

PUITS CANADIENS : ANALYSES EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES ET IMPACT SUR LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES BÂTIMENTS

Geoffroy Chardome

Thèse en vue de l'obtention du grade de docteur en
sciences de l'ingénieur et technologie

Jury

Promotrice : Prof. Véronique FELDHEIM (UMONS-FPMs)
Président : Prof. Marc FRÈRE (UMONS-FPMs)
Secrétaire : Prof. Anne-Lise HANTSON (UMONS-FPMs)
Membres : Prof. David GILLAN (UMONS-FS)
Dr. Déborah LANTERBECQ (Condorcet-CARAH)
Prof. Monica SIROUX (INSA-Strasbourg)
Prof. Diane THOMAS (UMONS-FPMs)

Mons, Octobre 2023

Remerciements

L'aspect pluridisciplinaire de cette thèse a nécessité le concours précieux de nombreuses personnes. Il m'est malheureusement impossible de toutes les citer, mais il m'est cher de faire savoir que je remercie tous ceux et celles qui ont pu participer à l'élaboration de cette thèse.

Je tiens tout particulièrement à remercier Véronique Feldheim, ma directrice de thèse qui a pu me conseiller minutieusement tout au long de celle-ci. Sa disponibilité, son enthousiasme, sa rigueur m'ont permis de mener à bien cette thèse et son aide précieuse m'a permis de rédiger celle-ci.

Je souhaite également remercier les membres de mon comité d'accompagnement qui ont pu suivre l'avancée de mes recherches, me conseiller sur les orientations à suivre et prendre une part active à celle-ci notamment Anne-Lise Hantson avec la réalisation du plan d'expérience nécessaire à l'étude paramétrique du modèle pseudo 3D intégrant les transferts de masse. Diane Thomas et Marc Frère ont pu me garder motivé durant cette thèse grâce à leurs encouragements et leurs critiques constructives ont permis un regard éclairé sur le rapport rédigé.

J'adresse aussi mes sincères remerciements aux membres de mon jury de thèse pour avoir accepté ce rôle et le temps consacré à la lecture attentive de ce rapport. Plus particulièrement à Monica Siroux qui vient de loin pour partager ses connaissances spécifiques à mon domaine de recherche.

Mes remerciements vont également au département des Sciences et Technologies de la Haute École en Hainaut qui a permis l'étude de son installation de puits canadien et a mis à disposition du matériel de mesures. Le personnel du département est également à remercier que ce soit mes collègues enseignants dont j'ai pu profiter des conseils ou Stephan Laterre, opérateur technicien, en charge des équipements sur qui j'ai pu compter pour le monitoring de l'installation.

Le matériel d'échantillonnage a pu être mis gracieusement à disposition par Hainaut Analyse et Marc Roger, pour le biocollecteur AIR IDEAL, par le CARAH - Centre pour l'Agronomie et l'Agro-industrie de la Province du Hainaut - et John Rivière pour le Burkard cyclone sampler et par Sciensano et Berdieke Goemaere pour le Coriolis μ Air Sampler. Je les remercie d'avoir pu mettre à notre disposition le matériel nécessaire à cette thèse et d'avoir pu partager leur expérience.

Les relevés et analyses ont été effectués avec l'aide d'Ayoub Adib, lorsqu'il était étudiant en dernière année de Master en Biologie à l'UMONS dans le cadre de son mémoire. Sa passion et ses connaissances ont permis de riches partages durant la phase micro-biologique de cette thèse. La supervision de David Gillan du service de Protéomie et Microbiologie de la Faculté des Sciences de l'UMONS, m'a aidé à mettre au point une méthode d'échantillonnage des micro-organismes présents dans l'air à des fins de séquençage.

Je voudrais aussi remercier Déborah Lanterbecq, chef de service du Labo de Recherche en Biotechnologie et biologie appliquée du CARAH/HEPH-Condorcet et coordinatrice recherche de la HEPH-Condorcet, qui a permis une collaboration très fructueuse. C'est le CARAH qui a réalisé l'extraction d'ADN, la PCR, les Tag, le multiplexage et le séquençage et plus particulièrement John Rivière. Je le remercie d'avoir pu réaliser ce travail et d'avoir contribué activement à cette thèse, d'avoir pu m'aider dans l'identification des pathogènes et d'être resté disponible durant toutes ces années.

Je dédicace cette thèse à ma compagne, Julie Dewasmes qui a su me soutenir et m'épauler, et qui a également pu prendre une part très active durant celle-ci en tant que biologiste en m'aidant à découvrir la microbiologie.

Table des matières

Introduction	1
Contexte général	1
Contexte réglementaire en Région wallonne	1
Objectifs de la thèse - Question de recherche	4
Présentation du manuscrit	5
I Puits canadien et qualité de l'air	7
1 Principe de fonctionnement d'un puits canadien	9
1.1 Éléments constituant le puits canadien	10
1.2 Puits canadien et transferts de chaleur	13
1.2.1 Propriétés thermiques du sol	13
1.2.2 Transferts thermiques au niveau du sol	15
1.2.3 Transferts thermiques au niveau du puits	18
2 Qualité de l'air et microbiologie	21
2.1 Types de polluants rencontrés	21
2.2 Intérêt de la ventilation	24
2.3 Taux de renouvellement d'air	24
2.4 Techniques de ventilation	25
2.5 Système de classification des êtres vivants	26
2.5.1 Classification phylogénétique des bactéries	28
2.5.2 Classification phylogénétique des fungi	30
2.6 L'extraction d'ADN, l'amplification par PCR et le séquençage haut-débit illumina, des techniques employées pour l'analyse métagénomique	31
2.6.1 L'extraction ADN	31
2.6.2 L'amplification par PCR	31
2.6.3 Séquençage haut débit Illumina	32
2.7 Analyses métagénomiques	33
2.7.1 Gènes ciblés en metabarcoding	33
2.7.2 ARNr 16S pour les bactéries	34

2.7.3	ITS pour les fungi	35
2.8	Aérobiologie	35
2.8.1	Les particules biologiques primaires de l'air	36
2.8.2	Risques sanitaires et biologiques	40
2.9	Législation concernant la qualité de l'air	43
2.10	Conclusion	47
3	État de l'art sur les puits canadiens	49
3.1	Intérêt de la technique	51
3.2	Paramètres impactant les performances du puits canadien	54
3.3	Le puits canadien couplé à d'autres techniques	56
3.4	Modélisations thermiques	57
3.5	Logiciels pour la modélisation des puits canadiens	62
3.6	Conclusion	64
4	État de l'art sur la qualité de l'air liée aux puits canadiens	67
4.1	Mission d'évaluation sanitaire du puits canadien - Siège social du Groupe Millet [1]	67
4.2	Étude sur la nettoyabilité des puits climatiques [2]	70
4.3	Impact éco-énergétique et sanitaire d'un puits canadien sur une habitation ossature bois - TFE M.Jellad [3]	71
4.4	Mesures expérimentales de la qualité de l'air intérieur et des micro-organismes en suspension dans l'air dans une maison très basse énergie équipée d'un puits canadien dans la région froide du Japon [4]	74
4.5	Enquêtes microbiennes et mesures des allergènes dans les puits canadiens [5]	74
4.5.1	Prélèvements et analyses	74
4.5.2	Résultats et conclusions	76
4.6	Performance d'un puits canadien (refroidissement) et caractéristiques de la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment [6]	76
4.6.1	Site d'étude	77
4.6.2	Protocole de monitoring	77
4.6.3	Résultats et conclusions	77
4.7	Conclusion	78
II	Configuration expérimentale et résultats numériques	81
5	Installation étudiée	83
5.1	Caractéristiques de l'installation analysée	83
5.2	Système de mesure	85
5.3	Type de sol étudié	85
5.4	Relevés expérimentaux	86
5.5	Débit et vitesse de l'air à l'intérieur du puits	87

6	Modélisations numériques - Construction du modèle et principales hypothèses	89
6.1	Récapitulatif des modèles développés	89
6.1.1	Modélisation de la partie horizontale du puits	90
6.1.2	Modélisation de la partie finale du puits	91
6.2	Matériels informatiques utilisés pour la résolution des modèles	92
6.3	Modèles numériques 3D sans transfert de masse	92
6.3.1	Condition initiale des modèles 3D	93
6.3.2	Conditions aux limites des modèles 3D	93
6.4	Modèles numériques - Modèle pseudo 3D sans transfert de masse	94
6.4.1	Intégration le long du tube	96
6.5	Analyse de sensibilité du modèle pseudo 3D sans transfert de masse	97
6.5.1	Discrétisation du puits canadien	98
6.5.2	Pente du puits canadien	98
6.5.3	Caractéristiques du sol	98
6.5.4	Profondeur et température de la nappe phréatique	98
6.5.5	Coefficient de transfert de chaleur par convection le long de la paroi du tube	99
6.5.6	Coefficient de transfert de chaleur par convection au niveau du sol	99
6.5.7	Maillages du modèle 2D et du modèle 3D	100
6.5.8	Résultats de l'étude de sensibilité	100
6.6	Résultats des modélisations	105
7	Modèle final - Partie horizontale du puits	107
7.1	Modèle pseudo 3D intégrant les transferts de masse	107
7.1.1	Condition initiale du modèle pseudo 3D intégrant les transferts de masse	108
7.1.2	Conditions aux limites du modèle pseudo 3D intégrant les trans- ferts de masse	108
7.2	Écoulement des condensats dans le puits	109
7.3	Intégration le long du tube pour le pseudo-modèle 3D intégrant les trans- ferts de masse	114
7.4	Analyse paramétrique de l'algorithme de résolution de la partie horizontale du puits	117
7.4.1	Résultats de l'analyse paramétrique de l'algorithme de résolution de la partie horizontale du puits	120
8	Modèle de la fin du puits	121
8.1	Modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits	121
8.1.1	Conditions initiales du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits	122
8.1.2	Conditions aux limites du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits	123
8.1.3	Maillage du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits	123
8.1.4	Résultats du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits	124

8.2	Modèle de la température des condensats en fin de puits	126
8.2.1	Conditions initiales du modèle de la température des condensats en fin de puits	127
8.2.2	Conditions aux limites du modèle de la température des condensats en fin de puits	127
8.3	Détermination du coefficient de convection à l'interface condensats/air . .	128
8.3.1	Convection forcée	129
8.3.2	Convection naturelle	130
8.3.3	Convection mixte	133
8.4	Algorithme de résolution du calcul du volume et de la température des condensats	135
9	Résultats des modélisations	137
9.1	Résultats des modélisations de la partie horizontale du puits	138
9.2	Résultats des modélisations de la fin du puits	139
III	Relevés et analyses des micro-organismes	141
10	Matériel et méthodes	143
10.1	Matériel et méthodes d'échantillonnage	143
10.1.1	Campagnes d'échantillonnage et stations monitorées	143
10.1.2	Matériel et méthode d'échantillonnage des campagnes 1 et 2	146
10.1.3	Matériel et méthode d'échantillonnage de la campagne 3	149
10.1.4	Méthodes alternatives d'échantillonnage	150
10.2	Matériel et méthode d'analyse des échantillons	152
10.2.1	Extraction ADN	152
10.2.2	Amplification de l'ADN cible par PCR	152
10.2.3	Séquençage des ADN cibles bactériens et fungi	154
10.2.4	Analyse bioinformatique	155
11	Résultats et analyses microbiologiques	157
11.1	Résultats après mise en culture des échantillons	157
11.1.1	Comparaison du nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ entre les stations de prélèvement pour la campagne 1.	159
11.1.2	Comparaison du nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ entre les stations de prélèvement pour la campagne 2.	160
11.1.3	Comparaison du nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ et de $CFU_{fungi}.m^{-3}$ entre les températures d'incubation, toutes campagnes confondues. .	160
11.1.4	Comparaison du nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ entre les campagnes toutes stations confondues	160
11.2	Résultats après analyse bioinformatique	161
11.2.1	Diversité des bactéries	161
11.2.2	Diversité des fungi	168

11.2.3	Recherche de pathogènes pour l'humain	171
11.2.4	Risques sanitaires des pathogènes détectés	177
12	Discussion et conclusions	187
IV	Conclusion et perspectives	191
13	Conclusions	193
14	Perspectives	197
V	Annexes	217
A	Système de classification des êtres vivants	219
B	Analyses métagénomiques	223
B.1	Métagénomique globale	223
B.2	Métagénomique ciblée sur amplicon	224
B.3	Assignation taxonomique	224
B.4	La table des OTU	225
C	Qualité de l'air	227
C.1	France - Classification suivant les concentrations moyennes en radon	227
C.2	Impact éco-énergétique et sanitaire d'un puits canadien sur une habitation ossature bois - TFE M.Jellad	228
D	Caractéristiques de l'installation étudiée	230
D.1	Schéma de principe du puits canadien du département des sciences et technologies de la HEH	231
D.2	Type de sol du site étudié	232
E	Plan optimisé - analyse paramétrique de l'algorithme de résolution de la partie horizontale du puits	233
F	Campagnes 1 et 2 - Résultats du comptage des colonies	245

Table des figures

1	Exigences PEB [7]	2
1.1	Schéma de principe du puits canadien [8]	10
1.2	Schéma d'une borne de prise d'air de puits canadien [8]	11
1.3	Fonctionnement du by-pass	13
1.4	Conductivité thermique de quelques sols en fonction de leur teneur en eau [9]	14
1.5	Illustration des températures du sol à différentes profondeurs pour un climat tempéré [10]	18
2.1	Belgique - Classification en régions radon [11]	22
2.2	L'arbre de la vie [12]. Dessiné d'après les phylogénies proposées par Cavalier-Smith [13] et la mégaclassification de Ruggiero et al. [14]	27
2.3	Pyramide des rangs taxonomiques. Du plus large : l'empire, au plus précis : l'espèce	27
2.4	Taxonomie des bactéries <i>Catalogue of life (CoL)</i> [15]	28
2.5	Arbre phylogénétique des bactéries proposé par Bern et Goldberg [16]	29
2.6	Arbre phylogénétique des bactéries sur base de l'ARNr 16S [17]	29
2.7	Taxonomie des fungi <i>Catalogue of life (CoL)</i> [15]	30
2.8	Arbre phylogénétique des fungi d'après McCarthy et Fitzpatrick [18]	31
2.9	Principe de la PCR [19]	32
2.10	ARNr 16S de la petite sous-unité des ribosomes bactériens [20]	35
2.11	Cycle de vie des Ascomycètes. (1) Des mycéliums de types sexuels opposés produisent un gamétocyste appelé ascogone (2) contenant des noyaux des 2 parents. (3) L'ascogone produit un ensemble d'hyphes et d'asques appelés ascocarpe. (4) Les ascospores sont produites dans les asques. (5) Dissémination active des ascospores. (6) Germination des spores et croissance du mycélium. (7) Reproduction asexuée du mycélium par la production de conidies. ©N.A. Campbell, BIOLOGY, 3th ed.	38
2.12	Système respiratoire humain. © Dessin Michel Saemann - Archives Larousse	41
3.1	Comparaison de deux simulations numériques sur les performances d'un puits canadien	51

3.2	Paramètres d'entrée pour la régulation du puits canadien	51
3.3	Règles du pouce pour amortissement journalier ou annuel [21]	54
4.1	Évolution du ratio Intérieur/Extérieur des charges fongiques [1]	68
4.2	Évolution du ratio Intérieur/Extérieur des charges bactériennes [1]	68
4.3	Schéma représentant les sites de prélèvement de l'étude [5]	75
4.4	Évolution journalière des PM et de l'humidité relative [6]	78
5.1	Schéma de l'installation monitorée et localisation des thermocouples	83
5.2	Sortie du puits canadien	84
5.3	Tuyaux composant le puits canadien	84
5.4	Température du sol mesurée à 2 m de profondeur et températures d'entrée et de sortie du puits canadien durant la période du 01/12/2014 au 01/01/2016.	86
5.5	Températures aux sondes 8.3, 8.4 et différence absolue entre ces mesures pendant la période du 01/12/2014 au 01/01/2016.	87
6.1	Modélisation 3D, Modèle 3D simplifié	93
6.2	Modélisation 3D, Modèle 3D complet	93
6.3	Conditions limites du modèle 3D simplifié - Frontière 1	93
6.4	Conditions limites du modèle 3D simplifié - Frontière 2	93
6.5	Conditions limites du modèle 3D simplifié - Frontière 3	93
6.6	Conditions limites du modèle 3D simplifié - Frontière 4	93
6.7	Conditions limites du modèle 3D simplifié - Frontière 5	93
6.8	Conditions limites du modèle 3D complet - Frontière 1	94
6.9	Conditions limites du modèle 3D complet - Frontière 2	94
6.10	Conditions limites du modèle 3D complet - Frontière 3	94
6.11	Conditions limites du modèle 3D complet - Frontière 5	94
6.12	Modélisation pseudo 3D, discrétisation du puits en différents tronçons	94
6.13	Modèle pseudo 3D pour les simulations numériques avec le logiciel COMSOL	95
6.14	Algorithme de résolution d'un problème 3D instationnaire à l'aide de modèles 2D sans prise en compte des transferts de masse	97
6.15	Pseudo-modèle 3D : erreur absolue maximum par rapport à l'erreur absolue moyenne pour les différentes simulations.	101
6.16	Modèles 3D : erreur absolue maximum par rapport à l'erreur absolue moyenne pour les différentes simulations.	101
7.1	Conditions aux limites du pseudo-modèle 3D (section d'entrée 2D)	108
7.2	Représentation de l'accumulation des condensats dans le puits sur un pas de temps	110
7.3	Représentation de l'écoulement gravitaire, selon les hypothèses de Chézy	111
7.4	Représentation du rapport des sections, des vitesses et des débits en fonction du rapport de la hauteur mouillée sur le diamètre	113

7.5	Représentation du rapport des sections en fonction du rapport compris entre 0 et 0,1 de la hauteur mouillée sur le diamètre	114
7.6	Algorithme de résolution d'un problème 3D instationnaire à l'aide d'un modèle 2D intégrant les transferts de masse	116
8.1	Représentation du modèle permettant le calcul de l'écoulement de l'air en fin de puits	122
8.2	Conditions limites du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits - Frontières 1 et 2	123
8.3	Conditions limites du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits - Frontière 3	123
8.4	Maillage du modèle permettant le calcul de l'écoulement de l'air en fin de puits pour une hauteur de condensats de 15 cm	124
8.5	Écoulement de l'air en fin de puits avec une hauteur de condensats de 5 cm	125
8.6	Écoulement de l'air en fin de puits avec une hauteur de condensats de 25 cm	125
8.7	Zoom à l'interface condensats/air de l'écoulement de l'air en fin de puits avec une hauteur de condensats de 5 cm	125
8.8	Zoom à l'interface condensats/air de l'écoulement de l'air en fin de puits avec une hauteur de condensats de 25 cm	125
8.9	Vitesse de l'air au niveau des condensats en fonction de la hauteur des condensats	126
8.10	Représentation du modèle permettant le calcul des températures des condensats	127
8.11	Conditions limites du modèle de la température des condensats en fin de puits - Frontière 1	128
8.12	Conditions limites du modèle de la température des condensats en fin de puits - Frontière 2	128
8.13	Conditions limites du modèle de la température des condensats en fin de puits - Frontières 3, 4, 5 et 6	128
8.14	Conditions limites du modèle de la température des condensats en fin de puits - Frontière 7	128
8.15	Algorithme de résolution du coefficient de convection à l'interface condensats/air pour de la convection forcée	130
8.16	Algorithme de résolution du coefficient de convection à l'interface condensats/air pour de la convection naturelle	132
8.17	Algorithme de résolution du coefficient de convection à l'interface condensats/air pour de la convection mixte	134
8.18	Algorithme de résolution du calcul du volume des condensats	135
9.1	Précipitations, températures et insolation à Uccle de l'année 2015 (à gauche) et 2016 (à droite) par rapport aux normales	137
9.2	Températures d'entrée et de sortie de la partie horizontale du puits pour l'année 2015 (à gauche) et 2016 (à droite)	138

9.3	Quantité de condensats produite pour l'année 2015 (à gauche) et 2016 (à droite)	138
9.4	Hauteur des condensats dans la fin du puits pour l'année 2015 (à gauche) et 2016 (à droite)	139
9.5	Températures des condensats dans la fin du puits pour l'année 2015 (à gauche) et 2016 (à droite)	139
10.1	Campagne d'échantillonnage sur l'installation monitorée	145
10.2	Biocollecteur d'air - Air Ideal	146
10.3	monitoring des boîtes fungi et création des échantillons pour analyse ADN pour une station de prélèvement	148
10.4	Coriolis μ Air Sampler ©Bertin Technologies	149
10.5	Technologie cyclonique utilisée par le Coriolis μ Air Sampler. [22]	150
10.6	Rampe de filtration microbiologique	151
10.7	Burkard cyclone sampler	151
11.1	Comparaison du nombre moyen de colonies entre stations pour les bactéries (à gauche) et les fungi (à droite) lors de la campagne 1.	159
11.2	Comparaison du nombre moyen de colonies entre stations pour les bactéries (à gauche) et les fungi (à droite) lors de la campagne 2.	160
11.3	Campagne 1 – Diagramme de Venn des OTU bactériens présents dans les différentes stations de prélèvement.	162
11.4	Campagne 2 – Diagramme de Venn des OTU bactériens présents dans les différentes stations de prélèvement.	163
11.5	Campagne 3 – Diagramme de Venn des OTU bactériens présents dans les différentes stations de prélèvement.	164
11.6	Campagne 1 – Diagramme de Venn des OTU fungi présents dans les différentes stations de prélèvement.	168
11.7	Campagne 2 – Diagramme de Venn des OTU fungi présents dans les différentes stations de prélèvement.	169
11.8	Campagne 3 – Diagramme de Venn des OTU fungi présents dans les différentes stations de prélèvement.	170
11.9	Campagne 1 – Nombre d'OTU bactériens (à gauche) et fungi (à droite) pathogènes et leur distribution entre les stations de prélèvement.	171
11.10	Campagne 2 – Nombre d'OTU bactériens (à gauche) et fungi (à droite) pathogènes et leur distribution entre les stations de prélèvement.	173
11.11	Campagne 3 – Nombre d'OTU bactériens (à gauche) et fungi (à droite) pathogènes et leur distribution entre les stations de prélèvement.	175
A.1	Charles Darwin, L'origine des espèces, Ed originale 1859	220
A.2	Arbre phylogénétique, Ernst Haeckel - General Morphology of Organisms – 1886 [23]	221
A.3	Arbre phylogénétique adapté de Woese et al. 1990	222

B.1	Shotgun sequencing -la totalité des séquences ADN présentes dans l'échantillon est traitée [24]	223
B.2	Metabarcoding - un gène particulier est ciblé et séquencé [24]	224
B.3	Exemple de table d'OTU utilisant les pourcentages comme méthode de normalisation [20]	225
C.1	France - Classification suivant les concentrations moyennes en radon [1] . .	227
C.2	Dates et conditions des tests [3]	228
C.3	Résultats des prélèvements avec l'aérobiocollecteur [3]	228
C.4	Résultats des prélèvements avec le RCS high flow - incubation à 46 °C [3]	228
C.5	Résultats des prélèvements avec le RCS high flow - incubation à 20 °C [3]	229
D.1	Schéma de principe de l'installation étudiée	231
D.2	Implantation des sondages et forages de la campagne géotechnique de l'IN-ISMA [25]	232
F.1	Résultats du comptage des colonies pour les campagnes 1 et 2	245

Liste des tableaux

1.1	Masses volumiques ρ et capacités thermiques isobares, par unité de masse c_p et de volume ρc_p , de quelques constituants du sol [9]	14
1.2	Influence de la période d'une onde thermique sur sa profondeur de pénétration et sur son amortissement	17
2.1	Séquences cibles utilisées en fonction des êtres vivants ou virus	34
2.2	Taille et estimation des émissions globales de différentes particules biologiques. [26]	36
2.3	Seuils de résistances des spores de fungi [27, 28, 29, 30]	39
2.4	Lieux de sédimentation des particules dans le système respiratoire humain en fonction de leur taille. [31]	41
2.5	Niveau de qualité de l'air recommandé par l'OMS. Genève, Organisation mondiale de la Santé, 2021. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO.	44
2.6	Valeurs limites reprises dans la Directive 2008/50/CE	44
2.7	Proposition de valeurs seuils relatives aux moisissures en suspension dans les habitats (EUR14988EN, 1993)	46
3.1	Modèles de puits canadiens rencontrés dans la littérature	61
5.1	Propriétés physiques considérées pour le sol	86
6.1	Caractéristiques des différents maillages étudiés	100
6.2	Modèles 3D : Résultats de l'étude de sensibilité	103
6.3	Pseudo-modèle 3D : Résultats de l'étude de sensibilité	104
6.4	Erreurs absolues moyennes et maximum pour les différentes simulations par rapport aux données expérimentales.	105
7.1	Propriétés physiques considérées pour la zone non saturée et la zone saturée de la matrice sol	107
7.2	Niveaux des grandeurs d'entrée du plan d'expérience	118
7.3	Plan d'expérience et paramètres de sortie obtenus avec l'algorithme de résolution de la partie horizontale du puits	119

8.1	Résultats des simulations de la vitesse moyenne de l'air à la surface des condensats pour différentes hauteurs de condensats	124
10.1	Récapitulatif des campagnes effectuées au cours de l'étude.	144
10.2	Qualité de l'air extérieur lors des campagnes d'échantillonnage. Données fournies par l'ISSEP	146
10.3	Nombre et caractéristiques des échantillons pour chaque site	147
10.4	Composition et monitoring des boîtes « contrôle négatif » lors des campagnes 1 et 2	149
10.5	Amorces utilisées pour l'amplification par PCR des régions hypervariables V3 et V4 de l'ADNr 16S bactérien	152
10.6	Contenu en réactifs des échantillons introduits dans le thermocycleur pour l'amplification PCR de l'ADNr bactérien	152
10.7	Paramètres sélectionnés pour l'amplification PCR au niveau du thermocycleur l'ADNr bactérien	153
10.8	Séquences des amorces sélectionnées pour l'amplification ciblée de la région ITS chez les fungi [32]	153
10.9	Contenu en réactif de chaque échantillon utilisé pour l'amplification par PCR des fungi	153
10.10	Paramètres sélectionnés au niveau du thermocycleur pour l'amplification ADN des fungi	154
10.11	Contenu en réactif des échantillons utilisés pour la préparation des bibliothèques par enrichissement PCR	154
10.12	Paramètres du thermocycleur utilisés pour la préparation des bibliothèques par enrichissement PCR	155
11.1	Nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ et de $CFU_{fungi}.m^{-3}$ pour chaque station et chaque campagne d'échantillonnage.	157
11.2	Nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ et de $CFU_{fungi}.m^{-3}$, toutes stations confondues, pour chaque température d'incubation et pour chaque campagne.	158
11.3	Synthèse du nombre de taxons bactériens et fungi identifiés pour les 3 campagnes d'échantillonnage	161
11.4	Campagne 3 - Concentration en $bactéries.m^{-3}$ d'air pour chaque échantillon et en moyenne pour les stations Extérieur , Sortie Puits et Intérieur	165
11.5	Assignation taxonomique des OTU communs aux stations Intérieur , Sortie Puits et Condensats pour chaque campagne d'échantillonnage.	167
11.6	Campagne 3 - Concentration en $spores.m^{-3}$ d'air pour chaque échantillon et en moyenne pour les stations Extérieur , Sortie Puits et Intérieur	171
11.7	Campagne 1 - Abondance relative des OTU pathogènes détectés à la fois aux stations Condensats et Sortie Puits . La couleur rose indique qu'il s'agit d'OTU bactériens et la verte indique les OTU fungi.	172

11.8	Campagne 1 - Abondance relative des OTU bactériens et fungi pathogènes détectés à la station Sortie Puits alors qu'ils n'étaient pas présents aux stations Extérieur et Condensats	173
11.9	Campagne 2 - Abondance relative des OTU pathogènes détectés à la fois aux stations Condensats et Sortie Puits . La couleur rose indique qu'il s'agit d'OTU bactériens et la verte indique les OTU fungi.	174
11.10	Campagne 2 - Abondance relative des OTU bactériens et fungi pathogènes détectés à la station Sortie Puits alors qu'ils n'étaient pas présents aux stations Extérieur et Condensats	174
11.11	Campagne 3 - Abondance relative des OTU pathogènes détectés à la fois aux stations Condensats et Sortie Puits . La couleur rose indique qu'il s'agit d'OTU bactériens et la verte indique les OTU fungi.	176
11.12	Campagne 3 - Abondance relative des OTU bactériens et fungi pathogènes détectés à la station Sortie Puits alors qu'ils n'étaient pas présents aux stations Extérieur et Condensats	177
11.13	Risque sanitaire, selon la norme européenne et allemande, des fungi pathogènes détectés à la fois aux stations Condensats et Sortie Puits	179
11.14	Risque sanitaire, selon la norme européenne et allemande, des fungi pathogènes détectés à la station Sortie Puits , mais non présents aux stations Extérieur et Condensats	181
11.15	Risque sanitaire, selon la norme européenne et allemande, des bactéries pathogènes détectées à la fois aux stations Condensats et Sortie Puits	183
11.16	Risque sanitaire, selon la norme européenne et allemande, des bactéries pathogènes détectées à la station Sortie Puits , mais non présentes aux stations Extérieur et Condensats	184

Liste des symboles

Acronymes

<i>ADN</i>	Acide désoxyribonucléique
<i>ARN</i>	Acide Ribonucléique
<i>ARN_m</i>	Acide Ribonucléique Messenger
<i>ARN_r</i>	Acide Ribonucléique Ribosomique
<i>ASHP</i>	Air Source Heat Pump - Pompe à chaleur air-eau
<i>BAuA</i>	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin - Institut fédéral allemand de la sécurité et de la santé au travail
<i>BIEC</i>	Bangalore International Exhibition Center
<i>BLAST</i>	Basic Local Alignment Search Tool - Méthode de recherche heuristique
<i>BU</i>	Biological Unit - Unité biologique
<i>CARAH</i>	Centre pour l'Agronomie et l'Agro-industrie de la Province du Hainaut
<i>CE</i>	Conformité Européenne
<i>CFC</i>	ChloroFluoroCarbure
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics - Mécanique des fluides numérique
<i>CFU</i>	Colony Forming Units - Unité Formant Colonie
<i>COL</i>	Catalogue Of Life - Catalogue de la vie
<i>COV</i>	Composés Organiques Volatils
<i>COVT</i>	Composés Organiques Volatils Totaux
<i>CPU</i>	Central Processing Unit - Unité centrale de calcul
<i>CSA</i>	Canadian Standards Association - Association canadienne de normalisation
<i>DNA</i>	Deoxyribonucleic Acid - Acide désoxyribonucléique
<i>EAHX</i>	Earth to Air Heat Exchanger - Échangeur de chaleur sol-air - Puits canadien

<i>ECS</i>	Eau Chaude Sanitaire
<i>EHX</i>	Earth Heat Exchanger - Échangeur de chaleur sol - Puits canadien
<i>GCHE</i>	Ground Coupled Heat Exchanger - Échangeur de chaleur souterrain
<i>GPU</i>	Graphics Processing Unit - unité de traitement graphique
<i>GSHP</i>	Ground Source Heat Pump - Pompe à chaleur sol-eau
<i>HAP</i>	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
<i>HCFC</i>	HydroChloroFluoroCarbure
<i>HCl</i>	Chlorure d'Hydrogène
<i>HEH</i>	Haute École en Hainaut
<i>HVAC</i>	Heating Ventilation and Air Conditioning - Chauffage Ventilation et Air Conditionné
<i>INISMA</i>	Institut Interuniversitaire des Silicates, Sols et Matériaux Mons
<i>irCELine</i>	Cellule Interrégionale de l'Environnement
<i>IRM</i>	Institut Royal Météorologique
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization - Organisation internationale de normalisation
<i>ISSeP</i>	Institut Scientifique de Service Public
<i>ITS</i>	Internal Transcribed Spacer - Espaceur interne transcrit
<i>MAE</i>	Mean Absolute Error - Erreur absolue moyenne
<i>milieu HS</i>	milieu High Salt - milieu à forte concentration en sel
<i>milieu NE</i>	milieu Non Exposé
<i>milieu TSA</i>	milieu Trypticase Soy Agar - milieu à base de gélose tryptone caséine soja
<i>NA</i>	Non Assigné
<i>NaOH</i>	Hydroxyde de Sodium
<i>NCBI</i>	National Center for Biotechnology Information - Centre américain pour les informations biotechnologiques
<i>NPP</i>	Nombre le Plus Probable
<i>OMS</i>	Organisation Mondiale de la Santé
<i>OTU</i>	Operational Taxonomic Unit - Unité taxonomique fonctionnelle
<i>PBS</i>	phosphate Buffered Saline - Tampon phosphate salin
<i>PCR</i>	Polymerase Chain Reaction - Réaction en chaîne par polymérase

<i>PEB</i>	Performance Énergétique des Bâtiments
<i>PEHD</i>	polyÉthylène Haute Densité
<i>PM</i>	Particulate Matter - Particules en suspension
<i>PNC</i>	Particule donnant Naissance à une Colonie
<i>ppm</i>	partie par million
<i>PVC</i>	PolyVinyl Chloride - PolyChlorure de Vinyle
<i>QAI</i>	Qualité de l'Air Intérieur
<i>RAM</i>	Random Access Memory - Mémoire vive
<i>RANS</i>	Reynolds Averaged Navier-Stokes
<i>RMSE</i>	Root Mean Square Error - Erreur quadratique moyenne
<i>SBS</i>	Sequencing By Synthesis - Séquençage par synthèse
<i>STD</i>	Simulation Thermique Dynamique
<i>TFE</i>	Travail de Fin d'Études
<i>TRBA</i>	Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe - Règles techniques pour les agents biologiques
<i>UFC</i>	Unité Formant Colonie
<i>UL</i>	Underwriters Laboratories - Certification/Normalisation UL
<i>UMONS</i>	Université de Mons
<i>UV</i>	Rayonnement UltraViolet
<i>VMC</i>	Ventilation Mécanique Contrôlée
<i>ZNS</i>	Zone Non Saturée
<i>ZS</i>	Zone Saturée

Symboles classiques

\dot{m}	Débit massique ($kg \cdot s^{-1}$)
$\vec{\nabla}T$	Gradient de température ($K \cdot m^{-1}$)
\vec{n}	Vecteur normal unitaire
a	Diffusivité thermique ($m^2 \cdot s^{-1}$)
C	Coefficient de Chézy ($m^{0,5} \cdot s^{-1}$)
c	Capacité thermique ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
c_a	Capacité thermique de l'air sec ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
c_H	Capacité thermique de l'air humide ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

d	Diamètre (m)
d_H	Dimension caractéristique (m)
dT	Amplitude de la variation de température (K)
e_a	Erreur absolue moyenne sur la température (K)
e_{max}	Erreur absolue maximum sur la température (K)
f	Facteur de friction
g	Accélération de la pesanteur ($m \cdot m^{-2}$)
Gr	Nombre de Grashof
H	Hauteur (m)
h	Coefficient de transfert convectif ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
h_{tube}	Coefficient de transfert convectif à l'intérieur du tube ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
i	Enthalpie ($J \cdot kg_{air}^{-1} \cdot sec$)
k	Facteur de proportionnalité
L	Longueur (m)
L_c	Chaleur latente de condensation ($J \cdot kg^{-1}$)
n	Coefficient de Manning
Nu	Nombre de Nusselt
P	Périmètre (m)
Pr	Nombre de Prandtl
P_v	Pression de vapeur (Pa)
q	Flux de chaleur volumique généré ($W \cdot m^{-3}$)
Q_v	Débit volumique ($m^3 \cdot s^{-1}$)
r	Rayon (m)
Ra	Nombre de Rayleigh
Re	Nombre de Reynolds
Ri	Nombre de Richardson
S	Surface ou section (m^2)
s	Pente ($m \cdot m^{-1}$)
T	Température (K ou $^{\circ}C$)
t	Temps (s)

t_{Tmax}	Moment où la température est maximale à l'interface sol/environnement extérieur (s)
v	Vitesse ($m \cdot s^{-1}$)
Vol	Volume (L)
x	Humidité absolue ($kg_{eau} \cdot kg_{air}^{-1} sec$)

Symboles grecs

β	Coefficient de dilatation thermique isobare (K^{-1})
δ	Profondeur de pénétration de l'onde thermique (m)
ϵ	Émissivité
γ	Poids volumique ($N \cdot m^{-3}$)
λ	Conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
μ	Viscosité dynamique du fluide ($Pa \cdot s$)
ν	Viscosité cinématique du fluide ($m^2 \cdot s^{-1}$)
ω	Pulsation de l'onde thermique déterminée par sa période (s^{-1})
Φ	Flux de chaleur (W)
ρ	Masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)
τ	Période de l'onde thermique (s)
θ	Angle caractérisant le remplissage de la conduite ($radian$)
φ	Densité de flux de chaleur ($W \cdot m^{-2}$)

Indices

<i>air</i>	Air
<i>charge</i>	Charge - canalisation remplie
<i>cond</i>	Condensats
<i>condens</i>	Condensation
<i>conv</i>	Convectif
<i>env</i>	Environnement
<i>ext</i>	Extérieur
<i>fin</i>	Final
<i>hyd</i>	hydraulique
<i>in</i>	Entrée de la section

<i>lat</i>	Latent
<i>m</i>	Mouillé
<i>out</i>	Sortie de la section
<i>paroi, m</i>	Moyenne au niveau de la paroi du tube
<i>paroi</i>	Paroi du tube
<i>sat</i>	Saturation
<i>section</i>	Section
<i>solaire</i>	Solaire
<i>surface</i>	Interface sol/environnement extérieur
<i>t</i>	Temps
<i>tot</i>	Total
<i>vent</i>	Vent
<i>z</i>	Profondeur
<i>vap</i>	Évaporation

Introduction

Contexte général

Les ressources en énergies fossiles diminuent sans cesse et il est donc essentiel d'économiser au maximum celles-ci dans une optique de développement durable. Le secteur du bâtiment étant un consommateur important en énergie, il est utile de s'intéresser à certaines techniques de réduction de la consommation, comme celle appelée puits canadien (cette appellation sera conservée dans cette étude), puits provençal ou puits climatique dans les pays francophones et Earth Heat Exchanger (EHX) ou Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE) dans les pays anglophones. Cette technique permet de diminuer la consommation d'un bâtiment aussi bien en période hivernale qu'en période estivale.

Il semblerait que c'est en 1977, que l'architecte Claude Micmacher, pionnier de l'écoconstruction, l'évoque pour la première fois dans le Manuel de Construction Rurale. Son nom lui vient de son utilisation par une peuplade amérindienne sédentaire située dans le Canada d'aujourd'hui. Cette dernière utilisait des troncs d'arbres évidés et enterrés à faible profondeur comme seule entrée d'air de l'habitation.

Pour diminuer la consommation en énergie dans le secteur du bâtiment, l'Union Européenne a mis en place la Directive Européenne sur la Performance Énergétique des Bâtiments retranscrite en Belgique par chaque Région. Dans ce cadre, le Gouvernement wallon a adopté le décret cadre le 19 avril 2007 et les premiers arrêtés d'application le 17 avril 2008. L'objectif de cette réglementation est de définir différents indices ou niveaux d'exigence permettant de caractériser un futur bâtiment et d'imposer des valeurs limites pour ceux-ci afin d'assurer une faible consommation énergétique.

Contexte réglementaire en Région wallonne

La Directive européenne sur la Performance Énergétique des Bâtiments est entrée en vigueur en Région wallonne le 1^{er} septembre 2008. Elle s'applique à tous les bâtiments dont les travaux nécessitent un permis d'urbanisme et définit différents niveaux ou indices : U, K, Ew, Es, V et S.

NATURE DES TRAVAUX SOUMIS À PERMIS				Valeurs U	Niveau K	Niveau E _w	Consommation spécifique	Ventilation	Surchauffe
				U	K	E _w	E _{spéc.}	V	S
Procédure AVEC responsable PEB	Bâtiment neuf ou assimilé	PER	Maisons unifamiliales Appartements	≤ U _{max}	≤ K35 + nœuds constructifs	45	85 kWh/m ² .a n	Annexe C2	< 6.500 Kb
		PEN	Bureaux Services Enseignement Hôpitaux HORECA Commerces Hébergements collectifs ...			90/45		Annexe C3	
		I	Industriel						
	Rénovation importante			Uniquement éléments modifiés et neufs					
Procédure SANS responsable PEB Déclaration PEB simplifiée	Rénovation simple, y compris Changement d'affectation chauffé > chauffé			≤ U _{max}					
	Changement d'affectation non chauffé > chauffé			des éléments modifiés et neufs	≤ K65 + nœuds constructifs			Annexe C2 ou C3	

FIGURE 1 – Exigences PEB [7]

Indice U (anciennement k) – $W.m^{-2}.K^{-1}$

Coefficient de transmission thermique d'une paroi. C'est la quantité de chaleur qui traverse 1 m² de paroi chaque seconde et pour chaque degré d'écart entre l'intérieur et l'extérieur.

Niveau K

Niveau d'isolation thermique global. C'est un indicateur de la performance énergétique de l'enveloppe d'un bâtiment défini par son volume protégé.

Niveau E_w

Niveau de consommation d'énergie primaire. C'est le rapport multiplié par cent entre l'énergie primaire consommée annuellement par une unité PEB du bâtiment étudié et l'énergie primaire consommée annuellement par une unité PEB de même géométrie avec des caractéristiques techniques standardisées (K45 - niveau d'isolation thermique global, Ventilation de type C - pulsion naturelle et extraction mécanique, v₅₀ = 8 m³.h⁻¹.m⁻² - débit de fuite (volume d'air qui s'échappe par les défauts d'étanchéité du bâtiment par heure) pour une différence de pression

de 50 Pa entre l'intérieur et l'extérieur par unité de surface de l'enveloppe, Chaudière mazout η installation = 72,8 %, ECS - Eau Chaude Sanitaire η production = 50 %, surface de fenêtre = 15 % du plancher chauffé).

Niveau Espec – $kWh.m^{-2}.an^{-1}$

Consommation spécifique annuelle en énergie primaire de l'unité PEB par mètre carré de plancher chauffé.

V

Il n'y a pas d'indice lié à la ventilation. Le bâtiment doit simplement respecter les exigences des annexes C2 (bâtiments résidentiels) ou C3 (bâtiments non résidentiels) de la réglementation PEB.

Indicateur S – Kh

Indicateur de surchauffe. Il est calculé en fonction du rapport entre les apports gratuits (internes et externes) et les pertes par transmission et par ventilation du bâtiment en tenant compte de l'inertie de celui-ci. Entre deux valeurs seuils en Kh , le permis d'urbanisme pourra être octroyé, mais une consommation annuelle fictive pour le refroidissement sera ajoutée dans le calcul du Ew .

Le placement d'un puits canadien couplé au système de ventilation choisi aura un impact sur le bâtiment et donc sur certains de ces indices. Jusqu'à la date du 1^{er} janvier 2014, la méthode de calcul donnant ces indices ne pouvait pas prendre en compte la présence d'un puits canadien. Cependant, l'impact d'un puits canadien serait positif. En période hivernale, le fonctionnement du puits ferait diminuer les indices Ew et $Espec$ et en période estivale, il diminuerait l'indicateur S et, si une consommation de refroidissement fictive les avait majorés, l'indice $Espec$ et l'indice Ew .

La méthode réglementaire de calcul permettant de déterminer les besoins en refroidissement et le risque de surchauffe a été analysée dans le cadre du projet EPICOOOL [33] afin d'être améliorée. Cette étude porte sur la comparaison entre les résultats obtenus pour trois bâtiments résidentiels types (une maison quatre façades, une maison de rangée et un appartement) via la méthode PEB qui est une méthode mensuelle et via un logiciel de simulation dynamique TRNSYS qui donnera des résultats heure par heure. Cette étude a permis de modifier la méthode de calcul PEB, par exemple, en limitant les majorations sécuritaires appliquées aux conditions climatiques ou en permettant la prise en compte d'une ventilation intensive ou la présence d'un puits canadien.

Il est donc possible, depuis le 1^{er} janvier 2014, de prendre en compte la présence d'un puits canadien dans le cadre de la méthode de calcul PEB. Toutefois, celui-ci n'aura un impact que sur le calcul des besoins en refroidissement et sur le risque de surchauffe. Les apports dus aux puits durant la période hivernale seront négligés et ne diminueront pas les besoins nets en chauffage. De plus, l'effet d'une nappe phréatique sera négligé et la conductivité thermique du sol sera prise forfaitairement égale à $2,0 W.m^{-1}.K^{-1}$ [34] alors que ces caractéristiques peuvent fortement influencer les résultats.

Objectifs de la thèse - Question de recherche

Le sol pouvant être assimilé à un milieu homogène semi-infini, la variation périodique de sa température est amortie et déphasée par rapport à la variation de la température de surface [35, 36, 37, 38]. Pour bénéficier de cet amortissement et de ce déphasage, l'air nécessaire à la ventilation hygiénique d'un bâtiment peut passer par un ou plusieurs tuyaux enterrés dans le sol, permettant de réduire la consommation d'un bâtiment aussi bien en période hivernale qu'en été. Cette technique fait partie des systèmes de climatisation passive [39].

Ce principe de ventilation est très ancien, il était déjà utilisé par les architectes iraniens en 3000 av. J.-C. qui utilisaient des tunnels souterrains et des tours à vent ou "catch-wind" pour le refroidissement et le chauffage des bâtiments [40, 41, 42].

L'objectif de cette thèse est de créer un modèle numérique pour la simulation d'un puits canadien afin de quantifier les condensats produits et leur température pendant certaines périodes de l'année. En effet, les condensats stagnants dans un échangeur de chaleur terre-air peuvent être à l'origine du développement de moisissures et de bactéries représentant un risque sanitaire qu'il est nécessaire d'étudier, bien que la présence de filtres au niveau du système de ventilation semble être une mesure suffisante pour éviter ce risque sanitaire, comme démontré dans plusieurs études [1, 2].

La présence de condensat stagnant durant de longues périodes sur certains modèles de puits canadiens est une certitude. Ce biotope particulier peut être propice au développement de micro-organismes et une question essentielle se pose :

"L'usage d'un puits canadien peut-il induire une contamination microbiologique de l'air par des agents pathogènes?".

Pour répondre à cette question, il est donc nécessaire d'étudier le fonctionnement d'un puits et plus particulièrement les condensats qui s'y forment afin de connaître l'évolution de la quantité de condensats au fil du temps. Il faut également caractériser ces condensats en température et leur interaction avec l'air de ventilation pour évaluer l'impact sanitaire.

La recherche se base sur une étude prédictive sur la formation de condensats au sein de l'échangeur de chaleur, pour laquelle nous avons développé un modèle. Ce modèle permet d'évaluer la quantité de condensats dans le puits canadien et leur température à tout instant. Les résultats obtenus sont comparés aux données recueillies sur une installation existante surveillée en continu. La validation du modèle se fait sur base des relevés de l'année 2015. Une modélisation 3D de la fin du puits a également été réalisée pour prendre en compte l'accumulation de condensats et les transferts de masse permettant la contamination de l'air par les agents microbiens. Les simulations sont réalisées pour deux années complètes sur base horaire afin de pouvoir étudier les effets de l'échangeur sur la variation périodique annuelle ou journalière des températures, et de comparer les résultats d'une année assez sèche (2015) à ceux d'une année humide (2016).

En plus de cette étude, une analyse microbiologique du site a été réalisée sur l'air circulant dans le puits et les condensats pour vérifier l'impact sanitaire de cette technique. Durant l'hiver 2020 et le printemps 2021, plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été menées et les échantillons séquencés pour identifier à l'aide de bases de données, les micro-organismes pathogènes présents dans le puits canadien ou dans les sites échantillonnés.

Présentation du manuscrit

Ce document est articulé en 5 parties. La Partie I, *Puits canadien et qualité de l'air*, reprend l'ensemble des éléments théoriques nécessaires à la compréhension de cette thèse ainsi que l'état de l'art des recherches menées sur le sujet en Europe et à l'étranger. Le principe de fonctionnement du puits canadien, un état de l'art sur ce dispositif, les notions théoriques concernant la qualité de l'air, le système de classification des êtres vivants, les techniques de microbiologie employées pour l'analyse des échantillons ainsi qu'un état de l'art sur la qualité de l'air y sont donc présentés.

Un des deux objectifs de cette thèse étant de pouvoir créer un modèle numérique pour quantifier les condensats produits, la Partie II, *Configuration expérimentale et résultats*, contient l'ensemble des données et résultats liés aux modèles numériques. Les aspects techniques de l'installation étudiée, le choix du modèle et des hypothèses prises pour la modélisation numérique y sont décrits. Au final ce sont deux modèles qui ont été réalisés pour atteindre l'objectif fixé. Une modélisation de la partie horizontale du puits qui définit la quantité et les températures des condensats produits et une modélisation de la fin du puits où les condensats s'accumulent et créent un biotope propice aux développements des micro-organismes.

L'autre objectif de cette thèse étant d'évaluer le risque sanitaire lié au potentiel développement de micro-organismes pathogènes dans le puits et les condensats, la Partie III, *Relevés et analyses des micro-organismes*, aborde l'ensemble des éléments liés aux campagnes d'échantillonnage, à l'analyse des échantillons et la recherche de micro-organismes pathogènes pour l'humain.

La Partie IV, *Conclusion et perspectives*, fait le lien entre les résultats des modélisations et ceux obtenus lors de l'analyse microbiologique. La combinaison de ces éléments permet d'avoir une vision globale pour répondre à la question initiale "*L'usage d'un puits canadien peut-il induire une contamination microbiologique de l'air par des agents pathogènes ?*". Plusieurs perspectives sont également abordées dans cette partie.

Enfin, la dernière Partie rassemble l'ensemble des Annexes liées à cette thèse.

Première partie

Puits canadien et qualité de l'air

Chapitre 1

Principe de fonctionnement d'un puits canadien

Le puits canadien est un échangeur air-sol dit géothermique de surface. Son principe est très simple puisque l'air qui va servir à la ventilation va passer dans cet échangeur composé d'un ou plusieurs tuyaux enterrés avant de pénétrer dans le bâtiment. Les oscillations de température en surface diminuent avec la profondeur, et la température du sol à une certaine profondeur de l'ordre de 10 m peut donc être considérée comme constante tout au long de l'année. Pour des raisons financières évidentes, les puits canadiens ne sont pas enterrés à une telle profondeur et on se limite en règle générale à une profondeur de l'ordre de 2 m, ce qui pour une période d'oscillations de 1 an représente une réduction d'un facteur 2,72 des oscillations de l'onde thermique dans un sol ayant une diffusivité thermique de $a = 3,222 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. À Uccle, pour les normales de saison, la température moyenne annuelle calculée sur base mensuelle étant de 10,5 °C, la température maximale moyenne mensuelle de 14,2 °C et la température minimale moyenne mensuelle de 6,9 °C [43], l'amplitude passerait de 3,65 °C à 1,34 °C.

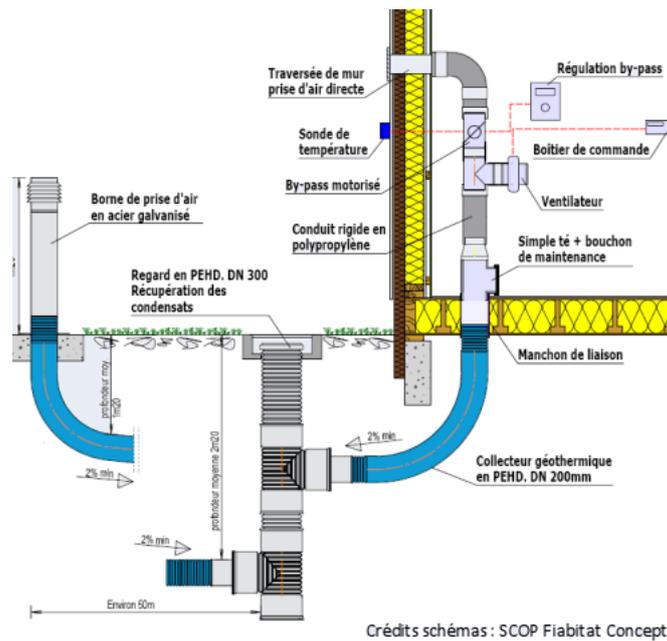


FIGURE 1.1 – Schéma de principe du puits canadien [8]

À cette profondeur, la température du sol en hiver est plus élevée que la température extérieure. Par conséquent, l'air qui passe par le puits canadien peut réaliser un échange thermique avec le sol afin d'augmenter sa température avant de rentrer dans l'habitation. Le phénomène est inverse en été, car la température du sol est plus faible que celle de l'air, ce qui permet à celui-ci de se rafraîchir avant d'être pulsé dans l'habitation.

En intersaison, ou durant certaines journées d'hiver ou d'été, il est possible que le puits canadien ne soit plus financièrement intéressant et il faut donc prévoir l'installation d'un by-pass. En effet, il est par exemple possible durant la période de chauffe que la température du sol soit plus faible que la température extérieure et il n'est donc pas financièrement intéressant de rafraîchir l'air avant son entrée dans l'habitation que l'on veut réchauffer.

1.1 Éléments constituant le puits canadien

La bouche d'aspiration

La bouche d'aspiration doit pouvoir aspirer l'air et le filtrer. Elle doit être composée d'une grille fine et d'un système de préfiltration G3/G4 (Norme Européenne EN779 - mailles de 10microns) qui va protéger l'entrée des rongeurs ou des insectes. C'est l'élément par lequel l'air entre dans la maison et il est situé en début de circuit. Pour ces raisons, la bouche d'aspiration doit également présenter les caractéristiques suivantes :

- une section suffisante afin d'éviter une augmentation des pertes de charge, et donc une surcharge du ventilateur, due à un encrassement trop rapide. Cela permet également une vitesse suffisamment faible afin de ne pas générer de bruit ;
- elle doit être placée le plus loin possible de toute source de pollution ;
- la hauteur de la prise d'air doit être de minimum 1 m pour éviter que le ventilateur aspire les poussières du sol ou les polluants situés sur les 40 premiers centimètres. De plus, cette hauteur permet d'éviter l'aspiration de radon, lequel, étant huit fois plus lourd que l'air, peut se trouver à faible hauteur et est un gaz cancérigène provoquant des rayonnements "ionisants" ;
- elle ne doit pas être placée à proximité d'une végétation abondante, pour éviter de capter le dioxyde de carbone produit par les plantes ainsi que le pollen qui est un allergène.

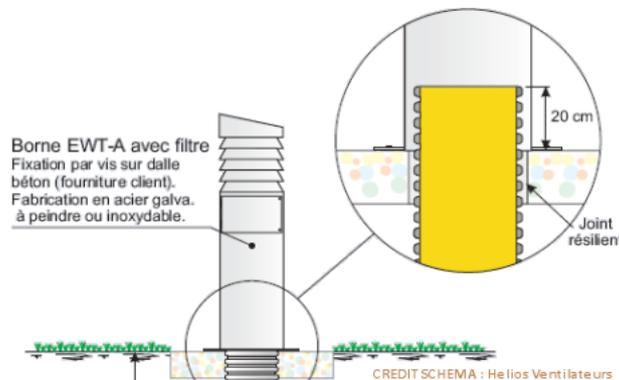


FIGURE 1.2 – Schéma d'une borne de prise d'air de puits canadien [8]

Les tuyaux

Le diamètre des tuyaux est déterminé par le débit d'air nécessaire au bâtiment. Souvent, le diamètre intérieur se situe entre 160 et 250 mm. Un diamètre supérieur ne permet pas un échange de chaleur uniforme, les températures de la partie supérieure étant trop différentes des températures de la partie inférieure. Les conduites doivent être de qualité alimentaire pour le passage de l'air et avoir une pente minimale de 2 % pour l'évacuation des condensats. L'intérieur des tuyaux est lisse sur toute la longueur pour éviter toute accumulation d'eau et donc tout développement de bactéries. L'extérieur, quant à lui, peut être annelé afin d'augmenter les surfaces d'échange, mais cela nécessite des précautions supplémentaires à la pose afin de s'assurer du contact des ailettes avec la terre et l'absence de poches d'air qui limiteraient les échanges de chaleur.

Choix des tuyaux :

Le choix des tuyaux est un élément majeur. Lors de la conception, il faut penser que

l'ensemble de l'air que l'on va respirer dans la maison transite par ceux-ci pendant plusieurs années. Les conditions requises, au niveau des tuyaux, pour une bonne utilisation d'un puits sont :

- la durabilité ;
- une capacité à supporter les charges dues à la profondeur d'enfouissement ;
- l'étanchéité à l'eau et à l'air du matériau utilisé pendant toute la durée de vie du puits canadien ;
- un matériau inerte pour éviter l'émission de vapeurs nocives ou d'odeurs ;
- une paroi intérieure lisse et antistatique, car la rugosité va produire des pertes de charge qui vont nécessiter un ventilateur plus puissant ;
- une bonne conductivité thermique ;
- une mise en œuvre aisée.

Le regard de visite

Le regard de visite est primordial pour permettre une inspection visuelle régulière de l'installation. Il permet aussi le nettoyage à grandes eaux en y plaçant une pompe à immersion. Pour assurer les fonctions pour lesquelles il est prévu, le regard devra avoir les caractéristiques suivantes :

- ouverture minimum de 300 par 100 millimètres ;
- couvercle étanche à l'air et à l'eau ;
- structure intérieure lisse ;
- fond du regard suffisamment profond pour pouvoir y placer une pompe pour l'évacuation des condensats ;
- raccords parfaitement étanches.

Le by-pass

Pendant l'intersaison, il est possible que l'air provenant du puits soit à une température inférieure à celle de l'extérieur. Cet air contribuera donc au rafraîchissement du bâtiment alors que l'on peut rechercher l'effet inverse. Le by-pass est un système qui permet de prendre l'air directement à l'extérieur sans passer par le puits. Le by-pass est généralement dirigé par un registre motorisé qui choisit en permanence la température la plus favorable pour le bâtiment, ce principe est illustré à la Figure 1.3. Il faut savoir que le by-pass ne court-circuite pas totalement le puits canadien. Pour éviter la prolifération de champignons et de bactéries, il faut en permanence maintenir un léger débit dans le puits en fonctionnement toute l'année.



FIGURE 1.3 – Fonctionnement du by-pass

Le ventilateur

Pour forcer et réguler le débit de l'air à distribuer dans l'ensemble du bâti, le ventilateur est choisi à partir du calcul des pertes de charge totales de l'installation. Plus le circuit de l'air sera long et composé de changements de direction ou d'irrégularités, plus le ventilateur devra être puissant pour vaincre ces pertes de charge.

1.2 Puits canadien et transferts de chaleur

Afin de comprendre le principe de fonctionnement d'un puits canadien et de pouvoir simuler le fonctionnement de celui-ci, il est nécessaire de maîtriser les phénomènes de transfert de chaleur. On peut séparer ceux-ci en deux grandes catégories qui feront l'objet de deux analyses : premièrement, les phénomènes de transfert au sein du sol et à sa surface et deuxièmement, les transferts au sein même du puits.

1.2.1 Propriétés thermiques du sol

Les informations traitées dans ce point sont basées sur un ouvrage de référence dans le domaine de la physique du sol [9].

Les propriétés thermiques d'un sol dépendent directement de celles des divers composants qui le constituent. Celles-ci peuvent varier pour un même sol de la même façon qu'elles sont directement influencées par la teneur en eau et la porosité du sol.

Capacité thermique

La capacité thermique ou plus précisément la capacité thermique massique isobare est la capacité d'un corps d'emmagasiner de la chaleur par unité de température et de masse. Elle dépend de la température, mais ses variations sont négligeables étant donné les faibles différences de températures rencontrées au sein du sol.

La capacité thermique d'un sol peut être calculée en réalisant la moyenne pondérée massique des capacités thermiques de ses constituants (minéraux, matière organique,

eau, glace, air).

Il est à remarquer dans le Tableau 1.1 que les capacités thermiques de l'eau et de la matière organique sont plus élevées que celles des minéraux. Un sol humide emmagasinerà donc mieux la chaleur qu'un sol sec et augmentera les performances d'un puits canadien.

	ρ $kg.m^{-3}$	c_p $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$\rho.c_p$ $J.m^{-3}.K^{-1}$
Minéraux (moy.)	2650	800	2100.10^3
Matière organique	1300	1900	2470.10^3
Eau	1000	4200	4200.10^3
Glace	920	2100	1930.10^3
Air	1,25	1000	1250

TABLE 1.1 – Masses volumiques ρ et capacités thermiques isobares, par unité de masse c_p et de volume ρc_p , de quelques constituants du sol [9]

Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un sol est fonction de ses différents constituants, mais aussi de l'arrangement, de la forme et des liaisons entre ceux-ci. L'air étant faiblement conducteur, la teneur en air du sol est également un paramètre important dans la détermination de sa conductivité thermique. La présence d'eau aura pour effet d'augmenter la conductivité thermique du sol et donc le coefficient global de transfert entre l'air et le sol au niveau du puits canadien. La Figure 1.4 représente la conductivité thermique de quelques sols en fonction de leur teneur en eau.

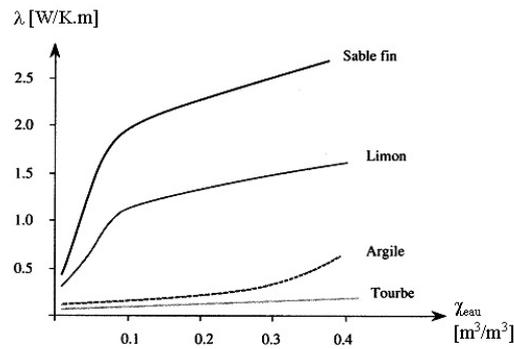


FIGURE 1.4 – Conductivité thermique de quelques sols en fonction de leur teneur en eau [9]

1.2.2 Transferts thermiques au niveau du sol

Transfert de chaleur entre l'environnement extérieur et le sol

Il y a trois modes principaux d'échange de chaleur qui ont lieu entre le sol et l'environnement extérieur : le rayonnement, la convection et l'évaporation.

- Le rayonnement a lieu entre le soleil et le sol et entre le sol et la voûte céleste.
- La convection est due à l'effet du vent et à l'infiltration de l'eau de pluie qui a une température différente de celle du sol.
- L'évaporation due à la présence d'eau de pluie ou de neige qui humidifie le sol.

Dans le cadre de ce travail, afin de faciliter la modélisation, nous négligerons les échanges par évaporation ou les phénomènes ponctuels comme par exemple, l'infiltration d'eaux froides ou chaudes dues à la pluie.

Transfert de chaleur au sein du sol

Différents modes de transfert de chaleur ont lieu au sein du sol. La conduction, l'évaporation, la convection et le rayonnement. Pour une approche simplifiée du champ des températures dans le sol, une modélisation suivant un modèle conductif pur est acceptable. En effet, les échanges radiatifs sont assez faibles au vu des petites différences de températures. L'évaporation et la convection peuvent également être négligées.

La conductibilité est un mode de transfert de proche en proche par chocs successifs qui n'ont lieu qu'en présence d'un support matériel au sein duquel existe un gradient de température.

Pour un solide dont les propriétés physiques sont uniformes et constantes, le champ de température est donné par la résolution de l'équation de Fourier - Kirchhoff en considérant des conditions initiales et aux limites adéquates.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q \quad (1.1)$$

Champ de température dans le sol

La température moyenne à proximité de la surface du sol est généralement fort proche de la température moyenne annuelle extérieure (T_0 : valant environ 10 °C sous nos latitudes). La modélisation du champ de température dans un sol ayant déjà été analysée dans de nombreuses études, nous reprendrons ici la résolution analytique de l'équation de Fourier - Kirchhoff à diffusivité thermique constante pour un milieu homogène semi-infini dont la surface est soumise à une variation sinusoïdale de température autour de la température moyenne annuelle.

Considérant qu'il n'y a pas de génération interne de chaleur (équation 1.3) et en introduisant la notion de diffusivité thermique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température (équation 1.4), l'équation 1.1 devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (1.2)$$

$$q = 0 \quad (1.3)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (1.4)$$

La condition limite supérieure à l'interface atmosphère-sol peut s'écrire sous la forme :

$$T(\text{surface}, t) = T_{\text{surface}} + dT_{\text{surface}} \cdot \cos(\omega(t - t_{Tmax})) \quad (1.5)$$

La condition limite inférieure à une grande profondeur peut être considérée comme une température constante :

$$T(\infty, t) = T_{\text{surface}} \quad (1.6)$$

La profondeur de pénétration de l'onde thermique qui représente la profondeur à laquelle l'amplitude du signal est amortie d'un facteur e, s'écrit :

$$\delta = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} = \sqrt{\frac{a\tau}{\pi}} \quad (1.7)$$

Avec comme pulsation de l'onde thermique déterminée par sa période τ :

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} \quad (1.8)$$

La solution de l'équation prend donc la forme :

$$T(z, t) = T_{\text{surface}} + dT_{\text{surface}} \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \cdot \cos(\omega(t - t_{Tmax}) - \frac{z}{\delta}) \quad (1.9)$$

En analysant l'équation 1.9, on peut faire quelques constatations :

- à toutes profondeurs, la température suit une loi sinusoïdale ;
- l'amplitude des oscillations de température en surface est atténuée avec un facteur $e^{-\frac{z}{\delta}}$ diminuant de manière exponentielle avec la profondeur. Ce facteur dépend également de la profondeur de pénétration déterminée par la période des oscillations et la diffusivité du sol. Il ne vaut plus que $\frac{1}{3}$ à la profondeur de pénétration et l'amplitude de l'onde est réduite d'un facteur 10 à 2,3 δ ;
- l'onde est retardée et déphasée par rapport à la surface d'une valeur : $\frac{z}{\delta}$;
- à toutes les profondeurs, la période est la même : $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$;
- toutes les profondeurs présentent la même valeur de température moyenne T_{surface} .

L'évolution de la profondeur de pénétration et de l'amortissement en fonction de la période de l'onde thermique est reprise dans le Tableau 1.2 pour un sol ayant comme caractéristiques thermiques :

- La masse volumique $\rho = 1800 \text{ kg.m}^{-3}$;
- La capacité thermique massique isobare $c = 1000 \text{ J.(kg.K}^{-1})$;
- La conductivité thermique $\lambda = 0,58 \text{ W.(m.K)}^{-1}$;
- La diffusivité thermique $a = \frac{\lambda}{\rho c} = 3,222.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

Période de l'onde thermique	Profondeur de pénétration	Profondeur pour une réduction d'un facteur 10 des oscillations de l'onde thermique
1 heure	0,02 m	0,05 m
1 jour	0,10 m	0,23 m
1 mois	0,52 m	1,20 m
1 année	1,80 m	4,15 m

TABLE 1.2 – Influence de la période d'une onde thermique sur sa profondeur de pénétration et sur son amortissement

Les variations horaires de températures étant déjà 10 fois moins ressenties à moins de 6 cm de profondeur, elles ne seront pas ressenties dans un puits canadien. Par contre, afin de minimiser l'incidence des variations annuelles, le puits devra être enterré plus profondément. Une profondeur d'enfouissement du puits égale à la profondeur de pénétration calculée sur base d'une période d'un an est un bon compromis, car le coût du terrassement est limité et l'oscillation de l'onde thermique réduite d'un facteur 2,72.

La profondeur de pénétration permet de définir la profondeur jusqu'à laquelle la sollicitation périodique est perceptible. L'évolution de la température pour un climat tempéré sur une période de un an à différentes profondeurs est illustrée à la Figure 1.5. Au-delà d'une certaine profondeur, souvent prise comme référence égale à $z = 4\delta$, l'amplitude peut être considérée comme étant quasiment nulle ($e^{-\frac{z}{\delta}} = e^{-4} = 0,018$). Ceci signifie que la température à cette profondeur $z = 4\delta$ est égale à la température moyenne $T_{surface}$.

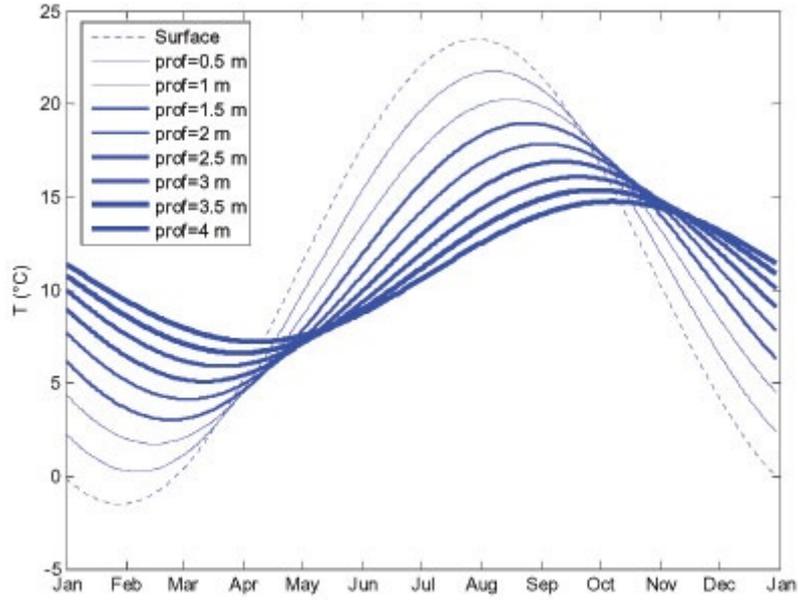


FIGURE 1.5 – Illustration des températures du sol à différentes profondeurs pour un climat tempéré [10]

1.2.3 Transferts thermiques au niveau du puits

Il y a essentiellement deux modes de transfert de chaleur à prendre en considération au niveau du puits. Premièrement, la conductibilité pure à travers le matériau qui compose le puits et dont on peut résoudre le champ de température à l'aide de l'équation 1.1 en utilisant les propriétés physiques du puits. Deuxièmement, les échanges principalement convectifs à l'intérieur du puits.

Transferts convectifs au sein du puits

Les transferts de chaleur entre les parois du puits et l'air qui y circule peuvent être qualifiés de convection forcée caractérisée suivant trois nombres adimensionnels que sont Nusselt, Prandtl et Reynolds.

$$Re = \frac{v \cdot d_H}{\nu} \quad (1.10)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \quad (1.11)$$

$$Nu = \frac{h \cdot d_H}{\lambda} \quad (1.12)$$

Les relations qui lient ces trois nombres adimensionnels pour un écoulement turbulent à l'intérieur d'un tube et qui permettent, sur base des équations 1.10, 1.11 et 1.12, de déterminer le coefficient de transfert par convection forcée (h) sont des relations empiriques dépendantes de l'écoulement et de la géométrie. Pour l'installation étudiée dans le cadre de cette thèse, la relation empirique prise en compte est la corrélation de Gnielinski 6.3 détaillée dans le chapitre 6.

Chapitre 2

Qualité de l'air et microbiologie

La ventilation volontaire d'un bâtiment est primordiale afin d'assurer une qualité de l'air suffisante, principalement lorsqu'un soin particulier a été apporté à l'étanchéité du bâtiment. En outre, les pertes énergétiques par ventilation représentent une part non négligeable de la consommation en énergie et la ventilation doit donc être étudiée avec le plus grand soin.

Afin d'assurer cette ventilation et permettre le préchauffage de l'air ou son refroidissement, un puits canadien peut être installé. Il est donc légitime de se demander si le fait de faire passer l'air nécessaire à cette ventilation à travers un tuyau enterré ne risque pas d'augmenter la présence de certains polluants ou d'en faire apparaître d'autres qui se seraient développés au sein du puits.

Ce chapitre présente donc, parallèlement aux aspects ventilations liés au puits canadien, les différents types de polluants qui peuvent être présents à l'intérieur d'un bâtiment. Afin de pouvoir évaluer les risques sanitaires liés au puits canadien, une attention particulière est portée aux particules biologiques présentes dans l'air. L'étude de ces particules, notamment l'analyse des échantillons et des résultats obtenus, nécessite des connaissances en taxonomie (classification des êtres vivants), microbiologie et aérobiologie également reprises dans ce chapitre. Enfin, pour pouvoir comparer les résultats obtenus à des normes, les aspects législatifs liés à la qualité de l'air sont présentés à la fin ce chapitre.

2.1 Types de polluants rencontrés

L'humidité

L'humidité en tant que telle n'est pas un polluant, mais sa présence peut provoquer une dégradation de la qualité de l'air, notamment au niveau biologique. En période estivale, les parois du puits canadien sont à une température plus faible que l'air extérieur. Lors du passage de l'air dans le puits, sa température va chuter et son humidité relative va augmenter jusqu'à provoquer l'apparition de condensats sur les parois du puits. Afin d'éviter

tout problème dû à ce phénomène, il faut prévoir des regards d'entrée d'air visitables, des dispositifs d'évacuation de ces condensats et une pente minimum de 2 %.

Le radon [11]

Le radon est un gaz radioactif formé par l'Uranium 238 présent naturellement dans le sol et les roches. Une matière radioactive est constituée d'atomes instables qui se divisent en d'autres atomes pour atteindre un état stable. Lors de cette division, de l'énergie est libérée sous forme de rayonnements. On les appelle rayonnements "ionisants" parce qu'ils ont la force de faire changer d'état d'autres atomes, généralement en influençant leurs électrons.

La concentration de radon dans l'air se mesure en $Bq.m^{-3}$: Becquerel par mètre cube. Le Becquerel est une unité de mesure de la radioactivité qui correspond à une désintégration par seconde du noyau atomique.

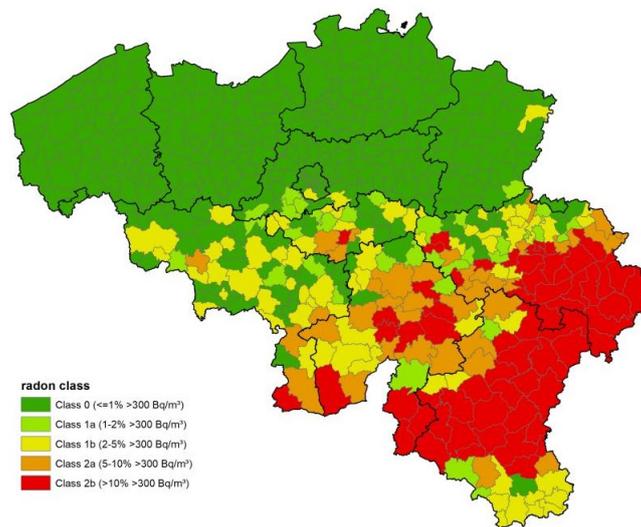


FIGURE 2.1 – Belgique - Classification en régions radon [11]

En Belgique, la concentration moyenne en radon dans les habitations est de $46 Bq.m^{-3}$. Toutefois, la concentration en radon peut varier fortement d'une région à l'autre comme illustré sur la Figure 2.1 et même d'un bâtiment à l'autre. Depuis septembre 2009, l'Organisation Mondiale de la Santé recommande le respect d'une valeur maximum de $100 Bq.m^{-3}$ pour réduire les expositions humaines et l'Union Européenne définit un seuil de $300 Bq.m^{-3}$ au-delà duquel des travaux doivent être envisagés.

Pour des raisons liées à la nature du sous-sol, le sud du pays est plus touché par le radon que le nord. Grâce aux études géologiques et aux campagnes de mesures qui ont été réalisées, des zones plus exposées au radon ont pu être identifiées.

Le cancer du poumon fait environ 6000 victimes chaque année en Belgique [44]. Dans 7 % des cas, le radon en est la cause. C'est la substance cancérigène la plus dangereuse dans les habitations. En Belgique, le radon est responsable d'environ 40% de l'irradiation subie par la population. Le radon pénètre dans les poumons avec l'air et, arrivé dans les poumons, il irradie les tissus, ce qui peut les endommager et provoquer un cancer.

Les agents chimiques

Il existe différents types d'agents chimiques : *COV* - Composés Organiques Volatils, *HAP* - Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, *CO₂* - dioxyde de carbone, *CO* - monoxyde de carbone,... ayant chacun des impacts spécifiques sur la santé. Par exemple, par inhalation, ils peuvent affecter les voies aériennes supérieures et les poumons, le système nerveux ainsi que d'autres organes tels que les reins, le foie.

Le *CO₂* naturellement présent dans l'air extérieur peut être considéré comme un polluant si sa concentration est trop élevée, sa concentration est un bon indicateur de la présence humaine et de la qualité de l'air, il est donc généralement utilisé pour gérer la ventilation et permet de légiférer en matière de qualité de l'air comme par exemple avec la loi du 6 novembre 2022 relative à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les lieux fermés accessibles au public [45]. Les effets de la concentration de *CO₂* sur la santé humaine sont les suivants :

- De 250 à 400 ppm : concentration normale dans l'air ambiant extérieur.
- De 400 à 1000 ppm : concentration courante dans les espaces intérieurs fermés avec un bon renouvellement d'air.
- De 1000 à 2000 ppm : sensation de fatigue et concentration réduite.
- De 2000 à 5000 ppm : maux de tête, somnolence, difficultés de concentration, pertes d'attention, augmentation de la fréquence cardiaque et légères nausées.
- 5000 ppm : valeur considérée comme un maximum à ne pas dépasser plus de 8 heures par jour.
- Au-delà de 40 000 ppm : l'exposition à ces concentrations élevées provoque un grave manque d'oxygène qui peut entraîner des lésions cérébrales permanentes, le coma, voire la mort.

Il est donc impératif d'éloigner la prise d'air de toutes sources de pollutions potentielles (axes routiers, décharges, rejets du chauffage des bâtiments, etc.) et aussi de bien choisir le matériau utilisé pour la conception du puits. À titre d'exemple, il est majoritairement déconseillé d'utiliser du PVC, car il pourrait émettre des phtalates et du chlore.

Les agents biologiques

Les polluants d'origine biologique peuvent se diviser en plusieurs catégories : les pollens, les moisissures avec leurs mycotoxines et les bactéries avec leurs toxines. Ils sont responsables de trois agressions sur la santé :

- l'effet infectieux : maladies engendrées par l'intrusion de moisissures ou de bactéries dans l'organisme ;

- l'effet toxique : effets néfastes pour l'organisme causés par les propriétés physico-chimiques des moisissures et des bactéries ;
- l'effet allergisant : il peut être provoqué par les moisissures, les bactéries et les pollens.

2.2 Intérêt de la ventilation

C'est durant les années septante et l'apparition de la première crise pétrolière que le concept d'économie d'énergie dans le bâtiment est apparu. Très rapidement, l'isolation est devenue courante lors de la construction de bâtiments ce qui a eu pour effet d'augmenter l'étanchéité à l'air de ceux-ci, faisant alors apparaître divers problèmes principalement liés à l'humidité. Il a donc fallu se pencher sur la ventilation afin d'éviter ces inconvénients :

- une maison bien isolée est aussi souvent étanche à l'air. Elle conserve donc l'humidité produite par les êtres vivants et certains appareils, ce qui peut conduire à l'apparition de moisissures ou au développement de diverses bactéries ;
- l'être humain a besoin d'oxygène pour vivre et il est donc nécessaire de renouveler régulièrement l'air de la maison ;
- d'autres sources de pollution, comme le radon, un gaz radioactif naturel, ou les composés organiques volatils (COV) présents dans les peintures, les colles, etc., nécessitent également un renouvellement d'air régulier.

2.3 Taux de renouvellement d'air

Le taux de ventilation d'un bâtiment dépend principalement de l'activité qui s'y déroule, de son occupation et est donné en volume par heure. Le volume pris en compte est le volume protégé délimité par l'enveloppe du bâtiment. Cette ventilation permet l'élimination de l'air vicié, de l'humidité et des différents polluants présents dans l'air.

Ce taux de ventilation peut être assuré de deux manières. D'une part par la ventilation dite volontaire du bâtiment, c'est-à-dire celle qui est contrôlée et prévue dès la conception, et d'autre part par les infiltrations et exfiltrations de l'air dues au manque d'étanchéité du bâtiment.

Dans les anciens bâtiments, le taux de ventilation peut être estimé à un volume à l'heure et, de manière générale, l'étanchéité à l'air y est si faible qu'il n'est souvent pas nécessaire de prévoir une ventilation volontaire. L'isolation toujours croissante des bâtiments et le soin particulier apporté à l'étanchéité de l'enveloppe diminuent fortement la ventilation parasite et il convient dès lors d'assurer une ventilation volontaire du bâtiment.

2.4 Techniques de ventilation

Quelle que soit la technique choisie, le principe reste identique. L'air frais sera amené via des ouvertures réglables ou mécaniques dans les pièces sèches pour être ensuite transféré via des ouvertures de transfert dans les locaux de service tandis que l'air vicié sera finalement extrait également via des ouvertures réglables ou mécaniques dans les pièces humides.

Ventilation naturelle – système A

Aucun appareillage mécanique n'est nécessaire pour le système A. La ventilation est basée sur les mouvements d'air encouragés par la configuration des lieux. Les déplacements d'air sont dus à des différences de température entre les pièces.

Ce système a l'avantage de ne pas consommer d'énergie pour assurer la ventilation, mais est lié aux conditions climatiques et n'est donc que très difficilement réglable. De plus, il peut créer de l'inconfort pour les occupants notamment d'un point de vue acoustique.

Ventilation mécanique contrôlée – système B

L'alimentation en air frais au sein du bâtiment est assurée de manière mécanique par un ou plusieurs groupes de pulsion et l'extraction de l'air vicié se fait naturellement via les ouvertures d'extraction. Le bâtiment est donc en surpression ce qui peut provoquer de l'inconfort pour les occupants. Néanmoins, cette technique permet une filtration de l'air entrant.

Ventilation mécanique contrôlée – système C

L'alimentation en air frais se fait naturellement via des ouvertures d'alimentation et c'est l'extraction qui est mécanique via un ou plusieurs groupes d'extraction. L'extraction est donc maîtrisée ce qui permet d'éviter les courants d'air dans les pièces humides, mais le bâtiment est en légère dépression ce qui peut favoriser les infiltrations d'air parasites venant de l'extérieur.

Bien que la norme impose un débit de pulsion et d'extraction en permanence, le système C peut être adapté afin de ne fonctionner que lorsque la qualité de l'air diminue ce qui permet d'assurer un air sain tout en limitant la consommation énergétique du ou des groupes d'extraction.

Ventilation mécanique contrôlée – système D

L'alimentation et l'extraction de l'air se font mécaniquement et peuvent donc être contrôlées. Généralement, c'est une unité de pulsion et d'extraction centralisée qui assure les débits de ventilation et qui, pour des raisons évidentes d'économie d'énergie, peut être associée à un récupérateur de chaleur. De cette façon, en fonctionnement hivernal, l'air extrait ayant une température supérieure à l'air entrant va réchauffer ce dernier avant sa pulsion dans le bâtiment. Afin d'éviter une situation similaire en fonctionnement es-

tival, le récupérateur de chaleur doit être muni d'un by-pass et d'une régulation appropriée.

Grâce au récupérateur de chaleur, les pertes par ventilation peuvent être fortement réduites ce qui limite l'intérêt du puits canadien en période hivernale.

2.5 Système de classification des êtres vivants

La classification biologique, appelée également taxonomie a pour but de simplifier et d'ordonner l'immense diversité de la vie en unités cohérentes appelées taxons [14]. Depuis l'Antiquité, les critères de classification employés par les humains ont été guidés par ses besoins, ses croyances, mais également l'évolution des technologies notamment la microscopie et la génétique.

Une synthèse des différents systèmes de classification depuis le *Systema Naturae* proposé par Carl von Linné en 1735 jusqu'au système de mégaclassification de Ruggiero et al. [14] est disponible en annexe (cf. Annexe A).

L'identification des êtres vivants est réalisée à l'aide d'un double nom en latin reprenant le genre et l'espèce. Cette nomenclature binomiale fut également proposée par Carl von Linné.

La mégaclassification de Ruggiero et al. présentée à la Figure 2.2 est utilisée depuis 2015 pour la classification et la recherche d'espèces dans la base de données *Catalogue of life (CoL)* [15]. Elle est formée de 2 empires (procaryotes, eucaryotes) et 7 règnes : bactéries, archées, protozoaires, chromistes, fungi, plantes et animaux.

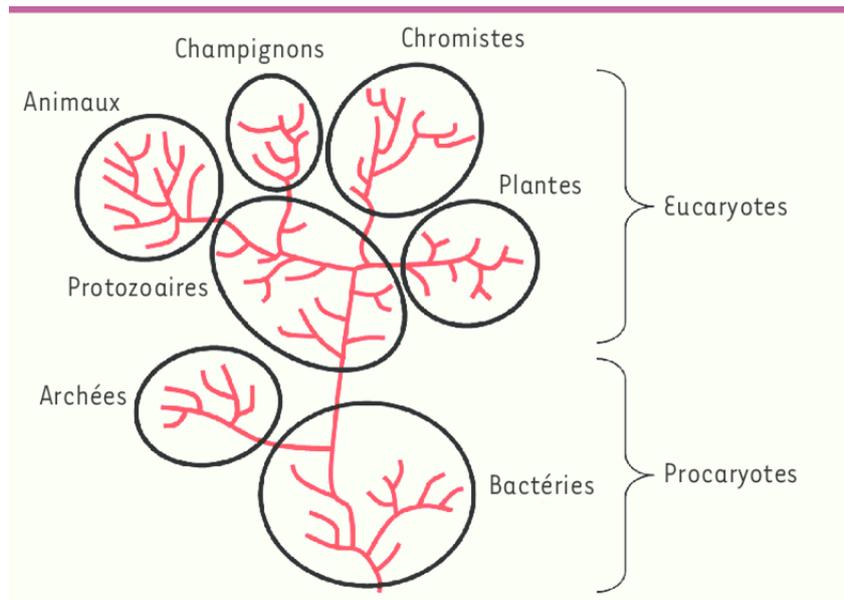


FIGURE 2.2 – L'arbre de la vie [12]. Dessiné d'après les phylogénies proposées par Cavalier-Smith [13] et la mégaclassification de Ruggiero et al. [14]

La Figure 2.3 présente la pyramide des rangs taxonomiques utilisés actuellement. Le monde vivant étant complexe à classer des sous-catégories telles que des sous-embranchements, des sous-classes peuvent s'ajouter à ce système principal.

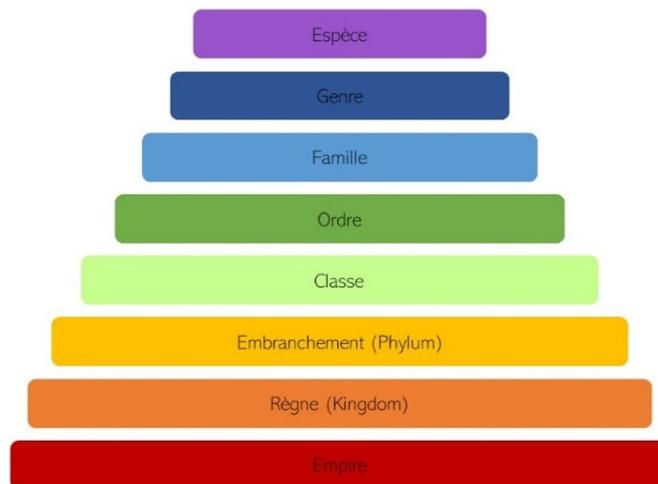


FIGURE 2.3 – Pyramide des rangs taxonomiques. Du plus large : l'empire, au plus précis : l'espèce

2.5.1 Classification phylogénétique des bactéries

Le règne des bactéries (Bacteria), présenté dans la Figure 2.4, regroupe des organismes unicellulaires appartenant à l'empire des procaryotes (Prokaryota) c'est-à-dire des organismes formés d'une seule cellule et qui ne possèdent pas de noyau. Ce règne compte actuellement un peu moins de 10 000 espèces réparties dans 29 embranchements dont 18 ne comportent qu'une seule classe [12], 51 classes et 115 ordres différents. Les 3 embranchements reprenant le plus d'espèces sont les Proteobacteria, les Actinobacteria et les Firmicutes.

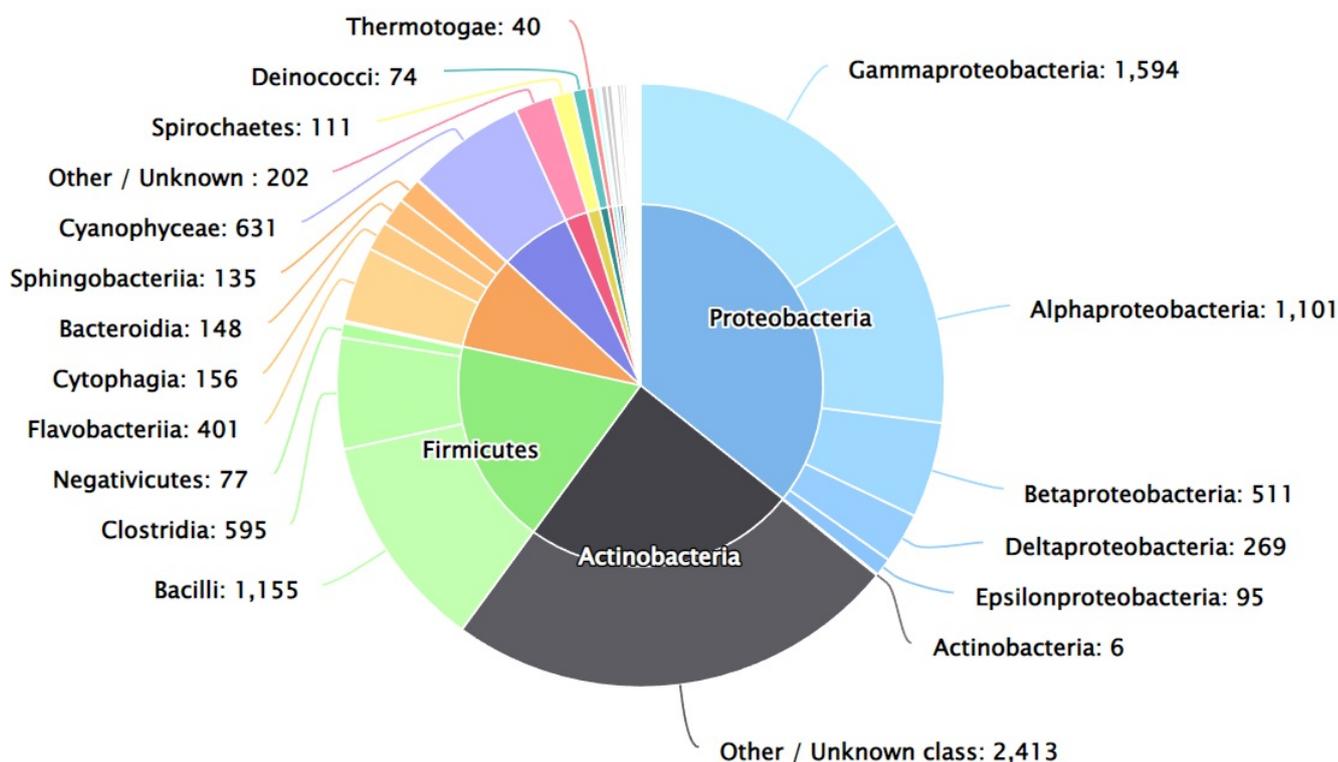


FIGURE 2.4 – Taxonomie des bactéries *Catalogue of life (CoL)* [15]

La Figure 2.5 présente l'arbre phylogénétique des bactéries proposé par Bern et Goldberg en 2005 [16]. Cet arbre est obtenu en utilisant un ensemble de séquences ADN codant pour des protéines hautement conservées chez les bactéries. Appelées séquences représentatives, elles sont utilisées dans une matrice de distances afin de pouvoir évaluer la concordance des séquences et ensuite construire l'arbre phylogénétique. Plus récemment l'utilisation de l'ARN ribosomique 16S permet également d'effectuer ce travail et d'obtenir des arbres phylogénétiques comme le montre la Figure 2.6.

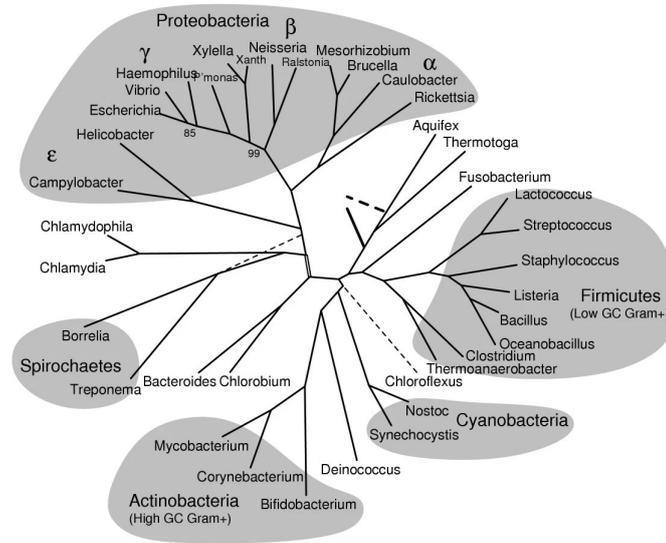


FIGURE 2.5 – Arbre phylogénétique des bactéries proposé par Bern et Goldberg [16]

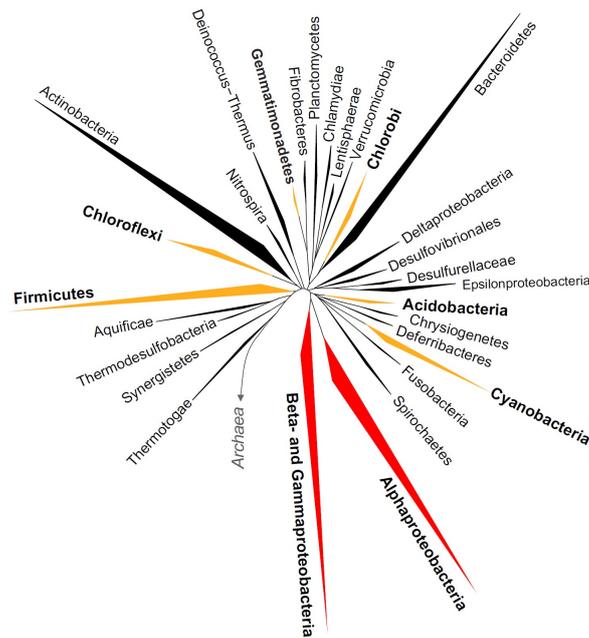


FIGURE 2.6 – Arbre phylogénétique des bactéries sur base de l'ARNr 16S [17]

2.5.2 Classification phylogénétique des fungi

Les fungi, plus communément connus sous le terme champignon, sont des organismes eucaryotes très diversifiés qui comprennent des formes macroscopiques, microscopiques unicellulaires ou pluricellulaires. Environ 146 000 espèces sont décrites à ce jour dont une grande partie appartiennent aux phyla des Ascomycota (92 724 espèces) et des Basidiomycota (50 385 espèces) [46, 47] comme le montre la Figure 2.7.

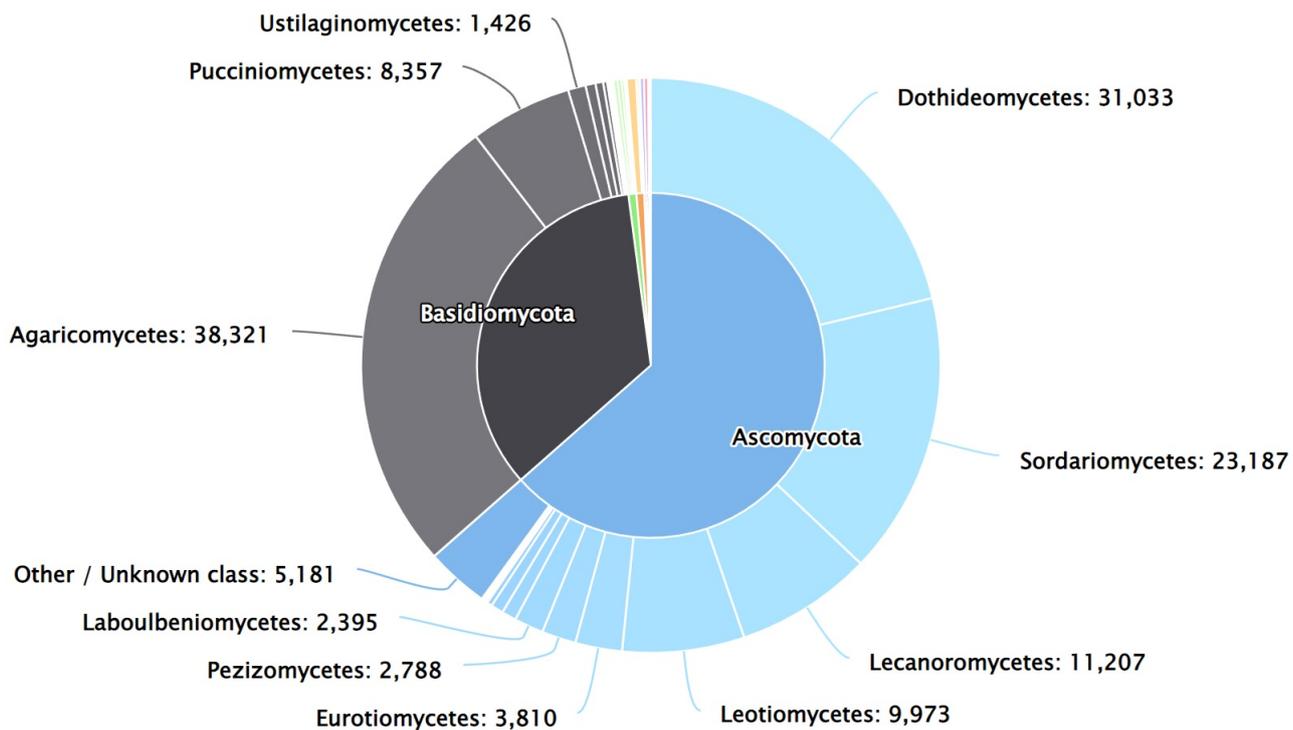


FIGURE 2.7 – Taxonomie des fungi *Catalogue of life (CoL)* [15]

La Figure 2.8 présente l'arbre phylogénétique et les 8 embranchements (phyla) du règne des fungi [18]. Les Basidiomycota et les Ascomycota de par leur lien phylogénétique font partie d'un sous-règne appelé Dikarya.

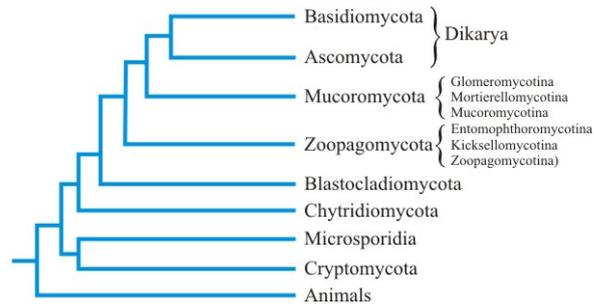


FIGURE 2.8 – Arbre phylogénétique des fungi d’après McCarthy et Fitzpatrick [18]

2.6 L’extraction d’ADN, l’amplification par PCR et le séquençage haut-débit illumina, des techniques employées pour l’analyse métagénomique

Lors d’une analyse métagénomique, les techniques d’extraction d’ADN, d’amplification par PCR et de séquençage sont employées. Ces 3 techniques sont détaillées ci-dessous afin de faciliter la compréhension des informations fournies sur la métagénomique au point suivant.

2.6.1 L’extraction ADN

Cette étape permet de récupérer l’ADN des micro-organismes présents dans l’échantillon en isolant l’ADN des cellules. Il faut respecter plusieurs étapes :

- Lyser les cellules
- Éliminer les protéines
- Concentrer l’ADN

2.6.2 L’amplification par PCR

La PCR ou Polymérase Chain Reaction dont le principe est illustré à la Figure 2.9 permet d’amplifier plusieurs millions de fois in vitro une séquence spécifique d’ADN à partir d’un échantillon contenant un grand nombre de séquences d’ADN différentes. Elle exploite le processus de réplication et fait appel pour cela à l’ADN polymérase, une enzyme capable de synthétiser le brin complémentaire d’un ADN servant de matrice. Pour initier le processus, des amorces s’hybrident de part et d’autre de la séquence à amplifier. Cette configuration permet à l’ADN polymérase de répliquer les 2 monobrins et ainsi aboutir à la synthèse de nouveaux ADN doubles brins.

L'amplification de fragments d'ADN *in vitro* : la PCR

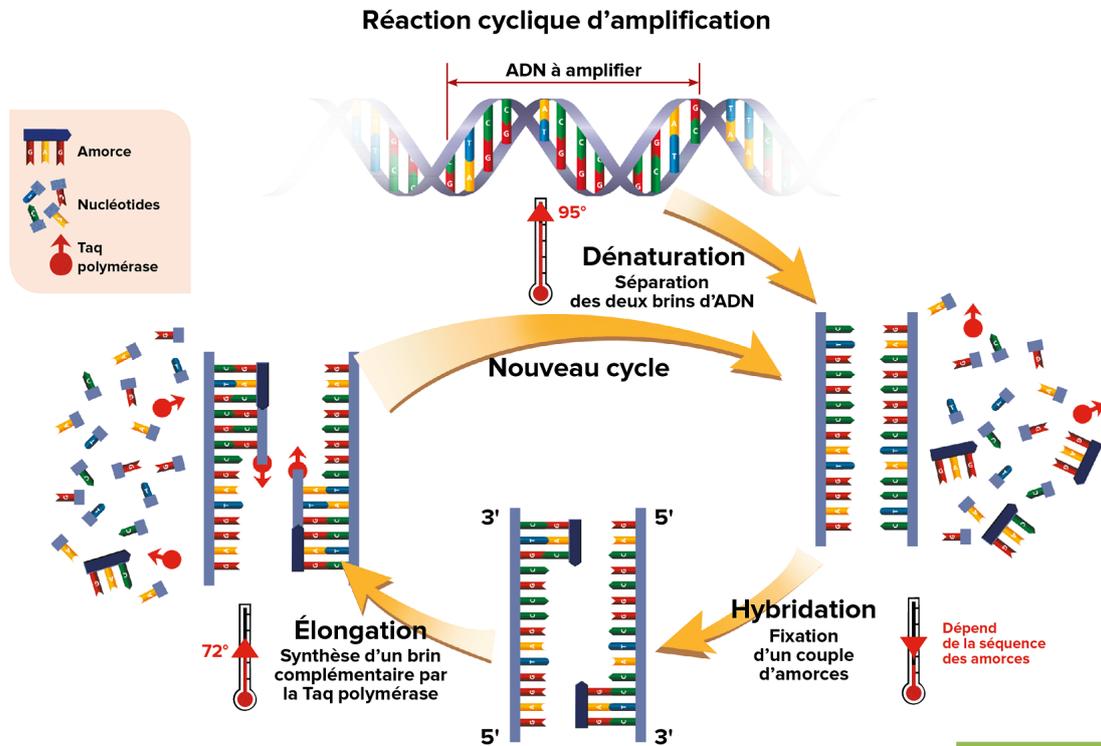


FIGURE 2.9 – Principe de la PCR [19]

2.6.3 Séquençage haut débit Illumina

Avant le séquençage, les produits obtenus après l'amplification par PCR subissent 2 traitements : l'adjonction d'étiquettes appelées tag et un multiplexage.

L'ajout de tag de reconnaissance sur les produits PCR permet de reconnaître, à la fin du séquençage, la provenance de chaque séquence. Un tag différent par échantillon est donc employé.

Le multiplexage est l'étape durant laquelle les produits PCR tagués provenant de l'ensemble des échantillons collectés sont mélangés. En effet, les techniques de séquençage utilisées actuellement permettent de séquencer en parallèle plusieurs millions de molécules d'ADN provenant de plusieurs centaines d'échantillons.

Le séquençage haut-débit Illumina utilise l'amplification clonale et le séquençage de l'ADN par synthèse chimique (SBS).

Ce procédé identifie les bases ADN en même temps qu'il les incorpore à la chaîne d'acide nucléique. Les séquences amplifiées et préparées provenant des échantillons sont fixées sur une surface spécifique « flowcell ». Par la suite, chaque base incorporée au niveau de cette surface émet un signal fluorescent spécifique enregistré par une caméra CCD. Ces signaux sont utilisés pour réaliser le séquençage et déterminer l'ordre des bases composant les séquences amplifiées.

2.7 Analyses métagénomiques

La métagénomique est une technique de séquençage et d'analyse de l'ADN contenu dans un milieu. Alors que la génomique séquence et analyse en détail le génome d'un être vivant particulier, la métagénomique permet d'étudier le microbiome, c'est-à-dire l'ensemble des micro-organismes vivants dans un environnement spécifique. Une analyse métagénomique donne donc accès à l'ensemble des espèces présentes dans un milieu, mais également leurs abondances et leurs diversités.

Cette technique est possible grâce à l'évolution majeure des technologies de séquençage haut débit et à la bioinformatique. Elle donne également des résultats sur la composition en micro-organismes plus proche de la réalité que les techniques de culture sur gélose. En effet, ces techniques de culture ont comme biais majeur de ne faire apparaître que les espèces cultivables et seul 1 % des bactéries de la plupart des environnements peut être cultivé [48].

L'analyse métagénomique peut être réalisée suivant 2 méthodes de séquençage : la métagénomique globale ou la métagénomique ciblée sur amplicon. Ces 2 méthodes sont détaillées en annexe (cf. Annexes B.1 et B.2).

Après plusieurs étapes bioinformatiques de filtrage et nettoyage des reads obtenus après séquençage, il faut assigner à chaque séquence le nom du micro-organisme. Différentes stratégies peuvent être employées pour réaliser l'assignation taxonomique. Celles-ci sont également détaillées en annexe (cf. Annexe B.3).

Une fois l'assignation taxonomique réalisée, le comptage du nombre d'espèces présentes, mais également leur abondance dans chaque échantillon, est réalisé afin de construire la table des OTU. Les méthodes utilisées pour créer ces tables sont présentées en annexe (cf. Annexe B.4).

2.7.1 Gènes ciblés en metabarcoding

Les différentes séquences qui se sont imposées comme cible préférentielle, pour le metabarcoding au fil du temps, se trouvent généralement dans l'opéron ribosomique.

Le Tableau 2.1, reprend les différentes séquences cibles utilisées en fonction du type d'être vivant ou de virus.

Procaryotes	Bactérie	ARNr 16S CPN60 ITS RecA gene
Eucaryotes	Fungi	ARNr 18S ITS
	Protozoaires	ARNr 18S ITS
Virus	bacteriophage	Gp23
	picornavirus	RdRp

TABLE 2.1 – Séquences cibles utilisées en fonction des êtres vivants ou virus

2.7.2 ARNr 16S pour les bactéries

Les ribosomes sont des organites présents dans les cellules procaryotes et eucaryotes. Ils sont formés de 2 sous-unités composées chacune de protéines et d'ARN ribosomiques notés ARNr. Cet organite a pour fonction de synthétiser les protéines en décodant les informations de l'ARNm.

Chez les bactéries, la petite sous-unité des ribosomes est formée d'une séquence d'ARNr spécifique aux bactéries appelée ARNr 16S. Cet ARN non codant présenté dans la Figure 2.10 contient des régions conservées et des régions sans rôle fonctionnel qui ont varié au cours de l'évolution. Ces régions variables sont donc différentes d'un taxon à l'autre [49].

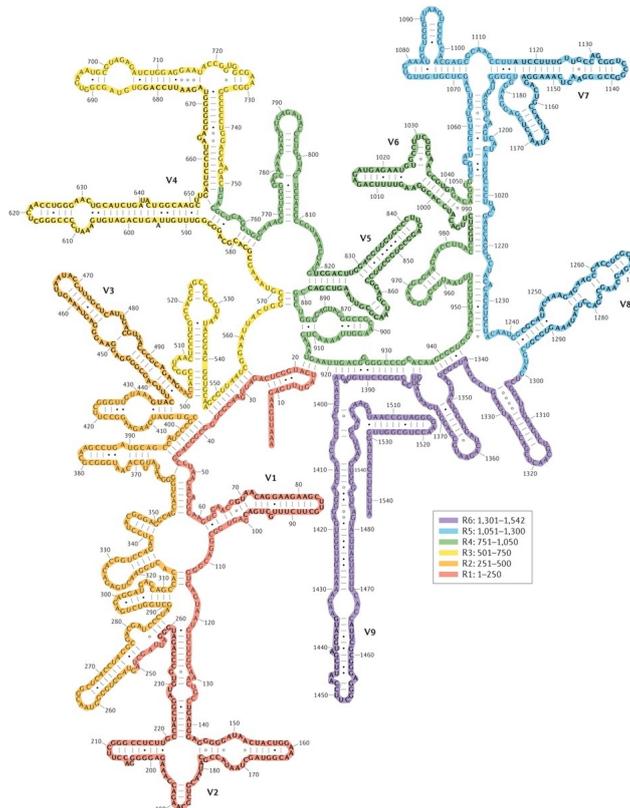


FIGURE 2.10 – ARNr 16S de la petite sous-unité des ribosomes bactériens [20]

Les régions conservées sont utilisées pour construire les amorces nécessaires à la phase d’amplification par PCR. Les régions variables sont utilisées lors de la phase d’assignation taxonomique pour discriminer les différents OTU.

2.7.3 ITS pour les fungi

Au niveau de l’ADN codant pour l’ARNr, les gènes codant les différents ARNr sont séparés par des séquences ADN « entre-espaces ». Les espaceurs internes transcrits (ITS) sont des régions « entre espaces » qui varient au fil de l’évolution et permettent l’identification des fungi jusqu’à l’espèce [50].

2.8 Aérobiologie

L’aérobiologie étudie les particules biologiques en suspension dans l’air. C’est un domaine de recherche pluridisciplinaire qui fait appel à la biologie, aux sciences médicales et à la météorologie. L’aérobiologie est également utile dans de nombreux domaines tels que la microbiologie, la lutte contre les armes biologiques, la compréhension du bioclimat ou notamment dans les études de qualité de l’air telle que celle-ci.

2.8.1 Les particules biologiques primaires de l'air

Deux catégories de particules biologiques sont présentes dans l'air : Les particules primaires et secondaires.

Les particules primaires regroupent une grande variété d'éléments tels que des fragments de plantes ou d'animaux, des cellules, des morceaux de biofilms, des spores, des virus, etc. Leur taille varie de quelques nanomètres à plusieurs centaines de microns.

Les particules secondaires sont composées d'un mélange de protéines, de lipides ou encore des sucres [51].

Les particules présentes dans l'air, qu'elles soient biologiques ou non, sont également classées selon leur diamètre :

- PM10 : particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à $10 \mu m$;
- PM2,5 : particules fines dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à $2,5 \mu m$;
- PM1,0 : particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à $1,0 \mu m$;
- PM0,1 : particules ultrafines ou nanoparticules dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à $0,1 \mu m$.

Le Tableau 2.2, adapté de [26], reprend la taille et l'estimation des émissions globales des principales particules biologiques primaires étudiées. Les estimations réalisées par [52] ont toutes un écart type, car ils utilisent une moyenne géométrique et une distribution log-normale dans les estimations.

Type de particules primaires	Émission globale $10^{12} \text{ gramme.an}^{-1}$	Diamètre des particules μm	Références
Bactérie	0,74 (0,4 - 1,8)	1 (PM1)	Burrows et al (2009b) [53]
	0,7	1 (PM1)	Hoose et al. (2010) [54]
	28,1	2 (PM2) écart type : 1,37	Jacobson et Streets (2009) [52]
Spore fongique	8	4 (PM4)	Sésartic et Dallafior (2011) [55]
	31	5 (PM5)	Hoose et al. (2010) [54]
	50	5 (PM5)	Elbert et al (2007) [46]
	186	3 (PM3) écart type : 1,37	Jacobson et Streets (2009) [52]
Pollen	47	30 (PM30)	Hoose et al. (2010) [54]
	84	30 (PM30) écart type : 1,37	Jacobson et Streets (2009) [52]

TABLE 2.2 – Taille et estimation des émissions globales de différentes particules biologiques. [26]

Les mécanismes d'émissions des particules biologiques primaires peuvent être passifs ou actifs. Les mécanismes passifs font intervenir une force extérieure telle que par exemple la pluie ou le vent pour rompre l'adhésion entre une particule et une surface. Les mécanismes actifs sont produits par la source d'émission elle-même. C'est le cas notamment des éternuements ou des mécanismes de dispersion des spores de certains fungi.

Les bactéries

Les bactéries sont présentes dans quasi tous les biotopes terrestres. Elles peuvent s'associer durablement en symbiose mutualiste avec de nombreuses espèces ou encore être opportunistes et pathogènes.

La concentration *bactéries.m⁻³* et la diversité en bactéries sont les 2 indicateurs qui permettent de comparer des environnements. Ces indicateurs, variables en fonction des écosystèmes, dépendent de facteurs météorologiques, locaux et saisonniers [53].

À l'exception d'environnements particuliers tels que les environnements côtiers, les concentrations en bactéries dans l'air se situent généralement autour de 10^4 *bactéries.m⁻³* [56, 57].

Généralement, la concentration *bactéries.m⁻³* est plus élevée en milieu urbain, car les activités humaines favorisent l'émission de bactéries dans l'air. Cependant, la diversité bactérienne est plus importante dans les milieux ruraux. Des études réalisées dans différents milieux urbains montrent qu'il n'existe pas une composition bactérienne type caractérisant l'air de ces environnements [58, 59, 26, 60].

Dans un environnement urbain, la concentration bactérienne dans l'air n'est pas homogène. En effet, il existe des zones de haute émission bactérienne appelées points chauds comme les égouts, les stations d'épuration ou encore les zones de compostage. Parallèlement, les zones vertes, plans d'eau, rivières sont des zones de basse émission bactérienne. Les variations saisonnières de la concentration bactérienne dans l'air sont plus importantes dans les zones de basse émission que dans les zones de haute émission [61, 62].

Les courants aériens permettent le déplacement des bactéries dans l'atmosphère. Celles-ci peuvent alors se retrouver en hautes altitudes et dans les nuages. L'échantillonnage de l'atmosphère à 12 km d'altitude a mis en évidence la présence de plusieurs genres dont *Pseudomonas*, *Escherichia* ou encore *Bacteroides* [63]. Malgré leur caractère temporaire, les nuages sont de grands réservoirs bactériens. Plusieurs études réalisées, notamment au Puy-de-Dôme, montrent que des bactéries peuvent se développer dans les nuages [64, 65].

Les fungi

Le cycle de vie des fungi est composé de 3 phases : la germination, la croissance durant laquelle la partie végétative (mycélium) se développe et la sporulation appelée également phase reproductive [47, 62]. Durant cette dernière phase, les spores peuvent être produites

de manière sexuée ou asexuée. Lors de la reproduction sexuée, les spores sont produites par des structures anatomiques spécifiques à chaque phyla. La Figure 2.11 présente le cycle de vie des Ascomycètes. Ceux-ci produisent des ascospores dans des structures appelées asques. Lors de la reproduction asexuée, les spores formées par les fungi sont appelées des conidiospores [46, 62].

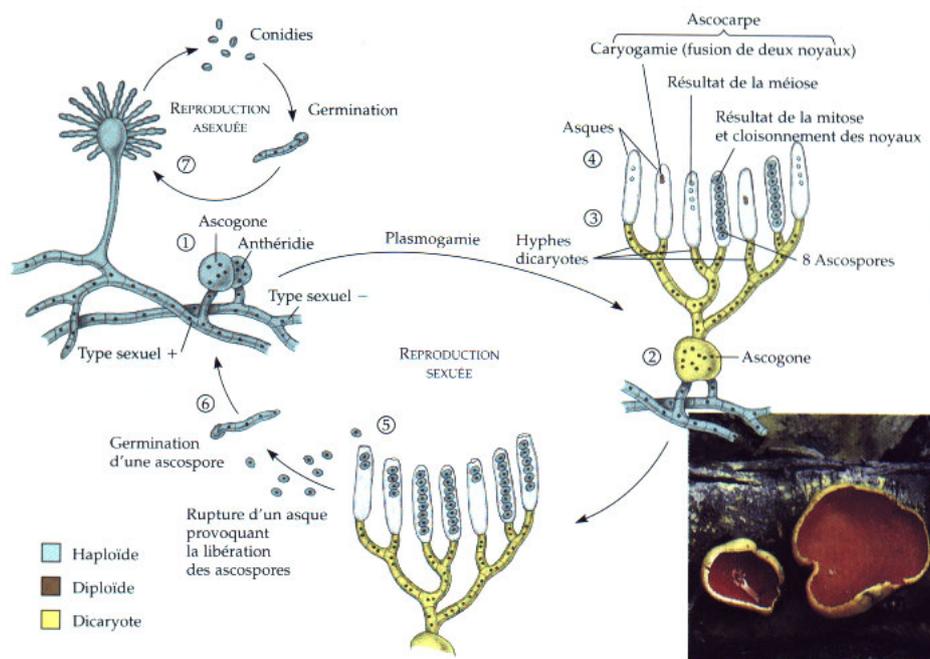


FIGURE 2.11 – Cycle de vie des Ascomycètes. (1) Des mycéliums de types sexuels opposés produisent un gamétocyste appelé ascogone (2) contenant des noyaux des 2 parents. (3) L'ascogone produit un ensemble d'hyphes et d'asques appelés ascocarpe. (4) Les ascospores sont produites dans les asques. (5) Dissémination active des ascospores. (6) Germination des spores et croissance du mycélium. (7) Reproduction asexuée du mycélium par la production de conidies. ©N.A. Campbell, BIOLOGY, 3th ed.

Les spores, dont le diamètre est compris entre $2 \mu m$ et $56 \mu m$, sont des particules biologiques communes dans l'air. Produites en grande quantité, résistantes à la dessiccation et à de nombreux stress environnementaux (voir Tableau 2.3), elles permettent la colonisation de nombreuses niches écologiques [51, 66]. L'émission globale de spores est estimée à $50.10^{12} \text{ gramme.an}^{-1}$ [46].

Condition Environnementale	Seuil de résistance	Durée de la viabilité	Exemples d'espèces concernées
Chaleur très élevée	90 °C (feux de forêt)	Quelques mois	<i>Ascospores de Byssochlamys fulva, Neurospora sp</i>
Froid intense	Congélation	Un hiver	Plusieurs espèces d'Amérique du Nord
Sécheresse de l'air ambiant	±0 % d'humidité relative	Semaines à années	La majorité des genres de l'environnement intérieur : <i>Eurotium, Aspergillus, Penicillium</i>
Présence d'humidité dans le milieu sur lequel se déposent les spores	De 0 à 50 % d'humidité	Jusqu'à des années	<i>Eurotium sp</i>
	Plus de 50 % d'humidité	Germination des spores. Dans le cas contraire, elles pourrissent	Toutes les espèces

TABLE 2.3 – Seuils de résistances des spores de fungi [27, 28, 29, 30]

La concentration $Spores.m^{-3}$ et le rapport *Basidiomycètes/Ascomycètes* sont les 2 indicateurs qui permettent de comparer des environnements. Ces indicateurs, variables en fonction des écosystèmes, dépendent de facteurs météorologiques, locaux et saisonniers [51].

En Europe, les genres *Cladosporium*, *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus* sont majoritairement présents dans l'air [67, 46, 68]. Chez un grand nombre de fungi, on observe une saisonnalité dans l'émission des spores. Les concentrations sont les plus élevées dans l'air de mai à octobre. Les niveaux les plus faibles s'observent entre janvier et mars [69, 70, 71, 72, 73, 74]. Cependant, pour certains fungi, aucune saisonnalité n'est observée. C'est le cas des genres *Penicillium* et *Aspergillus* présents tout au long de l'année [72, 73].

La concentration moyenne de spores observable dans l'air est d'environ $10^4 spores.m^{-3}$. Ces concentrations peuvent atteindre $10^9 spores.m^{-3}$ au niveau de fermes ou de stations de compostage alors qu'elles n'atteignent que $10^3 spores.m^{-3}$ en milieu alpin [51].

Plusieurs études expliquent les variations spatiales des communautés de spores dans l'air par le fait que certains fungi ont une dispersion limitée dans l'espace [75, 76, 77] alors que d'autres ont une dispersion à longue distance [78, 79, 80, 81, 82].

Autres particules biologiques primaires

L'air que nous respirons même en milieu urbain contient des algues microscopiques. Une étude menée à Berlin montre que les algues présentes dans l'air étaient semblables à la composition algale des points d'eau de la ville [83]. Rivières, plans d'eau, toitures sont autant d'endroits qui permettent le développement des algues en milieu urbain.

Vivant dans les environnements extrêmes, les archées sont également présentes dans l'air toute l'année. Les concentrations moyennes d'archée dans l'air sont d'environ 1 à 10 *séquence de matériel génétique*. m^{-3} . Des pics de concentration saisonniers sont aussi observés en automne et hiver [84].

Selon la saison et les environnements, des grains de pollen sont également présents en plus ou moins grande quantité dans l'air. La dispersion du pollen suit une saisonnalité et est maximale lors de la floraison des plantes et lorsque les températures sont élevées, l'humidité basse, le vent fort et les précipitations faibles [62]. La taille des grains de pollen dépend des espèces et est généralement comprise entre 10 μm et 100 μm [51].

Enfin, de nombreuses maladies virales telles que la grippe se propagent via les aérosols. Plusieurs études dont une réalisée en Corée du Sud ont mis en évidence la présence de nombreux virus dans l'air [85]. Parmi ceux-ci certains infectent les humains, mais d'autres sont spécifiques des plantes, des animaux, des bactéries ou encore des fungi.

2.8.2 Risques sanitaires et biologiques

La Figure 2.12 présente le système respiratoire humain. Celui-ci est divisé en 2 parties. La bouche, le nez, le larynx et le pharynx forment la partie supérieure. L'arbre trachéo-bronchique et les alvéoles forment la partie inférieure.

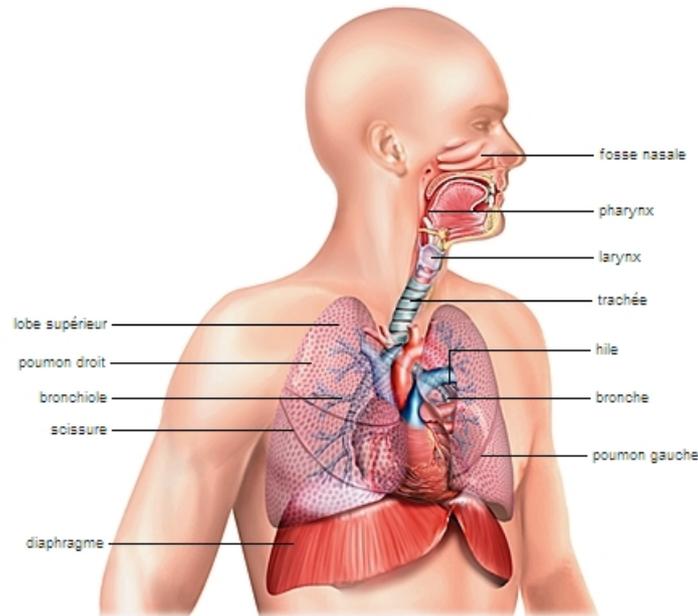


FIGURE 2.12 – Système respiratoire humain. © Dessin Michel Saemann - Archives Larousse

Comme le montre le Tableau 2.4, la sédimentation des particules dans le système respiratoire humain dépend de leur taille. Plus une particule est fine, plus sa sédimentation se fera dans la partie basse des voies respiratoires. La taille des virus, des bactéries et des spores de nombreux fungi leur permet de pénétrer la partie inférieure de notre système respiratoire [31].

Tailles des particules	Lieux de sédimentation dans le système respiratoire
200-100 μm	Partie supérieure
100-10 μm	Partie supérieure. Les PM10 peuvent pénétrer la section thoracique et s'arrêtent au niveau du larynx et des bronchioles.
$\leq 3.5 \mu m$	Considérées comme respirables et peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires.

TABLE 2.4 – Lieux de sédimentation des particules dans le système respiratoire humain en fonction de leur taille. [31]

Le potentiel infectieux d'une particule dépend de facteurs physiques tels que la concentration en particules, la taille de celle-ci, etc., et de facteurs environnementaux. En effet, l'humidité relative, la température ou encore l'exposition aux rayonnements UV affectent

le pouvoir infectieux d'un agent pathogène [31].

Bactéries et virus

L'origine de la plupart des particules biologiques présentes à l'intérieur d'un bâtiment est naturelle. Les bactéries en suspension dans l'air externe se retrouvent régulièrement dans nos intérieurs [86]. La présence d'animaux, de plantes et d'êtres humains à l'intérieur du bâtiment est une autre source importante de particules biologiques notamment de bactéries et virus [87, 88, 89].

Dans les milieux intérieurs, les bactéries qui prédominent naturellement sont *Micrococccaeae* et *Staphylococcus* [90, 91, 92, 93]. Dans les résidences présentant des problèmes d'humidité, certaines bactéries spécifiques, principalement *Streptomyces spp* apparaissent. Ces bactéries produisent plusieurs métabolites toxiques exclusivement détectés dans des matériaux de construction humides [94].

La transmission aérienne de particules biologiques pathogènes peut avoir lieu à partir d'une source environnementale, comme pour la légionellose *Legionella pneumophila* via la création d'aérosol contenant la bactérie à partir d'une source d'eau contaminée présente dans l'environnement.

Dans certaines conditions, elle peut avoir lieu à partir d'une source humaine. C'est le cas notamment de la tuberculose *Mycobacterium tuberculosis* transmise de personne à personne via la production de sécrétions respiratoires de type postillons.

Dans de nombreux cas, la transmission peut emprunter plusieurs modes. Par exemple, la grippe (Influenza) ou la covid-19 (SARS-CoV-2) dont la transmission est à la fois aérienne directe par les postillons et indirecte par la contamination de l'environnement physique et aérien via la création d'aérosols contenant le virus [95].

Fungi

De nombreuses études sur l'exposition aux spores fongiques présentes dans l'air intérieur des habitations montrent un lien causal entre l'exposition aux spores et le développement de l'asthme chez les enfants [96]. Une analyse de près de 30 études [97] a montré que la présence d'humidité à l'intérieur des logements et l'exposition à des moisissures étaient corrélées avec une hausse de 30 à 50 % environ des problèmes respiratoires de type symptômes des voies respiratoires supérieures, toux, respiration sifflante et asthme.

En Europe, peu d'études comparent la concentration en spores contenue dans l'air extérieur et l'air intérieur des bâtiments. Celles-ci montrent une concentration plus élevée dans l'air extérieur que dans l'air intérieur [98, 99, 100, 101]. *Cladosporium* est majoritaire dans l'air extérieur alors que *Penicillium* et *Aspergillus* sont majoritaires dans l'air intérieur [99].

Au niveau de l'air extérieur, plusieurs études réalisées notamment en Europe montrent que les enfants sont la population la plus sensible à l'exposition aux spores notamment

de *Cladosporium*, *Alternaria* et *Aspergillus-Penicillium*. Cette exposition pouvant causer et/ou aggraver l'asthme et provoquer des rhinites allergiques [102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111]. Les personnes âgées pourraient également être sensibles [112]. Dans l'enfance, les garçons pourraient être plus vulnérables que les filles [113], mais ces résultats sont à confirmer par d'autres travaux.

Une étude sur l'allergénicité de spores d'*Alternaria* en fonction des conditions environnementales montre que les spores les plus allergènes sont retrouvées pendant les périodes les plus sèches et les plus polluées [114]. Des études réalisées en lien avec les changements climatiques actuels et de potentiels risques sanitaires mettent en avant l'apparition possible de nouvelles maladies infectieuses via la sélection d'espèces fongiques plus adaptées à se développer à des températures supérieures à 37 °C potentiellement infectantes pour l'Humain, ou l'acquisition de cette capacité par des espèces non pathogènes [115]. L'aptitude à la dispersion sur de longues distances est également mise en avant, car celle-ci permettrait à des espèces pathogènes d'accroître leurs aires de répartition et d'envahir de nouveaux habitats [116, 117, 118, 119, 120].

2.9 Législation concernant la qualité de l'air

Le rapport de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) intitulé « Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air », dont la dernière version a été publiée en 2006 et mise à jour en 2021, comprend un ensemble de recommandations concernant les polluants atmosphériques les plus dangereux pour la santé. Il s'agit des particules fines (PM_{2,5} et PM₁₀), de l'ozone, du dioxyde d'azote, du dioxyde de soufre et du monoxyde de carbone. Au niveau des particules fines PM_{2,5}/PM₁₀, aucune distinction n'est faite entre les particules biologiques (spores, pollens, bactéries, etc.) et non biologiques. L'objectif général de ce rapport est d'offrir des recommandations sanitaires quantitatives sur la gestion de la qualité de l'air. Il ne contient pas de normes juridiquement contraignantes ; mais il constitue un outil basé sur des données scientifiques que les États peuvent utiliser pour mettre au point leur législation et leur politique.

En 2015, la 68e assemblée mondiale de la santé a adopté la résolution **WHA68.8** intitulée « Santé et environnement : agir face aux conséquences sanitaires de la pollution de l'air », qui a été approuvée par 194 États membres. Cette résolution mentionnait la nécessité de redoubler d'efforts pour protéger les populations face aux risques sanitaires de la pollution atmosphérique.

Le Tableau 2.5 reprend les niveaux de qualité de l'air recommandé par l'OMS dans son rapport.

Polluant	Durée d'exposition	Niveau de concentration recommandé
<i>PM_{2,5}</i>	Annuel	5 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	24 heures (pas plus de 3 <i>jours.an</i> ⁻¹)	15 $\mu\text{g.m}^{-3}$
<i>PM₁₀</i>	Annuel	15 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	24 heures (pas plus de 3 <i>jours.an</i> ⁻¹)	45 $\mu\text{g.m}^{-3}$
<i>O₃</i>	Saison de pointe	60 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	8 heures	100 $\mu\text{g.m}^{-3}$
<i>NO₂</i>	Annuel	10 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	24 heures (pas plus de 3 <i>jours.an</i> ⁻¹)	25 $\mu\text{g.m}^{-3}$
<i>SO₂</i>	24 heures	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$
<i>CO</i>	24 heures	4 mg.m^{-3}

TABLE 2.5 – Niveau de qualité de l'air recommandé par l'OMS. Genève, Organisation mondiale de la Santé, 2021. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

En Europe, l'ensemble de la réglementation et des directives concernant la qualité de l'air est repris dans la Directive 2008/50/CE nommée « Directive pour la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe » du 21 mai 2008 ainsi que la Directive 2015/1480/CE du 28 août 2015 établissant « les règles concernant les méthodes de référence, la validation des données et l'emplacement des points de prélèvement pour l'évaluation de la qualité de l'air ambiant ». Ces 2 Directives proposent une approche commune à l'ensemble des états membres en matière d'évaluation de la qualité de l'air sur la base de critères d'évaluation communs. Elles proposent :

- D'utiliser des techniques de mesure normalisées et des critères communs en ce qui concerne le nombre de stations de mesure et leur emplacement.
- D'effectuer des mesures détaillées des particules fines dans des lieux ruraux caractéristiques de la pollution de fond afin de mieux comprendre les incidences de ce polluant et d'élaborer les politiques appropriées.

La Directive 2008/50/CE légifère également en matière d'exposition aux PM_{2,5} et PM₁₀. Les valeurs sont reprises dans le Tableau 2.6.

Type de Particules fines	Valeur limite des concentrations
PM _{2,5}	20 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (moyenne annuelle)
PM ₁₀	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (moyenne annuelle)
	50 $\mu\text{g.m}^{-3}$ sur 234 heures. À ne pas dépasser plus de 35 jours par an.

TABLE 2.6 – Valeurs limites reprises dans la Directive 2008/50/CE

La méthode de référence pour l'échantillonnage et la mesure des PM_{2,5} et des PM₁₀ est celle décrite dans la norme EN 12341 :2014 « Air ambient - Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP₁₀ ou MP_{2,5} de matière particulaire en suspension ».

En Belgique, le contrôle de la qualité de l'air est réalisé par un réseau propre à chaque région. Afin de faciliter la collaboration entre les 3 réseaux et rassembler les données à l'échelle du pays, une Cellule interrégionale pour l'environnement (irCELine) a été mise en place. En Région wallonne, c'est l'Institut scientifique de service public (ISSeP) qui a la charge de ce contrôle. Concernant les particules fines, un système de vigilance à 3 seuils d'alerte est mis en place en Wallonie.

- Seuil 0 : PM₁₀ = 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en moyenne sur 24 h ou PM_{2,5} = 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en moyenne sur 24 h. La phase d'information est activée lorsque le seuil est atteint et que les prévisions indiquent que le dépassement devrait durer au moins 24 h.
- Seuil 1 : PM₁₀ = 70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en moyenne sur 24 h ou PM_{2,5} = 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en moyenne sur 24 h. Le niveau d'alerte est activé lorsque la cellule irCELine prévoit que ce seuil sera dépassé pendant deux jours consécutifs.
- Seuil 2 : PM₁₀ = 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en moyenne sur 24 h pour les PM₁₀. Le niveau d'alerte renforcée est activé lorsque irCELine prévoit que ce second seuil sera dépassé pendant deux jours consécutifs.

L'activation du seuil 0 implique une information et des recommandations à la population. Lorsque le seuil d'alerte 1 est atteint, des mesures contraignantes sont de plus mises en place.

Depuis 1974, le réseau belge de surveillance des pollens et des spores fongiques a été créé. Actuellement, la gestion du réseau est une activité du service Mycologie & Aérobiologie au sein du centre fédéral de recherche Sciensano. Le réseau de surveillance comprend 5 stations actives : Bruxelles, De Haan, Genk, Marche-en-Famenne et Baudour.

Concernant la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments, le Conseil supérieur de la santé belge préconise une approche globale et intégrée comprenant les occupants et leur comportement. Elle devrait consister en une série de mesures de contrôle des sources des polluants chimiques et microbiologiques, de prévention contre le radon ainsi que d'une ventilation intérieure efficace et adaptée.

L'arrêté du 30 août 2009 du gouvernement wallon détermine les critères minima de salubrité, les critères de surpeuplement et reprend les définitions visées à l'article 1er, 19 à 22bis du Code wallon du logement. Les articles 13, 14 et 16, présentés ci-dessous, déterminent les critères minima de ventilation et de présence de moisissures. Des modifications ont été apportées au niveau de l'article 16 de cet arrêté le 23 avril 2009.

Art. 13.

Les critères minimaux en matière d'étanchéité sont respectés si le logement ne présente aucun des manquements suivants : 1° infiltrations résultant de défauts qui compromettent

l'étanchéité à l'eau de la toiture, des murs ou des menuiseries extérieurs ; 2° humidité ascensionnelle dans les murs ou les planchers ; 3° forte condensation due aux caractéristiques techniques des diverses parois extérieures ou à l'absence ou la déficience des dispositifs permettant d'assurer la ventilation de la pièce.

Art. 14.

Le critère minimal relatif à la ventilation est respecté si toute pièce d'habitation et tout local sanitaire disposent soit d'une ventilation forcée, soit d'une ouverture, d'une grille ou d'une gaine ouvrant sur l'extérieur du bâtiment, de surface de section libre en position ouverte d'au moins 70 cm² pour les toilettes (AGW du 3 décembre 2020, art.11), 140 cm² pour les cuisines, salle de bain, douche et buanderie et 0,08 % de la superficie plancher pour les pièces de séjour et les chambres.

Art. 16.

§1er. Les critères minimaux en termes d'impact sur la santé des occupants sont respectés, si le logement ne présente aucun des manquements suivants : 1° présence de monoxyde de carbone dans une ou plusieurs pièces ; 2° présence d'amiante dans les matériaux ; 3° présence de moisissures sur plus d'un mètre carré dans une pièce d'habitation ou dans un local sanitaire dues à des manquements tels que définis à l'article 13.

Actuellement, il n'existe aucune valeur seuil officielle pour les concentrations atmosphériques de fungi ou des spores de fungi à l'intérieur des bâtiments. Cependant, un consensus existe pour caractériser l'exposition microbienne dans un environnement. Le Tableau 2.7 reprend une proposition de valeurs seuils relatives aux moisissures en suspension dans les habitats (EUR14988EN, 1993).

Moisissures présentes dans l'air intérieur des habitats	Conc. Très limitée	Conc. Faible	Conc. Moyenne	Conc. Élevée	Conc. Très élevée
Concentration en $UFC.m^{-3}$ (Appareil Andersen à six étages, MEA)	< 50	< 200	< 1 000	< 10 000	> 10 000

TABLE 2.7 – Proposition de valeurs seuils relatives aux moisissures en suspension dans les habitats (EUR14988EN, 1993)

En Belgique, il existe des structures publiques locales telles que Hainaut Analyses qui effectuent des interventions sur site. Les résultats peuvent aider les médecins dans leur diagnostic, et des actions coordonnées contribuent à une meilleure compréhension des pathologies.

2.10 Conclusion

En conclusion, les polluants impactant la qualité de l'air dans les bâtiments peuvent être nombreux et de natures diverses. Il est généralement admis qu'une bonne ventilation du bâtiment permet d'assurer une qualité de l'air correcte, l'air extérieur étant considéré comme de meilleure qualité que l'air intérieur. Les bâtiments sont de plus en plus étanches à l'air pour des raisons évidentes d'économie d'énergie et il est possible de ventiler ceux-ci avec un système de ventilation mécanique permettant de limiter la ventilation en se basant sur un polluant de référence qu'est le dioxyde de carbone, CO_2 car il est un bon indice de la présence humaine ou animale.

La pollution biologique de l'air n'est pas prise en compte d'un point de vue législatif pour caractériser la qualité de l'air, un logement sain ne devant pas être impacté par ce type de polluant. Une bonne ventilation aura tout de même un impact sur cette pollution biologique en limitant les concentrations en particules virales dans l'air, en modifiant l'humidité et en limitant la prolifération de certaines bactéries et fungi dans le bâtiment. Cependant le système de ventilation lui-même et également le puits canadien qui lui est associé peuvent être un lieu de développement de micro-organismes potentiellement dangereux pour la santé des occupants. Il est donc nécessaire de s'assurer que la présence d'un puits canadien placé associé à un système de ventilation mécanique ayant pour but d'assurer la qualité de l'air n'a pas un impact négatif sur celle-ci.

L'analyse métagénomique ciblée sur amplicon apparaît être la technique la plus appropriée à cette thèse. En effet, cette technique permettra d'avoir une vue d'ensemble du microbiote aérien, les différentes analyses pourront mettre en évidence l'impact du puits canadien sur ce microbiote. Le recours à des bases de données et catalogue pour l'assignation taxonomique allant au genre et à l'espèce favorise l'utilisation du système de classification phylogénétique de Ruggiero car il est moins stable et moins dépendant des différentes hypothèses sur la structure de l'arbre du vivant. Cette assignation taxonomique permettra également de mettre en évidence la présence de taxons potentiellement pathogènes et leurs abondances. Enfin, il sera possible de comparer les valeurs d'abondance obtenues aux législations sur la qualité de l'air en vigueur en Belgique afin d'estimer les risques sanitaires liés à l'utilisation du puits canadien.

Chapitre 3

État de l'art sur les puits canadiens

Ce chapitre a pour but de faire l'état de l'art dans le domaine des puits canadiens. Il permet d'illustrer l'intérêt de cette technique pour limiter la consommation d'énergie, de montrer le potentiel de cette technique couplée à d'autres systèmes comme une ventilation mécanique contrôlée ou une pompe à chaleur. Les paramètres ayant une influence sur les performances des puits canadiens sont identifiés afin de permettre de poser les meilleures hypothèses possibles pour la réalisation du modèle de cette étude.

Une attention particulière est portée sur les différentes modélisations rencontrées dans la littérature, 1D, 2D ou 3D, analytique ou numérique, ainsi que les paramètres d'entrée de ces modèles et leur degré de précision. Il est à noter que cette partie n'est pas exhaustive, il existe un grand nombre de modèles différents et d'études dans le domaine, seules les études ayant un intérêt par rapport à cette thèse sont présentées dans les sections suivantes. Elles ont permis de mieux appréhender la façon de concevoir la modélisation de l'installation étudiée.

Il existe des revues de littérature très complètes dans le domaine pour mieux comprendre l'étendue de la recherche liée aux puits canadiens. Ces études reprennent l'ensemble de la recherche dans le domaine sur les cinquante dernières années. Certaines se spécialisent sur une région géographique particulière comme [40] en Turquie ou [121] en Inde. D'autres mettent l'accent sur le potentiel d'économie d'énergie lié aux possibilités de refroidissement passif des puits canadiens et le couplage de cette technique à des systèmes de ventilation ou de climatisation via pompe à chaleur [122, 39, 121, 123, 124]. Enfin, certaines revues de littérature recensent les paramètres influençant les performances des puits canadiens, les différents modèles analytiques, numériques et les résultats expérimentaux d'installations [125, 42, 126, 126, 127, 128]. Il ressort de cette analyse que la problématique de la qualité de l'air n'est abordée dans la recherche que très récemment, et peu étudiée d'un point de vue pollution biologique.

Pour une meilleure compréhension de l'évolution de la recherche dans la thématique, voici la liste des revues de littérature classée par ordre chronologique :

- **2011 - L. Ozgener [40]** : S'intéresse à l'analyse expérimentale et analytique des systèmes de puits canadien en Turquie depuis 1980 à 2011.
- **2013 - C. Peretti and A. Zarrella and M. De Carli and R. Zecchin [122]** : Analyse la conception, les caractéristiques des échangeurs de chaleur terre-air et s'ils peuvent être couplés au système HVAC. La revue compare également une gamme de projets afin de recueillir et de résumer les suggestions de conception.
- **2013 - M. Santamouris [39]** : Passe en revue le rôle du refroidissement passif dans l'environnement urbain, notamment via des échangeurs enterrés couplés ou non à la ventilation. Le rôle du refroidissement par évaporation comme technique de dissipation de la chaleur pour les bâtiments est également discuté.
- **2013 - T.S. Bisoniya and A. Kumar and P. Baredar [121]** : Analyse l'utilité du système de puits canadien pour économiser de l'énergie et limiter l'usage des fluides réfrigérants. La revue examine pour cela les études expérimentales et analytiques des systèmes d'échangeurs de chaleur terre-air dans le monde et plus particulièrement en Inde.
- **2015 - S.K. Soni and M. Pandey and V. Nath Bartaria [123]** : Compare le potentiel de deux systèmes d'échangeur enterré, le puits canadien et la pompe à chaleur géothermique.
- **2017 - M. Kaushal [125]** : Étudie les effets de la géométrie, des débits d'air et des caractéristiques du sol sur les performances des puits canadiens.
- **2017 - F. Jomehzadeh [42]** : Résume les études antérieures à 2017 sur la qualité de l'air intérieur (QAI) et le confort thermique obtenus grâce à la ventilation naturelle à l'aide d'un dispositif de capteur de vent. Les systèmes appelés "capteur de vent" fonctionnent de manière très similaire aux puits canadiens.
- **2018 - R. Singh and R.L. Sawhney and I.J. Lazarus and V.V.N. Kishore [126]** : Présente les progrès récents dans le processus de modélisation et de conception de la technologie, l'effet de différents paramètres de conception et de fonctionnement sur les performances thermiques du système et les schémas d'installation. Étudie l'impact de modifications appropriées de la surface terrestre sur les performances d'un puits canadien.
- **2018 - N. Bordoloi and A. Sharma and H. Nautiyal and V. Goel [124]** : Décrit les études analytiques et expérimentales sur les différentes combinaisons d'EAHE et analyse les résultats de la performance thermique. La revue considère également l'aspect environnemental en plus des économies d'énergie.
- **2018 - K.K. Agrawal and G. Das Agrawal and R. Misra and M. Bhardwaj and D.K. Jamuwa [127]** : Examine l'effet des paramètres thermo-physiques du sol, des paramètres thermiques et d'écoulement de l'air, des propriétés géométriques et matérielles de la conduite, des différents modes de fonctionnement sur les performances des systèmes d'échangeurs de chaleur terre-air.
- **2022 - G. Mihalakakou and M. Souliotis and M. Papadaki and G. Halikos and J. Paravantis and S. Makridis and S. Papaefthimiou [129]** :

Examine de manière complète la performance thermique des systèmes d'échangeurs de chaleur terre-air, les études expérimentales et applications, les études paramétriques pour étudier l'impact de leurs principales caractéristiques sur l'efficacité thermique, et les avancées et tendances récentes, y compris les technologies et les systèmes hybrides sur les 30 dernières années.

3.1 Intérêt de la technique

Une étude économique a été réalisée sur l'installation étudiée dans le cadre de cette thèse [130]. Les détails techniques de l'installation sont définis dans le chapitre 5. Les résultats obtenus à l'aide de deux logiciels de simulation (GAEA et TRNSYS17) sur base d'une année climatique standardisée et comparés aux relevés expérimentaux sont repris dans le Tableau 3.1.

	GAEA	TRNSYS17	Relevés 2015	Relevés 2016
Période d'utilisation [$h.an^{-1}$]	4882	5555	7041	7103
Gain en chauffage [kWh]	775,9	1028,19	1679.48	1838.10
Gain en refroidissement [kWh]	183,8	144,20	201.16	245.81

FIGURE 3.1 – Comparaison de deux simulations numériques sur les performances d'un puits canadien

avec :

- Gain en chauffage - le gain énergétique réalisé par le puits en période de chauffe [kWh];
- Gain en refroidissement - le gain énergétique réalisé par le puits en période de refroidissement [kWh];

Ces simulations ont été réalisées suivant des paramètres de régulation repris au Tableau 3.2.

Débit de ventilation	$250 m^3.h^{-1}$
Température de confort	20 °C
Température de consigne chauffage	19,5 °C
Température de consigne refroidissement	20,5 °C
Écart minimum pour fonctionnement	0,5 °C

FIGURE 3.2 – Paramètres d'entrée pour la régulation du puits canadien

avec :

- Températures de consigne (chauffage et refroidissement) - consignes de température pour le fonctionnement du puits. Si la température extérieure est comprise entre ces deux valeurs, le puits ne fonctionne pas [°C] ;
- Écart minimum pour fonctionnement - le puits canadien est utilisé si la température de l'air en sortie est plus proche de la température de confort que la température extérieure. Il n'est pas toujours intéressant de faire fonctionner le puits, car cela a un coût et il est donc possible d'introduire une valeur d'écart minimum qui empêche le fonctionnement du puits si le gain (en chauffage ou en refroidissement) n'est pas supérieur à cette valeur [°C].

L'analyse des résultats obtenus à l'aide des modèles GAEA et TRNSYS basés sur une année climatique standard et comparés à des relevés expérimentaux montre que la prise en compte d'une année climatique standard sous-évalue les performances d'un puits canadien. De plus les gains n'ont été calculés que sur la modification de température de l'air de pulsion du système de ventilation. Le potentiel de rafraîchissement est donc sous-évalué, la méthode ne prenant pas en compte l'impact du refroidissement nocturne de la masse d'un bâtiment sur la montée en température du bâtiment en période diurne. Toutefois, le potentiel d'économie sur la période hivernale est de son côté surestimé, car les systèmes de ventilation mécanique sont généralement équipés d'un récupérateur de chaleur ayant une bonne efficacité. Cela limite le gain réalisé sur la température de pulsion.

Une étude très complète réalisée par Pierre Hollmuller et faisant référence dans le domaine [21] a permis de mettre en évidence la faible complémentarité du puits canadien avec le récupérateur sur air vicié en période hivernale. Cela est directement lié au niveau de température auquel on travaille. Celui-ci induit également une différenciation de l'utilité de la modification de la température du flux d'air selon que, à la sortie de l'échangeur, celui-ci se situe au-dessus ou en dessous du seuil de confort. Ainsi, dans le cas des puits canadiens et sous nos climats, l'amortissement hivernal de l'oscillation annuelle, à des températures situées en dessous du seuil de confort inférieur de 20 °C, n'induit rien d'autre qu'une économie sur le préchauffage du renouvellement d'air, auquel elle est intrinsèquement liée par minimisation du débit. Au contraire, l'amortissement estival de l'oscillation diurne est suffisant à produire une température de ventilation en dessous du seuil de confort supérieur de 26 °C permettant un rafraîchissement qui peut être accru par augmentation du débit et donc éviter l'installation d'un système de climatisation actif.

Cette étude a également permis l'élaboration de "règles du pouce" et d'un outil de pré-dimensionnement simplifié (modèle analytique avec transformée de Fourier) ; ainsi que la mise en évidence d'un phénomène permettant le déphasage à amortissement quasi-nul d'une oscillation thermique.

Déphasage à amortissement quasi-nul

Le déphasage et l'amortissement d'une onde thermique sont caractéristiques d'un flux d'air traversant un échangeur air-sol. Afin d'étudier le rapport entre ces deux phénomènes,

l'étude a différencié l'épaisseur de la couche de sol disponible (moitié de la distance entre échangeurs ou profondeur d'enfouissement) en prenant d'une part, une couche de sol suffisamment épaisse et supérieure à la profondeur de pénétration et d'autre part, une couche de sol "mince" inférieure à la profondeur de pénétration.

Il a été constaté qu'une couche de sol disponible avec une épaisseur importante favorise l'amortissement, mais qu'il est possible d'obtenir un déphasage d'autant plus élevé que le rayon du tube est grand avec un amortissement quasi-nul si la couche de sol disponible est d'une faible épaisseur et que le coefficient d'échange convectif est important.

Règles du pouce

Cette règle est basée sur le rapport entre le débit d'air et la surface d'échange de l'échangeur air-sol. Elle dépendra de la fréquence (journalière ou annuelle) et de l'effet recherché (amortissement ou déphasage). Elle se base sur des débits d'air de 200, 100 et 50 $m^3.h^{-1}$ pour des échangeurs ayant une section circulaire ou rectangulaire avec des vitesses de l'air de 1, 2 ou 4 $m.s^{-1}$. Les débits d'air et les vitesses de l'air étant fixés, la géométrie des échangeurs à mettre en place l'est également. Les résultats obtenus le sont pour un sol sablonneux à faible teneur en eau ayant une conductivité de 1,9 $W.m^{-1}.K^{-1}$ et une capacité calorifique de 1,9 $MJ.m^{-3}.K^{-1}$.

Comme vu au point 1.2.2, le choix de la fréquence à traiter aura un impact direct sur la profondeur de pénétration, c'est pourquoi l'étude différencie une fréquence journalière et une fréquence annuelle. De plus, avant d'entreprendre un dimensionnement de puits canadien, il faut définir à quelles fins celui-ci sera destiné. En effet, un puits canadien ayant pour but principal le préchauffage de l'air en période hivernale ne devra pas être dimensionné de la même façon qu'un puits canadien ayant pour but principal le rafraîchissement de l'air.

Cela s'explique par le climat que nous possédons en Belgique. En période hivernale, la température de confort de l'ordre de 20 °C est supérieure à la température moyenne du sol et à la température extérieure. Il est donc intéressant de considérer les données relatives à une période annuelle voire sur la durée de la saison de chauffe pour déterminer la mise en oeuvre, ce qui implique une profondeur de pénétration plus grande et donc une épaisseur de la couche de sol plus importante (profondeur d'enfouissement ou moitié de la distance entre échangeurs). En période estivale, la température de confort est parfois légèrement inférieure à la température extérieure, mais sur de courtes durées alors que la température moyenne du sol est, quant à elle, nettement inférieure à la température de confort. Les besoins en rafraîchissement sont donc assez faibles et facilement obtenus. Considérer une période journalière, voire de quelques jours si le bâtiment a une très faible inertie ou des apports internes ou externes importants, est donc suffisant pour définir les paramètres d'enfouissement, ce qui diminue le coût de mise en oeuvre étant donné la faible épaisseur de la couche de sol nécessaire.

Vitesse de l'air [m/s]	Dimensionnement [m ² de surface par m ³ /h de débit d'air]			
	Période journalière		Période annuelle	
	Ech. cylindrique	Ech. plan	Ech. cylindrique	Ech. plan
1	1/10	1/10	1/5	1/1
2	1/15	1/15	1/7	1/1
4	1/20	1/20	1/10	1/1

FIGURE 3.3 – Règles du pouce pour amortissement journalier ou annuel [21]

Prenons par exemple, un puits canadien composé d'un seul tuyau et ayant pour but le préchauffage de l'air en période hivernale. Avec un débit d'air de $200 \text{ m}^3.h^{-1}$ et une vitesse de l'air fixée à 2 m.s^{-1} , le tuyau aura besoin d'un rayon de $9,4 \text{ cm}$. La règle du pouce nous donne pour un amortissement annuel un ratio de $1/7$. Il faut donc prévoir une surface d'échange de $28,57 \text{ m}^2$ et donc une longueur de tuyau de $48,38 \text{ m}$.

3.2 Paramètres impactant les performances du puits canadien

La technique du puits canadien a été étudiée dans le monde entier et certains articles font l'état des lieux de la recherche dans ce domaine, essentiellement sur les aspects thermiques liés à cette technique.

La performance d'un puits canadien dépend des conditions de la surface terrestre et peut être améliorée de manière significative par des modifications appropriées de la surface terrestre [126]. Dans un climat froid, le chauffage de l'air peut être amélioré en noircissant et en vitrifiant la surface terrestre et dans un climat chaud et sec, le potentiel de rafraîchissement est augmenté en ombrageant et en mouillant la surface terrestre. La température du sol est directement liée à la température extérieure sur une profondeur de $0,5 \text{ m}$ à 4 m , mais la présence d'un puits canadien en fonctionnement continu aura un impact significatif sur la température du sol entourant celui-ci. Cet impact va modifier les performances du puits canadien de manière négative ou positive en fonction du climat. Par exemple, dans un objectif de rafraîchissement en période estivale, si la température nocturne est plus faible que la température de confort, un usage continu du puits canadien permettra d'abaisser la température du sol durant la nuit et augmentera le rafraîchissement obtenu par le puits en journée. Si la température nocturne est plus élevée que la température de confort, un usage du puits en continu affectera négativement les performances de rafraîchissement du puits canadien.

Diverses études expérimentales et analytiques ont décrit en détail [125, 124] les effets de la géométrie, des flux d'air et des caractéristiques du sol sur les performances des puits canadiens [127]. La température d'entrée et la vitesse d'écoulement de l'air ont un effet significatif sur la performance thermique du système. La connaissance des propriétés thermophysiques du sol est cruciale, mais le matériau du tuyau a un effet minime sur le transfert de chaleur global entre l'air et le sol. Il est recommandé d'utiliser plusieurs

tuyaux ayant un petit diamètre au lieu d'un seul tuyau de grand diamètre, mais lors de l'utilisation de plusieurs tuyaux, l'espacement entre les tuyaux devient un paramètre critique lorsque le puits canadien est mis en service en continu pendant de longues durées dans des conditions ambiantes difficiles. Pour réduire les coûts d'installation, la distance entre les tuyaux doit être réduite progressivement sur toute la longueur du tuyau, car le taux de transfert de chaleur dans la section amont du tuyau est plus élevé que dans la section aval. Il est important de garder en mémoire que l'usage de tuyaux de petits diamètres va entraîner une augmentation des pertes de charge et impacter la consommation du système de ventilation. Cet effet négatif est donc à mettre en balance avec l'intérêt thermique lié à l'usage de petits diamètres. Une profondeur de tuyau supérieure à 3-4 m n'apporte aucune amélioration par rapport à une profondeur classique d'environ 2 m, car la température du sol varie peu au-delà et la durée de fonctionnement du système doit être gérée de manière à ce que le sol retrouve ses propriétés thermiques. Il est en effet nécessaire d'assurer d'un équilibre entre l'utilisation en période hivernale et estivale pour éviter un phénomène "d'épuisement thermique du sol" qui provoquerait une modification de sa température après quelques années et limiterait les performances du puits.

Une analyse de sensibilité ayant comme paramètres d'entrée, la longueur, le rayon et le débit de ventilation a été réalisée par [131]. Afin de déterminer l'impact de ces paramètres sur le potentiel de refroidissement du système. Cette étude a été réalisée pour les climats chauds et secs de Jodhpur et de New Delhi.

Le choix du matériau qui compose les tuyaux a été étudié [132] en comparant des tuyaux en bambou, des tuyaux en PVC et des tuyaux en acier doux. Le site ayant servi à l'étude se situe au Nord-Est de l'Inde et les mesures ont eu lieu au mois de mai. Le système en bambou fonctionne parfaitement et réduit la température de l'ordre de 10 à 15 °C en moyenne pour des températures d'entrée comprises entre 35 et 40 °C.

L'impact de la pluie sur les performances des puits canadiens a été étudié [133]. Il a été démontré que l'échange d'énergie entre le sol et le puits canadien augmente de plus de 4 % après un événement pluvieux pendant les premières 24 h et de 2 % durant les 24 h suivantes. Les précipitations cumulées influencent plus les échanges de chaleur que l'intensité de la pluie. L'étude compare également les échanges de chaleur entre le puits canadien et le sol pour différents types de sol saturé en eau ou non et en période hivernale et estivale. Il ressort de cela que la nature du sol influence les échanges de chaleur de plus de 15 % lorsque le sol est non saturé, mais que pour des sols saturés, la nature du sol n'a qu'un impact limité d'environ 2 % sur les échanges de chaleur.

Une analyse de la recherche dans ce domaine en Turquie [40] et en Inde [121] montre l'utilité du système de puits canadien pour économiser de l'énergie en préchauffant et en prérefroidissant l'air pour la climatisation des bâtiments et pour réduire la consommation d'énergie, la consommation de CFC et de HCFC et les émissions de gaz à effet de serre. Pour l'instant, les États-Unis et l'Europe sont les leaders mondiaux dans l'utilisation des systèmes de puits canadien, mais le potentiel de développement est présent dans le monde entier.

3.3 Le puits canadien couplé à d'autres techniques

L'air circulant dans un puits canadien n'est pas toujours utilisé pour la ventilation d'un bâtiment, il peut être utilisé comme source froide ou chaude par une pompe à chaleur. L'air qui circule dans le puits n'est donc plus pulsé dans le bâtiment et le risque sanitaire ne peut donc être présent. Toutefois ce système nécessite l'usage d'énergie pour faire fonctionner le compresseur de la pompe à chaleur. Le puits canadien souvent considéré comme un système de climatisation passif est donc associé à un système de climatisation actif dont il améliore les performances. Une étude a été menée [134] pour analyser la performance énergétique d'une pompe à chaleur air-eau (ASHP) couplée à un échangeur de chaleur terre-air horizontal (EAHX) sous différents climats. Elle se focalise sur quatre climats différents, la ville de Turin (nord de l'Italie), par rapport à Brindisi (sud de l'Italie), et sur des climats extrêmement froids et chauds comme Tromsø (Norvège) et Béchar (Algérie). La modélisation du puits canadien s'est faite via le logiciel TRNSYS 17, une analyse de sensibilité regroupant 54 combinaisons et faisant varier les propriétés thermiques du sol, la profondeur d'enfouissement, le débit d'air et la longueur du tuyau a été réalisée. Le modèle a été validé avec un cas réel montrant une bonne correspondance entre les données simulées et mesurées. Les propriétés thermiques du sol sont prises à différents niveaux d'humidité volumétrique (0 %, 20 %, 40 %) pour mesurer l'impact de celle-ci sur les performances du puits canadien. Il en ressort que les performances du puits canadien sont grandement améliorées lorsque l'humidité volumétrique passe de 0 % à 20 % mais que cette amélioration des performances est moindre quand on passe de 20 % à 40 %.

Une analyse spéciale sur le couplage du puits canadien à un système de ventilation mécanique a été réalisée dans [122]. La conclusion de cette étude est qu'un puits canadien peut être installé dans différents types de climats et être conçu à la fois pour des climats frais (par exemple l'Allemagne) et pour des pays plus chauds (par exemple l'Inde). De nombreux types de bâtiments combinent des systèmes de ventilation avec des puits canadiens et si la conception thermique est bonne et que le puits canadien est couplé à d'autres techniques de refroidissement à faible consommation d'énergie (par exemple, le refroidissement nocturne), un système de climatisation n'est pas nécessaire.

Une étude qui définit des directives de conception générales indépendantes du climat pour l'amortissement de la température quotidienne ou annuelle basée sur le flux d'air a été rapportée par Hollmuller et al [135]. Elle montre que lorsqu'un puits canadien est couplé à une unité de récupération de l'énergie sur l'air vicié, son intérêt diminue fortement, car son apport en chaleur à l'air de pulsion devient négligeable. Une analyse de l'occurrence de la condensation dans le puits canadien pour un climat d'Europe centrale a montré que le risque est insignifiant pour une configuration peu profonde et compacte, mais présent pour une configuration de tuyaux profonds et distants.

Soni et al [123] ont concentré leur travail sur l'échangeur de chaleur couplé au sol (GCHE) et plus particulièrement sur les performances des deux types de systèmes GCHE : l'échangeur de chaleur terre-air (EAHE ou puits canadien) et les systèmes de pompe à chaleur

géothermique (GSHP). Le temps de retour sur investissement du puits canadien est faible, mais l'économie d'énergie est plus importante pour la GSHP. La technologie des systèmes EAHE est bien établie alors que celle des systèmes GSHP doit être acceptée dans les pays en développement. Cependant, ces technologies permettraient de limiter la consommation d'énergie par rapport à des systèmes de climatisation via pompes à chaleur à air et donc la construction de systèmes de production d'électricité.

Des recherches sont menées sur l'évaluation des performances d'un nouveau système de refroidissement hybride combinant un refroidisseur par évaporation indirecte et un échangeur de chaleur terre-air [136] dans un climat semi-aride (période la plus chaude des conditions météorologiques à Téhéran en Iran). Cette étude montre l'intérêt économique et environnemental du système qui permet une réduction de la consommation d'eau de 45 %, et une réduction de 62 % de la consommation d'énergie du refroidisseur par évaporation indirecte.

3.4 Modélisations thermiques

La modélisation de puits canadien a déjà fait l'objet de nombreuses études. Leurs objectifs peuvent être variables. Il peut s'agir de valider les résultats obtenus à l'aide d'un modèle analytique simplifié en les comparant aux résultats obtenus à l'aide d'un modèle numérique ou de valider un modèle, qu'il soit analytique ou numérique, en comparant les résultats des simulations aux valeurs expérimentales. Une liste non exhaustive des modélisations rencontrées dans la littérature est reprise dans le Tableau 3.1.

La modélisation des transferts thermiques dans la matrice sol est complexe ce qui explique le nombre d'études sur le sujet. Étant donné la nature hétérogène de la matrice du sol, il est nécessaire de faire des hypothèses simplificatrices en raison de la difficulté d'obtenir une analyse exacte de la composition de la matrice du sol et du nombre de phénomènes physiques ayant lieu dans le système.

Il existe différents types de modèles. Les études les plus simplifiées utilisent un modèle 1D en considérant la température de la matrice du sol comme un paramètre fixe. Ils ont été utilisés pour la première fois dans les années 1990 pour établir une relation entre les températures d'entrée et de sortie d'un tuyau et ne considèrent donc pas l'influence du transfert de chaleur entre le sol et l'air circulant dans le puits sur la température de la matrice du sol [137, 138, 139]. Ces modèles simplifiés permettent de déterminer les dimensions caractéristiques de l'échangeur afin qu'une efficacité thermique optimale soit atteinte avec une perte de charge acceptable et sans utiliser une méthodologie complexe.

Afin de déterminer les paramètres ayant une réelle influence sur les températures de sortie du puits canadien, une analyse de sensibilité a été réalisée [140] sur huit modèles de résolution analytique différents [141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148] en comparant les résultats des modèles à ceux obtenus expérimentalement sur deux installations monitorées. Les modèles [142, 143, 144, 145, 146, 147, 148] ne calculent que le transfert de chaleur

par convection entre l'air circulant dans le tuyau et la paroi du tuyau et nécessitent donc de connaître la température de la paroi du tuyau.

- Le modèle de [141] calcule d'abord le transfert de chaleur par convection de l'air circulant dans le tuyau, puis le transfert de chaleur par conduction du tuyau vers le sol et à l'intérieur de la masse du sol. Le sol est donc divisé en éléments cylindriques coaxiaux.
- Le modèle de [142] calcule la température à la sortie du tuyau en fonction de trois nombres adimensionnels qui dépendent des propriétés thermophysiques du tuyau et de l'air et des caractéristiques de l'écoulement de l'air.
- Le modèle de [143] permet de prédire la température de l'air circulant dans le tuyau à toute position x de l'entrée. La température de la paroi du tuyau est considérée maintenue constante dans le tuyau.
- Le modèle de [144] calcule la température de l'air dans le tuyau à une distance x de l'entrée en résolvant l'équation d'équilibre thermique en régime permanent entre l'air et le sol considéré à une distance D du tuyau, par un schéma de différences finies.
- Dans le modèle de [145], le tuyau est divisé en éléments élémentaires. La température de l'air à la sortie de chaque élément est donnée par une relation ne prenant en compte que les échanges entre l'air et la paroi du tube.
- Le modèle de [146] est très similaire au modèle de [144]. Ils se différencient uniquement par les équations permettant de calculer le transfert de chaleur entre la paroi du tube et l'air circulant dans le puits.
- Le modèle de [147] calcule la température en sortie de puits sur base d'un rapport entre la température à la sortie du puits et la température à la paroi. Ce rapport est lui-même obtenu sur base du rapport entre la température à l'entrée du puits et la température à la paroi corrigé par des paramètres intégrant le transfert de chaleur, les dimensions du tuyau et le débit d'air.
- Le modèle de [148] discrétise également le tuyau et résout en 3D l'écoulement et l'équation de conservation de l'énergie entre l'air et la paroi du tuyau en appliquant une condition limite de type Neumann à la surface externe du tuyau et en utilisant un schéma de différences finies.

Les huit modèles peuvent suivre le comportement dynamique à long terme de la température de l'air de sortie, mais leurs prédictions des valeurs quotidiennes maximales et minimales sont beaucoup moins précises. Afin de quantifier la précision des différents modèles par rapport aux relevés expérimentaux, l'erreur quadratique moyenne sur la température en sortie du puits a été calculée. Pour les 6 modèles les plus précis [142, 143, 144, 145, 146, 148], l'erreur quadratique moyenne est de l'ordre de 3,4 %. Ces modèles ne prenant pas en compte les échanges convectifs à l'interface air-sol qui influencent pourtant les performances du puits, leur précision restera limitée.

Un modèle 1D assez simple est largement répandu, il a notamment été utilisé dans [136] pour modéliser les performances du puits canadien. Ce modèle simplifié est basé sur la méthode de la *source cylindrique creuse transitoire*. Selon ce modèle, on suppose que la

chaleur prélevée dans le flux d'air intérieur, après avoir traversé la faible épaisseur du tuyau, est uniformément appliquée à la paroi d'un cylindre de sol creux. La température du sol en des points éloignés est considérée comme égale à la température du sol non perturbé. À la profondeur d'enfouissement de la conduite souterraine, la température du sol non perturbé est supposée égale à la température ambiante moyenne annuelle de la zone géographique. Cette méthode revient donc à considérer une profondeur pour laquelle l'onde de température extérieure est totalement amortie.

Dès le début des années 2000, des modèles 2D ont été proposés. Ils sont capables de simuler un champ de température du sol 2D au niveau de la section transversale d'un tuyau de puits canadien et, par conséquent, l'interaction thermique entre le tuyau et son sol environnant. Un modèle plus complexe a été développé par Pierre Hollmuller [149]. Il s'agit d'un modèle théorique analytique approfondi validé par de nombreuses mesures in situ permettant d'établir des règles simples pour le dimensionnement des puits canadiens telles que "la règle du pouce". Ce modèle a été validé par rapport à une solution analytique complète ainsi que par rapport à deux systèmes monitorés in-situ avec d'importants transferts de chaleur latente [150].

Pierre Tittlein [151] propose un modèle numérique basé sur le logiciel COMSOL qui discrétise le puits en différentes parties. Dans chaque tranche, un calcul des facteurs de réponse est effectué à l'aide de COMSOL afin de réduire le temps de calcul. Le facteur de réponse représente le flux linéaire répondant à une sollicitation en température triangulaire de hauteur unitaire sur l'une des frontières tout en laissant les autres frontières à température nulle. Dans cette étude, les deux frontières considérées sont la surface du sol et la surface intérieure du puits canadien. Il y a trois facteurs de réponse à calculer dans chaque partie, le premier représente le flux en surface du sol pénétrant dans le sol et répondant à la sollicitation en surface du sol de forme triangulaire et d'amplitude 1 °C, le deuxième représente le flux gagné par le puits et répondant à une sollicitation triangulaire au même endroit et le troisième qui représente soit le flux en surface intérieure du tube répondant à une variation triangulaire de température en surface du sol, soit le flux en surface sol répondant à une variation triangulaire de température en surface intérieure du tube. Le modèle proposé est ensuite comparé à un modèle analytique. Pour trouver la température de sortie, une équation de bilan thermique est appliquée. Le problème rencontré en utilisant le modèle mentionné ci-dessus est qu'il faut beaucoup de temps pour calculer le comportement de l'échangeur de chaleur avec précision en raison du type de maillage requis.

D'autres modèles numériques utilisant les éléments finis ou les différences finies considèrent la géométrie complète du problème en 2D [152] ou en 3D [153]. Ces dernières années, plusieurs modèles 3D ont été proposés. Ils tiennent compte de la géométrie des canalisations de l'EAHE. Cependant, ces modèles nécessitent une puissance de calcul importante, conduisant à des temps CPU allant, environ, d'une à plusieurs dizaines d'heures. Certains modèles ne considèrent pas le fait que le sol entier est influencé par l'échangeur [154]. D'autres résolvent un équilibre thermique à la surface du sol et un modèle d'échangeur avec un seul tube comme [155].

Lee et al. [156] ont utilisé le logiciel Energy Plus et ont créé un module complémentaire pour ce logiciel validé par des relevés expérimentaux. Le modèle pose plusieurs hypothèses simplificatrices, le profil de température au voisinage du tuyau n'est pas affecté par la présence du tuyau, le sol entourant le tuyau est homogène et a une conductivité thermique constante. Le transfert de chaleur entre le tube et le sol environnant se détermine sur base de trois valeurs de résistance thermique qui s'additionnent : la résistance thermique due au transfert de chaleur par convection entre l'air dans le tuyau et la surface intérieure du tuyau, la résistance thermique due au transfert de chaleur par conduction entre la surface intérieure et extérieure du tuyau, et la résistance thermique due au transfert de chaleur par conduction entre la surface extérieure du tuyau et le sol non perturbé. La distance entre la surface extérieure du tuyau et le sol non perturbé est supposée égale au rayon du tuyau.

Thiers et al. [157] ont posé plusieurs tubes en parallèle à la même profondeur afin d'étudier l'interaction entre ceux-ci. La méthode des volumes finis avec un nombre limité de nœuds a été utilisée. Le maillage comprend plusieurs mailles cylindriques concentriques d'axe horizontal représentant l'air à l'intérieur des tubes, le tube, et deux mailles de sol (l'une autour de chaque tuyau, l'autre englobant l'ensemble des tuyaux) elles-mêmes subdivisées en demi-mailles hautes et basses afin de différencier les conditions aux limites au-dessus et en dessous du domaine maillé. Le modèle de puits canadien spécifique comprend deux sous-modèles. Le premier, un modèle thermique du sol, a évalué la température du sol sans influence du puits. Cette température du sol est fournie comme condition aux limites au deuxième modèle, un modèle thermique de puits canadien, qui calcule la température de l'air de sortie de la conduite enterrée.

Auteur	Lieu/Climat	Caractéristiques		Modèle	Objectif
T. Boulard and E. Rajafinjohany and A. Baille [153] 1989	Sud de la France Novembre à Mai	Nbr tuyaux Diamètre Longueur Profondeur	10 et 10 125 mm 22 m 0,6 et 0,8 m	Modèle numérique considérant la géométrie complète du problème en 3D.	Mesurer les performances microclimatiques et thermiques du système, y compris les transferts de chaleur sensible et latente, pendant deux saisons de chauffage d'une serre de culture.
A. Tzaferis and D. Liparakis [140] 1992	Juin et Juillet	Nbr tuyaux Diamètre Longueur Profondeur	1 150 mm 14,8 m 1,1 m	Comparaison de huit modèles analytiques d'échanges statiques.	Réaliser une analyse de sensibilité sur huit modèles différents [141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148] modélisant un puits canadien pour déterminer les paramètres d'entrée ayant un impact significatif. Comparer les résultats des huit modèles à des relevés expérimentaux.
MS. Sodha and D. Buddhi and KR. Campus [131] 1993	Jodhpur et New Delhi – Inde Climats chauds et secs	Nbr tuyaux Diamètre Longueur Profondeur	1 1050x750 mm 80 m 4 m	Modèle analytique considérant les propriétés du sol comme homogènes et constantes.	Étudier l'effet de la longueur du tuyau, du rayon et du débit massique d'air à l'intérieur du tube ainsi que la couverture de la surface terrestre, sur l'efficacité du système de puits canadien. Le modèle ignore les phénomènes d'évaporation et de condensation, ainsi que l'évolution temporelle de la température de l'air ambiant ou du rayonnement thermique.
M. Bojic and N. Trifunovic and G. Papadakis and S. Kyritsis [152] 1997	Kragujevac – Serbie 5AM to 6PM 01 janvier et 01 juillet	Nbr tuyaux Diamètre Longueur Profondeur	1-4 145 mm 5-50 m 2,1 m	Modèle numérique considérant la géométrie complète du problème en 2D.	Évaluer les performances technico-économiques d'un puits canadien couplé au système de chauffage ou de refroidissement d'un bâtiment qui utilise 100 % d'air neuf comme moyen de chauffage ou de refroidissement.

TABLE 3.1 – Modèles de puits canadiens rencontrés dans la littérature

3.5 Logiciels pour la modélisation des puits canadiens

Un logiciel de simulation peut être utilisé pour réduire le temps de calcul et simplifier l'analyse des performances du puits canadien. Certains logiciels ont été développés pour des études internes, d'autres pour un usage commercial. Les modèles repris par ces logiciels ont tous été validés par des comparaisons avec des résultats expérimentaux, mais n'ont pas le même niveau de précision. Il est important de distinguer les logiciels intégrant un module spécifique pour le puits canadien qui permettent une étude rapide des performances du puits souvent couplé à d'autres systèmes et les logiciels de CFD qui permettent de modéliser des écoulements et donc de calculer les performances des puits canadiens. Les logiciels de CFD sont généralement plus précis et peuvent prendre en compte des spécificités géométriques, mais leur temps de calcul est aussi plus long.

ÉnergiePlus

Logiciel de simulation actuellement pris en charge par le Département de l'énergie des États-Unis. Il met en œuvre l'approche complète du bilan thermique. Il contient un modèle analytique de puits canadien développé par Lee et Strand [156] qui utilise un algorithme détaillé pour calculer la variation de température du sol autour d'un tube spécifié pour chaque pas de temps de la simulation.

TRNSYS

TRNSYS ou Transient System Simulation est un logiciel réalisant des simulations dynamiques qui a été développé en 1975 dans le laboratoire d'énergie solaire de l'université de Wisconsin-Madison aux États-Unis. Il est basé sur une approche modulaire permettant une prise en main rapide et la possibilité d'analyser des simulations dynamiques complexes. L'ensemble des modules, appelés Type, fonctionne sur base de données d'entrées, appelée inputs, de données de sortie, appelée outputs et de paramètres internes. Les inputs d'un module peuvent être les outputs d'un autre module, un fichier de données, ou encore une valeur prise par défaut. Les paramètres internes peuvent également être pris par défaut ou modifiés s'ils sont connus. TRNSYS permet la simulation dynamique de bâtiments et/ou de systèmes thermiques à l'aide des modules proposés, mais il est également possible de modifier ceux-ci ou d'en créer d'autres. Les chercheurs ont utilisé ce logiciel de différentes manières : Ahmed et al. [158] ont utilisé l'application TRNSED pour simplifier la simulation. Hollmuller et Lachal [150] ont développé une interface conviviale avec les "échangeurs de chaleur air-sol" et créé le module appelé : "type 460". Al-Ajmi et al. [159] ont utilisé le programme TRNSYS-IISIBAT pour développer le module de puits canadien Type 264 couplé avec le module de sous-sol Type 263.

WKM

Outil de conception développé par Huber Energietechnik AG (Zurich). C'est un logiciel commercial qui permet de calculer l'évolution de la température entre l'entrée et la sortie, le temps de fonctionnement du puits canadien, la récupération de chaleur et les performances énergétiques en hiver et en été [160]. C'est un modèle analytique fonctionnant

sous Excel.

GAEA (Graphische Auslegung von ErdwarmeAustauschern)

GAEA est un logiciel qui a été développé par le département de la physique et de l'énergie solaire appliquées aux bâtiments de l'université de Siegen en Allemagne en 1997. Il permet de simuler les effets d'un puits canadien en fonction de différents paramètres. GAEA est basé sur les modèles généraux de transfert de chaleur et de masse. Il effectue des calculs analytiques afin de déterminer les températures et les flux de chaleur en divisant le puits canadien modélisé en 100 segments. C'est un logiciel commercial qui permet de calculer l'évolution de la température entre l'entrée et la sortie, le temps de fonctionnement du puits canadien, la récupération de chaleur, les performances énergétiques en hiver et en été et le temps de retour sur investissement. Une routine d'optimisation permet de choisir parmi une gamme de variations de disposition, ce qui influence les gains de chaleur et les coûts [161].

PLEIADES STD Comfie

Comfie est le moteur de calcul de Simulation Thermique Dynamique (STD) de Pleiades. Il s'appuie sur un modèle aux différences finies multizone réduit par analyse modale. À chaque pas de temps, l'algorithme détermine les besoins de chauffage, de refroidissement, l'humidité et les températures dans chaque zone du bâtiment. Le bilan thermique réalisé intègre les échanges entre zones. L'inertie thermique est prise en compte au niveau de chaque paroi. Le logiciel a notamment été utilisé pour l'étude [157]. L'auteur, Stéphane Thiers, est en charge du développement du modèle de puits canadien dans Comfie.

Ansys FLUENT

Logiciel commercial en CFD. FLUENT est un solveur, il ne comporte pas de mailleur. Le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il utilise la méthode des volumes finis pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Par exemple, le modèle thermique d'un système de puits canadien peut-être simulé en considérant un écoulement turbulent transitoire 3D avec transfert de chaleur [162]. Dans cette analyse transitoire, le pas de temps est de 100s avec 20 itérations à chaque pas.

PHOENICS

Le logiciel PHOENICS a été utilisé pour le développement d'un modèle numérique tridimensionnel transitoire décrivant les performances thermiques d'un système de puits canadien dans l'étude [163]. PHOENICS est un programme de simulation CFD commercial, capable de prédire les flux de fluides et les processus de transfert de masse dans de nombreuses applications. Particulièrement pour les bâtiments et les espaces extérieurs. Le modèle numérique a utilisé des méthodes implicites basées sur des processus de transfert de chaleur et de masse simultanés dans le sol et le tuyau pendant le fonctionnement du système, et il a combiné le transfert de chaleur et de masse dans le sol avec l'écoulement turbulent à l'intérieur du tube. Le transfert de chaleur dans le sol a été décrit

par une équation tridimensionnelle de conduction thermique transitoire, tandis que pour modéliser les processus de transfert de chaleur et de masse dans le système sol-air-tube, des coordonnées cylindriques bidimensionnelles ont été utilisées.

COMSOL Multiphysics

Le logiciel COMSOL Multiphysics est un logiciel commercial utilisé pour la réalisation de simulations numériques avec la méthode des éléments finis, il dispose de différentes interfaces physiques de base pouvant être combinées pour résoudre des problèmes multiphysiques, notamment de CFD. Le maillage peut être défini de manière manuelle, automatique ou semi-automatique et plusieurs méthodes sont disponibles. Il est également possible de coupler le logiciel COMSOL Multiphysics au logiciel MATLAB permettant la définition de routines complexes. Il a été utilisé pour l'étude [151] et sera également utilisé dans le cadre de cette thèse.

3.6 Conclusion

Il ressort de cet état de l'art quelques conclusions corroborées par [129].

La distribution de la température du sol à la surface et à diverses profondeurs en dessous dépend de l'équation du bilan énergétique à la surface. Celui-ci doit tenir compte des échanges radiatifs (le rayonnement solaire, le rayonnement terrestre et atmosphérique), des transferts convectifs dus au vent et des flux de chaleur latents dus aux processus d'évaporation/condensation.

Les modèles développés peuvent être analytiques ou numériques, les résultats de ces modèles sont souvent validés par des relevés expérimentaux et d'autant plus précis que les transferts de chaleur dans le sol sont intégrés au modèle. Toutefois la prise en compte des transferts de masse ayant lieu au sein du puits n'apporte pas de précision supplémentaire aux résultats. Cela tend à prouver le faible impact de ces transferts sur la température obtenue en sortie de puits.

En ce qui concerne les performances de l'échangeur, des études paramétriques montrent l'importance des principaux paramètres de configuration sur l'efficacité du système. Les paramètres du système peuvent être divisés en trois catégories, la conception du système (longueur et rayon des tuyaux, profondeur d'enfouissement, vitesse de l'air à l'intérieur du tube, nombre de tuyaux et matériau des tuyaux), le type de sol et la couverture de la surface du sol. Les paramètres de conception du système, en particulier la longueur et la profondeur d'enfouissement, sont ceux ayant l'influence la plus importante sur l'efficacité thermique du système.

L'état de la recherche dans le domaine permet d'affirmer l'intérêt de la technique du puits canadien pour réduire la consommation en énergie et diminuer l'usage du rafraîchissement actif et donc des fluides réfrigérants. Toutefois, les études analysant les consommations d'énergie et la pollution potentielle ou les conséquences écologiques résultant de la

construction et de l'exploitation de tels systèmes ne sont que peu nombreuses et il est nécessaire d'orienter la recherche vers ces domaines.

Chapitre 4

État de l'art sur la qualité de l'air liée aux puits canadiens

La qualité de l'air intérieur des bâtiments est particulièrement étudiée compte tenu des impacts sur la santé et la productivité des occupants [164, 165]. L'objectif est de réduire les débits de ventilation pour limiter la consommation énergétique des bâtiments tout en garantissant la qualité de l'air. Pour caractériser la qualité de l'air dans les bâtiments, on trouve essentiellement des études sur les polluants physiques et chimiques [42, 6]. La pollution par des agents biologiques n'est généralement pas utilisée pour caractériser la qualité de l'air, mais le risque sanitaire provenant d'une contamination par un agent pathogène est pourtant bien réel. Le chapitre présent recense les études menées dans le domaine de la qualité de l'air associé à un puits canadien.

4.1 Mission d'évaluation sanitaire du puits canadien - Siège social du Groupe Millet [1]

Suite à la construction d'un bâtiment bioclimatique destiné à devenir son siège social, la société Millet a souhaité évaluer les performances sanitaires du puits canadien qui y est installé. Pour ce faire, elle a fait appel à la société Medieco qui a réalisé son étude sur deux thématiques ayant fait l'objet d'analyses et de mesures. Premièrement, le développement fongique et bactériologique et deuxièmement, l'activité volumique du radon.

Évaluation microbiologique

Les moisissures ont été étudiées à l'aide d'un milieu HS (High Salt), avec des prélèvements de 80 litres d'air et une incubation à 37 °C pour les moisissures thermo-tolérantes, et pour les moisissures mésophiles avec des prélèvements de 40 litres d'air et une incubation à 25 °C. Les bactéries mésophiles ont été étudiées à l'aide d'un milieu TSA (Trypticase Soy Agar) avec des prélèvements de 80 litres d'air et une incubation à 25 °C.

Les mesures prises comme référence pour la présence de bactéries et de moisissures dans l'air extérieur ont été effectuées à la prise d'air du puits avant les filtres. D'autres mesures ont été réalisées dans le local technique avant le passage dans le filtre F7 (Norme Européenne EN779. F7 - filtre fin avec une efficacité minimum de 35 % et une efficacité moyenne comprise entre 80 et 90 % pour des particules de $0,4 \mu m$), au milieu de l'open space et dans l'espace d'accueil. Les prélèvements ont eu lieu après 10 h et après 15 h 30 pour différencier la matinée et l'après-midi.

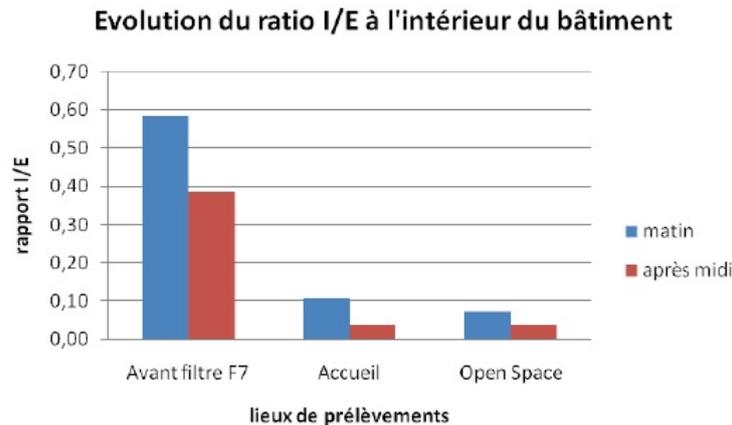


FIGURE 4.1 – Évolution du ratio Intérieur/Extérieur des charges fongiques [1]

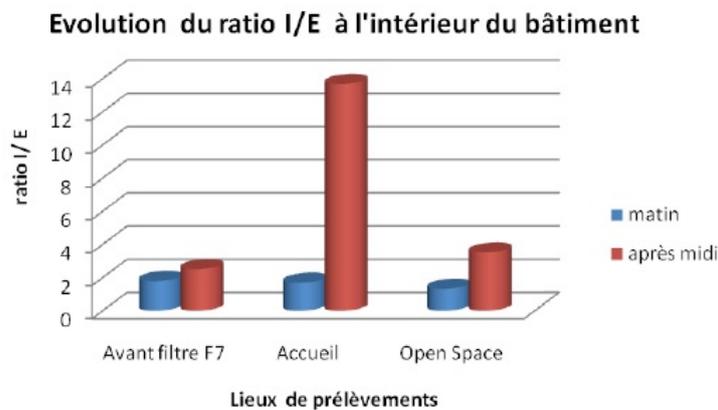


FIGURE 4.2 – Évolution du ratio Intérieur/Extérieur des charges bactériennes [1]

Pour la charge fongique représentée à la Figure 4.1, on constate que le système de filtration est efficace étant donné la forte diminution de celle-ci, mais les prélèvements ont également révélé, à l'intérieur du bâtiment, la présence d'une moisissure appelée *Aspergillus niger* qui n'était pas présente dans l'air extérieur. Cette moisissure se développe

dans la poussière et les filtres encrassés ce qui met en lumière l'importance du remplacement régulier des filtres. En effet, l'*Aspergillus niger* est à l'origine de manifestations broncho-pulmonaires allergiques et d'aspergilloses pulmonaires invasives chez les sujets immunodéprimés.

Pour la charge bactérienne représentée à la Figure 4.2, on constate une forte augmentation entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, et ce principalement l'après-midi. Cette augmentation peut être due à un développement bactérien dans le puits canadien lié à une mauvaise évacuation des condensats, mais également à la dispersion de la flore bactérienne humaine couplée à un faible taux de renouvellement d'air. Les endotoxines bactériennes sont à l'origine de réactions inflammatoires accompagnées de symptômes pseudogrippaux. Afin d'éviter le développement bactérien au sein du puits, il faudra s'assurer de manière régulière de la bonne évacuation des condensats et de l'absence de biofilm (mince couche visqueuse constituée de micro-organismes) au niveau du regard, principalement après l'été, car c'est à cette période que le phénomène de condensation a lieu au sein du puits.

Évaluation de l'activité volumique du radon

Le siège social de la société Millet étant construit dans le département des Deux-Sèvres (79) en France, une attention particulière est portée à la problématique du radon, car comme on peut le constater sur la carte (cf. Annexe C.1), la moyenne des concentrations de radon dans les bâtiments y est supérieure à 100 Bq.m^{-3} .

Les teneurs en radon au sein du bâtiment et de l'installation ont été contrôlées, grâce à la mise en place de capteurs, pendant deux mois en période de chauffe en différents points du système et des locaux. Les capteurs sont des dosimètres intégrés contenant un film sensible qui garde les traces des particules alpha provenant de la désintégration du radon.

Les lieux choisis pour les prélèvements sont :

- la prise d'air du puits canadien avant le passage dans les filtres. Cette mesure servira de référence pour le contrôle de la concentration en radon de l'air extérieur ;
- l'arrivée du puits canadien avant la VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) et le passage dans les filtres ;
- le local technique ;
- le milieu du bureau paysager ;
- l'espace d'accueil où l'air ne provient pas du puits canadien.

Cette campagne de mesures montre que les concentrations en radon sont inférieures à 100 Bq.m^{-3} à l'exception du local technique (116 Bq.m^{-3}), mais cette pièce n'est ni occupée ni ventilée. Le puits canadien ne semble pas augmenter la concentration en radon, ce qui tend à prouver une bonne étanchéité de celui-ci, car étant en dépression par rapport au terrain qui l'entoure, l'air du sol ne semble pas se mélanger à l'air extérieur acheminé par les tubes.

4.2 Étude sur la nettoyabilité des puits climatiques [2]

Les problèmes éventuels de qualité d'air imputables et/ou véhiculés par le puits climatique sont les suivants :

- développement fongique favorisé par les conditions intérieures du puits (phénomène de condensation, particules de matière) ;
- accumulation et transfert de radon liés à un problème d'étanchéité au niveau du réseau ;
- dégagement éventuel d'odeurs et de polluants gazeux au contact des tubes.

Toutefois, concernant ce dernier point, il y a peu d'études qui ont, à notre connaissance, été réalisées pour évaluer concrètement la contamination possible de l'air en COV au contact des différents matériaux utilisés pour les tubes.

Assurer la maintenance d'un puits climatique nécessite de considérer les différents composants constitutifs du puits. Cet aspect est décrit dans la deuxième partie de l'étude. Ainsi, quelques éléments du puits sont plus sensibles et méritent une vigilance particulière : c'est le cas de la prise d'air neuf et du dispositif d'évacuation des condensats. Pour ces éléments, la fréquence de contrôle et d'entretien est de 6 mois. Si aucun problème particulier n'est détecté, il est alors préconisé une inspection et un nettoyage du puits tous les 5 ans voire 10 ans selon les industriels. Par contre, en cas de problème au niveau du regard de collecte des condensats, il convient d'enlever les condensats présents et dans le même temps de réaliser l'inspection des réseaux.

Théoriquement, le nettoyage d'un puits climatique peut être réalisé selon trois techniques différentes :

- le brossage mécanique ;
- le nettoyage à haute pression utilisant l'air (aérocurage) ;
- le nettoyage à haute pression utilisant l'eau (hydrocurage).

Notons que quelques interrogations et réserves subsistent quant à un développement fongique lié à l'utilisation d'eau (technique de l'hydrocurage) pour nettoyer un réseau où passe de l'air.

Globalement, le brossage mécanique est une solution adaptée et même souvent conseillée pour toutes les installations "simples", c'est-à-dire les installations sans réseaux secondaires reliés à des collecteurs et ayant une bonne accessibilité aux deux extrémités du puits. Ces configurations se retrouvent en habitat, mais également en tertiaire. Effectivement, dans ce dernier cas, les tubes sont disposés selon plusieurs rangées et plusieurs profondeurs et vont déboucher sur des plénums. En revanche, en présence d'une configuration "boucle de Tichelmann" (configuration de réseaux secondaires raccordés à des collecteurs), les techniques basées sur un curage haute pression sont théoriquement les plus adaptées pour atteindre les réseaux secondaires.

La dernière partie de l'étude a été consacrée d'une part à l'élaboration d'un protocole

d'évaluation de la qualité sanitaire d'un puits et d'autre part, au suivi de la qualité d'air sur une installation datant de 2005. La qualité sanitaire de l'air a été appréhendée par des mesures de flore fongique de l'air, de radon et de COVT et ce, *a minima*, au niveau de la prise d'air neuf et en sortie de puits. De ce suivi, il ressort les principaux points suivants :

- le puits climatique n'entraîne pas d'augmentation de la concentration en radon dans le bâtiment ;
- le passage de l'air dans le puits climatique n'a pas d'incidence sur une augmentation de la concentration en COVT dans l'air apporté au bâtiment ;
- une charge fongique non négligeable présente en amont et en aval du puits climatique et témoignant d'une croissance favorable au niveau des conduits et/ou des plenums.

Parmi les espèces et genres recensés au niveau du puits, notons l'*Aspergillus Fumigatus*. Il s'agit d'une espèce d'origine tellurique qui ne doit, théoriquement, pas se retrouver dans l'air ambiant. Une mauvaise disposition de la prise d'air neuf, à savoir une proximité directe avec le sol et la végétation et une absence de filtration expliquent ce développement fongique. L'étude conclut qu'il est essentiel de modifier la prise d'air neuf de sorte à l'éloigner au maximum (hauteur supérieure à 1 mètre) du sol. Comme tout système aéraulique, le puits climatique n'est pas un système plus critique qu'un autre vis-à-vis d'un problème microbien. Par contre, comme tout système, des erreurs de conception, de mise en oeuvre voire de maintenance peuvent, à terme, avoir un impact négatif sur l'évolution de la qualité d'air.

4.3 Impact éco-énergétique et sanitaire d'un puits canadien sur une habitation ossature bois - TFE M.Jellad [3]

Dans le cadre de son travail de fin d'études, Mehdi Jellad, un ancien étudiant du département des sciences et technologies de la Haute École en Hainaut (anciennement ISIMs) a fait réaliser des prélèvements sur le puits canadien qui y est installé et sur lequel est basée cette thèse.

Une première étude consistant en une observation au niveau de l'entrée et de la sortie des tuyaux a été réalisée et a permis de constater la présence de terre, pollen, etc. à l'entrée des tuyaux. De plus, les raccords permettant l'étanchéité des tuyaux ne sont pas lisses et pourraient être à l'origine d'une stagnation des condensats provoquant la prolifération de bactéries et de moisissures.

Il est important de spécifier que le puits canadien étant fort proche de la nappe phréatique, un système d'évacuation des condensats n'a pas pu être mis en place et qu'il faut utiliser une pompe vide cave pour les évacuer. Ce type de pompe ayant besoin d'être amorcée, une faible quantité d'eau, ne pouvant être évacuée, restera toujours au fond du puits.

Analyse et prélèvements

Les prélèvements ont eu lieu à plusieurs dates et en des endroits bien définis(cf. Annexe C.2) :

- à la borne de prise d'air du puits afin de servir de référence pour la teneur dans l'air extérieur ;
- dans une chambre de visite située à la sortie du puits canadien, mais avant l'entrée dans la VMC ;
- dans le local technique étant alimenté en air par la VMC (donc après le passage de l'air au sein de la VMC et des filtres).

Afin de s'assurer de la bonne fabrication du milieu de culture, un milieu de culture vierge, non exposé (NE) à l'air, a aussi été étudié.

Deux appareils ont été utilisés pour les prélèvements. Premièrement, l'aérobiocollecteur de la marque Air idéal qui permet de quantifier la présence de bactéries, levures et moisissures et aspire 80 litres d'air par mesure. Deuxièmement, le RCS high flow qui quantifie la présence de levures et de moisissures et aspire 100 litres d'air par mesure.

Deux prélèvements ont été réalisés avec chaque appareil afin de les faire incuber à des températures différentes. Avec l'aérobiocollecteur, la première série de prélèvements a subi une incubation à 22 ± 2 °C pendant 72 heures et la deuxième série, une incubation à 30 ± 1 °C pendant 48 heures. Avec le RCS high flow, la première série de prélèvements a subi une incubation à 46 °C pendant 48 heures et la deuxième série, une incubation à 20 °C pendant 120 à 170 heures.

Résultats - Aérobiocollecteur (cf. Annexe C.2)

Ces mesures s'expriment en germes totaux, c'est-à-dire l'ensemble des germes présents dans le volume d'air prélevé. L'unité est le "NPP Coll. m^{-3} " qui représente le nombre le plus probable de germes collectés par m^3 . Ces prélèvements mettent en évidence la présence de levures, bactéries et moisissures. Aucune levure et très peu de bactéries ayant été détectées, cela signifie que les résultats s'appliquent presque essentiellement à la quantité de moisissures présentes.

Les résultats obtenus pour les tests 1 et 2 ne montrent pas une augmentation significative du nombre de germes. Il faut mettre ceci en relation avec les dates de prélèvement sachant que les germes apparaissent principalement suite à la présence de condensats non évacués dans le puits et qu'aux dates des tests 1 et 2, le phénomène de condensation au sein du puits ne devait pas être très important. Par contre, le test 3 révèle une augmentation de la quantité de germes présents en sortie de puits, ce qui tend à prouver qu'il y a bien prolifération au sein du puits et la date du test nous renseigne que celle-ci a bien lieu au début de la période estivale, quand le phénomène de condensation a commencé. Les résultats obtenus au niveau du local technique montrent également que la présence de filtres a un effet bénéfique sur la diminution du nombre de germes présents et ce bien qu'ils ne soient pas destinés à cette application.

Résultats - RCS high flow (cf. Annexe C.2)

Les résultats issus des prélèvements permettent de chiffrer la charge de moisissures en PNC (Particules donnant Naissance à Colonies) et d'en identifier les différents types. Le type de moisissures n'est pas dénombré précisément, mais caractérisé proportionnellement à la charge.

Vu la diminution de la charge après passage dans les filtres, on peut constater leur effet bénéfique pour la qualité de l'air au sein du local technique. Par contre, on constate l'apparition de certaines moisissures qui n'étaient pas présentes dans l'air extérieur alors qu'elles le sont en sortie du puits canadien au niveau de la chambre de visite, ce qui tend à prouver qu'un développement des moisissures a bien eu lieu au sein du puits.

Moisissures rencontrées

Aspergillus fumigatus

L'*Aspergillus fumigatus* est une espèce thermotolérante et thermophile qui se développe entre 12 et 57°C dans des milieux humides comme des conduits de ventilation, des humidificateurs ou sur des matériaux de construction humides.

Cette espèce produit un grand nombre de mycotoxines pouvant être dangereuses pour la santé en occasionnant, par exemple, des infections aiguës et chroniques du système respiratoire, des réactions allergiques, etc.

Cladosporium sp. et Cladosporium herbarum

Ces deux espèces se développent de façon optimale entre 18 et 28 °C et se retrouvent souvent dans l'air intérieur, sur la nourriture, les fenêtres humides, etc.

Le *Cladosporium* a la capacité de sporuler fortement ce qui en fait un des allergènes fongiques inhalables les plus importants. Il est responsable de problèmes d'asthme et de la fièvre des foins, mais est généralement non pathogène.

Penicillium sp.

Le *Penicillium sp.* est une espèce mésophile se développant entre 5 et 37 °C avec un optimum entre 20 et 30 °C, on le retrouve dans le sol, le bois, les matériaux endommagés par l'eau ou la poussière domestique.

Cette espèce est une des plus répandues en milieu intérieur et peut contribuer à des problèmes de santé comme des maux de tête, une irritation des yeux, du nez, de la gorge, etc.

Ulocladium

Le développement de cette espèce a lieu entre 5 et 34 °C et exige un haut niveau de moiteur pour germer et proliférer. Toutefois, elle peut survivre à de courtes périodes de sécheresse. Rarement pathogène pour les humains, ce mycète est tout de même un élément allergène.

4.4 Mesures expérimentales de la qualité de l'air intérieur et des micro-organismes en suspension dans l'air dans une maison très basse énergie équipée d'un puits canadien dans la région froide du Japon [4]

Cette étude a été menée durant 3 ans pour évaluer le niveau de contamination microbienne de l'air intérieur de deux résidences équipées d'une ventilation mécanique contrôlée avec récupérateur de chaleur et situées dans la ville de Kimobetsu à Hokkaido, au Japon. L'analyse de l'air a été réalisée en trois volets. Premièrement, les auteurs ont évalué la qualité de l'air intérieur et la concentration microbienne en comparant les concentrations de particules (PM10 et PM2,5), de dioxyde de carbone, de bactéries et de champignons dans l'air intérieur et l'air extérieur au printemps, en été et en hiver. Deuxièmement, la concentration microbienne à l'intérieur d'un puits canadien et du récupérateur de chaleur a été évaluée en analysant l'air d'alimentation. Troisièmement, les auteurs ont évalué la possibilité d'une contamination microbienne à l'intérieur du puits canadien en utilisant l'indice fongique et en mesurant la température et l'humidité relative au niveau du flux d'air de sortie du puits.

Les résultats ont montré que la concentration totale de champignons dans l'air était plus élevée en été qu'au printemps ou en hiver et que les genres de champignons *Cladosporium sp.* et *Penicillium sp.* étaient dominants dans les échantillons. En outre, il a été constaté que l'environnement à l'intérieur du puits canadien permettait une croissance facile des champignons de mai à septembre, l'indice fongique le plus élevé étant mesuré en août.

4.5 Enquêtes microbiennes et mesures des allergènes dans les puits canadiens [5]

L'objectif de cette étude est de déterminer si une croissance microbienne se produit à l'intérieur des tubes des puits canadiens et si des effets néfastes sur la santé doivent être envisagés.

Afin de refléter la diversité des installations présentes en Suisse, 12 puits canadiens de bâtiments de différentes tailles et fonctions (école, maison unifamiliale, immeuble de bureaux, bâtiments commerciaux) ont été étudiés. Les systèmes de tuyaux et gaines utilisés dans ces installations varient en âge (1 à 13 ans de fonctionnement), en taille, en conception, en termes de matériaux (béton ou plastique) ainsi qu'au niveau de la qualité des filtres présents dans les unités de récupération de chaleur.

4.5.1 Prélèvements et analyses

Sur chaque puits canadien, plusieurs sites de prélèvement représentés sur la Figure 4.3 ont été sélectionnés afin de déterminer les concentrations et les genres de micro-organismes

dans l'air extérieur (a), dans l'air à l'extrémité des tubes (e) et dans l'air d'alimentation (f).

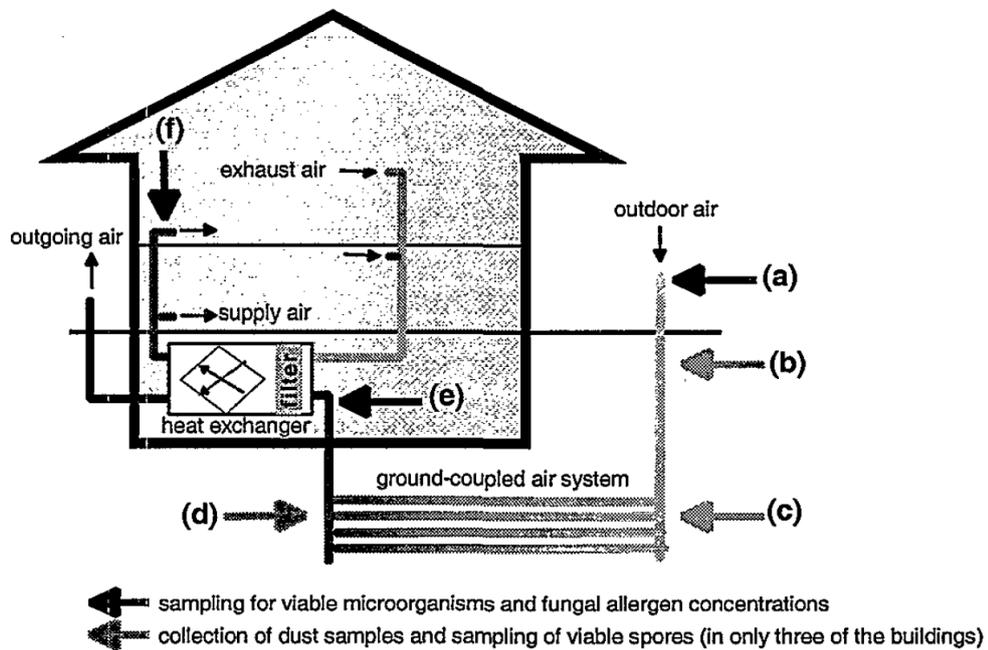


FIGURE 4.3 – Schéma représentant les sites de prélèvement de l'étude [5]

Trois bâtiments (maison unifamiliale, immeuble de bureaux, école) ont été échantillonnés chaque trimestre pour couvrir les changements saisonniers. Pour une meilleure estimation de l'exposition aux allergènes des moisissures *Alternaria* et *Cladosporium* par des patients allergiques, les concentrations d'allergènes ont été mesurées en plus des concentrations de spores viables dans quatre puits canadiens au printemps, en été et à l'automne (sur les sites a, e, f). Une spore viable est une spore capable de germer lorsque les conditions d'humidité et de température sont favorables au développement de l'espèce de fungi dont elle est issue.

Dans trois bâtiments, un échantillonnage supplémentaire été effectué aux sites b et d afin d'étudier l'influence des longs tubes, des courbes et angles sur les concentrations de micro-organismes en suspension dans l'air.

Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un échantillonneur à fentes couplé à une boîte de pétri remplie de gélose spécifique pour chaque type de micro-organisme (fungi ou bactérie). En plus, des impacteurs liquides à plusieurs étages remplis de solution saline tamponnée ont été utilisés pour l'échantillonnage sélectif par taille des spores viables et des fractions de spores contenant des allergènes fongiques.

Les spores viables recueillies ont ensuite été déterminées en plaçant des échantillons de 1 ml de solution sur des boîtes de pétri gélosées. L'ensemble des boîtes fungi réalisées à

l'aide des 2 types d'échantillonneurs ont été incubées à température ambiante pendant cinq jours, les colonies ont été comptées et identifiées jusqu'au genre.

Les boîtes bactéries ont été incubées à 30 °C et les colonies ont été regroupées en fonction de leur morphologie. Tous les résultats ont été exprimés en unités formant des colonies par m³ d'air ($CFU.m^{-3}$).

Pour la quantification des allergènes fongiques aéroportés, un test ELISA pour *Cladosporium herbarum* et *Alternaria tenuis* avec des sérums de patients allergiques a été utilisé. Les résultats sont exprimés en unité biologique (BU) par m³ d'air.

Les échantillons de poussière aux deux extrémités des puits canadiens (c, d) ont été collectés à l'aide d'un aspirateur équipé d'un accessoire ALK (Allergological Laboratory, Danemark) pour collecter la poussière sur un filtre en fibre de verre. Les échantillons de poussières ont ensuite été mis en suspension dans une solution saline tamponnée et analysés pour détecter les spores viables, la concentration en protéines (Lowry Protein Assay) et la teneur en allergènes (ELISA). Les résultats sont exprimés en CFU , mg de protéines ou $BU.g^{-1}$ de poussière.

4.5.2 Résultats et conclusions

Les résultats démontrent qu'aucune croissance fongique ou bactérienne nocive ne se produit à l'intérieur du puits canadien et que les concentrations de spores viables et de bactéries dans l'air, à quelques exceptions près, diminuent même après le passage dans le système de tuyaux. D'autre part, les mesures des concentrations d'allergènes des moisissures extérieures *Cladosporium* et *Alternaria* ont montré que même si aucune concentration ou seulement de faibles concentrations de spores viables dans l'air sont trouvées à la sortie du puits et après le passage dans le filtre, les allergènes sont toujours présents. Les concentrations d'allergènes sont généralement plus faibles dans l'air soufflé que dans l'air extérieur, mais ceux-ci peuvent quand même contribuer à une réaction allergique.

Aucune différence n'a été constatée entre les systèmes de tuyaux de différents matériaux ou âges. Cependant, la taille du système et le débit d'air total semblent avoir une influence sur la diminution de la concentration de micro-organismes viables. De grandes différences ont ainsi été observées entre les maisons unifamiliales et les grands bâtiments.

4.6 Performance d'un puits canadien (refroidissement) et caractéristiques de la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment [6]

Cette étude souhaite comprendre les performances de refroidissement et les caractéristiques liées à la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment connecté à un puits canadien en réalisant le monitoring d'un ensemble de paramètres. Des corrélations sont également effectuées pour comprendre l'influence que peuvent avoir certains de ces paramètres sur les autres.

4.6.1 Site d'étude

L'étude a été réalisée dans la maison d'exposition témoin "Prana" installée au Bangalore International Exhibition Center (BIEC), Bangalore, Inde. Le BIEC est localisé à la périphérie nord-ouest de la ville, à l'écart des sources de pollution atmosphérique générée par celle-ci. Le bâtiment était très peu occupé avec seulement des visites pour la collecte de données, des visiteurs de la maison témoin ainsi que l'équipe de nettoyage.

Le puits canadien qui équipe la maison témoin est constitué d'un tuyau en polypropylène de 72 m de long et de 400 mm de diamètre, enterré à 4,2 m de profondeur. La température moyenne de la terre à cette profondeur est de 24 °C dans la ville de Bangalore. La prise d'air du tunnel est située à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol et est entourée d'une bonne végétation. Le débit d'air dans les différentes pièces est contrôlé par des clapets motorisés. L'air, après avoir refroidi la maison, s'échappe par les ouvertures et les petits trous dans l'enveloppe du bâtiment.

4.6.2 Protocole de monitoring

Le bâtiment est équipé d'un système de monitoring reprenant un ensemble de capteurs qui ont permis de collecter de manière continue les paramètres de l'air intérieur, à savoir la température, l'humidité relative, et la concentration de CO₂, CO et PM. La température d'entrée et de sortie de l'air dans le tunnel du puits canadien et la température du sol à une profondeur de 4,2 m ont également fait l'objet d'un suivi.

De manière plus spécifique, les concentrations en particule ont été collectées du 9 septembre au 11 octobre 2012. Celles-ci ont été mesurées à une hauteur de 0,8 m par rapport au sol. Le spectromètre aérosol GRIMM (modèle 1.108) a été utilisé pour surveiller les PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁ à travers 15 canaux allant de 0,3 à 20 μm avec un intervalle de temps de 5 minutes. L'appareil était équipé d'une tête d'échantillonnage à symétrie radiale conforme à la norme EN 481. La vitesse d'entrée de l'air dans l'appareil était constante et de 1,25 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ au niveau de la fente d'ouverture. L'instrument utilise la technique de diffusion de la lumière pour compter et classer les particules.

4.6.3 Résultats et conclusions

Le puits canadien a réduit la température moyenne diurne de l'air intérieur de 1,2 °C. Il a permis d'accélérer la diminution de la concentration de CO₂ produit à l'intérieur. Lorsque le puits était en fonctionnement, tous les paramètres liés à la qualité de l'air intérieur contrôlé étaient conformes aux normes nationales.

Concernant les particules, les concentrations étaient plus élevées lorsque le puits était en fonctionnement. Ceci est dû à la remise en suspension des particules causée par l'augmentation du mouvement de l'air intérieur lorsque le puits était en fonctionnement. Les valeurs relevées dans la maison témoin sont légèrement plus faibles que celles des milieux ruraux à faible trafic routier sauf lors de la présence de l'équipe de nettoyage.

La Figure 4.4 représente la tendance diurne des concentrations de PM et de l'humidité relative pour 1 jour. Les tendances pointées par ce graphique sont représentatives des autres jours.

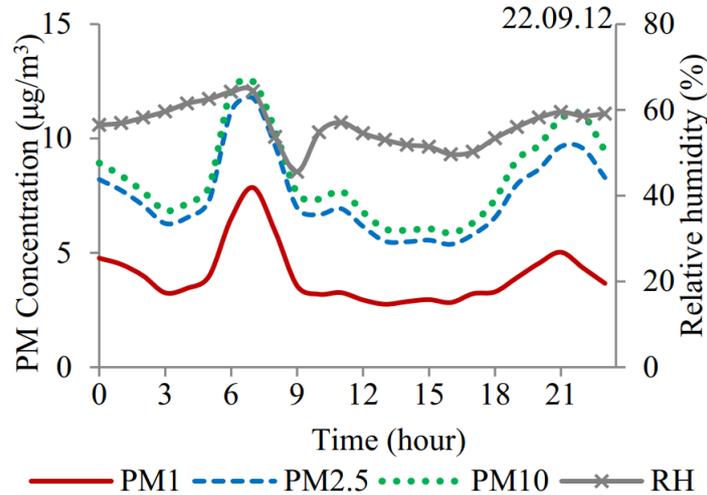


FIGURE 4.4 – Évolution journalière des PM et de l'humidité relative [6]

Les concentrations de PM augmentent avec l'augmentation de l'humidité relative et diminuent lorsque l'humidité relative diminue.

Il y a donc une corrélation positive entre l'humidité relative et les particules de différentes tailles. En effet, l'humidité favorise la croissance des particules et certaines particules peuvent être de nature hygroscopique. Ces particules passent de particules ultrafines à des particules fines (PM1) et grossières (PM2,5 et PM10).

L'auteur met également en évidence une corrélation négative entre les concentrations de PM et la température de l'air en raison du changement de phase des particules semi-volatiles, qui passent de solide à gaz avec une augmentation de la température et vice versa. Les concentrations de PM de différentes tailles ont des corrélations très élevées entre elles, ce qui indique qu'elles sont influencées par les mêmes facteurs.

4.7 Conclusion

Les principaux paramètres pris en compte pour l'analyse de la qualité de l'air sont le radon, le CO₂ et l'analyse des fungi et bactéries. Si l'analyse des PM10 et PM2,5 permet d'évaluer la charge en micro-organismes, elle n'est pas suffisante pour évaluer correctement le risque sanitaire lié à ceux-ci.

Les différentes analyses microbiologiques réalisées privilégient pour la collecte des échantillons un aéro-biocollecteur couplé à une boîte de Pétri contenant un milieu nutritif

gélifié [1, 2, 3, 4, 5]. Les températures d'incubation des boîtes de pétri sont de 30-37 °C et 20- 25 °C.

Les points de collecte principaux sont la prise d'air du puits comme référence pour l'air extérieur et la sortie du puits comme référence pour l'air intérieur. L'air à la sortie du puits, mais avant le passage dans le filtre, a également été testé dans trois études [1, 3, 5] afin d'évaluer l'efficacité des filtres.

Les résultats des études présentés dans ce chapitre montrent notamment grâce à l'indice fongique que le puits canadien est un milieu favorable aux développements des moisissures en été à l'exception de [5] qui ne constate pas d'augmentation de la charge microbienne entre le milieu extérieur et l'air sortant du puits avant le passage dans les filtres.

Le développement des moisissures est dû à la présence de condensats dans le puits. Parmi ces moisissures, la présence d'*Aspergillus niger* ou d'*Aspergillus fumigatus*, toutes deux impliquées dans des infections respiratoires chroniques, a été constatée dans l'air intérieur alors qu'elles ne sont pas présentes dans l'air extérieur. Ces deux fungi ont également été retrouvés dans les poussières présentes dans le puits. L'importance des filtres dans la diminution de la charge microbienne a été mise en avant.

Deuxième partie

Configuration expérimentale et résultats numériques

Le puits canadien est réalisé en PEHD (Polyéthylène Haute Densité) et se compose d'un élément d'aspiration associé à un puits vertical de 375 mm de diamètre qui s'enfonce dans le sol jusqu'à une profondeur de 1,25 m. Il est ensuite divisé en deux tuyaux de 25 m de long chacun ayant un diamètre intérieur de 140 mm et formant un angle pour assurer une distance de 1 m entre eux et ainsi éviter qu'un tuyau n'influence la température du sol autour du second tuyau. Une pente de 3 % assure l'évacuation des condensats.

Compte tenu de la disposition du puits, à peu près à mi-chemin de leur parcours horizontal, les tuyaux font un angle horizontal de 90° illustré à la Figure 5.3. À la fin de leur parcours horizontal, ils se rejoignent dans un puits vertical de 375 mm de diamètre et de 2 m de profondeur et dans lequel s'accumulent les condensats comme représenté à la Figure 5.2. Si nécessaire, les condensats sont évacués à l'aide d'une pompe vide-cave installée à cet effet, mais aucun système de monitoring n'est en place pour mesurer les quantités de condensats évacuées. Une fois que l'air sort de ce puits vertical, il entre dans le vide sanitaire du bâtiment par un tuyau entièrement isolé (pour réduire les échanges de chaleur) et est ensuite aspiré par un système de ventilation mécanique contrôlée avec récupération de chaleur et filtres, qui pulse cet air dans un local témoin.

Il convient de noter que la profondeur de l'installation n'est pas optimale. Le puits canadien devrait avoir une profondeur moyenne d'environ 2,25 m, alors que l'installation a été réalisée à une profondeur moyenne de 1,625 m. La température du sol varie donc davantage au cours de l'année et le potentiel de refroidissement en été et de préchauffage en hiver est réduit. C'est la présence de la nappe phréatique qui a imposé la limitation de la profondeur du puits canadien, car bien que l'étanchéité à l'eau et au radon de celui-ci soit assurée par des gaines thermorétractables, il était techniquement difficile de creuser sous le niveau de la nappe phréatique. La présence de cette dernière a néanmoins un effet positif, car elle favorise les échanges entre le puits canadien et le sol.

La vitesse du ventilateur étant maintenue constante tout au long de l'année, les pertes de charge de l'installation variant peu, le débit d'air sera considéré comme constant. La valeur mesurée est de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.



FIGURE 5.2 – Sortie du puits canadien



FIGURE 5.3 – Tuyaux composant le puits canadien

5.2 Système de mesure

L'installation est équipée de thermocouples étanches et blindés afin d'éviter toute erreur de mesure due à la condensation sur le thermocouple. Ils sont de type "T" 6 x 150 mm gaine inox avec bornier étanche et tête PVC. Le raccordement est de type "M20" et se fait par un presse-étoupe PVC adapté. Le câble de compensation est également de type "T" 2 x 1,34 mm² isolé en PVC avec une feuille d'aluminium moussante interne. Il est possible de mesurer la température du sol, de l'air extérieur, à différents endroits du puits et évidemment à la sortie du puits lui-même.

Un thermocouple de type "T" est composé de cuivre et de constantan (alliage de cuivre et de nickel). Sa précision est très importante, et l'erreur standard est de l'ordre de 0,1 °C.

Le débit d'air est mesuré deux fois par mois au niveau de la grille de soufflage avec un entonnoir et un anémomètre.

5.3 Type de sol étudié

Le sol dans lequel a été placé le puits canadien est essentiellement composé de remblai. Cette composition de sol est due à l'histoire de Mons dont une partie des terres fut aménagée en marais pour se protéger des envahisseurs. La ville a ensuite été fortifiée à plusieurs reprises et les fortifications ont parfois été détruites au gré des différentes gouvernances de Mons.

Compte tenu de la réalisation d'une campagne géotechnique, due aux travaux liés à la canalisation d'une rivière proche "Le Trouillon", la profondeur de la nappe phréatique (2,5 m) et la composition du sol au niveau du puits sont connues [25]. Il est composé d'un remblai brun sablo-caillouteux, dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 5.1.

Les résultats obtenus par le sondage au pénétromètre statique en P1 et ceux obtenus par les forages à la tarière motorisée F1 et FR1 permettent de connaître les caractéristiques du sol situé autour du puits canadien (cf. Annexe D.2).

La densité a été mesurée lors de la campagne géotechnique, les autres caractéristiques ont été choisies en fonction de la nature du sol [137]. Une étude de sensibilité sur la capacité thermique et la conductivité thermique sera présentée au point 6.5.3.

Propriétés du sol	
$c [J.kg^{-1}.K^{-1}]$	1000
$\rho [kg.m^{-3}]$	1800
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,58
$a [m^2.s^{-1}]$	$3,222.10^{-7}$
ϵ	0,95

TABLE 5.1 – Propriétés physiques considérées pour le sol

5.4 Relevés expérimentaux

Toutes les 15 minutes, le système de mesure enregistre la température extérieure, la température du sol à 2 m de profondeur, les températures dans chaque tuyau tous les 5 m et la température à la sortie du puits. Pour limiter les données de simulation, une moyenne des mesures a été effectuée pour obtenir des valeurs horaires. La sonde mesurant la température du sol est située entre les tuyaux, mais plus profondément. La distance entre la sonde et les tuyaux est de 70 cm, le résultat de la mesure est donc impacté par la présence des tuyaux. Normalement, la moyenne annuelle de la température extérieure (12,4 °C) et celle de la température du sol (14,6 °C) devraient être les mêmes.

Le puits fait l'objet d'un suivi depuis juin 2014. Pour cette étude, l'année de référence est l'année 2015, car c'est la première année de mesures complète. Afin de limiter l'impact du choix des valeurs initiales dans les modèles numériques, les relevés, repris sur la Figure 5.4, commencent le 01 décembre 2014 à 01 h 00, ce qui correspond à l'heure - 743. Le 01 janvier 2015 à 00 : 00 h est pris comme référence à 0 heure et le 01 janvier 2016 à 00 : 00 h correspond à l'heure 8760.

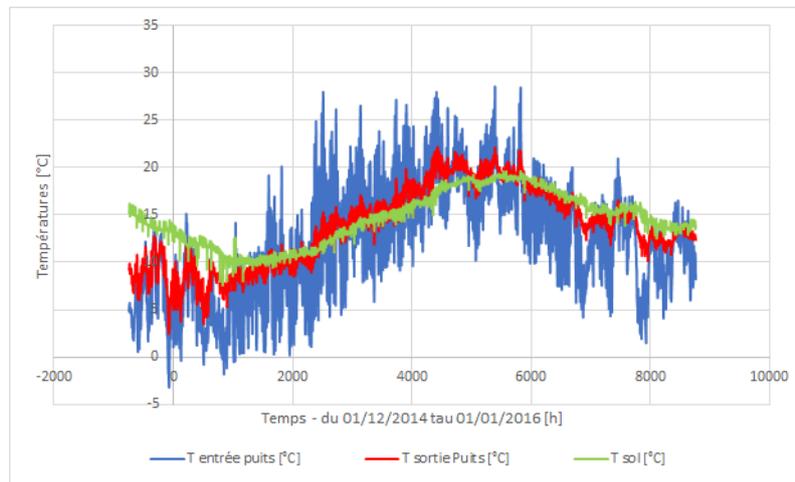


FIGURE 5.4 – Température du sol mesurée à 2 m de profondeur et températures d'entrée et de sortie du puits canadien durant la période du 01/12/2014 au 01/01/2016.

5.5 Débit et vitesse de l'air à l'intérieur du puits

L'installation étant en fait composée de deux tubes, il est intéressant d'observer l'évolution de la température à l'intérieur de chaque tube. Pour cela, nous avons comparé les températures aux sondes 8.3 et 8.4, toutes deux placées à une distance de 11,20 m de l'entrée du puits et illustrées à la Figure 5.1.

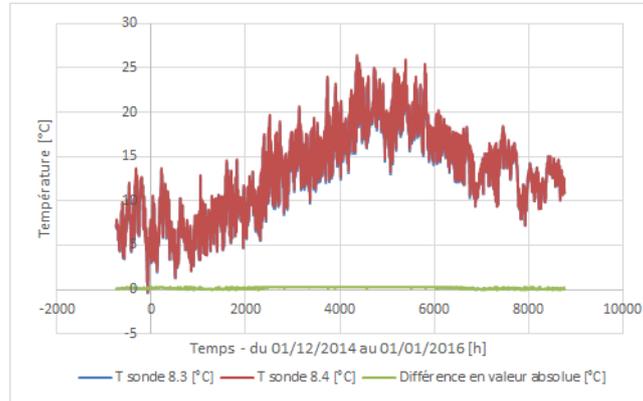


FIGURE 5.5 – Températures aux sondes 8.3, 8.4 et différence absolue entre ces mesures pendant la période du 01/12/2014 au 01/01/2016.

La Figure 5.5 montre que les températures données par ces deux sondes sont très proches et on peut en conclure que les phénomènes (notamment les transferts thermiques) sont identiques à l'intérieur de chaque tuyau. La vitesse de l'air à l'intérieur des tuyaux étant la seule inconnue influençant le transfert de chaleur, elle doit avoir une valeur assez proche dans les deux tuyaux, et on peut dire que le débit est uniformément réparti à l'intérieur des tuyaux.

Le débit d'air total mesuré circulant dans le puits est de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, nous considérons donc qu'un débit d'air de $125 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ circule à l'intérieur de chaque tuyau.

Chapitre 6

Modélisations numériques - Construction du modèle et principales hypothèses

La modélisation est décomposée en deux modèles principaux, les différentes simulations sont effectuées à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics couplé au logiciel MATLAB permettant la définition de routines complexes. Un premier modèle principal doit permettre d'évaluer les transferts de chaleur et de masse pour caractériser les volumes et températures des condensats qui apparaissent dans le puits au cours du temps. Ce modèle doit également étudier l'écoulement de ces condensats afin d'identifier à chaque instant le volume et la température des condensats qui arrivent à la fin du puits. Pour établir celui-ci et le valider, différentes étapes ont été réalisées dont les premières négligent les transferts de masse. Étant donné que les transferts de masse sont assez faibles et influencent donc peu les températures en sortie de puits, la validation des modélisations s'est basée sur une comparaison entre les températures de sortie mesurées et simulées sans transfert de masse.

Un deuxième modèle principal a ensuite été réalisé pour étudier plus particulièrement la fin du puits où aura lieu l'arrivée des condensats. C'est à cet endroit que les condensats vont stagner et créer un biotope propice au développement des micro-organismes. Ce deuxième modèle permettra de caractériser ce biotope en température et en volume en prenant en compte l'arrivée des condensats du puits et les transferts de masse avec l'air de ventilation.

6.1 Récapitulatif des modèles développés

Pour bien définir les objectifs des différents modèles réalisés, un récapitulatif de ceux-ci est présenté ci-dessous. Ces modèles sont détaillés dans la suite de ce chapitre, ainsi

qu'aux chapitres 7 et 8.

6.1.1 Modélisation de la partie horizontale du puits ¹

Modèles numériques 3D sans transfert de masse

Les deux modèles 3D développés, présentés au point 6.3, appelés modèle 3D complet et modèle 3D simplifié ont été réalisés afin de comparer les résultats entre eux, avec le modèle pseudo 3D sans transfert de masse et avec les données expérimentales pour vérifier l'hypothèse simplificatrice permettant de ne pas considérer les parties verticales et les coudes du puits. Ils ont également permis de valider le principe de la symétrie utilisée dans le modèle pseudo 3D sans transfert de masse.

Modèle pseudo 3D sans transfert de masse

Ce modèle détaillé au point 6.4 a servi de base au modèle permettant la résolution de la partie horizontale du puits. Il ne considère qu'une zone non saturée de sol et néglige la présence des coudes au sein du puits ainsi que les parties verticales. Une analyse de sensibilité a été réalisée sur ce modèle, elle est reprise au point 6.5. Une des conclusions essentielles de cette analyse a mis en évidence que le fait de considérer le niveau de la nappe phréatique comme frontière du domaine en lui imposant une température constante toute l'année influence trop fortement les résultats.

Modèle pseudo 3D intégrant les transferts de masse

Le modèle décrit au point 7.1 fait suite au modèle pseudo 3D sans transfert de masse dont les hypothèses simplificatrices ont été validées par les modèles numériques 3D. Les résultats de l'analyse de sensibilité ont montré l'importance de l'emplacement de la nappe phréatique. Ce modèle intègre donc une zone saturée sous la zone non saturée et ayant comme limite la nappe phréatique. Les propriétés physiques de ces zones ont été choisies en lien avec le type de sol présent sur le site.

Les transferts de masse sont intégrés à ce modèle. Cela n'a pas un impact significatif sur les températures de l'air en sortie de puits, car les transferts de masse sont faibles, ils influencent peu les températures de sortie, mais cela permet de définir la quantité de condensats produits dans le puits.

Modèle final - Partie horizontale du puits

Le modèle final de la partie horizontale du puits développé au point 7.3 reprend le modèle pseudo 3D intégrant les transferts de masse et calcule l'écoulement des condensats dans le puits. Une analyse paramétrique de ce modèle, présentée au point 7.4 a été réalisée.

1. Bien que la plus longue partie du puits présente une pente, le qualificatif "horizontal" est utilisé pour y faire référence

Ce modèle va permettre de disposer des températures et de l'humidité absolue de l'air ainsi que de la température et de la quantité des condensats à chaque instant en sortie de la partie horizontale du puits.

6.1.2 Modélisation de la partie finale du puits

Modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits

Le modèle 3D stationnaire exposé au point 8.1 a pour objectif de définir l'écoulement de l'air à l'interface condensats/air. Cet écoulement influence les échanges de chaleur et de masse entre l'air sorti de la partie horizontale du puits et les condensats. La hauteur des condensats varie à chaque pas de temps et un modèle 3D complet instationnaire de l'ensemble demanderait un temps de calcul trop important. On a donc évalué les phénomènes pour différentes hauteurs de condensats de manière stationnaire afin de disposer d'une loi qui lie la hauteur des condensats en fin de puits et la vitesse d'écoulement de l'air à l'interface condensats/air.

Modèle de la température des condensats en fin de puits

Ce modèle présenté au point 8.2 permet de calculer la température des condensats présents à la fin du puits. C'est un modèle 3D instationnaire conductif qui peut ou pas tenir compte des échanges convectifs et des transferts de masse ayant lieu à l'interface condensats/air en modifiant les conditions limites de la frontière représentant cette interface. Pour prendre en compte les transferts convectifs et les transferts de masse, il est nécessaire de déterminer le coefficient de convection présent à cette interface, lui-même fonction du type de convection rencontrée (forcée, mixte ou naturelle). Dans le cas d'une convection mixte ou naturelle, les températures des condensats doivent être connues pour évaluer le coefficient de convection. Un algorithme itératif permet de résoudre ce problème en appelant le modèle de la température des condensats en fin de puits et en faisant varier la condition limite à l'interface condensats/air.

Modèle de la fin de puits

Le modèle de la fin du puits détaillé au point 8.4 a comme données d'entrée les résultats du modèle final sur la partie horizontale du puits. Il prend en compte la loi déterminée par le modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits et les températures de condensats obtenues via le modèle de la température des condensats en fin de puits. Il peut déterminer pour chaque pas de temps un coefficient de convection en fonction du type de convection dominante (forcée, mixte ou naturelle) et estimer les transferts de masse à l'interface condensats/air. Avec ces données, il définit la température des condensats et le volume de condensats présent en fin de puits pour chaque pas de temps.

6.2 Matériels informatiques utilisés pour la résolution des modèles

La résolution des modèles a été réalisée sur plusieurs ordinateurs, un ordinateur plus performant pour les modèles nécessitant des ressources importantes (modèle instationnaire, maillage fin) et des ordinateurs moins performants pour tester la résolution des modèles à l'aide de maillage moins précis. Les temps de calcul sont repris sur base de l'ordinateur performant. Les caractéristiques de cet ordinateur sont :

- Processeur CPU : AMD Ryzen Threadripper 1950X 16-Core Processor 3,40 GHz
- GPU : Quadro M2000 - Integrated RAMDAC - 4 Go
- Mémoire RAM : 64,0 Go

6.3 Modèles numériques 3D sans transfert de masse

Un modèle complet (Modèle 3D complet) et un modèle simplifié (Modèle 3D simplifié) ont été réalisés afin de comparer les résultats entre eux et avec les données expérimentales pour vérifier l'hypothèse simplificatrice permettant de ne pas considérer les parties verticales et les coudes du puits. De cette façon, la modélisation du puits pourrait se faire en ne modélisant en 2D qu'un seul conduit discrétisé sur sa longueur, appelé modèle pseudo 3D.

Pour modéliser le transfert de chaleur et l'écoulement des fluides dans notre système, les modèles 3D utilisent les modules "physique" disponibles dans le logiciel COMSOL. Le module "transfert de chaleur dans le solide" pour modéliser le comportement thermique du sol qui résout l'équation de Fourier-Kirchhoff et "transfert de chaleur dans le tube" pour la modélisation du puits qui modélise le transfert de chaleur par conduction et convection dans des conduites représentées en 1D. L'écoulement n'a pas été résolu, le champ de vitesse de l'air dans les canalisations étant considéré connu et uniforme en tout point. Ce modèle considère une résistance de film interne caractérisée par un nombre de Nusselt de 3,66 (calcul de la couche limite visqueuse) pour les sections circulaires et un transfert de chaleur conductif au sein du matériau composant le tube.

Le sol est assimilé à un milieu homogène continu et non saturé. Sa profondeur est limitée à 2,5 m et correspond à la nappe phréatique.

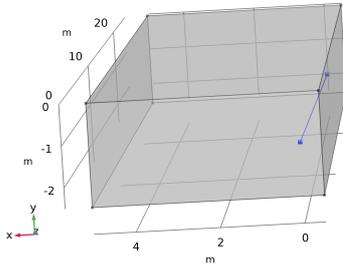


FIGURE 6.1 – Modélisation 3D, Modèle 3D simplifié

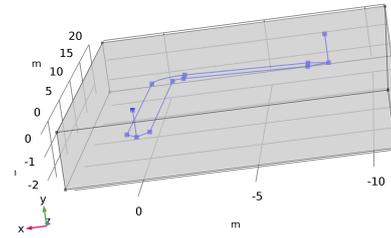


FIGURE 6.2 – Modélisation 3D, Modèle 3D complet

Le modèle 3D complet, représenté sur la Figure 6.2, a une profondeur de 2,5 m, une largeur de 14 m et une longueur de 23 m. Le modèle 3D simplifié, représenté sur la Figure 6.1, a une profondeur de 2,5 m, une largeur de 5,5 m et une longueur de 25 m.

6.3.1 Condition initiale des modèles 3D

La condition initiale du sol est définie comme suit, la température de la matrice du sol a été définie comme étant égale à la température du sol à 1 m de profondeur le 1er décembre 2014, date du début de la simulation. Elle est donc de 15,2 °C.

6.3.2 Conditions aux limites des modèles 3D

Les différentes conditions aux limites des modèles 3D sont identifiées sur les Figures 6.3 à 6.11 et détaillées ensuite.

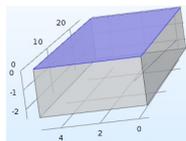


FIGURE 6.3 – Conditions limites du modèle 3D simplifié - Frontière 1

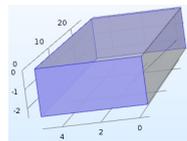


FIGURE 6.4 – Conditions limites du modèle 3D simplifié - Frontière 2

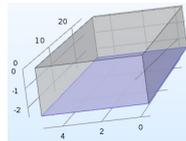


FIGURE 6.5 – Conditions limites du modèle 3D simplifié - Frontière 3

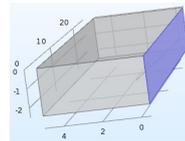


FIGURE 6.6 – Conditions limites du modèle 3D simplifié - Frontière 4

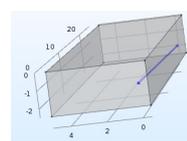


FIGURE 6.7 – Conditions limites du modèle 3D simplifié - Frontière 5

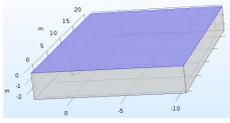


FIGURE 6.8 – Conditions limites du modèle 3D complet - Frontière 1

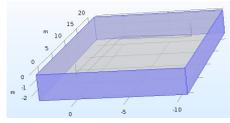


FIGURE 6.9 – Conditions limites du modèle 3D complet - Frontière 2

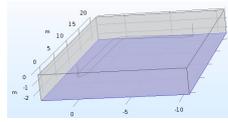


FIGURE 6.10 – Conditions limites du modèle 3D complet - Frontière 3

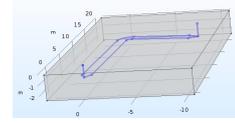


FIGURE 6.11 – Conditions limites du modèle 3D complet - Frontière 5

La frontière 1 représente l'interface entre le sol et l'environnement extérieur. La frontière 2 est considérée comme adiabatique. La frontière 3 représente la nappe phréatique, c'est une condition de Dirichlet. La température imposée a été définie comme la moyenne arithmétique des températures extérieures de 2015 : $12,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. La frontière 4 est le plan de symétrie du modèle et sera donc considérée comme adiabatique. La frontière 5 représente l'intérieur du tube dont l'épaisseur est de 1 mm et dont la conductivité λ est de $0,49\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Seuls les échanges convectifs seront considérés, c'est donc une condition de Fourier.

6.4 Modèles numériques - Modèle pseudo 3D sans transfert de masse

La simulation du problème 3D instationnaire exigeant des temps de calcul assez importants, nous simplifions l'analyse en étudiant un modèle pseudo 3D. Nous discrétisons les tubes sur leur longueur en différentes parties appelées sections (Figure 6.12) et intégrons le transfert de chaleur sur la longueur en supposant constant, sur un tronçon, le flux de chaleur calculé dans la section 2D.

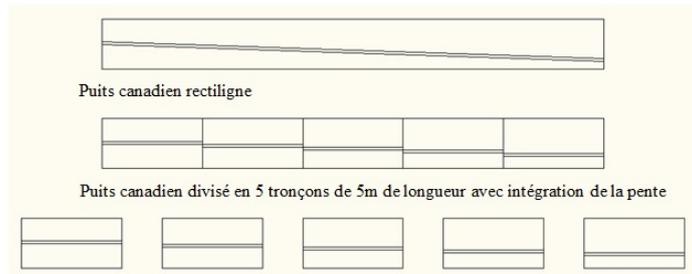


FIGURE 6.12 – Modélisation pseudo 3D, discrétisation du puits en différents tronçons

Différents phénomènes ont lieu au sein du sol : conduction, convection et rayonnement. Pour une approche simplifiée du champ de température dans le sol, un modèle purement conductif est acceptable. En effet, le transfert radiatif est plutôt faible compte tenu des

faibles gradients de température. L'évaporation et la convection peuvent également être négligées comme le démontre une étude sur le transfert de chaleur dans les milieux poreux [166]. Par simplification, les parties verticales et les coudes seront négligés dans ce modèle. Cette hypothèse simplificatrice a été vérifiée à l'aide des modèles 3D au point 6.3

Conditions initiales du modèle pseudo 3D sans transfert de masse

La condition initiale du sol est définie comme au point 6.3.1 pour les modèles 3D, soit la température du sol à 1 m de profondeur le 1er décembre 2014, date du début de la simulation. Elle est donc de 15,2 °C.

Conditions limites du modèle pseudo 3D sans transfert de masse

Les différentes conditions limites du modèle pseudo 3D sont identifiées sur la Figure 6.13 qui représente la coupe du puits canadien et sont ensuite détaillées.

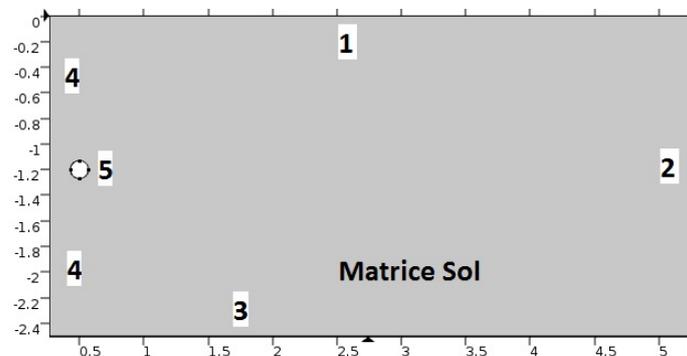


FIGURE 6.13 – Modèle pseudo 3D pour les simulations numériques avec le logiciel COMSOL

Frontière 1

La frontière 1 représente l'interface entre le sol et l'environnement extérieur. La conservation de l'énergie s'y exprime sous la forme :

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = \varphi_{solaire} + h_{surface} \cdot (T_{ext} - T) + \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{env}^4 - T^4) \quad (6.1)$$

Pour simplifier le modèle, la température T_{env} est assimilée à la température T_{ext} .

Frontière 2

Cette frontière est considérée comme étant adiabatique, il n'y aura pas d'échange de chaleur.

Frontière 3

La frontière 3 représente la nappe phréatique, c'est une condition de Dirichlet (température imposée) et la température y a été définie comme étant la moyenne arithmétique des températures extérieures de l'année 2015, soit : 12,4 °C. La zone du sol saturée n'est pas prise en compte dans ce modèle qui s'arrête donc à 2,5m de profondeur.

Frontière 4

Cette frontière est le plan de symétrie du modèle et sera donc considérée comme étant adiabatique.

Frontière 5

La frontière 5 représente l'intérieur du tube et seuls les échanges par convection seront considérés, c'est donc une condition de Fourier. La conservation de l'énergie s'y exprime sous la forme :

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = h_{tube} \cdot (T_{air} - T_{paroi}) \quad (6.2)$$

T_{paroi} est connu à chaque nœud de la frontière et nous prenons alors une valeur moyenne $T_{paroi,m}$ pour évaluer le coefficient de transfert de chaleur moyen. Connaissant la température de l'air et sa vitesse, la température moyenne de la paroi, nous évaluons les nombres Re, Pr et Nu pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air situé dans la section et la paroi interne du tuyau. Nu a été calculé avec la corrélation de Gnielinski pour des tubes lisses [167] :

$$Nu = 0,0214 \cdot (Re^{0,8} - 100) \cdot Pr^{0,4} \text{ pour } \begin{cases} 0,5 < Pr < 1,5 \\ 10^4 < Re < 5 \cdot 10^6 \end{cases} \quad (6.3)$$

Les nombres de Prandtl et de Reynolds sont respectivement d'environ 0,716 et $22 \cdot 10^3$ à l'intérieur du puits et varient peu entre l'entrée et la sortie.

6.4.1 Intégration le long du tube

Le résultat de la simulation 2D nous permet de déterminer le flux de chaleur échangé entre la surface interne du tuyau et l'air qui circule à l'intérieur (on considère la température moyenne au droit de la paroi pour chaque heure).

Schéma de principe

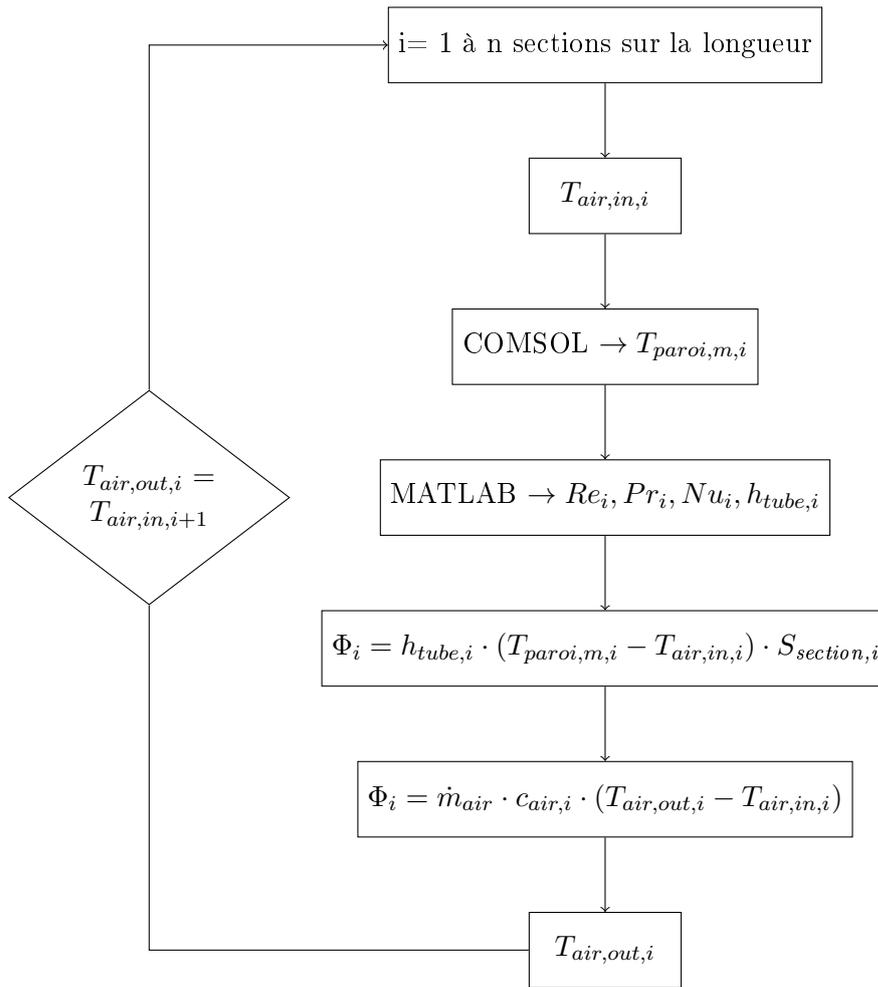


FIGURE 6.14 – Algorithme de résolution d’un problème 3D instationnaire à l’aide de modèles 2D sans prise en compte des transferts de masse

6.5 Analyse de sensibilité du modèle pseudo 3D sans transfert de masse

Afin d’identifier les paramètres ayant une influence importante sur les résultats des simulations, une série d’études de sensibilité a été réalisée, comme défini dans les sections 6.5.1 - 6.5.7. Les deux modèles 3D - complet et simplifié - ont été réalisés afin de permettre la validation des résultats obtenus par le pseudo modèle 3D, l’étude de sensibilité se concentrera principalement sur le pseudo modèle 3D. Les résultats de l’analyse de sensibilité sont présentés dans la section 6.5.8.

Afin de comparer la précision des différentes simulations, nous avons calculé l’erreur absolue moyenne suivant la formule 6.4 et l’erreur absolue maximum suivant la formule 6.5

entre les températures mesurées et simulées en fin de puits pour toute l'année 2015.

$$e_a = \frac{\sum_{i=1}^{8760} |t_{\text{mesurée } i} - t_{\text{simulée } i}|}{8760} \quad (6.4)$$

$$e_{max} = \max_{i=1}^{8760} |t_{\text{mesurée } i} - t_{\text{simulée } i}| \quad (6.5)$$

6.5.1 Discrétisation du puits canadien

Ce paramètre a été analysé uniquement pour le modèle pseudo 3D. Chaque partie horizontale du puits a une longueur de 25 m et les conditions d'écoulement de l'air sont identiques dans les deux tuyaux constituant le puits. Plusieurs simulations numériques ont été réalisées en discrétisant la longueur totale du puits en différentes parties ou segments : 1 x 25 m (un seul segment), 5 x 5 m (5 segments), 10 x 2,5 m (10 segments) et 25 x 1 m (25 segments).

6.5.2 Pente du puits canadien

La profondeur des parties "horizontales" du puits est de 1,2 m à l'entrée et de 1,95 m à la sortie, étant donné le gradient de 3 ‰ permettant l'écoulement du condensat. Dans le pseudo modèle 3D, cette pente peut être prise en compte en donnant à chaque section du puits sa profondeur moyenne réelle. Dans le modèle 3D grandeur nature et le modèle 3D simplifié, la pente est facilement modélisée.

6.5.3 Caractéristiques du sol

La densité du sol a pu être mesurée et déterminée et ne sera donc pas modifiée. En ce qui concerne la capacité thermique et la conductivité thermique du sol, elles ont été choisies sur la base des valeurs habituelles pour le type de sol considéré (voir Tableau 5.1). Cependant, en raison de la nature hétérogène du sol, différentes simulations ont été réalisées en tenant compte d'une capacité thermique de 1000 ou 900 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ et d'une conductivité thermique de 0,58, 0,85 ou 1 $W.m^{-1}.K^{-1}$ qui peuvent varier en fonction de l'humidité [168].

6.5.4 Profondeur et température de la nappe phréatique

La profondeur de la nappe phréatique a été estimée à 2,5 m sur la base d'un rapport d'analyse du sol. Comme la profondeur de la nappe phréatique peut varier dans le temps, des simulations pour des profondeurs de 2,05 m, 2,5 m, 3 m, 4 m, 10 m et 50 m ont été effectuées.

La température de la nappe phréatique est la troisième limite du modèle numérique, comme le montre la Figure 6.13. Elle a été initialement prise égale à la température extérieure annuelle moyenne (12,4 °C). Dans un deuxième temps, cette température de

la nappe phréatique a été considérée comme égale à la température du sol surveillée à 2 m de profondeur (Figure 5.4, c'est-à-dire variable dans le temps. Enfin, elle a été considérée comme égale à la moyenne annuelle de la température du sol surveillée (14,6 °C).

6.5.5 Coefficient de transfert de chaleur par convection le long de la paroi du tube

Ce paramètre a été analysé uniquement pour le modèle pseudo 3D. Pour les premières simulations, ce coefficient h_{tube} a été considéré comme constant et égal à $9,26 W.m^{-2}.K^{-1}$, la valeur obtenue pour la température moyenne de l'année, 12,5 °C.

Dans un deuxième temps, ce coefficient a été considéré comme variable dans les simulations et calculé à chaque pas de temps et pour chaque section en fonction des caractéristiques thermiques et mécaniques de l'air selon la formule 6.3 à la frontière 5. Sa valeur varie entre $9,05 W.m^{-2}.K^{-1}$ et $9,49 W.m^{-2}.K^{-1}$.

6.5.6 Coefficient de transfert de chaleur par convection au niveau du sol

Pour les premières simulations, le coefficient $h_{surface}$ a été considéré constant et égal à $23 W.m^{-2}.K^{-1}$. Dans un deuxième temps, le coefficient a été considéré comme variable dans les simulations et calculé à chaque pas de temps en fonction des caractéristiques thermiques de l'air et de la vitesse du vent. Pour calculer ce coefficient, deux méthodes ont été utilisées.

Pour la première méthode, l'écoulement est considéré comme un écoulement longitudinal parallèle à une plaque de longueur d . La longueur a été initialement considérée comme égale à 10 m pour être modifiée ensuite en faisant varier la valeur de d par pas de 5 m de 10 m à 55 m.

Les formules empiriques de [169] permettant le calcul de ce coefficient de transfert thermique convectif sont :

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \text{ pour } Re < 4.10^5 \quad (6.6)$$

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \text{ pour } Re \geq 4.10^5 \quad (6.7)$$

Le nombre de Reynolds est calculé sur la base de la vitesse du vent comprise entre $0 m.s^{-1}$ et $20,56 m.s^{-1}$ et de la dimension caractéristique d choisie. Les valeurs $h_{surface}$ obtenues pour un d égal à 10 m sont comprises entre $0 W.m^{-2}.K^{-1}$ et $42,53 W.m^{-2}.K^{-1}$, alors que pour un d égal à 55 m, elles varient entre $0 W.m^{-2}.K^{-1}$ et $30,24 W.m^{-2}.K^{-1}$.

La deuxième méthode est basée sur une équation empirique reprise des travaux et articles [170] et [171] reliant le coefficient de transfert thermique convectif de surface et la vitesse du vent. Cette équation est la suivante :

$$h_{surface} = 0,5 + 1,2 \cdot \sqrt{v_{vent}} \quad (6.8)$$

6.5.7 Maillages du modèle 2D et du modèle 3D

Dans le pseudo-modèle 3D, il y a un maillage d'éléments finis 2D dans la section du puits. Plusieurs simulations ont été effectuées en utilisant différents maillages pour assurer l'indépendance nécessaire du modèle vis-à-vis du maillage. Le logiciel COMSOL permet de choisir un maillage semi-automatique dont les caractéristiques pour une nappe phréatique située à 2,5 m sont indiquées dans le Tableau 6.1.

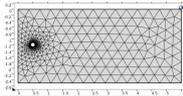
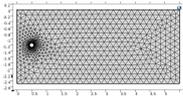
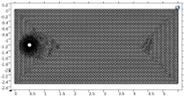
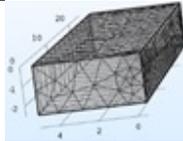
	Maillage normal - Modèle 2D	Maillage fin - Modèle 2D	Maillage très fin - Modèle 2D	Maillage 3D simplifié
Points du maillage	483	798	6727	414
Éléments triangles	892	1484	13130	546
Éléments d'arêtes	74	112	324	124
Éléments ponctuels	8	8	8	10
Temps de simulation (s)	218	353	2657	1794
e_a - Erreur absolue (K)	0,98	0,98	0,98	1,04
e_{max} - Erreur maximale (K)	3,19	3,19	3,19	3,50
Illustrations				

TABLE 6.1 – Caractéristiques des différents maillages étudiés

6.5.8 Résultats de l'étude de sensibilité

Les résultats de l'analyse de sensibilité sont résumés dans les Figures 6.15 (Pseudo modèle 3D) et 6.16 (modèles 3D), en termes de différence horaire absolue maximale et moyenne avec les données surveillées (voir équations 6.4 et 6.5). Les résultats détaillés de la simulation par scénario se trouvent au Tableau 6.2 pour les résultats des modèles 3D et au Tableau 6.3 pour les résultats du pseudo-modèle 3D.

Nous pouvons constater sur la Figure 6.15 que les simulations numériques permettent d'obtenir des résultats intéressants. L'ensemble des simulations tend également à prouver

que la discrétisation du puits, dans le pseudo modèle 3D, en un grand nombre de segments n'apporte aucune amélioration sur la précision des résultats. Cependant, la comparaison des résultats avec les simulations effectuées pour un seul segment (égal à la longueur totale du puits - (Voir Tableau 6.3, simulations numéro 9, 15, 24 et 27)) met en avant l'importance de discrétiser la longueur du puits en au moins 2 sections comme le montre la Figure 6.15.

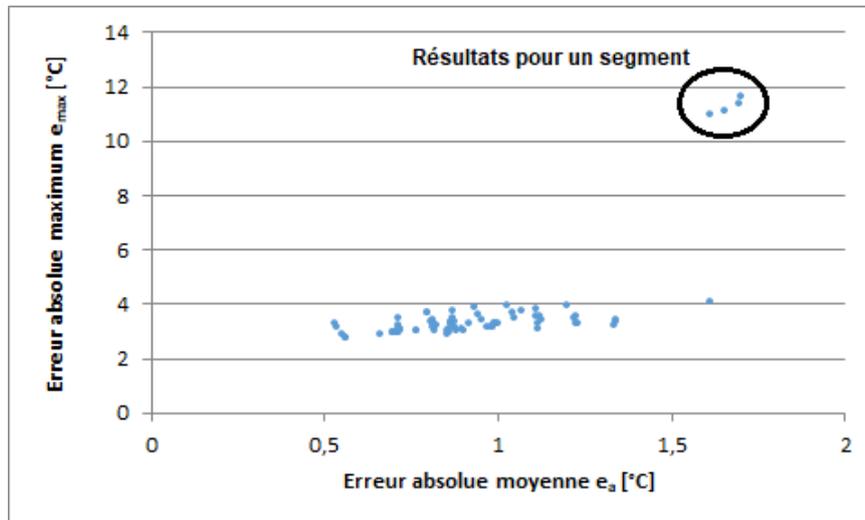


FIGURE 6.15 – Pseudo-modèle 3D : erreur absolue maximum par rapport à l'erreur absolue moyenne pour les différentes simulations.

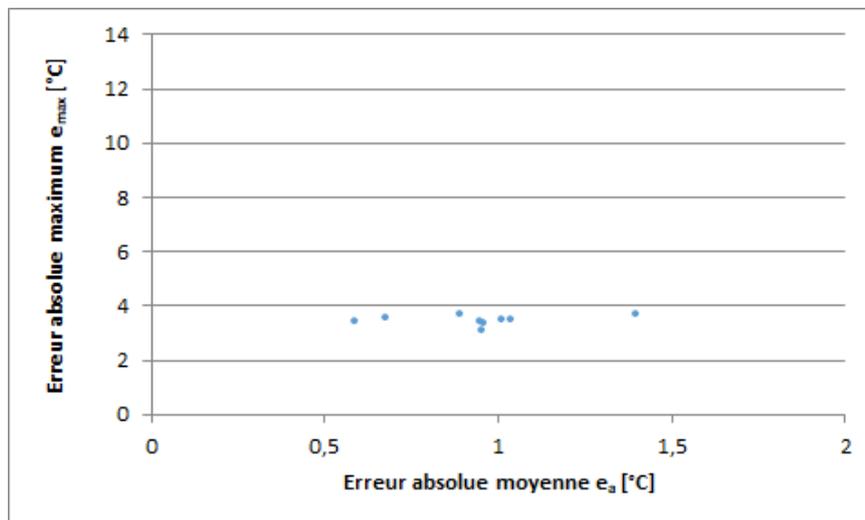


FIGURE 6.16 – Modèles 3D : erreur absolue maximum par rapport à l'erreur absolue moyenne pour les différentes simulations.

Comme on peut le voir sur la Figure 6.16, les résultats obtenus avec les modèles 3D sont assez proches des résultats du pseudo modèle 3D et ne sont pas plus précis. Le pseudo modèle 3D est donc validé, et les transferts de masse y seront intégrés.

La prise en compte de la pente du puits aurait un effet néfaste sur les résultats, et ce phénomène pourrait être lié à la présence de la nappe phréatique à proximité du puits. En effet, plus la nappe est profonde, plus la prise en compte de la pente du puits dans les simulations donne des résultats proches des relevés expérimentaux par rapport à la prise d'une profondeur constante du puits. L'erreur absolue moyenne sur la température e_a diminue de 0,04 K pour une profondeur de nappe de 2,5 m (Voir Tableau 6.3, comparaison des numéros de simulation 10 et 65), diminue de 0,18 K à 0,15 K pour une profondeur de nappe de 10 m (Voir Tableau 6.3, comparaison des numéros de simulation 16 et 19, 17 et 20, 18 et 21) et diminue de 0,16 K pour une profondeur de nappe de 50 m (Voir Tableau 6.3, comparaison des numéros de simulation 22 et 23).

Le maillage dit "Normal" (voir Tableau 6.1) permet d'obtenir des résultats suffisamment précis et il n'est donc pas nécessaire de choisir des maillages plus fins augmentant inutilement le temps de calcul.

Outre ce résultat général, nous souhaitons souligner les points spécifiques suivants :

- Les propriétés physiques du sol :
 - Elles ont un impact sur les résultats des simulations. Pour une discrétisation en 10 ou 25 segments, lorsque la conductivité passe de 0,58 à 0,85 $W.m^{-1}.K^{-1}$, les résultats sont plus précis de 0,11 K par rapport aux données expérimentales si la variation de profondeur du puits est prise en compte (Voir Tableau 6.3, comparaison des numéros de simulation 13 et 54, 14 et 55). Dans le cas d'une profondeur fixe de 1,2 m, son impact est très faible, de l'ordre de 0,01 K (Voir Tableau 6.3, comparaison des simulations 10 et 50, 11 et 51). Le fait de prendre une capacité thermique de 900 au lieu de 1000 $J.kg^{-1}.K^{-1}$, ou de changer la conductivité thermique de 0,85 à 1 $W.m^{-1}.K^{-1}$, n'influence pas significativement les résultats des simulations surtout si la variation de profondeur du puits est prise en compte, pas plus de 0,02 K (Voir Tableau 6.3, comparant les numéros de simulation 48 et 54, 49 et 55, 53 et 59, 54 et 60, 55 et 61).
- Transfert de chaleur par convection au niveau du sol :
 - La deuxième méthode de calcul de $h_{surface}$ donne des résultats de simulations supérieurs à 0,44 K en e_a par rapport aux résultats obtenus avec la première méthode de calcul et une longueur de référence d de 10 m (Voir Tableau 6.3, simulation numéro 62 et 65).
 - En augmentant la distance d de 10 m à 55 m, le $h_{surface}$ sera augmenté et les résultats des simulations seront améliorés de l'ordre de 0,07 K en e_a (Voir Tableau 6.3, simulation numéro 65 à 73).
- Transfert de chaleur par convection à l'intérieur du puits
 - Le choix de calculer le h_{tube} pour chaque pas de temps et pour chaque section

n'influence pas vraiment les résultats des simulations par rapport à une valeur fixe de $9,26 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (Voir Tableau 6.3, simulation numéro 25 à 45).

Numéro Simulation	Modèle	Pente	c	λ	Profondeur de la nappe phréatique	Température de la nappe phréatique	h_{tubo}	h_{surface}	Maillage	e_a	e_{max}
			$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	m	$^{\circ}\text{C}$	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$		K	K
1	Simplifié	oui	1000	0,58	2,05	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	1,39	3,67
2	Simplifié	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	1,04	3,50
3	Simplifié	oui	1000	0,58	3	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,89	3,67
4	Simplifié	oui	1000	0,58	5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,68	3,56
5	Simplifié	oui	1000	0,58	10	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,59	3,46
6	Simplifié	oui	1000	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,95	3,11
7	Simplifié	oui	1000	1	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,96	3,37
8	Simplifié	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=25m	Normal	1,01	3,51
9	Simplifié	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=50m	Normal	0,95	3,46
10	Complet	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=55m	Fin	0,94	3,30
11	Complet	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=55m	Normal	0,92	3,17

TABLE 6.2 – Modèles 3D : Résultats de l'étude de sensibilité

Numéro Simulation	Segments	Pente	c J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	λ W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Profondeur de	Température	h _{tube} W.m ⁻² .K ⁻¹	h _{surface} W.m ⁻² .K ⁻¹	Maillage	e _a K	e _{max} K
					la nappe phréatique m	de la nappe phréatique °C					
1	5	non	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Très fin	0,80	3,68
2	10	non	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Très fin	0,81	3,40
3	25	non	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Très fin	0,82	3,24
4	10	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Très fin	0,98	3,19
5	25	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Très fin	0,99	3,29
6	25	non	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Fin	0,82	3,24
7	10	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Fin	0,98	3,19
8	25	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Fin	0,99	3,29
9	1	/	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	1,61	10,97
10	5	non	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,80	3,67
11	10	non	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,81	3,39
12	25	non	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,82	3,24
13	10	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,98	3,19
14	25	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,99	3,29
15	1	/	1000	0,58	10	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	1,65	11,09
16	5	non	1000	0,58	10	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,71	3,52
17	10	non	1000	0,58	10	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,71	3,24
18	25	non	1000	0,58	10	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,71	3,08
19	5	oui	1000	0,58	10	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,53	3,18
20	10	oui	1000	0,58	10	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,55	2,91
21	25	oui	1000	0,58	10	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,56	2,76
22	25	non	1000	0,58	50	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,72	3,09
23	25	oui	1000	0,58	50	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,56	2,76
24	1	/	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	23	Normal	1,70	11,62
25	5	non	1000	0,58	2,05	12,4	9,26	23	Normal	1,22	3,50
26	10	oui	1000	0,58	2,05	12,4	9,26	23	Normal	1,61	4,12
27	1	/	1000	0,58	2,5	12,4	9,26	23	Normal	1,69	11,36
28	5	non	1000	0,58	2,5	12,4	9,26	23	Normal	1,11	3,85
29	10	non	1000	0,58	2,5	12,4	9,26	23	Normal	1,12	3,57
30	25	non	1000	0,58	2,5	12,4	9,26	23	Normal	1,13	3,42
31	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	9,26	23	Normal	1,34	3,24
32	10	oui	1000	0,58	2,5	12,4	9,26	23	Normal	1,34	3,36
33	25	oui	1000	0,58	2,5	12,4	9,26	23	Normal	1,34	3,46
34	5	non	1000	0,58	3	12,4	9,26	23	Normal	1,03	3,96
35	10	non	1000	0,58	3	12,4	9,26	23	Normal	1,04	3,68
36	25	non	1000	0,58	3	12,4	9,26	23	Normal	1,05	3,52
37	5	oui	1000	0,58	3	12,4	9,26	23	Normal	1,22	3,55
38	10	oui	1000	0,58	3	12,4	9,26	23	Normal	1,23	3,27
39	25	oui	1000	0,58	3	12,4	9,26	23	Normal	1,23	3,29
40	5	non	1000	0,58	4	12,4	9,26	23	Normal	0,93	3,89
41	10	non	1000	0,58	4	12,4	9,26	23	Normal	0,94	3,60
42	25	non	1000	0,58	4	12,4	9,26	23	Normal	0,95	3,45
43	5	oui	1000	0,58	4	12,4	9,26	23	Normal	1,11	3,56
44	10	oui	1000	0,58	4	12,4	9,26	23	Normal	1,11	3,27
45	25	oui	1000	0,58	4	12,4	9,26	23	Normal	1,12	3,12
46	10	non	900	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,86	3,12
47	25	non	900	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,86	2,97
48	10	oui	900	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,89	3,12
49	25	oui	900	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,90	3,00
50	5	non	1000	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,81	3,41
51	10	non	1000	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,81	3,15
52	25	non	1000	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,82	3,01
53	5	oui	1000	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,86	3,39
54	10	oui	1000	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,87	3,17
55	25	oui	1000	0,85	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,88	3,05
56	5	non	1000	1	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,86	3,27
57	10	non	1000	1	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,85	3,04
58	25	non	1000	1	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,85	2,92
59	5	oui	1000	1	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,87	3,75
60	10	oui	1000	1	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,87	3,51
61	25	oui	1000	1	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,88	3,37
62	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - v _{vent}	Normal	1,20	3,95
63	5	oui	1000	0,85	3	12,4	Variable	Variable - d=25m	Normal	0,92	3,28
64	5	oui	1000	0,85	3	12,4	Variable	Variable - d=40m	Normal	1,00	3,30
65	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,76	3,04
66	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=20m	Normal	0,72	3,01
67	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=25m	Normal	0,71	2,99
68	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=30m	Normal	0,71	2,98
69	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=35m	Normal	0,70	2,97
70	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=40m	Normal	0,70	2,97
71	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=45m	Normal	0,70	2,96
72	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=50m	Normal	0,70	2,95
73	5	oui	1000	0,58	2,5	12,4	Variable	Variable - d=55m	Normal	0,70	2,95
74	5	oui	1000	0,58	2,5	14,6	Variable	Variable - d=10m	Normal	0,66	2,90
75	5	oui	1000	0,58	2,05	14,6	Variable	Variable - d=10m	Normal	1,07	3,73

TABLE 6.3 – Pseudo-modèle 3D : Résultats de l'étude de sensibilité

6.6 Résultats des modélisations

L'analyse de sensibilité permet de conclure que le modèle pseudo 3D optimal sans prise en compte des transferts de masse était un puits discrétisé en cinq segments dont la pente est prise en compte et pour lequel la profondeur de chaque section sera différente. ρ est de 1800 kg.m^{-3} , c est de $1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et λ est égal à $0,58 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La profondeur de la nappe phréatique étant variable au cours de l'année, une profondeur de 2,5 m a été considérée. Les coefficients de transfert de chaleur par convection le long du tube et de la surface du sol ont été considérés comme variables et calculés pour chaque pas de temps et chaque section. Le coefficient de transfert de chaleur convectif à la surface du sol a été calculé avec un écoulement considéré comme longitudinal et parallèle à une plaque de longueur d égale à 55 m. Le maillage a été choisi de manière semi-automatique et défini par le logiciel comme "Normal". Les résultats de la simulation pour les différents modèles étudiés sont présentés dans le Tableau 6.4.

	3D simplifié	3D complet	Pseudo 3D sans transfert de masse
e_a	0,95	0,92	0,70
e_{max}	3,46	3,17	2,95

TABLE 6.4 – Erreurs absolues moyennes et maximum pour les différentes simulations par rapport aux données expérimentales.

Avec ces résultats, nous pouvons confirmer les hypothèses simplificatrices faites sur le modèle 3D simplifié et les pseudo-modèles 3D concernant les parties verticales du puits. Ces dernières, avec un grand diamètre interne de 375 mm, ont un impact très limité sur le transfert de chaleur global. Les parties verticales ont représenté 4,8 % du transfert de chaleur global le jour le plus froid de l'année, et 1,1 % le jour le plus chaud de l'année. Elles peuvent donc être négligées dans le pseudo-modèle 3D.

Chapitre 7

Modèle final - Partie horizontale du puits

7.1 Modèle pseudo 3D intégrant les transferts de masse

Au vu des résultats obtenus dans le chapitre 6.4, le puits peut être discrétisé sur sa longueur en différentes sections. Le flux de chaleur échangé entre le sol et l'air intérieur du puits, et calculé dans la section 2D d'entrée du tronçon, est considéré comme uniforme au sein du tronçon. Un modèle conductif pur est acceptable pour modéliser les échanges au sein de la matrice sol. Les parties verticales du puits ne sont pas intégrées au modèle.

Les résultats de l'analyse de sensibilité ont également mis en avant l'importance de l'emplacement de la nappe phréatique, le modèle va donc intégrer une zone saturée. La nappe phréatique représentera la délimitation entre la zone saturée et la zone non saturée, chacune considérée comme homogène et continue. Les propriétés physiques de ces zones ont été choisies en lien avec le type de sol présent sur le site. Il est à noter que les propriétés physiques de la zone non saturée ont dû être légèrement modifiées par rapport aux modèles précédents, car ils ne prennent en compte qu'une seule zone qui est par conséquent supposée plus humide.

	Propriétés de la Zone Non Saturée	Propriétés de la Zone Saturée
$c [J.kg^{-1}.K^{-1}]$	800	1235
$\rho [kg.m^{-3}]$	1875	2050
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,625	2,475
$a [m^2.s^{-1}]$	$3,222.10^{-7}$	$9,776.10^{-7}$
ϵ	0,95	0,95

TABLE 7.1 – Propriétés physiques considérées pour la zone non saturée et la zone saturée de la matrice sol

7.1.1 Condition initiale du modèle pseudo 3D intégrant les transferts de masse

La condition initiale du sol est définie comme au point 6.3.1 pour les modèles 3D, soit la température du sol à 1 m de profondeur le 1er décembre 2014, date du début de la simulation. Elle est donc de 15,2 °C.

7.1.2 Conditions aux limites du modèle pseudo 3D intégrant les transferts de masse

Les différentes conditions aux limites du pseudo-modèle 3D sont identifiées sur la Figure 7.1.

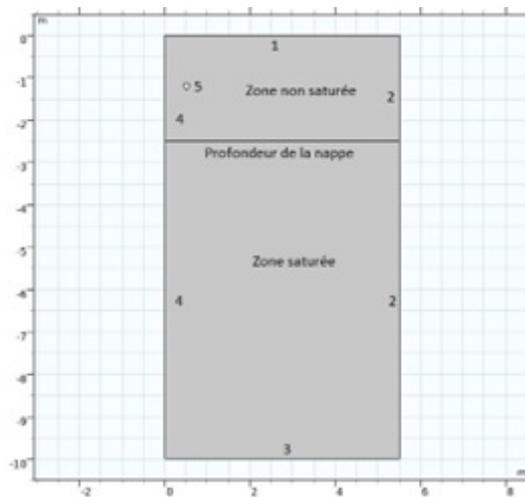


FIGURE 7.1 – Conditions aux limites du pseudo-modèle 3D (section d'entrée 2D)

Les conditions aux limites du pseudo-modèle 3D intégrant les transferts de masse sont identiques à celles du modèle pseudo 3D sans transfert de masse décrites au point 6.4 sauf pour les limites 3 et 5. La frontière 3 ne représente plus la nappe phréatique, mais cela reste une condition de Dirichlet (température imposée) et la température y a été définie comme étant la moyenne arithmétique des températures extérieures de l'année 2015, soit : 12,4 °C. Pour la frontière 5, dans un premier temps, seul le transfert de chaleur par convection a été considéré. Ceci correspond à une condition de Fourier (voir algorithme sur la Figure 7.6). Dans un deuxième temps, le phénomène de condensation et d'évaporation est pris en compte et une condition de Neumann sera ajoutée. Le bilan énergétique sur la 5ème frontière s'exprime alors de la manière suivante :

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = \underbrace{h_{tube} \cdot \frac{c_a}{c_H} \cdot (T_{air} - T_{paroi})}_{\text{condition de Fourier}} + \underbrace{\varphi_{lat}}_{\text{condition de Neumann}} \quad (7.1)$$

T_{paroi} est connu à chaque nœud de la frontière et nous prenons alors une valeur moyenne $T_{paroi,m}$ pour évaluer le coefficient de transfert de chaleur moyen h_{tube} . Connaissant la température de l'air et sa vitesse, la température moyenne de la paroi, nous évaluons les nombres Re, Pr et Nu pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air situé dans la section et la paroi interne du tuyau. Nu a été calculé avec la corrélation de Gnielinski pour des tubes lisses [167] :

$$Nu = 0,0214 \cdot (Re^{0,8} - 100) \cdot Pr^{0,4} \text{ pour } \begin{cases} 0,5 < Pr < 1,5 \\ 10^4 < Re < 5 \cdot 10^6 \end{cases} \quad (7.2)$$

Les nombres de Prandtl et de Reynolds sont respectivement d'environ 0,716 et $22 \cdot 10^3$ à l'intérieur du puits. Pour déterminer s'il y a condensation, le taux d'humidité x de l'air entrant dans la section est comparé au taux d'humidité à saturation x_{sat} pour la température $T_{paroi,m}$ à chaque pas de temps. Si x est supérieur à x_{sat} , il y a condensation et $\varphi_{lat-condens}$ doit être déterminé. Pour qu'il y ait évaporation, il faut que des condensats soient présents et que la pression de vapeur saturante soit supérieure à la pression de vapeur. Si c'est le cas, il faut déterminer $\varphi_{lat-vap}$.

Les transferts de masse ont lieu entre l'air circulant dans le puits et la paroi intérieure du tube.

Sachant que pour un mélange air-eau, le nombre de Lewis est considéré comme égal à 1, il est démontré dans [172] que pour le refroidissement de l'air humide en contact direct avec une paroi, le flux total est donné comme suit :

$$\varphi_{tot} = \frac{h_{tube}}{c_H} \cdot (i_{air} - i_{sat}(T_{paroi,m})) \quad (7.3)$$

Pour déterminer le flux à considérer au niveau de la 5ème frontière, l'équation 7.3 doit être mise sous la forme de l'équation 7.1.

Après développement, on obtient :

$$\varphi_{lat} = \frac{h_{tube}}{c_H} \cdot (c_v \cdot (x \cdot T_{air} - x_{sat}(T_{paroi,m}) \cdot T_{paroi,m}) + L_c \cdot (x - x_{sat}(T_{paroi,m}))) \quad (7.4)$$

7.2 Écoulement des condensats dans le puits

L'écoulement dans le puits est rectiligne et la géométrie est définie par une succession de sections perpendiculaires à l'axe du puits. La surface libre des condensats est considérée comme horizontale de bord à bord dans la section du puits, tous les paramètres géométriques sont donc fonction de l'axe du puits et les vitesses d'écoulement étant supposées homogènes, nous pouvons utiliser une modélisation à une dimension.

Le pas de temps de l'algorithme de résolution du modèle est d'une heure. Il est donc aisé de trouver la masse et donc le volume de condensats produits sur base du débit de condensats \dot{m}_{cond} . La condensation a été considérée comme étant uniforme sur la face interne du tuyau et celui-ci étant lisse, la tension superficielle a été négligée. Les condensats produits durant le pas de temps sont supposés s'accumuler dans le tronçon comme illustré sur la Figure 7.2.

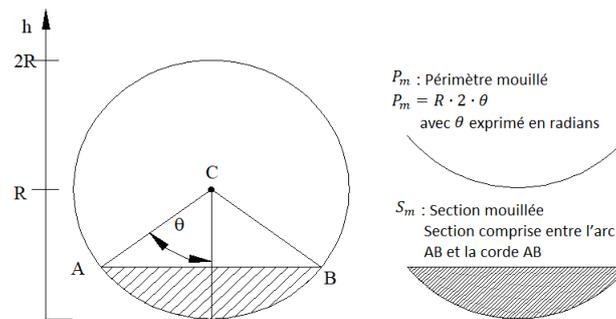


FIGURE 7.2 – Représentation de l'accumulation des condensats dans le puits sur un pas de temps

L'écoulement est considéré comme un écoulement permanent uniforme à surface libre défini par la gravité et la vitesse moyenne de l'écoulement peut être calculée par l'équation empirique de Manning-Strickler qui donne de très bons résultats lorsque la forme, la pente et la rugosité du tuyau ne varient pas dans le temps et dans l'espace. L'équation de Manning-Strickler [173] (Équation 7.10) est un cas particulier de la formule de Chézy [174] (Équation 7.9) sur les écoulements gravitaires.

Pour un liquide homogène et incompressible, l'équation de continuité de la masse implique la continuité du volume. Le volume de liquide entrant dans une section est égal au volume sortant d'une section aval durant un intervalle de temps. L'écoulement étant permanent uniforme, le débit est constant et la géométrie du tuyau également, ce qui signifie que la vitesse moyenne et la section mouillée peuvent également être considérées comme constantes.

La hauteur des condensats étant constante, leur surface limite dans le tuyau est parallèle à la pente de celui-ci qui pour rappel vaut 3 ‰, ce qui est illustré sur la Figure 7.3. Le théorème de Bernoulli généralisé exprime que la variation de la charge est égale à la perte de charge. N'ayant pas de singularité dans le puits, la perte de charge est donc linéaire et la perte de charge linéique est identique à la pente. Pour qu'un écoulement uniforme ait lieu, il est nécessaire d'avoir une pente, ce sont les forces de gravité qui provoquent l'écoulement.

La section mouillée S_m se calcule sur base du débit de condensats \dot{m}_{cond} produits durant un temps t additionné du volume de condensats déjà présents VOL :

$$S_m = \frac{\dot{m}_{cond} \cdot t + Vol}{L_{section}} \quad (7.5)$$

Le rayon hydraulique r_{hyd} est le rapport entre la section mouillée S_m et le périmètre mouillé P_m :

$$r_{hyd} = \frac{S_m}{P_m} \quad (7.6)$$

Dans un écoulement uniforme, les forces appliquées à la masse fluide comprise entre deux sections espacées d'une distance l sont en équilibre. Les deux hypothèses émises par Chézy sont :

- La force résistante à l'écoulement qui s'applique sur le périmètre mouillé P_m est proportionnelle d'un facteur k au carré de la vitesse moyenne de l'écoulement v ;
- Cette force résistante est équilibrée par la composante longitudinale de la force de gravité. Celle-ci s'obtient par le produit du poids volumique γ , de la section mouillée S_m et de la pente s .

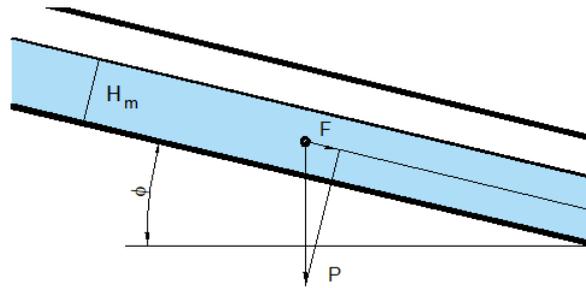


FIGURE 7.3 – Représentation de l'écoulement gravitaire, selon les hypothèses de Chézy

Sur base de la Figure 7.3 et des hypothèses émises, il est possible de retrouver la formule de Chézy :

$$\gamma \cdot S_m \cdot s = k \cdot v^2 \cdot P_m \quad (7.7)$$

$$v^2 = \frac{\gamma}{k} \cdot \frac{S_m}{P_m} \cdot s \quad (7.8)$$

$$v = C \cdot \sqrt{r_{hyd} \cdot s} \quad (7.9)$$

Le coefficient de Chézy C dépend de la nature des parois et du rayon hydraulique, il s'exprime en $m^{0,5} s^{-1}$. Manning a amélioré la formule de Chézy en identifiant un coefficient de rugosité n indépendant du taux de remplissage de la canalisation mais

fonction de la nature des parois pour calculer la vitesse moyenne d'écoulement de manière plus précise selon la formule :

$$v = \frac{r_{hyd}^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{s}}{n} \quad (7.10)$$

Ayant du polyéthylène haute densité lisse à l'intérieur du tuyau, le coefficient de rugosité de Manning n a été pris égal à 0,009 [175].

La pente s , le coefficient de Manning n et la surface mouillée S_m sont connus, il faut déterminer le périmètre mouillé P_m pour pouvoir calculer la vitesse moyenne v .

Sur base de l'équation de Manning (Équation 7.10), il est possible d'établir des relations liant le débit et la vitesse avec un angle θ représenté sur la Figure 7.2, r étant le rayon de la conduite [176].

$$v \cdot S_m = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{r^8}{2^5}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left[\frac{(\theta - \sin \theta)^5}{\theta^2}\right]^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{s} \quad (7.11)$$

$$v = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{r}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{(\theta - \sin \theta)}{\theta}\right]^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{s} \quad (7.12)$$

Résoudre ces équations nécessite de longues itérations, c'est donc une approche semi-graphique qui a été préférée dans le cadre de cette étude.

Il est possible de lier le rapport de la hauteur mouillée et du diamètre du conduit $\frac{H_m}{d}$ avec d'autres rapports comme $\frac{S_m}{S}$ le rapport entre la section mouillée et la section du conduit, $\frac{v}{v_{charge}}$ le rapport entre la vitesse d'écoulement et la vitesse d'écoulement en charge (conduit rempli donc plus de surface libre) ou $\frac{Q_v}{Q_{v \text{ charge}}}$ le rapport entre le débit volumique et le débit volumique en charge. Cela est représenté sur la Figure 7.4.

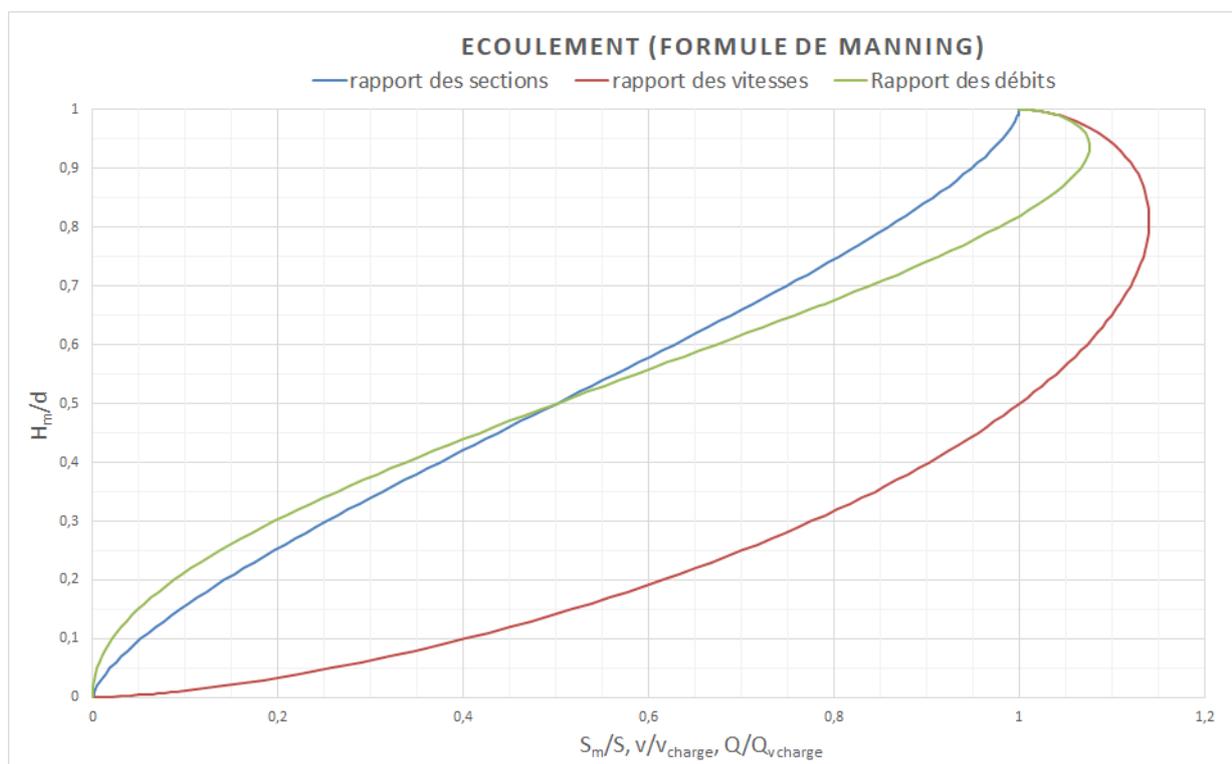


FIGURE 7.4 – Représentation du rapport des sections, des vitesses et des débits en fonction du rapport de la hauteur mouillée sur le diamètre

La section mouillée S_m est une donnée et le graphique permet de déterminer la hauteur mouillée H_m connaissant la section et le diamètre du tuyau composant le puits. Les faibles quantités de condensats, ne permettent pas de dépasser un rapport $\frac{H_m}{d}$ supérieur à 0,1, une polynomiale d'ordre 6 liant le rapport $\frac{H_m}{d}$ au rapport $\frac{S_m}{S}$ a pu être établie pour un rapport $\frac{H_m}{d}$ compris entre 0 et 0,1 comme illustré sur la Figure 7.5.

$$\begin{aligned} \frac{H_m}{d} = & - 8 \cdot 10^7 \left(\frac{S_m}{S} \right)^6 + 10^7 \left(\frac{S_m}{S} \right)^5 - 888672 \left(\frac{S_m}{S} \right)^4 + 28005 \left(\frac{S_m}{S} \right)^3 - 462,2 \left(\frac{S_m}{S} \right)^2 \\ & + 5,7504 \frac{S_m}{S} + 0,0013 \end{aligned} \quad (7.13)$$

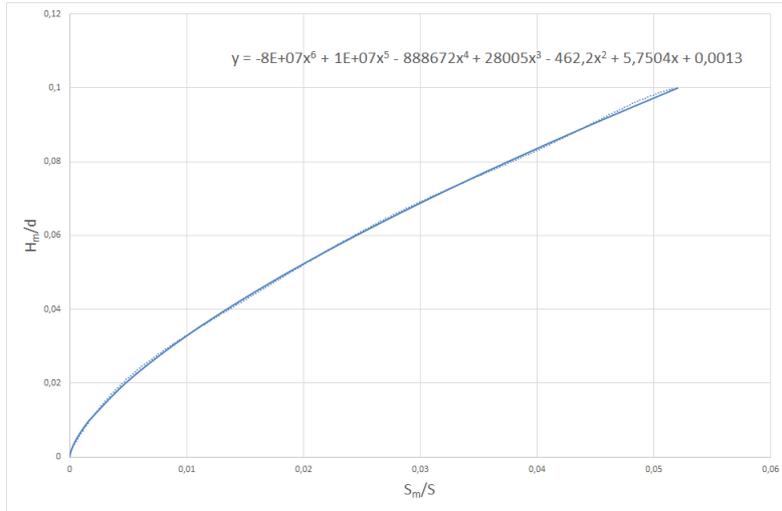


FIGURE 7.5 – Représentation du rapport des sections en fonction du rapport compris entre 0 et 0,1 de la hauteur mouillée sur le diamètre

Une fois la hauteur mouillée connue, il est possible de déterminer l'angle θ et le rayon hydraulique grâce au périmètre mouillé pour trouver la vitesse d'écoulement à l'aide de l'équation de Manning-Strickler.

$$\theta = \arccos \frac{r - H_m}{r} \quad (7.14)$$

$$P_m = 2 \cdot \theta \cdot r \quad (7.15)$$

Avec la vitesse moyenne d'écoulement, nous pouvons connaître l'emplacement des condensats dans le puits pour chaque pas de temps.

7.3 Intégration le long du tube pour le pseudo-modèle 3D intégrant les transferts de masse

Cette intégration est effectuée selon l'algorithme illustré à la Figure 7.6 et expliqué ci-dessous. L'algorithme utilisé pour le transfert de chaleur entre l'air sec et le sol est similaire à celui développé par [146]. La prise en compte du transfert de chaleur dû à la condensation fait référence à l'algorithme présenté par Boulard et al [177], validé par des données expérimentales [153] et intégré dans TRNSYS pour les systèmes multi-tuyaux [150].

Le résultat de la simulation du modèle pseudo 3D (COMSOL sans transfert de masse) donne la température moyenne à la surface de la paroi du tube pour chaque heure. Avec cette température $T_{paroi,m}$ on peut calculer le x_{sat} et comparer cette valeur au taux d'humidité x à l'entrée de la section.

Pour l'évaporation, il faut comparer la pression de vapeur saturante à la température de l'air en entrée de tronçon, à la pression de vapeur de cet air. Si la pression de vapeur est inférieure à la pression de vapeur saturante, il faut vérifier que des condensats sont présents dans le tronçon considéré. Cette information est obtenue par la résolution de l'écoulement des condensats dans le puits décrite au point 7.2.

Pour chaque pas de temps, un flux est calculé selon l'équation 7.4 lorsqu'il y a un transfert de masse.

Ce flux de chaleur est ajouté à la cinquième frontière du modèle pseudo 3D (COMSOL avec transfert de masse) et une nouvelle simulation nous permet de déterminer le flux de chaleur total ϕ_{tot} et une nouvelle température de paroi $T_{paroi,m}$.

$$\phi_{conv} = h_{tube} \cdot (T_{paroi,m} - T_{air,in}) \cdot S_{section} \quad (7.16)$$

Connaissant ϕ_{tot} et ϕ_{conv} , nous pouvons calculer ϕ_{lat} lorsqu'il y a transfert de masse et la température et l'humidité absolue à la fin de la section, en considérant c_H comme une constante le long de la section.

$$\phi_{tot} = \phi_{conv} + \phi_{lat} = \dot{m}_{air} \cdot c_H \cdot (T_{air,out} - T_{air,in}) + \dot{m}_{air} \cdot L_c \cdot (x_{air,out} - x_{air,in}) \quad (7.17)$$

$$\begin{aligned} \phi_{lat} = \phi_{tot} - \phi_{conv} = \dot{m}_{air} \cdot c_H \cdot (T_{air,out} - T_{air,in}) + \dot{m}_{air} \cdot L_c \cdot (x_{air,out} - x_{air,in}) \\ - h_{tube} \cdot (T_{paroi,m} - T_{air,in}) \cdot S_{section} \end{aligned} \quad (7.18)$$

La température et le taux d'humidité de l'air à la sortie de la section considérée sont alors utilisés dans le modèle comme étant la température et le taux d'humidité de l'air à l'entrée de la section suivante. Le débit de condensat produit est alors calculé pour la section considérée afin de déterminer la quantité totale de condensat produite dans l'ensemble du puits à chaque pas de temps.

$$\dot{m}_{cond} = \frac{\phi_{lat}}{L_c} \quad (7.19)$$

Les tuyaux ont une pente de 3 % qui permet aux condensats de s'accumuler dans le fond du tuyau vertical à la sortie du puits. Les condensats sont évacués à l'aide d'une pompe vide cave installée à cet effet, lors de la maintenance du puits.

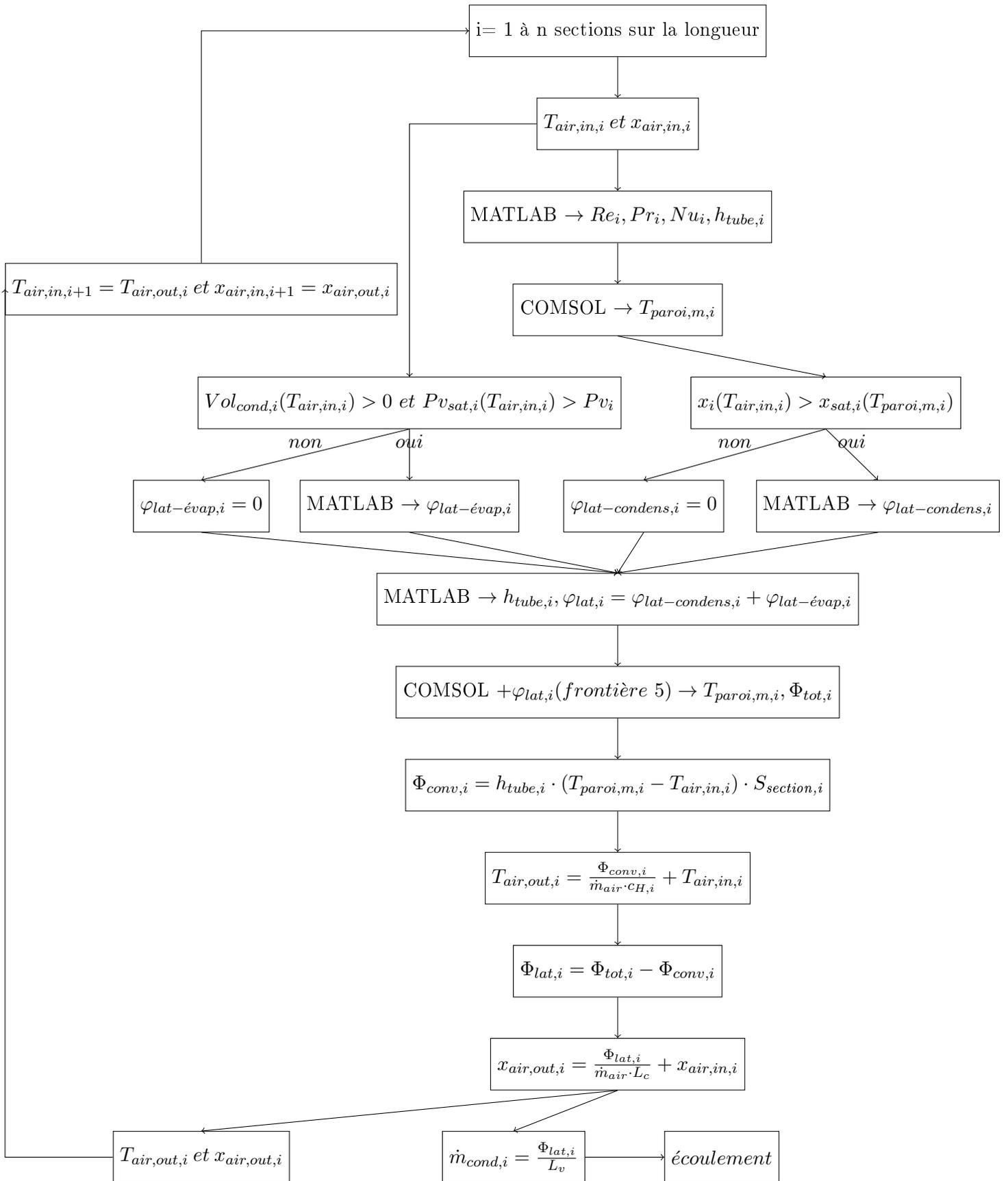


FIGURE 7.6 – Algorithme de résolution d'un problème 3D instationnaire à l'aide d'un modèle 2D intégrant les transferts de masse

7.4 Analyse paramétrique de l'algorithme de résolution de la partie horizontale du puits

Les transferts de chaleur et de masse ont lieu essentiellement dans la partie horizontale du puits. Une analyse paramétrique de l'algorithme présenté à la Figure 7.6 a été réalisée pour analyser l'impact des paramètres d'entrée du modèle sur la température de l'air en sortie de puits. L'objectif étant de valider l'algorithme de résolution, ce n'est pas directement la température de l'air en sortie de puits qui a été considérée comme paramètre de sortie.

Cette analyse paramétrique a été réalisée avec le logiciel JMP Statistical Discovery développé par l'institut SAS qui a permis de concevoir le plan d'expérience et d'obtenir l'analyse de sensibilité des paramètres de sortie.

Paramètres d'entrée - Variables

- Conductivité thermique de la Zone Non Saturée (ZNS) et de la Zone Saturée (ZS)
- Capacité thermique de la Zone Non Saturée (ZNS) et de la Zone Saturée (ZS)
- Masse volumique de la Zone Non Saturée (ZNS) et de la Zone Saturée (ZS)
- Profondeur de la nappe phréatique

Paramètres de sortie - Grandeurs d'intérêts

- Erreur absolue maximum - e_{max} ou erreur maximum

$$e_{max} = \max_{i=1}^{8760} |t_{\text{simulée } i} - t_{\text{mesurée } i}| \quad (7.20)$$

- Erreur absolue moyenne - e_a ou MAE

$$e_a = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} |t_{\text{simulée } i} - t_{\text{mesurée } i}| \quad (7.21)$$

- Erreur quadratique moyenne - RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} (t_{\text{simulée } i} - t_{\text{mesurée } i})^2} \quad (7.22)$$

- Coefficient de détermination linéaire de Pearson - R^2

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{8760} (t_{\text{simulée } i} - t_{\text{mesurée } i})^2}{\sum_{i=1}^{8760} (t_{\text{mesurée } i} - \bar{t}_{\text{mesurée}})^2} \quad (7.23)$$

- Biais

$$Biais = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} (t_{\text{simulée } i} - t_{\text{mesurée } i}) \quad (7.24)$$

- Variance

$$Variance = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} \left[(t_{\text{simulée } i} - t_{\text{mesurée } i}) - \overline{(t_{\text{simulée } i} - t_{\text{mesurée } i})} \right]^2 \quad (7.25)$$

Le plan d'expérience est un plan factoriel fractionnaire à n niveaux. Il est en fait constitué d'un plan factoriel fractionnaire à deux niveaux (-1 ;+1) ayant nécessité 16 simulations additionnées de 8 simulations supplémentaires pour obtenir un plan optimisé donnant des résultats analysables. Une simulation a bien évidemment été ajoutée avec les valeurs prises comme hypothèse de départ, ce qui porte le nombre de simulations du plan d'expérience à 25 au total. Le plan d'expérience et les paramètres de sortie sont repris dans le Tableau 7.3

Les niveaux (-1 ;+1) des paramètres d'entrée sont des valeurs réalistes extrêmes en lien avec le site étudié. Elles sont reprises dans le Tableau 7.2.

Niveaux	λ ZNS [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	c ZNS [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	ρ ZNS [kg.m ⁻³]	Prof. nappe m	λ ZS [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	c ZS [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	ρ ZS [kg.m ⁻³]
+1	0,9	850	2100	3	3,65	1540	2200
0	0,625	800	1875	2,5	2,475	1235	2050
-1	0,35	750	1650	2	1,3	930	1900

TABLE 7.2 – Niveaux des grandeurs d'entrée du plan d'expérience

<i>Sim n°</i>	λ ZNS [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	c ZNS [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	ρ ZNS [kg.m ⁻³]	Prof. nappe <i>m</i>	λ ZS [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	c ZS [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	ρ ZS [kg.m ⁻³]	e_{max} <i>K</i>	e_a MAE <i>K</i>	RMSE <i>K</i>	R^2	Biais <i>K</i>	Variance <i>K</i> ²
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3,829	1,061	1,281	0,903	0,924	0,787
2	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	4,720	0,840	1,029	0,937	0,828	0,374
3	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	3,608	1,125	1,363	0,890	0,920	1,011
4	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	4,523	0,847	1,034	0,937	0,830	0,380
5	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	3,657	1,093	1,317	0,897	0,905	0,915
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	4,420	0,867	1,040	0,936	0,845	0,368
7	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	3,542	1,172	1,418	0,881	0,908	1,186
8	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	4,186	0,903	1,081	0,931	0,856	0,436
9	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	3,216	0,710	0,927	0,949	-0,395	0,703
10	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	2,973	0,698	0,877	0,954	-0,376	0,628
11	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	3,404	0,777	1,017	0,939	-0,381	0,890
12	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	3,233	0,726	0,925	0,949	-0,369	0,719
13	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	3,256	0,745	0,976	0,944	-0,409	0,785
14	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	3,114	0,708	0,900	0,952	-0,385	0,662
15	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	3,569	0,821	1,074	0,932	-0,400	0,995
16	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3,363	0,746	0,959	0,946	-0,379	0,777
17	0	0	0	0	0	0	0	3,074	0,670	0,823	0,960	0,314	0,579
18	-1	0	0	-1	0	-1	+1	3,409	0,788	1,034	0,937	-0,430	0,885
19	0	-1	+1	0	-1	+1	-1	3,132	0,840	0,981	0,943	0,409	0,795
20	+1	0	0	+1	0	-1	0	3,646	1,311	1,551	0,858	1,091	1,215
21	0	+1	-1	0	-1	+1	+1	3,166	0,890	1,044	0,935	0,426	0,909
22	-1	0	0	+1	+1	+1	-1	3,411	0,789	1,035	0,937	-0,429	0,886
23	0	+1	+1	+1	0	+1	+1	3,081	0,789	0,920	0,950	0,391	0,693
24	+1	0	0	-1	+1	+1	+1	3,645	1,311	1,552	0,858	1,092	1,215
25	0	+1	+1	-1	0	-1	-1	3,081	0,787	0,919	0,950	0,390	0,692

TABLE 7.3 – Plan d'expérience et paramètres de sortie obtenus avec l'algorithme de résolution de la partie horizontale du puits

7.4.1 Résultats de l'analyse paramétrique de l'algorithme de résolution de la partie horizontale du puits

Les résultats complets du plan factoriel fractionnaire à n niveaux optimisé sont situés en annexe (cf. Annexe E).

Le paramètre d'entrée le plus influant sur les résultats est la conductivité thermique de la zone non saturée. En deuxième position, c'est la combinaison de deux paramètres qui sont la profondeur et la conductivité thermique de la zone non saturée. Cela peut s'expliquer facilement, car si la conductivité thermique de la zone non saturée a une forte influence, la profondeur va avoir pour effet de modifier la dimension de la zone non saturée. En troisième position, c'est la conductivité thermique de la zone saturée qui est reprise. Arrivent ensuite les capacités thermiques des zones saturée et non saturée. Les paramètres d'entrée ayant peu ou pas d'influence sur les paramètres de sortie sont les masses volumiques des deux zones. La profondeur seule n'influence que très peu les résultats, mais comme dit précédemment, couplée à la conductivité thermique de la zone non saturée, elle est très impactante.

L'analyse de l'influence des paramètres d'entrée peut être réalisée pour chaque paramètre de sortie, cette analyse est reprise en annexe (cf. Annexe E). Les paramètres d'entrée ou les combinaisons des paramètres d'entrée les plus impactant sont défini par un indice p . Ceux repris en orange ($p \leq 0,01$) sont les plus impactant, ceux ayant une influence moindre sont repris en rouge ($0,01 < p \leq 0,05$) et ceux ayant peu ou pas d'influence sont repris en noir ($p > 0,05$).

Chapitre 8

Modèle de la fin du puits

Afin de modéliser les condensats en fin de puits pour caractériser ceux-ci en volume et en température, différents modèles ont dû être réalisés. Un premier modèle permet de définir l'écoulement de l'air dans cette géométrie particulière pour déterminer la vitesse de l'air à la surface des condensats et ainsi pouvoir définir les échanges convectifs par convection forcée. Un second modèle caractérise les échanges convectifs à la surface des condensats par convection naturelle pour les comparer aux résultats du premier modèle et établir pour chaque pas de temps, si les échanges convectifs ont lieu par convection naturelle, mixte ou forcée. Les échanges convectifs déterminés, les transferts de masse peuvent être estimés pour connaître le volume de condensats présent à chaque pas de temps et leur température.

La difficulté de cette modélisation de la fin du puits réside dans la problématique itérative rencontrée. Les échanges convectifs à la surface des condensats sont fonction de la hauteur des condensats et de leur température qui sont les sorties du modèle. Il est nécessaire d'établir pour chaque pas de temps le coefficient d'échange convectif pour déterminer les transferts de masse. Ceux-ci influencent la hauteur des condensats et leur température au pas de temps suivant qui eux-mêmes modifient le coefficient d'échange convectif. Avec un pas de temps d'une heure, pour une période de 13 mois, cela représente 9505 valeurs à calculer et autant de maillage différents. Il a donc été nécessaire de réaliser des modèles représentatifs pour certaines géométries et ensuite faire le lien entre eux. Malgré cette méthode de résolution simplifiée, les résultats obtenus donnent un niveau de précision largement supérieur aux besoins de cette thèse. L'objectif étant de comparer les températures de condensats à celles de croissances des micro-organismes pathogènes identifiés.

8.1 Modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits

Le modèle résolu est représenté à la Figure 8.1. Les domaines repris en bleu sont ceux dans lesquels circule l'air. L'écoulement au droit de l'interface condensats/air est directement

impacté par la hauteur des condensats, mais pour une hauteur de condensats définie, l'écoulement est constant. Le modèle nécessite un maillage assez fin, ce qui nécessite des temps de calcul importants. La résolution de celui-ci pour chaque pas de temps est donc inenvisageable. Le modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits pour une hauteur de condensats définie peut être considéré comme stationnaire. Plusieurs modélisations stationnaires à des hauteurs de condensats différentes ont été effectuées pour établir une loi liant l'écoulement de l'air à la hauteur des condensats.

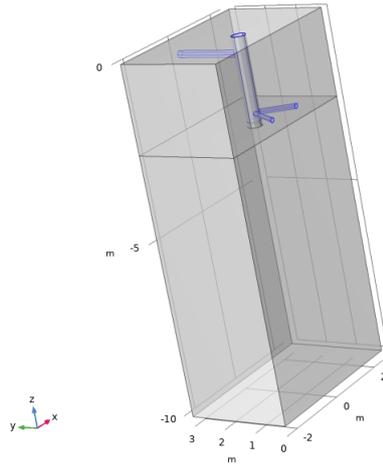


FIGURE 8.1 – Représentation du modèle permettant le calcul de l'écoulement de l'air en fin de puits

La physique utilisée pour modéliser l'écoulement est : " Ecoulement turbulent, $k-\epsilon$ bas Re ". Elle est utilisée pour simuler des écoulements monophasés à des nombres de Reynolds élevés et adaptée aux écoulements incompressibles et aux écoulements compressibles à faible nombre de Mach (généralement inférieur à 0,3). Elle résout les équations de Navier-Stokes pour la conservation de la quantité de mouvement et l'équation de continuité pour la conservation de la masse. La modélisation de la turbulence de type RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) se fait sur base du modèle $k-\epsilon$ à deux équations de transport et étant à bas Reynolds, il peut résoudre l'écoulement jusqu'à la paroi.

8.1.1 Conditions initiales du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits

Les conditions initiales proposées par le logiciel sont une pression et un champ de vitesses suivant les axes x , y et z nul. Ce choix peut avoir un impact sur le temps de calcul et la convergence, mais l'étude étant stationnaire, le résultat obtenu ne sera pas fonction de ces conditions.

8.1.2 Conditions aux limites du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits

Les différentes conditions aux limites du modèle sont identifiées sur les Figures 8.2 et 8.3. Les frontières 1 et 2 représentent les sorties du puits horizontales et l'entrée dans le modèle, la vitesse de l'air est de $2,256 \text{ m s}^{-1}$ dans chaque tube. La frontière 3 représente la sortie du modèle. Les autres frontières sont les parois du domaine, une condition de non glissement y est considérée.

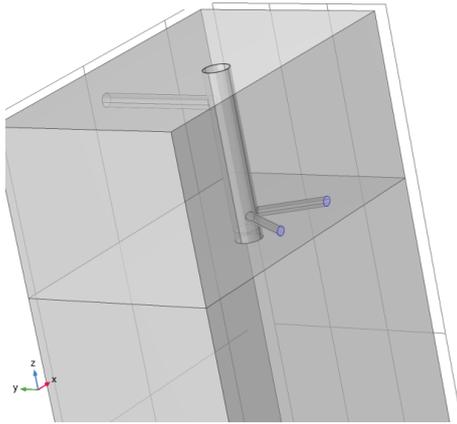


FIGURE 8.2 – Conditions limites du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits - Frontières 1 et 2

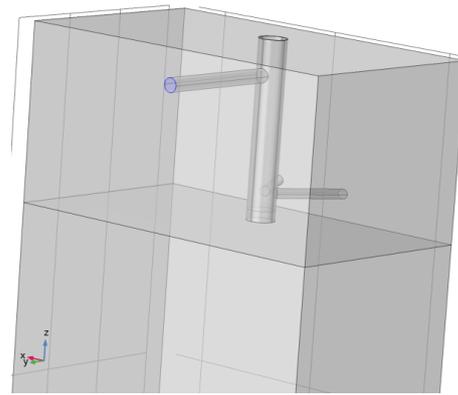


FIGURE 8.3 – Conditions limites du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits - Frontière 3

8.1.3 Maillage du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits

La physique " Ecoulement turbulent, $k-\epsilon$ bas Re " nécessite un maillage assez fin pour résoudre l'écoulement jusqu'à la paroi. C'est un maillage défini automatiquement en fonction de la physique et considéré comme "plus fin" qui a été choisi. Ce maillage est le meilleur compromis entre précision des résultats et temps de calcul. À titre d'exemple, le maillage représenté à la Figure 8.4 est celui défini pour une hauteur de condensats de 15 cm, il consiste en 1456194 éléments de domaine, 60016 éléments de frontière, et 2404 éléments d'arête et donne un temps de calcul de l'ordre de 150 minutes.

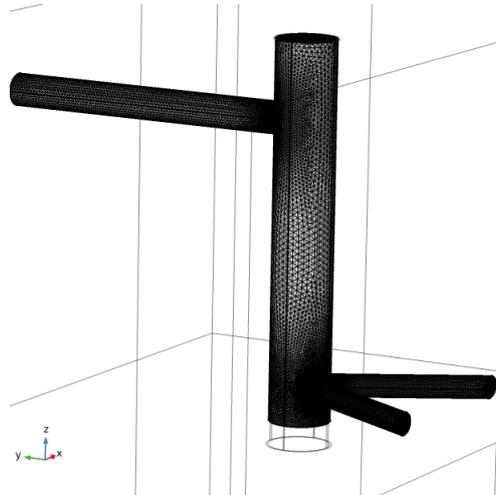


FIGURE 8.4 – Maillage du modèle permettant le calcul de l'écoulement de l'air en fin de puits pour une hauteur de condensats de 15 cm

8.1.4 Résultats du modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits

Les conditions d'écoulement et de turbulence sont directement impactées par la quantité de condensats présents dans le fond du puits. Des modélisations ont été réalisées pour des hauteurs de condensats de 0,1, 5, 10, 15, 20, 25 et 30 cm. Pour chacune de ces hauteurs, une vitesse moyenne de l'air à la surface des condensats a pu être établie. Le modèle donne des valeurs de vitesse moyenne suivant les axes x et y, mais la symétrie de l'installation dans le plan y, z donne une vitesse moyenne suivant l'axe x proche de 0. Seule la vitesse moyenne suivant l'axe y est donc considérée et reprise dans le Tableau 8.1.

Hauteur de condensats [m]	vitesse moyenne suivant y [m s ⁻¹]
0,001	-0,7497
0,05	-0,7064
0,10	-0,2068
0,15	-0,0231
0,20	0,0365
0,25	0,0249
0,30	0,0869

TABLE 8.1 – Résultats des simulations de la vitesse moyenne de l'air à la surface des condensats pour différentes hauteurs de condensats

Les vitesses de l'air à la surface des condensats sont assez faibles, mais varient fortement en fonction de la hauteur de ceux-ci. Lorsque les hauteurs de condensats sont faibles,

l'air qui arrive en fin de puits impacte la surface opposée et un courant descendant apparaît qui vient lécher les condensats. Ce phénomène va provoquer une augmentation de l'évaporation des condensats. Ce phénomène est représenté sur les Figures 8.5, 8.6, 8.7 et 8.8 qui comparent les résultats des simulations avec des condensats à 5 cm de hauteur et des condensats à 25 cm de hauteur. La condition initiale de la hauteur des condensats impactera donc directement les résultats finaux obtenus.

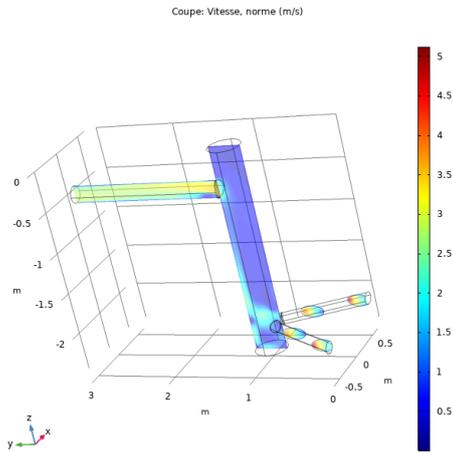


FIGURE 8.5 – Écoulement de l'air en fin de puits avec une hauteur de condensats de 5 cm

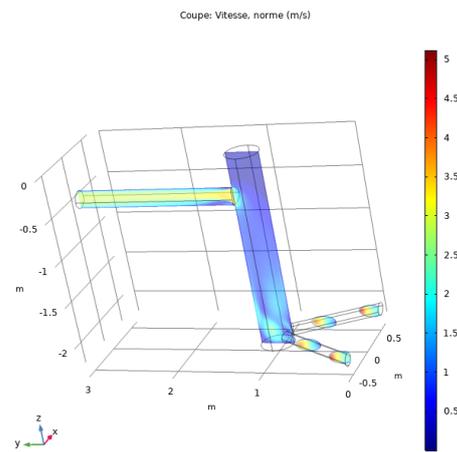


FIGURE 8.6 – Écoulement de l'air en fin de puits avec une hauteur de condensats de 25 cm

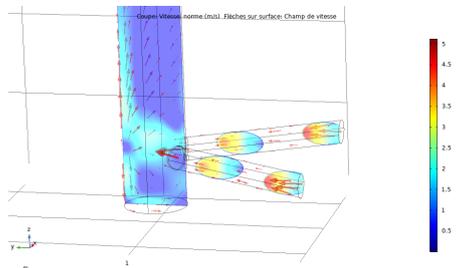


FIGURE 8.7 – Zoom à l'interface condensats/air de l'écoulement de l'air en fin de puits avec une hauteur de condensats de 5 cm

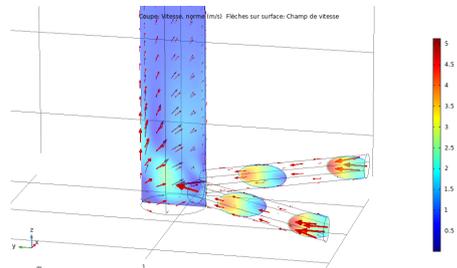


FIGURE 8.8 – Zoom à l'interface condensats/air de l'écoulement de l'air en fin de puits avec une hauteur de condensats de 25 cm

Sur base de ces résultats, deux courbes de tendance de la vitesse de l'air en fonction de la hauteur des condensats ont pu être déterminées, elles sont représentées à la Figure 8.9. Pour les hauteurs de condensats inférieures à 5 cm, c'est une régression linéaire qui a été choisie. Pour les hauteurs de condensats comprises entre 5 cm et 30 cm, une polynomiale d'ordre 3 a été choisie.

H_{cond} en cm < 5cm

$$v_{air} = 8,8 \cdot 10^{-3} \cdot H_{cond} - 0,7506 \quad (8.1)$$

$5cm \leq H_{cond}$ en cm $\leq 30cm$

$$v_{air} = 1,560359 \cdot 10^{-4} \cdot H_{cond}^3 - 1,03127808 \cdot 10^{-2} \cdot H_{cond}^2 + 2,248700283 \cdot 10^{-1} \cdot H_{cond} - 1,5898683333 \quad (8.2)$$

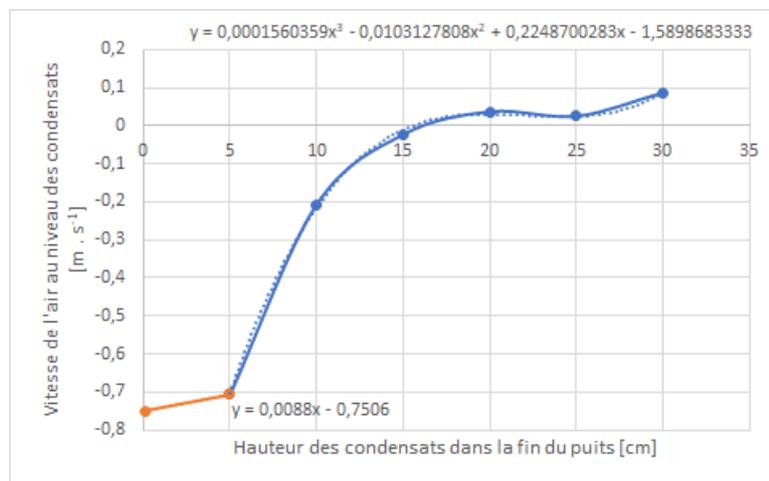


FIGURE 8.9 – Vitesse de l'air au niveau des condensats en fonction de la hauteur des condensats

8.2 Modèle de la température des condensats en fin de puits

Les conditions d'écoulement d'air à la surface des condensats connues, il est possible de modéliser la fin de puits pour déterminer la température des condensats pour chaque pas de temps et pour différentes hauteurs. Cette température sera influencée par des échanges conductifs avec le sol entourant le fond du puits, par des échanges convectifs avec l'air circulant au-dessus des condensats et par leur évaporation. La physique utilisée dans ce modèle est la physique "Transfert de chaleur dans des solides" qui résout l'équation de Fourier-Kirchhoff. Les condensats bien qu'étant un fluide sont considérés comme un solide, car ils ne sont pas en mouvement. La représentation géométrique du modèle est reprise dans la Figure 8.10. Les domaines dans lesquels circule de l'air sont supprimés du modèle, l'interface condensats/air est donc une frontière de celui-ci.

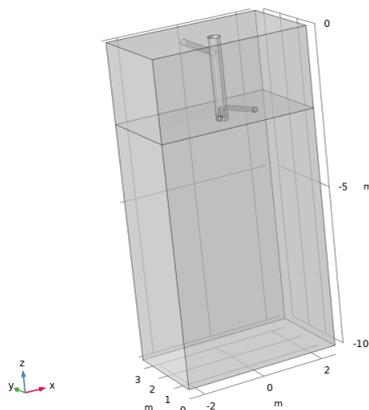


FIGURE 8.10 – Représentation du modèle permettant le calcul des températures des condensats

8.2.1 Conditions initiales du modèle de la température des condensats en fin de puits

La température de la matrice du sol a été définie comme étant la température du sol à 1 m de profondeur le 1er décembre 2014, date du début de la simulation. Elle est donc de 15,2 °C.

8.2.2 Conditions aux limites du modèle de la température des condensats en fin de puits

Les différentes conditions aux limites du modèle sont identifiées sur les Figures 8.11, 8.12, 8.13 et 8.2.2. La frontière 1 représente l'interface entre le sol et l'environnement extérieur, elle est détaillée au point 6.4. La frontière 2 représente une condition de Dirichlet (température imposée) et la température y a été définie comme étant la moyenne arithmétique des températures extérieures de l'année 2015, soit : 12,4 °C. Les frontières 3, 4, 5, 6 sont considérées comme adiabatiques ainsi que toutes les frontières représentant les interfaces air-tube. Cette hypothèse peut être posée, car les échanges de chaleur entre l'air et le sol sont faibles en fin de puits, comme démontré au point 6.3. La frontière 7, représente l'interface condensats/air, seuls les échanges par convection sont considérés, c'est donc une condition de Fourier. La conservation de l'énergie s'y exprime sous la forme :

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = h_{cond}(t) \cdot (T_{air}(t) - T_{cond}(t)) \quad (8.3)$$

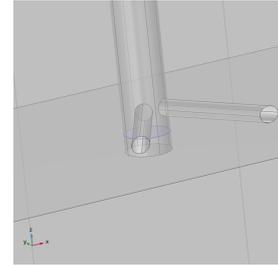
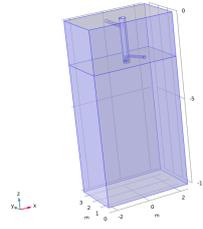
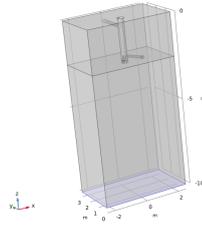
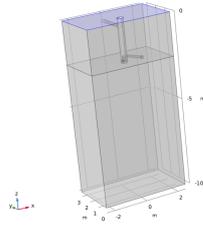


FIGURE 8.11 – FIGURE 8.12 – FIGURE 8.13 – FIGURE 8.14 –
 Conditions limites Conditions limites Conditions limites Conditions limites
 du modèle de la du modèle de la du modèle de la du modèle de la
 température des température des température des température des
 condensats en fin de condensats en fin de condensats en fin de condensats en fin de
 puits - Frontière 1 puits - Frontière 2 puits - Frontières 3, puits - Frontière 7
 4, 5 et 6

8.3 Détermination du coefficient de convection à l'interface condensats/air

Pour déterminer le coefficient de convection h_{cond} à l'interface entre les condensats et l'air qui s'applique à la frontière 7, il est nécessaire de définir si la convection est de type naturelle, forcée ou mixte. En effet, les faibles vitesses de l'air en fin de puits à l'interface condensats/air pour certaines hauteurs de condensats, nécessitent de prendre en compte les transferts de chaleur par convection naturelle ou mixte et pas uniquement ceux par convection forcée pour déterminer le coefficient de convection. La géométrie en fin de puits au niveau de l'interface condensats/air est très spécifique et ne correspond que partiellement aux géométries classiques considérées dans la littérature. Cette géométrie est assimilée à une plaque plane, cette approximation ne porte pas à conséquence sur les objectifs du modèle qui consiste à définir la température des condensats pour la comparer aux températures de développement des pathogènes identifiés dans la suite de l'étude.

Pour chaque pas de temps et pour des hauteurs de condensats H_{cond} de 5, 10, 15, 20 et 30 cm, les coefficients d'échanges convectifs par convection naturelle, mixte et forcée vont être calculés. Pour définir quel coefficient d'échange convectif h_{cond} prendre en compte, le nombre de Richardson doit être évalué. Il représente le rapport entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique d'un fluide, et donc l'importance de l'effet sur le mouvement du fluide. Le nombre de Richardson Ri est le rapport entre le nombre de Grashof Gr et le nombre de Reynolds Re au carré. Il représente également le rapport, élevé au carré, des vitesses caractéristiques de convection naturelle et de convection forcée.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (8.4)$$

Le nombre de Grashof représente le rapport entre la force de flottabilité ou gravité et la force visqueuse agissant sur un fluide dans la couche limite de vitesse. Il est fonction de l'accélération de la pesanteur g , d'un coefficient de dilatation thermique β , de la différence de température entre l'air et les condensats, du cube d'une dimension caractéristique d_H et du carré de la viscosité cinématique ν .

$$Gr = \frac{g \beta (T_{cond} - T_{air}) d_H^3}{\nu^2} \quad (8.5)$$

L'air étant considéré comme un gaz parfait, le coefficient de dilatation thermique isobare a pour expression :

$$\beta = \frac{1}{\frac{T_{cond} + T_{air}}{2}} \quad (8.6)$$

Il n'existe pas de frontières physiques entre les différentes sortes de convections définies par des valeurs précises du nombre de Richardson, les deux régimes de convection naturelle et de convection forcée étant des régimes asymptotiques de la convection mixte. Il est tout de même acceptable de fixer des valeurs limites du nombre de Richardson en deçà ou au-delà desquelles seule la convection forcée ou naturelle sera considérée comme responsable de l'écoulement. Nous admettons :

- $Ri \leq 0.1 \rightarrow$ convection forcée
- $0,1 < Ri < 1 \rightarrow$ corrélation linéaire entre convection forcée et mixte
- $Ri = 1 \rightarrow$ convection mixte
- $1 < Ri < 10 \rightarrow$ corrélation linéaire entre convection naturelle et mixte
- $Ri \geq 10 \rightarrow$ convection naturelle

En se basant sur ces conditions, pour chaque hauteur de condensats, un seul coefficient de convection est attribué à chaque pas de temps à l'aide d'une régression linéaire en fonction du nombre de Richardson.

8.3.1 Convection forcée

La vitesse de l'air à l'interface condensats/air v est obtenue grâce au modèle de l'écoulement de l'air en fin de puits pour des hauteurs de condensats H_{cond} comprises entre 5 cm et 30 cm. La vitesse maximum rencontrée est de $0,7506 \text{ m.s}^{-1}$, la température minimum de l'air est de $4,71 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui donne une viscosité cinématique minimum de $1,3687 \cdot 10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Le nombre de Reynolds maximum est donc de 20565 et le nombre de Prandtl est toujours supérieur à 0,7, l'écoulement est considéré comme laminaire. Le nombre de Nusselt Nu peut donc être calculé par la relation 8.7 :

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \text{ pour } \begin{cases} 0,5 < Pr < 10 \\ Re < 3 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (8.7)$$

Schéma de principe pour la convection forcée

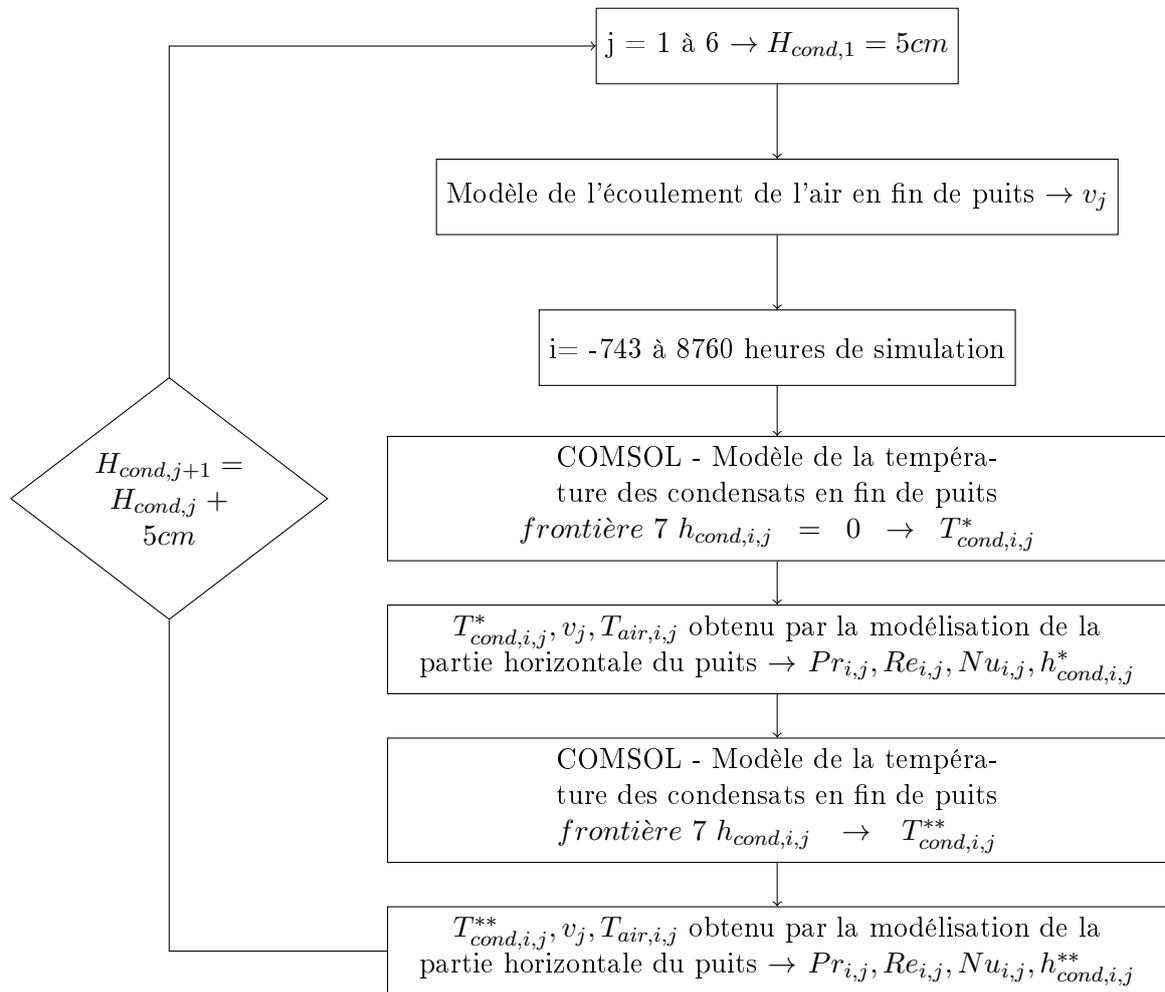


FIGURE 8.15 – Algorithme de résolution du coefficient de convection à l'interface condensats/air pour de la convection forcée

Pour déterminer les échanges convectifs dus à la convection forcée, une itération est nécessaire pour déterminer la température des condensats qui va influencer la température du film et donc les propriétés physiques. Toutefois, la variation du nombre de Prandtl pour de l'air en fonction de la température reste assez faible, c'est pourquoi seules deux itérations sont nécessaires.

8.3.2 Convection naturelle

Pour déterminer le coefficient de convection dû à la convection naturelle, il est d'abord nécessaire d'établir le nombre de Nusselt qui est fonction du type d'écoulement, laminaire

suivant l'Équation 8.9 ou turbulent suivant l'Équation 8.10. C'est le nombre de Rayleigh Ra qui détermine l'écoulement et vaut le produit du nombre de Grashof Gr et du nombre de Prandtl Pr comme repris dans l'Équation 8.8. Il caractérise le transfert de chaleur au sein d'un fluide. Sous une valeur critique de l'ordre de 1700, le transfert s'opère uniquement par conduction, tandis qu'au-delà de cette valeur la convection libre ou naturelle devient prépondérante.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (8.8)$$

$$Nu = 0,54 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \text{ pour } \begin{cases} 10^5 < Ra < 10^7 \\ \text{régime laminaire} \end{cases} \quad (8.9)$$

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} \text{ pour } \begin{cases} 10^7 < Ra < 3 \cdot 10^{10} \\ \text{régime turbulent} \end{cases} \quad (8.10)$$

Schéma de principe pour la convection naturelle

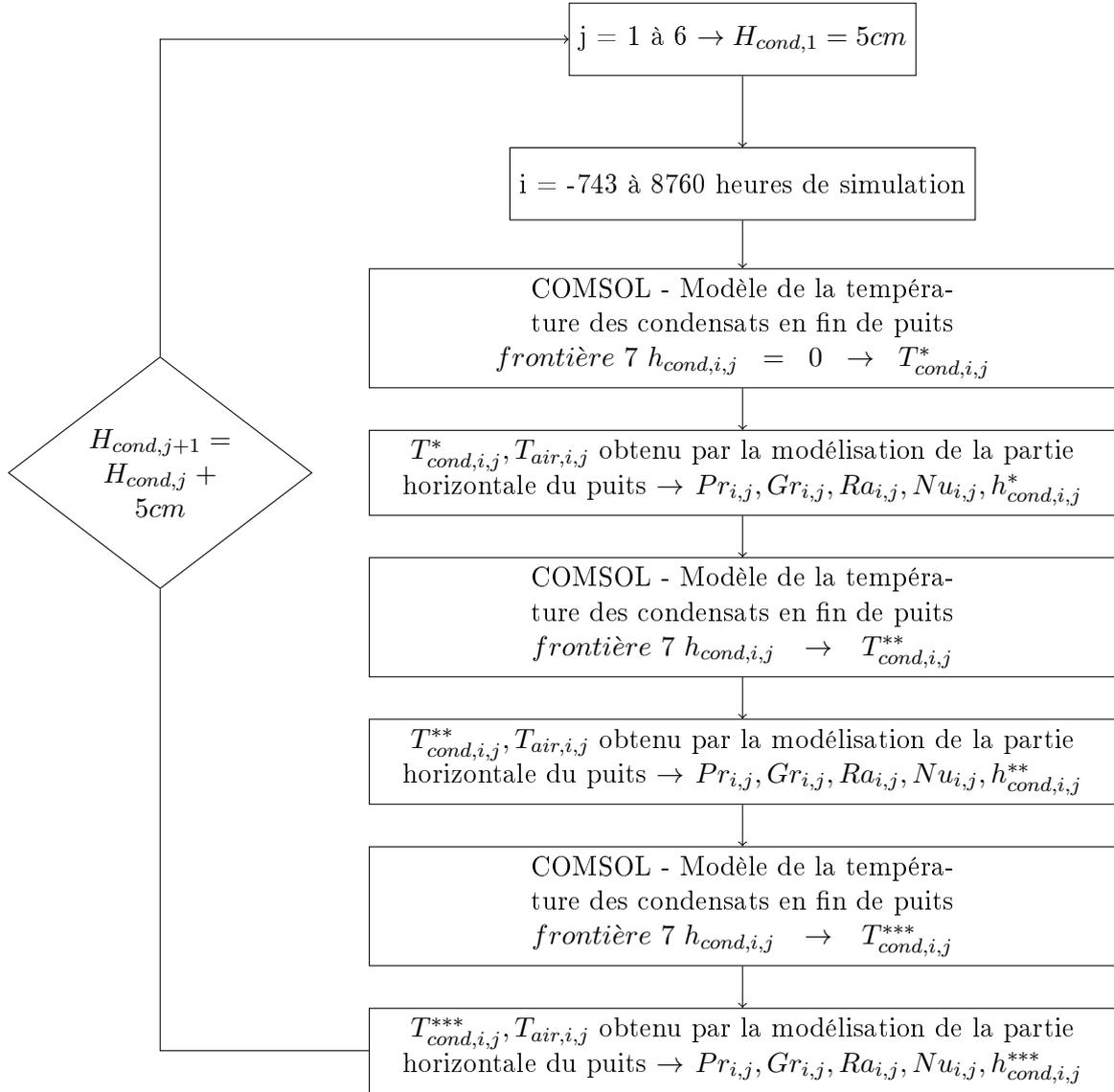


FIGURE 8.16 – Algorithme de résolution du coefficient de convection à l'interface condensats/air pour de la convection naturelle

Le coefficient de convection dû à la convection naturelle est directement fonction de la différence de températures entre les condensats et l'air, cette différence intervenant dans le calcul du nombre de Grashof. Il est donc nécessaire de réaliser une itération sur la température des condensats. Après trois itérations, la convergence des résultats permet d'établir une température de condensats et un coefficient de convection.

8.3.3 Convection mixte

Bien que l'air se déplace dans le puits grâce à une action mécanique, l'écoulement qui en résulte à l'interface condensats/air est assez faible, surtout pour des hauteurs de condensats comprises entre 15 et 30 cm. La convection naturelle et la convection forcée vont donc coexister et l'une ne peut être ignorée au profit de l'autre. L'évaporation des condensats ne peut se produire que si la pression de vapeur saturante à la température de ceux-ci est supérieure à la pression de vapeur de l'air qui passe au-dessus. Cela se produit principalement quand la température des condensats est supérieure à la température de l'air, le mouvement gravitaire dû à la convection naturelle est donc un flux ascendant. La convection mixte est de par ce fait considérée comme majoritairement favorable, c'est-à-dire que les forces d'Archimède vont dans le sens de l'écoulement forcé. Le nombre de Nusselt se calcule à l'aide de deux équations liées au nombre de Prandtl et décrites dans [178].

$$F_1(Pr) = 0,399 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + \left(\frac{0,0468}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (8.11)$$

$$F_2(Pr) = \left(\frac{Pr}{5} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{2}} \left[0,25 + 1,6Pr^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (8.12)$$

$$\frac{Nu}{\sqrt{Re}} = 2F_1(Pr) \cdot \left[1 \pm \left(\frac{5F_2(Pr) \cdot \left(\frac{Gr}{Re^{\frac{5}{2}}} \right)^{\frac{1}{5}}}{6F_1(Pr)} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} + \rightarrow \text{convection mixte favorable} \\ (T_{cond} > T_{air}) \\ - \rightarrow \text{convection mixte défavorable} \\ (T_{cond} < T_{air}) \end{cases} \quad (8.13)$$

Schéma de principe pour la convection mixte

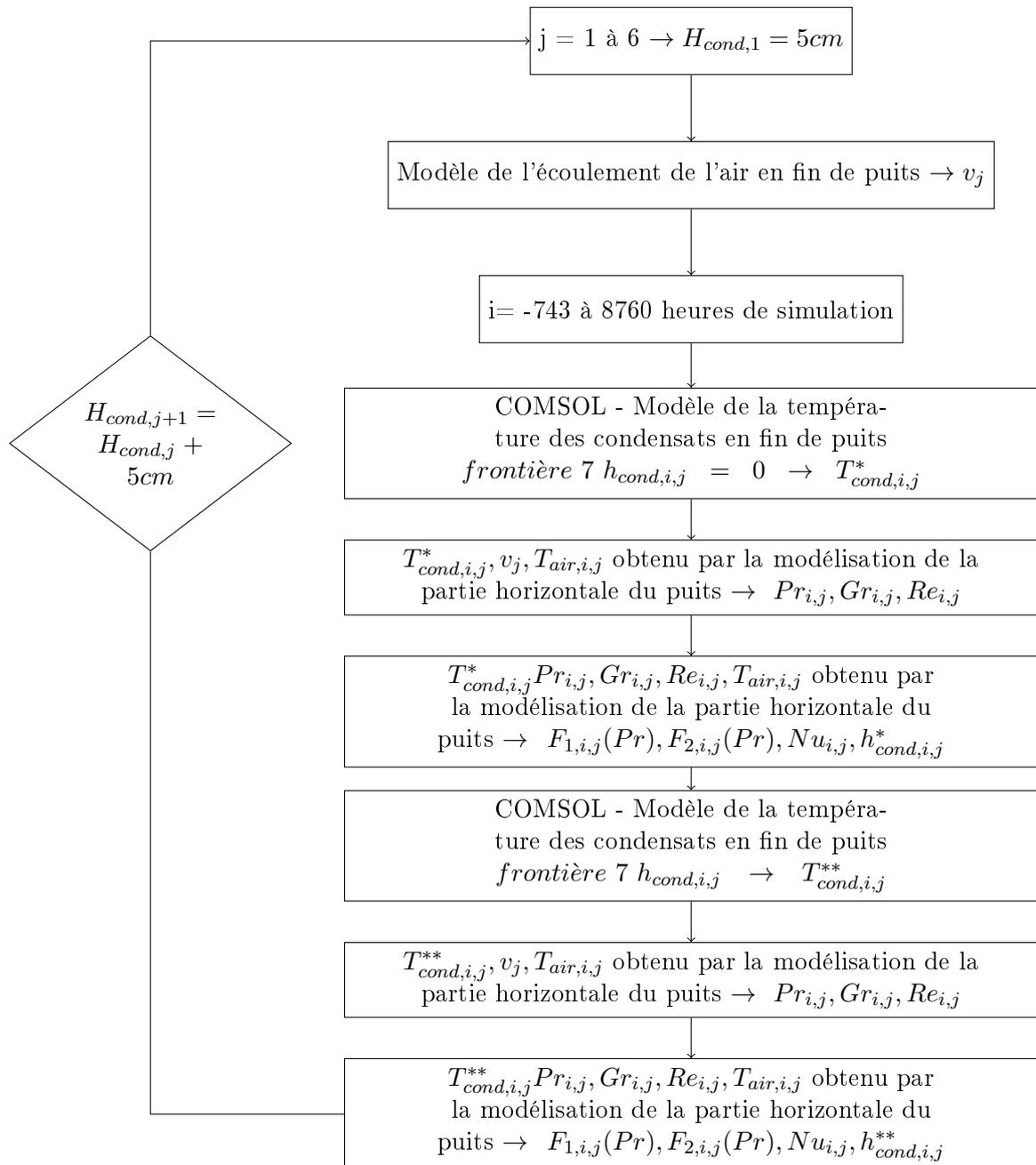


FIGURE 8.17 – Algorithme de résolution du coefficient de convection à l'interface condensats/air pour de la convection mixte

8.4 Algorithme de résolution du calcul du volume et de la température des condensats

Ayant pour chaque pas de temps et pour chaque hauteur de condensats un coefficient de convection, il est possible d'appliquer le développement présenté au point 7.1.2 pour calculer les transferts de masse qui auront lieu en fin de puits. Les condensats produits dans la partie horizontale du puits s'ajoutent aux condensats déjà présents. La hauteur initiale des condensats au premier décembre 2014 a été relevée et était de 15 cm.

Schéma de principe

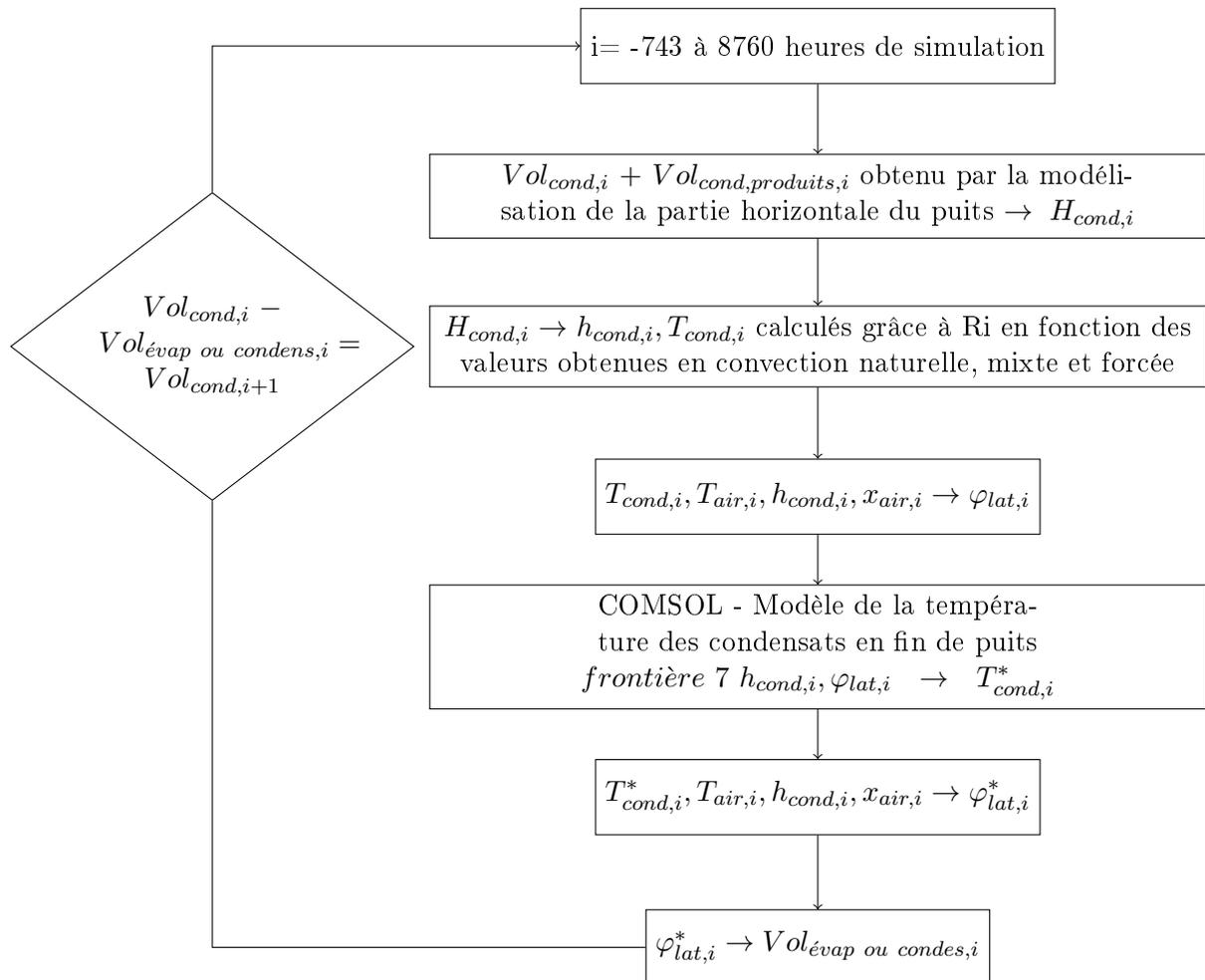


FIGURE 8.18 – Algorithme de résolution du calcul du volume des condensats

Sur base des résultats obtenus, le modèle COMSOL présenté au point 8.2.2 est utilisé en ajoutant à la frontière 7 les transferts de masse pour obtenir une température de conden-

sats pour chaque pas de temps. Les transferts de masse ayant une influence importante sur la température des condensats, une itération est nécessaire pour trouver un résultat convergent concernant les transferts de masse et la température des condensats.

Chapitre 9

Résultats des modélisations

L'année 2015 ayant permis la validation des modèles est référencée comme légèrement plus chaude que la normale mais moins humide en termes de précipitation (87,1 % par rapport à la normale) et d'humidité dans l'air. Cette année n'était donc pas propice à la présence de condensats dans le puits et ne peut pas être utilisée seule pour apporter une information cohérente à cette thèse. L'année 2016 a quant à elle été beaucoup plus humide et donc propice à la présence de condensats dans le puits avec des précipitations de 110,5 % par rapport à la normale [43, 179], ceci étant représenté à la Figure 9.1. Les modèles ont donc été appliqués sur ces deux années.

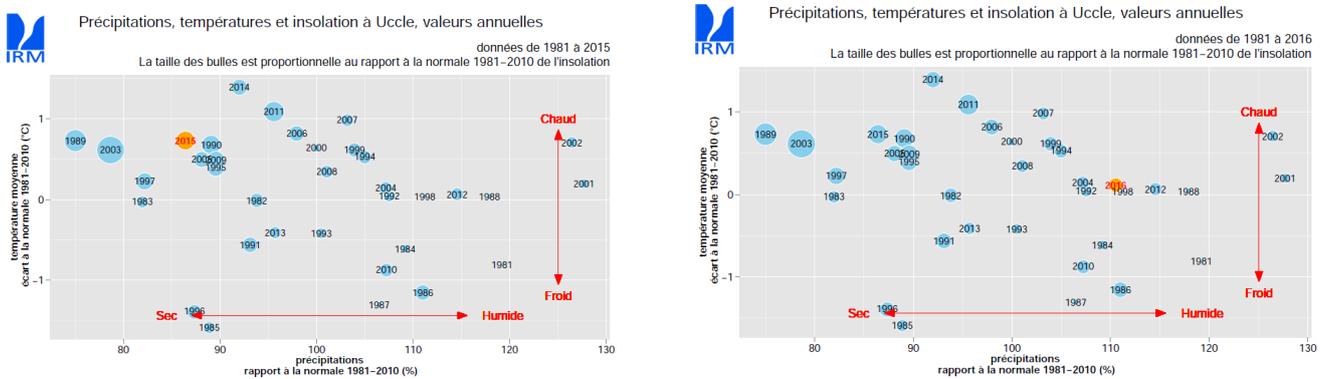


FIGURE 9.1 – Précipitations, températures et insolation à Uccle de l'année 2015 (à gauche) et 2016 (à droite) par rapport aux normales

9.1 Résultats des modélisations de la partie horizontale du puits

Les résultats des simulations repris aux Figures 9.2 et 9.3 mettent en avant le rôle du puits canadien dans la possibilité d'amortissement et de déphasage des températures reçues à la sortie du puits par rapport à l'entrée. En 2015, les minima et maxima étaient respectivement de $-3,2\text{ °C}$ et $28,6\text{ °C}$ pour l'air extérieur alors qu'à la sortie du puits, ils étaient de $4,7\text{ °C}$ et $23,9\text{ °C}$. En 2016, les minima et maxima étaient respectivement de $-5,3\text{ °C}$ et $31,1\text{ °C}$ pour l'air extérieur alors qu'à la sortie du puits, ils étaient de $3,8\text{ °C}$ et $23,1\text{ °C}$. Les quantités de condensats produits en 2015 et en 2016 sont de respectivement $6,49\text{ l}$ et $31,18\text{ l}$. Cela montre la variabilité de la production d'une année à l'autre et explique qu'il soit parfois nécessaire d'évacuer mécaniquement les condensats du puits lorsque deux années humides se suivent.

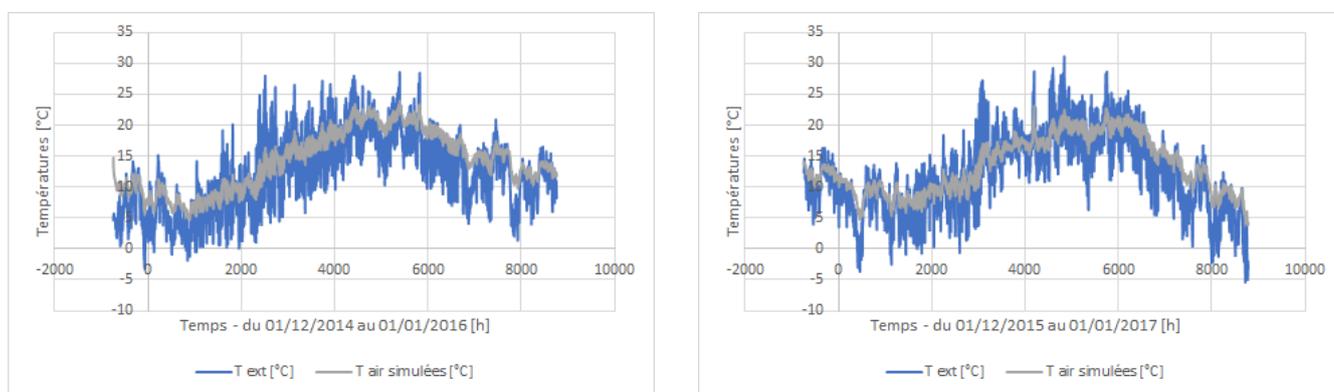


FIGURE 9.2 – Températures d'entrée et de sortie de la partie horizontale du puits pour l'année 2015 (à gauche) et 2016 (à droite)

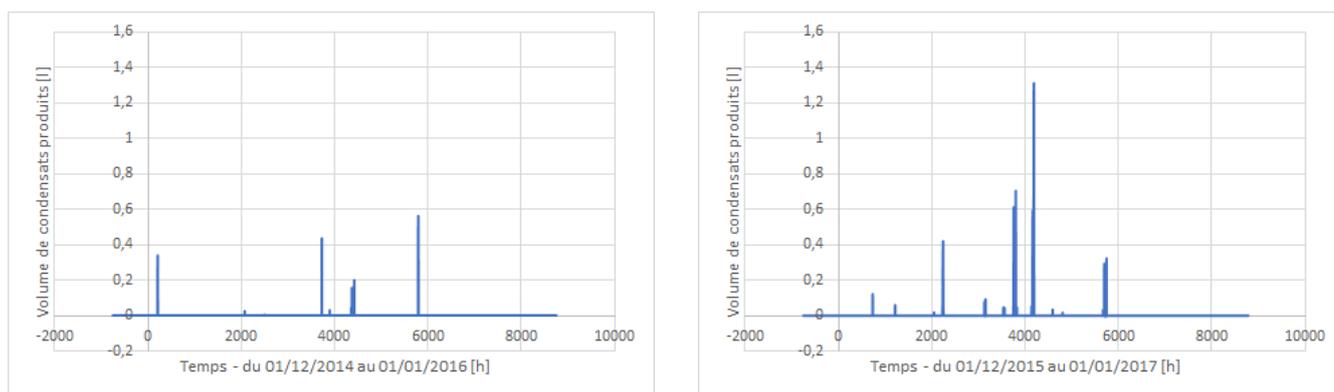


FIGURE 9.3 – Quantité de condensats produite pour l'année 2015 (à gauche) et 2016 (à droite)

9.2 Résultats des modélisations de la fin du puits

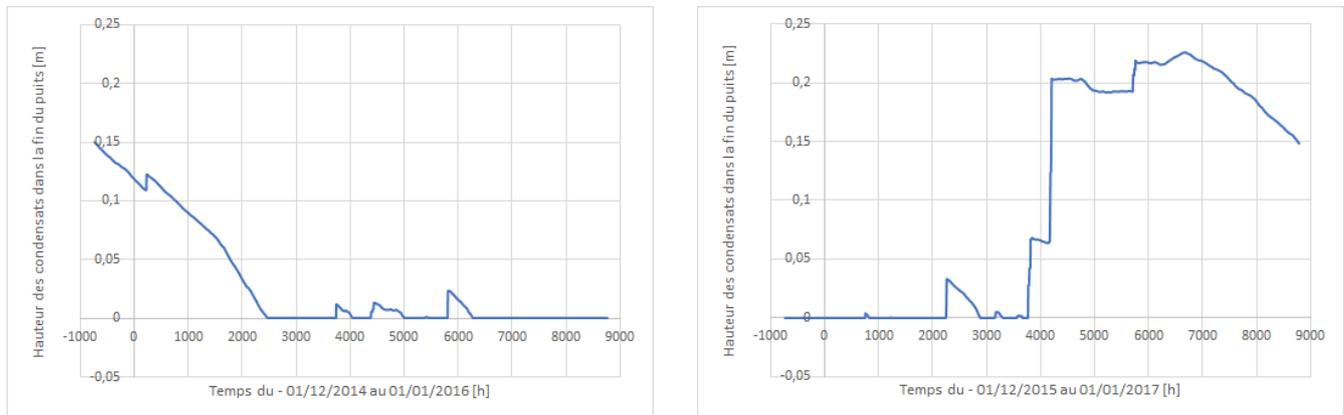


FIGURE 9.4 – Hauteur des condensats dans la fin du puits pour l'année 2015 (à gauche) et 2016 (à droite)

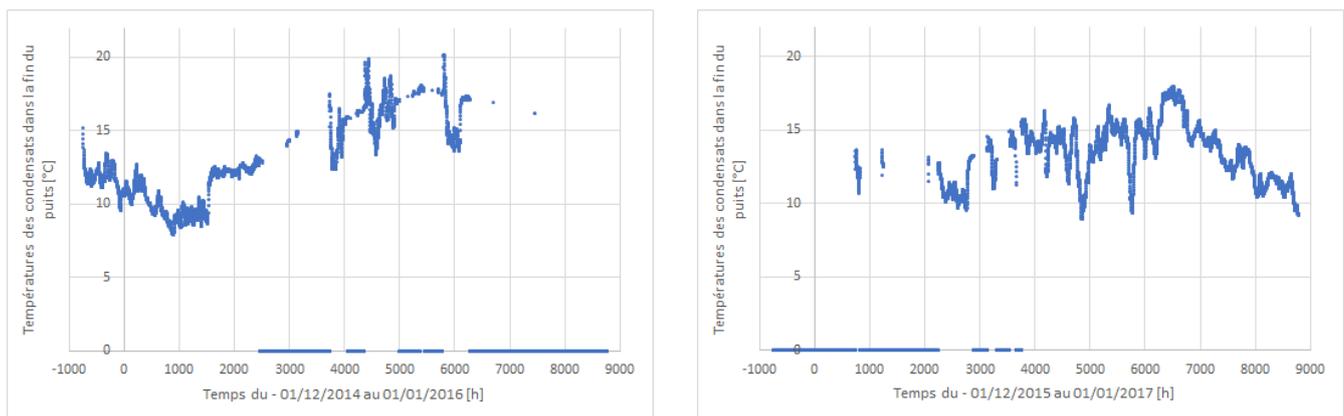


FIGURE 9.5 – Températures des condensats dans la fin du puits pour l'année 2015 (à gauche) et 2016 (à droite)

Les Figures 9.4 et 9.5 montrent que lorsque l'année est peu humide, il est possible de se retrouver en fin de puits sans condensat après la période estivale. Par contre, lorsque l'année est humide, les condensats sont bien présents et l'évaporation à la fin du puits n'est pas suffisante pour empêcher les condensats produits dans la partie horizontale de s'accumuler. Les températures des condensats sont comprises entre 7,89 °C et 20,15 °C pour 2015 et entre 8,95 °C et 17,97 °C pour 2016, ce qui représente des températures de développement pour les micro-organismes psychrophiles. Au total, 4134 h de l'année 2015 se sont retrouvées avec des condensats en fin de puits sur les 8760 h modélisées, soit 47,2 % de l'année 2015 et 6064 h de l'année 2016 sur les 8784 h modélisées, soit 69 % de

l'année 2016.

Pour l'étude des micro-organismes présents en fin de puits, trois campagnes ont été réalisées dont les détails sont repris au point 10.1.1. Elles ont eu lieu de la mi-décembre 2020 à la mi-avril 2021 et des condensats étaient bien présents en fin de puits. L'automne 2020 a été dans les normales de saison pour les précipitations avec 219,2 mm par rapport à 219,9 mm. L'hiver 2020/2021 a été particulièrement humide avec des précipitations de 264,1 mm par rapport aux normales de 228,6 mm et le printemps 2021 parfaitement dans les normales de saison avec 165,6 mm [180, 181]. Le modèle est donc cohérent avec les observations réalisés lors des campagnes d'échantillonnages.

Troisième partie

Relevés et analyses des micro-organismes

Chapitre 10

Matériel et méthodes

Afin d'étudier la biocénose particulière présente au sein du puits, diverses analyses ont été réalisées.

10.1 Matériel et méthodes d'échantillonnage

Pour caractériser les micro-organismes présents dans l'air, il existe plusieurs méthodologies dont deux sont principalement utilisées [182]. Les techniques traditionnelles reposent sur l'impaction des particules sur une gélose et sont donc limitées aux études de la flore cultivable. Ces techniques n'offrent qu'une vision partielle des micro-organismes présents dans un environnement, car environ 1 % des bactéries de la plupart des écosystèmes est cultivable [48]. Suite à la démocratisation des analyses métagénomiques, un nouveau type d'appareil a été mis au point. Basé sur la technologie cyclonique, l'appareil collecte et concentre rapidement les particules biologiques dans un liquide, permettant de réaliser une extraction d'ADN sans incubation préalable.

L'échantillonnage de l'ADN plutôt que l'ARN des micro-organismes présent dans l'air permet de prendre en compte les bactéries et fungi en dormance. En effet, les conditions (température et humidité) pouvant fluctuer tant à l'extérieur qu'à l'intérieur du puits canadien, une partie des micro-organismes pourrait être à l'état de dormance dans l'attente de conditions plus favorables à leur développement.

10.1.1 Campagnes d'échantillonnage et stations monitorées

Durant cette étude, 4 campagnes d'échantillonnage ont été réalisées. Le Tableau 10.1 reprend les dates, l'objectif de chaque campagne et le nombre d'échantillons collectés. La campagne préliminaire a permis de valider le protocole d'échantillonnage. Elle a également mis en évidence plusieurs problématiques liées aux collecteurs. En effet, les aérobiocollecteurs cycloniques sont difficilement accessibles. De plus, leur encombrement ainsi que les dimensions de l'installation monitorée en limite l'usage notamment au niveau

de la boîte étanche située à la sortie du puits. Suite à un partenariat, la 3e campagne d'échantillonnage a été réalisée à l'aide d'un échantillonneur cyclonique de taille adaptée.

Campagnes	Date	Objectif	Nombre d'échantillons
Préliminaire	29/10/2020	Validation du protocole d'échantillonnage et de la méthode d'analyse	13 - AIR IDEAL
1	16/12/2020	Campagne hivernale Test supplémentaire avec un biocollecteur cyclonique (BURKART)	36 - AIR IDEAL 9 - BURKART 6 - filtre VMC 3 - condensats puits
2	29/03/2021	Campagne printanière	36 - AIR IDEAL 3 - condensats puits
3	13/04/2021	Campagne d'échantillonnage en collaboration avec Sciensano	9 - CORIOLIS 3 - condensats puits 3 - Rampe filtration 3 - AIR IDEAL+ filtre

TABLE 10.1 – Récapitulatif des campagnes effectuées au cours de l'étude.

Au cours de chacune de ces campagnes, 3 stations/sites ont fait l'objet de prélèvements d'aérosols biologiques. Lors des campagnes principales, un quatrième site a fait l'objet de prélèvement de condensats liquides. Ces sites, déterminés au préalable, sont référencés sur la Figure 10.1.

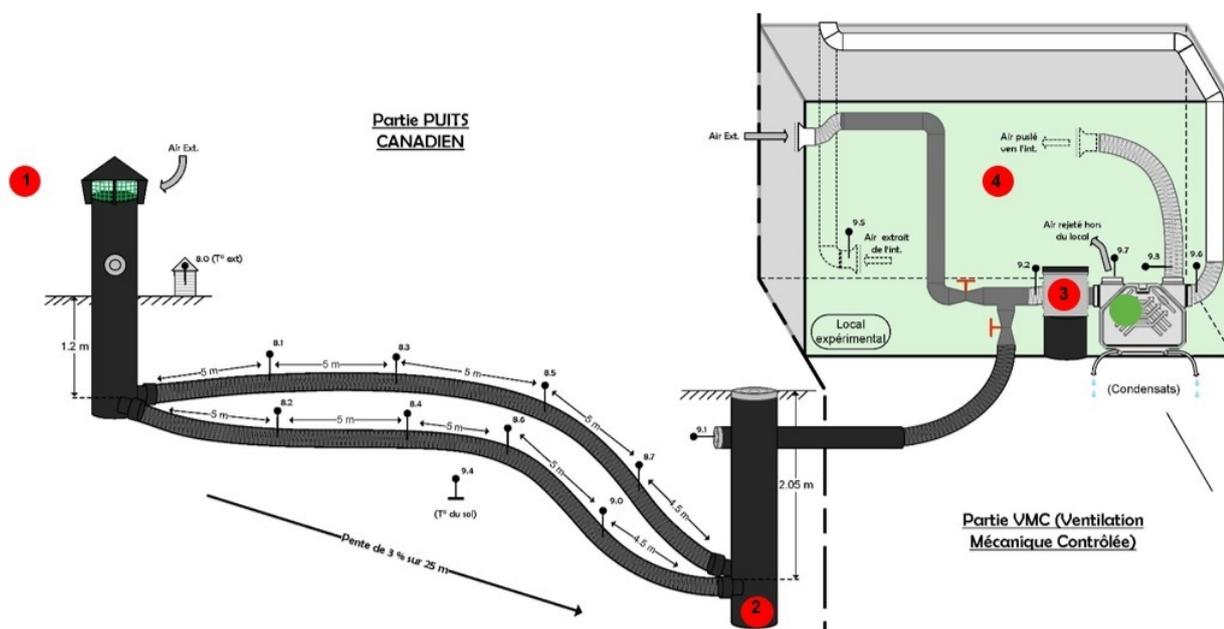


FIGURE 10.1 – Campagne d'échantillonnage sur l'installation monitorée

Les 4 stations de prélèvement représentées en rouge sont les suivantes :

- **Station 1** - À l'interface puits canadien - extérieur afin d'échantillonner l'air extérieur ;
- **Station 2** - Au niveau du collecteur de condensat à l'intérieur du puits ;
- **Station 3** - À la sortie du puits avant le passage dans le système de ventilation mécanique ;
- **Station 4** - À l'intérieur du local témoin.

Les échantillons de condensats ont été prélevés au niveau du collecteur de la station n°2. Leurs analyses permettront de savoir si ce milieu est propice ou non au développement de micro-organismes et de vérifier son possible rôle d'incubateur.

Afin d'analyser l'impact du système de filtration de la ventilation mécanique à la sortie du puits canadien (site représenté en vert sur la Figure 10.1), 6 échantillons de filtre ont été collectés lors de la première campagne. Ce filtre, en place depuis plusieurs années, est de type G3 selon la norme européenne EN 779 :2012.

Enfin, des techniques de collecte alternatives ont également été testées lors des différentes campagnes afin de vérifier l'impact du choix du matériel de collecte sur le résultat des analyses.

Lors de chaque campagne d'échantillonnage, les données fournies par l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP), en charge du monitoring de la qualité de l'air en Wallonie, ont été collectées. Le Tableau 10.2 reprend l'ensemble de ces données qui peuvent servir

de référence.

Date	Lieu	PM2,5 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	PM10 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Indice BelAQI	Température (C°)	Humidité relative (%)
16/12/2020	Mons	4	8	1 Excellent	8,9	88
23/03/2021	Mons	18	72	8 Mauvais	13,5	60
14/04/2021	Mons	14	25	3 Bon	4,4	70

TABLE 10.2 – Qualité de l'air extérieur lors des campagnes d'échantillonnage. Données fournies par l'ISSeP

10.1.2 Matériel et méthode d'échantillonnage des campagnes 1 et 2

Lors de ces campagnes, la collecte des aérosols biologiques a été réalisée avec le collecteur AIR IDEAL 3P BIOMERIEUX. Présenté sur la Figure 10.2, ce biocollecteur est conforme à la norme internationale ISO/DIS 14698-1. Il collecte les particules présentes dans l'air par impaction directe sur gélose contenue dans une boîte de Petri de 90 mm de diamètre au travers d'un crible.



FIGURE 10.2 – Biocollecteur d'air - Air Ideal

Le Tableau 10.3 reprend pour chaque station de prélèvement, le nombre d'échantillons collectés et leurs caractéristiques.

Station	Quantité prélevée	Bactéries	Fungi
1	1000 L d'air/échantillon	6 échantillons Boîte de pétri 90 mm Milieu 869 + cycloheximide	6 échantillons Boîte de pétri 90 mm Milieu 869
2	50 mL de condensat/échantillons	3 échantillons Tube Falcon 50 mL	
3	1000 L d'air/échantillon	6 échantillons Boîte de pétri 90 mm Milieu 869 + cycloheximide	6 échantillons Boîte de pétri 90 mm Milieu 869
4	1000 L d'air/échantillon	6 échantillons Boîte de pétri 90 mm Milieu 869 + cycloheximide	6 échantillons Boîte de pétri 90 mm Milieu 869

TABLE 10.3 – Nombre et caractéristiques des échantillons pour chaque site

Le milieu de culture 869 est un milieu complet permettant le développement tant des bactéries que des fungi. Il a été coulé dans des boîtes de Petri d'un diamètre de 90 mm sous une hotte à flux laminaire. Pour les échantillons bactériens, 50 mg de cycloheximide ont été ajoutés par 1000 mL de milieu de culture. Cet antifongique permet aux bactéries de se développer sans entrer en compétition avec des fungi à croissance rapide. Aucun antibiotique n'a été ajouté au milieu destiné aux échantillons de fungi.

Le milieu de culture 869 est composé comme suit pour 1000 mL :

- Tryptone - 10 g
- Extrait de levure - 5 g
- NaCl - 5 g
- Glucose - 1 g
- CaCl₂.2H₂O - 345 mg
- Agar-agar - 15 g
- Ajuster à pH7

Après l'échantillonnage des 3 stations, la moitié des boîtes de Petri ont été incubées 72 h à 30 °C, température optimale de croissance de nombreux fungi et bactéries. L'autre moitié des boîtes ont été incubées 72 h à 20 °C, température représentative des habitations. Une énumération des colonies a été réalisée toutes les 24 h sur chaque boîte afin de vérifier la présence de bactéries ou fungi et leur croissance. Après la période d'incubation, l'ensemble des boîtes ont été conservées à 4 °C. Les échantillons utilisés pour l'extraction ADN ont été réalisés comme suit : Pour chaque station et pour chaque micro-organisme d'intérêt (bactéries ou fungi), les boîtes de Petri provenant des 2 températures d'incubation ont été rassemblées 2 par 2 aléatoirement ; 1 boîte à 20 °C avec une boîte à 30 °C, pour créer

3 échantillons. Chaque boîte a été raclée et l'ensemble des micro-organismes issus de 2 boîtes a été inséré dans un tube Eppendorf de 2 mL pour l'extraction d'ADN.

La Figure 10.3 illustre, pour une station de prélèvement, le monitoring réalisé sur les boîtes de Petri « Fungi » et la création des 3 échantillons « fungi » pour l'analyse ADN.

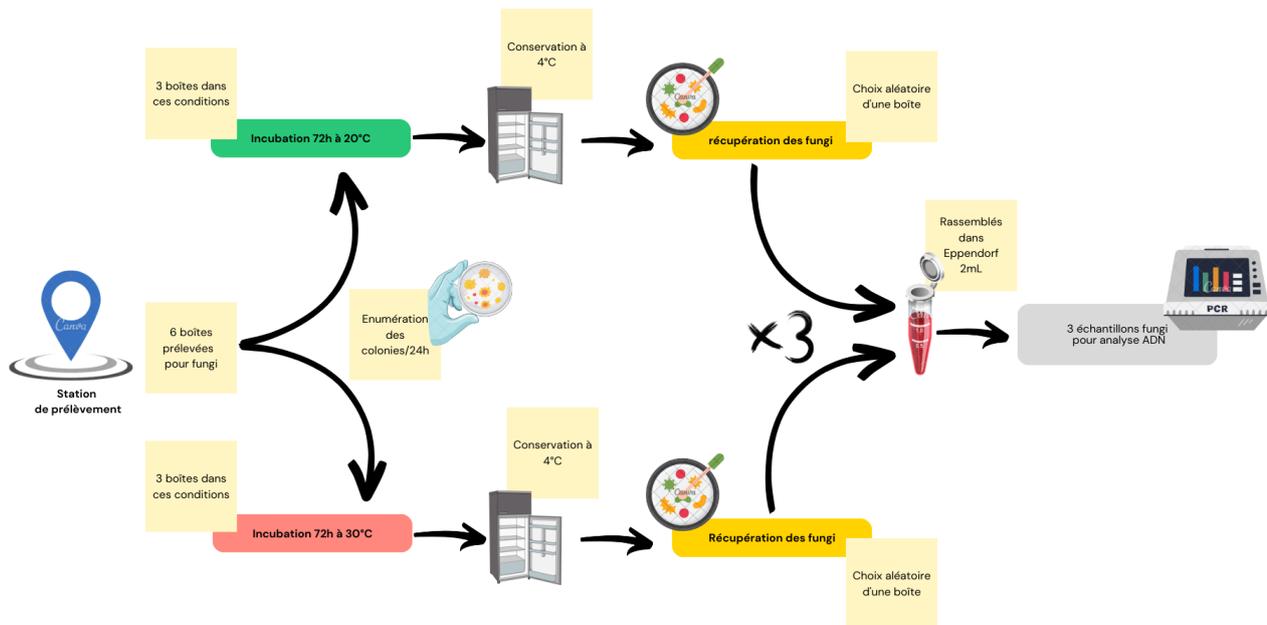


FIGURE 10.3 – monitoring des boîtes fungi et création des échantillons pour analyse ADN pour une station de prélèvement

Lors des campagnes 1 et 2, 4 boîtes dites de « contrôle négatif » ont été préparées en même temps que les boîtes classiques. Elles ont été premièrement incubées pour s'assurer que le milieu préparé n'avait pas été contaminé à l'origine. Ces boîtes "contrôles négatifs" ont ensuite suivi le même parcours que les boîtes d'échantillons et ont été incubées une deuxième fois afin de vérifier et d'écarter toute contamination externe durant le processus de collecte.

Le Tableau 10.4 reprend la composition et le monitoring réalisés sur les contrôles négatifs.

Boîte	Composition	Monitoring		
1	Milieu 869 + cycloheximide	Incubation 48 h à 30 °C	Accompagnement échantillons lors de la collecte	Incubation 72 h à 20 °C avec les échantillons
2	Milieu 869 + cycloheximide	Incubation 48 h à 30 °C	Accompagnement échantillons lors de la collecte	Incubation 72 h à 30 °C avec les échantillons
3	Milieu 869	Incubation 48 h à 30 °C	Accompagnement échantillons lors de la collecte	Incubation 72 h à 20 °C avec les échantillons
4	Milieu 869	Incubation 48 h à 30 °C	Accompagnement échantillons lors de la collecte	Incubation 72 h à 30 °C avec les échantillons

TABLE 10.4 – Composition et monitoring des boîtes « contrôle négatif » lors des campagnes 1 et 2

10.1.3 Matériel et méthode d'échantillonnage de la campagne 3

Lors de cette campagne, la collecte des aérosols biologiques a été réalisée à l'aide du Coriolis μ Air Sampler de Bertin Technologies. Ce dernier est présenté à la Figure 10.4.



FIGURE 10.4 – Coriolis μ Air Sampler ©Bertin Technologies

Cet aérobiocollecteur répond aux normes CE et internationales ISO 14698-1. Il utilise la technologie cyclonique présentée à la Figure 10.5. Le mouvement de l'air aspiré à l'intérieur du cône de collecte permet la création d'un vortex qui sépare les particules biologiques (d'un diamètre minimum de 0,5 μm) du flux d'air en les dirigeant contre les parois de cône pour ensuite les concentrer dans une solution. L'échantillon obtenu est directement utilisable pour l'extraction ADN.

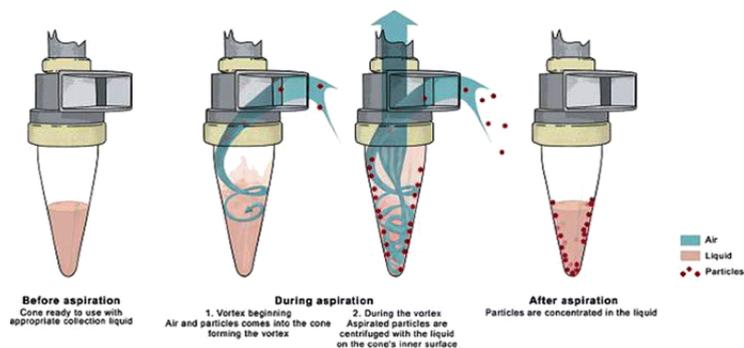


FIGURE 10.5 – Technologie cyclonique utilisée par le Coriolis μ Air Sampler. [22]

Pour chaque station de collecte aérienne, 3 échantillons de 1000 L d'air ont été collectés. Pour chaque échantillon, le cône de collecte est rempli de 15 mL de solution tampon phosphate salin (PBS).

10.1.4 Méthodes alternatives d'échantillonnage

Afin de valider la méthodologie d'échantillonnage utilisée, plusieurs méthodes alternatives ont également été testées. Les 2 premières méthodes présentées dans ce point n'ont été testées que sur l'air extérieur.

La première méthode alternative utilise l'AIR IDEAL mais l'impaction a été réalisée sur un filtre en polycarbonate de 90 mm au lieu d'une boîte de Petri avec gélose. Aucune étape de mise en culture n'a été réalisée, le filtre a simplement été découpé pour réaliser l'extraction ADN.

La seconde méthode alternative utilise pour la collecte une rampe de filtration microbologique couplée à une pompe externe qui force l'air à passer par un filtre en polycarbonate pour capturer les particules en suspension. Le dispositif de collecte est présenté à la Figure 10.6. Comme pour la première méthode, aucune étape de mise en culture n'a été réalisée. Le filtre a été directement utilisé pour réaliser l'extraction ADN.



FIGURE 10.6 – Rampe de filtration microbiologique

La troisième méthode utilise un aérobiocollecteur, le Burkard cyclone sampler visible à la Figure 10.7. Cet appareil fait passer en solution les micro-organismes de l'air grâce à un effet cyclonique. Malheureusement les dimensions de l'appareil, trop imposantes par rapport aux dimensions du puits, ne permettaient pas de réaliser l'échantillonnage de la station 3 de l'installation.



FIGURE 10.7 – Burkard cyclone sampler

Les résultats des tests réalisés avec ces 3 méthodes n'étant pas concluants, la méthode de l'AIR IDEAL couplée à une boîte de Petri avec gélose est donc privilégiée.

10.2 Matériel et méthode d'analyse des échantillons

10.2.1 Extraction ADN

L'extraction ADN des échantillons a été réalisée à l'aide du kit Power Soil Pro de QIAGEN. Une double quantification de l'ADN présent dans les échantillons a été réalisée. La première avec le spectrofluorimètre NanoDrop ND330 - Thermo Fisher Scientific qui est certifié UL/CSA et CE. La deuxième via la méthode du PicoGreen. Cette dernière utilise un réactif fluorescent spécifique de l'acide nucléique (le PicoGreen dsDNA) et permet une quantification précise de l'ADN double brin.

10.2.2 Amplification de l'ADN cible par PCR

L'amplification PCR pour les échantillons bactériens a été réalisée à l'aide du kit Phusion Hot Start II High-Fidelity PCR Master Mix - Thermo Fisher Scientific. Les amorces utilisées et présentées dans le Tableau 10.5 ciblent les régions hypervariables V3 et V4 de l'ADNr 16S. Le Tableau 10.6 détaille le contenu des échantillons introduits dans le thermocycleur et le Tableau 10.7 l'ensemble des paramètres sélectionnés au niveau de l'appareil pour l'amplification ADN. Le contrôle qualité des acides nucléiques issus de la PCR a été réalisé en combinant le système TapeStation 4150 et les ScreenTape D1000 - Agilent. Enfin, le système AMPure XP Beads - Beckman Coulter a permis de purifier les échantillons à la suite de la PCR. Après chaque étape et dans l'attente de leur utilisation, les échantillons ont été stockés à -20°C .

Nom de l'amorce	Séquence de l'amorce
Illumina_16S_341F	5'-TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAGCCTACGGGNGGCWGCAG
Illumina_16S_805R	5'-GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAGGACTACHVGGGTATCTAATCC

TABLE 10.5 – Amorces utilisées pour l'amplification par PCR des régions hypervariables V3 et V4 de l'ADNr 16S bactérien

Volume présent par échantillon	Réactifs
3 μL	ADN
10 μL	Phusion Hot Start II High-Fidelity PCR Master Mix
1 μL	Primers forward
1 μL	Primers reverse
5 μL	H ₂ O exempte de nucléase

TABLE 10.6 – Contenu en réactifs des échantillons introduits dans le thermocycleur pour l'amplification PCR de l'ADNr bactérien

Étapes	Température	Durée d'un cycle/étape	Nombre de cycles
Dénaturation initiale	98 °C	2 minutes	1
Dénaturation	98 °C	20 secondes	25
Appariement	55 °C	30 secondes	
Extension	72 °C	30 secondes	
Extension finale	72 °C	5 minutes	1
Maintien	4 °C	Infini	1

TABLE 10.7 – Paramètres sélectionnés pour l'amplification PCR au niveau du thermocycleur l'ADNr bactérien

L'amplification PCR pour les échantillons fungi a été réalisée à l'aide du kit PCR IllustratTM Hot Start Mix RTGTM. Les amorces utilisées et présentées au Tableau 10.8 ciblent les régions variables ITS1 et ITS4 de l'ADNr. Le contenu en réactifs des échantillons introduits dans le thermocycleur ainsi que les paramètres sélectionnés pour l'amplification ADN par PCR sont détaillés dans les Tableaux 10.9 et 10.10. La purification des produits issus de la PCR a été réalisée à l'aide d'AMPure XP Beads - Beckman Coulter. Enfin après chaque étape et dans l'attente de leur utilisation, les échantillons ont été stockés à -20 °C.

Nom de l'amorce	Séquence de l'amorce
ITS1	5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGC-3'
ITS4	5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3'

TABLE 10.8 – Séquences des amorces sélectionnées pour l'amplification ciblée de la région ITS chez les fungi [32]

Volume présent par échantillon	Réactifs
3 μL	ADN
10 μL	Hot start PCR Mix
1 μL	Primers forward
1 μL	Primers reverse
5 μL	H ₂ O exempte de nucléase

TABLE 10.9 – Contenu en réactif de chaque échantillon utilisé pour l'amplification par PCR des fungi

Étapes	Température	Durée d'un cycle/étape	Nombre de cycles
Dénaturation initiale	98 °C	2 minutes	1
Dénaturation	98 °C	20 secondes	25
Appariement	55 °C	30 secondes	
Extension	72 °C	30 secondes	
Extension finale	72 °C	5 minutes	1
Maintien	4 °C	Infini	1

TABLE 10.10 – Paramètres sélectionnés au niveau du thermocycleur pour l'amplification ADN des fungi

10.2.3 Séquençage des ADN cibles bactériens et fungi

Pour l'ensemble des échantillons bactériens et fungi des 3 campagnes principales, la préparation des librairies c'est-à-dire de l'ensemble des fragments ADN que l'on souhaite séquençer est réalisée par enrichissement PCR. Lors de cette étape, les tags et indexes sont ajoutés aux produits purifiés provenant de l'amplification à l'aide du kit Nextera XT DNA Library Preparation – Illumina. Le contenu en réactif des échantillons utilisés et les paramètres sélectionnés au niveau du thermocycleur pour l'enrichissement PCR sont détaillés dans les Tableaux 10.11 et 10.12. L'ajout des tags et indexes permet le multiplexage, c'est-à-dire le séquençage de plusieurs échantillons en même temps, car ils sont identifiés par code-barre. La purification des produits provenant de l'ajout des indexes a été réalisée avec l'AMPure XP Beads - Beckman Coulter selon le protocole standard.

Volume présent par échantillon	Réactifs
5 μ L	ADN provenant de l'amplification PCR
5 μ L	Nextera XT Index Primer 1 (N7) - Illumina
5 μ L	Nextera XT Index Primer 2 (S5) - Illumina
25 μ L	PCR Phusion Hot Start Mix
10 μ L	H ₂ O exempte de nucléase

TABLE 10.11 – Contenu en réactif des échantillons utilisés pour la préparation des librairies par enrichissement PCR

Étapes	Température	Durée d'un cycle/étape	Nombre de cycles
Dénaturation initiale	95 °C	3 minutes	1
Dénaturation	95 °C	30 secondes	8
Appariement	55 °C	30 secondes	
Extension	72 °C	30 secondes	
Extension finale	72 °C	5 minutes	1
Maintien	4 °C	Infini	1

TABLE 10.12 – Paramètres du thermocycleur utilisés pour la préparation des bibliothèques par enrichissement PCR

Les bibliothèques ont été ensuite quantifiées au spectrofluorimètre NanoDrop ND330 - Thermo Fisher Scientific et leur taille vérifiée avec le système TapeStation 4150 et les ScreenTape D1000 – Agilent.

Dans un second temps, les bibliothèques ont été diluées pour atteindre une concentration de 5 nM avec du tampon Tris-HCl d'une concentration de 10 mM et de pH 8,5.

Enfin, une aliquote de 5 μ L d'ADN dilué de chaque échantillon a été prélevée lors de la combinaison des bibliothèques. Les bibliothèques combinées ont été dénaturées par chauffage avec du NaOH. 5 % de PhiX Control V3 ont été ajoutés lors des séquençages afin d'augmenter la diversité nucléotidique des bibliothèques. À la suite de toutes ces étapes, les bibliothèques ont été chargées dans la cartouche du système MiSeq™ d'IlluminaMD pour le séquençage. Ce dernier est basé sur une approche « paired-end » qui génère pour chaque fragment d'ADN une séquence « sens » ou « forward » et une séquence « anti-sens » ou « reverse » de maximum 300 paires de bases chacune. À la fin du processus, les séquences sont automatiquement dé-multiplexées et attribuées à leurs échantillons respectifs.

10.2.4 Analyse bioinformatique

Les séquences brutes obtenues à la suite du séquençage ADN sont passées par un ensemble d'étapes de traitement bioinformatique appelé « Pipeline » permettant de nettoyer et trier les séquences avant leur assignation taxonomique. Le pipeline développé par le CARAH et utilisé pour cette étude contient les boîtes à outils et programmes bioinformatiques Cutadapt, Pear, DADA2 et Uchime. Ils permettent la découpe des amorces, l'assemblage des séquences et l'élimination des séquences chimériques.

L'assignation taxonomique des séquences obtenues en fin de pipeline a été réalisée à l'aide de l'algorithme BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) dans la base de données GenBank du National Center for Biotechnology Information (NCBI). Cette banque de données, en constante évolution, est la plus exhaustive et contenait en 2020 plus de 210 millions de séquences ADN et plus de 95 000 espèces biologiques référencées. L'assignation taxonomique des bactéries et fungi a été réalisée jusqu'à l'espèce.

Les tables de taxons obtenues à la suite de l'assignation taxonomique ont également été comparées aux bases de données FAPROTAX (bactéries) et FUNGuild (fungi) pour la recherche d'espèces pathogènes pouvant représenter un risque sanitaire.

Chapitre 11

Résultats et analyses microbiologiques

11.1 Résultats après mise en culture des échantillons

Lors des campagnes d'échantillonnage 1 et 2, des cultures bactériennes et fongiques ont été réalisées. Dans cette section, les nombres de $CFU.m^{-3}$ (unité formant une colonie par mètre cube) obtenus entre les stations aériennes (Station 1 : Extérieur, Station 3 : Sortie de puits et Station 4 : Intérieur), les campagnes et les températures d'incubation sont comparés. Les tableaux reprenant les résultats du comptage des colonies sont détaillés en annexe (cf. Annexe F).

Les boîtes « contrôle négatif » ont également été analysées pour chaque campagne. Celles-ci étant exemptes de colonie, aucune contamination lors de la préparation des boîtes ou au cours du processus de collecte n'est à déplorer.

Le tableau 11.1 reprend le nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ et de $CFU_{fungi}.m^{-3}$ pour chaque station et pour chaque campagne d'échantillonnage.

Station d'échantillonnage	Campagne 1		Campagne 2	
	Bactéries $CFU.m^{-3}$	Fungi $CFU.m^{-3}$	Bactéries $CFU.m^{-3}$	Fungi $CFU.m^{-3}$
Station 1	225 ± 72	294 ± 82	106 ± 31	116 ± 97
Station 3	70 ± 28	319 ± 59	38 ± 17	67 ± 56
Station 4	53 ± 48	110 ± 72	55 ± 53	68 ± 29

TABLE 11.1 – Nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ et de $CFU_{fungi}.m^{-3}$ pour chaque station et chaque campagne d'échantillonnage.

Lors de la campagne 1, le nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ le plus élevé est recensé à la sortie du puits (station 3) pour les fungi et à l'extérieur (station 1) pour les bactéries. Le nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ pour les bactéries et les fungi est le plus élevé à l'extérieur (station 1) lors de la campagne 2.

Le tableau 11.2 reprend le nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ et de $CFU_{fungi}.m^{-3}$, toutes stations confondues, pour chaque température d'incubation et pour chaque campagne.

Pour les bactéries et les fungi, ce nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ recensé, toutes stations et campagnes confondues, est plus important à la température d'incubation de 20 °C.

Pour les bactéries et les fungi, ce nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ recensé, toutes stations et températures d'incubation confondues, est plus important à la campagne 1.

Variables		Bactéries $CFU.m^{-3}$	Fungi $CFU.m^{-3}$
Température d'incubation	20°C	100 ± 184	174 ± 201
	30 °C	83 ± 102	150 ± 208
Campagne d'échantillonnage	Campagne 1	116 ± 168	241 ± 187
	Campagne 2	66 ± 71	83 ± 130

TABLE 11.2 – Nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ et de $CFU_{fungi}.m^{-3}$, toutes stations confondues, pour chaque température d'incubation et pour chaque campagne.

Pour analyser ces résultats, des tests d'hypothèse ont été réalisés. Ils sont utilisés pour prouver ou affirmer quelque chose sur une population à l'aide d'un échantillon. Une hypothèse est donc posée, notée H0 ou hypothèse nulle. L'hypothèse nulle choisie dans cette étude est la similarité des populations. Un niveau de signification, noté p, est calculé et permet de décider si l'hypothèse nulle doit être rejetée ou non. Si la valeur p est inférieure au seuil de signification, l'hypothèse nulle doit être rejetée, dans le cas contraire, elle ne doit pas être rejetée. Le seuil de signification choisi est de 5 %, cela signifie qu'il y a 5 % de chances de rejeter l'hypothèse nulle même si en fait elle est vraie.

Le test de Kruskal-Wallis est utilisé pour déterminer si les échantillons ont des similarités ou non. C'est un test non paramétrique, cela signifie qu'il n'exige pas que la distribution de l'échantillonnage soit caractérisée par certains paramètres comme par exemple une répartition suivant une loi normale. La non-normalité de l'échantillonnage a été vérifiée et est détaillée dans [183]. C'est ce test qui est le mieux adapté pour comparer statistiquement la moyenne des $CFU.m^{-3}$ entre les stations de prélèvement.

Pour compléter le test de Kruskal-Wallis, un test de Dunn ou test de comparaison multiple par paires, est utilisé pour effectuer un nombre spécifique de comparaisons entre des groupes de données et déterminer laquelle d'entre elles est significative.

Le test de Mann-Whitney, également non paramétrique, est utilisé pour vérifier si les distributions de chacun des deux groupes de données sont proches. Il a permis de comparer statistiquement le nombre moyen de $CFU.m^{-3}$, toutes stations confondues, pour les températures d'incubation et les campagnes d'échantillonnage.

11.1.1 Comparaison du nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ entre les stations de prélèvement pour la campagne 1.

Pour les bactéries, la valeur obtenue pour le test de Kruskal-Wallis est $p = 0,00274$. L'hypothèse nulle H_0 est donc rejetée et il existe une différence significative entre les différentes stations.

Un test de Dunn a été réalisé afin de mettre en évidence les stations qui sont significativement différentes entre elles. La Figure 11.1 permet de comparer le nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ recensés aux différentes stations. Cette figure montre que le nombre de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ de la station 1 (air extérieur) est significativement plus grand que celui des stations 3 et 4.

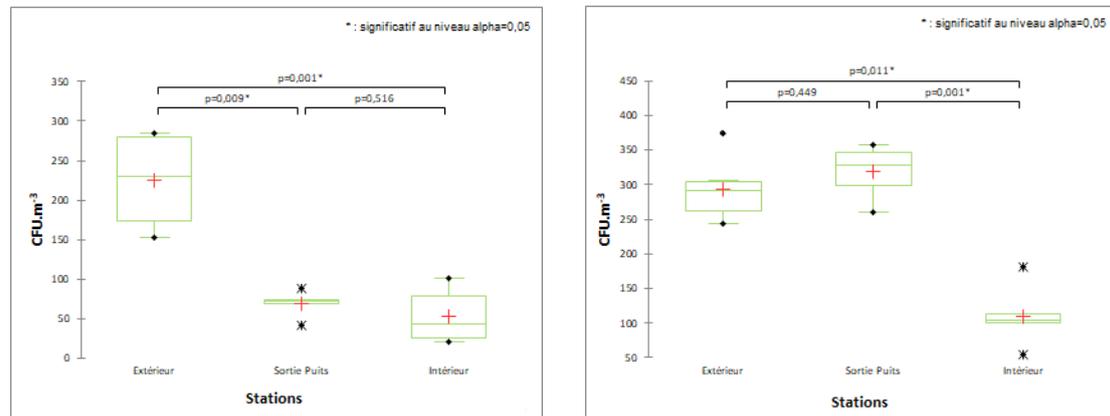


FIGURE 11.1 – Comparaison du nombre moyen de colonies entre stations pour les bactéries (à gauche) et les fungi (à droite) lors de la campagne 1.

Pour les Fungi, la valeur obtenue pour le test de Kruskal-Wallis est $p = 0,0026$. L'hypothèse nulle H_0 est donc rejetée et il existe une différence significative entre les stations. Comme pour les bactéries un test de Dunn a également été réalisé. La Figure 11.1 compare le nombre moyen de $CFU_{fungi}.m^{-3}$ recensé aux différentes stations. Ce nombre est significativement différent entre les stations 1 (air extérieur) et 4 (air intérieur). Il est également significativement différent entre les stations 3 (sortie puits) et 4 (air intérieur).

11.1.2 Comparaison du nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ entre les stations de prélèvement pour la campagne 2.

Pour les bactéries, la valeur obtenue au test de Kruskal-Wallis est $p = 0,0058$. Il y a donc une différence significative entre les nombres moyens de $CFU.m^{-3}$ recensés aux 3 stations. Les résultats du test de Dunn sont présentés à la Figure 11.2. Le nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ de la station 1 (air extérieur) est significativement différent de celui recensé à la station 3 (sortie de puits).

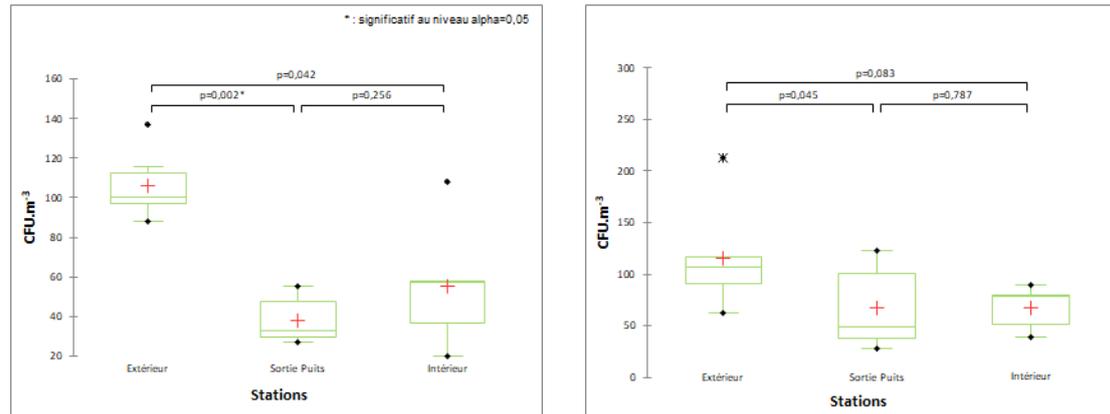


FIGURE 11.2 – Comparaison du nombre moyen de colonies entre stations pour les bactéries (à gauche) et les fungi (à droite) lors de la campagne 2.

Pour les Fungi, la valeur obtenue au test de Kruskal-Wallis est $p = 0,0945$. L'hypothèse nulle H_0 n'est pas rejetée et il n'existe aucune différence significative entre les nombres moyens de $CFU.m^{-3}$ entre les stations comme illustré à la Figure 11.2.

11.1.3 Comparaison du nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ et de $CFU_{fungi}.m^{-3}$ entre les températures d'incubation, toutes campagnes confondues.

Les valeurs obtenues aux tests de Mann-Whitney sont $p = 0,987$ pour les bactéries et $p = 0,261$ pour les Fungi. L'hypothèse nulle H_0 n'est donc pas rejetée. Aucune différence significative du nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ n'est donc relevée entre les températures d'incubation pour les deux types de microorganismes.

11.1.4 Comparaison du nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ entre les campagnes toutes stations confondues

La valeur obtenue au test de Mann-Whitney pour les bactéries est $p = 0,133$. Il n'y a donc pas de différences significatives du nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ recensé, toutes stations confondues, entre les campagnes.

Pour les Fungi, la valeur obtenue au test de Mann-Whitney est $p = 0,0000512$. Il existe donc une différence significative du nombre moyen de $CFU.m^{-3}$, toutes stations confondues, entre les campagnes d'échantillonnage. Comme le montre le Tableau 11.2, le nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ recensé est plus élevé lors de la campagne 1.

11.2 Résultats après analyse bioinformatique

Le séquençage ADN et l'assignation taxonomique permettent d'étudier la composition taxonomique des échantillons. Pour les 3 campagnes confondues, 1528 OTU fungi et 5504 OTU bactériens ont été recensés au total. Le Tableau 11.3 synthétise le nombre de taxons bactériens et fungi identifiés au cours des 3 campagnes d'échantillonnage.

Amplicons	Phylum	Classe	Ordre	Famille	Genre	Espèce
ITS (fungi)	7	31	97	270	544	649
16S (bactérie)	30	61	165	371	849	969

TABLE 11.3 – Synthèse du nombre de taxons bactériens et fungi identifiés pour les 3 campagnes d'échantillonnage

Dans chaque échantillon, il n'a pas toujours été possible d'identifier chaque OTU jusqu'à l'espèce. Ces OTU non-assignés (NA) jusqu'à l'espèce étant cependant bien distincts les uns des autres, ils ont été pris en compte lors des analyses.

11.2.1 Diversité des bactéries

Les Figures 11.3, 11.4 et 11.5 présentent les diagrammes de Venn des OTU bactériens présents dans les différentes stations pour chaque campagne de prélèvement. Pour chaque station, le nombre total d'OTU est composé de l'ensemble des OTU identifiés à l'intérieur des 3 échantillons prélevés à cette station. Les chiffres indiqués aux intersections représentent le nombre d'OTU commun à 2, 3 ou 4 stations. Afin de pouvoir répondre à notre question initiale et vérifier le potentiel rôle d'incubateur microbiologique des condensats, nous nous focaliserons principalement sur les OTU détectés à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**.

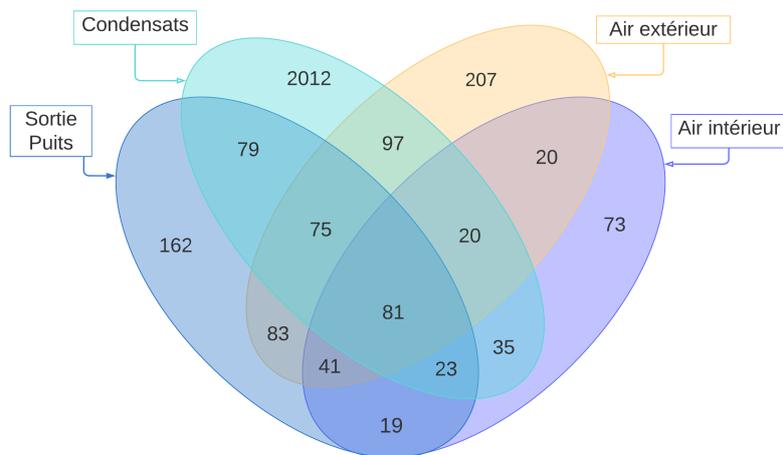


FIGURE 11.3 – Campagne 1 – Diagramme de Venn des OTU bactériens présents dans les différentes stations de prélèvement.

L'analyse du diagramme de Venn montre que sur les 3027 OTU recensés lors de cette campagne, 2012 OTU sont uniquement présents à la station **Condensats**. 81 OTU sont communs à l'ensemble des stations de prélèvement. 79 OTU non détectés dans l'**air extérieur** sont communs aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**. 61 de ces OTU ont été assignés jusqu'à l'espèce et 11 OTU jusqu'au genre. Enfin, 23 OTU non détectés dans l'**air extérieur** sont communs aux stations **Intérieur**, **Sortie Puits** et **Condensats**. Sur ces 23 OTU, 16 ont été assignés jusqu'à l'espèce et 5 jusqu'au genre. Le Tableau 11.5 reprend l'identification de ces OTU.

Les 3 OTU les plus abondants au niveau de la station **Condensats** sont :

- 24,6 % une espèce NA de l'ordre des *Nitrosomonadales*
- 4,4 % *Rhizobacter profundii*
- 2,2 % *Nevskia ramosa*

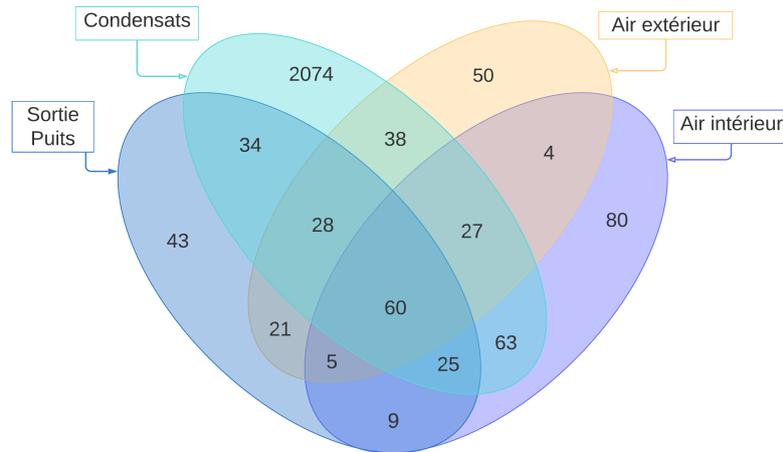


FIGURE 11.4 – Campagne 2 – Diagramme de Venn des OTU bactériens présents dans les différentes stations de prélèvement.

Sur les 2561 OTU recensés lors de la 2e campagne, 2074 OTU sont présents uniquement à la station **Condensats**. 60 OTU sont communs à l'ensemble des stations de prélèvement. 34 OTU non détectés dans l'**air extérieur** sont communs aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**. 25 de ces OTU ont été assignés jusqu'à l'espèce et 6 OTU jusqu'au genre. 25 OTU non détectés dans l'**air extérieur** sont présents au niveau des stations **Intérieur**, **Sortie Puits** et **Condensats**. Sur ces 25 OTU, 18 OTU ont été identifiés jusqu'à l'espèce et 7 jusqu'au genre. Le Tableau 11.5 reprend l'assignation taxonomique de ces OTU.

Les 3 OTU les plus abondants au niveau de la station **Condensats** sont :

- 18,5 % *Pseudomonas NA*
- 8 % *Ornithobacterium rhinotracheale*
- 5,4 % *Robiginitomaculacae NA*

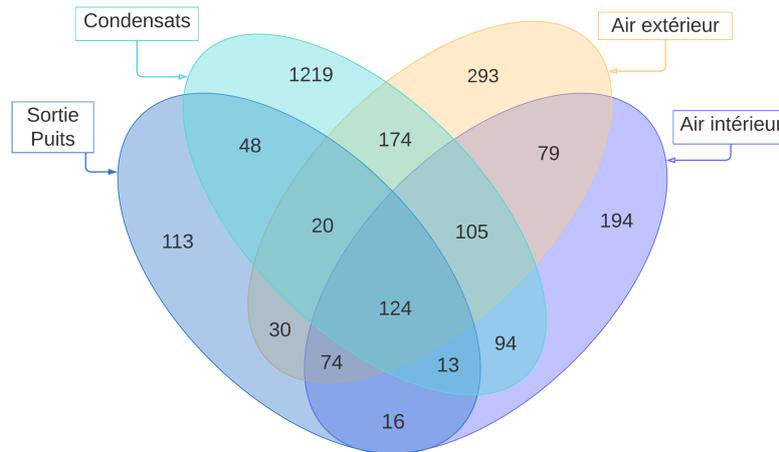


FIGURE 11.5 – Campagne 3 – Diagramme de Venn des OTU bactériens présents dans les différentes stations de prélèvement.

Sur les 2596 OTU recensés lors de la 3e campagne, 1219 OTU sont uniquement présents à la station **Condensats**. 124 OTU sont communs à l'ensemble des stations de prélèvement. 48 OTU non détectés dans l'**air extérieur** sont présents aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**. 39 de ces OTU ont été assignés jusqu'à l'espèce et 5 OTU jusqu'au genre. 13 OTU non détectés dans l'**air extérieur** sont communs aux stations **Intérieur**, **Sortie Puits** et **Condensats**. Sur ces 13 OTU, 11 ont été identifiés jusqu'à l'espèce et 1 jusqu'au genre. Le Tableau 11.5 reprend l'assignation taxonomique de ces espèces.

Les 3 OTU les plus abondants au niveau de la station **Condensats** sont :

- 12 % *Clostridium thermopalmarium*
- 9 % *Claderihabitans maritimus*
- 7,6 % *Massilia NA*

Lors de cette campagne, l'aérobiocollecteur utilisé permet de supprimer le biais lié à la mise en culture. De plus, le volume d'air échantillonné pour chaque échantillon étant de 1 m^3 , le nombre et la quantité d'OTU détectés dans chaque échantillon peuvent être assimilés à la concentration en *bactéries.m⁻³ d'air*. Ces concentrations pour chaque échantillon prélevé aux stations **Extérieur**, **Sortie Puits** et **Intérieur** ainsi que la moyenne pour chaque station sont présentées dans le Tableau 11.4.

Stations	échantillons	<i>bactéries.m⁻³</i>	Moyenne par station <i>bactéries.m⁻³</i>
Extérieur	Ext-31	126 225	132 375
	Ext-32	123 731	
	Ext-33	147 170	
Sortie Puits	Puits-31	162 584	255 750
	Puits-32	111 474	
	Puits-33	493 192	
Intérieur	Int-31	167 249	173 450
	Int-32	157 653	
	Int-33	195 448	

TABLE 11.4 – Campagne 3 - Concentration en *bactéries.m⁻³* *d'air* pour chaque échantillon et en moyenne pour les stations **Extérieur**, **Sortie Puits** et **Intérieur**.

Campagne 1		Campagne 2		Campagne 3	
Genre	Espèce	Genre	Espèce	Genre	Espèce
Acinetobacter	Acinetobacter junii	Acinetobacter	NA	Actinokineospora	Actinokineospora acnipugnans
Alkalihalobacillus	NA	Alkanindiges	Alkanindiges hongkongensis	Candidatus Protochlamydia	Candidatus Protochlamydia naegleriophila
Altererythrobacter	Altererythrobacter aquiaggeris	Bacillus	Bacillus alkalitolerans	Coralloluteibacterium	Coralloluteibacterium stylophorae
Arthrobacter	Arthrobacter ginkgonis	Bacillus	Bacillus lacus	Cryobacterium	NA
Arthrobacter	Arthrobacter pokkalii	Cellulomonas	Cellulomonas hominis	Frondihabitans	Frondihabitans cladoniiphilus
Arthrobacter	Arthrobacter agilis	Frigoribacterium	Frigoribacterium faeni	Hydrogenophaga	Hydrogenophaga crassostreae
Cellvibrio	Cellvibrio fibrivorans	Glutamicibacter	Glutamicibacter bergerei	Janthinobacterium	Janthinobacterium lividum
Cryptosporangium	NA	Kocuria	NA	Methyloceanibacter	Methyloceanibacter caenitepidi
Gottfriedia	Gottfriedia luciferensis	Metabacillus	Metabacillus herbersteinensis	Modestobacter	Modestobacter marinus
Jeotgalibacillus	NA	Oceanobacillus	Oceanobacillus chironomi	NA	NA
Marinospirillum	Marinospirillum alkaliphilum	Paenarthrobacter	Paenarthrobacter nitrogua-jacolicus	Pseudolabrys	Pseudolabrys taiwanensis
Micrococcus	NA	Paeniglutamicibacter	NA	Pseudomonas	Pseudomonas guguanensis

Suite à la page suivante...

<i>suite du tableau</i>					
Campagne 1		Campagne 2		Campagne 3	
Genre	Espèce	Genre	Espèce	Genre	Espèce
Micrococcus	Micrococcus aloeverae	Paenisporosarcina	Paenisporosarcina quisquiliarum	Tumebacillus	Tumebacillus ginsengisoli
Micrococcus	Micrococcus flavus	Paenisporosarcina	Paenisporosarcina macmurdoensis		
NA	NA	Pelomonas	Pelomonas aquatica		
NA	NA	Priestia	Priestia koreensis		
Pelomonas	Pelomonas aquatica	Salinibacillus	Salinibacillus kushneri		
Priestia	Priestia abyssalis	Sanguibacter	NA		
Reinekea	Reinekea aestuarii	Sanguibacter	Sanguibacter antarcticus		
Rhizobium	Rhizobium undicola	Sphingomonas	NA		
Rhodococcus	Rhodococcus kyotonensis	Staphylococcus	NA		
Sphingopyxis	NA	Staphylococcus	Staphylococcus ureilyticus		
Terribacillus	Terribacillus saccharophilus	Staphylococcus	Staphylococcus arlettae		
		Staphylococcus	Staphylococcus massiliensis		
		Williamsia	NA		

TABLE 11.5 – Assignation taxonomique des OTU communs aux stations **Intérieur**, **Sortie Puits** et **Condensats** pour chaque campagne d'échantillonnage.

Lors des 3 campagnes, des OTU bactériens non présents dans **l'air extérieur** et appartenant aux genres *Alkalihalobacillus* et *Pseudomonas* ont été détectés au niveau des stations **Condensats** et **Sortie Puits**. Durant les campagnes 1 et 2, des OTU bactériens du genre *Cellulomonas*, *Exiguobacterium*, *Leifsonia*, *Oceanobacillus* et *Streptomyces* ont été détectés à ces mêmes stations. Pendant les campagnes 1 et 3, les espèces *Schlesneria paludicola*, *Daejeonella rubra* et *Caulobacter mirabilis* ainsi que des OTU bactériens du genre *Kitasatospora*, *Massilia*, *Roseomonas* étaient présents à ces 2 stations, **Condensats** et **Sortie Puits**.

11.2.2 Diversité des fungi

Les Figures 11.6, 11.7 et 11.8 présentent les diagrammes de Venn des OTU fungi présents dans les différentes stations pour chaque campagne de prélèvement. Pour chaque station, le nombre total d'OTU est composé de l'ensemble des OTU identifiés à l'intérieur des 3 échantillons prélevés à cette station. Les chiffres indiqués aux intersections représentent le nombre d'OTU commun à 2, 3 ou 4 stations. Comme pour les bactéries, nous nous focaliserons sur les OTU détectés à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**.

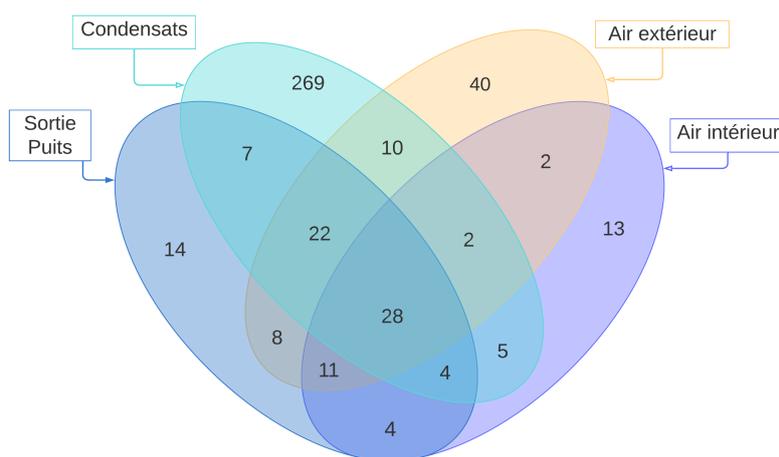


FIGURE 11.6 – Campagne 1 – Diagramme de Venn des OTU fungi présents dans les différentes stations de prélèvement.

Sur les 439 OTU détectés durant la première campagne, 269 OTU sont présents uniquement à la station **Condensats**. 28 OTU sont communs à l'ensemble des stations. 7 OTU non détectés dans **l'air extérieur** sont communs aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**. 6 d'entre eux ont été assignés jusqu'à l'espèce et 1 jusqu'au genre *Ganoderma*. 4 OTU non détectés dans **l'air extérieur** ont été identifiés à la fois dans les stations **Intérieur**, **Sortie Puits** et **Condensats**. Pour ces OTU, l'assignation taxonomique a été possible jusqu'à l'espèce. Il s'agit de *Microascus atrogriseus*, *Phanerochaete conrescens*,

Aspergillus sulphureoviridis et *Vishniacozyma foliicola*.

Les 3 OTU les plus abondants au niveau de la station **Condensats** sont :

- 43 % espèces NA de la classe des *Agaricomycetes*
- 13,95 % *Cladosporium NA*
- 7,6 % *Penicillium kongii*

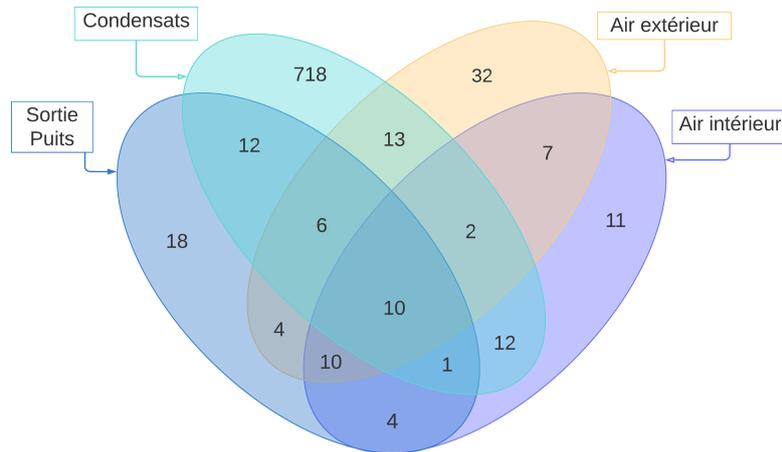


FIGURE 11.7 – Campagne 2 – Diagramme de Venn des OTU fongiques présents dans les différentes stations de prélèvement.

Parmi les 852 OTU recensés durant la campagne 2, 718 OTU ont été détectés uniquement au niveau de la station **Condensats**. 10 OTU sont communs à l'ensemble des stations. 12 OTU non présents dans l'**air extérieur** sont communs aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**. 5 d'entre eux ont été assignés jusqu'à l'espèce et 3 jusqu'au genre. 1 OTU non détecté dans l'**air extérieur** a été mis en évidence à la fois dans les stations **Intérieur**, **Sortie Puits** et **Condensats**. Il s'agit de l'espèce *Sodiomyces alcalophilus*.

Les 3 OTU les plus abondants au niveau de la station **Condensats** sont :

- 52 % *Neodevriesia bulbillosa*
- 12,7 % *Verrucocladosporum dirinae*
- 7 % *Cladosporium NA*

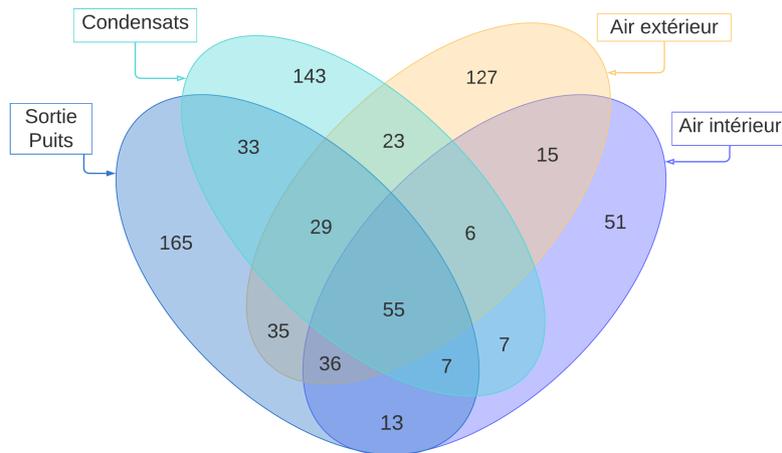


FIGURE 11.8 – Campagne 3 – Diagramme de Venn des OTU fongiques présents dans les différentes stations de prélèvement.

Sur les 745 OTU détectés durant cette 3^e campagne, 55 OTU sont communs à l'ensemble des stations de prélèvement. 33 OTU non présents dans l'**air extérieur** sont communs aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**. 27 de ces OTU ont été assignés jusqu'à l'espèce et 4 jusqu'au genre. 7 OTU non recensés dans l'**air extérieur** ont été détectés à la fois dans les stations **Intérieur**, **Sortie Puits** et **Condensats**. Parmi eux, 5 OTU ont été assignés taxonomiquement jusqu'à l'espèce. Il s'agit de *Acremonium alternatum*, *Leptospora galii*, *Psathyrella oboensis* et *Pseudozyma prolifica*. Le 6^e OTU fait partie du genre *Fusarium* et le dernier de la famille des *Aspergillaceae*.

Les 3 OTU les plus abondants au niveau de la station **Condensats** sont :

- 20,5 % *Penicillium brevicompactum*
- 14,8 % *Cladosporium NA*
- 10 % *Coniochaeta hoffmani*

Comme pour les bactéries, les concentrations en spores fongiques par m^3 d'air ont été calculées en assimilant chaque OTU fongique détecté à une spore. Les *spores.m⁻³ d'air* pour chaque échantillon collecté aux stations **Extérieur**, **Sortie Puits** et **Intérieur** ainsi que la moyenne des échantillons pour chacune de ces stations sont présentées dans le Tableau 11.6. La valeur de l'échantillon Puits-33 étant très nettement en dessous des valeurs minimales observées dans les environnements pauvres en spores fongiques, il n'a pas été pris en compte pour le calcul de la moyenne de la station **Sortie Puits**.

Stations	échantillons	<i>spores.m⁻³ d'air</i>	Moyenne par station <i>spores.m⁻³ d'air</i>
Extérieur	Ext-31	190 087	220 039
	Ext-32	190 728	
	Ext-33	279 301	
Sortie Puits	Puits-31	387 735	342 334
	Puits-32	296 932	
	Puits-33	417(*)	
Intérieur	Int-31	284 088	248 730
	Int-32	211 432	
	Int-33	250 671	

TABLE 11.6 – Campagne 3 - Concentration en *spores.m⁻³ d'air* pour chaque échantillon et en moyenne pour les stations **Extérieur**, **Sortie Puits** et **Intérieur**.

11.2.3 Recherche de pathogènes pour l'humain

Une recherche de pathogène potentiel pour l'humain parmi l'ensemble des OTU recensés a été réalisée grâce aux bases de données FAProTax et Funguild. Les diagrammes de Venn des Figures 11.9, 11.10 et 11.11 présentent, pour chaque campagne d'échantillonnage, le nombre d'OTU bactériens pathogènes pour les humains et le nombre d'OTU fungi pathogènes pour les animaux (dont les humains) recensés ainsi que leur distribution entre les stations de prélèvement. Que ce soit pour les fungi ou les bactéries, au cours des 3 campagnes, la station **Condensats** est celle où le recensement de pathogène est le plus élevé.

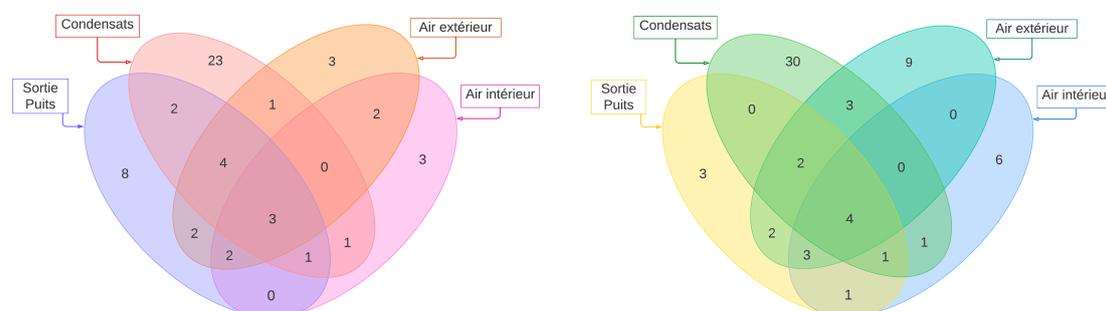


FIGURE 11.9 – Campagne 1 – Nombre d'OTU bactériens (à gauche) et fungi (à droite) pathogènes et leur distribution entre les stations de prélèvement.

Sur les 439 OTU fungi et les 3027 OTU bactériens détectés lors de cette première campagne, 65 OTU fungi et 55 OTU bactériens sont pathogènes. Sur les 28 OTU fungi et les 81 OTU bactériens commun à l'ensemble des stations, 4 OTU fungi et 3 OTU bactériens détectés sont pathogènes. Sur les 4 OTU fungi et les 23 OTU bactériens non présents

dans l'**air extérieur** et communs aux stations **Intérieur**, **Sortie Puits**, 1 OTU fungi et 1 OTU bactérien sont pathogènes. Il s'agit de *Microascus atrogriseus* pour l'OTU fungi et *Acinetobacter junii* pour l'OTU bactérien. Sur les 7 OTU fungi et les 79 OTU bactériens non présents dans l'**air extérieur et intérieur** et détectés aux stations **Condensats**, **Sortie Puits**, aucun OTU Fungi pathogène et 2 OTU bactériens pathogènes ont été détectés. Ces 2 OTU sont *Roseomonas musae* et *Moraxella osloensis*.

Le Tableau 11.7 indique l'abondance relative des OTU pathogènes détectés à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**.

OTU Genre/Espèce	Station Condensats	Station Sortie Puits	Station Intérieur	Station Extérieur
<i>Roseomonas musae</i>	0,750.10 ⁻³ %	0,734.10 ⁻³ %	/	/
<i>Moraxella osloensis</i>	1,000.10 ⁻³ %	0,184.10 ⁻³ %	/	/
<i>Acinetobacter junii</i>	1,750.10 ⁻³ %	1,653.10 ⁻³ %	50,877.10 ⁻³ %	/
<i>Microascus atrogriseus</i>	12,510.10 ⁻³ %	219,023.10 ⁻³ %	0,321.10 ⁻³ %	/
<i>Staphylococcus aureus</i>	0,500.10 ⁻³ %	11,568.10 ⁻³ %	/	1,504.10 ⁻³ %
<i>Moraxella boevrei</i>	0,500.10 ⁻³ %	669,300.10 ⁻³ %	/	682,463.10 ⁻³ %
<i>Moraxella NA</i>	1,250.10 ⁻³ %	81,161.10 ⁻³ %	/	0,430.10 ⁻³ %
<i>Stenotrophomonas chelatifhaga</i>	3,250.10 ⁻³ %	32,134.10 ⁻³ %	/	715,985.10 ⁻³ %
<i>Beauveria NA</i>	0,727.10 ⁻³ %	334,204.10 ⁻³ %	/	85,616.10 ⁻³ %
<i>Epicoccum endophyticum</i>	17,311.10 ⁻³ %	1,643.10 ⁻³ %	/	34,516.10 ⁻³ %
<i>Pseudomonas stutzeri</i>	20,503.10 ⁻³ %	0,551.10 ⁻³ %	654,451.10 ⁻³ %	0,430.10 ⁻³ %
<i>Stenotrophomonas rhizophila</i>	31,754.10 ⁻³ %	3106,506.10 ⁻³ %	628,502.10 ⁻³ %	1152,19.10 ⁻³ %
<i>Stenotrophomonas NA</i>	0,500.10 ⁻³ %	0,176.10 ⁻³	1,430.10 ⁻³ %	237,659.10 ⁻³ %
<i>Aspergillus fumigatus</i>	110,556.10 ⁻³ %	17102,550.10 ⁻³ %	2281,112.10 ⁻³ %	5724,159.10 ⁻³ %
<i>Fusarium NA</i>	28,221.10 ⁻³ %	0,657.10 ⁻³ %	17,950.10 ⁻³ %	18606,787.10 ⁻³ %
<i>Fusicolla ossicola</i>	856,665.10 ⁻³ %	1737,727.10 ⁻³ %	1,923.10 ⁻³ %	88,313.10 ⁻³ %
<i>Sporobolomyces roseus</i>	11,638.10 ⁻³ %	0,657.10 ⁻³ %	4,488.10 ⁻³ %	27,505.10 ⁻³ %

TABLE 11.7 – Campagne 1 - Abondance relative des OTU pathogènes détectés à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**. La couleur rose indique qu'il s'agit d'OTU bactériens et la verte indique les OTU fungi.

Le Tableau 11.8 reprend les OTU pathogènes présents à la station **Sortie Puits** alors qu'ils n'ont pas été détectés dans les **Condensats** ou dans l'**Air Extérieur**.

OTU bactériens pathogènes		OTU fungi pathogènes	
OTU Genre/Espèce	Abondance Sortie Puits	OTU Genre/Espèce	Abondance Sortie Puits
<i>Corynebacterium jeikeium</i>	1,102.10 ⁻³ %	<i>Acrodontium luzulae</i>	3,286.10 ⁻³ %
<i>Enterococcus faecalis</i>	1,285.10 ⁻³ %	<i>Beauveria pseudobassiana</i>	4,929.10 ⁻³ %
<i>Moraxella equi</i>	132,391.10 ⁻³ %	<i>Microascus hyalinus</i>	9,694.10 ⁻³ %
<i>Moraxella lincolnii</i>	76,754.10 ⁻³ %	<i>Trichoderma citrinoviride</i>	134,240.10 ⁻³ %
<i>Moraxella caviae</i>	0,551.10 ⁻³ %		
<i>Pseudomonas mendocina</i>	24,238.10 ⁻³ %		
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	112,376.10 ⁻³ %		
<i>Stenotrophomonas terrae</i>	0,367.10 ⁻³ %		

TABLE 11.8 – Campagne 1 - Abondance relative des OTU bactériens et fungi pathogènes détectés à la station **Sortie Puits** alors qu'ils n'étaient pas présents aux stations **Extérieur** et **Condensats**.

À titre de comparaison, l'abondance relative la plus importante relevée pour un OTU présent à cette station alors qu'il n'était pas détecté aux stations **Extérieur** et **Condensats** est de 2,57 % pour l'OTU bactérien *Staphylococcus gallinarum* et 0,189 % pour l'OTU fungi *Penicillium freii*. L'OTU *Trichoderma citrinoviride* avec 0,134 % arrive en 3e position.

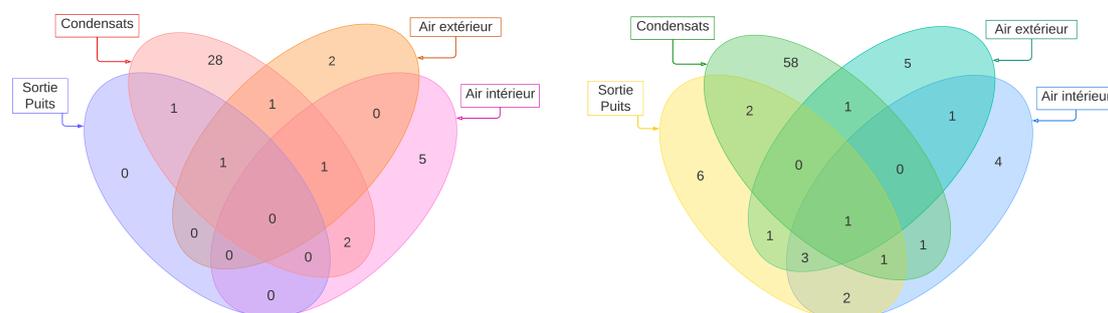


FIGURE 11.10 – Campagne 2 – Nombre d'OTU bactériens (à gauche) et fungi (à droite) pathogènes et leur distribution entre les stations de prélèvement.

Sur les 852 OTU fungi et 2561 OTU bactériens recensés lors de la 2e campagne, 86 OTU fungi et 41 OTU bactériens sont pathogènes. Sur les 10 OTU fungi et 60 OTU bactériens communs à l'ensemble des stations, 1 seul OTU fungi pathogène a été détecté. Concernant les OTU non présents dans l'**air extérieur** et détectés dans les stations **Intérieur**, **Sortie Puits**, **Condensats**, aucun OTU bactérien sur les 25 présents n'est pathogène. L'OTU fungi *Sodiomyces alcalophilus* est quant à lui pathogène. Sur les 12 OTU fungi et les 25 OTU bactériens non présents dans l'**air extérieur** et détectés aux stations

Condensats et **Sortie Puits**, 2 OTU fungi et 1 OTU bactérien sont pathogènes. Il s'agit de 2 *Didymellaceae* dont *Xenodidymella camporesii* pour les fungi et de *Pseudomonas stutzeri* pour la bactérie. Le Tableau 11.9 indique l'abondance relative des OTU pathogènes détectés à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**.

OTU Genre/Espèce	Station Condensats	Station Sortie Puits	Station Intérieur	Station Extérieur
<i>Pseudomonas stutzeri</i>	40,511.10 ⁻³ %	8,288.10 ⁻³ %	/	/
Didymellaceae NA	2,585.10 ⁻³ %	634,580.10 ⁻³ %	/	/
<i>Xenodidymella camporesii</i>	7,541.10 ⁻³ %	0,170.10 ⁻³ %	/	/
<i>Sodiomyces alcalophilus</i>	0,431.10 ⁻³ %	14,147.10 ⁻³ %	0,393.10 ⁻³ %	/
<i>Stenotrophomonas rhizophila</i>	2,586.10 ⁻³ %	0,809.10 ⁻³ %	/	983,679.10 ⁻³ %
<i>Aspergillus fumigatus</i>	42,874.10 ⁻³ %	7860,069.10 ⁻³ %	2153,051.10 ⁻³ %	78,279.10 ⁻³ %

TABLE 11.9 – Campagne 2 - Abondance relative des OTU pathogènes détectés à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**. La couleur rose indique qu'il s'agit d'OTU bactériens et la verte indique les OTU fungi.

Le Tableau 11.10 reprend les OTU pathogènes présents à la station **Sortie Puits** alors qu'ils n'ont pas été détectés dans les **Condensats** ou dans l'**Air Extérieur**. Lors de cette deuxième campagne, aucun OTU bactérien pathogène n'a été détecté uniquement à la station **Sortie Puits**.

OTU bactériens pathogènes		OTU fungi pathogènes	
OTU Genre/Espèce	Abondance Sortie Puits	OTU Genre/Espèce	Abondance Sortie Puits
		<i>Acremonium collariferum</i>	0,341.10 ⁻³ %
		<i>Candida maltosa</i>	1,364.10 ⁻³ %
		<i>Cephalotrichum dendrocephalum</i>	2527,072.10 ⁻³ %
		<i>Kernia hippocrepida</i>	8,693.10 ⁻³ %
		<i>Malassezia restricta</i>	52,498.10 ⁻³ %
		<i>Pseudallescheria angusta</i>	0,341.10 ⁻³ %
		<i>Lecanicillium magnisporum</i>	1,193.10 ⁻³ %
		<i>Wickerhamomyces anomalus</i>	0,341.10 ⁻³ %

TABLE 11.10 – Campagne 2 - Abondance relative des OTU bactériens et fungi pathogènes détectés à la station **Sortie Puits** alors qu'ils n'étaient pas présents aux stations **Extérieur** et **Condensats**.

Cephalotrichum dendrocephalum et *Malassezia restricta* sont les 2 OTU dont l'abondance

relative est la plus élevée parmi l'ensemble des OTU fungi pathogènes ou non détectés à cette station alors qu'ils n'étaient pas présents aux stations **Extérieur** et **Condensats**.

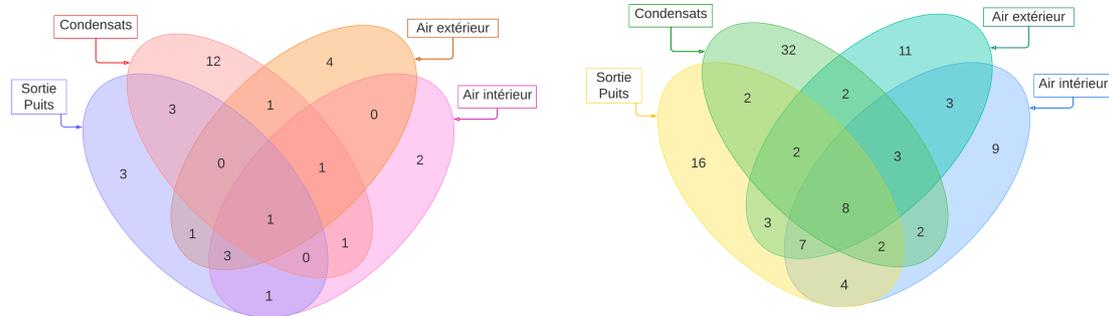


FIGURE 11.11 – Campagne 3 – Nombre d’OTU bactériens (à gauche) et fungi (à droite) pathogènes et leur distribution entre les stations de prélèvement.

Sur les 745 OTU fungi et 2596 OTU bactériens recensés lors de la 3e campagne, 106 OTU fungi et 33 OTU bactériens sont pathogènes. Sur les 55 OTU fungi et 124 OTU bactériens communs à l'ensemble des stations, 8 OTU fungi et 1 OTU bactérien sont pathogènes. Concernant les OTU non présents dans l'**air extérieur** et détectés aux stations **Intérieur**, **Sortie Puits** et **Condensats**, aucun OTU bactérien sur les 13 recensés n'est pathogène et 2 OTU fungi sur 7 sont pathogènes. Il s'agit de 2 *Nectriaceae*, le *Fusicolla violacea* et d'un OTU du genre *Fusarium*. Sur les 33 OTU fungi et les 48 OTU bactériens non présents dans l'**air extérieur** et communs aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**, 2 OTU fungi et 3 OTU bactériens sont pathogènes. Les OTU fungi pathogènes sont *Coniochaeta hoffmannii* et *Nigrograna mycophila*. Les OTU bactériens pathogènes sont *Roseomonas aerofrigidensis*, *Roseomonas arcticisoli* et *Stenotrophomonas rhizophila*. Le Tableau 11.11 indique l'abondance relative des OTU pathogènes détectés à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**.

OTU Genre/Espèce	Station Condensats	Station Sortie Puits	Station Intérieur	Station Extérieur
Roseomonas aerofrigidensis	7,463.10 ⁻³ %	46,660.10 ⁻³ %	/	/
Roseomonas arcticisoli	20,895.10 ⁻³ %	5,213.10 ⁻³ %	/	/
Stenotrophomonas rhizophila	4,478.10 ⁻³ %	1,955.10 ⁻³ %	/	/
Coniochaeta hoffmannii	10033,306.10 ⁻³ %	10,218.10 ⁻³ %	/	/
Nigrograna mycophila	1,902.10 ⁻³ %	3,941.10 ⁻³ %	/	/
Fusarium NA	7,353.10 ⁻³ %	14,305.10 ⁻³ %	32,431.10 ⁻³ %	/
Fusicolla violacea	4,818.10 ⁻³ %	0,876.10 ⁻³ %	2,144.10 ⁻³ %	/
Cyphellophora reptans	178,383.10 ⁻³ %	3,503.10 ⁻³ %	/	2,727.10 ⁻³ %
Fusarium foetens	1573,243.10 ⁻³ %	12,845.10 ⁻³ %	/	3,939.10 ⁻³ %
Roseomonas NA	2,985.10 ⁻³ %	35,451.10 ⁻³ %	1,153.10 ⁻³ %	4,281.10 ⁻³ %
Aspergillus fumigatus	5,198.10 ⁻³ %	15,327.10 ⁻³ %	266,018.10 ⁻³ %	18,330.10 ⁻³ %
Aspergillus creber	0,380.10 ⁻³ %	0,876.10 ⁻³ %	2,278.10 ⁻³ %	11,665.10 ⁻³ %
Beauveria majiangensis	22,187.10 ⁻³ %	14,013.10 ⁻³ %	10,855.10 ⁻³ %	22,269.10 ⁻³ %
Eupeniidiella venezuelensis	8,114.10 ⁻³ %	116,628.10 ⁻³ %	54,142.10 ⁻³ %	18,785.10 ⁻³ %
Fusicolla aquaeductuum	1673,021.10 ⁻³ %	12,115.10 ⁻³ %	19,566.10 ⁻³ %	0,606.10 ⁻³ %
Herpotrichiellaceae NA	20,539.10 ⁻³ %	323,172.10 ⁻³ %	9595,801.10 ⁻³ %	6452,957.10 ⁻³ %
Didymellaceae NA	111,949.10 ⁻³ %	110,497.10 ⁻³ %	88,583.10 ⁻³ %	302,977.10 ⁻³ %
Sporobolomyces roseus	1,014.10 ⁻³ %	21,603.10 ⁻³ %	12,865.10 ⁻³ %	24,693.10 ⁻³ %

TABLE 11.11 – Campagne 3 - Abondance relative des OTU pathogènes détectés à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**. La couleur rose indique qu'il s'agit d'OTU bactériens et la verte indique les OTU fungi.

Le Tableau 11.12 reprend les OTU pathogènes présents à la station **Sortie Puits** alors qu'ils n'ont pas été détectés dans les **Condensats** ou dans l'**Air Extérieur**.

OTU bactériens pathogènes		OTU fungi pathogènes	
OTU Genre/Espèce	Abondance Sortie Puits	OTU Genre/Espèce	Abondance Sortie Puits
<i>Mycobacterium branderi</i>	24,633.10 ⁻³ %	<i>Acremonium parvum</i>	186,255.10 ⁻³ %
<i>Roseomonas ludipueritiae</i>	1,173.10 ⁻³ %	<i>Acremonium exiguum</i>	0,876.10 ⁻³ %
<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	3,519.10 ⁻³ %	<i>Acrodontium pigmentosum</i>	2,190.10 ⁻³ %
<i>Moraxella oblonga</i>	1,694.10 ⁻³ %	<i>Aureobasidium NA</i>	0,584.10 ⁻³ %
		<i>Capronia mansonii</i>	3,211.10 ⁻³ %
		<i>Capronia coronata</i>	2,044.10 ⁻³ %
		<i>Cladophialophora minutissima</i>	2,627.10 ⁻³ %
		<i>Cladophialophora behniae</i>	2,190.10 ⁻³ %
		<i>Exophiala cancerae</i>	1,460.10 ⁻³ %
		<i>Fusarium langsethiae</i>	9,050.10 ⁻³ %
		<i>Fusarium NA</i>	2,919.10 ⁻³ %
		<i>Malassezia arunalokei</i>	1,168.10 ⁻³ %
		<i>Neocatenulostroma abietis</i>	2,190.10 ⁻³ %
		<i>Pithoascus NA</i>	1,314.10 ⁻³ %
		<i>Salinomyces thailandica</i>	1,460.10 ⁻³ %
		<i>Zoophthora radicans</i>	17,078.10 ⁻³ %
		<i>Acremonium sordidulum</i>	64,226.10 ⁻³ %
		<i>Acremonium brachypenium</i>	1,314.10 ⁻³ %
		<i>Fusarium equiseti</i>	7,736.10 ⁻³ %
		<i>Wickerhamomyces anomalus</i>	0,876.10 ⁻³ %

TABLE 11.12 – Campagne 3 - Abondance relative des OTU bactériens et fungi pathogènes détectés à la station **Sortie Puits** alors qu'ils n'étaient pas présents aux stations **Extérieur** et **Condensats**.

L'OTU bactérien, non détecté aux stations **Extérieur** et **Condensats**, dont l'abondance relative est la plus importante à cette station est *Kutzneria NA* avec 1,448 %. Pour les OTU fungi, *Acremonium parvum* (0,186 %) est l'OTU fungi le plus abondant parmi ceux, pathogènes ou non, détectés à la station **Sortie Puits**, mais non présents à l'**Extérieur** et dans les **Condensats**. Si plusieurs genres d'OTU fungi et bactériens sont communs à plusieurs campagnes, l'OTU fungi *Wickerhamomyces anomalus* est le seul OTU pathogène détecté en **Sortie Puits** lors de 2 campagnes consécutives (campagne 2 et 3).

11.2.4 Risques sanitaires des pathogènes détectés

Les bases de données Funguild et FaPoTrax référencent les pathogènes fungi et bactéries sur base de la littérature scientifique, mais, les risques sanitaires liés à ces pathogènes ne sont pas toujours évalués ou explicites. Afin d'évaluer le risque sanitaire, le recours à des

normes est nécessaire.

Au niveau de l'Union Européenne, la directive 2000/54/CE classe les agents biologiques en 4 groupes selon leur risque sanitaire. Ces 4 groupes sont également d'application au niveau des normes mises au point et utilisées dans différents pays, dont l'Allemagne via le BAuA ; l'institut fédéral pour la sécurité et la santé au travail.

- **Groupe 1** : normalement pas de risque pour l'humain.
- **Groupe 2** : peut provoquer une maladie et constituer un danger pour l'humain. Sa propagation dans la collectivité est improbable ; il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficace.
- **Groupe 3** : peut provoquer une maladie grave et constituer un danger sérieux pour l'humain. Il peut présenter un risque de propagation dans la collectivité, mais il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficace.
- **Groupe 4** : provoque des maladies graves et constitue un danger sérieux pour l'humain. Il peut présenter un risque élevé de propagation dans la collectivité ; il n'existe généralement pas de prophylaxie ni de traitement efficace.

Le Tableau 11.13 reprend le risque sanitaire des fungi pathogènes détectés à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits** suivant la directive 2000/54/CE et la norme allemande TRBA-460. Les notes supplémentaires qui accompagnent le score ont la signification suivante :

- A : effets allergiques possibles.
- n : pathogène pour les non-vertébrés
- p : phytopathogène – pathogène pour les plantes
- T : production de toxines
- t : pathogène pour les vertébrés
- + : Cas isolés pour lesquels l'agent pathogène est prouvé ou suspecté, Infections ne se produisant généralement que chez des personnes dont les défenses immunitaires sont diminuées.

OTU fungi pathogènes	Risque sanitaire Directive 2000/54/CE	Risque sanitaire Norme TRBA-460
<i>Aspergillus creber</i>	inconnu	inconnu
<i>Aspergillus fumigatus</i>	2 (A)	2 (A,t)
<i>Beauveria majiangensis</i>	inconnu	inconnu
<i>Beauveria NA</i>	inconnu	Généralement 1 (A, n)
<i>Coniochaeta hoffmannii</i>	inconnu	1 (+, t)
<i>Cyphellophora reptans</i>	inconnu	inconnu
Didymellaceae NA	inconnu	Généralement 1 (p)
<i>Epicoccum endophyticum</i>	inconnu	1 (A, t)
<i>Eupenidiella venezuelensis</i>	inconnu	inconnu
<i>Fusarium foetens</i>	inconnu	inconnu
<i>Fusarium NA</i>	inconnu	Généralement 2 (A, p, T)
<i>Fusicolla aquaeductuum</i>	inconnu	inconnu
<i>Fusicolla ossicola</i>	inconnu	inconnu
<i>Fusicolla violacea</i>	inconnu	inconnu
Herpotrichiellaceae NA	inconnu	inconnu
<i>Microascus atrogriseus</i>	inconnu	1 (+, t)
<i>Nigrograna mycophila</i>	inconnu	inconnu
<i>Sodiomyces alcalophilus</i>	inconnu	inconnu
<i>Sporobolomyces roseus</i>	inconnu	1
<i>Xenodidymella camporesii</i>	inconnu	inconnu

TABLE 11.13 – Risque sanitaire, selon la norme européenne et allemande, des fungi pathogènes détectés à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**.

Le risque sanitaire de la plupart des fungi pathogènes détectés est inconnu, car ceux-ci ne sont pas répertoriés dans la directive 2000/54/CE ou la norme allemande TRBA-460.

La seule espèce classée en groupe 2 selon les 2 normes est *Aspergillus fumigatus*. Cette espèce est également répertoriée dans la liste des « fungi pathogènes d'intérêt critique » par l'OMS [184]. Une quarantaine d'espèces du genre *Aspergillus* sont reconnues comme pathogène animal et/ou humain. La majorité des infections liées aux *Aspergillus* sont de type allergique (aspergillose bronchopulmonaire, rhinite) ou superficiel (trachéobronchite, aspergillome). Néanmoins, chez les personnes immunodéprimées les *Aspergillus* provoquent des infections envahissantes dont le taux de morbidité et mortalité est élevé [185]. *Aspergillus fumigatus* est une espèce thermotolérante et thermophile capable de se développer entre 12 °C et 57 °C. Cette espèce a également été retrouvée dans des systèmes d'humidification et de climatisation ainsi que dans des conduits de ventilation et des systèmes de filtration d'air [186]. L'eau et les aliments peuvent donc constituer des réservoirs pour la transmission des *Aspergillus* [187].

Les espèces du genre *Fusarium* sont connues pour être des contaminants communs. Elles peuvent aussi causer diverses infections chez l'homme dont notamment des allergies (asthme et rhinite). Elles sont connues en tant que productrices de puissantes mycotoxines. Ces substances peuvent causer des mycotoxicoses lorsqu'elles sont ingérées de manière répétée via des aliments contaminés [188]. Plusieurs espèces sont donc classées dans le groupe 2 selon la norme allemande TRBA-460. Les espèces du genre *Fusarium* sont également présentes dans la liste des « fungi pathogènes de haut intérêt » par l'OMS [184]. Les espèces du genre *Fusarium* nécessitent des conditions humides pour leur croissance. Elles sont fréquemment détectées dans l'eau stagnante souillée telle que celle trouvée dans les réservoirs des humidificateurs [189].

Le Tableau 11.14 reprend le risque sanitaire, suivant la directive 2000/54/CE et la norme allemande TRBA-460, des 31 fungi pathogènes détectés à la station **Sortie Puits**, mais non présents aux stations **Extérieur** et **Condensats** lors des 3 campagnes.

Pour rappel, les notes supplémentaires qui accompagnent le score ont la signification suivante :

- A : effets allergiques possibles.
- n : pathogène pour les non-vertébrés
- p : phytopathogène – pathogène pour les plantes
- T : production de toxines
- t : pathogène pour les vertébrés
- + : Cas isolés pour lesquels l'agent pathogène est prouvé ou suspecté, Infections ne se produisant généralement que chez des personnes dont les défenses immunitaires sont diminuées.

OTU fungi pathogènes	Risque sanitaire Directive 2000/54/CE	Risque sanitaire Norme TRBA-460
<i>Acremonium brachypenium</i>	inconnu	inconnu
<i>Acremonium collariferum</i>	inconnu	inconnu
<i>Acremonium exiguum</i>	inconnu	inconnu
<i>Acremonium parvum</i>	inconnu	inconnu
<i>Acremonium sordidulum</i>	inconnu	inconnu
<i>Acrodontium luzulae</i>	inconnu	inconnu
<i>Acrodontium pigmentosum</i>	inconnu	inconnu
<i>Aureobasidium NA</i>	inconnu	Généralement 1 ou 2
<i>Beauveria pseudobassiana</i>	inconnu	inconnu
<i>Candida maltosa</i>	inconnu	1
<i>Capronia coronata</i>	inconnu	inconnu
<i>Capronia mansonii</i>	inconnu	1
<i>Cephalotrichum dendrocephalum</i>	inconnu	inconnu
<i>Cladophialophora behniae</i>	inconnu	inconnu
<i>Cladophialophora minutissima</i>	inconnu	inconnu
<i>Exophiala cancerae</i>	inconnu	1
<i>Fusarium equiseti</i>	inconnu	1 (+, t)
<i>Fusarium langsethiae</i>	inconnu	inconnu
<i>Fusarium NA</i>	inconnu	Généralement 2 (A, p, T)
<i>Kernia hippocrepeida</i>	inconnu	inconnu
<i>Lecanicillium magnisporum</i>	inconnu	inconnu
<i>Malassezia arunalokei</i>	inconnu	inconnu
<i>Malassezia restricta</i>	inconnu	1 (+,A)
<i>Microascus hyalinus</i>	inconnu	inconnu
<i>Neocatenulostroma abietis</i>	inconnu	inconnu
<i>Pithoascus NA</i>	inconnu	Potentiellement 2
<i>Pseudallescheria angusta</i>	inconnu	2
<i>Salinomyces thailandica</i>	inconnu	inconnu
<i>Trichoderma citrinoviride</i>	inconnu	2
<i>Wickerhamomyces anomalus</i>	inconnu	1
<i>Zoopthora radicans</i>	inconnu	inconnu

TABLE 11.14 – Risque sanitaire, selon la norme européenne et allemande, des fungi pathogènes détectés à la station **Sortie Puits**, mais non présents aux stations **Extérieur** et **Condensats**.

Les fungi du genre *Acremonium* ont une distribution mondiale. Principalement non pathogènes, ils sont présents dans le sol et les matières végétales en décomposition

[190]). Quelques espèces sont néanmoins pathogènes pour l'humain [191]. Les spores d'*Acremonium* sont généralement entourées de gouttelettes de mucilage et le vent est souvent indispensable à leur dissémination dans l'air [192]. Des variations saisonnières de concentration des spores dans l'air sont néanmoins observées [193]. En raison de ses besoins en eau, les fungi du genre *Acremonium* sont souvent détectés en milieu humide et dans l'eau des humidificateurs notamment [194]. Parmi le genre *Acremonium* seules quelques espèces sont associées aux allergies de Type I, telles que la rhinite allergique et l'asthme [195].

Parmi le genre *Aureobasidium*, *A. pullulans* est la seule espèce bien connue [196]. Les *Aureobasidium* se développent bien aux températures de 2 °C à 35 °C, avec une température optimale de 25 °C [197]. Récemment, des rapports associent la présence d'*Aureobasidium* à la rhinite chez l'enfant et l'adulte et l'asthme ou la sinusite chez les adultes [198].

Certaines espèces pathogènes de genre *Cladosporium* ont été transférées au genre *Cladophialophora* [199]. L'espèce pathogène humaine classée en niveau 3 selon la norme européenne et allemande est *C. bantianum*. En effet cette dernière est l'agent principal des phaeohyphomycose cérébrales détectées chez l'humain [200]. *C. modesta* est également de niveau 3 uniquement selon la norme allemande. Plusieurs autres fungi du genre *Cladophialophora* sont également classés en niveau 2 selon la norme allemande, mais aucun des OTU *Cladophialophora* présents à la station **Sortie Puits** n'est répertorié. Le risque lié à ces OTU est donc inconnu. La croissance de ces fungi est possible à des températures allant de 14 °C à 43 °C [201].

Lorsqu'il est associé à *Scedosporium prolificans*, le fungi *Pseudallescheria angusta* est responsable d'infections variées notamment les scedosporioses invasives principalement chez les personnes immunodéprimées [202]. Certains *Pseudallescheria* peuvent également causer des infections pulmonaires telles que des pneumonies même chez les patients non-immunodéprimés [203].

Trichoderma citrinoviride est une des espèces de *Trichoderma* les plus fréquemment recensées dans le sol. Il est également reconnu comme un pathogène opportuniste de l'humain principalement chez les personnes immunodéprimées. Son optimum de croissance est situé à 35 °C-36 °C [204].

Le Tableau 11.15 reprend le risque sanitaire, suivant la directive 2000/54/CE et la norme allemande TRBA-466, des bactéries pathogènes détectées à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits** lors des 3 campagnes. Les notes accompagnant parfois les scores ont la signification suivante :

- + : agent pathogène avéré ou suspecté dans des cas isolés, principalement chez des personnes dont les défenses immunitaires sont considérablement réduites.
- ht : pathogène pour l'homme et les vertébrés, mais généralement pas de transmission entre les deux.
- T : production de toxines

OTU bactériens pathogènes	Risque sanitaire Directive 2000/54/CE	Risque sanitaire Norme TRBA-466
<i>Acinetobacter junii</i>	inconnu	2
<i>Moraxella boevrei</i>	inconnu	1
<i>Moraxella</i> NA	inconnu	Généralement 2
<i>Moraxella osloensis</i>	inconnu	2
<i>Pseudomonas stutzeri</i>	inconnu	1 (+)
<i>Roseomonas aerofrigidensis</i>	inconnu	1
<i>Roseomonas arcticisoli</i>	inconnu	1
<i>Roseomonas musae</i>	inconnu	1
<i>Roseomonas</i> NA	inconnu	Généralement 1
<i>Staphylococcus aureus</i>	2	2 (ht, T)
<i>Stenotrophomonas chelatifhaga</i>	inconnu	1
<i>Stenotrophomonas</i> NA	inconnu	Généralement 1
<i>Stenotrophomonas rhizophila</i>	inconnu	1

TABLE 11.15 – Risque sanitaire, selon la norme européenne et allemande, des bactéries pathogènes détectées à la fois aux stations **Condensats** et **Sortie Puits**.

Staphylococcus aureus est la seule bactérie reprise à la fois dans la directive européenne et la norme allemande. Classée dans le groupe 2, cette espèce est fréquemment rencontrée, car elle fait souvent partie du microbiote de la peau et la muqueuse nasale humaine [205]. Pathogène opportuniste, cette espèce est à l'origine de plusieurs maladies humaines allant de l'affection cutanée bénigne jusqu'aux toxi-infections alimentaires et aux infections nosocomiales [206]. Certaines souches de *Staphylococcus aureus* produisent la toxine TSST-1, responsable de 75 % des cas de syndrome de choc toxique [207]. Cette espèce peut se développer entre 6 °C et 48 °C avec un optimum de croissance compris entre 35 °C et 41 °C. La production de toxine est effective entre 10 °C et 45 °C avec un optimum entre 34 °C et 40 °C [208].

Acinetobacter junii est classée en groupe 2 dans la norme TRBA-466. Cette bactérie est naturellement présente dans les milieux humides, le sol et l'eau [209]. Elle se trouve également sur la peau et les muqueuses respiratoires. Elle peut être à l'origine de pneumonies nosocomiales et d'infections diverses liées aux sondes urinaires et cathéters en milieu hospitalier [210].

Les bactéries du genre *Moraxella* sont classées généralement dans le groupe 2 même si quelques espèces telles que *Moraxella boevrei* sont dans le groupe 1. Présente normalement au niveau de la peau et des muqueuses de l'oropharynx et des voies génitales, elles sont à l'origine de cas graves d'otites moyennes, de sinusites aiguës ou chroniques, d'infections des voies respiratoires ou encore de conjonctivites [211]. La transmission entre humains est fréquente. La contamination environnementale et les aérosols constituent d'autres modes potentiels de transmission [212].

Les espèces du genre *Moraxella* se développent mieux entre 22 °C et 35 °C avec un optimum à 30 °C. [213].

Le Tableau 11.16 reprend le risque sanitaire selon la directive 2000/54/CE et la norme allemande TRBA-466, des bactéries pathogènes détectées à la station **Sortie Puits**, mais non présentes aux stations **Extérieur** et **Condensats** pour les 3 campagnes.

Pour rappel, les notes accompagnant parfois les scores ont la signification suivante :

- + : agent pathogène avéré ou suspecté dans des cas isolés, principalement chez des personnes dont les défenses immunitaires sont considérablement réduites.
- ht : pathogène pour l'homme et les vertébrés, mais généralement pas de transmission entre les deux.
- T : production de toxines

OTU bactériens pathogènes	Risque sanitaire Directive 2000/54/CE	Risque sanitaire Norme TRBA-466
<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	inconnu	2
<i>Corynebacterium jeikeium</i>	2	2
<i>Enterococcus faecalis</i>	2	2
<i>Moraxella caviae</i>	inconnu	1
<i>Moraxella equi</i>	inconnu	2 (t)
<i>Moraxella lincolni</i>	inconnu	1
<i>Moraxella oblonga</i>	inconnu	1
<i>Mycobacterium branderi</i>	inconnu	2
<i>Pseudomonas mendocina</i>	inconnu	2
<i>Roseomonas ludipueritiae</i>	inconnu	inconnu
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	inconnu	2 (ht)
<i>Stenotrophomonas terrae</i>	inconnu	1

TABLE 11.16 – Risque sanitaire, selon la norme européenne et allemande, des bactéries pathogènes détectées à la station **Sortie Puits**, mais non présentes aux stations **Extérieur** et **Condensats**.

Les 2 bactéries classées de niveau 2 selon les 2 normes sont *Corynebacterium jeikeium* et *Enterococcus faecalis*.

Corynebacterium jeikeium peut se trouver au niveau des muqueuses et de la peau chez les humains. Elle est malheureusement souvent multirésistante à différents antibiotiques et est à la base d'infections variées dont des infections nosocomiales chez les personnes immunodéprimées. Son optimum de croissance est atteint à 37 °C sur gélose contenant du sang [214].

Enterococcus faecalis fait partie de la flore intestinale humaine, mais également de nombreux autres mammifères. On peut également la retrouver dans les milieux aqueux via

une contamination notamment avec les eaux usées [211]. La température de croissance optimale de cette espèce est comprise entre 28 °C et 37 °C [213, 215]. Les *Enterococcus* sont des pathogènes opportunistes qui provoquent des infections des voies urinaires, des plaies et tissus mous chez les personnes âgées ou immunodéprimées [211].

Acinetobacter calcoaceticus est active entre 20 °C et 45 °C avec un optimum de croissance à 25 °C [213]. Cette espèce est connue pour acquérir et transférer à d'autres souches bactériennes des facteurs de résistances à différents antibiotiques [216]. Elle est naturellement présente dans les milieux humides et le sol [209], mais elle peut également être présente et coloniser les intestins de différentes espèces, dont les humains [217].

Mycobacterium branderi fait partie des NTM (*Non-tuberculosis mycobacteria*) et est présente dans les milieux aquatiques, le sol ou encore les animaux [218]. Elle est considérée comme un pathogène opportuniste humain puisque les infections observées ne sont dues qu'à une contamination via l'environnement [219]. Son optimum de croissance est situé entre 25 °C et 45 °C [220].

Pseudomonas mendocina est généralement présente dans les milieux aqueux et le sol, mais également d'autres substrats [221]. Sa température de croissance optimale est comprise entre 25 °C et 42 °C. Cette bactérie est peu souvent impliquée dans des infections humaines sauf en cas de contact prolongé ou de patients hospitalisés aux soins intensifs [222].

Stenotrophomonas maltophilia est classée en niveau 2 selon la norme allemande, mais elle est considérée comme « espèce émergente pathogène à surveiller » selon l'OMS, car elle est de plus en plus souvent détectée et multirésistante [223, 224]. Elle est un pathogène opportuniste chez l'humain causant principalement des infections nosocomiales avec un taux de morbidité et de mortalité élevé chez les personnes immunodéprimées [225]. Elle est présente principalement dans les environnements et animaux aquatiques, le sol et les plantes [226]. Sa température optimale de croissance est comprise entre 20 °C et 30 °C, mais elle peut survivre jusqu'à 4 °C [227].

Chapitre 12

Discussion et conclusions

Lors des 2 premières campagnes, les boîtes contrôles montrent qu'il n'y a pas eu de contamination extérieure et que les micro-organismes et l'ADN collectés proviennent bien de l'air échantillonné aux différentes stations.

L'analyse des échantillons mis en culture montre que pour les 2 campagnes, le nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ relevé à l'extérieur est significativement supérieur à celui recensé en sortie de puits. Pour la campagne 1, le nombre moyen de $CFU_{fungi}.m^{-3}$ relevé à la sortie du puits est légèrement supérieur au nombre relevé à l'extérieur, mais cette différence n'est pas significative. Les condensats et leur potentiel rôle d'accumulateur de micro-organismes n'augmenteraient donc pas le nombre moyen de $CFU.m^{-3}$ d'air.

Lors des 2 campagnes, il n'y a pas de différences significatives entre le nombre moyen de $CFU_{bactériennes}.m^{-3}$ recensé à la sortie du puits ou à l'intérieur. Ceci pourrait s'expliquer par un apport d'air autre que celui du puits dans le local intérieur ainsi que par la présence régulière d'humains dans celui-ci.

Le choix de travailler sur l'ADN pour le séquençage permet de prendre en compte les micro-organismes en dormance présents notamment dans la zone d'accumulation des condensats.

Lors des 3 campagnes, la station **Condensats** est celle pour laquelle le plus grand nombre d'OTU bactériens a été recensé. Pour les OTU fungi, lors des 2 premières campagnes, la station **Condensats** est celle contenant le plus grand nombre d'OTU. Cependant, lors de la 3e campagne le plus grand nombre d'OTU fungi est recensé au niveau de la station **Sortie Puits**. Tant pour les OTU bactériens que pour les OTU fungi, un grand nombre d'OTU recensés à la station **Condensats** n'étaient pas présents dans l'**air extérieur** au moment de la captation. Les condensats seraient donc une zone d'accumulation d'OTU provenant de l'air extérieur. Les bactéries et fungi, en fonction de leurs besoins et des conditions rencontrées dans ces condensats, auraient donc la possibilité de se développer dans ce milieu.

Au cours des 3 campagnes, des OTU bactériens et fungi ont été recensés à la station **Sortie Puits** alors qu'ils n'étaient pas présents dans l'air extérieur ou dans les condensats au moment de la captation. La présence de ces OTU pourrait s'expliquer par la formation de biofilm au niveau des parois du puits permettant leur développement, et ce malgré l'écoulement de condensats.

Les concentrations en *bactéries ou spores.m⁻³ d'air* relevées à la station **Extérieur** sont supérieures aux valeurs moyennes de 10^4 *bactéries.m⁻³ d'air* et 10^4 *spores.m⁻³ d'air* mentionnées dans [51, 56, 57]. La proximité d'un point chaud à savoir le carrefour liant le boulevard John Fitzgerald Kennedy et l'Avenue Victor Maistriau et le trafic important de véhicules qui y passe peut expliquer ces concentrations élevées. Cela correspond également aux informations mentionnées par [62]. Les concentrations de spores relevées sont néanmoins inférieures à celles d'une ferme ou d'une station de compostage qui sont de 10^9 *spores.m⁻³ d'air* [51]. L'analyse des *spores.m⁻³ d'air* et des *bactéries.m⁻³ d'air* ainsi que des moyennes des concentrations, entre les stations **Extérieur** et **Sortie Puits** montre que les concentrations en bactéries et spores ont tendance à augmenter après le passage de l'air dans le puits canadien. L'air extérieur se chargerait donc en micro-organismes au contact des condensats et des biofilms présents au niveau des parois du puits. La diminution des concentrations en bactéries et spores dans l'air entre la station **Sortie Puits** et **Intérieur** met en avant le rôle des filtres. Cependant, leur efficacité est difficilement quantifiable. En effet, comme la littérature le mentionne, la présence de bactéries et fungi dans l'air intérieur peut être due à l'apport d'air extérieur ne venant pas du puits (ouverture de la porte du local notamment) ou encore des humains [86, 87, 88, 89].

Les 3 campagnes d'échantillonnages ont été réalisées entre les mois de décembre et avril, cette période couvre la période de basse émission de spores de la plupart des fungi qui s'étend généralement de janvier à mars [69, 70, 71, 72, 73, 74]. Lorsque des variations saisonnières sont observées chez les bactéries, cette période correspond également aux basses concentrations dans l'air extérieur [61, 62]. Il n'est donc pas possible d'évaluer si les condensats, via l'accumulation potentielle d'OTU et leurs conditions favorables au développement de certains d'entre eux, pourraient atténuer la saisonnalité de certains fungi et bactéries.

Pour les 3 campagnes, le nombre d'OTU fungi et bactériens pathogènes est le plus important à la station **Condensats**. Au niveau de cette station, tant pour les OTU bactériens que pour les OTU fungi, plusieurs OTU pathogènes recensés n'étaient pas présents dans **l'air extérieur** au moment de la captation. Comme l'ensemble des bactéries et fungi présents dans l'air extérieur, les espèces pathogènes peuvent donc potentiellement s'accumuler et se développer dans les condensats. C'est le cas notamment de *Coniochaeta hoffmannii*, un fungi détecté lors de la 3e campagne et dont l'abondance relative est de 10 % au niveau des condensats alors qu'il n'est pas présent dans l'air extérieur au moment de la captation. Cependant, l'abondance relative des espèces pathogènes détectées à la fois dans les condensats et à la sortie du puits est généralement très faible et inférieure à 1 %.

3 hypothèses pourraient expliquer ces faibles pourcentages :

- Les micro-organismes s'accumulent au niveau des condensats, mais les conditions présentes dans ces derniers ne sont pas favorables au développement des pathogènes présents.
- Les conditions présentes au niveau des condensats sont favorables au développement des micro-organismes. Cependant, le très grand nombre d'OTU recensés dans ce milieu induit une compétition pour les ressources et l'espace qui limite leur croissance.
- Les conditions présentes dans les condensats rencontrent l'optimum de croissance d'une ou quelques espèces qui deviennent majoritaires et limitent le développement des autres.

L'analyse des abondances relatives des OTU, présents au niveau de la station **Condensats**, sans tenir compte de leur caractère pathogène montre que pour les fungi, la 3e hypothèse serait à privilégier. En effet, lors de la campagne 1 un OTU NA appartenant à la classe des *Agaromycetes* est majoritaire à 43 %. Au niveau de la campagne 2, l'espèce *Neodevriesia bulbilosa* a une abondance relative de 52 %. L'espèce *Penicillium brevicompactum* a une abondance relative de 20,5 % dans les condensats de la campagne 3. Enfin, un OTU NA du genre *Cladosporium* est, lors de chaque campagne, parmi les 3 plus hautes abondances relatives au niveau des condensats. Il y aurait donc bien pour les campagnes 1 et 2, un OTU fungi majoritaire et pour la campagne 3, 3 OTU fungi dont l'abondance relative cumulée est de 45,3 %. Parmi ces 3 OTU, un est pathogène.

Concernant les OTU bactériens, les abondances relatives les plus élevées au niveau des condensats sont de 24,6 % pour un OTU NA de l'ordre des *Nitrosomonadales* (campagne 1), 18,5 % pour un OTU NA du genre *Pseudomonas* (campagne 2) et 12,1 % pour *Clostridium thermopalmarium* (campagne 3). L'ensemble des abondances relatives des autres OTU détectés lors des 3 campagnes sont inférieures à 10 %. L'hypothèse de l'OTU ou d'un petit nombre d'OTU majoritaires ne peut être envisagée pour les bactéries. Au vu du grand nombre d'OTU bactériens, nous privilégions donc la deuxième hypothèse, les conditions au niveau des condensats déterminées précédemment étant favorables au développement.

L'analyse du risque sanitaire des pathogènes recensés lors des 3 campagnes montre que la plupart des fungi pathogènes détectés au niveau des condensats ne sont pas répertoriés dans la directive 2000/54/CE ou la norme allemande TRBA-460 et que les OTU bactériens pathogènes recensés au niveau des condensats sont principalement classés en catégorie 1 dans la norme allemande TRBA-466. Seuls quelques OTU sont répertoriés en classe 2 et sont connus pour leurs pathologies allergisantes de type asthme, rhinite et allergies broncho-pulmonaires sur les personnes non immunodéprimées ou encore leur production de toxines. Les températures rencontrées dans les condensats, allant d'environ 7 °C à 20 °C selon la saison, sont favorables au développement des espèces psychrophiles et n'empêchent pas le développement, dans une moindre mesure, des espèces mésophiles.

Concernant les OTU pathogènes présents en sortie de puits, mais non détectés dans les condensats ou dans l'air extérieur, l'analyse du risque sanitaire montre que la plupart des OTU fungi pathogènes ne sont pas répertoriés dans la directive européenne ou la norme TRBA-460. Les quelques fungi détectés et répertoriés dans la norme allemande sont connus pour être des pathogènes opportunistes ou pour leur pathologie allergisante chez l'humain. Seuls 2 OTU bactériens pathogènes sont répertoriés dans la directive européenne alors que la quasi-totalité d'entre eux est répertoriée dans la norme TRBA-466. Ces espèces sont principalement mésophiles et pourraient peut-être rencontrer des conditions de température plus favorable au niveau du biofilm présent en sortie de puits que dans les condensats. La majeure partie d'entre elles sont considérées comme des pathogènes opportunistes de l'humain dont les infections touchent principalement les personnes immunodéprimées. Cependant, plusieurs d'entre elles sont impliquées dans des mécanismes d'antibiorésistance qui est un problème de santé publique non négligeable.

Que ces OTU bactériens et fungi pathogènes soient présents dans les condensats ou en sortie de puits, leur détection régulière dans les environnements naturels humides ou aqueux, mais également au niveau des humidificateurs ou des systèmes d'aération incitent néanmoins à la vigilance notamment en ce qui concerne l'entretien et la qualité des filtres placés à l'interface Sortie Puits/intérieur. Cet élément rejoint donc les conclusions des différentes études liées à la qualité de l'air en présence d'un puits canadien [1, 2, 3, 4].

En conclusions, le puits canadien par la présence et l'accumulation de condensats, mais également par la création de biofilms au niveau de ses parois est un système dans lequel des bactéries et des fungi provenant de l'air extérieur peuvent s'accumuler. Cette conclusion corrobore les résultats des études [1, 2, 3, 4]. Les conditions rencontrées au niveau des condensats sont favorables au développement de micro-organismes dont certains sont pathogènes pour l'humain, mais la compétition inter- et intraspécifique est un facteur qui limite leur abondance. Le risque sanitaire lié aux pathogènes rencontrés à la sortie du puits et dans les condensats est assez faible. Néanmoins, les changements climatiques via l'augmentation des températures du sol et de l'air, mais également de l'humidité de l'air dans nos régions pourraient potentiellement modifier les conditions rencontrées dans le puits et augmenter encore la température et la quantité de condensats.

Ces changements pourraient donc améliorer les conditions rencontrées par les micro-organismes au sein du puits et favoriser des espèces qui pour le moment ne rencontrent pas leur optimum de croissance. Ces conditions pourraient également être favorables à des espèces provenant de régions tropicales ou à des espèces pathogènes représentant un risque sanitaire plus important pour l'humain. Le puits canadien est donc un système de ventilation qui nécessite une vigilance d'un point de vue microbiologique et sanitaire au niveau des condensats et de l'entretien du filtre.

Quatrième partie

Conclusion et perspectives

Chapitre 13

Conclusions

Un des objectifs de cette thèse était de créer un modèle numérique pour la simulation d'un puits canadien afin de quantifier les condensats produits et leur température pendant certaines périodes de l'année. L'autre objectif était de réaliser une analyse microbiologique du site étudié sur l'air circulant dans le puits et les condensats pour vérifier l'impact sanitaire de cette technique que la qualité de l'air intérieur. Ces objectifs atteints ont permis de répondre à la question initiale :

"L'usage d'un puits canadien peut-il induire une contamination microbiologique de l'air par des agents pathogènes ?"

La réponse à cette question est oui, l'usage d'un puits canadien peut induire une contamination microbiologique de l'air par des agents pathogènes, mais ce risque est assez faible. En effet, même si les conditions au niveau des condensats et en sortie de puits sont favorables au développement des fungi et bactéries, la majeure partie des espèces pathogènes pour l'humain qui ont été recensées sont opportunistes et sont connues pour leurs pathologies allergisantes du système respiratoire ce qui ne représente pas un risque important pour la santé humaine.

Dans la Partie 1 *Puits canadien et qualité de l'air*, l'étude bibliographique concernant la technologie du puits canadien, les transferts thermiques qu'elle implique et les risques sanitaires qui y sont liés établit le cadre théorique nécessaire à la compréhension des différents éléments de cette thèse. Elle synthétise également les réglementations sur les performances énergétiques des bâtiments et la qualité de l'air dans lesquelles s'inscrit ce travail. L'état de l'art concernant la modélisation numérique de la technologie du puits canadien, pointe les paramètres à tenir en compte lors de la modélisation du puits ainsi que ceux qui vont influencer les performances de l'échangeur. Il analyse également les modèles fréquemment rencontrés. Il ressort de cet état de l'art que les modélisations des puits canadiens négligent fréquemment les transferts de masse. En effet, les puits canadiens rencontrés dans la littérature, sont principalement modélisés pour définir l'impact sur les températures de l'air en sortie de puits afin de quantifier le potentiel de préchauf-

fage ou de rafraîchissement. Les transferts de masse influençant peu ce résultat, c'est pourquoi ils sont généralement négligés. De par ce fait l'écoulement des condensats pouvant apparaître au sein d'un puits canadien n'a jamais été modélisé au regard de l'état de l'art. L'état de l'art sur la qualité de l'air met en évidence les principaux paramètres pris en compte pour l'analyse de la qualité de l'air. Il fait également le point sur le matériel, les méthodes d'échantillonnage de l'air utilisées ainsi que sur les résultats d'analyses obtenus par les différentes études menées sur des systèmes de puits canadien. Il en ressort que l'aéromicrobiologie est un domaine encore assez peu connu et qu'en raison de la nature du milieu étudié, les résultats obtenus peuvent fortement varier au cours du temps. Les méthodes d'échantillonnage sont encore très souvent basées sur un système prévu pour une mise en culture malgré les biais que cela engendre. Les méthodes d'échantillonnage prévues pour une analyse métagénomique tendent à se développer, le coût des analyses diminuant, mais l'étude des échantillons nécessite des traitements bioinformatiques pouvant également apporter des biais. Cet état de l'art met également en avant la faiblesse de la législation dans le domaine de la qualité de l'air d'un point de vue biologique. Les études dans le domaine sont encore trop peu nombreuses et les bases de données des micro-organismes pathogènes souvent incomplètes.

La Partie 2 *Configuration expérimentale et résultats* détaille les différentes étapes, modèles et hypothèses utilisés pour la réalisation des modèles finaux. Le premier modèle a pour objectif de définir l'apparition des condensats et leur écoulement dans la partie horizontale du puits, afin de connaître pour chaque pas de temps la quantité et la température des condensats qui arrivent en fin de puits. Ce modèle a pris en compte des hypothèses simplificatrices comme le fait de négliger les transferts de chaleur et de masse dans les parties verticales du puits, ou de considérer une forme rectiligne pour les tubes composant le puits. Ces hypothèses simplificatrices ont été vérifiées à l'aide de modèles 3D qui ont permis de prouver l'impact négligeable que représente leur prise en compte. Un premier modèle établi (Modèle pseudo 3D sans transfert de masse) qui néglige la présence d'une zone saturée sous la nappe phréatique et les transferts de masse a permis de mettre au point la méthodologie appliquée au modèle final. Toutefois, une analyse de sensibilité réalisée sur ce modèle, a mis en évidence l'importance de la profondeur de la nappe phréatique sur les résultats du modèle. Le modèle a donc été adapté pour prendre en compte la présence d'une zone saturée sous la nappe phréatique. Les transferts de masse et l'écoulement des condensats ont également été intégrés à ce modèle et une analyse paramétrique lui a été appliquée pour définir l'impact des paramètres d'entrée sur les résultats du modèle. La comparaison des résultats de simulations à des relevés obtenus via le monitoring de l'installation sur une durée d'un an a permis la validation du modèle pseudo 3D intégrant les transferts de masse et nous avons pu définir la quantité et la température des condensats qui arrivent en fin de puits pour chaque pas de temps. Le deuxième modèle qui modélise la fin du puits a permis de prendre en compte cette production de condensats pour déterminer en volume et température les condensats qui stagnent en fin de puits pour chaque pas de temps sur une période de deux ans (2015 et 2016). Ce modèle de fin de puits a été réalisé en 3D étant donné sa géométrie particulière, il a été nécessaire de déterminer l'écoulement de l'air au sein de cette géométrie, car les

vitesse de l'air à l'interface condensats/air sont fortement impactées par la quantité de condensats présente. La modélisation de l'écoulement a mis en avant que l'air qui arrive en fin de puits va se séparer en deux flux à la paroi opposée à l'arrivée des tuyaux. Un des flux d'air a un mouvement descendant et celui-ci est plus important lorsqu'une faible hauteur de condensats est présente en fin de puits. Il apparaît donc qu'une faible quantité de condensats favorise les transferts de chaleur et de masse en fin de puits. A contrario une hauteur de condensats plus importante limite ces transferts. Les vitesses d'air connues, le modèle identifie le type de transfert convectif (naturelle, mixte ou forcée) et détermine les températures et volumes des condensats présents en fin de puits. Suite à une année dite "sèche", nous avons pu constater que les condensats peuvent totalement disparaître en fin de puits, mais se reformer et s'accumuler rapidement lors de périodes chaudes et humides. Les températures des condensats obtenues via ces modélisations varient de 7 °C à 20 °C selon la saison.

La Partie 3 *Relevés et analyses des micro-organismes* présente le matériel et les méthodes d'échantillonnage des micro-organismes utilisés durant cette thèse ainsi que les résultats des analyses métagénomiques réalisées lors des 3 campagnes. L'analyse des résultats d'échantillonnage et la recherche de pathogène montrent que le puits canadien est un système dans lequel des bactéries et des fungi, pathogènes ou non pour l'humain, provenant de l'extérieur s'accumulent principalement au niveau des condensats, mais peuvent également se développer en sortie de puits via la création de biofilms au niveau des parois du tube. Toutefois, le transfert de ces micro-organismes à l'intérieur du bâtiment est fortement limité par la présence du système de filtration. Les conditions de température des condensats obtenues via les modélisations numériques sont favorables au développement des fungi et des espèces bactériennes psychrophiles. Ces conditions permettent, dans une plus faible mesure, le développement des espèces bactériennes mésophiles. Ces dernières, plus présentes en sortie de puits rencontreraient des conditions plus favorables à leur développement. Cependant, malgré ces conditions, l'abondance relative des espèces bactériennes et fungi pathogènes est très faible. Cela s'explique par le fait que, pour les fungi, les conditions de température rencontrent l'optimum de croissance d'une ou quelques espèces non pathogènes qui deviennent majoritaires et limitent le développement des autres. Pour les bactéries, le très grand nombre d'OTU recensé induit une compétition inter et intraspécifique qui limite leur croissance.

Bien que le risque sanitaire lié à la technologie du puits canadien soit faible, plusieurs résultats incitent à la vigilance lors de l'utilisation de ce système. Les volumes de condensats obtenus lors des saisons ou des années plus riches en précipitation pourraient favoriser un développement plus important des micro-organismes sur de plus longues périodes. L'extraction régulière des condensats, l'entretien des canalisations du puits afin de limiter l'apparition de biofilms et un changement régulier des filtres de la ventilation permettraient de réduire encore le risque sanitaire. L'augmentation des températures et des précipitations dans nos régions liées au réchauffement climatique pourraient améliorer les conditions rencontrées au sein du puits notamment pour des espèces bactériennes mésophiles pathogènes dont le risque sanitaire pour l'humain serait plus élevé.

Chapitre 14

Perspectives

Le modèle numérique pseudo 3D pourrait être amélioré en tenant compte des périodes où l'air diminue la quantité de condensat présent en se chargeant d'humidité.

La création d'un outil ou d'une application basée sur les modèles numériques développés dans cette étude et permettant aux propriétaires ou aux gestionnaires de puits canadien de savoir, en fonction des conditions météorologiques, quand être vigilant et entretenir leur puits notamment pour l'extraction des condensats afin d'éviter leur accumulation et le développement des micro-organismes pourrait être envisagée.

Les 3 campagnes d'échantillonnage réalisées lors de cette étude couvraient principalement la période de basse émission de spores pour les fungi ainsi que celle de basse concentration de nombreuses bactéries. La réalisation d'un ensemble de campagnes d'échantillonnage couvrant une année complète ou plusieurs saisons successives permettrait d'analyser et de caractériser les micro-organismes présents lors de la période de haute émission de spores et de haute concentration en bactéries. Ces campagnes saisonnières permettraient également de voir si le puits canadien, par la présence de condensats et de conditions favorables, diminue la saisonnalité de certaines espèces. L'utilisation systématique d'un aérobiocollecteur cyclonique de taille adaptée tel que le Coriolis μ Air Sampler pour l'échantillonnage de l'air permettrait de supprimer les biais liés à la mise en culture sur gélose.

La collecte d'échantillon du biofilm présent en fin de puits et l'analyse des conditions de température et humidité à ce niveau permettrait de vérifier si les conditions rencontrées au niveau du biofilm sont différentes de celles rencontrées dans les condensats et si des micro-organismes s'y développent préférentiellement.

Un ensemble d'analyses statistiques pourraient également être menées sur les résultats microbiologiques afin de caractériser notamment la diversité des populations fongiques et bactériennes présentes aux différentes stations.

Bibliographie

- [1] S. Déoux. Mission d'évaluation sanitaire du puits canadien - siège social du Groupe Millet. Technical report, Medieco, 17 janvier 2011.
- [2] M. Barbat. Nettoyabilité des puits climatiques. Technical report, Costic, Décembre 2012.
- [3] M. Jellad. Impact éco-énergétique et sanitaire d'un puits canadien sur une habitation ossature bois. Master's thesis, ISIMs - Campus Technique de la Haute Ecole en Hainaut, Juin 2011.
- [4] K. Yoonkyung and N. Katsunori. Field measurement of indoor air quality and airborne microbes in a near-zero energy house with an earth tube in the cold region of japan. *Science and Technology for the Built Environment*, 22(7) :1010–1023, 2016.
- [5] B. Flückiger and C. Monn. Microbial investigations and allergen measurements in ground-coupled earth-to-air heat exchangers. In *20th AIVC and Indoor Air 99 Conference "Ventilation and indoor air quality in buildings"*, 1999.
- [6] D.G. Leo Samuel. Cooling performance and indoor air quality characteristics of an earth air tunnel cooled building. *Journal of Metrology Society of India MAPAN*, 2017.
- [7] Région wallonne. Tableaux des exigences en fonction de la nature des travaux. <https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-electromobilite.html?IDC=9136>, 2022.
- [8] FIABITAT Concept. Le puits canadien à la loupe. <http://www.fiabitat.com>, 2014.
- [9] A. Musy and M. Soutter. *Physique du sol*. Eyrolles, 01 avril 1991.
- [10] B. Sodielec. Evolution annuelle de la température en surface et en profondeur, pour un cycle de moyenne de 11 °C et d'amplitude crête à crête de 25 °C. <https://www.sodielec-berger.fr/fr/content/255/88/vmc/puits-canadien-puits-canadien>, 2022.
- [11] AFCN Agence fédérale de contrôle nucléaire. Le radon. <https://afcn.fgov.be/fr/radon>, 2022.
- [12] D. Aubert. Une nouvelle mégaclassification pragmatique du vivant. *Med Sci (Paris)*, 32(5) :497–499, 2016.

- [13] T. Cavalier-smith. Early evolution of eukaryote feeding modes, cell structural diversity, and classification of the protozoan phyla loukoozoa, sulcozoa, and choanozoa. *European journal of protistology*, 49 2 :115–78, 2013.
- [14] M. Ruggiero, D. Gordon, T. Orrell, N. Bailly, T. Bourgoin, R. Brusca, T. Cavalier-Smith, M. Guiry, and P. Kirk. A higher level classification of all living organisms. *PLOS ONE*, 10(4) :1–60, 04 2015.
- [15] Catalogue of life. <https://www.catalogueoflife.org/>, 2022.
- [16] M. Bern and D. Goldberg. Automatic selection of representative proteins for bacterial phylogeny. *BMC Evolutionary Biology*, 5(34), 05 2005.
- [17] M. Koblížek. Ecology of aerobic anoxygenic phototrophs in aquatic environments. *FEMS Microbiology Reviews*, 39(6) :854–870, 07 2015.
- [18] C. McCarthy and D. Fitzpatrick. Phylogenomic reconstruction of the oomycete phylogeny derived from 37 genomes. *mSphere*, 2(2) :e00095–17, 2017.
- [19] L'amplification de fragments d'adn in vitro : la pcr. <https://www.semee-pedagogie.org/sujet/coeur-adn/>, 2022.
- [20] S. Schutz. Introduction à la métagénomique. <https://dridk.me/metagenomique.html>, 2022.
- [21] P. Hollmuller. *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments*. PhD thesis, Faculté des Sciences - Université de Genève, 2002.
- [22] E. Carvalho, C. Sindt, A. Verdier, C. Galán, L. O'Donoghue, S. Parks, and M. Thibaudon. Performance of the coriolis air sampler, a high-volume aerosol-collection system for quantification of airborne spores and pollen grains. *Aerobiologia*, 24 :191–201, 11 2008.
- [23] U. Hossfeld, L. Olsson, and G. Levit. The 150th anniversary of ernst haeckel's "biogenetic law". *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, pages 167–176, 01 2017.
- [24] Métagénomique. <https://www.france-genomique.org/expertises-technologiques/metagenomique/>, 2022.
- [25] bercinisma. Mons - reconstruction du puits du trouillon entre la rue valenciennoise et l'avenue maistriaux. campagne géotechnique. Technical report, Inisma, 19 décembre 2011.
- [26] V. Després, J. Huffman, S. Burrows, C. Hoose, A. Safatov, G. Buryak, J. Fröhlich-Nowoisky, W. Elbert, M. Andreae, U. Poschl, and R. Jaenicke. Primary biological aerosol particles in the atmosphere : a review. *Tellus B : Chemical and Physical Meteorology*, 64(1) :15598, 2012.
- [27] M. Carlile, S. Watkinson, and G. Gooday. 3 - fungal cells and vegetative growth. In Michael J Carlile, Sarah C Watkinson, and Graham W Gooday, editors, *The Fungi (Second Edition)*, pages 85–184. Academic Press, London, second edition edition, 2001.

- [28] B. Kendrick. *The fifth kingdom*. Hackett Publishing, 2017.
- [29] S.S. Block. *Sterilization and preservation, 4th ed.* Lea & Febiger editors, 1991.
- [30] J.P. Regnault. *Microbiologie générale*. Décarie Éditeur inc., 1990.
- [31] P. Blais Lecours, C. Duchaine, M. Thibaudon, and D. Marsolais. *Health Impacts of Bioaerosol Exposure*, chapter 4.1, pages 249–268. John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [32] T. White, T. Bruns, SJWT. Lee, J. Taylor, et al. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal rna genes for phylogenetics. *PCR protocols : a guide to methods and applications*, 18(1) :315–322, 1990.
- [33] B. Altdorfer and V. Feldheim. Analyse et amélioration du calcul des besoins de refroidissement et du risque de surchauffe dans la méthode réglementaire belge d'évaluation de la peb des bâtiments résidentiels. http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2011/Communications/57.pdf, 2011.
- [34] Gouvernement wallon. *Arrêté du Gouvernement wallon modifiant, en ce qui concerne la performance énergétique des bâtiments, le Code wallon de l'Aménagement du territoire, de l'Urbanisme, du Patrimoine et de l'Energie*. Moniteur belge, 22 juin 2012.
- [35] D.Y. Goswami and S. Ileslamlou. Performance analysis of a closed loop climate control system using underground air tunnel. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1990.
- [36] T. Kusuda and P.R. Achenbach. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in united states. Technical report, ASHRAE Transactions 71, 1965.
- [37] G. Mihalakakou, M. Santamouris, and D. Asimakopoulos. Modelling the earth temperature using multiyear measurements. *Energy and Buildings*, 1992.
- [38] G. Mihalakakou. On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy*, 1997.
- [39] M. Santamouris. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures : The state of the art. *Energy and Buildings*, 2013.
- [40] L. Ozgener. A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (eahe) systems in turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011.
- [41] M.S. Hatamipour and A. Abedi. Passive cooling systems in buildings : some useful experiences from ancient architecture for natural cooling in a hot and humid region. *Energy Conversion and Management*, 2008.
- [42] F. Jomehzadeh. A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, part 1 : Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [43] Institut royal météorologique (IRM). Bilan climatique annuel - année 2015. Technical report, IRM, 2015.

- [44] Registre du Cancer. Cancer du poumon en belgique. <https://www.cancer.be/les-cancers/types-de-cancers/cancer-du-poumon>, 2022.
- [45] Service Public Fédéral Santé Publique, Sécurité de la chaîne alimentaire et environnement. Loi du 06 novembre 2022 relative à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur, 06 Novembre 2022.
- [46] W. Elbert, P. E. Taylor, M. O. Andreae, and U. Poschl. Contribution of fungi to primary biogenic aerosols in the atmosphere : wet and dry discharged spores, carbohydrates, and inorganic ions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(17) :4569–4588, 2007.
- [47] J. Webster and R. Weber. *Introduction to Fungi*. Cambridge University Press, 3 edition, 2007.
- [48] R. Amann, B. Binder, R. Olson, S. Chisholm, R. Devereux, and D.A. Stahl. Combination of 16s rRNA-targeted oligonucleotide probes with flow cytometry for analyzing mixed microbial populations. *Applied and environmental microbiology*, 56(6) :1919–1925, 1990.
- [49] K. Fukuda, M. Ogawa, H. Taniguchi, and M. Saito. Molecular approaches to studying microbial communities : targeting the 16s ribosomal rna gene. *Journal of UOEH*, 38(3) :223–232, 2016.
- [50] J. Mitchell and A. Zuccaro. Sequences, the environment and fungi. *Mycologist*, 20(2) :62–74, 2006.
- [51] P. Amato, E. Brisebois, M. Draghi, C. Duchaine, J. Fröhlich-Nowoisky, J.A. Huffman, G. Mainelis, E. Robine, and M. Thibaudon. *Main Biological Aerosols, Specificities, Abundance, and Diversity*, chapter 1.1, pages 1–21. John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [52] M. Jacobson and D. Streets. Influence of future anthropogenic emissions on climate, natural emissions, and air quality. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 114(D8), 2009.
- [53] S. Burrows, T. Butler, P. Jockel, H. Tost, A. Kerckweg, U. Poschl, and M. Lawrence. Bacteria in the global atmosphere – part 2 : Modeling of emissions and transport between different ecosystems. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(23) :9281–9297, 2009.
- [54] C. Hoose, J. E. Kristjánsson, J.-P. Chen, and A. Hazra. A classical-theory-based parameterization of heterogeneous ice nucleation by mineral dust, soot, and biological particles in a global climate model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(8) :2483 – 2503, 2010.
- [55] A. Sesartic and Tanja N Dallafior. Global fungal spore emissions, review and synthesis of literature data. *Biogeosciences*, 8(5) :1181–1192, 2011.
- [56] J. Prospero, E. Blades, G. Mathison, and R. Naidu. Interhemispheric transport of viable fungi and bacteria from africa to the caribbean with soil dust. *Aerobiologia*, 21(1) :1–19, 2005.

- [57] D. Griffin, D. Westphal, and M. Gray. Airborne microorganisms in the african desert dust corridor over the mid-atlantic ridge, ocean drilling program, leg 209. *Aerobiologia*, 22(3) :211–226, 2006.
- [58] A. Bovallius, B. Bucht, R. Roffey, and P. Anas. Long-range air transmission of bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 35(6) :1231–1232, 1978.
- [59] I. Rosas, C. Calderon, M. Ulloa, and J. Lacey. Abundance of airborne penicillium cfu in relation to urbanization in mexico city. *Applied and Environmental Microbiology*, 59(8) :2648–2652, 1993.
- [60] C. Fahlgren, G. Bratbak, R.A. Sandaa, R. Thyrhaug, and U.L. Zweifel. Diversity of airborne bacteria in samples collected using different devices for aerosol collection. *Aerobiologia*, 27(2) :107–120, 2011.
- [61] R. Harrison, A. Jones, P. Biggins, N. Pomeroy, C. Cox, S. Kidd, J. Hobman, N. Brown, and A. Beswick. Climate factors influencing bacterial count in background air samples. *International Journal of Biometeorology*, 49(3) :167–178, 2005.
- [62] V. Després, J. Huffman, S. Burrows, C. Hoese, A. Safatov, G. Buryak, J. Fröhlich-Nowoisky, W. Elbert, M. Andreae, U. Pöschl, et al. Primary biological aerosol particles in the atmosphere : a review. *Tellus B : Chemical and Physical Meteorology*, 64(1) :15598, 2012.
- [63] C. Jaing, J. Thissen, M. Morrison, M. Dillon, S. Waters, G. Graham, N. Be, P. Niccoll, S. Verma, T. Caro, et al. Sierra nevada sweep : metagenomic measurements of bioaerosols vertically distributed across the troposphere. *Scientific reports*, 10(1) :1–13, 2020.
- [64] B. Sattler, H. Puxbaum, and R. Psenner. Bacterial growth in supercooled cloud droplets. *Geophysical Research Letters*, 28(2) :239–242, 2001.
- [65] P. Amato. Clouds provide atmospheric oases for microbes-estimated to total 1019 cells, microorganisms in clouds appear sufficient to affect physicochemical processes in the global atmosphere. *Microbe*, 7(3) :119, 2012.
- [66] R. Cordero and A. Casadevall. Functions of fungal melanin beyond virulence. *Fungal Biology Reviews*, 31(2) :99–112, 2017.
- [67] T.M. Madelin. Fungal aerosols : a review. *Journal of aerosol science*, 25(8) :1405–1412, 1994.
- [68] M. Recio, M. del Mar Trigo, S. Docampo, M. Melgar, J. García-Sánchez, L. Boottello, and B. Cabezudor. Analysis of the predicting variables for daily and weekly fluctuations of two airborne fungal spores : *Alternaria* and *cladosporium*. *International journal of biometeorology*, 56(6) :983–991, 2012.
- [69] F. Alshareef and G. Robson. Prevalence, persistence, and phenotypic variation of *aspergillus fumigatus* in the outdoor environment in manchester, uk, over a 2-year period. *Sabouraudia*, 52(4) :367–375, 2014.
- [70] V. Jiřík, O. Machaczka, V. Ovesná, H. Miturová, E. Holendová, J. Janoutová, V. Janout, et al. Bioaerosols in the suburbs of ostrava during a one year period. *Central European Journal of Public Health*, 24(Supplement) :S55–S60, 2016.

- [71] M. Katotomichelakis, C. Nikolaidis, M. Makris, E. Proimos, X. Aggelides, T. Constantinidis, C. Papadakis, and V. Danielides. A lternaria and c ladosporium calendar of w estern t hrace : Relationship with allergic rhinitis symptoms. *The Laryngoscope*, 126(2) :E51–E56, 2016.
- [72] L. Larsen and S. Gravesen. Seasonal variation of outdoor airborne viable microfungi in copenhagen, denmark. *Grana*, 30(2) :467–471, 1991.
- [73] L. Larsen. A three-year-survey of microfungi in the air of copenhagen 1977–79. *Allergy*, 36(1) :15–22, 1981.
- [74] M. Oliveira, H. Ribeiro, L. Delgado, J. Fonseca, M.G.Gastel-Branco, and I. Abreu. 4 outdoor allergenic fungal spores : Comparison between an urban and a rural area in northern portugal. *Journal of investigational allergology & clinical immunology*, 20(2) :117, 2010.
- [75] R. Adams, M. Miletto, J. Taylor, and T. Bruns. Dispersal in microbes : fungi in indoor air are dominated by outdoor air and show dispersal limitation at short distances. *The ISME journal*, 7(7) :1262–1273, 2013.
- [76] K. Peay and T. Bruns. Spore dispersal of basidiomycete fungi at the landscape scale is driven by stochastic and deterministic processes and generates variability in plant–fungal interactions. *New Phytologist*, 204(1) :180–191, 2014.
- [77] K. Peay, M. Garbelotto, and T. Bruns. Evidence of dispersal limitation in soil microorganisms : isolation reduces species richness on mycorrhizal tree islands. *Ecology*, 91(12) :3631–3640, 2010.
- [78] J. Golan and A. Pringle. Long-distance dispersal of fungi. *Microbiology spectrum*, 5(4) :5–4, 2017.
- [79] S. L. Maldonado-Ramirez, D. Schmale III, E. Shields, and G. Bergstrom. The relative abundance of viable spores of gibberella zeae in the planetary boundary layer suggests the role of long-distance transport in regional epidemics of fusarium head blight. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(1-2) :20–27, 2005.
- [80] J.M. Moncalvo and P. Buchanan. Molecular evidence for long distance dispersal across the southern hemisphere in the ganoderma applanatum-australe species complex (basidiomycota). *Mycological research*, 112(4) :425–436, 2008.
- [81] A. Rieux, S. Soubeyrand, F. Bonnot, E. Klein, J. Ngando, A. Mehl, V. Ravigne, J. Carrier, and L. De Lapeyre de Bellaire. Long-distance wind-dispersal of spores in a fungal plant pathogen : estimation of anisotropic dispersal kernels from an extensive field experiment. *PLoS One*, 9(8) :e103225, 2014.
- [82] D. Schmale III and S. Ross. Highways in the sky : Scales of atmospheric transport of plant pathogens. *Annual review of phytopathology*, 53 :591–611, 2015.
- [83] H. Schlichting Jr. Survival of some fresh-water algae under extreme environmental conditions. *Transactions of the American Microscopical Society*, pages 610–613, 1974.

- [84] J. Fröhlich-Nowoisky, C. Kampf, B. Weber, A. Huffman, C. Pöhlker, M. Andreae, N. Lang-Yona, S. Burrows, S. Gunthe, W. Elbert, et al. Bioaerosols in the earth system : Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research*, 182 :346–376, 2016.
- [85] T. W. Whon, M.S. Kim, S. W. Roh, N.R. Shin, H.W. Lee, and J.W. Bae. Metagenomic characterization of airborne viral dna diversity in the near-surface atmosphere. *Journal of virology*, 86(15) :8221–8231, 2012.
- [86] M.C. Horner-Devine, M. Lage, J. Hughes, and B. Bohannan. A taxa–area relationship for bacteria. *Nature*, 432(7018) :750–753, 2004.
- [87] R. Wood, K. Mudd, and P. Eggleston. The distribution of cat and dust mite allergens on wall surfaces. *Journal of allergy and clinical immunology*, 89(1) :126–130, 1992.
- [88] A. Custovic, A. Fletcher, C.A.C. Pickering, H.C. Francis, R. Green, A. Smith, M. Chapman, and A. Woodcock. Domestic allergens in public places iii : house dust mite, cat, dog and cockroach allergens in british hospitals. *Clinical and Experimental Allergy*, 28 :53–59, 1998.
- [89] J.M. Macher, F.C. Tsai, L.E. Burton, and K.S. Liu. Concentrations of cat and dust-mite allergens in dust samples from 92 large us office buildings from the base study. *Indoor Air*, 15(9) :82–88, 2005.
- [90] R. Gorny and J. Dutkiewicz. Bacterial and fungal aerosols in indoor environment in central and eastern european countries. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 9(1), 2002.
- [91] L. Bouillard, O. Michel, M. Dramaix, and M. Devleeschouwer. Bacterial contamination of indoor air, surfaces, and settled dust, and related dust endotoxin concentrations in healthy office buildings. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 12(2) :187–192, 2005.
- [92] M. Stryjowska-Sekulska, A. Piotraszewska-Pajak, A. Szyszka, M. Nowicki, and M. Filipiak. Microbiological quality of indoor air in university rooms. *Polish Journal of Environmental Studies*, 16(4) :623, 2007.
- [93] M. Gołofit-Szymczak and R. Górny. Bacterial and fungal aerosols in air-conditioned office buildings in warsaw, poland—the winter season. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 16(4) :465–476, 2010.
- [94] M. Täubel, M. Sulyok, V. Vishwanath, E. Bloom, M. Turunen, K. Järvi, E. Kauphanen, R. Krska, A. Hyvärinen, L. Larsson, et al. Co-occurrence of toxic bacterial and fungal secondary metabolites in moisture-damaged indoor environments. *Indoor air*, 21(5) :368–375, 2011.
- [95] J.C. Desenclos. La transmission aérienne des agents infectieux. *Médecine et maladies infectieuses*, 38(8) :449–451, 2008.
- [96] E. Cartieaux, M.A. Rzepka, and D. Cuny. Indoor air quality in schools. *Archives de pediatrie : organe officiel de la Societe francaise de pediatrie*, 18(7) :789–796, 2011.

- [97] W. Fisk, Q. Lei-Gomez, and M. Mendell. Meta-analyses of the associations of respiratory health effects with dampness and mold in homes. *Indoor air*, 17(LBNL-59363), 2006.
- [98] C. Dassonville, C. Demattei, B. Detaint, S. Barral, V. Bex-Capelle, and I. Momas. Assessment and predictors determination of indoor airborne fungal concentrations in paris newborn babies' homes. *Environmental research*, 108(1) :80–85, 2008.
- [99] M. Sautour, N. Sixt, F. Dalle, C. l'Ollivier, V. Fourquenet, C. Calinon, K. Paul, S. Valvin, A. Maurel, S. Aho, et al. Profiles and seasonal distribution of airborne fungi in indoor and outdoor environments at a french hospital. *Science of the total environment*, 407(12) :3766–3771, 2009.
- [100] R. Tormo-Molina, M.A. Gonzalo-Garijo, S. Fernández-Rodríguez, and I. Silva-Palacios. Monitoring the occurrence of indoor fungi in a hospital. *Revista iberoamericana de micologia*, 29(4) :227–234, 2012.
- [101] M. Vackova, V. Buchta, R. Prymula, J. Cerman, A. Kubatova, P. Hamal, V. Ralavský, and R. Chlibeka. The occurrence of microscopic fungi in air samples from a transplant intensive care unit. *Indoor and Built Environment*, 15(1) :115–118, 2006.
- [102] R. Newson, D. Strachan, J. Corden, and W. Millington. Fungal and other spore counts as predictors of admissions for asthma in the trent region. *Occupational and Environmental Medicine*, 57(11) :786–792, 2000.
- [103] K. Harley, J. Macher, M. Lipsett, P. Duramad, N. Holland, S. Prager, J. Ferber, A. Bradman, B. Eskenazi, and I. Tager. Fungi and pollen exposure in the first months of life and risk of early childhood wheezing. *Thorax*, 64(4) :353–358, 2009.
- [104] S. Cakmak, R. Dales, R. Burnett, S. Judek, F. Coates, and J. Brook. Effect of airborne allergens on emergency visits by children for conjunctivitis and rhinitis. *The Lancet*, 359(9310) :947–948, 2002.
- [105] B. Behbod, J. Sordillo, E. Hoffman, S. Datta, T. Webb, D. Kwan, J. Kamel, M. Muilenberg, J. Scott, G. Chew, et al. Asthma and allergy development : contrasting influences of yeasts and other fungal exposures. *Clinical & Experimental Allergy*, 45(1) :154–163, 2015.
- [106] A. Guilbert, K. Simons, L. Hoebeke, A. Packeu, M. Hendrickx, K. De Cremer, R. Buyl, D. Coomans, and A. Van Nieuwenhuysse. Short-term effect of pollen and spore exposure on allergy morbidity in the brussels-capital region. *EcoHealth*, 13(2) :303–315, 2016.
- [107] D. Caillaud, M. Cheriaux, S. Martin, C. Segala, N. Dupuy, B. Evrard, and M. Thiabaudon. Short-term effect of outdoor mould spore exposure on prescribed allergy medication sales in central france. *Clinical & Experimental Allergy*, 48(7) :837–845, 2018.
- [108] J. Pongracic, G. O'Connor, M. Muilenberg, B. Vaughn, D. Gold, M. Kattan, W. Morgan, R. Gruchalla, E. Smartt, and H. Mitchell. Differential effects of outdoor

- versus indoor fungal spores on asthma morbidity in inner-city children. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 125(3) :593–599, 2010.
- [109] R. Delfino, R. Zeiger, J. Seltzer, D. Street, R. Matteucci, P. Anderson, and P. Koutrakis. The effect of outdoor fungal spore concentrations on daily asthma severity. *Environmental health perspectives*, 105(6) :622–635, 1997.
- [110] R. Dales, S. Cakmak, R. Burnett, S. Judek, F. Coates, and J. Brook. Influence of ambient fungal spores on emergency visits for asthma to a regional children’s hospital. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 162(6) :2087–2090, 2000.
- [111] R. Tham, D. Vicendese, S. Dharmage, R. Hyndman, E. Newbigin, E. Lewis, M. O’Sullivan, A. Lowe, P. Taylor, P. Bardin, et al. Associations between outdoor fungal spores and childhood and adolescent asthma hospitalizations. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 139(4) :1140–1147, 2017.
- [112] S. Rutherford, R. Simpson, G. Williams, C. Mitchell, and B. McCall. Relationships between environmental factors and lung function of asthmatic subjects in south east queensland, australia. *Journal of occupational and environmental medicine*, pages 882–891, 2000.
- [113] D.M. Caillaud, S. Martin, C. Segala, N. Dupuy, M. Thibaudon, and D. Muti. Short-acting β 2-agonists (saba) bronchodilator sales and outdoor mould in central france. *Clinical and translational allergy*, 9(1) :1–5, 2019.
- [114] L. Grewling, M. Nowak, A. Szymańska, L. Kostecki, and P. Bogawski. Temporal variability in the allergenicity of airborne alternaria spores. *Medical mycology*, 57(4) :403–411, 2019.
- [115] M. Garcia-Solache and A. Casadevall. Global warming will bring new fungal diseases for mammals. *MBio*, 1(1) :e00061–10, 2010.
- [116] A. Casadevall, D. Kontoyiannis, and V. Robert. On the emergence of candida auris : climate change, azoles, swamps, and birds. *MBio*, 10(4) :e01397–19, 2019.
- [117] R. Cavicchioli, W. Ripple, K. Timmis, F. Azam, L. Bakken, M. Baylis, M. Behrenfeld, A. Boetius, P. Boyd, A. Classen, et al. Scientists’ warning to humanity : microorganisms and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 17(9) :569–586, 2019.
- [118] S. Chakraborty. Migrate or evolve : options for plant pathogens under climate change. *Global change biology*, 19(7) :1985–2000, 2013.
- [119] M. Fisher, D. Henk, C. Briggs, J. Brownstein, L. Madoff, S. McCraw, S. Gurr, et al. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature*, 484(7393) :186–194, 2012.
- [120] D. Friedman and I. Schwartz. Emerging fungal infections : new patients, new patterns, and new pathogens. *Journal of Fungi*, 5(3) :67, 2019.
- [121] T.S. Bisioniya, A. Kumar, and P. Baredar. Experimental and analytical studies of earth–air heat exchanger (eahe) systems in india : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.

- [122] C. Peretti, A. Zarrella, M. De Carli, and R. Zecchin. The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (eahe). a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
- [123] S.K. Soni, M. Pandey, and V. Nath Bartaria. Ground coupled heat exchangers : A review and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015.
- [124] N. Bordoloi, A. Sharma, H. Nautiyal, and V. Goel. An intense review on the latest advancements of earth air heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
- [125] M. Kaushal. Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies : Comprehensive review. *Energy and Buildings*, 2017.
- [126] R. Singh, R.L. Sawhney, I.J. Lazarus, and V.V.N. Kishore. Recent advancements in earth air tunnel heat exchanger (eathe) system for indoor thermal comfort application : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
- [127] K.K. Agrawal, G. Das Agrawal, R. Misra, M. Bhardwaj, and D.K. Jamuwa. A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of earth air tunnel heat exchanger. *Energy and Buildings*, 2018.
- [128] G. Mihalakakou, M. Santamouris, J. O. Lewis, and D. N. Asimakopoulos. *Solar Energy*. Elsevier Science Ltd, 1997.
- [129] G. Mihalakakou, M. Souliotis, M. Papadaki, G. Halkos, J. Paravantis, S. Makridis, and S. Papaefthimiou. Applications of earth-to-air heat exchangers : A holistic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155 :111921, 2022.
- [130] G. Chardome. Analyse numérique et expérimentale des performances d'un puits canadien. Master's thesis, Faculté Polytechnique - Université de Mons, Septembre 2014.
- [131] MS. Sodha, D. Buddhi, and KR. Campus. Optimization of pipe parameters of an underground air pipe cooling system. *Energy Convers Manag*, 1993.
- [132] T. Choudhury and AK. Misra. Minimizing changing climate impact on buildings using easily and economically feasible earth to air heat exchanger technique. *Mitig Adapt Strat Glob Change*, 2014.
- [133] M. Cuny, J. Lin, M. Siroux, and C. Fond. Influence of rainfall events on the energy performance of an earth-air heat exchanger embedded in a multilayered soil. *Renewable Energy*, 147 :2664–2675, 2020. Shallow Geothermal Energy Systems.
- [134] P.M. Congedo, C. Baglivo, S. Bonuso, and D. D'Agostino. Numerical and experimental analysis of the energy performance of an air-source heat pump (ashp) coupled with a horizontal earth-to-air heat exchanger (eahx) in different climates. *Geothermics*, 87 :101845, 2020.
- [135] P. Hollmuller and B. Lachal. Air-soil heat exchangers for heating and cooling of buildings : Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance. *Applied Energy*, 2014.

- [136] N. Nemati, A. Omidvar, and B. Rosti. Performance evaluation of a novel hybrid cooling system combining indirect evaporative cooler and earth-air heat exchanger. *Energy*, 215 :119216, 2021.
- [137] M. De Paepe and A. Janssens. Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, 2003.
- [138] V. Badescu and B. Sicre. Renewable energy for passive house heating : li model. *Energy and Buildings*, 2003.
- [139] M.K. Ghosal and G.N. Tiwari. Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air exchanger integrated with a greenhouse. *Energy conversion and management*, 2006.
- [140] A. Tzaferis, D. Liparakis, M. Santamouris, and A. Argiriou. Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, 18(1) :35–43, 1992.
- [141] G. Schiller. Earth tubes for passive cooling, the development of a transient numerical model for predicting the performance of earth/air heat exchangers. Master's thesis, MIT, Mechanical Engineering, 1982.
- [142] M. Santamouris and C. C. Lefas. Thermal analysis and computer control of hybrid greenhouse with subsurface heat storage. *Energy Agric.*, 1986.
- [143] E.A. Rodriguez, J.M. Cjudo, and S. Alvarez. Earth-tube systems performance. In *Proc. CIB Meeting, Air Quality and Air Conditioning*, 1988.
- [144] H.J. Levit, R. Gaspar, and R.D. Piacentini. Simulation of greenhouse microclimate by earth-tube heat exchangers. *Agric. Forest Meteorol.*, 1989.
- [145] A.L.T. Seroa da Motta and A.N. Young. The predicted performance of buried pipe cooling system for hot humid climates. In *Proc. of Solar Engineering Conf.*, 1985.
- [146] D. Elmer and G. Schiller. A preliminary examination of the dehumidification potential of earth-air heat exchangers. In *1st Nat. Passive Cooling Conf.*, 1981.
- [147] M.S. Sodha, I.C. Goyal, P.K. Bansal, and A. Kumar. Temperature distribution in an earth-air tunnel system. -, 1984.
- [148] B. Chen, T. Wang, J. Maloney, and M. Newmanr. Measured and predicted cooling performance of earth contact cooling tubes. In *ASES Annual Meet.*, 1983.
- [149] P. Hollmuller. Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003.
- [150] P. Hollmuller and B.M. Lachal. Buried pipe systems with sensible and latent heat exchanges : validation of numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring. *International Building Performance Simulation Association (IBPSA - Montreal Canada)*, 2005.
- [151] P. Tittlein. Étude des échangeurs air-sol par la méthode convolutive des facteurs de réponse. In *Conférence IBPSA France*, 2008.

- [152] M. Bojic, N. Trifunovic, G. Papadakis, and S. Kyritsis. Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building. *Energy*, 1997.
- [153] T. Boulard, E. Rajafinjohany, and A. Baille. Heat and water vapour transfer in a greenhouse with an underground heat storage system part-ii experimental result. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989.
- [154] R. Kumar, S. Ramesh, and S. C. Kaushik. Performance evaluation and energy conservation potential of earth-air-tunnel system coupled with non-air-conditioned building. *Building and Environment*, 2003.
- [155] V. Badescu. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. *Renewable Energy*, 2007.
- [156] K.H. Lee and R.K. Strand. The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. *Energy and Buildings*, 2008.
- [157] S. Thiers and B. Peuportier. Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in france. *Solar Energy*, 2008.
- [158] A. Ahmed, K. Ip, A. Miller, and K. Gidado. Thermal performance of earth-air heat exchanger for reducing cooling energy demand of office buildings in the united kingdom. In *11th Conference of international building performance simulation association*, volume 2009, pages 2228–2235, 2009.
- [159] F. Al-Ajmi, D.L. Loveday, and V.I. Hanby. The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. *Building and Environment*, 41(3) :235–244, 2006.
- [160] A. Huber and WKM Version. 2.0—pc-rechenprogramm für luft-erdregister. *Huber Energietechnik, Zürich*, 2001.
- [161] F.D. S. Benkert and D. Schöler Heidt. Calculation tool for earth heat exchanges gaea. *University of Siegen. Germany*, 1997.
- [162] V. Bansal, R. Misra, G.D. Agrawal, and J. Mathur. Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating. *Energy and Buildings*, 41(11) :1151–1154, 2009.
- [163] H. Wu, S. Wang, and D. Zhu. Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems. *Energy Conversion and management*, 48(5) :1462–1471, 2007.
- [164] W. Fisk. How ieq affects health, productivity. *ASHRAE Journal*, 2002.
- [165] P. Wargocki. Productivity and health effects of high indoor air quality, in encyclopedia of environmental health. *Elsevier*, 2011.
- [166] P. Burton. Analyse et simulation numérique des performances du stockage géothermique de l'énergie solaire pour chauffer des bâtiments. Master's thesis, Faculté Polytechnique de Mons - UMONS, 2006.

- [167] V. Gnielinski. Neue gleichungen für den wärmeund den stoffübergang in turbulent durchströmten rohren und kanälen. Technical report, Forschung im Ingenieur-Wesen, 1975.
- [168] D. Pahud. Geothermal energy and heat storage, supsi – dct – leee, dipartimento costruzioni e territorio. Technical report, Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, 2002.
- [169] A.F. Mills. *Heat Transfer*. Second Edition, Prentice-Hall, 1999.
- [170] S. Thiers. Modélisation thermique d’un échangeur air-sol pour le rafraichissement de bâtiments. Technical report, Journée thématique SFT - IBPSA, 2007.
- [171] B. Givoni and M. Mostrel. Windscreens in radiant cooling. *Passive Solar Journal*, 1982.
- [172] P. Lybaert H. Meunier. Notes de cours - thermique appliquée. Technical report, Université de Mons - UMONS, 2012-2013.
- [173] R. Manning, J.P. Griffith, TF. Pigot, and L-F. Vernon-Harcourt. *On the flow of water in open channels and pipes*. 1890.
- [174] A. Chezy. Formule pour trouver la vitesse de l’eau conduite dans une rigole donnée. dossier 847 (ms 1915) of the manuscript collection of the école nationales des ponts et chaussées, paris. reproduced in : Mouret, g.(1921). antoine chézy : histoire d’une formule d’hydraulique. In *Annales des Ponts et Chaussées*, volume 61, pages 165–269, 1776.
- [175] G. Nassaji Matin. Evaluation of effective parameters of manning roughness coefficients in hdpe culverts via kernel-based approaches. *Journal of Hydroinformatics*, 24(6) :1111–1126, 2022.
- [176] JP. Giroud, B. Palmer, and JE. Dove. Calculation of flow velocity in pipes as a function of flow rate. *Geosynthetics International*, 7(4-6) :583–600, 2000.
- [177] T. Boulard, E. Rajafinjohany, and A. Baille. Heat and water vapour transfer in a greenhouse with an underground heat storage system part-i experimental results. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989.
- [178] J. Huetz and J-P. Petit. Notions de transfert thermique par convection. *Techniques de l’ingénieur A-1541*, 1990.
- [179] Institut royal météorologique (IRM). Bilan climatique annuel - année 2016. Technical report, IRM, 2016.
- [180] Institut royal météorologique (IRM). Bilan climatique annuel - année 2020. Technical report, IRM, 2020.
- [181] Institut royal météorologique (IRM). Bilan climatique annuel - année 2021. Technical report, IRM, 2021.
- [182] Ki-Hyun Kim, Ehsanul Kabir, and Shamin Ara Jahan. Airborne bioaerosols and their impact on human health. *Journal of Environmental Sciences*, 67 :23–35, 2018.

- [183] A. Adib. Évaluation des risques sanitaires d'un puits canadien : exploration du contenu génétique de l'air par métagénomique. Master's thesis, Faculté des Sciences - Université de Mons, Janvier 2022.
- [184] Global Coordination, Ana Alastruey-Izquierdo, World Health Organization, World Health Organization, et al. Who fungal priority pathogens list to guide research, development and public health action. 2022.
- [185] PE. Verweij, ME. Brandt, et al. Aspergillus, fusarium, and other opportunistic moniliaceous fungi. *Manual of clinical microbiology : Volume 2*, (Ed. 9) :1802–1838, 2006.
- [186] E. Storey, KH. Dangman, P. Schenck, RL. DeBernardo, CS. Yang, A. Bracker, and MJ. Hodgson. Guidance for clinicians on the recognition and management of health effects related to mold exposure and moisture indoors. *Farmington, CT : University of Connecticut Health Center*, pages 1–206, 2004.
- [187] R. Araujo, A. Gonçalves Rodrigues, and C. Pina-Vaz. Susceptibility pattern among pathogenic species of aspergillus to physical and chemical treatments. *Medical Mycology*, 44(5) :439–443, 2006.
- [188] A. Gupta, R. Baran, and R. Summerbell. Fusarium infections of the skin. *Current opinion in infectious diseases*, 13(2) :121–128, 2000.
- [189] B. Flannigan, R. Samson, and JD. Miller. *Microorganisms in home and indoor work environments : diversity, health impacts, investigation and control*. CRC press, 2002.
- [190] Inc Environmental Microbiology Laboratory. (emlab) : An index of some commonly encountered fungal genera. 2007.
- [191] M. Airaksinen, P. Pasanen, J. Kurnitski, and O. Seppanen. Microbial contamination of indoor air due to leakages from crawl space : a field study. *Indoor air*, 14(1) :55–64, 2004.
- [192] C. Alexopoulos, C. Mims, M. Blackwell, et al. *Introductory mycology*. Number Ed. 4. John Wiley and Sons, 1996.
- [193] E. Piecková and Z. Jesenská. Microscopic fungi in dwellings and their health implications in humans. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 6(1), 1999.
- [194] Mold...what is all about? <http://www.mold-help.org/>, 2006.
- [195] H. Burge. Fungus allergens. *Clinical Reviews in Allergy*, 3(3) :319–329, 1985.
- [196] T.F. Patterson and M.R. McGinnis. The fungi : description. site doctor fungus. *Mycoses Study Group*, 100 :205–226, 2009.
- [197] R. Samson, E. Hoekstra, J. Frisvad, et al. *Introduction to food-and airborne fungi*. Number Ed. 7. Centraalbureau voor Schimmelcultures (CBS), 2004.
- [198] R-L. Patovirta, M. Reiman, T. Husman, U. Haverinen, M. Toivola, A. Nevalainen, et al. Mould specific ige antibodies connected with sinusitis in teachers of mould damaged school : a two-year follow-up study. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 16(3) :221–230, 2003.

- [199] D. Ellis. Mycology online. <https://www.adelaide.edu.au/mycology/>, 2007.
- [200] C. Garzoni, L. Markham, P. Bijlenga, and J. Garbino. Cladophialophora bantiana : a rare cause of fungal brain abscess. clinical aspects and new therapeutic options. *Medical mycology*, 46(5) :481–486, 2008.
- [201] K.J. Kwon-Chung and J.E. Bennett. Medical mycology. *Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo*, 34 :504–504, 1992.
- [202] D. Bronnimann, D. Garcia-Hermoso, and F. Lanternier. Analyse préliminaire de l'étude sos : étude rétrospective nationale sur les infections invasives à scedosporium et lomentospora. *Journal de Mycologie Médicale*, 27(3) :e33, 2017.
- [203] A. Serda Kantarcioglu, G. Sybren de Hoog, and J. Guarro. Clinical characteristics and epidemiology of pulmonary pseudallescheriasis. *Revista Iberoamericana de Micología*, 29(1) :1–13, 2012.
- [204] I. Druzhinina, K. Chenthamara, J. Zhang, L. Atanasova, D. Yang, Y. Miao, M. Rahimi, M. Grujic, F. Cai, S. Pourmehdi, et al. Massive lateral transfer of genes encoding plant cell wall-degrading enzymes to the mycoparasitic fungus trichoderma from its plant-associated hosts. *PLoS genetics*, 14(4) :e1007322, 2018.
- [205] JAN. Kluytmans, A. Van Belkum, and H. Verbrugh. Nasal carriage of staphylococcus aureus : epidemiology, underlying mechanisms, and associated risks. *Clinical microbiology reviews*, 10(3) :505–520, 1997.
- [206] Y. Le Loir, F. Baron, and M. Gautier. [i] staphylococcus aureus [/i] and food poisoning. *Genetics and molecular research : GMR*, 2(1) :63–76, 2003.
- [207] P. Murray, E. Baron, J. Jorgensen, M. Landry, M. Pfaller, and R. Tenover. *Manual of Clinical Microbiology (8th ed.)*. United States of America : American Society for Microbiology, 2003.
- [208] International Commission on Microbiological Specifications for Foods. *Microorganisms in foods 5 : Characteristics of microbial pathogens*, volume 5. Springer Science & Business Media, 1996.
- [209] A. Al Atrouni, M-L. Joly-Guillou, M. Hamze, and M. Kempf. Reservoirs of non-baumannii acinetobacter species. *Frontiers in microbiology*, 7 :49, 2016.
- [210] H. Doughari, P. Ndakidemi, I. Human, and S. Benade. The ecology, biology and pathogenesis of acinetobacter spp. : an overview. *Microbes and environments*, 26(2) :101–112, 2011.
- [211] G. Ray and K. Ryan. *Sherris medical microbiology : an introduction to infectious diseases*. McGraw-Hill NY, 2004.
- [212] C. Verduin, C. Hol, A. Fleer, H. van Dijk, and A. van Belkum. Moraxella catarhalis : from emerging to established pathogen. *Clinical microbiology reviews*, 15(1) :125–144, 2002.
- [213] A. Tsuji, Y. Kaneko, K. Takahashi, M. Ogawa, and S. Goto. The effects of temperature and ph on the growth of eight enteric and nine glucose non-fermenting species of gram-negative rods. *Microbiology and immunology*, 26(1) :15–24, 1982.

- [214] F. Mookadam, M. Cikes, L.M. Baddour, I.M. Tleyjeh, and M. Mookadam. *Corynebacterium jeikeium* endocarditis : a systematic overview spanning four decades. *European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases*, 25 :349–353, 2006.
- [215] L. M. Teixeira, M. G. S. Carvalho, and R. R. Facklam. *Manual of Clinical Microbiology (9th ed.)*. United States of America : American Society for Microbiology, 2007.
- [216] E. Bergogne-Bérézin. *Bacteria : Acinetobacter*. 2014.
- [217] J. Glover, B. Browning, T. Ticer, A. Engevik, and M. Engevik. *Acinetobacter calcoaceticus* is well adapted to withstand intestinal stressors and modulate the gut epithelium. *Frontiers in Physiology*, page 841, 2022.
- [218] K. Khan, J. Wang, and T. Marras. Nontuberculous mycobacterial sensitization in the united states : national trends over three decades. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 176(3) :306–313, 2007.
- [219] E. Tanaka, T. Kimoto, H. Matsumoto, K. Tsuyuguchi, K. Suzuki, S. Nagai, M. Shimadzu, H. Ishibatake, T. Murayama, and R. Amitani. Familial pulmonary mycobacterium avium complex disease. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 161(5) :1643–1647, 2000.
- [220] P. Koukila-Kähköll, B. Springer, E. Böttger, L. Paulin, E. Jantzen, and M-L. Katila. *Mycobacterium branderi* sp. nov., a new potential human pathogen. *International journal of systematic bacteriology*, 45(3) :549–553, 1995.
- [221] N. Palleroni, M. Doudoroff, R.Y. Stanier, RE. Solanes, and M. Mandel. Taxonomy of the aerobic pseudomonads : the properties of the pseudomonas stutzeri group. *Microbiology*, 60(2) :215–231, 1970.
- [222] M. Gani, S. Rao, M. Miller, and S. Scoular. *Pseudomonas mendocina* bacteremia : A case study and review of literature. *The American Journal of Case Reports*, 20 :453, 2019.
- [223] I. Abbott, M. Slavin, J. Turnidge, K. Thursky, and L. Worth. *Stenotrophomonas maltophilia* : emerging disease patterns and challenges for treatment. *Expert review of anti-infective therapy*, 9(4) :471–488, 2011.
- [224] J. Brooke. *New strategies against stenotrophomonas maltophilia : a serious world-wide intrinsically drug-resistant opportunistic pathogen*, 2014.
- [225] M.S. Said, E. Tirthani, and E. Lesho. *Stenotrophomonas maltophilia*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK572123/>, 2023.
- [226] WJ. Looney. Role of *stenotrophomonas maltophilia* in hospital-acquired infection. *British journal of biomedical science*, 62(3) :145–154, 2005.
- [227] O. Mahdi, B. Eklund, and N. Fisher. Laboratory culture and maintenance of *stenotrophomonas maltophilia*. *Current Protocols in Microbiology*, 32(1) :6F–1, 2014.

- [228] E. Mayr and W.J. Bock. Classifications and other ordering systems. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 40(4) :169–194, 2002.

Références des articles publiés durant la thèse

G. Chardome and V. Feldheim. Heat transfer and condensation in an earth-air heat exchanger : 2d/3d numerical modeling validated by experimental measurements. *Energy and Buildings*, 205 :109532, 2019.

G. Chardome and V. Feldheim. Thermal modelling of earth air heat exchanger (eahe) and analyse of health risk. In *Building Simulation Conference Proceedings, IBPSA*, pages 1964-1970, 2019.

Cinquième partie

Annexes

Annexe A

Système de classification des êtres vivants

La classification biologique, appelée également taxonomie a pour but de simplifier et d'ordonner l'immense diversité de la vie en unités cohérentes appelées taxons [14]. Depuis l'Antiquité, les critères de classification employés par les humains ont été guidés par ses besoins, ses croyances, mais également l'évolution des technologies notamment la microscopie et la génétique.

En 1735, dans *Systema Naturae*, Carl von Linné propose une classification dans laquelle les êtres vivants qui partagent un ensemble de caractères observables sont réunis dans un système de groupes hiérarchisés : Règne, Embranchement, Classe, Ordre, Famille, Genre, Espèce, Variété (ou Race). Il propose également une nomenclature binomiale où les êtres vivants sont identifiés par un double nom en latin reprenant le genre et l'espèce.

En 1859, Charles Darwin et Alfred Wallace co-construisent la théorie de l'évolution sur base de leurs nombreuses observations et recherches. La Figure A.1 montre l'image de l'arbre utilisé par Darwin qui donne une interprétation généalogique des différents groupes employés jusqu'alors en classification. Si des organismes appartiennent à un groupe particulier et partagent des caractères, c'est parce qu'ils ont hérité ces caractères d'un ancêtre commun.

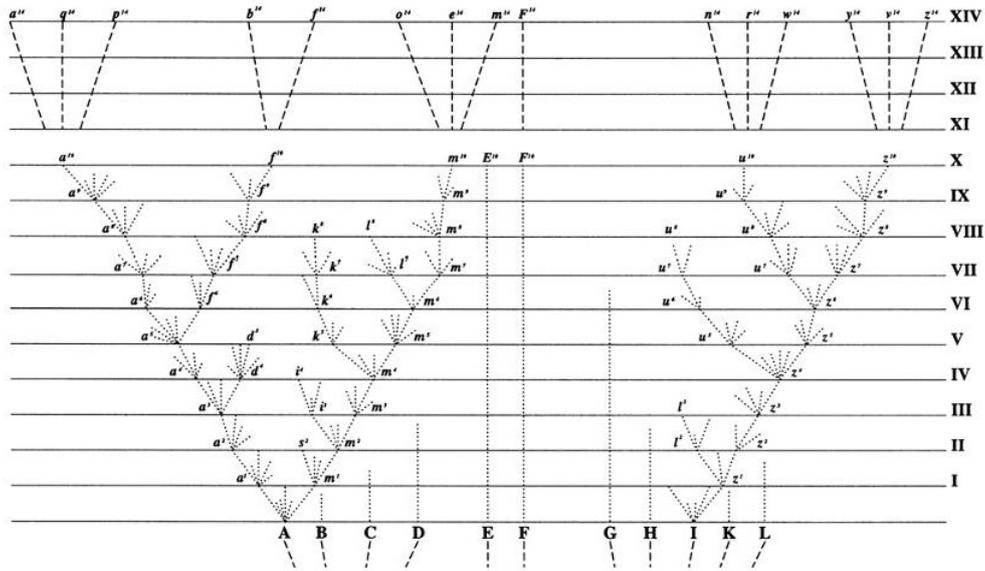


FIGURE A.1 – Charles Darwin, L'origine des espèces, Ed originale 1859

En 1866, Haeckel sur base de la théorie de l'évolution entame un travail sur la classification du vivant. La classification biologique devient donc une classification phylogénétique. Cette dernière a 2 objectifs : ordonner la diversité du vivant et comprendre son évolution en faisant apparaître la phylogénie des lignées d'organismes. La Figure A.2 présente l'arbre proposé par Haeckel. Celui-ci, suite aux découvertes faites grâce à l'apparition de la microscopie optique, propose également un règne supplémentaire celui des protistes en plus des règnes des plantes et des animaux.

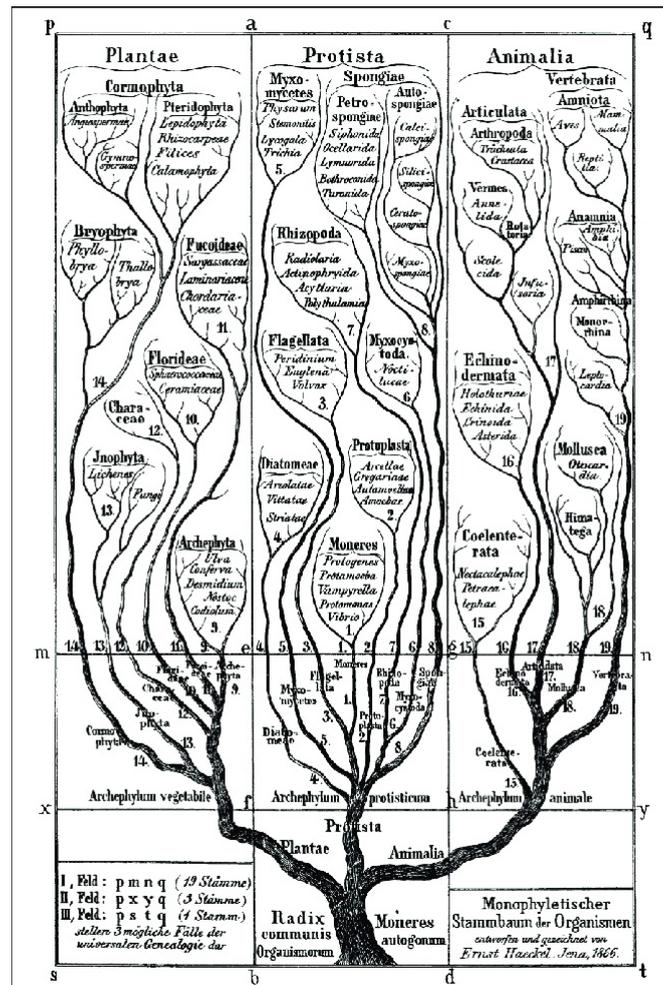


FIGURE A.2 – Arbre phylogénétique, Ernst Haeckel - General Morphology of Organisms – 1886 [23]

En 1950, Willi Hennig propose une méthode de classification qui pour chaque caractère employé distingue 2 formes : la forme ancestrale et la forme dérivée. Cette méthode est toujours celle employée actuellement. Dès 1931, la microscopie électronique révolutionne la science et permet notamment l'apparition de la microbiologie. Cette nouvelle branche de la biologie s'intéresse entre autres aux différents composants des cellules et met en lumière les procaryotes qui possèdent de l'ADN libre, non protégé dans un noyau et les eucaryotes qui possèdent un noyau.

L'accès à l'information génétique via le séquençage de l'ADN et l'ARN est une autre révolution. En 1970, Carl Woese et George Fox proposent sur base de la comparaison des ARN ribosomiques 16S une classification en 2 empires; procaryotes et eucaryotes et 6 règnes : eubactéries, archéobactéries, protistes (unicellulaires), champignons (fungi),

plantes et animaux. En 1990, ils proposent également d'ajouter un niveau supérieur, le domaine. Comme le montre l'arbre phylogénétique présenté en Figure A.3, le monde vivant est alors divisé en 3 domaines : bactéries, archées et eucaryotes.

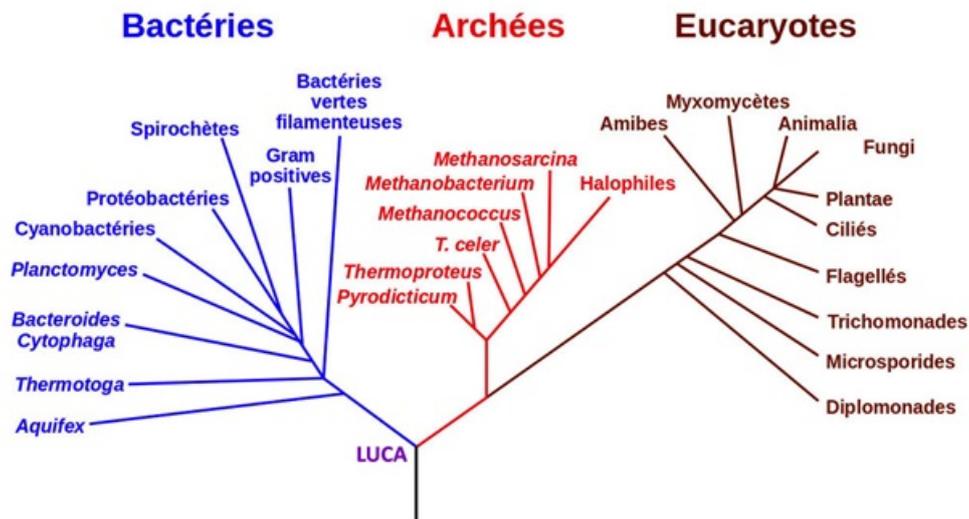


FIGURE A.3 – Arbre phylogénétique adapté de Woese et al. 1990

Née en Europe, la fédération *Species 2000* est composée d'un ensemble de taxonomistes dispersés à travers le monde. *Species 2000* collabore depuis 2001 avec l'organisation *Integrated taxonomic information system (ITIS)* afin de recenser toutes les espèces connues dans une base de données appelée *Catalogue of life (CoL)* [15]. Un peu plus de 1,6 million d'espèces ont déjà été listées à ce jour. Cette énorme masse de données nécessite un système de classement consensuel afin de stocker et de retrouver facilement les informations pertinentes [12]. En 2015, Ruggiero et al. [14] proposent un système de classification formé de 2 empires (procaryotes, eucaryotes) et 7 règnes : bactéries, archées, protozoaires, chromistes, fungi, plantes et animaux. Cette mégaclassification, présentée à la Figure 2.2, marque une étape importante du projet *Catalogue of life* car les auteurs ont opté pour une classification plus évolutionniste qui autorise les groupes paraphylétiques, c'est-à-dire excluant les descendants qui ont trop divergé [12].

En pratique, cette classification est moins instable, car elle est moins dépendante des hypothèses fluctuantes concernant la structure exacte de l'arbre du vivant [228]. En effet, quel que soit l'ordre exact des ramifications menant aux différentes espèces, les groupes fondés à la fois sur une ascendance commune et une similarité morphologique resteront stables [12]. La taxonomie et la phylogénétique, grâce aux avancées technologiques et aux informations qu'elles permettent d'obtenir, sont donc des domaines toujours en évolution.

Annexe B

Analyses métagénomiques

B.1 Métagénomique globale

La métagénomique globale, ou Shotgun sequencing, traite la totalité de l'ADN présent dans un échantillon comme illustré à la Figure B.1. Les ADNs présents sont dans un premier temps fragmentés puis séquencés. Les séquences (ou reads) obtenues sont finalement réassemblées bioinformatiquement afin de reconstruire les génomes d'origine des micro-organismes.

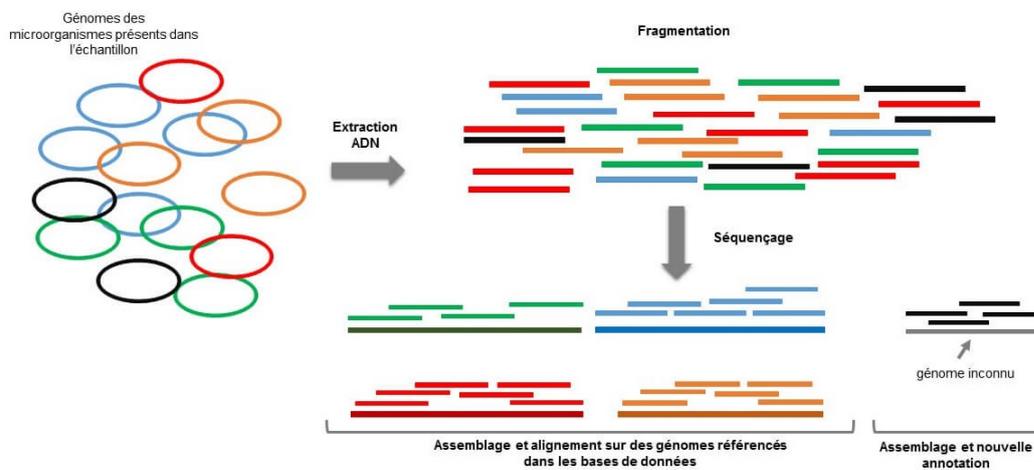


FIGURE B.1 – Shotgun sequencing -la totalité des séquences ADN présentes dans l'échantillon est traitée [24]

B.2 Métagénomique ciblée sur amplicon

La métagénomique ciblée sur amplicon, ou Metabarcoding, traite un ou parfois plusieurs gènes particuliers au lieu des génomes complets comme illustré à la Figure B.2. Ces gènes, appelés barcodes ou étiquettes, doivent être communs à un grand nombre d'espèces tout en présentant des régions suffisamment variables afin de différencier les espèces entre elles. Après plusieurs étapes bioinformatiques de filtrage et nettoyage des reads obtenus après séquençage, il faut assigner à chaque séquence le nom du micro-organisme.

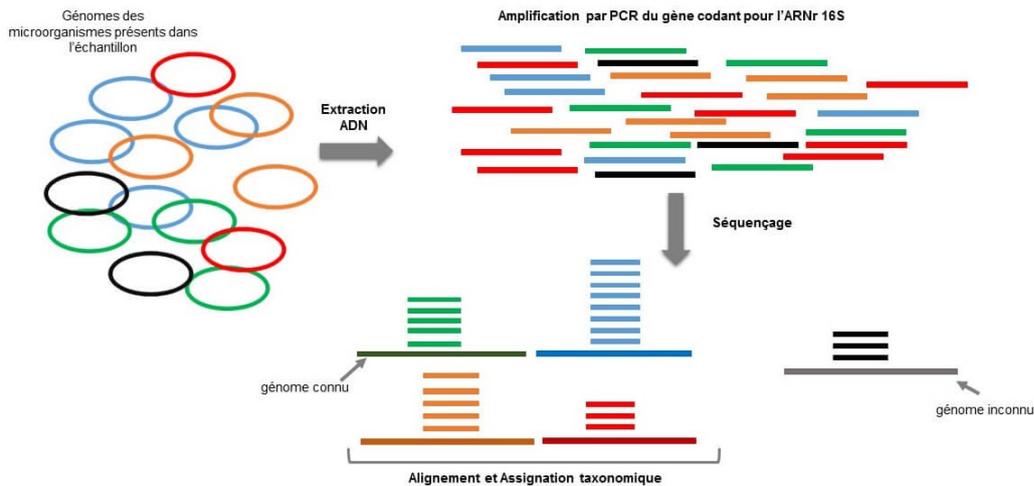


FIGURE B.2 – Metabarcoding - un gène particulier est ciblé et séquençé [24]

B.3 Assignment taxonomique

Il existe deux possibilités d'assignment taxonomique : la stratégie close-reference ou la stratégie de novo.

Avec la stratégie close-reference, les reads obtenus sont alignés et comparés aux séquences microbiologiques référencées dans une ou plusieurs bases de données. Lorsqu'un read est similaire à 97 % à une séquence de référence, il est assigné au micro-organisme à qui appartient cette séquence de référence. Cette stratégie est rapide, mais l'inconvénient est que les reads non assignés, c'est-à-dire qui ne correspondent à aucune séquence de référence, sont ignorés.

Avec la stratégie de novo, les reads obtenus sont premièrement comparés entre-eux et regroupés par similarité pour former des clusters. Pour chaque cluster, une séquence consensus est choisie. L'ensemble des séquences consensus est ensuite comparées aux séquences d'une base de données pour être assignées à un micro-organisme. Les séquences consensus non assignées restent alors comme une espèce inconnue.

Une fois l'assignation taxonomique réalisée, le comptage du nombre d'espèces présentes, mais également leur abondance dans chaque échantillon, est réalisé afin de construire la table des OTU (unité taxonomique opérationnelle). L'outil bioinformatique est à nouveau indispensable, car il permet de trier les données, de constituer les bases de référence, d'assigner les séquences aux taxons via ces bases, de définir et gérer des listes de tags reconnaissances.

B.4 La table des OTU

La table des OTU est un tableau à double entrée contenant le nombre de séquences, appelé abondance, obtenu par OTU et par échantillon. Ces abondances absolues sont normalisées afin de rendre les échantillons comparables. La méthode de normalisation la plus courante est l'utilisation des pourcentages. La Figure B.3 présente un exemple simplifié de table d'OTU utilisant les pourcentages comme méthode de normalisation.

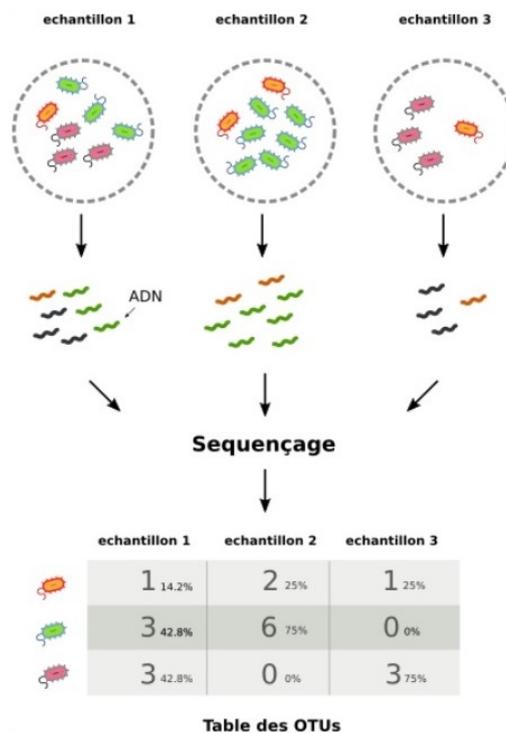


FIGURE B.3 – Exemple de table d'OTU utilisant les pourcentages comme méthode de normalisation [20]

Annexe C

Qualité de l'air

C.1 France - Classification suivant les concentrations moyennes en radon en Bq.m³

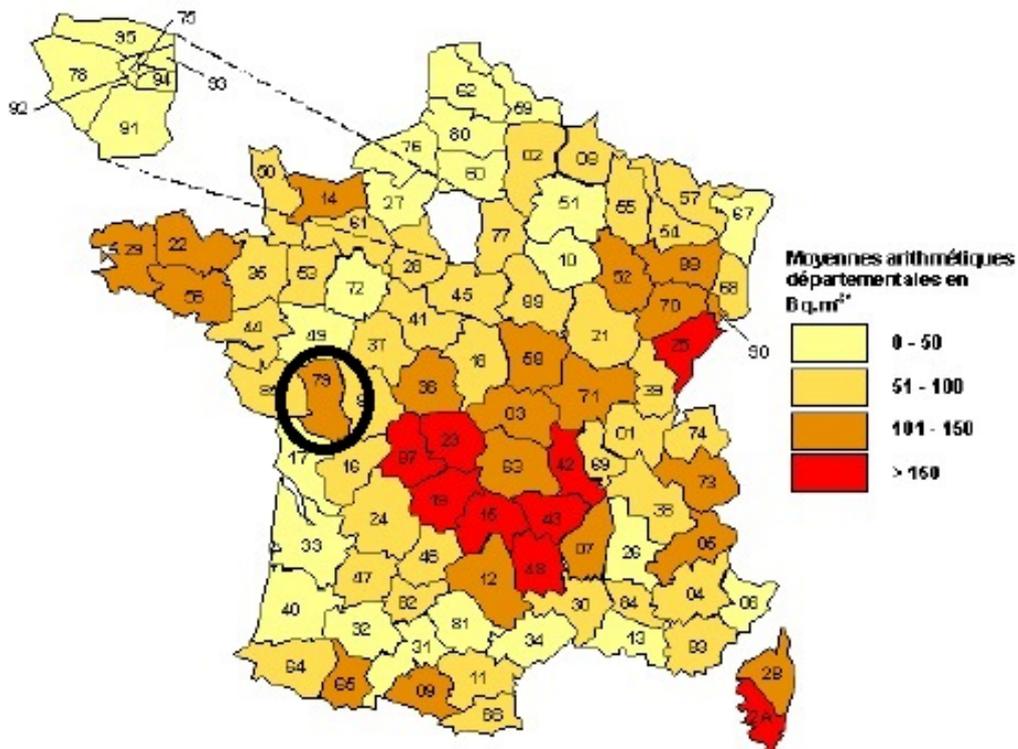


FIGURE C.1 – France - Classification suivant les concentrations moyennes en radon [1]

C.2 Impact éco-énergétique et sanitaire d'un puits canadien sur une habitation ossature bois - TFE M.Jellad

	Dates	Air extérieur		T° sortie puits	T° sol	Air intérieur	
		T° [°C]	HR [%]	[°C]	[°C]	T° [°C]	HR [%]
Test 1	17/03/2011	7	39	9	8,2	14	38
Test 2	26/04/2011	23,7	27	11,9	11,9	24,4	33,1
Test 3	17/05/2011	21	40	16,5	13	21,7	40
Test 4	31/05/2011	16,7	47	15,5	14	19	46

FIGURE C.2 – Dates et conditions des tests [3]

	Germes totaux à 22°C [NPP Coll./m³]				Germes totaux à 30°C [NPP Coll./m³]			
	NE	Réf ext.	Ch. Visite	Local technique	NE	Réf ext.	Ch. Visite	Local technique
Test 1	<13	314	259	341	<13	206	114	369
Test 2	<13	691	980	369	<13	206	127	246
Test 3	<13	645	1.793	76	<13	193	411	13

FIGURE C.3 – Résultats des prélèvements avec l'aérobiocollecteur [3]

		Ref. ext	Ch. de visite	Loc. tech.
Test 1	Charge [PNC/100l]	1	0	0
	Aspergillus fumigatus	1		
	Mucorale	1		
Test 2	Charge [PNC/100l]	0	3	1
	Aspergillus fumigatus	0	3	1
Test 3	Charge [PNC/100l]	0	2	1
	Aspergillus fumigatus	0	0	1
	Mucorale	0	2	0
Test 4	Charge [PNC/100l]	2	1	0
	Aspergillus fumigatus	2	1	0

FIGURE C.4 – Résultats des prélèvements avec le RCS high flow - incubation à 46 °C [3]

		Réf. Ext.	Ch. de visite	Loc. tech.
Test 1	Charge [PNC/100]	16	35	31
	Cladosporium sp.	+	+	+
	Aspergillus sp.	+	+	+
	Penicilium sp.	+	++	++
Test 2	Charge [PNC/100]	48	32	13
	Cladosporium sp.	++		+
	Cladosporium herbarum	++	++	
	Ulocladium sp		+	
	Penicilium sp.		+	+
Test 3	Charge [PNC/100]	76	66	6
	Cladosporium sp.	++	++	+
	Penicilium sp.		+	+
Test 4	Charge [PNC/100]	>300	133	18
	Cladosporium sp.	+++	++	+
	Aspergillus sp.		+	
	Penicilium sp.			+
	Levures	+	+	+

FIGURE C.5 – Résultats des prélèvements avec le RCS high flow - incubation à 20 °C [3]

Annexe D

Caractéristiques de l'installation étudiée

D.1 Schéma de principe du puits canadien du département des sciences et technologies de la HEH

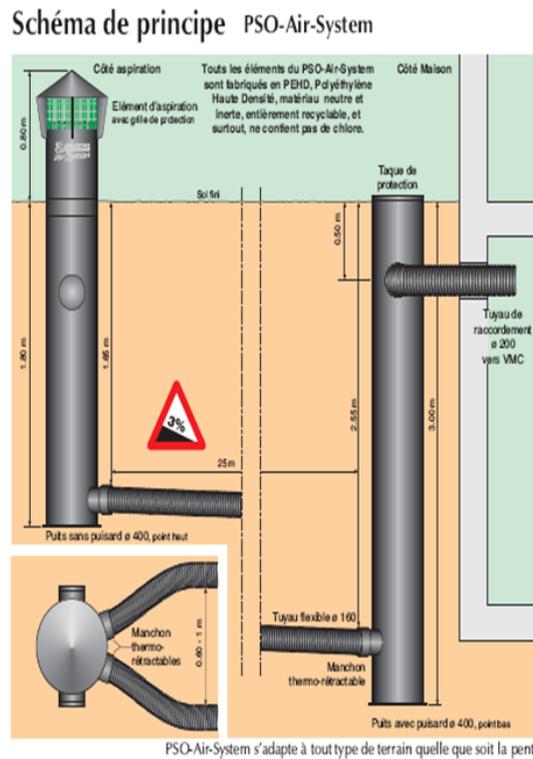


FIGURE D.1 – Schéma de principe de l'installation étudiée

D.2 Type de sol du site étudié

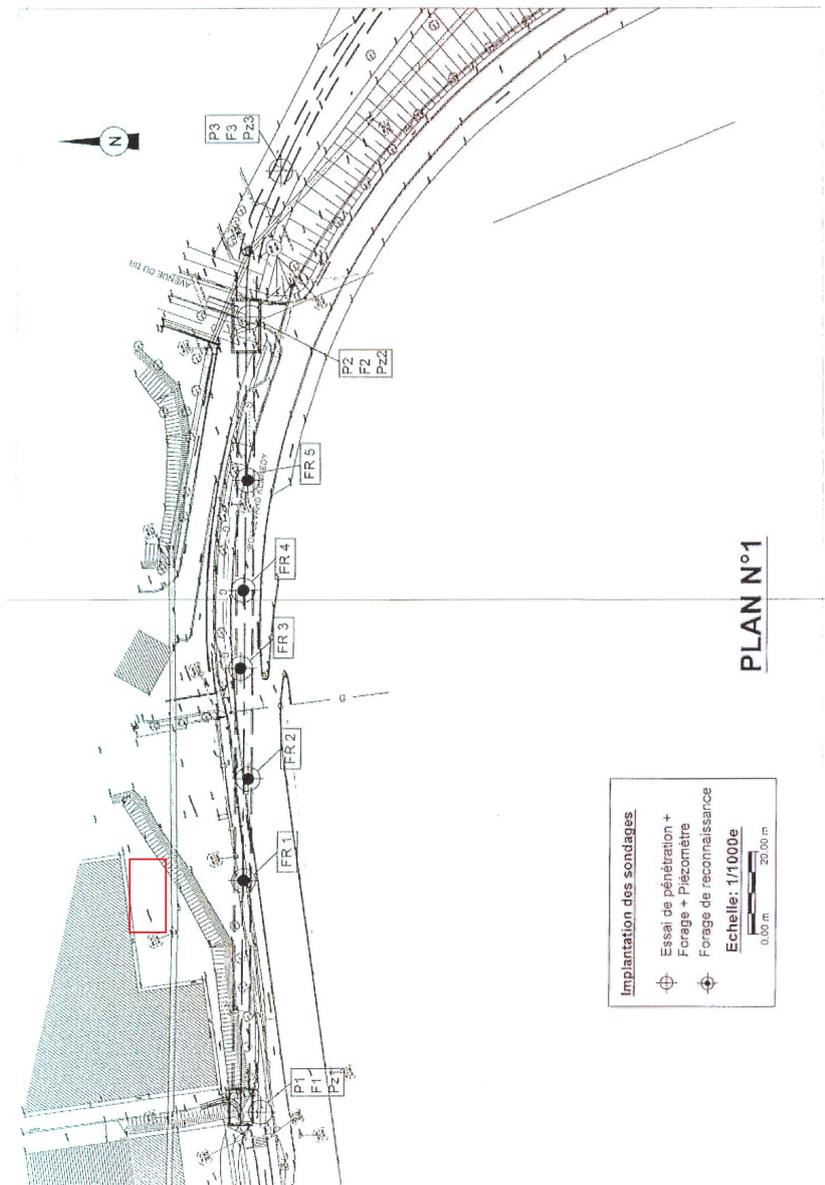


FIGURE D.2 – Implantation des sondages et forages de la campagne géotechnique de l'INISMA [25]

La zone apparaissant en rouge sur la Figure D.2 est celle où se situe le puits canadien.

Annexe E

Plan optimisé - analyse paramétrique de l'algorithme de résolution de la partie horizontale du puits

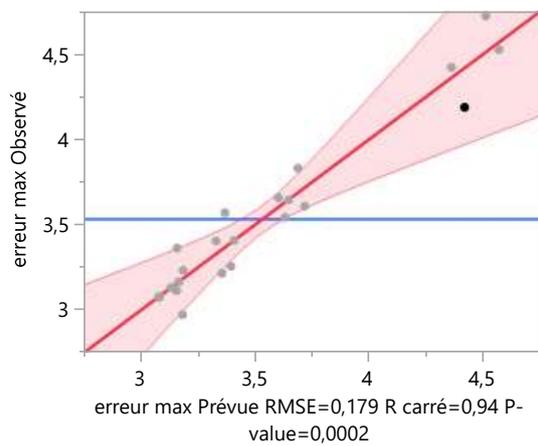
Ajustement des moindres carrés

Résumé des effets

Source	LogWorth	P-value
cond ZNS(0,35,0,9)	17,262	0,00000
cond ZNS*profondeur	5,975	0,00000
cond ZS(1,3,3,65)	5,774	0,00000
cond ZNS*cond ZS	4,663	0,00002
capacité ZS(930,1540)	3,820	0,00015
capacité ZNS*rho ZNS	3,631	0,00023
capacité ZNS(750,850)	2,505	0,00313 ^
cond ZNS*rho ZNS	2,328	0,00470
rho ZNS(1650,2100)	1,882	0,01311 ^
cond ZNS*capacité ZNS	1,273	0,05338
profondeur(2,3)	0,949	0,11238 ^
rho ZNS*profondeur	0,487	0,32618
capacité ZNS*profondeur	0,464	0,34390
rho ZS(1900,2200)	0,425	0,37599

Réponse erreur max

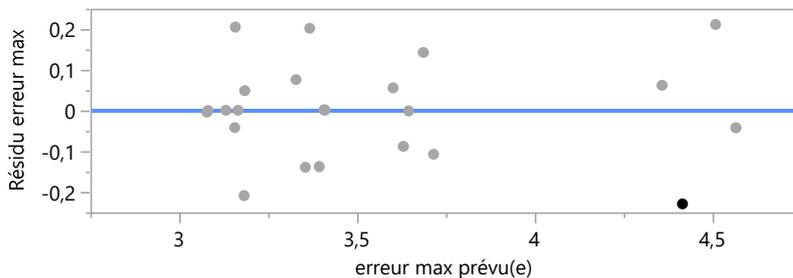
Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues



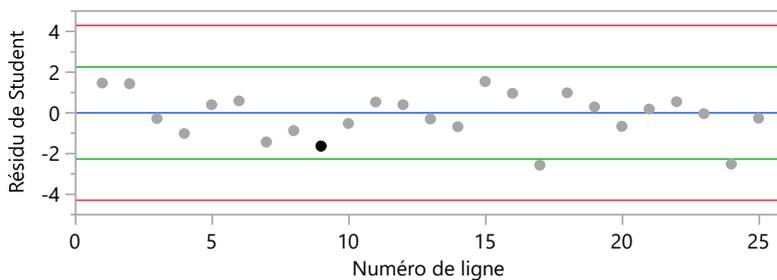
Ajustement des moindres carrés

Réponse erreur max

Graphique des résidus en fonction des valeurs prévues



Résidus de Student



Résidus studentisés externes avec limites simultanées de 95 % (Bonferroni) en rouge, limites individuelles en vert.

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	3,4722356	0,08509	40,81	<,0001*
cond ZNS(0,35,0,9)	0,0680177	0,105265	0,65	0,5327
capacité ZNS(750,850)	-0,073326	0,125366	-0,58	0,5716
rho ZNS(1650,2100)	-0,265759	0,141792	-1,87	0,0904
profondeur(2,3)	-0,036231	0,154561	-0,23	0,8194
cond ZS(1,3,3,65)	0,1984788	0,089801	2,21	0,0515
capacité ZS(930,1540)	-0,176819	0,086958	-2,03	0,0694
rho ZS(1900,2200)	-0,175441	0,195554	-0,90	0,3907
cond ZNS*capacité ZNS	0,4263159	0,553543	0,77	0,4590
cond ZNS*rho ZNS	-0,85724	1,060243	-0,81	0,4376
cond ZNS*profondeur	-0,034172	0,006154	-5,55	0,0002*
cond ZNS*cond ZS	0,1890159	0,059627	3,17	0,0100*
capacité ZNS*rho ZNS	-0,05158	0,022256	-2,32	0,0429*
capacité ZNS*profondeur	-0,407048	0,409718	-0,99	0,3439
rho ZNS*profondeur	0,7956924	0,770677	1,03	0,3262

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
cond ZNS(0,35,0,9)	1	1	0,01338262	0,4175	0,5327
capacité ZNS(750,850)	1	1	0,01096529	0,3421	0,5716
rho ZNS(1650,2100)	1	1	0,11259900	3,5129	0,0904
profondeur(2,3)	1	1	0,00176122	0,0549	0,8194
cond ZS(1,3,3,65)	1	1	0,15657953	4,8851	0,0515
capacité ZS(930,1540)	1	1	0,13252594	4,1346	0,0694
rho ZS(1900,2200)	1	1	0,02579831	0,8049	0,3907
cond ZNS*capacité ZNS	1	1	0,01901188	0,5931	0,4590
cond ZNS*rho ZNS	1	1	0,02095360	0,6537	0,4376
cond ZNS*profondeur	1	1	0,98824257	30,8318	0,0002*
cond ZNS*cond ZS	1	1	0,32209316	10,0489	0,0100*
capacité ZNS*rho ZNS	1	1	0,17216849	5,3714	0,0429*

Ajustement des moindres carrés

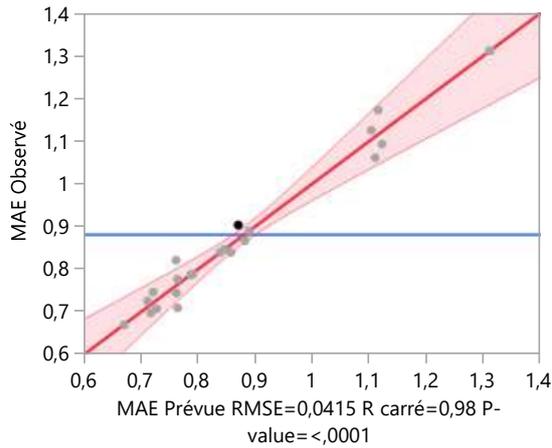
Réponse erreur max

Tests des effets

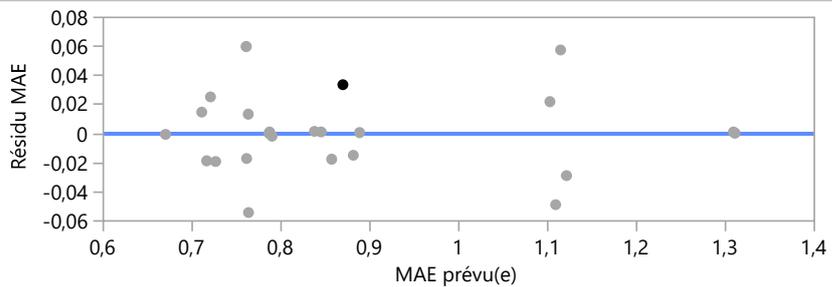
Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
capacité ZNS*profondeur	1	1	0,03163644	0,9870	0,3439
rho ZNS*profondeur	1	1	0,03416731	1,0660	0,3262

Réponse MAE

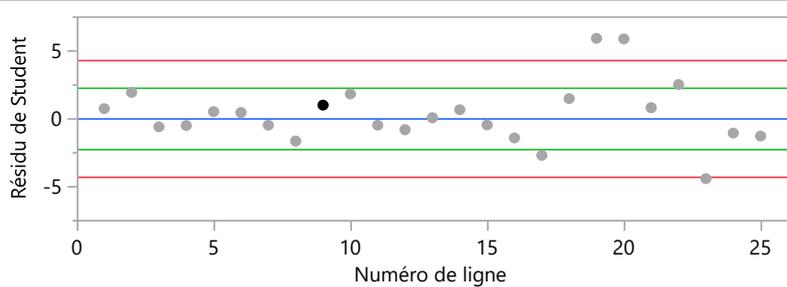
Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues



Graphique des résidus en fonction des valeurs prévues



Résidus de Student



Résidus studentisés externes avec limites simultanées de 95 % (Bonferroni) en rouge, limites individuelles en vert.

Estimations des coefficients

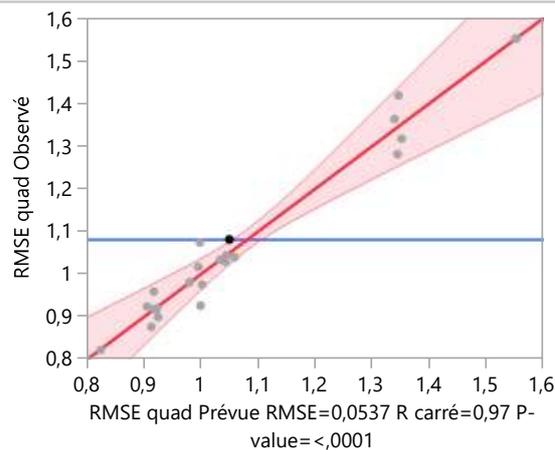
Terme	Estimation	Erreur		Prob. > t
		standard	t ratio	
Constante	0,9875413	0,019739	50,03	<,0001*
cond ZNS(0,35,0,9)	0,2195344	0,02442	8,99	<,0001*
capacité ZNS(750,850)	-0,101407	0,029083	-3,49	0,0059*
rho ZNS(1650,2100)	-0,084761	0,032893	-2,58	0,0276*
profondeur(2,3)	0,0624097	0,035855	1,74	0,1124

Ajustement des moindres carrés**Réponse MAE****Estimations des coefficients**

Terme	Estimation	Erreur		Prob. > t
		standard	t ratio	
cond ZS(1,3,3,65)	0,1025235	0,020832	4,92	0,0006*
capacité ZS(930,1540)	-0,033329	0,020173	-1,65	0,1295
rho ZS(1900,2200)	0,0420323	0,045365	0,93	0,3760
cond ZNS*capacité ZNS	-0,049377	0,128412	-0,38	0,7086
cond ZNS*rho ZNS	0,0958918	0,245957	0,39	0,7048
cond ZNS*profondeur	0,0070463	0,001428	4,94	0,0006*
cond ZNS*cond ZS	0,0626356	0,013832	4,53	0,0011*
capacité ZNS*rho ZNS	-0,012217	0,005163	-2,37	0,0395*
capacité ZNS*profondeur	0,0767963	0,095047	0,81	0,4379
rho ZNS*profondeur	-0,146265	0,178783	-0,82	0,4324

Tests des effets

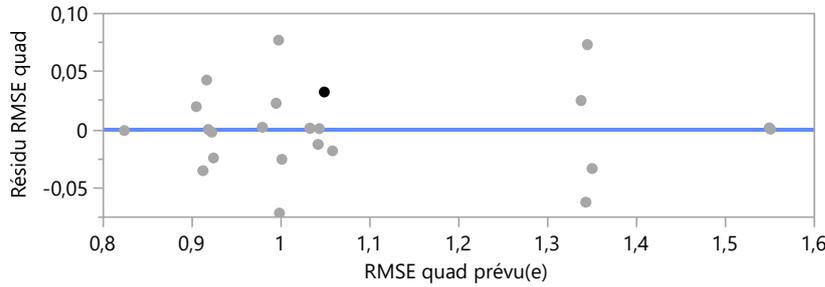
Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
cond ZNS(0,35,0,9)	1	1	0,13941271	80,8219	<,0001*
capacité ZNS(750,850)	1	1	0,02097184	12,1580	0,0059*
rho ZNS(1650,2100)	1	1	0,01145388	6,6402	0,0276*
profondeur(2,3)	1	1	0,00522597	3,0297	0,1124
cond ZS(1,3,3,65)	1	1	0,04177860	24,2203	0,0006*
capacité ZS(930,1540)	1	1	0,00470860	2,7297	0,1295
rho ZS(1900,2200)	1	1	0,00148080	0,8585	0,3760
cond ZNS*capacité ZNS	1	1	0,00025504	0,1479	0,7086
cond ZNS*rho ZNS	1	1	0,00026219	0,1520	0,7048
cond ZNS*profondeur	1	1	0,04201819	24,3592	0,0006*
cond ZNS*cond ZS	1	1	0,03536940	20,5047	0,0011*
capacité ZNS*rho ZNS	1	1	0,00965805	5,5991	0,0395*
capacité ZNS*profondeur	1	1	0,00112610	0,6528	0,4379
rho ZNS*profondeur	1	1	0,00115452	0,6693	0,4324

Réponse RMSE quad**Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues**

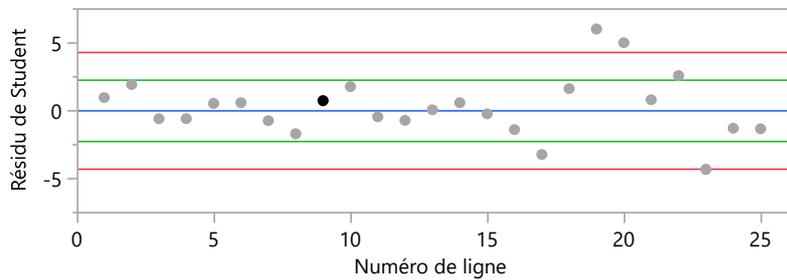
Ajustement des moindres carrés

Réponse RMSE quad

Graphique des résidus en fonction des valeurs prévues



Résidus de Student



Résidus studentisés externes avec limites simultanées de 95 % (Bonferroni) en rouge, limites individuelles en vert.

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	1,2051632	0,02552	47,22	<,0001*
cond ZNS(0,35,0,9)	0,2076344	0,031571	6,58	<,0001*
capacité ZNS(750,850)	-0,13702	0,037599	-3,64	0,0045*
rho ZNS(1650,2100)	-0,127888	0,042526	-3,01	0,0132*
profondeur(2,3)	0,0711279	0,046355	1,53	0,1559
cond ZS(1,3,3,65)	0,1537908	0,026933	5,71	0,0002*
capacité ZS(930,1540)	-0,058816	0,02608	-2,26	0,0478*
rho ZS(1900,2200)	0,0411922	0,05865	0,70	0,4985
cond ZNS*capacité ZNS	-0,01509	0,166016	-0,09	0,9294
cond ZNS*rho ZNS	0,0240942	0,317983	0,08	0,9411
cond ZNS*profondeur	0,0073971	0,001846	4,01	0,0025*
cond ZNS*cond ZS	0,0813023	0,017883	4,55	0,0011*
capacité ZNS*rho ZNS	-0,019321	0,006675	-2,89	0,0160*
capacité ZNS*profondeur	0,0569006	0,12288	0,46	0,6532
rho ZNS*profondeur	-0,108462	0,231137	-0,47	0,6490

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
cond ZNS(0,35,0,9)	1	1	0,12470839	43,2548	<,0001*
capacité ZNS(750,850)	1	1	0,03828897	13,2804	0,0045*
rho ZNS(1650,2100)	1	1	0,02607465	9,0439	0,0132*
profondeur(2,3)	1	1	0,00678801	2,3544	0,1559
cond ZS(1,3,3,65)	1	1	0,09400860	32,6067	0,0002*
capacité ZS(930,1540)	1	1	0,01466321	5,0859	0,0478*
rho ZS(1900,2200)	1	1	0,00142220	0,4933	0,4985
cond ZNS*capacité ZNS	1	1	0,00002382	0,0083	0,9294
cond ZNS*rho ZNS	1	1	0,00001655	0,0057	0,9411
cond ZNS*profondeur	1	1	0,04630589	16,0611	0,0025*
cond ZNS*cond ZS	1	1	0,05959237	20,6695	0,0011*
capacité ZNS*rho ZNS	1	1	0,02415696	8,3788	0,0160*

Ajustement des moindres carrés

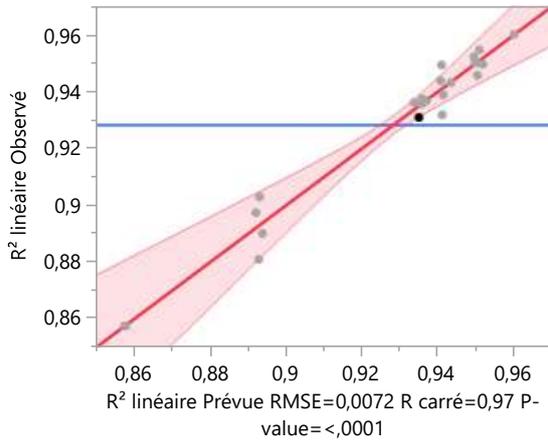
Réponse RMSE quad

Tests des effets

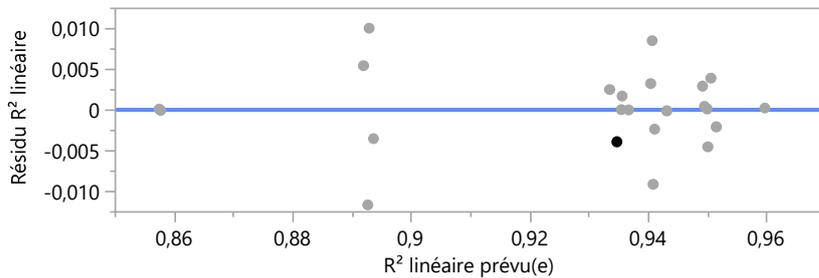
Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
capacité ZNS*profondeur	1	1	0,00061820	0,2144	0,6532
rho ZNS*profondeur	1	1	0,00063486	0,2202	0,6490

Réponse R² linéaire

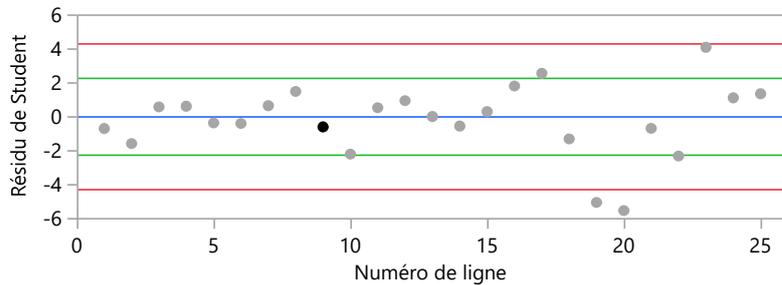
Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues



Graphique des résidus en fonction des valeurs prévues



Résidus de Student



Résidus studentisés externes avec limites simultanées de 95 % (Bonferroni) en rouge, limites individuelles en vert.

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur		Prob. > t
		standard	t ratio	
Constante	0,9102713	0,00344	264,60	<,0001*
cond ZNS(0,35,0,9)	-0,033168	0,004256	-7,79	<,0001*
capacité ZNS(750,850)	0,019598	0,005069	3,87	0,0031*
rho ZNS(1650,2100)	0,0172568	0,005733	3,01	0,0131*
profondeur(2,3)	-0,009412	0,006249	-1,51	0,1630

Ajustement des moindres carrés**Réponse R² linéaire****Estimations des coefficients**

Terme	Estimation	Erreur		Prob. > t
		standard	t ratio	
cond ZS(1,3,3,65)	-0,022996	0,003631	-6,33	<,0001*
capacité ZS(930,1540)	0,0087671	0,003516	2,49	0,0318*
rho ZS(1900,2200)	-0,006189	0,007906	-0,78	0,4519
cond ZNS*capacité ZNS	0,002343	0,02238	0,10	0,9187
cond ZNS*rho ZNS	-0,004866	0,042866	-0,11	0,9119
cond ZNS*profondeur	-0,001128	0,000249	-4,53	0,0011*
cond ZNS*cond ZS	-0,009668	0,002411	-4,01	0,0025*
capacité ZNS*rho ZNS	0,0026606	0,0009	2,96	0,0144*
capacité ZNS*profondeur	-0,007214	0,016565	-0,44	0,6724
rho ZNS*profondeur	0,0138089	0,031159	0,44	0,6671

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
cond ZNS(0,35,0,9)	1	1	0,00318224	60,7372	<,0001*
capacité ZNS(750,850)	1	1	0,00078330	14,9503	0,0031*
rho ZNS(1650,2100)	1	1	0,00047477	9,0616	0,0131*
profondeur(2,3)	1	1	0,00011885	2,2683	0,1630
cond ZS(1,3,3,65)	1	1	0,00210182	40,1160	<,0001*
capacité ZS(930,1540)	1	1	0,00032580	6,2184	0,0318*
rho ZS(1900,2200)	1	1	0,00003210	0,6127	0,4519
cond ZNS*capacité ZNS	1	1	0,00000057	0,0110	0,9187
cond ZNS*rho ZNS	1	1	0,00000068	0,0129	0,9119
cond ZNS*profondeur	1	1	0,00107616	20,5398	0,0011*
cond ZNS*cond ZS	1	1	0,00084266	16,0833	0,0025*
capacité ZNS*rho ZNS	1	1	0,00045809	8,7433	0,0144*
capacité ZNS*profondeur	1	1	0,00000994	0,1897	0,6724
rho ZNS*profondeur	1	1	0,00001029	0,1964	0,6671

Ajustement des moindres carrés

Réponse biais

Estimations des coefficients

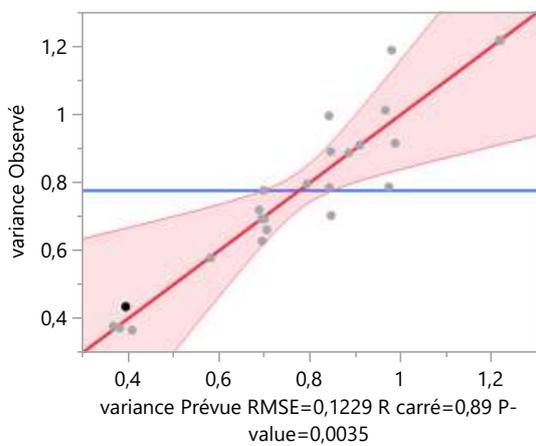
Terme	Estimation	Erreur		t ratio	Prob. > t
		standard			
Constante	0,3535674	0,004265		82,90	<,0001*
cond ZNS(0,35,0,9)	0,7718667	0,005276		146,29	<,0001*
capacité ZNS(750,850)	0,0201737	0,006284		3,21	0,0093*
rho ZNS(1650,2100)	0,0105555	0,007107		1,49	0,1683
profondeur(2,3)	-0,011969	0,007747		-1,54	0,1534
cond ZS(1,3,3,65)	-0,044735	0,004501		-9,94	<,0001*
capacité ZS(930,1540)	0,0257062	0,004359		5,90	0,0002*
rho ZS(1900,2200)	-0,001038	0,009802		-0,11	0,9178
cond ZNS*capacité ZNS	-0,060749	0,027745		-2,19	0,0534
cond ZNS*rho ZNS	0,1922749	0,053142		3,62	0,0047*
cond ZNS*profondeur	0,0032236	0,000308		10,45	<,0001*
cond ZNS*cond ZS	-0,022283	0,002989		-7,46	<,0001*
capacité ZNS*rho ZNS	0,0062256	0,001116		5,58	0,0002*
capacité ZNS*profondeur	0,0095429	0,020536		0,46	0,6521
rho ZNS*profondeur	-0,02147	0,038628		-0,56	0,5906

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
cond ZNS(0,35,0,9)	1	1	1,7233830	21401,79	<,0001*
capacité ZNS(750,850)	1	1	0,0008300	10,3073	0,0093*
rho ZNS(1650,2100)	1	1	0,0001776	2,2059	0,1683
profondeur(2,3)	1	1	0,0001922	2,3868	0,1534
cond ZS(1,3,3,65)	1	1	0,0079543	98,7799	<,0001*
capacité ZS(930,1540)	1	1	0,0028010	34,7846	0,0002*
rho ZS(1900,2200)	1	1	9,03174e-7	0,0112	0,9178
cond ZNS*capacité ZNS	1	1	0,0003860	4,7941	0,0534
cond ZNS*rho ZNS	1	1	0,0010541	13,0908	0,0047*
cond ZNS*profondeur	1	1	0,0087941	109,2088	<,0001*
cond ZNS*cond ZS	1	1	0,0044763	55,5883	<,0001*
capacité ZNS*rho ZNS	1	1	0,0025082	31,1476	0,0002*
capacité ZNS*profondeur	1	1	0,0000174	0,2159	0,6521
rho ZNS*profondeur	1	1	0,0000249	0,3089	0,5906

Réponse variance

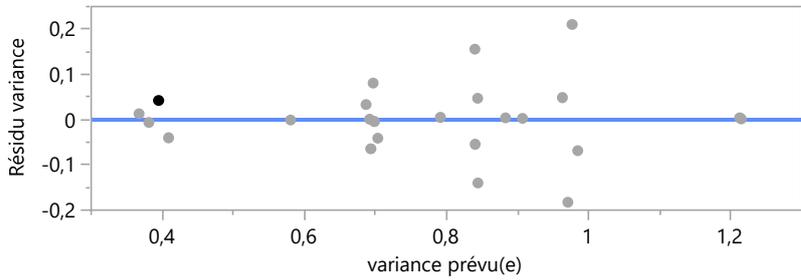
Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues



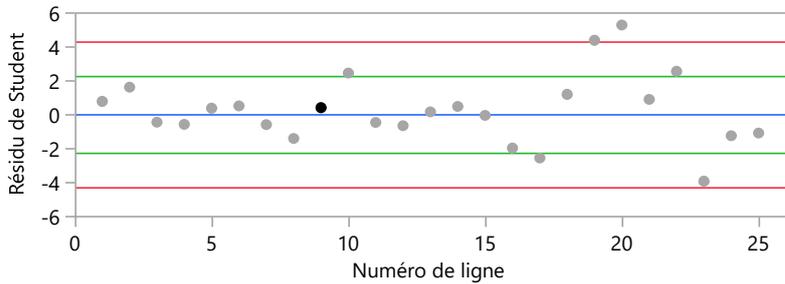
Ajustement des moindres carrés

Réponse variance

Graphique des résidus en fonction des valeurs prévues



Résidus de Student



Résidus studentisés externes avec limites simultanées de 95 % (Bonferroni) en rouge, limites individuelles en vert.

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur		
		standard	t ratio	Prob. > t
Constante	0,9779287	0,058395	16,75	<,0001*
cond ZNS(0,35,0,9)	0,1281232	0,072241	1,77	0,1065
capacité ZNS(750,850)	-0,131327	0,086036	-1,53	0,1579
rho ZNS(1650,2100)	-0,134374	0,097309	-1,38	0,1974
profondeur(2,3)	0,0638301	0,106073	0,60	0,5607
cond ZS(1,3,3,65)	0,1153996	0,061628	1,87	0,0906
capacité ZS(930,1540)	-0,028451	0,059678	-0,48	0,6438
rho ZS(1900,2200)	0,0547691	0,134205	0,41	0,6918
cond ZNS*capacité ZNS	-0,060691	0,379886	-0,16	0,8763
cond ZNS*rho ZNS	0,1127868	0,727624	0,16	0,8799
cond ZNS*profondeur	0,0150727	0,004224	3,57	0,0051*
cond ZNS*cond ZS	0,0466111	0,040921	1,14	0,2812
capacité ZNS*rho ZNS	-0,016084	0,015274	-1,05	0,3171
capacité ZNS*profondeur	0,0862249	0,281181	0,31	0,7654
rho ZNS*profondeur	-0,172986	0,5289	-0,33	0,7504

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
cond ZNS(0,35,0,9)	1	1	0,04748456	3,1455	0,1065
capacité ZNS(750,850)	1	1	0,03517306	2,3299	0,1579
rho ZNS(1650,2100)	1	1	0,02878647	1,9069	0,1974
profondeur(2,3)	1	1	0,00546655	0,3621	0,5607
cond ZS(1,3,3,65)	1	1	0,05293165	3,5063	0,0906
capacité ZS(930,1540)	1	1	0,00343106	0,2273	0,6438
rho ZS(1900,2200)	1	1	0,00251421	0,1665	0,6918
cond ZNS*capacité ZNS	1	1	0,00038531	0,0255	0,8763
cond ZNS*rho ZNS	1	1	0,00036272	0,0240	0,8799
cond ZNS*profondeur	1	1	0,19226411	12,7359	0,0051*
cond ZNS*cond ZS	1	1	0,01958678	1,2975	0,2812
capacité ZNS*rho ZNS	1	1	0,01674010	1,1089	0,3171

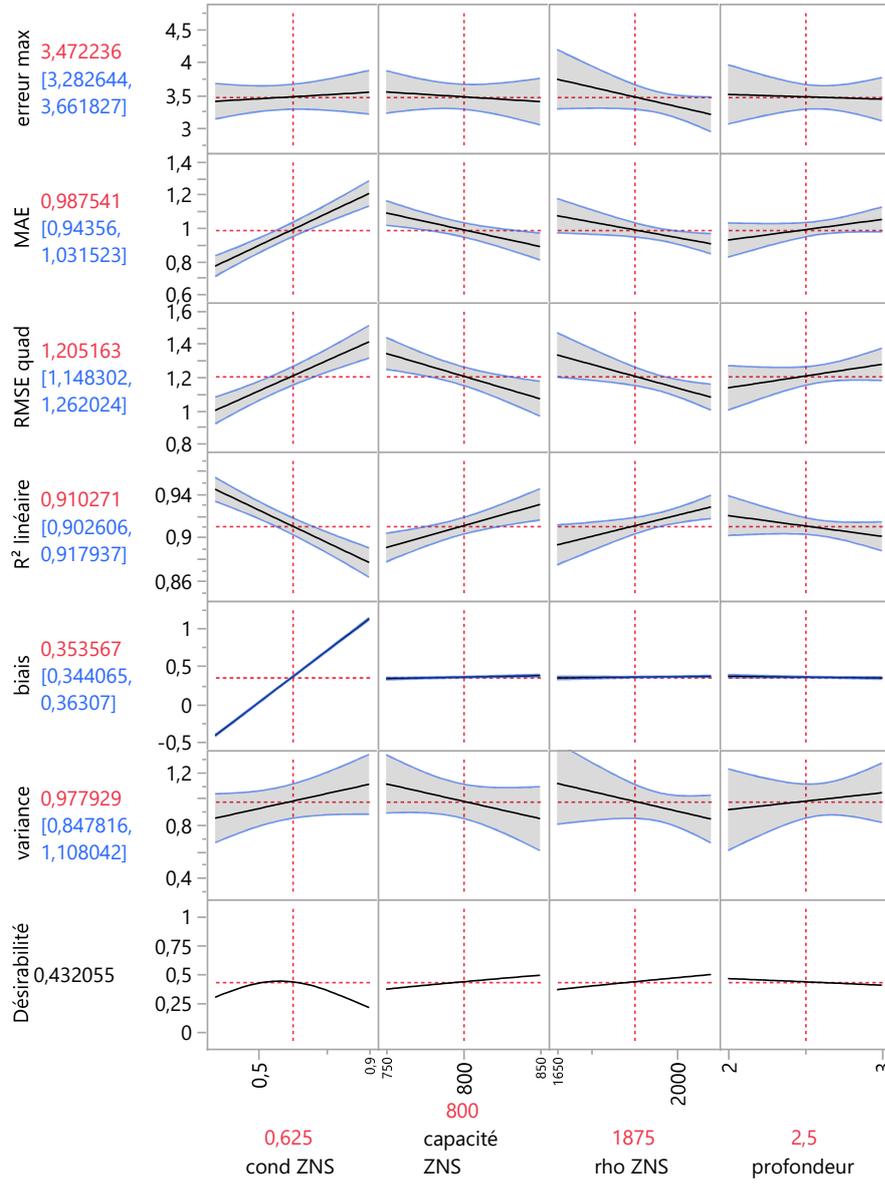
Ajustement des moindres carrés

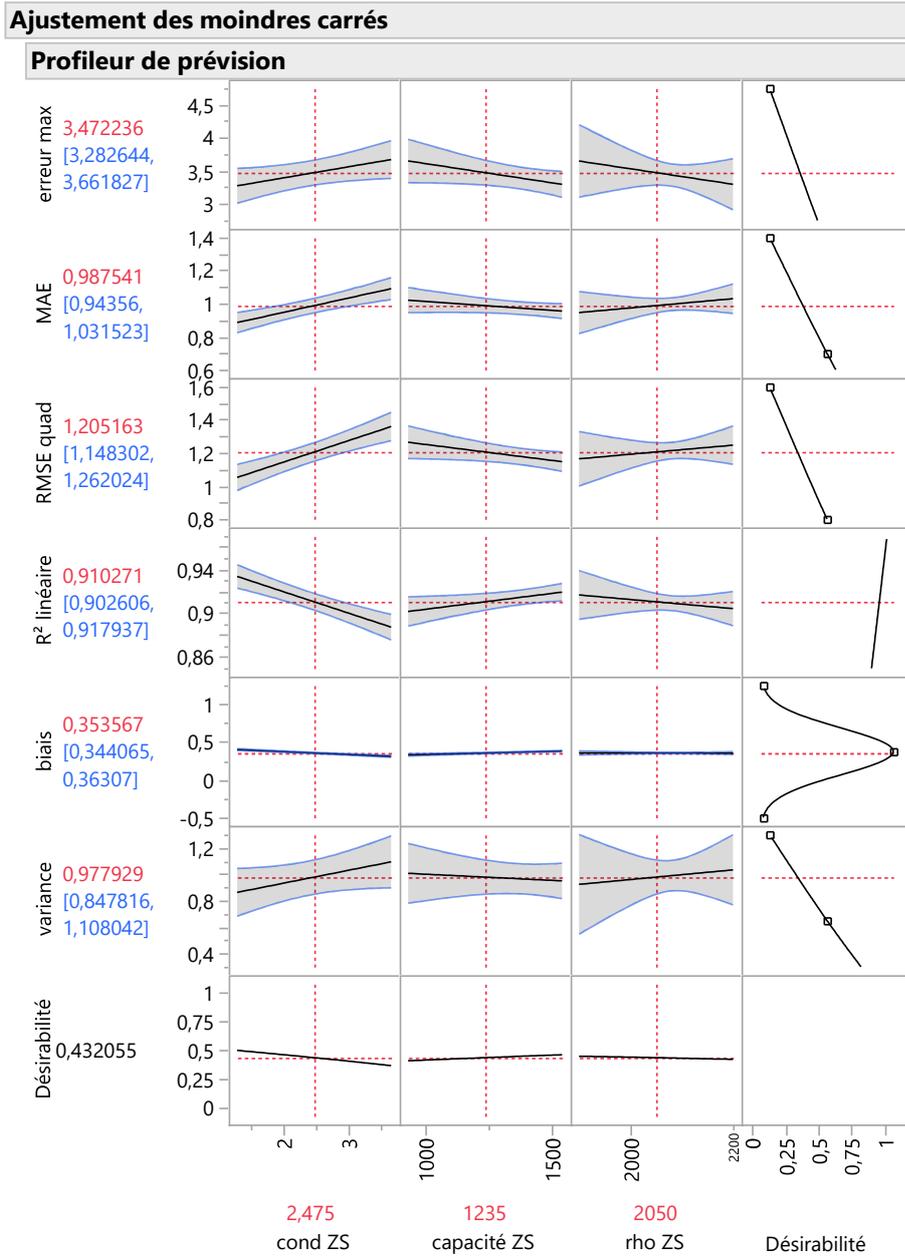
Réponse variance

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
capacité ZNS*profondeur	1	1	0,00141958	0,0940	0,7654
rho ZNS*profondeur	1	1	0,00161488	0,1070	0,7504

Profilleur de prévision





Annexe F

Campagnes 1 et 2 - Résultats du comptage des colonies

Campagne 1						
	Bactérie [CFU.m ⁻³]			Fungi [CFU.m ⁻³]		
	Extérieur	Sortie Puits	Intérieur	Extérieur	Sortie Puits	Intérieur
20 °C	275	69	21	306	290	108
	281	74	88	375	330	100
	284	74	101	298	353	182
30 °C	185	70	33	284	358	114
	153	89	54	244	325	54
	170	42	23	254	260	101

Campagne 2						
	Bactérie [CFU.m ⁻³]			Fungi [CFU.m ⁻³]		
	Extérieur	Sortie Puits	Intérieur	Extérieur	Sortie Puits	Intérieur
20 °C	96	29	20	117	114	78
	101	55	57	116	61	42
	88	52	30	98	123	39
30 °C	137	30	108	63	38	80
	100	35	57	213	37	89
	116	27	58	88	28	78

FIGURE F.1 – Résultats du comptage des colonies pour les campagnes 1 et 2