Cependant, dans un premier temps, nous ferons l'hypothèse que ce moment est nul et que l'éprouvette n'est soumise à aucun effort normal.

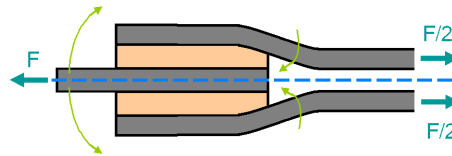


Figure 4.11 : Moments de flexion induits dans un essai à double recouvrement

Tous les essais de cisaillement double ont donné lieu à une rupture parfaitement adhésive. Pour chaque recouvrement, c'est toujours l'interface du côté de la plaque centrale qui rompt. En effet, elle est soumise à un effort F, tandis que par un équilibre des forces, les deux autres plaques ne sont sollicitées chacune que par un effort valant F/2.

Les courbes effort-déplacement relatives à ces essais (Figure 4.12) montrent tout d'abord que l'essai est reproductible. Les valeurs mesurées par les deux extensomètres ne sont pas identiques, ce qui prouve que l'essai n'est pas parfaitement symétrique non plus. Cela peut être dû à la non-symétrie de l'éprouvette mais aussi à celle du chargement. Il est en effet, très possible que l'échantillon n'ait pas été

placé parfaitement verticalement dans la presse. Le moment de flexion qui résulterait de ce mauvais positionnement pourrait expliquer la raison pour laquelle l'extensomètre 1 voit un déplacement négatif en début de chargement.

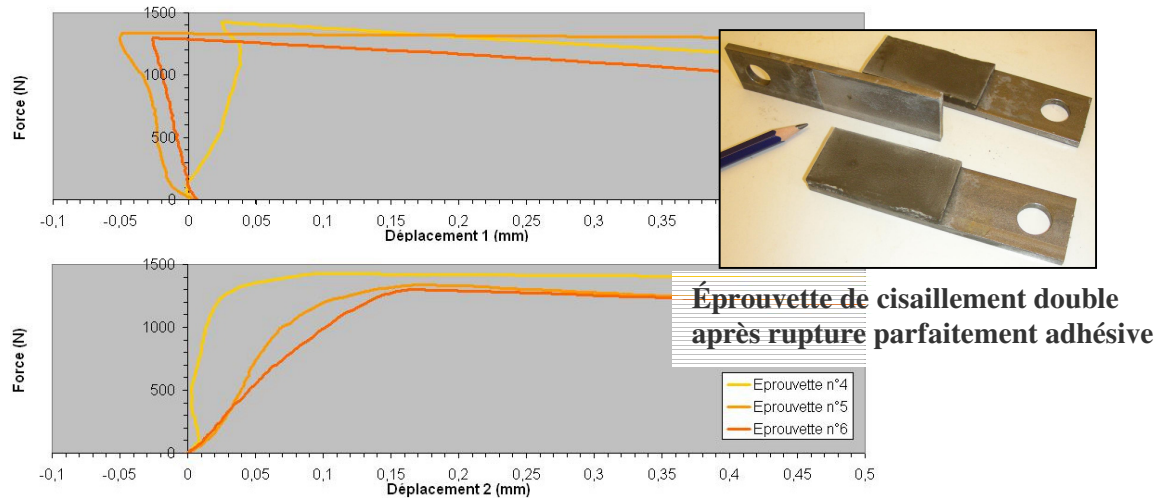


Figure 4.12 : Courbes force-déplacement de la première série d'essais de cisaillement à double recouvrement

L'Equation (4.9) permet de convertir la force en contrainte. L'effort moyen appliqué à la rupture vaut $F = 1354.7$ N, ce qui correspond à une contrainte tangentielle maximale de $\tau_{\max} = 376.30$ kPa. Le moment de flexion n'étant pas totalement supprimé, la valeur calculée de τ_{\max} est surestimée par rapport à sa valeur réelle. Toutefois, les contraintes sont 5 fois plus élevées que pour l'essai de cisaillement simple, ce qui confirme que cet essai permet quand même de réduire le moment de flexion.

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot L \cdot b} \quad (4.9)$$

Comme pour l'essai de cisaillement simple, une analyse plus poussée du calcul des contraintes pourrait être menée. Cependant, ces développements ne permettent pas d'obtenir une solution analytique simple, ils ne seront donc pas réalisés dans le cadre de ce travail. L'analyse de Hart-Smith (1981_[2]) permet néanmoins de déduire la contrainte normale maximale σ en fonction de la contrainte maximale de cisaillement τ (Eq. (4.10)). La valeur de la contrainte normale σ_{\max} reste non négligeable par rapport à τ_{\max} car l'épaisseur du ciment n'est pas mince par rapport à celle de l'acier.

$$\sigma_{\max} = \tau \cdot \left[\frac{3 \cdot E_a \cdot (1 - \nu^2) \cdot h}{E \cdot h_a} \right]^{1/4} = 244.01 \text{ kPa avec } \tau_{\max} = 376.30 \text{ kPa} \quad (4.10)$$

avec E : le module de Young de l'adhérent (210 Gpa) ;
 ν : le coefficient de Poisson de l'adhérent (0.27) ;
 h : l'épaisseur de l'adhérent (4 mm) ;
 E_a : le module de Young de l'adhésif (13.6 Gpa) ;
 h_a : l'épaisseur de l'adhésif (4 mm).

- **Séries 2 et 3 d'essais de cisaillement double : influence de la vitesse de chargement**

Alors que les essais ont jusqu'à présents été pilotés avec une vitesse de déplacement de 1 mm/min, cette section sert à déterminer l'influence de la vitesse de déplacement sur la résistance au cisaillement des assemblages.

Vitesse (mm/min)	F (N)	τ_{max} (kPa)
0.5	1553.4	431.49
0.1	1115.1	309.74

La valeur de la résistance au cisaillement obtenue pour une vitesse de 0.5 mm/min semble surestimée à cause de l'éprouvette n°17 dont la réponse est marginale (Figure C. 3 p.79). Malgré cela, il semblerait que la valeur de la résistance augmenterait avec la vitesse de sollicitation (Figure 4.13). Pour pouvoir caractériser plus précisément cette tendance (type d'évolution, stabilisation de la tendance à partir d'une certaine vitesse), il faudrait mener de nouvelles séries d'essais. Il semblerait toutefois qu'une vitesse plus élevée de 1 mm/min permettrait d'obtenir une plus faible dispersion des résultats. Il faut également noter que plus la vitesse est élevée, plus le phénomène de rupture intervient de manière dynamique. Pour observer une rupture statique, il faudrait mener l'essai à des vitesses beaucoup plus faibles ou créer une pré-entaille au niveau de l'interface qui permettrait d'amorcer la fissuration de manière moins brutale.

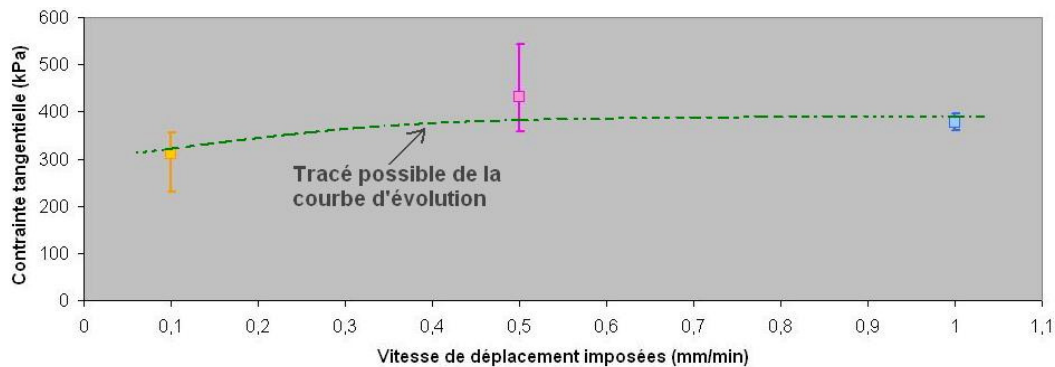


Figure 4.13 : Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la vitesse de pilotage de l'essai

- **Série 4 d'essais de cisaillement double : influence de l'aire de la surface d'interface**

La quatrième série d'essais de cisaillement à double recouvrement a consisté à tester 3 éprouvettes dont l'aire de recouvrement a été réduite de moitié. Le but de cette manipulation est de vérifier que la valeur de la contrainte est bien indépendante de la surface de contact ou si, au contraire, il y a des effets de surface.

L'effort moyen appliqué à la rupture vaut $F = 1078.7$ N, ce qui correspond à une contrainte tangentielle maximale de $\tau_{max} = 599.29$ kPa. Les résultats de cette série d'essais (Figure 4.14) mettent en évidence la dépendance de la contrainte tangentielle par rapport à l'aire de l'interface, du moins pour les essais à petite échelle. La dispersion des valeurs obtenues indique que pour les petites surfaces d'interface, les essais sont moins représentatifs que pour les surfaces d'interface plus grandes.

Il faudrait des résultats pour d'autres valeurs d'interface afin de pouvoir tracer une courbe d'évolution de la contrainte. Cependant, la connaissance en géomécanique (Tshibangu 2009_[32]) des effets d'échelle permet d'extrapoler une courbe d'allure hyperbolique. Les valeurs élevées pour la série 4 sont probablement dues à la présence accrue d'effets de bord qui augmenteraient la résistance. La forte variabilité peut s'expliquer par le fait que les petites interfaces sont plus hétérogènes que les grandes, en effet, celles-ci étant plus étendues, elles subiraient un effet de lissage. Suite à cette analyse, il semblerait que la taille d'échantillons initialement choisie soit suffisante pour s'affranchir des effets de bord et de surface.

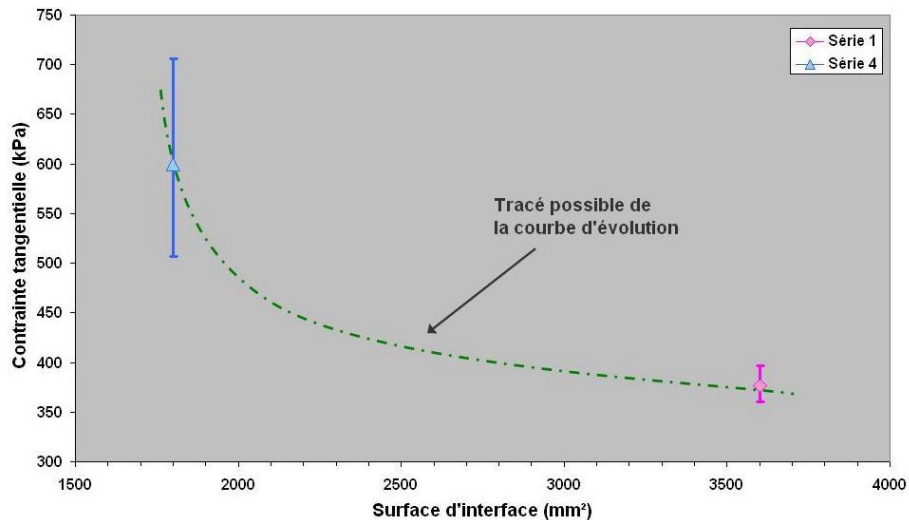


Figure 4.14 : Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la surface d'interface

- **Séries 5 et 6 d'essais de cisaillement double : influence du vieillissement en milieu saturé en CO₂**

La suite du programme expérimental a pour but d'étudier l'effet du vieillissement par le CO₂ sur les interfaces acier/ciment. A cette fin, trois assemblages ont été placés 4 semaines, dans un milieu aqueux saturé en CO₂, sous une pression de 40 bars et à une température de 80°C, ce qui représente les conditions de puits à une profondeur moyenne. Afin d'analyser correctement ces résultats, trois échantillons témoins ont été placés à vieillir pendant 4 semaines, dans l'eau, à 40 bars et 80°C.

Série 5 : vieillissement en milieu aqueux (eau, T = 80°C, P = 40 bars)

La mise en cellule de vieillissement n'a pas modifié l'aspect des échantillons. L'effort moyen mesuré à la rupture vaut $F = 1259.7 \text{ N}$ ce qui correspond à une contrainte tangentielle maximale de $\tau_{\max} = 349.93 \text{ kPa}$.

Série 6 : vieillissement en milieu CO₂ (eau saturée en CO₂, T= 80°C, P = 40 bars)

La carbonatation au niveau de l'interface provoque une rupture qui n'est plus purement interfaciale (Figure 4.15(A)). Lorsque les assemblages de cisaillement sont mis à vieillir en présence de CO₂, ils prennent une couleur brun rouille (Figure 4.15 (C)). Si on se réfère au fait que le ciment des assemblages témoins sort avec un état de surface propre (Figure 4.15 (B)) et que le ciment massif vieilli au CO₂ est recouvert de calcite de couleur blanche (Figure 4.2), on en déduit que :

- le ciment non carbonaté n'interagit pas avec les oxydes de fer provenant des plaques d'acier ;
- le ciment carbonaté est de couleur blanche mais qu'il se teinte en présence d'oxyde de fer, ce qui signifie que la couleur rouille des assemblages peut être assimilée à la zone carbonatée.

A partir de cela, on peut se demander si l'interaction de l'oxyde de fer avec la zone carbonatée ne provoque pas une modification des propriétés de la zone. De plus, les zones carbonatées sont des passages privilégiés par lesquels le CO₂ peut atteindre les plaques d'acier et les corroder. Or, la réaction d'oxydation du fer a un bilan volumique positif, augmente les contraintes au niveau de l'interface et la fragilise. Toutefois, après 4 semaines dans le CO₂, l'acier des interfaces ne semble pas corrodé.

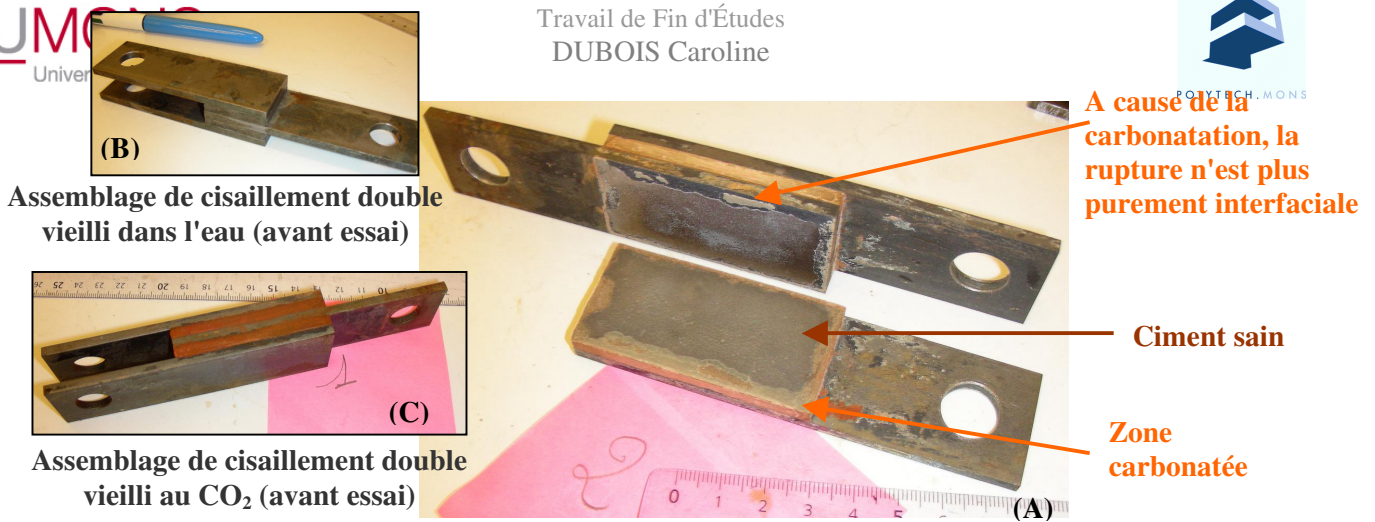


Figure 4.15 : Etat de l'interface après essai mécanique de l'assemblage vieilli 4 semaines dans le CO₂

L'effort moyen appliqué à la rupture vaut $F = 2261.2 \text{ N}$ ce qui correspond à une contrainte tangentielle maximale de $\tau_{\max} = 628.11 \text{ kPa}$, ce qui est beaucoup plus élevé que pour les échantillons témoins (Figure 4.16). L'augmentation de volume résultant de la carbonatation du ciment et/ou de la formation d'oxydes de fer, a pour effet d'augmenter le confinement du ciment, ce qui permet à l'interface de reprendre de plus grandes contraintes en cisaillement. Il est cependant probable que cette tendance s'inverserait pour des temps de vieillissement plus longs. En effet, si la variation volumique continue à augmenter du fait de la propagation du front de carbonatation, on peut s'attendre au développement de contraintes internes pouvant générer une (multi)-fissuration du ciment.

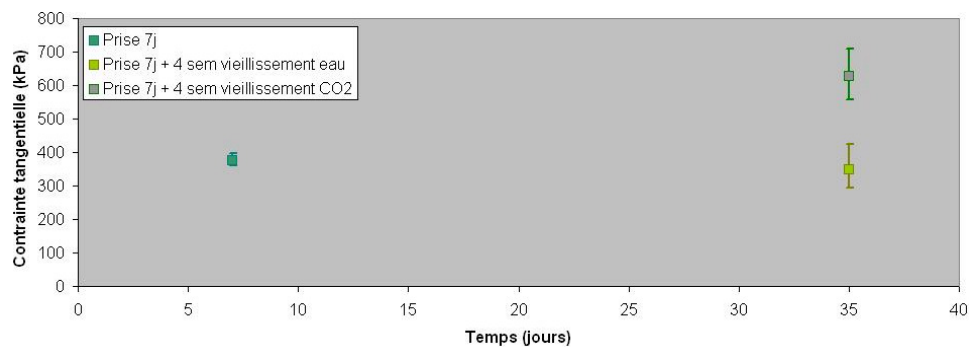


Figure 4.16 : Evolution de la contrainte tangentielle en fonction des conditions de prise

4.4 Bilan des essais de cisaillement

Les séries d'essais menées dans le cadre de ce travail ont permis d'améliorer la compréhension des phénomènes régissant le cisaillement d'une interface. Elles ont également permis d'affiner la méthodologie à mettre en place pour réaliser de tels essais.

Tout d'abord, pour tester une interface en cisaillement, les essais de cisaillement à simple recouvrement sont à éviter car ils génèrent un moment de flexion tel qu'il y a autant d'ouverture que de cisaillement. Une géométrie à double recouvrement est donc préférable, quoique encore imparfaite. Pour réaliser des essais de cisaillement double dans les meilleures conditions, il faut veiller à avoir une aire d'interface suffisamment grande pour réduire les effets de bord et de surface. Les dimensions choisies dans ce travail ($L = 60 \text{ mm}$, $b = 30 \text{ mm}$) semblent satisfaisantes pour s'affranchir des effets indésirables. Choisir une vitesse d'essai adéquate est également important : idéalement, il faudrait une vitesse permettant d'avoir une rupture de type statique et non dynamique. L'instrumentation des essais utilisée n'est pas optimale, car le système d'attache des extensomètres empêche de discerner un éventuel comportement frottant de l'interface après rupture. Dans le futur, il serait donc utile de mettre au point un autre dispositif de fixation des extensomètres.

Les interfaces acier/ciment ont finalement été testées dans des conditions plus proches des conditions réelles de puits : températures élevées, haute pression, présence ou non de CO₂. On constate alors que, dans un premier temps, la présence du CO₂ a une action bénéfique sur la résistance au cisaillement de l'interface, car les produits résultant de l'interaction entre le CO₂ et le ciment et/ou l'acier entraînent une augmentation du confinement. Par la suite, on peut s'attendre à ce que les contraintes internes générées par ces réactions provoquent une fissuration du ciment. Des essais sur des interfaces vieilles plus longtemps seraient nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Dans le futur, il serait également intéressant de mener des analyses physico-chimiques sur l'interface carbonatée.

4.5 Présentation de l'essai de traction

4.5.1 Les assemblages à tester en traction

- **Géométrie des éprouvettes**

L'assemblage est constitué d'une plaque d'acier large de 40 mm sur laquelle est coulée une rondelle de ciment de 20 mm de diamètre et 6 mm d'épaisseur. Un plot en aluminium est collé au ciment (Figure 4.17). Le choix de la colle est une étape délicate car sa résistance à la traction doit être supérieure à celle de l'interface. Nous avons choisi d'utiliser la colle polyépoxyde "Araldite". Elle s'obtient en mélangeant une résine époxyde avec un agent polymérisant.

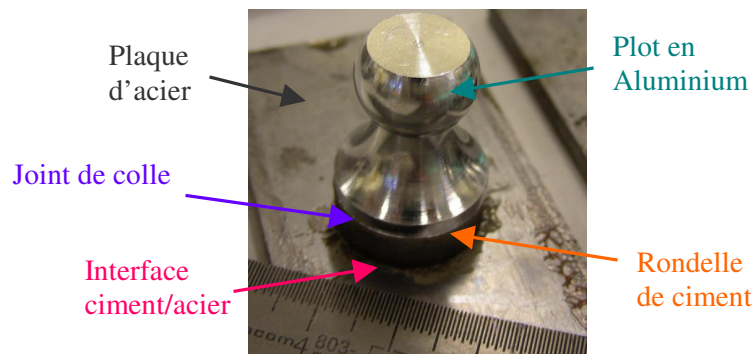
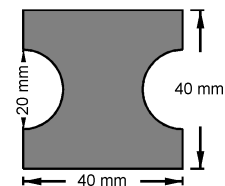


Figure 4.17 : Eprouvette pour l'essai de traction au plot collé

- **Fabrication des échantillons**

Les rondelles sont coulées par lot de 9 (Figure 4.18). Dans la boîte de moulage, 3 plaques d'acier de 40 x 160 mm sont placées horizontalement et des découpes en acier de 40 x 40 mm sont fixées par dessus. Celles-ci sont découpées pour ménager, lorsqu'elles sont mises côte à côte, un disque de 20 mm de diamètre dans lequel le ciment est coulé. Les découpes sont graissées pour que le ciment n'y adhère pas. Les rondelles s'hydratent pendant 7 jours, dans l'eau, à pression atmosphérique et à température de 20°C. Elles sont alors démoulées et testées mécaniquement.



Découpe en acier pour le moulage des rondelles de ciment et permettant de les démouler facilement

Figure 4.18 : Moule de fabrication des assemblages de traction au plot collé

4.5.2 Dispositif et principe de l'essai de traction

Le dispositif pour l'essai de traction est très simple (Figure 4.19). Il consiste en un tube contenant un mors servant à fixer le plot en aluminium qui est relié à un piston. A l'aide d'une pompe à main, on fait le vide dans le tube, ce qui met le piston en traction. La valeur de la contrainte de traction à la rupture est lue sur un manomètre à cadran.

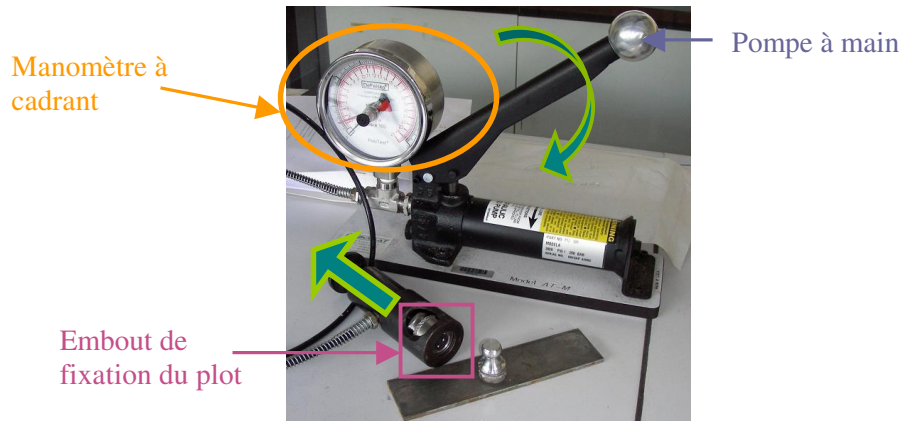


Figure 4.19 : Dispositif des essais de traction

4.6 Résultats des essais de traction

Aucun essai de traction n'a pu être réalisé car, sur les 9 assemblages préparés, les interfaces ciment/acier ont toutes rompu avant la mise en charge. Ces ruptures sont dues à la manipulation pendant le démoulage, le collage et la mise en place de l'assemblage du dispositif d'essai. Le problème peut avoir plusieurs causes :

- le système de démoulage n'est pas adapté ;
- une trop faible rugosité des plaques d'acier qui ne permet pas un bon ancrage du ciment ;
- une aire trop petite de l'interface pour laquelle la force nécessaire pour désadhérer est trop faible.

Il est également apparu que la colle époxyde "Araldite" n'est pas adéquate pour coller du ciment sur lequel elle a une très mauvaise accroche.

4.7 Bilan des essais de traction

Suite à l'échec des essais de traction, on peut conclure que la géométrie de l'éprouvette n'est pas adaptée et la non résistance de l'interface résulte probablement de la combinaison de plusieurs facteurs. Voici toutefois des pistes qui permettraient dans le futur de créer un essai de traction permettant de caractériser mécaniquement les interfaces :

- modifier la forme des découpes en acier pour permettre un démoulage plus facile (par exemple passer de 2 à 4 découpes pour former une rondelle (Figure 4.20) ;

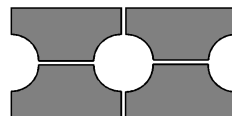


Figure 4.20 : Modification des découpes en acier pour le moulage des rondelles de ciment

- utiliser des plaques d'acier ayant un état de surface moins lisse pour permettre une meilleure accroche du ciment.

Une autre solution serait d'augmenter l'aire d'interface, mais cela impliquerait de devoir utiliser un autre dispositif d'essai. Pour finir, il est nécessaire de trouver une autre colle capable d'adhérer au ciment.

Chapitre 5 CONCLUSIONS

5.1 Bilan de ce travail

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans la problématique actuelle qu'est le stockage géologique du CO₂. Il s'est plus particulièrement intéressé aux problèmes d'étanchéité rencontrés dans le puits d'injection, en tentant de caractériser le comportement mécanique de l'interface entre l'annulaire de ciment et le cuvelage en acier.

La première partie de ce travail a consisté en une analyse bibliographique dont le but était d'introduire les notions essentielles pour l'étude mais surtout de placer ce travail dans le contexte des connaissances scientifiques déjà acquises sur le sujet. Les études que j'ai effectuées ont pour but de contribuer à l'avancement de ces connaissances et se sont focalisées sur deux domaines distincts mais complémentaires :

- la modélisation numérique du comportement mécanique de l'interface par le biais de lois spécifiques ;
- la mise au point d'assemblages et d'essais servant à caractériser mécaniquement les interfaces ciment/acier.

La modélisation numérique visait la mise au point d'une méthode afin de simuler correctement le comportement mécanique des interfaces en cisaillement pur notamment (essais *push-out*). A cette fin, une loi de la bibliothèque du code de calcul Abaqus™ a été testée dans un premier temps. Comme elle ne permettait pas de reproduire le comportement adhérent frottant déjà mis en évidence expérimentalement (Kenga_[20]), une autre solution a été envisagée : l'implémentation d'une loi d'interface de Cangémi_[12]. Une fois adaptée numériquement, elle permettra de mener des simulations prédictives du comportement des interfaces car elle allie adhérence et frottement. Bien que la loi ne soit pas encore totalement fonctionnelle, les résultats déjà obtenus sont prometteurs et encourageants.

Pour obtenir des résultats conformes avec une simulation numérique, il est nécessaire d'introduire les bons paramètres des matériaux et de l'interface. C'est pour cette raison que la dernière partie de ce travail a été assignée à la mise au point d'essais servant à caractériser mécaniquement les interfaces ciment/acier.

Plusieurs configurations d'assemblages ont été testées en cisaillement. Grâce à ces essais, un début de protocole expérimental a été élaboré : une géométrie d'assemblage permettant de réduire les efforts indésirables, une taille d'échantillons adéquate pour éviter les effets de bord et de surface, ... Outre l'étude de la géométrie des assemblages et des paramètres d'essais, une caractérisation des interfaces vieillies en milieu aqueux saturé en CO₂ a commencé. Les résultats obtenus ont mis en évidence un effet bénéfique de la carbonatation du ciment sur la résistance au cisaillement pour les faibles temps de vieillissement (4 semaines).

Un essai de traction a également été élaboré pour tenter d'analyser les interfaces en mode de rupture d'ouverture. Malheureusement, la géométrie de l'essai n'étant pas adaptée aux interfaces ciment/acier, il n'a pas permis de les caractériser en traction.

En outre, pour disposer de valeurs de référence auxquelles comparer les résultats obtenus sur les interfaces ciment/acier, des essais mécaniques ont été menés sur des plots de ciment massif.

5.2 Perspectives futures

Les recherches menées dans ce travail ont créé des ouvertures pour des travaux futurs.

Dans le domaine de la modélisation des interfaces ciment/acier, plusieurs points sont à approfondir :

- achever l'implémentation de la loi d'interface et en préciser les paramètres afin que le modèle approche les résultats expérimentaux ;

- tester la robustesse de la loi : faire en sorte qu'une loi unique soit capable de représenter le comportement de l'interface, quelle que soit la sollicitation appliquée ;
- adapter ou créer une nouvelle loi qui permettrait de tenir compte de l'évolution des propriétés de l'interface en fonction de l'état de carbonatation du ciment par le CO₂.

Au niveau des essais mécaniques, beaucoup de perspectives se sont ouvertes avec ce projet :

- mettre au point un protocole d'essais mécaniques pour tester le ciment massif après carbonatation afin d'éviter les problèmes de mise en place ; des essais de poinçonnement pourrait être une solution pour tester la zone carbonatée ;
- terminer le protocole expérimental des essais de cisaillement en approfondissant les études commencées et particulièrement en recherchant les vitesses d'essais qui permettraient d'obtenir une rupture statique de l'interface ;
- analyser l'évolution des propriétés de l'interface pour de longues durées de vieillissement en présence de CO₂ et caractériser d'un point de vue physico-chimique la zone carbonatée ;
- élaborer une géométrie d'assemblage pour tester les interfaces en traction et en flexion et ainsi pouvoir élargir la base de données sur les propriétés des interfaces.

Pour compléter cette étude, l'IFP a mis en place une thèse de doctorat qui commencera à la rentrée académique 2010.

Annexe A Utilisation du logiciel ABAQUS™ pour la modélisation de zones cohésives

A.1 Présentation du code de calcul de structure ABAQUS™

(Abaqus™ 2009_[1])

Abaqus™ est un logiciel de calcul d'éléments finis qui se compose de plusieurs logiciels produits :

- ABAQUS/Standard : un solveur général pour des problèmes aux éléments finis ;
- ABAQUS/Explicit : un solveur explicite pour des problèmes dynamiques aux éléments finis ;
- ABAQUS/CAE : l'interface pour créer des modèles aux éléments finis et en analyser les résultats ;
- ABAQUS/Viewer : une interface destinée au post-traitement des résultats.

Abaqus™ permet de résoudre des problèmes mécaniques complexes dans de nombreux domaines. Il est principalement utilisé en automobile et en aéronautique.

Présentation d'ABAQUS/CAE :

Figure A. 1 : Fenêtre principale (Abaqus™ 2009_[1])

La fenêtre principale se compose de différentes parties:

- La *Title bar* indique la version d'Abaqus™ et le nom du modèle en cours ;
- La *Menu bar* contient les menus donnant accès aux fonctionnalités ;
- La *Toolbar* et la *Toolbox area* fournissent un accès rapide à certaines fonctionnalités de la *Menu bar* ;
- La *Contexte bar* permet de passer facilement d'une étape à l'autre de la modélisation;
- Le *Model Tree* montre une vue d'ensemble du modèle et des objets qui le composent (la géométrie, les matériaux, le maillage, les chargements, ...) ;
- Le *Resul Tree* donne une vue d'ensemble du résultat de la simulation et des fichiers de sortie ;
- La *Viewport* est la zone de la fenêtre où est affiché le modèle ;

- La *Prompt area* fournit des instructions pendant les procédures de construction du modèle ;
- La *Message area* affiche les messages d'avertissement et d'erreur ainsi que différentes informations.

La *Menu bar* et la *Toolbox area* évoluent et s'adaptent à l'étape de modélisation en cours.

Abaqus™ est divisé en modules fonctionnels, chacun concernant une étape de la construction du modèle. Les différentes étapes de la modélisation :

1. *Part* : Créer les parties du modèle en définissant leur géométrie ;
2. *Materials* : Définir les propriétés des matériaux présents dans le modèle. Affecter les matériaux à des *sections* ;
3. *Section* : Définir les sections intervenant dans le modèle et les affecter aux *parts*
4. *Assembly* : Assembler les différentes parties du modèle ;
5. *Step* : Spécifier et paramétrer les étapes de l'analyse en leur associant les variables qu'Abaqus™ doit sortir (*Output Request*)
6. *Interaction* : Créer les interactions entre les régions du modèle;
7. *Load* : Définir les chargements qui sont appliqués dans les *steps* ;
8. *Boundary Conditions* (BCs) : Spécifier les conditions limites qui sont appliquées dans les *steps* ;
9. *Mesh* : Créer un maillage aux éléments finis ;
10. *Job* : Créer une analyse et lancer le calcul.

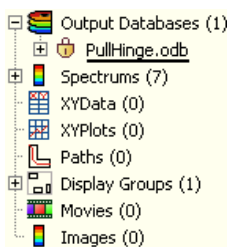


Figure A. 2 : *Model Tree* (Abaqus™ 2009_[1])

Le *Result Tree* fournit une description visuelle des données de sortie. Il permet de les visualiser cartographiquement, graphiquement ou selon une table de résultats. Il permet également de créer des variables de sorties additionnelles, des graphiques, des historiques, ...

Figure A. 3 : *Result Tree* (Abaqus™ 2009_[1])

A.2 Exemple d'un fichier d'entrée (extension .inp) utilisant des éléments cohésifs axisymétriques – Essai *push-out*

Le fichier d'entrée est généré en grande partie par Abaqus / CAE (notamment pour créer la géométrie et le maillage). L'utilisateur peut ensuite revenir dans le fichier *input* (extension .inp) pour rajouter ou modifier certaines fonctionnalités non activées dans le CAE.

L'exemple de fichier *input* présenté ci-dessous concerne le modèle d'essai *push-out*. Il s'agit d'un essai mécanique qui a pour but de provoquer la rupture de l'interface existant entre un cylindre de ciment coulé dans un cylindre creux d'acier (Figure A. 4). Le modèle conçu est axisymétrique et contient 3 parties :

- le cylindre de ciment sur la surface duquel une force est exercée ;
- le cylindre creux d'acier dont les parties extérieures sont encastrées ;
- une zone interfaciale constituée d'éléments cohésifs qui relie le ciment à l'acier.

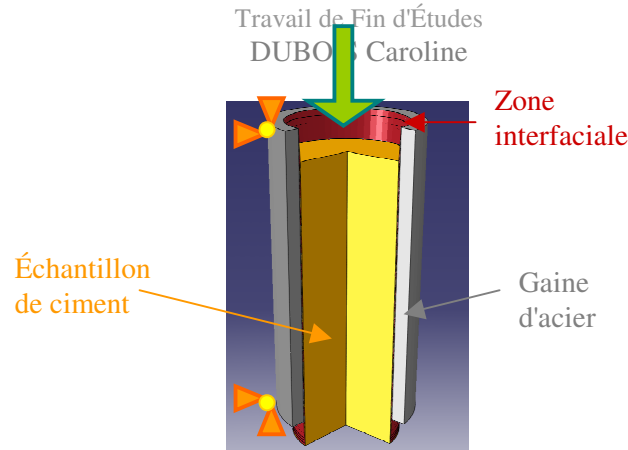


Figure A. 4 : Modèle de l'essai *push-out*

Fichier d'entrée de l'essai *push-out* :

```

*Heading
** Job name: PushOut Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE Version 6.8-3
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** -----
** -----
**
** PARTS
**
*Part, name=Casing
*End Part
*Part, name=Echantillon
*End Part
*Part, name=Interface
*End Part
**
** -----
** -----
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
** -----
**
*Instance, name=Casing-1, part=Casing
*Node
  1, ...
*Element, type=CAX4
  1, ...
*Nset, nset= ...
*Elset, elset= ...
*Solid Section, elset=Set_Casing, material=Acier
*End Instance
**
** -----
**
*Instance, name=Ciment-1, part=Echantillon
*Node
  1, ...
*Element, type=CAX4
  1, ...
*Nset, nset= ...

```

* : ce qui suit est un mot-clef
** : ce qui suit est un commentaire

Parts composant le modèle
3 parts : Casing, Echantillon, Interface

Instances composant le modèle
3 instances :
Casing (éléments homogènes axisymétriques),
Echantillon (éléments homogènes axisymétriques),
Interface (éléments cohésifs axisymétriques)

```
*Elset, elset= ...
*Solid Section, elset=Set_Echant, material=Ciment
*End Instance
**
**
** -----
**
**
```

```
*Instance, name=Interface-1, part=Interface
*Node
1, ...
```

Définition d'éléments
cohésifs axisymétriques

```
*Element, type=COHAX4
```

```
1, ...
*Nset, nset= ...
*Elset, elset= ...
**
**
**
```

Définition du set
d'éléments pour
lesquels les propriétés
cohésives sont définies

Définition du
matériel affecté à
ces éléments

```
*Cohesive Section, elset=Set_Interf, material=Interface,
response=traction separation, thickness=geometry, stack direction=1
,**
```

Définition du type de
comportement des
éléments cohésifs

Définition du calcul
de l'épaisseur des
éléments cohésifs

Définition de la
direction de l'épaisseur
de la couche cohésive

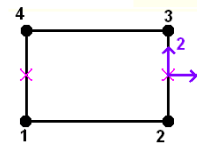
Geometry : l'épaisseur initiale de la
couche cohésive est déterminée à partir
des coordonnées des nœuds des éléments

Specified : spécifier l'épaisseur constitutive
initiale de la couche cohésive. Si le champ
est laissé blanc ou = 0, l'épaisseur est
considérée égale à l'unité.

Traction separation : pour les zones
cohésives ayant une épaisseur très faible

Continuum : pour les zones cohésives
dont l'épaisseur est importante

1, 2, 3 : direction correspondante de l'élément
pour un élément axisymétrique :



Orientation : direction particulière. Nécessite
l'introduction d'un paramètre "orientation"

La direction dépend de la connectivité des
éléments.

```
**
**
** -----
**
**
```

```
*End Assembly
**
**
** -----
**
**
```

```
**
**
** MATERIALS
```

Matériaux affectés au modèle
3 instances : Acier pour "casing", béton pour
"echantillon", Interface pour "interface"

```
*Material, name=Acier
*Elastic
21000, 0.27
```




```

**
*Material, name=Ciment
*Elastic
12000, 0.2
*Mohr Coulomb
30.,20.
*Mohr Coulomb Hardening
18,0.
**
**
**
**
**
**
**

```

Isotropic (type par défaut) : comportement isotrope

Engineering constants : comportement orthotrope

Lamina : comportement orthotrope en contraintes planes

Orthotropic : comportement orthotrope

Anisotropic : comportement entièrement anisotrope

Traction : comportement de cisaillement orthotrope pour éléments déformables ou comportement en traction non couplée pour éléments cohésifs

Coupled traction : comportement en traction couplée pour éléments cohésifs

```

*Material, name=Interface
*Elastic, type=TRACTION
13333, 5000, 5000
**
**
**
**
**
**
**

```

L'utilisateur doit rentrer les modules de cisaillement dans la direction normale et les directions tangentielles. Ceux-ci peuvent être déterminés à partir des valeurs de E et ν comme suit :

$$K_{NN} = E \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \text{ et } K_{SS} = K_{TT} = E \frac{1}{2(1+\nu)}$$

Type d'initiation de l'endommagement

```

*Damage initiation, criterion=maxe
1e-03, 1e-03, 1e-03
**
**

```

Déformations normale ϵ_{nn} et tangentielle ϵ_{ss} ϵ_{tt} à partir desquelles l'endommagement débute

Ductile : basé sur la déformation ductile à la rupture

Hysteresis energy : basé sur l'énergie non-élastique d'hystérésis dissipée par cycle stabilisé dans une analyse de fatigue

Maxe : basé sur la déformation nominale maximale des éléments cohésifs

Maxs : basé sur la contrainte nominale maximale des éléments cohésifs

Quade : basé sur un critère quadratique en déformation, des éléments cohésifs

Quads : basé sur un critère quadratique en contrainte, des éléments cohésifs

Shear : basé sur la déformation de rupture en cisaillement

Type de propagation de l'endommagement

Adoucissement de l'endommagement

```

*Damage Evolution, type=displacement, softening=linear
**

```

Displacement : évolution de l'endommagement en fonction du déplacement après l'initiation du dommage

Energy : évolution de l'endommagement en terme d'énergie nécessaire à la propagation de la rupture

Hysteresis energy : évolution de l'endommagement en terme d'énergie non-élastique d'hystérésis dissipée par cycle stabilisé dans une analyse de fatigue

Linear : évolution linéaire de la variable d'endommagement

Exponential : évolution exponentielle de la variable d'endommagement

Tabular : évolution de la variable d'endommagement en fonction de la déformation

```

**
5
**
**
**
**
** INTERACTION PROPERTIES
**
** *Surface Interaction, name=contact-tied
1.,
** *Friction
0.,
** *Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD
**
**
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** *Name: Encastrement Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
** *Boundary
Casing-1.Set_Encastr, ENCASTRE
**
**
** INTERACTIONS
**
** *Interaction: Contact-tied-acier/interf
** *Contact Pair, interaction=contact-tied, tied, adjust=1e-05
Surf-interf/acier-slave, Surf-acier-master
**
** *Interaction: Contact-tied-ciment/interf
** *Contact Pair, interaction=contact-tied, tied, adjust=1e-05
Surf-interf/ciment-slave, Surf-ciment-master
**
**
**
** STEP: Chargement
**
** *Step, name=Chargement, inc=1000
** *Static
1, 200., 1e-10 , 5.
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** *Name: Chargement Type: Velocity/Angular velocity
** *Boundary, type=VELOCITY
Ciment-1.Set_Charg, 2, 2, -0.0167
**
**
** OUTPUT REQUESTS
** *Restart, write, frequency=0

```

Déplacement atteint à la ruine du matériau

Conditions aux limites
Encastrement du casing

Interactions entre les parts
2 interactions : ciment/interface et interface/acier

L' "Interface" a été définie par une PART distincte du "Casing" et de l' "Echantillon". Il convient donc de lier les surfaces qui sont en contact, mais qui appartiennent à des PARTs différentes à l' aide de « contact pair, tied ».

Étape de chargement
La vitesse de déplacement de l'échantillon est imposée à 1 mm/min

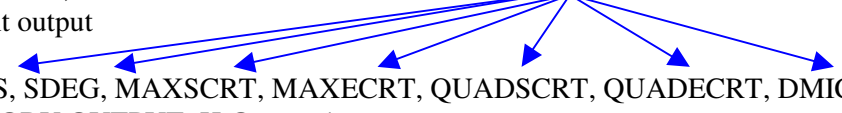
Définir les sorties
du modèle

```

**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
*Output, field, variable=PRESELECT
*Element output
**
STATUS, SDEG, MAXSCRT, MAXECRT, QUADSCRT, QUADDECRT, DMICRT,
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
*Output, history, variable=PRESELECT
**
*End Step

```

Variables propres aux éléments cohésifs



A.3 Analyse des résultats de l'essai *push-out* depuis Abaqus Viewer

Une fois le calcul réalisé par le code ABAQUS™ (module Abaqus / Standard), les résultats peuvent être visualisés grâce à Abaqus / Viewer. L'analyse des résultats dans le cas de l'essai *push-out* sont présentés ci-dessous.

Remarque : Les conventions Abaqus™ impliquent :
 Pour la traction : forces et contraintes positives
 Pour la compression : forces et contraintes négatives

Cette partie montre la répartition des variables (contrainte, déformation, ...) obtenues en simulant le modèle de base de l'essai *push-out* défini dans la section 3.1.

La Figure A. 5 indique que la décohéation totale se produit au temps $t_D \approx 13$ s et que l'échantillon est totalement rompu au temps $t_R = 300$ s.

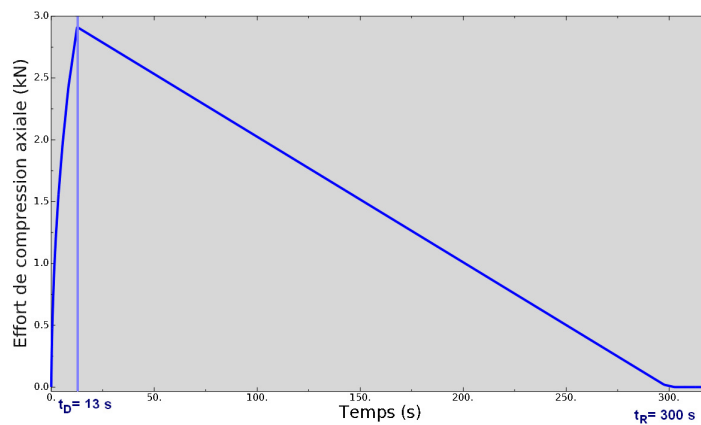


Figure A. 5 : Effort de compression axiale en fonction du temps

Le choix de la définition des éléments cohésifs détermine les sorties actives de l'élément :

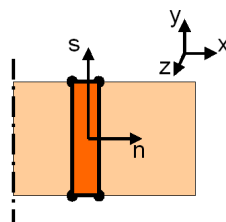


Figure A. 6 : Orientation d'un élément cohésif axisymétrique

- l'approche continue : l'élément a une épaisseur non négligeable (cas d'une interphase). Les sorties de l'élément cohésif sont semblables à celles d'un élément continu (pour un élément axisymétrique : $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \epsilon_{xy}$) ;
- l'approche traction-séparation : l'élément a une épaisseur très faible (cas d'une interface). Les sorties ne sont données que dans les directions normales et tangentielles (pour un élément axisymétrique : $\epsilon_{nn}, \epsilon_{tt}$).

A.3.1 Variables Standards

Les variables standards sont définies pour tout type de modèle et de chargement. A l'instant initial, toutes les variables sont égales à 0.

- **Force verticale appliquée sur la surface du cylindre (RF)**

La force de compression verticale se répartit sur la surface de chargement et est induite par le chargement à vitesse constante. Sa valeur augmente jusqu'à t_D puis diminue pour s'annuler en t_R . Au sein de la zone cohésive, l'effort de compression reste nul. (Figure A. 7)

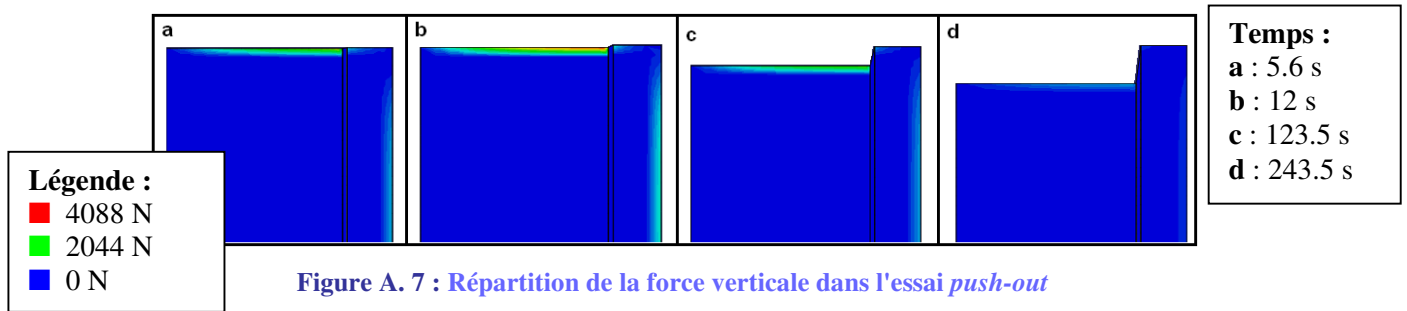


Figure A. 7 : Répartition de la force verticale dans l'essai *push-out*

- **Contraintes normales (σ_{nn}) et tangentielles dans l'interface (σ_{ss})**

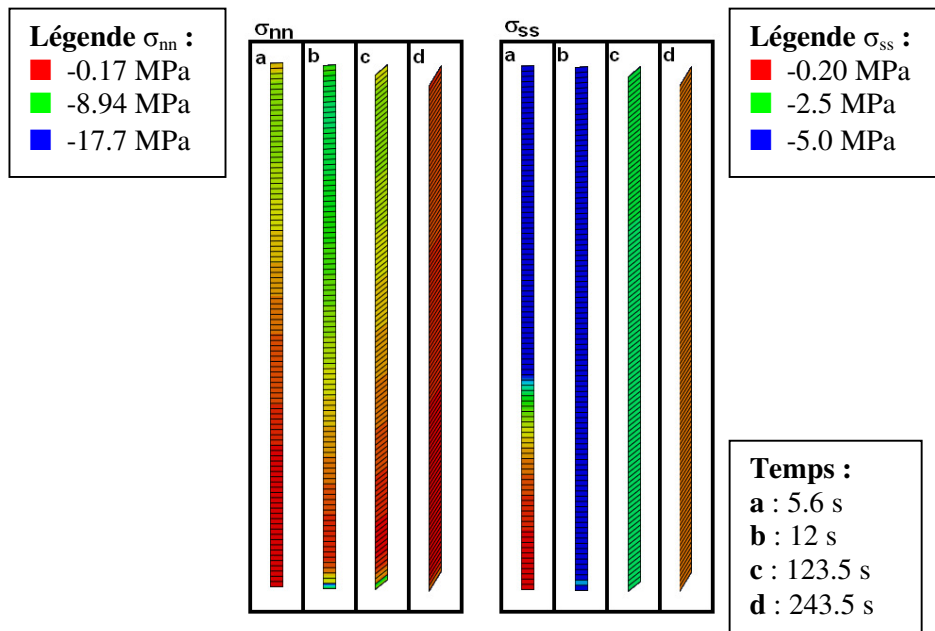


Figure A. 8 : Répartition du champ de contraintes normales et tangentielles dans l'interface de l'essai *push-out*

La contrainte normale dans l'interface indique que celle-ci est en compression durant tout l'essai. Sa valeur augmente, à partir de son sommet, jusqu'au temps t_D . Par la suite elle diminue pour qu'en t_R l'interface soit totalement relâchée, lorsque l'interface est désadhérée, elle n'est plus soumise à des sollicitations normales. La contrainte tangentielle progresse le long de l'interface jusqu'en t_D où elle est maximale et vaut -5 MPa. elle diminue ensuite linéairement pour s'annuler en t_R . (Figure A. 8)

- **Déformations normales (ϵ_{nn}) et tangentielles (ϵ_{ss}) dans l'interface**

La déformation normale de l'interface montre qu'elle se comprime de plus en plus jusqu'en t_D , pour ensuite se relâcher et s'annuler en t_R , après la rupture de l'échantillon, l'interface n'est plus déformée normalement. La déformation tangentielle augmente dans l'interface tout au long de l'essai. (Figure A. 9)

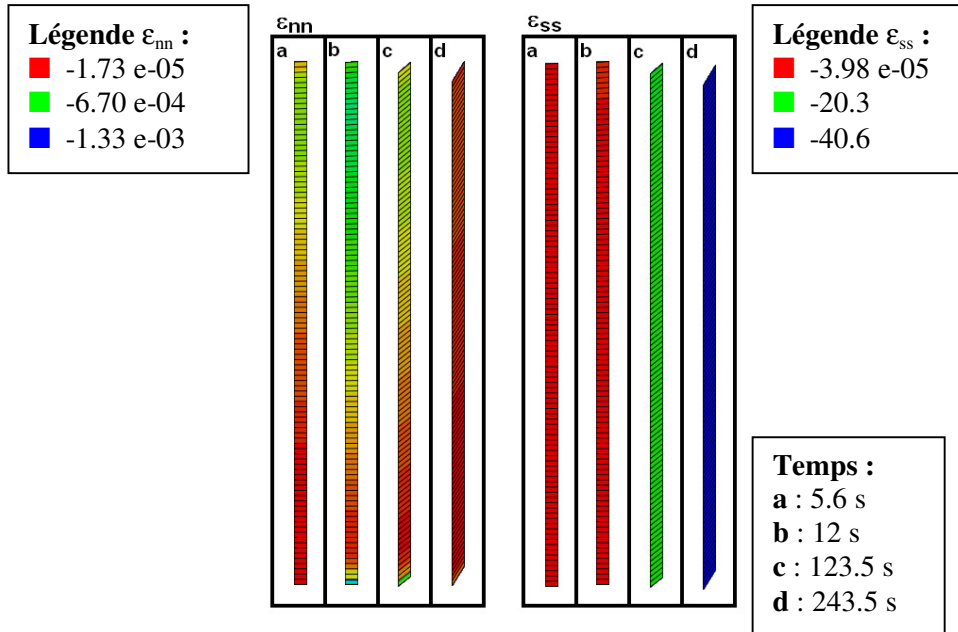


Figure A. 9 : Répartition du champ de déformations normales et tangentielles dans l'interface de l'essai *push-out*

- **Pression de contact**

La pression au contact entre l'échantillon et l'interface indique que les contacts sont principalement soumis à des pressions de traction. Celle-ci est maximale en t_D dans le bas du modèle. Les figures (a) et (b) permettent de bien constater le retard de déplacement du bas par rapport au haut de l'échantillon. (Figure A. 10)

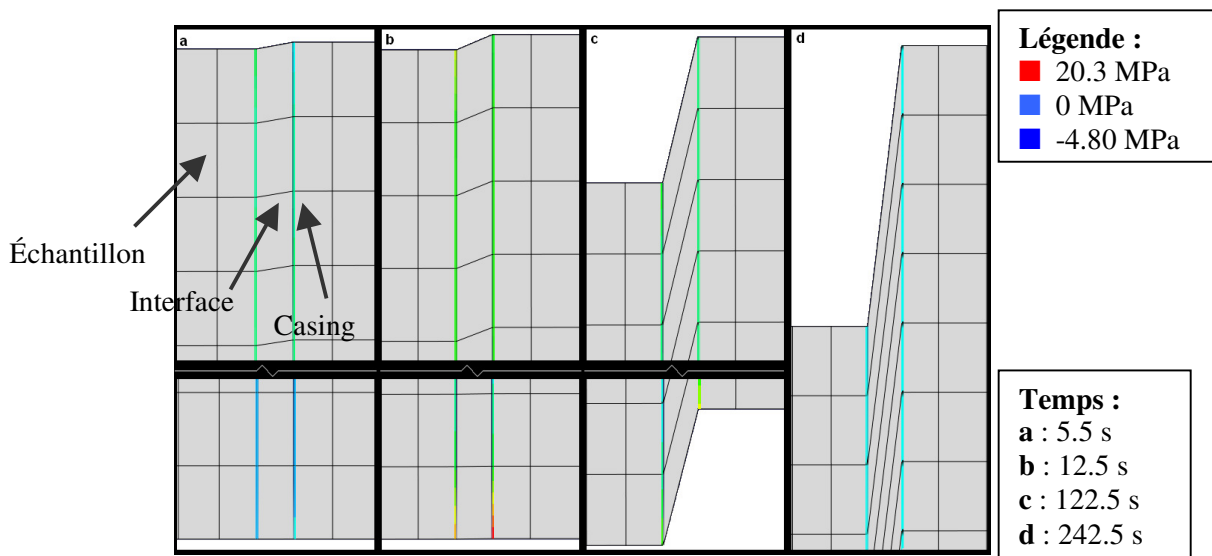


Figure A. 10 : Pression au contact entre l'échantillon, l'interface et le casing

- **Contrainte de cisaillement au contact**

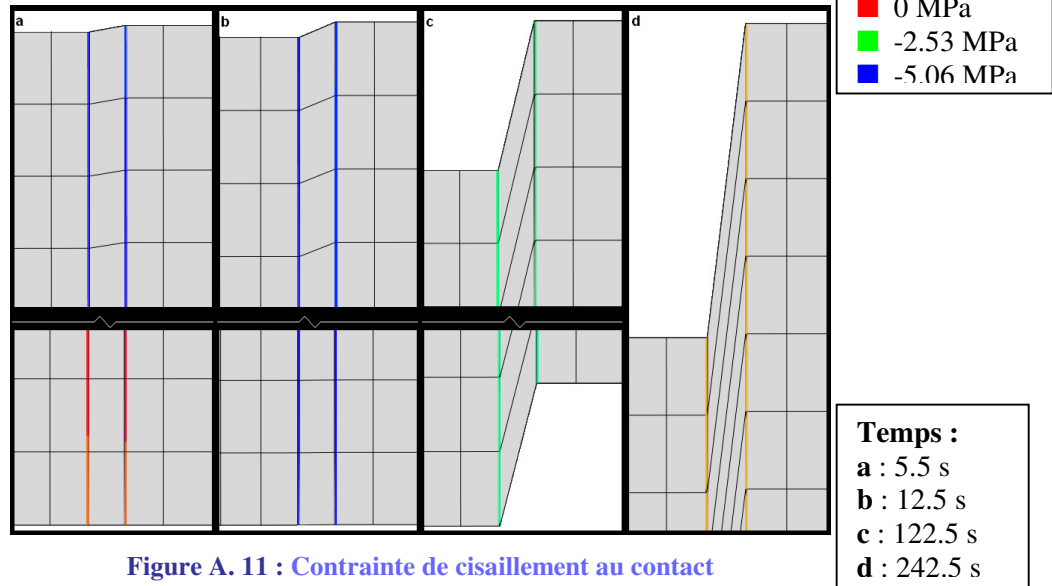


Figure A. 11 : Contrainte de cisaillement au contact

Au début de l'essai, la contrainte de cisaillement est nulle tout le long des contacts. Elle augmente progressivement pour atteindre sa valeur maximale en t_D . Elle diminue ensuite pour s'annuler en t_R . (Figure A. 11)

A.3.2 Variables propres aux éléments cohésifs

Il existe des variables spécifiques aux éléments cohésifs à comportement traction-séparation. Elle ne sont disponibles que pour l'interface.

- **STATUS**

La variable Status donne le statut de l'élément : $STATUS = \begin{cases} 1 & \text{si l'élément est actif} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

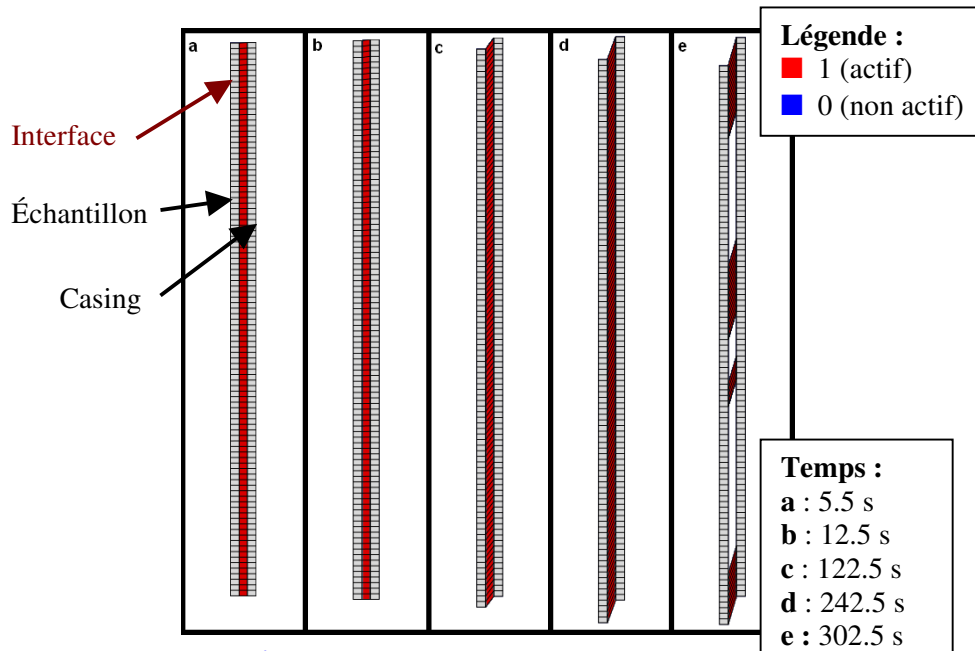


Figure A. 12 : Évolution de la variable Status dans l'interface cohésive

Tous les éléments cohésifs restent actifs jusqu'à la ruine du matériau (t_R) (Figure A. 12). Après rupture de l'interface, les éléments cohésifs disparaissent progressivement (figure (e)). Un élément disparaît lorsque $D = 1$ et qu'aucun de ses nœuds n'est plus en compression.

- **Endommagement**

Valeur globale de la variable d'endommagement D : $D = \begin{cases} 0 & \text{matériau sain} \\ 1 & \text{endommagement complet du matériau} \end{cases}$

L'endommagement total du matériau se produit dans les premières secondes de mise en charge de l'échantillon. (Figure A. 13)

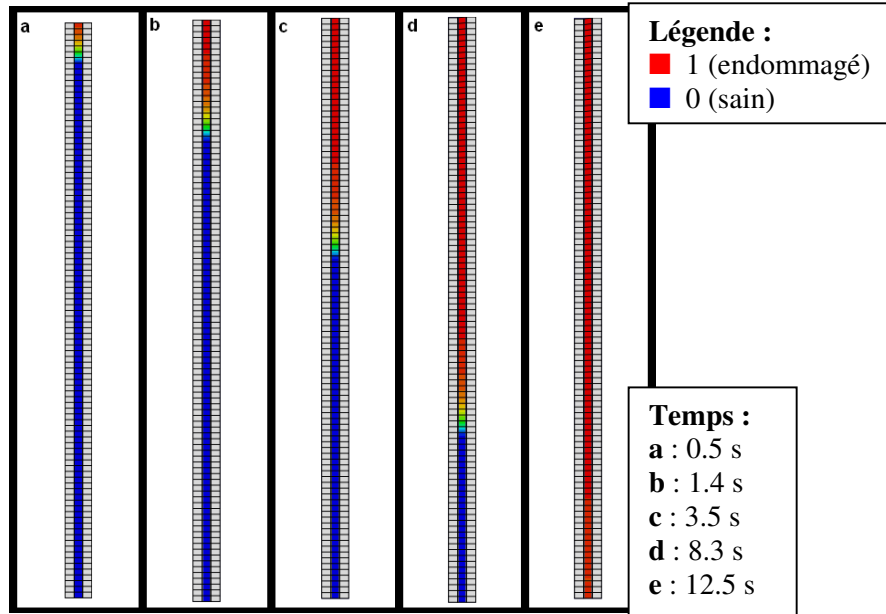


Figure A. 13 : Évolution de l'endommagement dans l'interface cohésive

- **Critères d'initiation de l'endommagement.**

Critère MAXE

Cette variable indique si la déformation nominale maximale du critère d'initiation de l'endommagement est satisfaite en un point. Elle est évaluée comme :

$$\max \left\{ \frac{\langle \epsilon_n \rangle}{\epsilon_n^o}, \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s^o}, \frac{\epsilon_t}{\epsilon_t^o} \right\} \begin{cases} < 1 : \text{le critère d'initiation de l'endommagement n'est pas satisfait} \\ \geq 1 : \text{le critère d'initiation de l'endommagement est satisfait} \end{cases}$$

- avec ϵ_i^o : déformation à partir de laquelle il y a initiation de l'endommagement
 ϵ_i : déformation calculée par Abaqus™
 n : direction normale
 s : direction tangentielle 1
 t : direction tangentielle 2

Le critère d'initiation de l'endommagement est atteint dès le début de l'essai. (Figure A. 14)

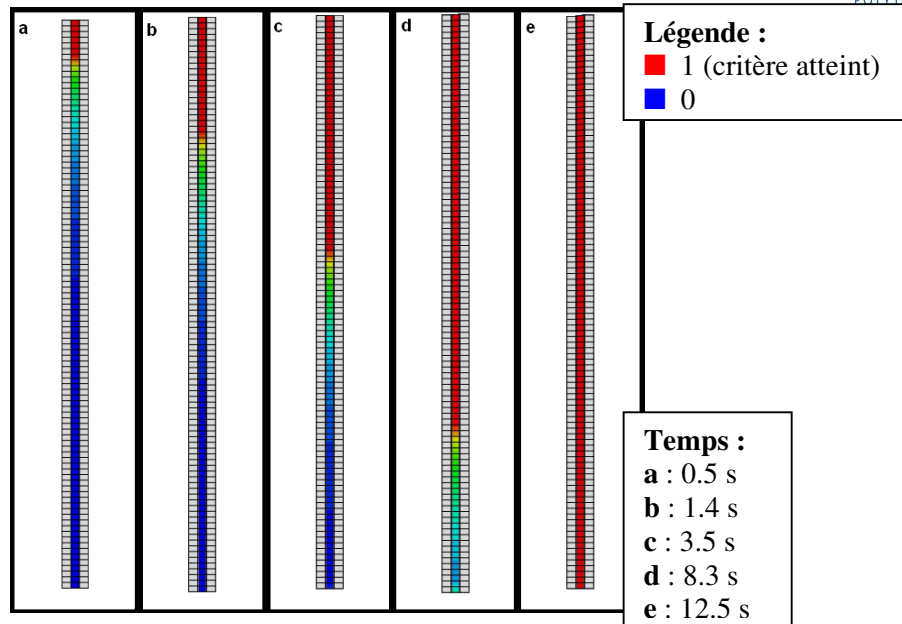


Figure A. 14 : Évolution du critère d'initiation de la rupture dans l'interface cohésive

Les autres critères

MAXS : Cette variable indique si la contrainte nominale maximale du critère d'initiation de l'endommagement est satisfaite en un point. Elle est évaluée comme :

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^o}, \frac{t_s}{t_s^o}, \frac{t_t}{t_t^o} \right\} \begin{cases} < 1: \text{le critère d'initiation de l'endommagement n'est pas satisfait} \\ \geq 1: \text{le critère d'initiation de l'endommagement est satisfait} \end{cases}$$

avec t_i^o : contrainte à partir de laquelle il y a initiation de l'endommagement
 t_i : contrainte calculée par Abaqus™
 n : direction normale
 s : direction tangentielle 1
 t : direction tangentielle 2

QUADS : Cette variable indique si la contrainte nominale quadratique du critère d'initiation de l'endommagement est satisfaite en un point. Elle est évaluée comme :

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^o} \right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^o} \right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^o} \right)^2 \begin{cases} < 1: \text{le critère d'initiation de l'endommagement n'est pas satisfait} \\ \geq 1: \text{le critère d'initiation de l'endommagement est satisfait} \end{cases}$$

Dans cette analyse, cette variable n'a pas de sortie car le critère utilisé est le critère MAXE.

QUADE : Cette variable indique si la déformation nominale quadratique du critère d'initiation de l'endommagement est satisfaite en un point. Elle est évaluée comme :

$$\left(\frac{\langle \epsilon_n \rangle}{\epsilon_n^o} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_s^o} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_t^o} \right)^2 \begin{cases} < 1: \text{le critère d'initiation de l'endommagement n'est pas satisfait} \\ \geq 1: \text{le critère d'initiation de l'endommagement est satisfait} \end{cases}$$

Dans cette analyse, cette variable n'a pas de sortie, car le critère utilisé est le critère MAXE.

Annexe B Propriétés mécaniques du ciment massif

Cette annexe contient le détail des résultats de la caractérisation des propriétés mécaniques du ciment massif. Le ciment utilisé est un ciment classique Portland ClassG. En plus des produits de base (carbonates et alumino-silicates), il contient un peu de gypse pour réguler la prise et également de l'anti-mousse pour éviter la formation de bulles d'air qui affaibliraient sa tenue mécanique.

La procédure d'hydratation de la poudre est normalisée. Le ciment est mélangé à l'eau avec un rapport massique $\frac{E}{C} = 0.44$ pour obtenir une densité de 1,9, cette étape doit être réalisée en 15 s. Le laitier de ciment est alors agité à grande vitesse pendant 35 s pour permettre une hydratation massive de la poudre. Il est ensuite malaxé plus lentement pendant 20 minutes pour parfaire l'hydratation et éviter que le gel de silice ne se forme trop rapidement. Il est finalement coulé dans des moules appropriés où il prend pendant 7 jours, dans l'eau, à pression atmosphérique et température de 20°C. Dans le cas des essais vieillis, après la prise de 7 jours, les échantillons sont placés 4 semaines dans une cellule contrôlée en température et pression.

Les essais mécaniques sur le ciment sont réalisés sur des échantillons cylindriques de 25 mm de diamètre par 50 mm de hauteur pour les essais de compression et 25 mm de hauteur pour les essais de traction. Pour caractériser les propriétés mécaniques du ciment employé, des essais de compression et de traction ont été réalisés. Ils sont pilotés à une vitesse de mise en charge valant à 5,8 kN/min, soit environ 12 MPa/min. Ils ont été menés sur une presse mécanique pouvant exercer une charge allant jusqu'à 5T. La charge appliquée est mesurée avec un capteur de force et l'acquisition de la déformation est réalisée à l'aide d'un extensomètre. L'acquisition des données a été faite au moyen du logiciel Bluehill.

B.1 Ciment à 7 jours de prise

Cette section consiste à déterminer les propriétés mécaniques du ciment massif qui a pris pendant 7 jours dans l'eau, à température de 20°C et à pression atmosphérique.

- **Essais de traction brésilienne**

Le but de l'essai de traction est de déterminer la résistance à la traction R_t du ciment. Comme ce matériau est très peu résistant en traction, on procède à un essai de traction indirecte. Il consiste à comprimer l'échantillon latéralement par deux forces F diamétralement opposées. On obtient ainsi une résultante en traction qui agit le long du plan de chargement (Figure B. 1).

$$R_t = \frac{2F}{\pi \cdot DH}$$

avec R_t : la résistance à la traction

F : la charge de compression appliquée à la rupture de l'échantillon

D : le diamètre de l'échantillon

H : la hauteur de l'échantillon

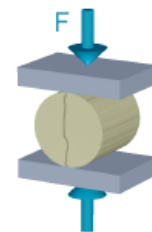


Figure B. 1 : Schéma de principe de l'essai de traction

Si on exclut l'essai de traction sur le cylindre N°13 qui est marginal par rapport aux autres, on constate que les résultats des essais de traction brésilienne présentent une faible dispersion et sont reproductibles (Figure B. 2 et Tableau B. 1). Après le pic de rupture, la contrainte reste à une valeur

plateau avant de retomber à zéro, car la surface contour du cylindre n'est pas parfaitement régulière, ce qui engendre une rupture en plusieurs temps.

	F (daN)	D (mm)	H (mm)	R_t (MPa)
Cylindre N°13	345,6	24,77	25,06	3,54
Cylindre N°14	355,3	24,68	26,18	3,50
Cylindre N°15	289,9	24,94	24,73	2,99
Cylindre N°16	293,6	25,05	24,57	3,04
Cylindre N°17	351,4	24,98	25,46	3,52
Cylindre N°18	307,2	24,85	25,26	3,12
Moyenne	323,8	24,88	25,21	3,28
Écart-type	30,2	0,14	0,58	0,26

Tableau B. 1 : Résultats des essais de traction brésilienne (prise 7 jours)

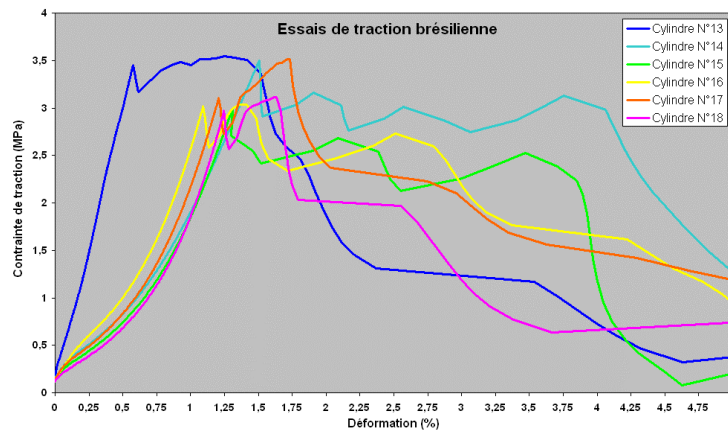


Figure B. 2 : Courbes effort-déplacement des essais de traction brésilienne sur des échantillons à 7j de prise

- **Essais de compression uniaxiale**

L'essai de compression simple sert à déterminer la résistance à la compression R_c et le module de Young E du ciment. Il consiste à soumettre à un échantillon, une charge axiale F jusqu'à la rupture. Pour se faire, on place l'échantillon sous une presse dont l'un des plateaux se déplace pour fournir la pression (Figure B. 3).

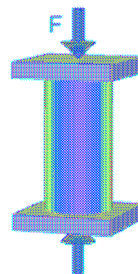


Figure B. 3 : Schéma de principe de l'essai de compression simple

Les résultats de l'essai de compression simple permettent de tracer la courbe contrainte-déformation sur laquelle on peut lire (Figure B. 4) :

- R_e : la résistance élastique : limite de la zone linéaire ;
- ϵ_e : la déformation correspondant à R_e ;
- R_c : la résistance à la compression : contrainte maximale atteinte pendant l'essai ;
- ϵ_c : la déformation correspondant à R_c ;
- E : le module de Young : pente de la zone linéaire.

$$R_c = \frac{F}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

avec D : le diamètre de l'échantillon
 H : la hauteur de l'échantillon

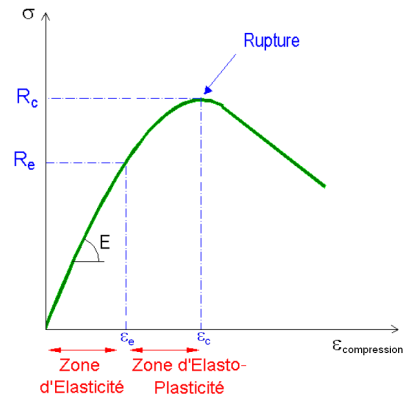


Figure B. 4 : Courbe type de la contrainte exercée sur l'échantillon en fonction de sa déformation axiale

Pour limiter la phase de mise en place sur les courbes contrainte-déformation, il faut prendre certaines précautions expérimentales. La première est de s'assurer que les faces du cylindre sont bien parallèles entre elles et perpendiculaire à l'axe de révolution du cylindre. La seconde consiste à graisser les faces de l'échantillon pour faciliter la mise en place du plateau, et la troisième est de ne pas bloquer la rotule du plateau supérieur de la presse pour permettre de compenser une éventuelle non-horizontalité des faces de l'échantillon.

Les courbes contrainte-déformation des 6 essais ont toutes la même allure et se trouvent dans un faisceau relativement étroit (Figure B. 5). L'essai est donc reproductible et les valeurs trouvées sont bien représentatives du ciment (Tableau B. 2).

	F (daN)	D (mm)	H (mm)	E (GPa)	ϵ_e (%)	R_e (MPa)	ϵ_c (%)	R_c (MPa)
Cylindre N°1	1634,7	24,74	49,92	10,7	0,26	22,0	0,48	34,01
Cylindre N°2	1526,9	25,01	49,94	10,2	0,21	19,5	0,52	31,08
Cylindre N°3	1753,9	24,81	49,97	11,1	0,24	25,4	0,50	36,28
Cylindre N°4	1822,8	25,14	49,95	10,6	0,24	22,4	0,62	36,72
Cylindre N°5	1753,2	25,13	50,1	10,2	0,27	23,0	0,66	35,35
Cylindre N°6	1878,6	25,11	49,95	11,5	0,26	25,0	0,60	37,94
Moyenne	1728,4	24,99	49,97	10,7	0,25	22,88	0,56	35,23
Écart-type	128,2	0,17	0,06	0,52	0,02	2,16	0,07	2,42

Tableau B. 2 : Résultats des essais de compression simple (prise 7 jours)

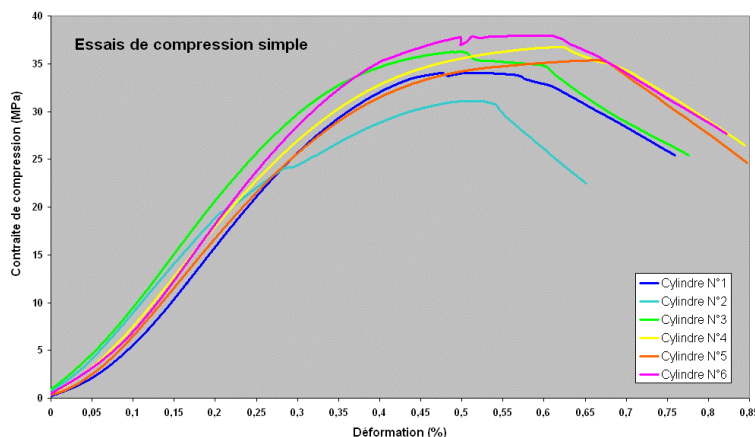


Figure B. 5 : Courbes effort-déplacement des essais de compression simple sur des échantillons à 7j de prise

Le dispositif présent ne permet pas de mesurer les déformations axiales et donc le coefficient de Poisson n'est pas disponible. Cependant, dans la littérature, il est établi que dès les premiers jours, le ciment a un coefficient de Poisson $\nu = 0.2$. C'est donc cette valeur que nous utiliserons par la suite.

- **Essais de chargement-déchargement**

Les graphiques contrainte-déformation obtenus par les essais de compression simple, présentent une phase initiale non linéaire. Elle correspond à la mise en place de l'échantillon au contact de la presse. Cette phase a pour effet de diminuer la valeur du module de Young. Pour s'en affranchir et obtenir un module de Young représentatif, on soumet les échantillons à des cycles de chargement et de déchargement. Le module de Young est alors mesuré comme la pente de la courbe au début du déchargement (Tableau B. 3).

		E (GPa)	
		Descente Cycle 1	Descente Cycle 2
15 MPa	Cylindre N°7	14,1	14,0
	Cylindre N°8	13,3	13,3
	Cylindre N°9	13,5	13,5
Moyenne		13,6	13,6
Écart-type		0,37	0,38
30 MPa	Cylindre N°10	13,6	13,6
	Cylindre N°11	14,2	14,2
	Cylindre N°12	13,2	13,2
Moyenne		13,7	13,7
Écart-type		0,48	0,48
Moyenne		13,6	
Écart-type		0,38	

Tableau B. 3 : Résultats des essais de chargement-déchargement (prise 7 jours)

Afin de constater la présence d'une éventuelle viscosité, 3 essais ont été testés avec des cycles montant à 15 MPa, soit 43% de R_c , et 3 autres à 30 MPa, soit 85% de R_c (Figure B. 6 a et b). Les résultats montrent des modules très proches pour tous les essais de chargement-déchargement, ceux-ci étant plus élevés que ceux obtenus par les essais de compression simple.

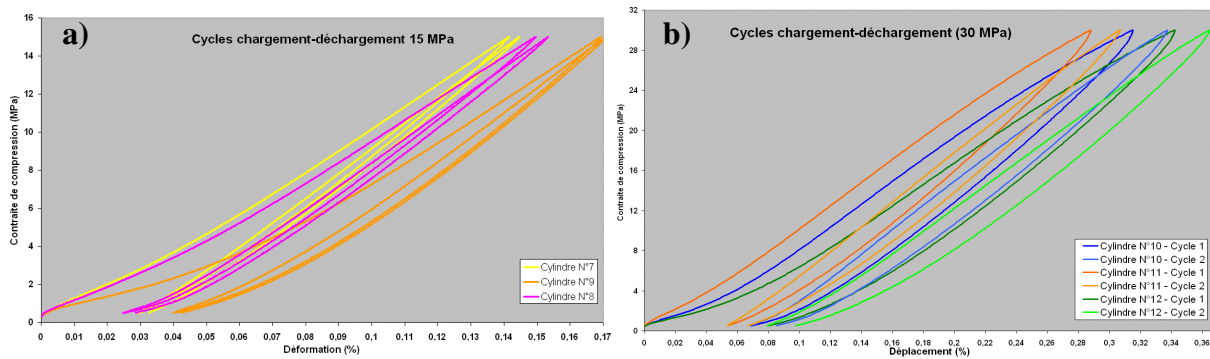


Figure B. 6 : Courbes effort-déplacement des essais de chargement-déchargement [(a) 15MPa, (b) 30 MPa] sur des échantillons à 7j de prise

- **Propriétés du ciment à 7 jours de prise**

Dans le plan σ - τ (σ : contrainte normale, τ : contrainte tangentielle), à partir des valeurs de résistance en traction et de résistance en compression, on peut construire les cercles de Mohr. La droite tangente à ces cercles représente le critère de rupture de Mohr-Coulomb, à partir de laquelle on détermine la cohésion C et l'angle de frottement φ (Figure B. 7).

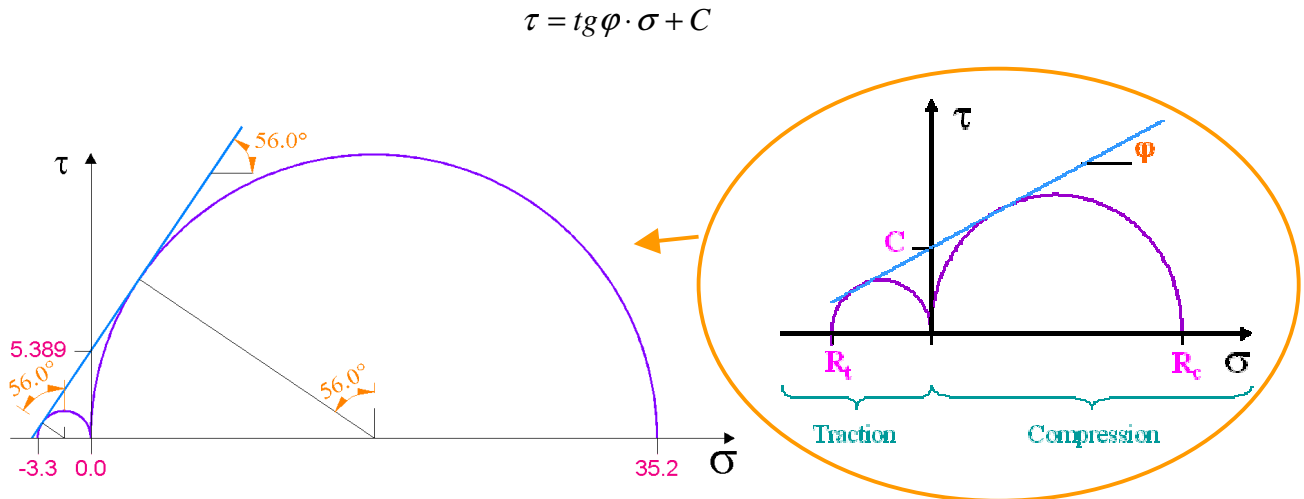


Figure B. 7 : Représentation du critère de rupture dans le plan de Mohr [MPa]

Le **Tableau B. 4** récapitule les propriétés mécaniques du ciment pris pendant 7 jours, dans l'eau, à 20°C et à pression atmosphérique.

	Moyenne	Écart-type
R_t [MPa]	3,28	0,3
R_c [MPa]	35,23	2,4
E [GPa]	13,6	0,38
ν	0,2	-
C [MPa]	5,4	-
φ [°]	56,0	-

Tableau B. 4 : Propriétés du ciment (prise 7 jours)

B.2 Ciment à 7 jours de prise et 4 semaines de vieillissement dans l'eau

Nous mesurerons ici les propriétés mécaniques du ciment massif qui a pris pendant 7 jours dans l'eau, à température de 20°C et à pression atmosphérique, puis qui a été placé à vieillir dans une cellule en milieu aqueux, à 40 bars et 80°C.

- **Essais de traction brésilienne**

Les essais de traction brésilienne menés sur les plots de ciment vieilli dans l'eau montrent une très faible dispersion des résultats (**Figure B. 8** et **Tableau B. 5**). La résistance à la traction a sensiblement augmenté par rapport aux échantillons non vieillis. Cette amélioration s'explique d'une part par l'augmentation du temps d'hydratation qui permet au ciment de se durcir davantage et d'autre part par la pression élevée qui joue le rôle de confinement.

	F (daN)	D (mm)	H (mm)	R_t (MPa)
Cylindre N°9	445,1	24,96	24,84	4,57
Cylindre N°10	476,6	25,28	25,62	4,69
Cylindre N°11	496,1	24,90	23,58	5,38
Cylindre N°12	432,4	24,99	25,10	4,39
Moyenne	462,6	25,03	24,78	4,76
Écart-type	29,1	0,17	0,87	0,43

Tableau B. 5 : Résultats des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)

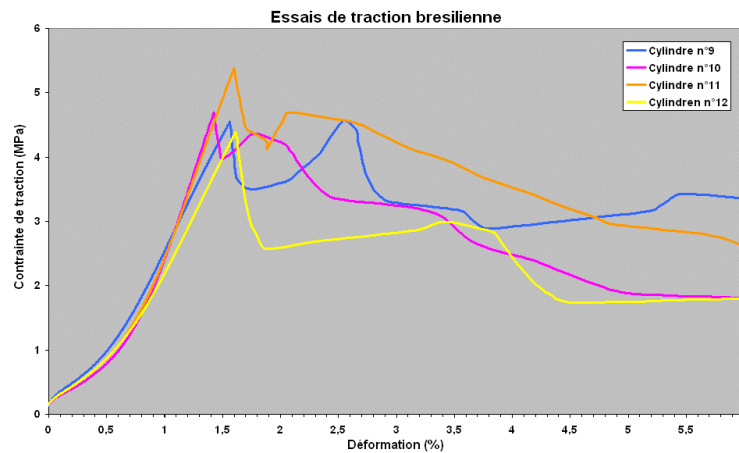


Figure B. 8 : Courbes effort-déplacement des essais de traction brésilienne (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)

- **Essais de compression uniaxiale**

Les courbes de compression simple montrent une bonne reproductibilité (Figure B. 9). Les valeurs de résistance à la compression présentent une légère amélioration par rapport aux ciments non vieilli (Tableau B. 6). Comme pour les essais de traction brésilienne, cela s'explique par un plus long temps de durcissement.

Comme expliqué précédemment, pour s'affranchir des effets de mise en place de l'échantillon au contact de la presse, le module de Young a été mesuré lors de la mise en décharge de l'échantillon. Après avoir subi ces charges et décharges, les échantillons n°5, 6, 7 et 8, ont également été testés en compression simple (échantillons n°2, 3 et 4). Leurs réponses à ce chargement sont identiques à celles des échantillons uniquement soumis à la compression simple. On constate toutefois que la zone de mise en contact (le pied de la courbe) est un peu moins étendue. Bien que les cycles de chargement soient restés dans la zone linéaire, cela signifie que les échantillons ont subis une déformation permanente.

	F (daN)	D (mm)	H (mm)	E (GPa)	ε_e (%)	R_e (MPa)	ε_c (%)	R_c (MPa)
Cylindre N°2	1668,6	25,23	50,03	9,08	0,28	21,0	0,55	33,37
Cylindre N°3	1809,3	24,82	50,00	8,91	0,35	25,5	0,65	37,40
Cylindre N°4	1703,9	25,23	49,92	8,26	0,32	24,0	0,62	34,08
Moyenne	1727,3	25,09	49,98	8,75	0,32	23,5	0,61	34,95
Écart-type	73,2	0,24	0,06	0,43	0,04	2,3	0,05	2,15
Cylindre N°5	1774,0	25,17	49,98	9,43	0,26	22,0	0,59	35,65
Cylindre N°6	1888,3	24,91	49,87	9,43	0,23	22,0	0,63	38,75

Cylindre N°7	1842,3	25,06	50,02	10,26	0,23	20,5	0,54	37,35
Cylindre N°8	1803,1	25,26	49,85	9,92	0,25	22,0	0,60	35,98
Moyenne	1826,9	25,10	49,93	9,76	0,24	21,63	0,59	36,93
Écart-type	49,6	0,15	0,08	0,41	0,02	0,75	0,04	1,42
Moyenne	1784,2	25,10	49,95	9,33	0,27	22,4	0,60	36,08
Écart-type	76,5	0,17	0,07	0,66	0,05	1,7	0,04	1,92

Tableau B. 6 : Résultats des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)

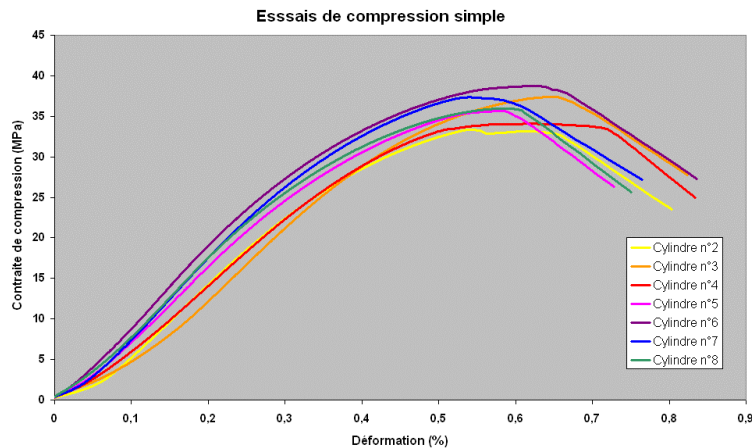


Figure B. 9 : Courbes effort-déplacement des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)

- Essais de chargement-déchargement

Chaque échantillon a été soumis à deux cycles de chargement-déchargement allant jusqu'à 15 MPa afin de déterminer le module de Young (Figure B. 10). Celui-ci est légèrement plus faible que pour les essais non vieillis, car le durcissement supplémentaire du ciment lui a fait perdre un peu de son élasticité (Tableau B. 7).

		E (GPa)	
		Descente Cycle 1	Descente Cycle 2
15 MPa	Cylindre N°5	13,0	12,6
	Cylindre N°6	13,0	13,0
	Cylindre N°7	13,1	12,8
	Cylindre N°8	12,9	12,8
Moyenne		13,0	12,8
Écart-type		0,08	0,16
Moyenne		12,9	
Écart-type		0,16	

Tableau B. 7 : Résultats des essais de chargement-déchargement (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)

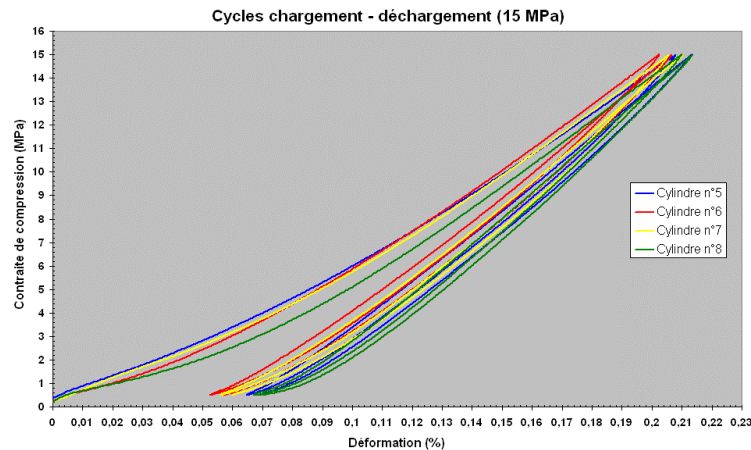


Figure B. 10 : Courbes effort-déplacement des essais de chargement-déchargement (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)

- **Propriétés du ciment à 7 jours de prise + 4 semaines de vieillissement dans l'eau**

La cohésion et l'angle de frottement sont calculés à partir des valeurs de R_t et de R_c . La cohésion a augmenté par rapport au ciment pris pendant 7 jours (Tableau B. 4), tandis que l'angle de frottement a diminué. (Tableau B. 8)

	Moyenne	Écart-type
R_t [MPa]	4,76	0,43
R_c [MPa]	36,08	1,92
E [GPa]	12,9	0,16
ν	0,2	-
C [MPa]	6,6	-
ϕ [°]	50,1	-

Tableau B. 8 : Propriétés du ciment (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau)

B.3 Ciment à 7 jours de prise et 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO_2

Dans ce paragraphe, nous établirons les propriétés mécaniques du ciment massif qui a pris pendant 7 jours dans l'eau, à température de 20°C et à pression atmosphérique, puis qui a été placé à vieillir dans une cellule en milieu aqueux saturé en CO_2 , à 40 bars et 80°C .

La Figure B. 11 montre un plot de ciment après un séjour de 4 semaines dans l'eau saturée en CO_2 , on y constate deux phénomènes :

- une altération du matériau sur une épaisseur de quelques millimètres est vraisemblablement due à une carbonatation dans la masse du ciment ;
- des cristaux de calcite rendent la surface de l'échantillon hétérogène. Ils proviennent probablement d'une re-précipitation de la calcite à partir de la solution saturée en ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} .

La combinaison de ces phénomènes a provoqué une augmentation moyenne de 4,5% du volume des échantillons entre le moment de leur entrée et celui de leur sortie de la cellule de vieillissement. De plus, les faces des cylindres ont perdu leur parallélisme à cause de la cristallisation de la calcite, ce qui remet en cause la qualité des résultats.

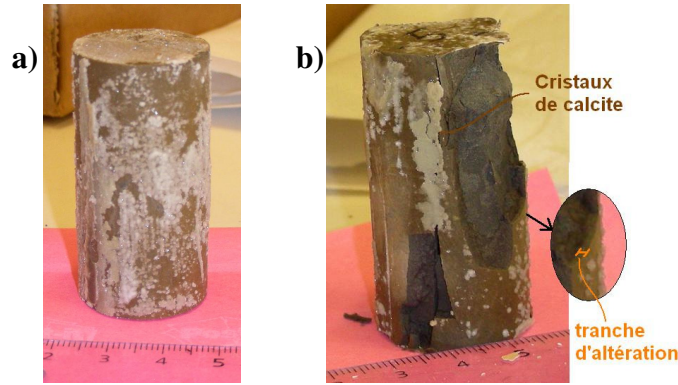


Figure B. 11 : Plot de ciment ayant subi une carbonatation au CO₂ (a) avant et (b) après rupture

- **Essais de traction brésilienne**

Après un séjour de 4 semaines dans le CO₂, le ciment a une résistance en traction beaucoup plus faible que pour le vieillissement dans l'eau, mais quand même plus élevée que le ciment qui n'a pas été vieilli (Tableau B. 9 et Figure B. 12). En réalité, deux mécanismes antagonistes sont mis en œuvre.

1. L'augmentation du temps de prise conduit à une amélioration de la résistance à la traction. L'altération du ciment par le CO₂ entraîne un affaiblissement des propriétés mécaniques.

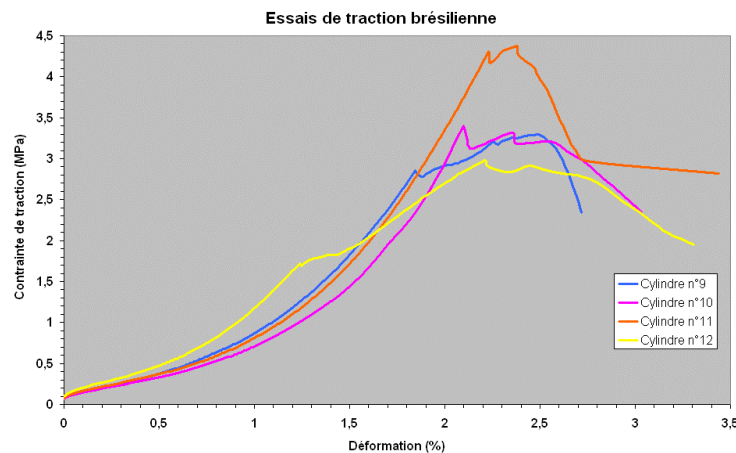


Figure B. 12 : Courbes effort-déplacement des essais de traction brésilienne (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO₂)

	<i>F</i> (daN)	<i>D</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>R_t</i> (MPa)
Cylindre N°9	342,5	25,58	25,91	3,29
Cylindre N°10	348,0	25,31	25,76	3,40
Cylindre N°11	469,2	25,72	26,52	4,38
Cylindre N°12	289,3	24,96	24,75	2,98
Moyenne	362,3	25,39	25,74	3,51
Écart-type	76,0	0,33	0,73	0,60

Tableau B. 9 : Résultats des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO₂)

- **Essais de compression uniaxiale**

Deux séries d'essais de compression simple ont été menées (Figure B. 13). La première série comporte les échantillons 2 à 4 qui ont directement été soumis à un effort de compression uniaxiale

jusqu'à rupture. La seconde contient les échantillons 5 à 8 qui ont d'abord subi un essai de chargement-déchargement à 12 MPa (Figure B. 14) avant d'être testés en compression jusqu'à rupture.

On constate, surtout pour la première série, que la courbe de compression simple a un pied très étendu avant d'arriver dans la zone linéaire. Cette zone reflète la mise en contact du plateau de la presse avec l'échantillon, par le broyage de la calcite et de la zone carbonatée. La mise en charge de l'échantillon a réellement lieu après cette zone, ce qui signifie qu'on ne teste alors que ce qui reste de ciment sain. Le pied de la série 2 est fortement réduit, car les plots ont été préchargés (Figure B. 14), ce qui a ajusté les faces des échantillons en écrasant la zone altérée.

Contrairement aux essais précédents, la rupture ne se produit pas en une fois. La surface du plot s'écaille progressivement en provoquant des "sauts" de contraintes, puis l'échantillon se rompt totalement lorsqu'il n'est plus capable de reprendre l'effort imposé. La résistance à la compression en est fortement réduite (Tableau B. 10).

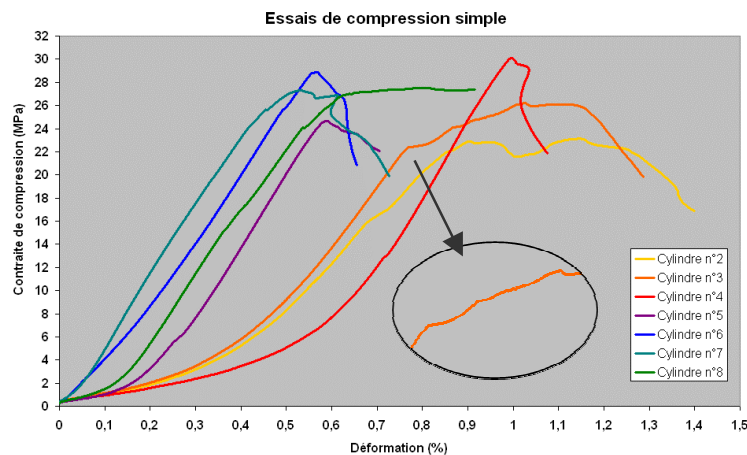


Figure B. 13 : Courbes effort-déplacement des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO₂)

	F (daN)	D (mm)	H (mm)	E (GPa)	ϵ_e (%)	R_e (MPa)	ϵ_c (%)	R_c (MPa)
Cylindre N°2	1176,6	25,44	50,68	3,94	0,69	16,3	1,15	23,15
Cylindre N°3	1360,5	25,70	50,67	4,98	0,77	22,4	1,03	26,23
Cylindre N°4	1538,3	25,50	50,64	6,32	0,95	28,0	1,00	30,12
Moyenne	1358,5	25,55	50,66	5,08	0,80	22,2	1,06	26,50
Écart-type	180,9	0,14	0,02	1,20	0,13	5,9	0,08	3,49
Cylindre N°5	1228,1	25,19	50,58	6,43	0,55	23,1	0,59	24,64
Cylindre N°6	1409,0	24,92	50,64	6,20	0,49	25,5	0,57	28,89
Cylindre N°7	1353,1	25,12	50,47	6,74	0,41	23,8	0,53	27,30
Cylindre N°8	1370,2	25,17	50,57	5,83	0,53	24,0	0,81	27,54
Moyenne	1340,1	25,10	50,57	6,30	0,50	24,1	0,62	27,09
Écart-type	78,3	0,12	0,07	0,38	0,06	1,0	0,13	1,78
Moyenne	1348,0	25,29	50,61	5,78	0,63	23,3	0,81	26,84
Écart-type	118,6	0,27	0,07	0,99	0,19	3,6	0,25	2,40

Tableau B. 10 : Résultats des essais de compression simple (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO₂)

- **Essais de chargement-déchargement**

Les échantillons ont été soumis à deux cycles de chargement-déchargement allant jusqu'à 12 MPa afin de déterminer le module de Young (Figure B. 14). Le module de Young mesuré grâce au déchargement de l'échantillon est deux fois plus important que celui mesuré par l'essai de compression

simple (Tableau B. 11). Il faut alors remettre en cause la validité de la démarche, car il est évident que dans la zone sensée être élastique, le chargement a un effet irréversible sur les propriétés du matériau. Dans le futur, il serait intéressant d'étudier ce problème plus attentivement et de mettre au point un essai qui permettrait de s'en affranchir.

		E (GPa)	
		Descente Cycle 1	Descente Cycle 2
15 MPa	Cylindre N°5	11,5	11,4
	Cylindre N°6	10,4	10,3
	Cylindre N°7	11,3	11,3
	Cylindre N°8	11,9	11,9
Moyenne		11,3	11,2
Écart-type		0,6	0,7
Moyenne		11,25	
Écart-type		0,60	

Tableau B. 11 : Résultats des essais de chargement-déchargement (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO₂)

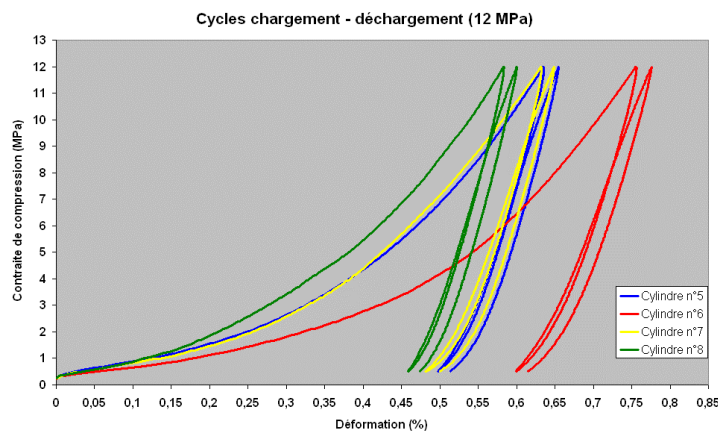


Figure B. 14 : Courbes effort-déplacement des essais de chargement-déchargement (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO₂)

- **Propriétés du ciment à 7 jours de prise + 4 semaines en vieillissement CO₂**

On constate enfin que la présence de CO₂ n'a pas d'effet sur l'angle de frottement interne du ciment, mais diminue fortement la cohésion (Tableau B. 12).

	Moyenne	Écart-type
R_t [MPa]	3,51	0,60
R_c [MPa]	26,84	2,40
E [GPa]	11,25	0,60
ν	0,2	-
C [MPa]	4,9	-
ϕ [°]	50,2	-

Tableau B. 12 : Propriétés du ciment (prise 7 jours + 4 semaines de vieillissement dans l'eau saturée en CO₂)

B.4 Récapitulatif des propriétés mécaniques du ciment

Le **Tableau B. 13** reprend les propriétés mécaniques du ciment massif en fonction des conditions de prise et de vieillissement :

			7 jours de prise Tamb, Patm	7 jours de prise Tamb, Patm
		7 jours de prise Tamb, Patm	+ 4 semaines de vieillissement témoin dans l'eau	+ 4 semaines de vieillissement témoin dans l'eau saturée en CO₂
			80°C, 40 bars	80°C, 40 bars
Mesurés	R_t [MPa]	3,28	4,76	3,51
	R_c [MPa]	35,23	36,08	26,84
	E [GPa]	13,6	12,9	11,25
Calculés	C [MPa]	5,4	6,6	4,9
	φ [°]	56,0	50,1	50,2

Tableau B. 13 : Récapitulatif des propriétés du ciment massif selon les différentes conditions de prise et de vieillissement

Annexe C Résistance au cisaillement des interfaces acier/ciment

Cette annexe contient le détail des résultats de la caractérisation de la tenue mécanique en cisaillement des interfaces ciment/acier. Les essais de cisaillement ont été réalisés sur les éprouvettes décrites au paragraphe 4.2.1 p.39. Les essais ont été pilotés à la vitesse de déplacement de 1 mm/min.

C.1 Essais de cisaillement à simple recouvrement

Les deux essais de cisaillement simple ont donné lieu à une rupture parfaitement adhésive de l'une des deux interfaces.

La Figure C. 1 représente les courbes effort-déplacement mesurées par les 2 extensomètres. La force nécessaire à la rupture est très faible, environ 125 N, car l'assemblage est soumis à un moment de flexion important à cause de son asymétrie. Les valeurs mesurées par les 2 extensomètres ne sont pas identiques, cela peut s'expliquer par le fait que le déplacement ne se fait pas uniquement à l'interface, le corps du ciment et les plaques d'acier sont également soumises à une déformation élastique.

Après la rupture, la force tombe à une valeur résiduelle qui est probablement un artefact induit par le dispositif d'essai : les élastiques servant à fixer les extensomètres, maintiennent également l'assemblage fermé provoquant ainsi un frottement artificiel.

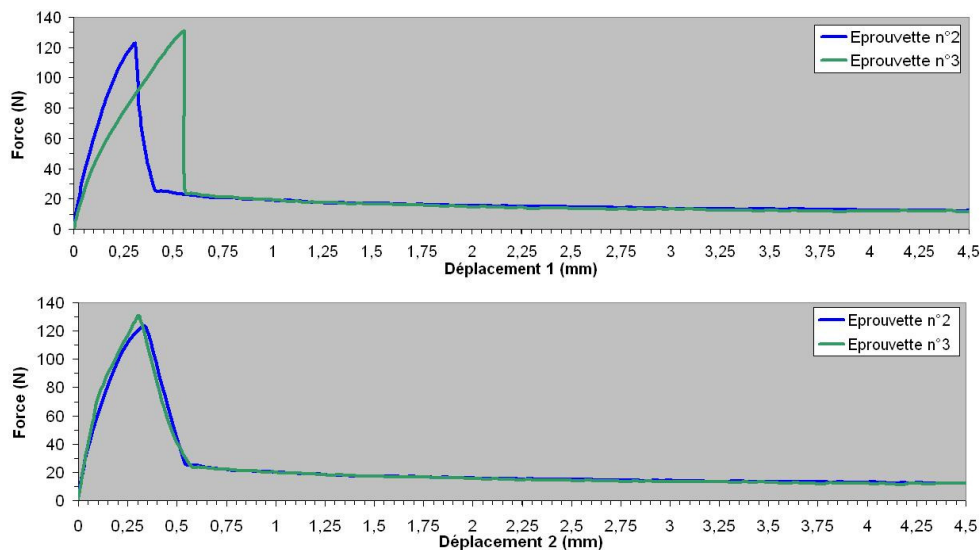


Figure C. 1 : Courbes force-déplacement de la première série d'essais de cisaillement à simple recouvrement

Série 1	F [N]	τ [kPa]
Éprouvette n°2	122.6	68.1
Éprouvette n°3	130.4	72.4
Moyenne	126.5	70.3
Écart-type	5.5	3.1

Tableau C. 1 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement simple

C.2 Essais de cisaillement à double recouvrement

- **Série 1 : Essais de cisaillement double recouvrement témoin (temps d'hydratation = 7 jours)**

Tous les essais de cisaillement double ont donné lieu à une rupture parfaitement adhésive.

Les courbes effort-déplacement de la première série d'essais de cisaillement double (Figure C. 2) montrent que l'essai est reproductible. Les valeurs mesurées par les deux extensomètres ne sont pas identiques à cause d'une non-symétrie de l'éprouvette et/ou du chargement. Le moment de flexion qui résulterait de ce mauvais positionnement pourrait expliquer la raison pour laquelle l'extensomètre 1 voit un déplacement négatif en début de chargement.

L'effort appliqué à la rupture est 5 fois plus élevés que pour l'essai de cisaillement simple. Cela confirme que cet essai permet malgré tout de réduire fortement le moment de flexion.

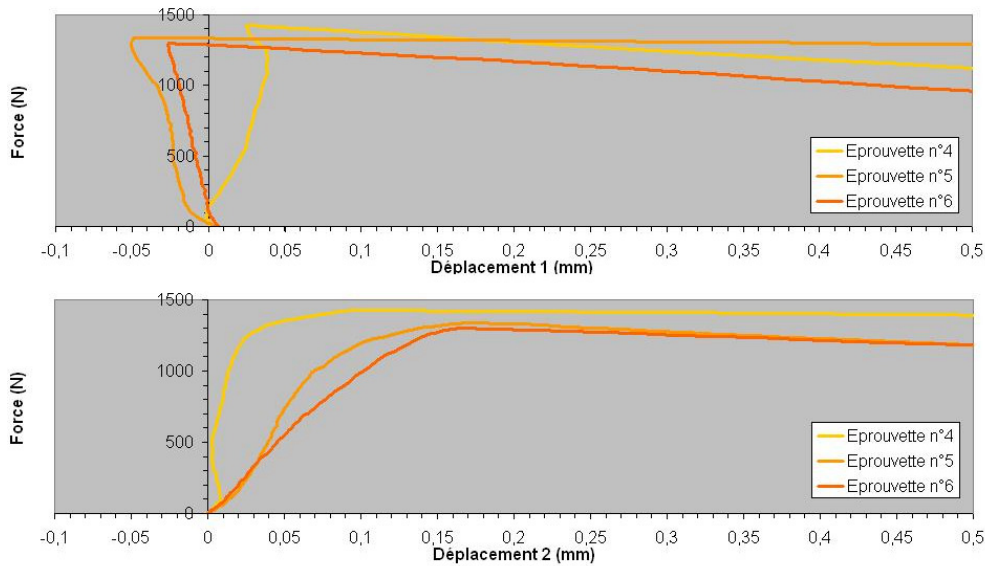


Figure C. 2 : Courbes force-déplacement de la première série d'essais de cisaillement à double recouvrement

Série 1	F [N]	τ série 1 [kPa]
Éprouvette n°4	1427.6	396.56
Éprouvette n°5	1337.9	371.64
Éprouvette n°6	1298.6	360.71
Moyenne	1354.7	376.30
Écart-type	66.2	18.37

Tableau C. 2 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (référence)

- **Séries 2 et 3 : Essais de cisaillement double recouvrement testés à différentes vitesses de déplacement (temps d'hydratation = 7 jours)**

Cette section sert à déterminer l'influence de la vitesse de déplacement sur la résistance au cisaillement des assemblages. En plus de la vitesse initiale de 1 mm/min (série 1), les vitesses de 0.5 mm/min (série 2) et 0.1 mm/min (séries 3) ont été testées.

On constate que les assemblages présentent des résistances au cisaillement très proches les unes des autres (Figure C. 3), sauf les éprouvettes n°17 (série 2) et 21 (série 3) qui sont marginales. On ne

peut pas faire ressortir une réelle loi d'évolution, il faudrait disposer de résultats supplémentaires pour les vitesses déjà testées, et tester d'autres vitesses de déformation.

Série 2	F [N]	τ série 5 [kPa]
Éprouvette n°16	1409.3	391.48
Éprouvette n°17	1958.9	544.15
Éprouvette n°18	1291.9	358.85
Moyenne	1553.4	431.49
Écart-type	356.1	98.92

Tableau C. 3 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (vitesse de 0.5 mm/min)

Série 3	F [N]	τ série 6 [kPa]
Éprouvette n°19	1240.3	344.52
Éprouvette n°20	1276.9	354.69
Éprouvette n°21	828.1	230.02
Moyenne	1115.1	309.74
Écart-type	249.2	69.23

Tableau C. 4 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (vitesse de 0.1 mm/min)

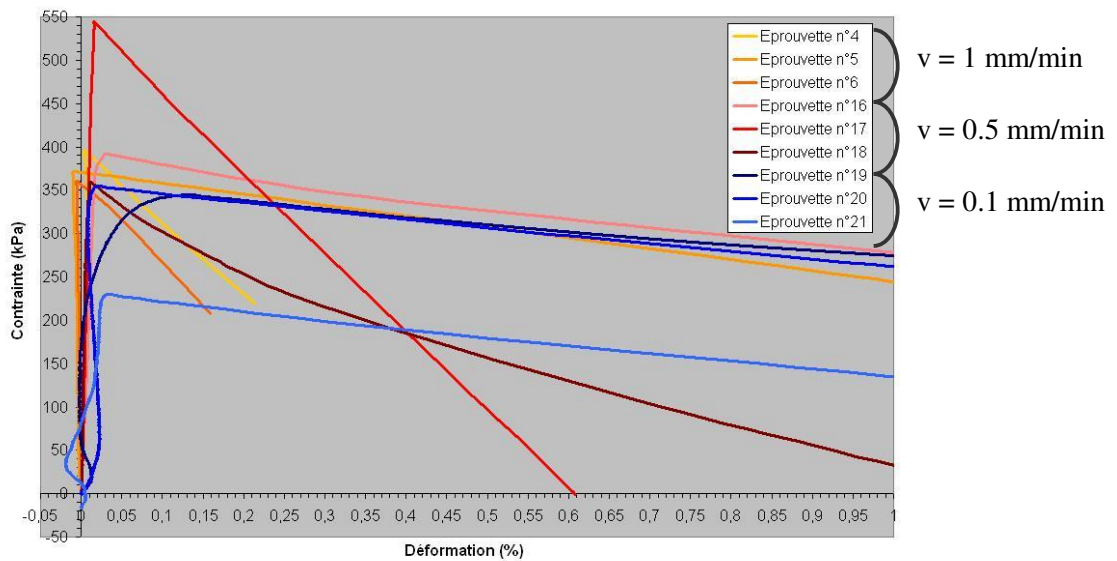


Figure C. 3 : Comparaison des courbes force-déplacement pour les séries 1, 2 et 3 de cisaillement double

- **Série 4 : Essais de cisaillement double recouvrement : surface d'interface réduite de moitié (temps d'hydratation = 7 jours)**

L'influence de la surface d'interface sur la résistance au cisaillement a été testée grâce à 3 éprouvettes dont l'aire de recouvrement a été réduite de moitié, afin d'étudier les effets de surface.

Les résultats (Figure C. 4) mettent en évidence la dépendance de la contrainte tangentielle par rapport à l'aire de l'interface, pour les essais à petite échelle. La dispersion des valeurs obtenues indique que pour les petites aires d'interface, les essais sont moins représentatifs que pour celles d'interface plus grandes.

Les valeurs élevés pour la série 4 sont probablement dues à la présence accrue d'effets de bord qui augmenteraient la résistance. La forte variabilité peut s'expliquer par le fait que les petites interfaces sont plus hétérogènes que les grandes (en effet, celles-ci étant plus étendues, elles subiraient un effet de lissage).

Série 4	F [N]	τ série 2 [kPa]
Éprouvette n°7	1052.1	584.50
Éprouvette n°8	1271.5	706.40
Éprouvette n°9	912.6	506.97
Moyenne	1078.7	599.29
Écart-type	180.9	100.53

Tableau C. 5 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (interface réduite)

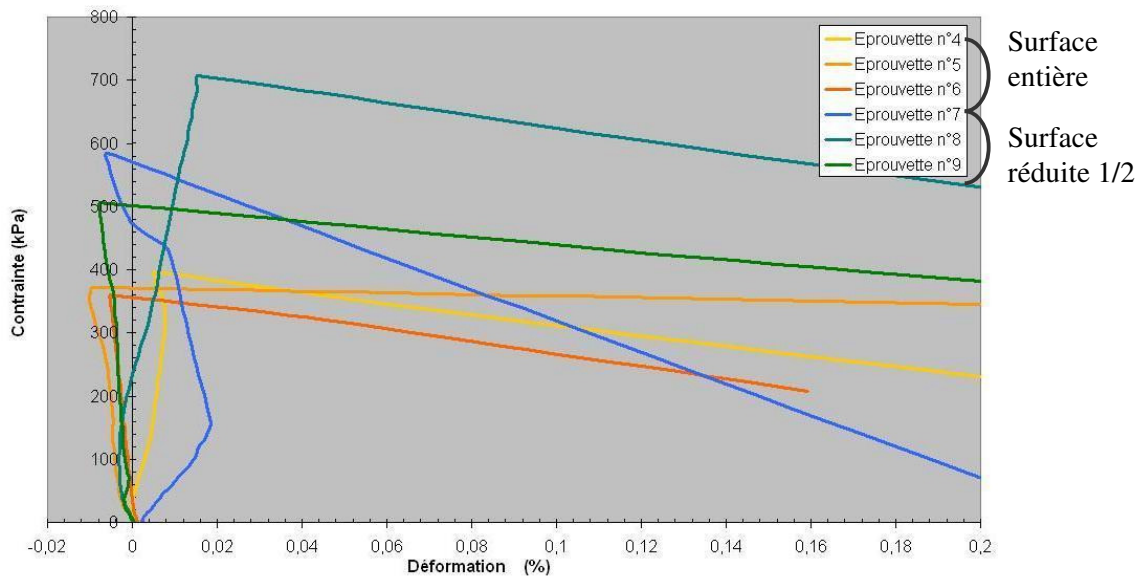


Figure C. 4 : Comparaison des courbes force-déplacement pour les séries 1 et 4 de cisaillement double

- **Séries 5 et 6 : Essais de cisaillement double recouvrement vieillis en différentes conditions**

Ces séries d'essais ont pour but d'étudier l'effet du vieillissement par le CO₂ sur les interfaces acier/ciment. A cette fin, trois assemblages (série 5) ont été placés 4 semaines, dans un milieu aqueux (eau de Volvic) saturé en CO₂, sous une pression de 40 bars et à une température de 80°C, ce qui représente les conditions de puits à une profondeur moyenne. Pour pouvoir correctement analyser ces résultats, trois échantillons témoins (série 6) ont été placés à vieillir pendant 4 semaines, dans l'eau, à 40 bars et 80°C.

Pour les assemblages vieillis dans l'eau, la rupture reste purement interfaciale, tandis qu'elle devient partiellement cohésive une fois les échantillons mis en contact avec le CO₂.

L'effort nécessaire à la rupture en cisaillement est beaucoup plus élevé pour les assemblages vieillis au CO₂ que pour les éprouvettes témoins (Figure C. 5). L'augmentation de volume résultant de la carbonatation du ciment et/ou de la formation d'oxydes de fer, a pour effet d'augmenter le confinement du ciment, ce qui permet à l'interface de reprendre de plus grandes contraintes en cisaillement. Il est cependant probable que cette tendance s'inverserait pour des temps de vieillissement plus long. En effet, si la variation volumique continue à augmenter du fait de la propagation du front de carbonatation, on peut s'attendre au développement de contraintes internes pouvant générer une (multi)-fissuration du ciment.

Il faut noter que seule une interface de l'éprouvette n°14 vieillie au CO₂ a été rompue pendant l'essai, c'est la raison pour laquelle sa résistance au cisaillement est inférieure à la moyenne.

Série 5	F [N]	τ série 3 [kPa]
Éprouvette n°10	1527.5	424.29
Éprouvette n°11	1195.3	332.02
Éprouvette n°12	1056.5	293.47
Moyenne	1259.7	349.93
Écart-type	242.0	67.22

Tableau C. 6 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (vieillessement aqueux)

Série 6	F [N]	τ série 4 [kPa]
Éprouvette n°13	2551.8	708.83
Éprouvette n°14	2009.4	558.16
Éprouvette n°15	2222.5	617.35
Moyenne	2261.2	628.11
Écart-type	273.3	75.91

Tableau C. 7 : Forces et contraintes maximales pour les essais de cisaillement double (vieillessement CO₂)

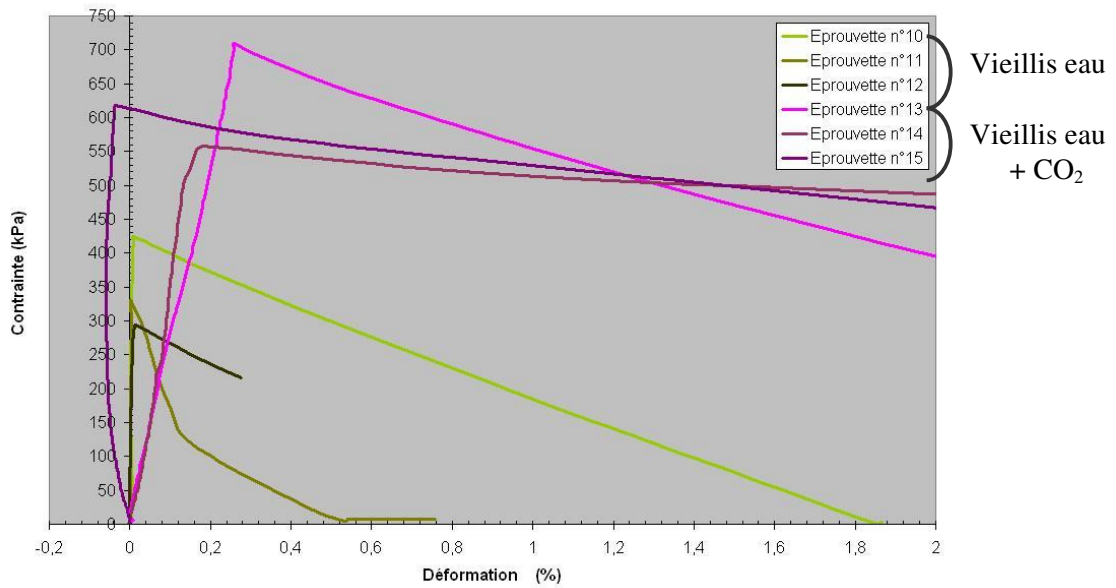


Figure C. 5 : Comparaison des courbes force-déplacement pour les séries 5 et 6 de cisaillement double

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **ABAQUS 6.9**, Abaqus/CAE User's Manual, Abaqus Keywords Reference Manual, Abaqus Theory Manual , Abaqus User Subroutines Reference Manual, 2009.
- [2] **ADAMS R.D., COMYN J., WAKE W.C.**, Structural adhesive joints in engineering, *Chapman & Hall*, 1997.
- [3] **ADOUANI H., TIE B., BERDIN C., AUBRY D.**, Modélisation numérique de la propagation instable et limitée de fissure due à la présence de zones locales fragiles, *École Centrale Paris*, 2007
- [4] **BAELE J.-M.**, Ressources minérales et énergétiques, *Cours FPMs*, 2009.
- [5] **BARLET-GOUEDARD V., RIMMELE G., GOFFE B. et PORCHERIE O.**, Well technologies for CO₂ geological storage: CO₂ – resistant cement, *Oil & Gas Science and Technology*, Rev IFP, 2007.
- [6] **BARLET-GOUEDARD V., RIMMELE G.**, Mitigation Strategies for Risk of CO₂ Migration Through Wellbores, *IADC/SPE*, 2006.
- [7] **BARLET-GOUEDARD V., RIMMELE G., GOFFE B. et PORCHERIE O., QUISEL N., DESROCHES J.**, A solution against well cement degradation under CO₂ geological storage environment, *International journal of greenhouse gas control*, Elsevier, 2009.
- [8] **BEER G., WATSON J.O.**, Introduction to finite and boundary element methods for engineers, *John Wiley Sons Inc*, 1992.
- [9] **BOURISSAI M.**, Estimation des contraintes initiales dans les ciments pétroliers après prise en fond de puits, *rapport de mi-thèse IFP*, 2008.
- [10] **BRASSEUR J.-P.**, Sondages, forages profonds et réservoir engineering, *Cours FPMs*, 2009.
- [11] **CAILLY B., LE THIEZ P., EGERMANN P., AUDIBERT A., VIDAL-GILBERT S. and LONGAYGUE X.**, Geological Storage of CO₂: A State-of-the-Art of Injection Processes and Technologies, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2005.
- [12] **CANGEMI L.**, Frottements et adhérence : modèle, traitement numérique et application à l'interface fibre/matrice, *rapport de thèse Université d'Aix-Marseille*, 1997.
- [13] **Campus numérique francophone**, Matériaux de construction: Les ciments dans Cours en ligne, *Agence Universitaire de la Francophonie*.
http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_deux.html
- [14] **CHARALAMBIDES P.G., LUND J., EVANS A.G., McMEEKING R.M.**, A test specimen for determining the fracture resistance of bimaterial interfaces, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 56, 1989.
- [15] **DARQUE-CERETTI É. et FELDER É.**, Adhésion et adhérence, *Sciences et techniques de l'ingénieur*, CNRS Éditions, 2003.
- [16] **DUBOIS F., RENOUF M.**, *Modélisation des milieux divisés*, Cours LMGC Université de Montpellier, 2007

- [17] **DUNCAN B. et CROCKER L.**, Review of test for adhesion strength, *NPL Materials Centre*, 2001.
- [18] **GRAY K.E., PODNOS E., BECKER E.**, Finite-element studies of near-wellbore region during cementing operations : Part I, *SPE Drilling & Completion*, 2009
- [19] **KENGA Y.**, Méthode de caractérisation mécanique des interfaces, Application au cas des interfaces aciers/ciment/acier, *Étude bibliographique IFP*, 2005.
- [20] **KENGA Y.**, Rapport d'essais de cisaillement sur les interfaces acier/ciment, *Rapport IFP*.
- [21] **LAVERNE J., MONERIE Y.**, Modèles de Zone Cohésive : avancées, limitations et mise en œuvre, *Forum Mecamat*, 2010
- [22] **LEMAITRE J., CHABOCHE J.-L.**, Mécanique des matériaux solides, *Dunod*, 1985
- [23] **NELSON E.**, Well cementing, *Developments in petroleum science*, n°28, Elsevier, 1990.
- [24] **Office québécois de la langue française**, Le grand dictionnaire terminologique, *Québec*.
<http://www.olf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>
- [25] **RIMMELE G., BARLET-GOUEDARD V., PORCHERIE O., GOFFE B., BRUNET F.**, Heterogeneous porosity distribution in Portland cement exposed to CO₂-rich fluids, *Cement and Concrete Research*, n°38, Elsevier 2008
- [26] **ROGUET É., CANGEMI L.**, Utilisation d'une approche multi-échelle pour définir l'endommagement transverse d'un composite à matrice organique, *Rapport d'étude postdoctorale IFP*, 2009.
- [27] **ROPITAL F.**, Corrosion et dégradation des matériaux métalliques : compréhension des phénomènes et applications dans l'industrie pétrolière et des procédés, *Éditions Technip*, IFP Publications, 2009.
- [28] **THERY P.-Y., POULAIN M., DUPEUX M., BRACCINI M.**, Adhesion energy of a YPSZ EB-PVD layer in two thermal barrier coating systems, *Surface & Coatings Technology*, n°202, Elsevier, 2007.
- [29] **THOMANN M.**, Connections par adhérence pour les ponts mixtes acier-béton, *Rapport de thèse École Polytechnique Fédérale De Lausanne*, 2005.
- [30] **TOTAL**, Le captage et le stockage géologique du CO₂, *prospectus informatif*, 2007.
- [31] **TSHIBANGU J.-P.**, Modélisation analytique et numérique en mécanique des roches, *Cours FPMs*, 2008.
- [32] **TSHIBANGU J.-P.**, Application de la mécanique des roches, *Cours FPMs*, 2009.