

Analyse du risque sanitaire provoqué par l'utilisation d'un échangeur air-sol (EAHE)

Geoffroy CHARDOME^{1*}, Véronique FELDHEIM¹

¹UMONS – Faculté Polytechnique – Service Thermique et Combustion

Rue de l'Épargne, 56 – 7000 Mons – Belgique

*(auteur correspondant : geoffroy.chardome@umons.ac.be)

Résumé - Un échangeur air-sol ou puits canadien induit l'apparition de condensats pouvant s'accumuler et stagner. Cela génère un biotope particulier propice au développement de microorganismes pouvant potentiellement contaminer l'air de ventilation. Un modèle numérique quantifiant en volume et température ces condensats a été réalisé. La biocénose de ces condensats et de l'air a été caractérisée à l'aide d'études métagénomiques. Les conditions de développement, les possibilités de migration et la présence de pathogènes ont donc pu être établies.

Nomenclature

c	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
T	température, $^{\circ}C$
h	coefficient de convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$
Re	nombre de Reynolds
Pr	nombre de Prandtl
Nu	nombre de Nusselt
u	vitesse, $m.s^{-1}$
d	dimension caractéristique, m
f	facteur de friction
M	flux massique, $kg.s^{-1}.m^{-2}$
K_D	coefficient de diffusion de matière, $kg.s^{-1}.m^{-2}$
Y_j	titre massique, $kg_j.kg^{-1}$ <i>mélange</i>
i	enthalpie par unité de masse de gaz, $J.kg_{air}^{-1}.sec$
x	humidité absolue, $kg_{eau}.kg_{air}^{-1}.sec$
L_c	chaleur latente de condensation, $J.kg^{-1}$
S	surface, m^2
q	débit massique, $kg.s^{-1}$
MAE	erreur moyenne absolue, K

Symboles grecs

ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
φ	densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$
ν	viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
α	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
Φ	flux de chaleur, W

Indices et exposants

<i>sol</i>	interface sol/ambiance extérieure
<i>ext</i>	extérieur
<i>tube</i>	interface tube/air
<i>a</i>	air sec
<i>H</i>	air humide
<i>m</i>	moyenne
<i>sat</i>	saturation
<i>v</i>	vapeur d'eau
<i>tot</i>	total
<i>conv</i>	convection
<i>lat</i>	latent
<i>cond</i>	condensat

1. Introduction

L'impact d'un EAHE sur la qualité de l'air intérieur a déjà fait l'objet d'études comme [1], mais les polluants analysés sont chimiques ou physiques, pas biologiques.

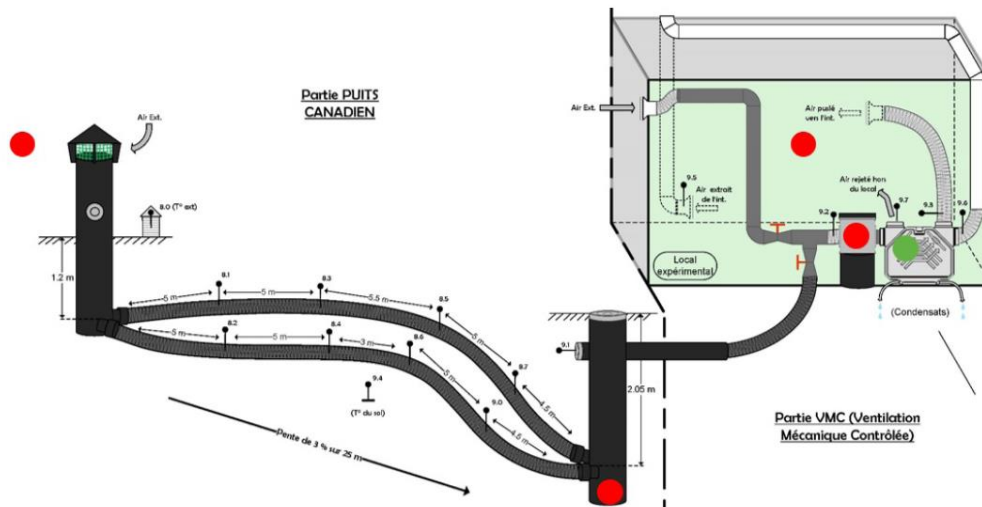
L'objectif de cette étude est de réaliser un modèle numérique permettant la simulation d'un échangeur air-sol afin de quantifier les condensats produits durant certaines périodes de l'année. Ceux-ci stagnent dans l'échangeur air-sol et peuvent être à l'origine de développement de moisissures et de bactéries représentant un risque sanitaire qu'il est nécessaire d'étudier. Toutefois, la présence de filtres au niveau du système de ventilation semble être une mesure suffisante pour éviter ce risque sanitaire, comme le démontre les études [2] et [3].

Cet article fait suite à [4] qui reprend les données détaillées de l'installation témoin, monitorée en continu, et dont les relevés permettent la validation des modèles numériques. Il se différencie par la prise en compte d'une zone saturée dans le modèle numérique et l'étude microbiologique de l'installation.

Nous proposons une étude prédictive sur la formation de condensats au sein de l'échangeur modélisé à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics et d'une interface MATLAB. Cette modélisation permet de déterminer les quantités de condensats présents dans le puits et leur température suivant le pas de temps choisi. Les résultats obtenus par cette modélisation pourront être comparés aux conditions de développement des pathogènes identifiés durant l'étude microbiologique afin de déterminer si les échangeurs air-sol peuvent représenter un risque sanitaire.

2. Dispositif expérimental

L'installation est située sur le site du Campus Technique de la Haute École en Hainaut (HEH) à Mons en Belgique. Le puits canadien est réalisé en PEHD (Polyéthylène Haute Densité) et se compose d'un élément d'aspiration associé à un puits vertical d'un diamètre de 400mm qui s'enfonce dans le sol jusqu'à une profondeur de 1,25 m. Il est ensuite divisé en deux tuyaux ayant chacun un diamètre extérieur de 160 mm et formant un angle afin de s'assurer d'une distance de 1 m entre eux et ainsi éviter qu'un tuyau influence la température du sol situé autour du second. Une pente de 3% assure l'évacuation des condensats. Le débit d'air 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 chacun des tuyaux.



3. Modèle numérique

Le puits est discrétisé sur sa longueur en différentes parties appelées tronçons. 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.

Bien que différents modes de transfert de chaleur aient lieu au sein du sol, un modèle conductif pur est acceptable. C'est généralement cette modélisation qui est rencontrée dans la littérature comme dans l'étude [5] faisant référence en la matière. Dans [4], il est montré que les parties verticales du puits, ayant un diamètre intérieur important de 400 mm, ont un impact très limité sur les échanges de chaleur. Elles ne sont donc pas intégrées au modèle.

3.1. Conditions initiales

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

3.2. Conditions limites du modèle

Les différentes conditions limites du modèle sont identifiées sur la figure 2.

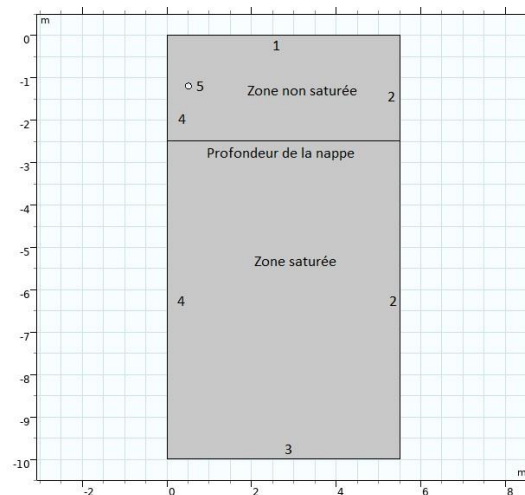


Figure 2 : Conditions limites du modèle.

La frontière 1 représente l'interface entre le sol et l'ambiance extérieure. La densité de flux s'y exprime sous la forme :

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = \varphi_{sol} + h_{sol} \cdot (T_{ext} - T) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{ext}^4 - T^4) \quad (1)$$

La frontière 2 est considérée comme étant adiabatique. On applique une condition de Dirichlet sur la frontière 3. Sa température a été définie comme étant la moyenne arithmétique des températures extérieures de l'année 2015, soit : 12,4 °C. La frontière 4 est le plan de symétrie du modèle et sera donc considérée comme étant adiabatique. La frontière 5 représente l'intérieur du tube. Dans un premier temps, seuls les échanges par convection seront considérés. C'est donc une condition de Fourier qui est appliquée sur cette frontière. Dans un second temps, le phénomène de condensation sera pris en compte et une condition de Neumann sera ajoutée. La densité de flux s'y exprime alors sous la forme suivante :

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = \underbrace{h_{tube} \cdot \frac{c_a}{c_H} \cdot (T_a - T_{tube})}_{\text{Condition de Fourier}} + \underbrace{\varphi_0}_{\text{Condition de Neumann}} \quad (2)$$

T_{tube} varie en fonction du nœud considéré, raison pour laquelle une valeur moyenne $T_{tube,m}$ est calculée. Cette valeur renvoyée par le modèle permet, ayant connaissance de la température de l'air et de sa vitesse, de calculer le Re ($22 \cdot 10^3$ au sein du puits), le Pr (0,716 au sein du puits) et le Nu pour déterminer le coefficient de convection entre l'air situé dans le tronçon et la paroi intérieure du tuyau. La dimension caractéristique est prise égale au diamètre intérieur du tube.

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (3)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4)$$

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} \quad (5)$$

La formule de Gnielinski est considérée pour l'évaluation du Nu comme détaillé ci-après :

$$f = (0,790 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2} \quad \text{applicable pour des tubes lisses} \quad (6)$$

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad \text{applicable pour } \left[\begin{array}{l} 0,5 < Pr < 2000 \\ 2300 < Re < 5 \cdot 10^6 \end{array} \right] \quad (7)$$

Pour déterminer s'il y a condensation, l'humidité absolue x de l'air en entrée du tronçon est comparée au x_{sat} pour $T_{tube,m}$ à chaque pas de temps. Si x est supérieure à x_{sat} , il y a condensation et il faut déterminer φ_0 . La loi de Fick, qui permet d'estimer le transfert de matière entre deux milieux de titres massiques différents, appliquée à notre cas d'étude, peut s'écrire :

$$M = K_D \cdot (Y_a - Y_{sat}) \quad (8)$$

Sachant que pour un mélange air-eau, la couche limite thermique et le transfert de masse par diffusion sont comparables, nous pouvons établir que pour le refroidissement d'air humide en contact direct avec une paroi, la densité de flux total échangé vaut :

$$\varphi_{tot} = \frac{h_{tube}}{c_H} \cdot (i_a - i_{sat}(T_{tube,m})) \quad (9)$$

Nous devons mettre cette équation (9) sous la forme de l'équation (2) pour déterminer le flux à reprendre au niveau de la frontière 5. Après développement, nous obtenons :

$$\varphi_0 = \frac{h_{tube}}{c_H} \cdot \left(c_v \cdot (x \cdot T_a - x_{sat}(T_{tube,m}) \cdot T_{tube,m}) + L_c \cdot (x - x_{sat}(T_{tube,m})) \right) \quad (10)$$

3.3. Évaluation de la condensation par intégration le long du tube

Cette intégration se fait suivant l'algorithme de résolution repris dans [4] et rappelé brièvement ci-après. La simulation des transferts de chaleur dans le modèle 2D (COMSOL) fournit la température moyenne au droit de la paroi du tube pour chaque heure. Avec cette température $T_{tube, m}$ nous pouvons calculer le x_{sat} et comparer cette valeur au x en entrée de tronçon. Pour chaque pas de temps, un flux est calculé suivant l'équation (10) lorsqu'il y a condensation et pris égal à 0 lorsqu'il n'y en a pas. Ce flux de chaleur est ajouté à la frontière 5 du modèle COMSOL et une nouvelle simulation nous permet de déterminer le flux de chaleur total échangé Φ_{tot} , ainsi qu'une nouvelle température $T_{tube, m}$. Le Φ_{conv} est calculé suivant l'équation (11).

$$\Phi_{conv} = h_{tube} \cdot (T_{tube,m} - T_{air,in}) \cdot S_{tronçon} \quad (11)$$

Il permet de calculer Φ_{lat} lorsqu'il y a condensation et les conditions de température et d'humidité absolue en sortie de tronçon, en considérant c_H comme constant le long du tronçon. Nous faisons l'hypothèse de la constance des flux sur tout le tronçon.

$$\Phi_{tot} = \Phi_{conv} + \Phi_{lat} = q_a \cdot c_H (T_{a,out} - T_{a,in}) + q_a \cdot L_c \cdot (x_{a,out} - x_{a,in}) \quad (12)$$

La température et l'humidité absolue de l'air à la sortie du tronçon considéré sont alors renvoyées dans le modèle comme étant la température de l'air et l'humidité absolue à l'entrée du tronçon suivant. Le débit de condensat produit est ensuite calculé pour le tronçon considéré afin de déterminer la quantité totale de condensat produit dans l'ensemble du puits à chaque pas de temps.

$$q_{cond} = \frac{\Phi_{lat}}{L_c} \quad (13)$$

Ce modèle ne prend en compte que la condensation, mais pas l'évaporation. 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. À cet endroit, la surface libre est relativement petite, et le phénomène d'évaporation est limité. Les condensats sont évacués à l'aide d'une pompe lors de l'entretien du puits.

4. Résultats des simulations numériques

Afin de valider le modèle, nous avons calculé la différence de température entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées pour l'ensemble de l'année 2015 et calculé une moyenne des valeurs absolues des erreurs MAE valant 0,67°C.

Le modèle considère une discrétisation du puits en cinq tronçons avec une profondeur différente pour chaque tronçon afin de tenir compte de la pente du puits. Malgré une profondeur de nappe phréatique variable au cours de l'année, l'hypothèse d'une profondeur de 2,5 m a cependant été retenue. Le modèle considère une zone saturée jusqu'à une profondeur de 10 m. Les caractéristiques des zones (saturée et non saturée) sont reprises dans le tableau 1. Les coefficients de convection au niveau de la paroi du tube et du sol sont calculés à chaque pas de temps et pour chaque tronçon. Le coefficient de convection au niveau de la surface du sol a été calculé avec un écoulement considéré comme étant longitudinal et parallèle à une plaque plane de longueur d égale à 10m. Le maillage a été choisi de manière semi-automatique et défini par le logiciel, il comporte 1072 éléments de tailles allant de 0,003 m à 0,67 m.

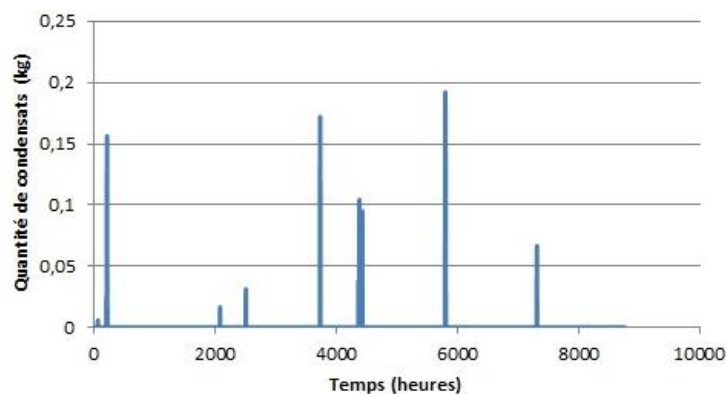


Figure 3 : *Quantité de condensats produite en 2015 dans un des deux tubes (résultat de la simulation).*

La quantité totale de condensats produite au sein du puits (2 tubes) durant l'année 2015 est de 6,68 kg comme illustrée sur la figure 3. C'est au cours des mois de juin, juillet et août que l'essentiel de la condensation a lieu. En dehors de cette période, nous constatons une faible production de condensats ayant lieu aux alentours du 10/01/2015. Celle-ci est due à des

températures largement supérieures aux normales de saison ainsi qu'à un taux d'humidité relative assez élevé.

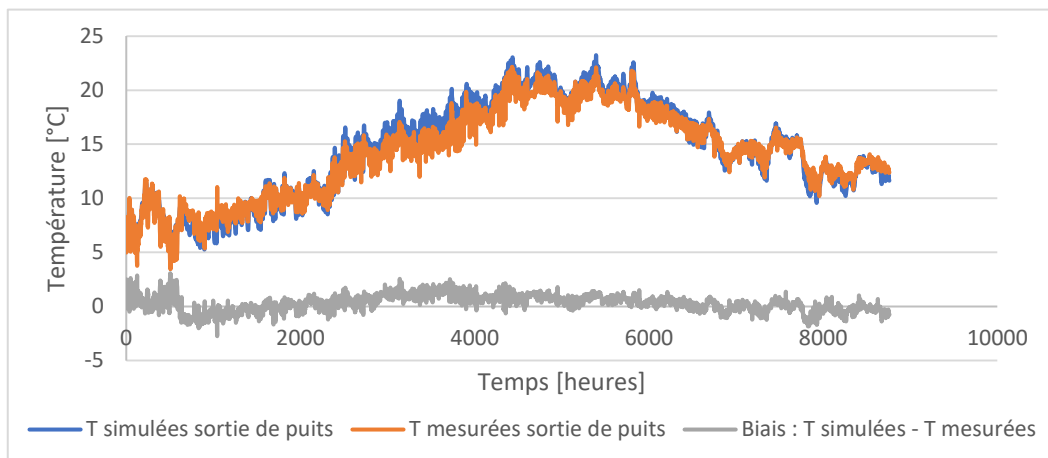


Figure 4 : Températures de l'air à la sortie des puits relevées et simulées.

Les températures des condensats produits seront proches de celles de l'air en sortie des puits reprises sur la figure 4. Les condensats auront donc des températures comprises entre 3°C et 23°C, températures très propices au développement de microorganismes psychrophiles.

5. Étude microbiologique

5.1. Campagne d'échantillonnage

Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées pour cette étude, la première a eu lieu le 16 décembre 2020 et la deuxième le 29 mars 2021. Ces campagnes espacées dans le temps permettent d'analyser l'impact de la saison sur les populations bactériennes et fongiques. Lors des campagnes de décembre et de mars, 12 échantillons ont été prélevés au niveau de 4 stations/localisations déterminées au préalable et référencées sur la figure 1.

Ces 4 stations représentées en rouge sont les suivantes :

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

Les échantillons sont nommés « Station.x.y », où Station est la localisation dans le système, x est la campagne (1 – hiver, 2 – printemps) et y est l'essai expérimental. Par exemple l'échantillon Puits1.2, correspond à l'échantillon 2 de l'air à la sortie du puits prélevé en décembre.

Afin d'analyser l'impact du système de filtration de la ventilation mécanique à la sortie du puits canadien (site repris en vert sur la figure 1), 6 échantillons du filtre ont été collectés lors de la première campagne. Le filtre échantillonné, de type G3 selon la norme européenne 38 EN 779 :2012, était en place depuis plusieurs années. Lors de ces deux campagnes, ce sont donc 102 échantillons qui ont été collectés.

5.2. Protocole de relevés et analyses

Afin d'étudier la biocénose particulière présente au sein du puits, diverses analyses ont été réalisées. L'identification taxonomique est réalisée sur base de l'ARN ribosomique 16S (bactérie) et la sous-région ITS 2 (fungi). L'ARNr 16S constitue la petite sous-unité des ribosomes des procaryotes et la sous-région ITS2 "internal transcribed spacer", est une région comprise entre les gènes 18s et 28s de l'ARNr. Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'un biocollecteur de marque Air Ideal conforme à la norme internationale ISO/DIS 14698-1. Ce dernier est prévu pour une impaction directe sur gélose contenue dans une boîte de Pétri de 90 mm de diamètre au travers d'un crible. Le volume de chaque prélèvement a été de 1000 litres.

Les populations de micro-organismes sont en très faibles quantités dans l'air. L'ADN récolté ne permet donc pas une analyse métagénomique ciblée directement sans un appareillage spécifique. Afin d'augmenter les quantités d'ADN, les boîtes de Pétri récoltées ont été mises en culture à des températures de 20°C et 30°C pendant 72h. Ces températures ont été choisies, car elles représentent les conditions de températures que l'on retrouve dans les bâtiments. Les fungi étant très envahissants, la moitié des boîtes de Pétri a reçu un antifongique, le cycloheximide. De cette façon, seules les bactéries ont pu se développer sur ces boîtes de Pétri et les échantillons bactérie et fungi ont pu être distingués l'un de l'autre.

Pour chaque station et afin de limiter le nombre d'échantillons à séquencer (coût de l'opération), les colonies formées sur une des boîtes de Pétri et cultivées à 20°C ont été raclées et associées à celles développées sur une des boîtes de Pétri et cultivées à 30°C. Le choix des boîtes associées s'est fait au hasard. Il y a donc pour chaque campagne et pour chaque station, 3 échantillons de bactéries et 3 échantillons de fungi avec également 3 échantillons du filtre récupéré lors de la première campagne.

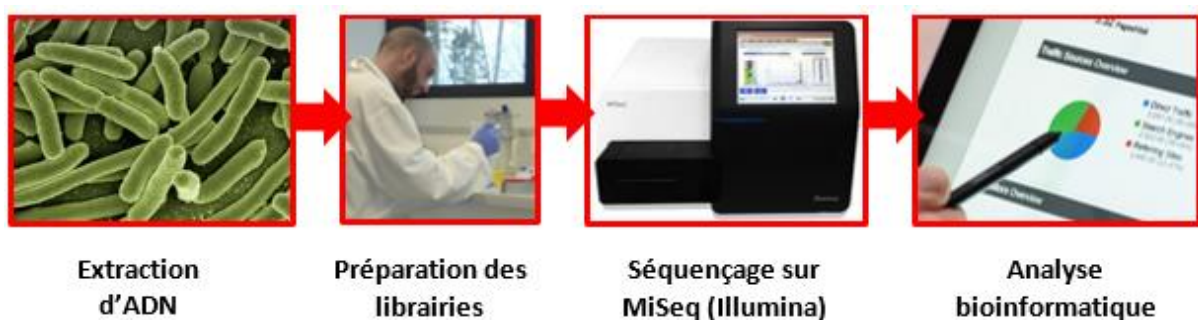


Figure 5 : Pipeline de métagénomique ciblée appliqué aux échantillons

Chaque échantillon a ensuite subi un traitement illustré à la figure 5 et l'assignation taxonomique s'est faite en suivant les niveaux hiérarchiques :

Règne → Embranchement → Classe → Ordre → Famille → Genre → Espèce

Le choix de l'ARN ribosomique 16S (bactérie) et de la sous-région ITS 2 (fungi) permet une assignation taxonomique allant jusqu'au genre. Il est possible de descendre au niveau de l'espèce, mais pas systématiquement, car certaines espèces différentes, mais d'un même genre, ont le même ARN 16S ou la même sous-région ITS 2.

5.2.1. Pathogènes

Les espèces pathogènes ont été déterminées sur base des rapports (TRBA) émis par l'Institut fédéral de la sécurité et de la santé au travail (BAuA) [6] et [7]. Ces rapports classent les

organismes selon leur degré de dangerosité de 1 (peu susceptible de provoquer une maladie chez un individu) à 4 (agent pouvant provoquer une maladie grave, risque de propagation considérable, un traitement et une prévention ne sont pas possibles). Seules les espèces présentant une abondance relative de plus de 2% ont été analysées. Aucune espèce pathogène de fungi n'a pu être identifiée. Par contre, au total 10 espèces de bactéries ayant un score BAuA supérieur ou égal à 1 ont été identifiées. Sur ces 10 espèces, 3 seulement sont présentes dans le puits canadien. Les 3 espèces pathogènes présentes dans le puits sont :

- *Pantoea agglomerans* (Puits1.2 - 9,17%) : BAuA – 2 (uniquement les immunodéprimés)
- *Microbacterium oxydans* (Puits1.2 - 2,02%) : BAuA – 2
- *Bacillus licheniformis* (Puits2.3 - 3,36% & Ext2.3 - 2,46%) : BAuA – 2

6. Conclusion

Le modèle numérique a permis d'établir la quantité de condensats et les températures de ceux-ci à la sortie du puits canadien. Ce biotope particulier peut être la source de développement de microorganismes comme le montre l'étude métagénomique ciblée réalisée. En effet, certains microorganismes sont retrouvés dans les condensats et dans l'air du puits, mais pas à l'extérieur ni à l'intérieur. Cela prouve que les condensats ont été à un moment donné contaminés par des microorganismes présents dans l'air extérieur, que ces microorganismes ont pu se développer dans les condensats et passer dans l'air de ventilation. Toutefois l'absence de ces microorganismes à l'intérieur du bâtiment démontre l'efficacité du filtre de la ventilation.

Bien que des microorganismes puissent se développer dans un puits canadien, l'analyse microbiologique montre également que très peu de pathogènes y sont présents et que ceux-ci ne se retrouvent pas dans l'air intérieur. Le risque sanitaire provoqué par l'utilisation d'un échangeur air-sol peut donc, à ce stade, être considéré comme nul pour autant que le système de ventilation et de filtration soit régulièrement entretenu.

Références

- [1] D.G. Leo Samuel, *Cooling performance and indoor air quality characteristics on an earth air tunnel cooled building*. J. Metropol. Soc. India MAPAN 33 (2017) 147-158
- [2] B. Flückiger, H-U. Wanner, P. Lüthy, *Mikrobielle Untersuchungen von Luftansaug-Erdregistern*. ETH (Ecole Polytechnique fédérale de Zurich) (1997)
- [3] S.Déoux, *Mission d'évaluation sanitaire du puits canadien - Siège social du Groupe Millet*. Medieco (2011)
- [4] G. Chardome, V. Feldheim, *Transferts de chaleur et condensation au sein d'un échangeur air-sol : modélisations numériques 2D/3D validées par des relevés expérimentaux*. Congrès Français de Thermique (Pau - Mai 2018)
- [5] P. Hollmuller, B. Lachal, *Air-soil heat exchangers for heating and cooling of buildings : design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance*. Appl Energy 119 (2014) 476-487
- [6] TRBA 460 - Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe, *Classification of Fungi into Risk Groups*, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) (Juillet 2016).
- [7] TRBA 466 - Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe, *Classification of Prokaryotes (Bacteria and Archaea) into Risk Groups*, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) (Décembre 2010).