

Caractérisation du biotope dû à la condensation dans un échangeur air-sol (EAHE) pour analyser le risque sanitaire.

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 – geoffroy.chardome@heh.be)

Résumé - L'étude vise à caractériser le biotope formé par la condensation dans un échangeur air-sol (EAHE). Des modélisations numériques 2D et 3D ont été développées pour évaluer le volume et la température du biotope, comparés aux conditions de développement des micro-organismes pathogènes. La méthodologie inclut la modélisation des transferts de chaleur et de masse ayant lieu dans la partie horizontale et la fin du puits, avec validation expérimentale. L'analyse des micro-organismes est réalisée par métagénomique ciblée et la présence de bactéries et de fungi pathogènes a été mise en évidence.

Nomenclature

C capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
T température, °C
h coefficient de convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$
Ri nombre de Richardson
Gr nombre de Grashof
Re nombre de Reynolds
Pr nombre de Prandtl
Nu nombre de Nusselt
Ra nombre de Rayleigh

Symboles grecs

ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$
 λ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
 φ densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$
 ε émissivité
 σ Constante de Stefan-Boltzmann,
($5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$)

Indices et exposants

ext extérieur
cond condensat

1. Introduction

Cette étude se concentre sur la création d'un modèle numérique pour simuler un puits canadien, visant à quantifier les condensats produits et leur température pendant certaines périodes de l'année. Elle est dans la continuité de travaux précédents qui ont proposé la modélisation d'une partie du puits canadien [1] et amélioré le modèle en présentant l'étude microbiologique du puits [2]. La technique du puits canadien, intégrée aux systèmes de climatisation passive, utilise l'air nécessaire à la ventilation d'un bâtiment en le faisant passer à travers des tuyaux enterrés dans le sol, contribuant ainsi à réduire la consommation d'énergie en hiver et en été.

L'objectif de la recherche est d'étudier les condensats dans le puits canadien, en raison du risque sanitaire lié au développement de moisissures et de bactéries. La présence de condensats stagnants peut potentiellement poser des problèmes microbiologiques, et on souhaite déterminer si l'utilisation d'un puits canadien peut entraîner une contamination microbiologique de l'air.

Une modélisation du puits est réalisée pour prendre en compte deux aspects. Premièrement l'accumulation de condensats et les transferts de masse, et deuxièmement les effets de l'échangeur sur les variations périodiques annuelles des températures. En plus des modélisations, une analyse microbiologique du site est réalisée en échantillonnant l'air circulant dans le puits

et les condensats, afin de vérifier l'impact sanitaire de cette technique. Plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été menées, et les échantillons ont été séquencés pour identifier les micro-organismes pathogènes présents dans le puits canadien.

2. Dispositif expérimental

L'installation est implantée sur le Département des Sciences et Technologie de la Haute École en Hainaut (HEH) à Mons, en Belgique et est représentée sur la Figure 1.

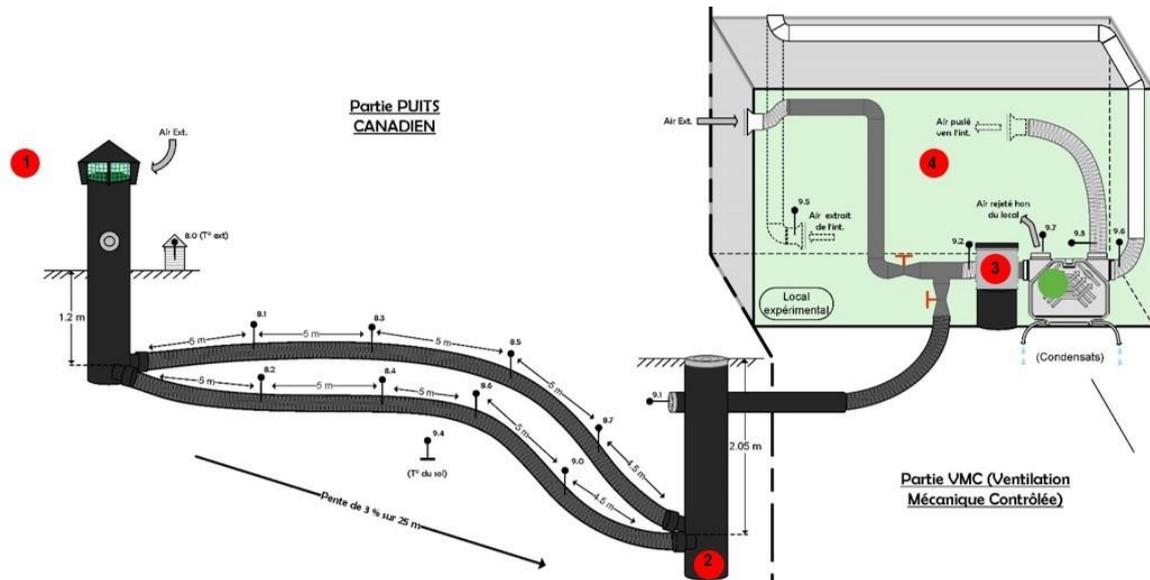


Figure 1 : Schéma de l'installation monitorée, emplacement des thermocouples et des stations d'échantillonnage de l'étude microbiologique (points rouges).

Le puits canadien, conçu en Polyéthylène Haute Densité (PEHD), se compose d'une entrée d'air liée à un puits vertical de 400 mm de diamètre, enfoncé dans le sol jusqu'à une profondeur de 1,25 m. Elle est ensuite divisée en deux tuyaux, chacun ayant un diamètre externe de 160 mm, formant un angle pour maintenir une distance de 1 m entre eux, évitant ainsi l'influence d'un tuyau sur l'autre. Une pente de 3% est prévue pour faciliter l'évacuation des condensats. Le débit d'air de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ circule dans le puits, ce qui signifie qu'un débit d'air de $125 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ circule à l'intérieur de chaque tuyau.

	C	ρ	λ
	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Zone non saturée	800	1875	0,625
Zone saturée	1235	2050	2,475

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du sol

La nappe phréatique se situe à une profondeur moyenne de 2,5 m, et le sol est de type remblai sablo-caillouteux brunâtre non plastique, dont les caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 1.

3. Modèles numériques et résultats

La modélisation se divise en deux modèles principaux, et les simulations sont effectuées à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics en conjonction avec MATLAB et EXCEL, permettant la définition de routines complexes. Le premier modèle vise à évaluer les transferts de chaleur et de masse pour caractériser les volumes et températures des condensats qui se forment dans le puits au fil du temps. Il examine également l'écoulement de ces condensats pour identifier à chaque instant les volumes et les températures des condensats arrivant à la fin du puits.

Le deuxième modèle principal se concentre spécifiquement sur la fin du puits, où les condensats s'accumulent, créant un environnement propice au développement de micro-organismes. Ce modèle permet de caractériser ce biotope en termes de température et de volume, en prenant en compte l'arrivée des condensats du puits et les transferts de masse avec l'air de ventilation. Aucun monitoring n'est présent en fin de puits pour des questions techniques, mais les résultats obtenus correspondent à des relevés effectués lors de la maintenance du puits.

3.1. Résultats des modélisations de la partie horizontale du puits

La modélisation de la partie horizontale du puits est détaillée dans [2], c'est pourquoi seuls les résultats du modèle validés par les relevés expérimentaux sont présentés ici. Ces résultats servent d'entrée au modèle de la fin du puits. Ils donnent pour chaque pas de temps d'une heure, le volume et la température des condensats ainsi que la température et l'humidité de l'air qui arrivent en fin de puits.

Les quantités de condensats produites en 2015 et 2016, dont les évolutions sont présentées aux Figures 2 et 3, étaient respectivement de 6,49 litres et 31,18 litres. Cela démontre la variabilité de la production d'une année à l'autre, expliquant parfois la nécessité d'évacuer mécaniquement les condensats du puits lorsque deux années humides se suivent.

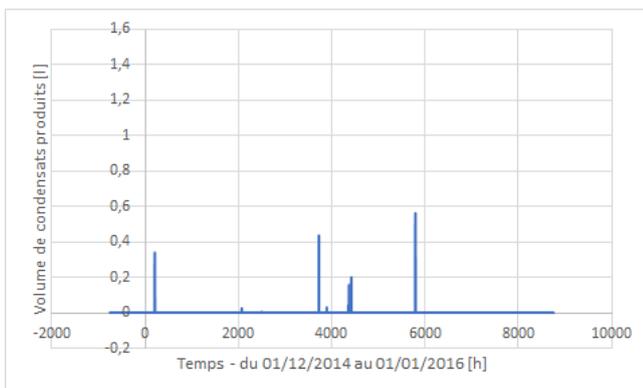


Figure 2 : - *Quantité de condensats produite pour l'année 2015*

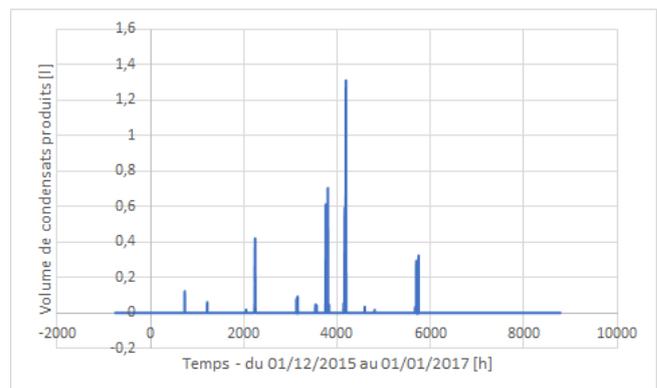


Figure 3 : *Quantité de condensats produite pour l'année 2016*

3.2. Modèle Fin du puits

La complexité de la modélisation de la fin du puits réside dans la nécessité de traiter le problème de façon itérative. Les échanges convectifs à la surface des condensats dépendent de la hauteur et de la température de ces derniers, qui constituent les sorties du modèle précédent. Il est nécessaire d'établir, pour chaque pas de temps, le coefficient d'échange convectif afin de déterminer les transferts de masse. Ces transferts influent à leur tour sur la hauteur des

condensats et leur température au pas de temps suivant, modifiant ainsi le coefficient d'échange convectif. Avec un pas de temps d'une heure sur une période de 13 mois, cela représente 9505 valeurs à calculer, et autant de maillages différents. Il a donc été nécessaire de créer des modèles représentatifs pour certaines géométries, puis d'établir des liens entre eux. Malgré cette méthode de résolution simplifiée, les résultats obtenus dépassent largement le niveau de précision requis pour cette étude, l'objectif étant de comparer les températures des condensats à celles favorables à la croissance des micro-organismes pathogènes identifiés.

Le modèle de la fin du puits illustré à la Figure 4 permet de déterminer la température des condensats pour chaque pas de temps et différentes hauteurs. Cette température est influencée par des échanges conductifs avec le sol entourant le fond du puits, des échanges convectifs avec l'air circulant au-dessus des condensats et par leur évaporation. Les condensats, bien que fluides, seront considérés comme des solides, car ils ne sont pas en mouvement. Les domaines où circule l'air sont exclus du modèle, faisant de l'interface condensats/air une frontière du système.

3.2.1. 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 une profondeur d'un mètre le 1er décembre 2014, date du début de la simulation. Elle s'établit ainsi à 15,2 °C.

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

Les conditions limites du modèle sont représentées sur la Figure 4.

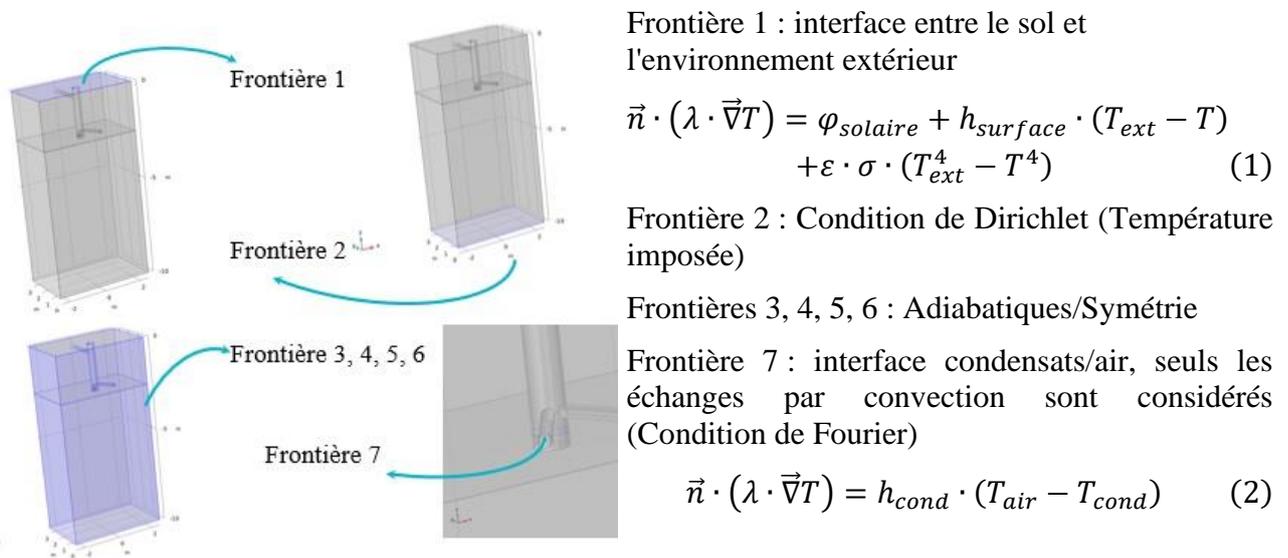


Figure 4 : Conditions limites du modèle de la température des condensats en fin de puits

Le coefficient de convection $h_{surface}$ a été considéré comme variable dans les simulations et calculé à chaque pas de temps en fonction des caractéristiques thermiques de l'air extérieur à T_{ext} et de la vitesse du vent. T_{air} est la température de l'air qui arrive en fin de puits après passage dans la partie horizontale du puits et obtenue à l'aide des modélisations de cette dernière.

La température des condensats T_{cond} est dans un premier temps calculée sur base d'un modèle conductif pur en négligeant les échanges convectifs à la frontière 7. Une fois T_{cond} obtenu, il est possible de déterminer h_{cond} et de réaliser un calcul itératif pour définir T_{cond} et h_{cond} .

3.2.3. 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 appliqué à la frontière 7, il est essentiel de préciser si la convection est de type naturel, forcé ou mixte. En effet, les faibles vitesses de l'air en fin de puits à l'interface condensats/air, pour certaines hauteurs de condensats, exigent la prise en compte des transferts de chaleur par convection naturelle ou mixte, et non exclusivement ceux par convection forcée.

Afin de déterminer quel coefficient d'échange convectif h_{cond} considérer, il est nécessaire d'évaluer le nombre de Richardson. Ce dernier représente le rapport entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique d'un fluide, reflétant ainsi l'importance de l'effet sur le mouvement du fluide.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (3)$$

Il n'y a pas de frontières physiques nettes entre les différents types de convections définis par des valeurs spécifiques du nombre de Richardson. Les deux régimes de convection, naturelle et forcée, sont des régimes asymptotiques de la convection mixte. Il est généralement acceptable de fixer des valeurs limites du nombre de Richardson en deçà ou au-delà desquelles seule la convection forcée ou naturelle est considérée comme responsable de l'écoulement.

Dans le cadre de cette étude, les conditions suivantes sont appliquées :

- $Ri \leq 0.1 \rightarrow$ 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 critères, un seul coefficient de convection est attribué à chaque hauteur de condensats pour chaque pas de temps, en utilisant une régression linéaire en fonction du nombre de Richardson. Les corrélations employées sont issues de [3].

Convection forcée

Le nombre de Reynolds maximum est donc de 20565 et le nombre de Prandtl est toujours supérieur à 0,7. L'écoulement est donc considéré comme laminaire et le nombre de Nusselt peut être calculé suivant la relation :

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \text{ pour } \begin{cases} 0,5 < Pr < 10 \\ Re < 3 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (4)$$

Convection naturelle

Le coefficient de convection dû à la convection naturelle dépend directement de la différence de température entre les condensats et l'air ambiant qui intervient dans le calcul du nombre de Grashof. Il est donc nécessaire de choisir une approche itérative qui permet d'ajuster progressivement la température des condensats jusqu'à convergence, assurant ainsi la cohérence des résultats. Pour calculer le nombre de Nusselt, il est nécessaire de savoir si l'on se trouve avec un écoulement laminaire ou turbulent, ce qui est établi par le nombre de Rayleigh.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (5)$$

$$Nu = 0,54 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \text{ pour } \begin{cases} 10^5 < Ra < 10^7 \\ \text{Régime laminaire} \end{cases} \quad (6)$$

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

Convection mixte

Malgré le déplacement mécanique de l'air dans le puits, l'écoulement résultant à l'interface condensats/air est limité, surtout avec des hauteurs de condensats entre 15 et 30 cm. La coexistence de la convection naturelle et forcée est inévitable, et aucune ne peut être négligée au détriment de l'autre. L'évaporation des condensats n'a lieu que si la pression de vapeur saturante à la température des condensats est supérieure à la pression de vapeur de l'air. Ce phénomène se manifeste principalement lorsque la température des condensats dépasse celle de l'air, induisant un flux ascendant par convection naturelle. Ainsi, la convection mixte est considérée comme favorable, les forces d'Archimède soutenant l'écoulement vers le haut.

$$F_1(Pr) = 0,399 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + \left(\frac{0,0468}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (8)$$

$$F_2(Pr) = \left(\frac{Pr}{5} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{2}} \left[0,25 + 1,6Pr^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$\frac{Nu}{\sqrt{Re}} = 2F_1(Pr) \cdot \left[1 \pm \left(\frac{5F_2(Pr) \cdot \left(\frac{Gr}{5} \right)^{\frac{1}{5}}}{6F_1(Pr)} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} \text{ avec } \begin{cases} + \rightarrow \text{Conv. mixte favorable} \\ T_{cond} > T_{air} \\ - \rightarrow \text{Conv. mixte défavorable} \\ T_{cond} < T_{air} \end{cases} \quad (10)$$

3.3. Résultats des modélisations de la fin du puits

Les résultats des simulations repris sur les Figures 5, 6, 7 et 8 démontrent que lors d'une année peu humide, il est envisageable de se retrouver à la fin du puits sans aucun condensat après la période estivale. En revanche, lors d'une année humide, les condensats sont présents, et l'évaporation à la fin du puits ne suffit pas à empêcher l'accumulation des condensats produits dans la partie horizontale. Les températures des condensats se situent entre 7,89 °C et 20,15 °C pour 2015, et entre 8,95 °C et 17,97 °C pour 2016, représentant des températures propices au développement des micro-organismes psychrophiles. En 2015, 4134 heures sur les 8760 modélisées ont été marquées par la présence de condensats à la fin du puits, soit 47,2% de l'année, tandis qu'en 2016, 6064 heures sur les 8784 modélisées ont été affectées, représentant 69% de l'année.

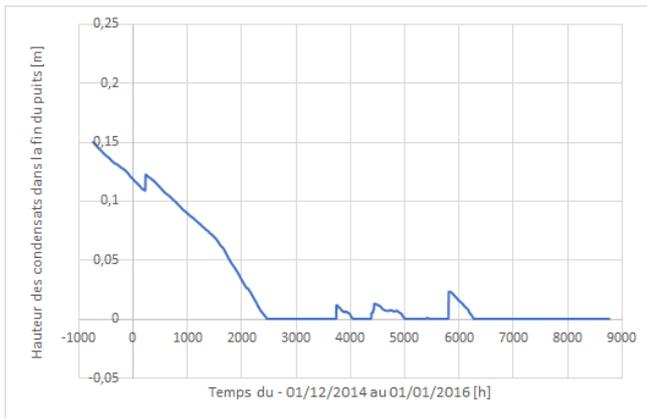


Figure 5 : *Hauteur des condensats dans la fin du puits pour l'année 2015*

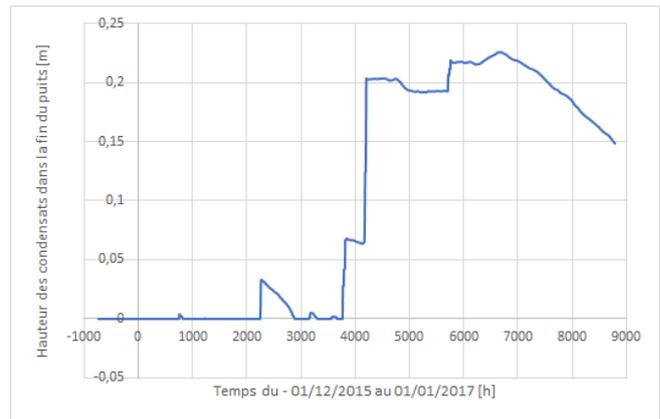


Figure 6 : *Hauteur des condensats dans la fin du puits pour l'année 2016*

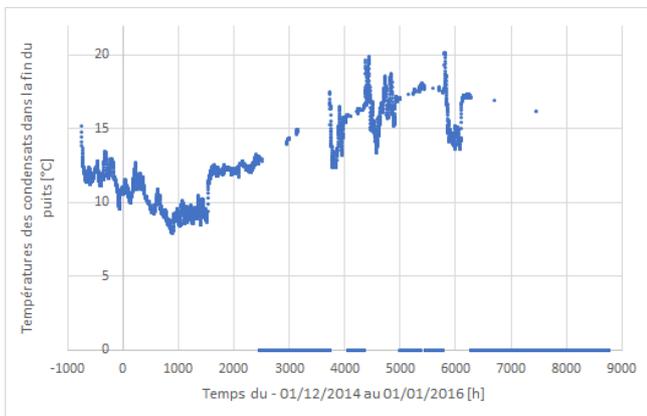


Figure 7 : *Températures des condensats dans la fin du puits pour l'année 2015*

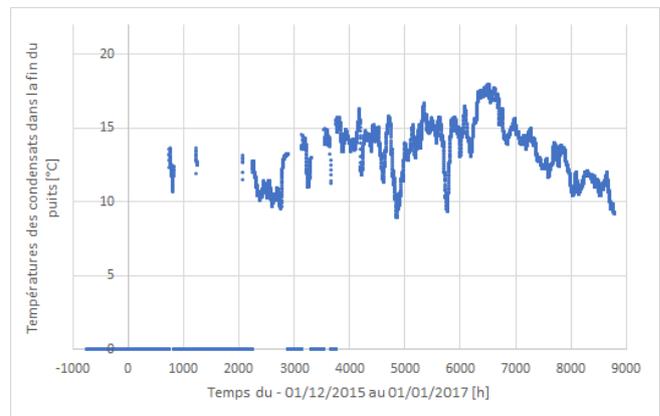


Figure 8 : *Températures des condensats dans la fin du puits pour l'année 2016*

4. Étude microbiologique

Le matériel, les méthodes d'échantillonnage, le descriptif des campagnes et les traitements bio-informatiques réalisés sont présentés dans [2] et détaillés dans [4].

4.1. 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) [5] et [6]. Ces rapports classent les organismes selon leur degré de dangerosité de 1 (peu susceptible de provoquer une maladie chez un individu) à 4 (peut provoquer une maladie grave, risque de propagation considérable, un traitement et une prévention ne sont pas possibles). La Figure 9 illustre les pathogènes que l'on retrouve dans les différentes stations, elles-mêmes reprises sur la Figure 1. Aucun des pathogènes découverts ne dépasse le degré de dangerosité 2 (peut provoquer une maladie chez l'homme et constituer un danger pour les travailleurs. Sa propagation dans la collectivité est improbable. Il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficace).

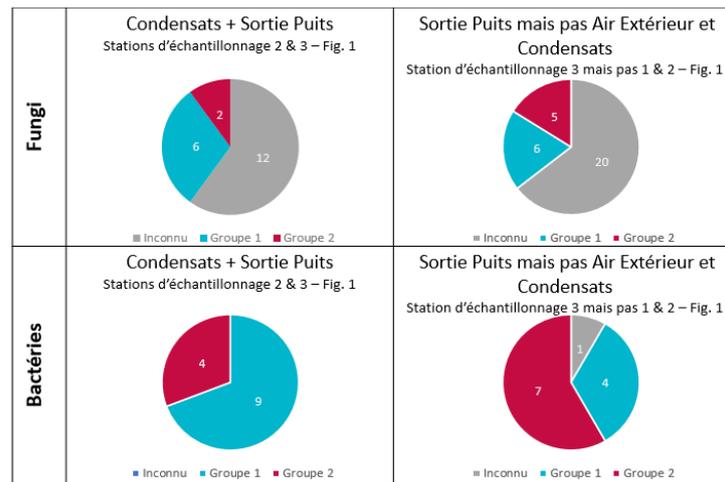


Figure 9 : Agents pathogènes détectés dans différentes stations reprises sur la Figure 1.

5. Conclusion

Cette étude visait à créer un modèle numérique complet pour simuler un puits canadien, quantifier les condensats produits et leurs températures saisonnières. Une analyse microbiologique a également été entreprise pour évaluer l'impact sanitaire de cette technique sur la qualité de l'air intérieur. Les résultats confirment que l'utilisation d'un puits canadien peut entraîner une contamination microbiologique, bien que le risque reste relativement faible.

L'étude microbiologique révèle la présence de bactéries et de fungi, principalement dans les condensats, mais leur transfert dans le bâtiment est limité par le système de filtration. Malgré des conditions propices au développement de micro-organismes psychrophiles, le risque sanitaire reste faible en raison de la faible abondance relative des espèces pathogènes. Des mesures préventives, telles que l'extraction régulière des condensats et l'entretien du puits, peuvent réduire davantage le risque. Les conditions climatiques changeantes peuvent influencer le risque sanitaire, justifiant une vigilance accrue à l'avenir.

Références

- [1] 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).
- [2] G. Chardome, V. Feldheim, *Analyse du risque sanitaire provoqué par l'utilisation d'un échangeur air-sol (EAHE)*. Congrès Français de Thermique (Valenciennes/Mons - Mai 2022). <https://doi.org/10.25855/SFT2022-038>
- [3] J. Huetz and J-P. Petit. *Notions de transfert thermique par convection*. Techniques de l'ingénieur A-1541 (1990).
- [4] G. Chardome, *Puits canadiens : analyses expérimentale et numérique des performances énergétiques et impact sur la qualité de l'air dans les bâtiments*. Doctoral thesis, UMONS - Université de Mons (2023).
- [5] TRBA 460 - Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe, *Classification of Fungi into Risk Groups*, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) (Juillet 2016).
- [6] TRBA 466 - Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe, *Classification of Prokaryotes (Bacteria and Archaea) into Risk Groups*, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) (Décembre 2010).