



Puits canadien, une technologie d'hier pour atteindre les objectifs de demain : focus sur la qualité de l'air intérieur

CHARDOME Geoffroy,
PhD student UMONS
Maître-assistant HEH

Plan de l'exposé

Contexte et technologie

Indoor Air Quality

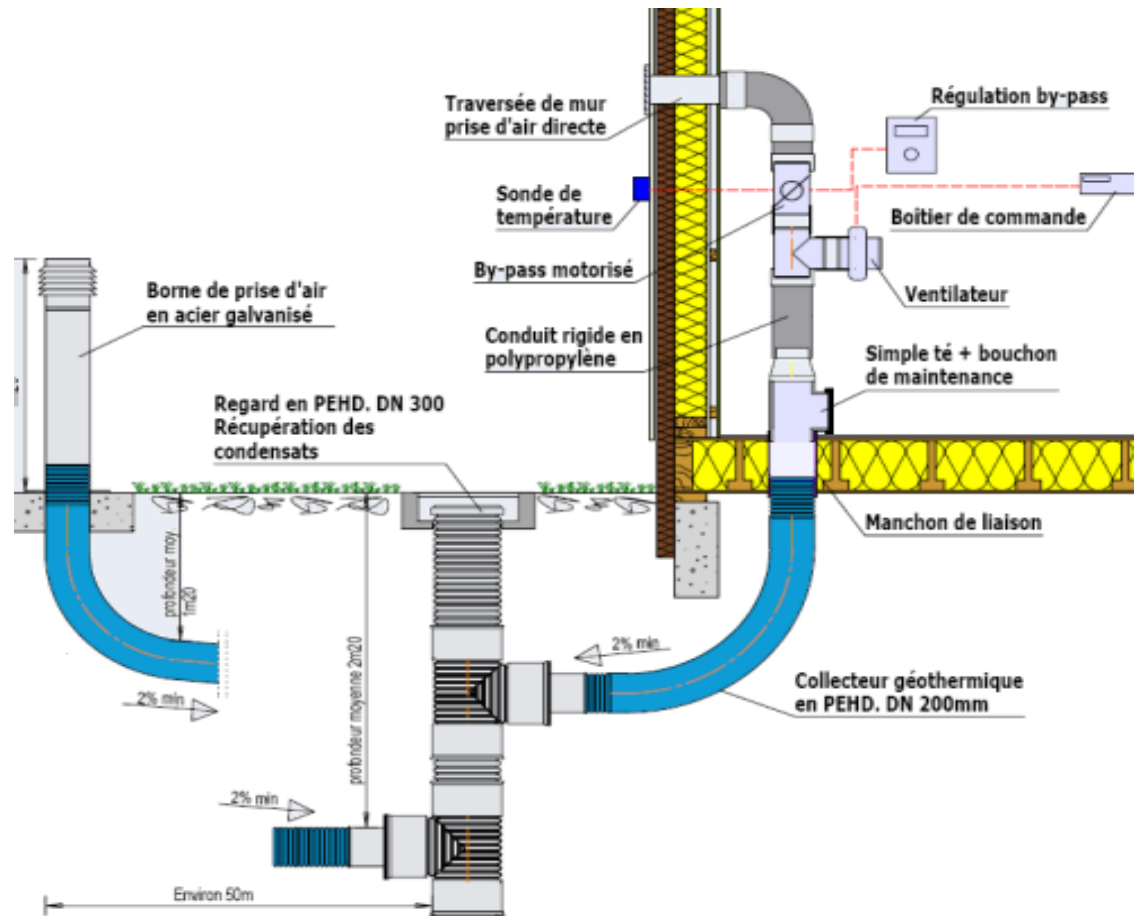
Installation étudiée

Modèles numériques

Microbiologie

Conclusion

Contexte et technologie

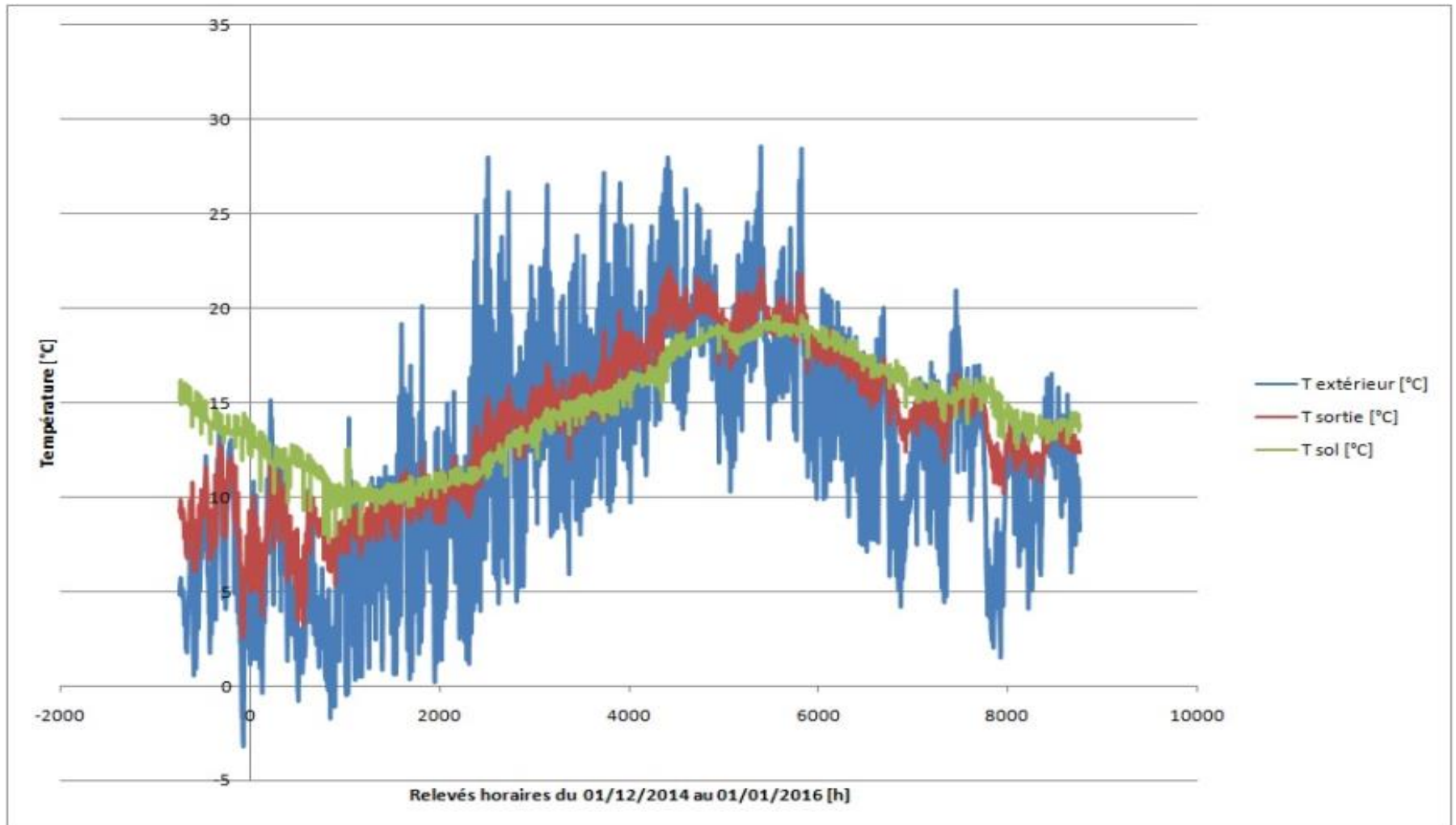


Crédits schémas : SCOP Fiabitat Concept

Contexte et technologie

- Technologie ancienne
 - Iran – 3000 Avant JC
- Réglementation PEB
 - Indice U – $[W/m^2.K]$
 - Niveau K
 - Niveau Ew
 - Niveau Espec – $[kWh/m^2.an]$
 - Indicateur I – $[Kh]$
- EPICOOOL
 - 1^{er} janvier 2014
 - conductivité thermique du sol - $2,0 W/m.K$
 - Nappe phréatique négligée

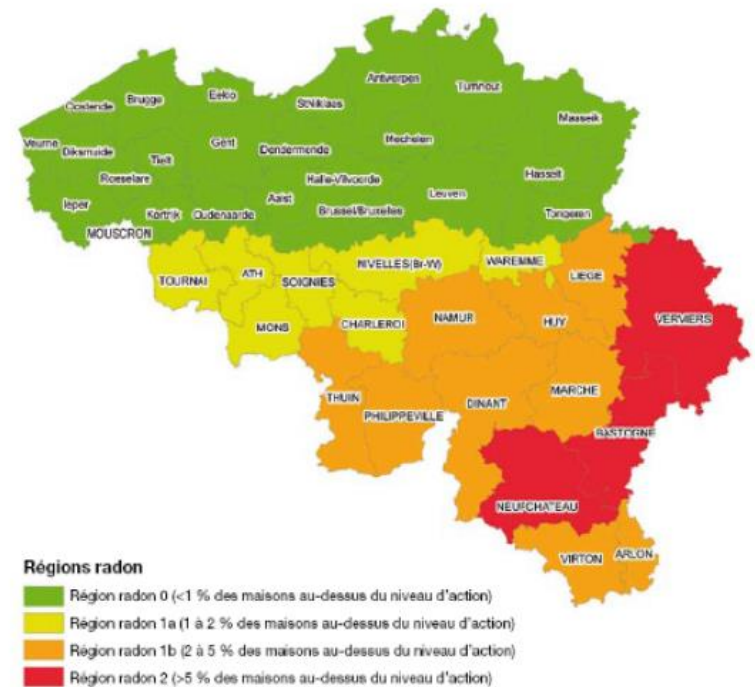
Contexte et technologie



Indoor Air Quality

■ Types de polluants rencontrés

- Radon
- Agents physiques
 - PM 2.5
 - PM 10
 - Humidité
- Agents chimiques
 - COV
 - HAP
 - CO₂
 - ...
- Agents biologiques
 - Moisissures
 - Bactéries



AFCN - Agence fédérale de contrôle nucléaire

Indoor Air Quality

D. G. Leo Samuel - MAPAN-Journal of Metrology Society of India (Nov 2017)

- Cooling Performance and Indoor Air Quality Characteristics of an Earth Air Tunnel Cooled Building
 - Bangalore, India South (25°C à 35°C)
 - Un tube de 72m, ϕ 400mm, prof 4,2m (24°C), 610m³/h
 - PM10, PM2.5, PM1, CO₂, CO, températures, HR
- Conclusion
 - Un puits canadien permet une augmentation du débit de ventilation sans augmenter les déperditions → Augmentation de IAQ

Indoor Air Quality

Qualité de l'air

■ Etudes réalisées dans le domaine

- Mission d'évaluation sanitaire du puits canadien - Siège social du Groupe Millet. Dr Suzanne Déoux 2011
- Nettoyabilité des puits climatiques. Muriel Barbat 2012
- Impact éco-énergétique et sanitaire d'un puits canadien sur une habitation ossature bois. Mehdi Jellad 2011

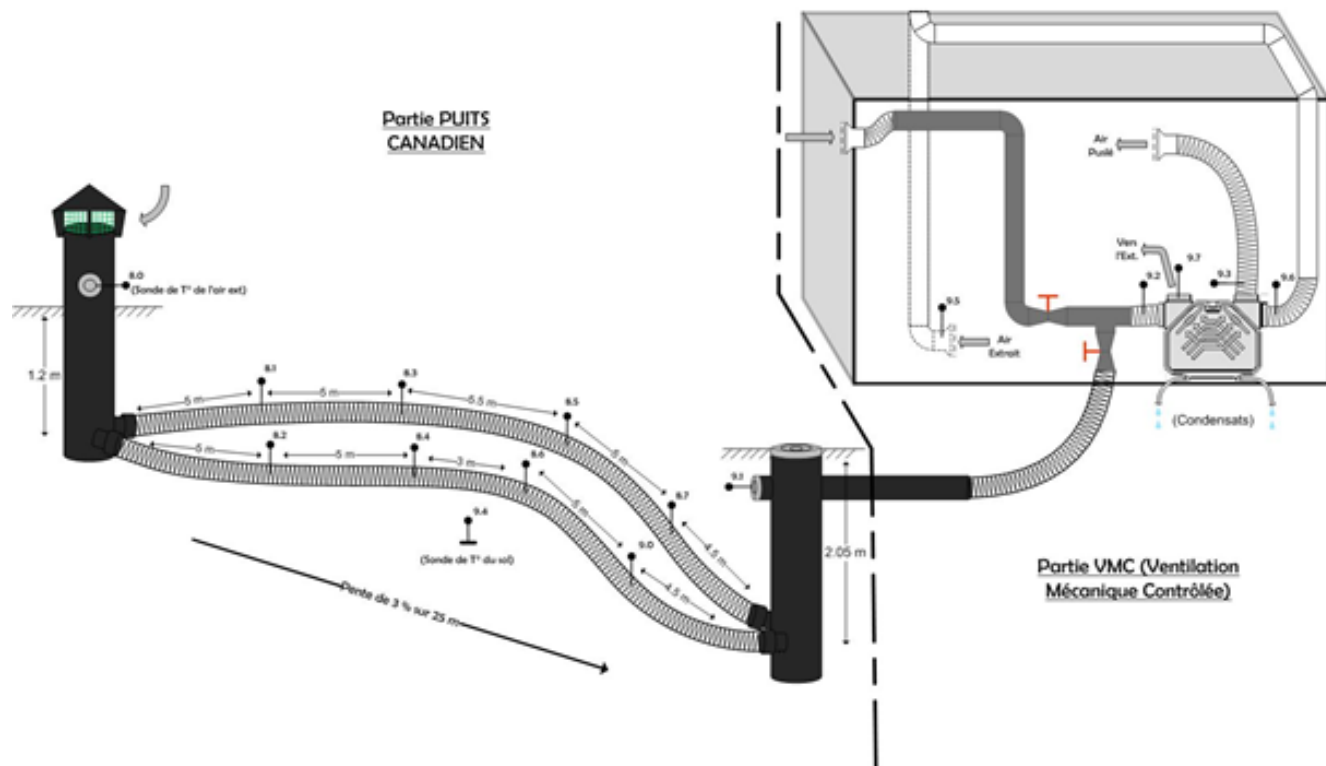
■ Conclusion

- Radon et agents chimiques → Pas de soucis
- Agents biologiques → Période estivale, filtres

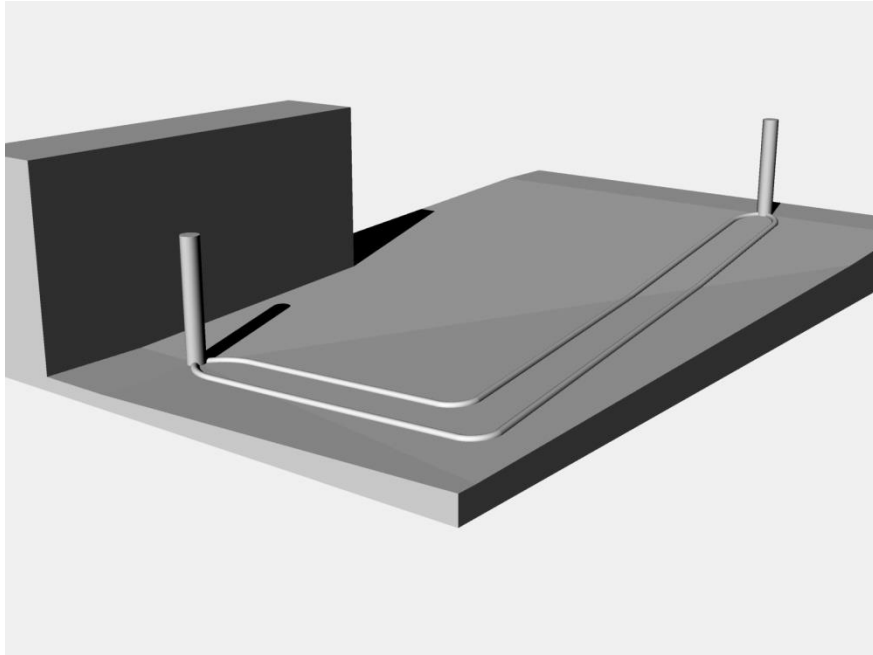
Installation étudiée

Campus technique de la HEH

PLAN DE POSITIONNEMENT DES SONDES DE T°
DU Puits CANADIEN ET DE LA VMC



Installation étudiée



Modèles numériques

Monitoring

- Début : 01/12/2014 00:00 – heure : -743
- Fin : 01/01/2016 00:00 – heure : 8760

Conditions initiales

- Température de la matrice sol = température du sol à une profondeur de 1m le 01 décembre 2014, date de début de simulation. 15,2°C

Analyse des résultats

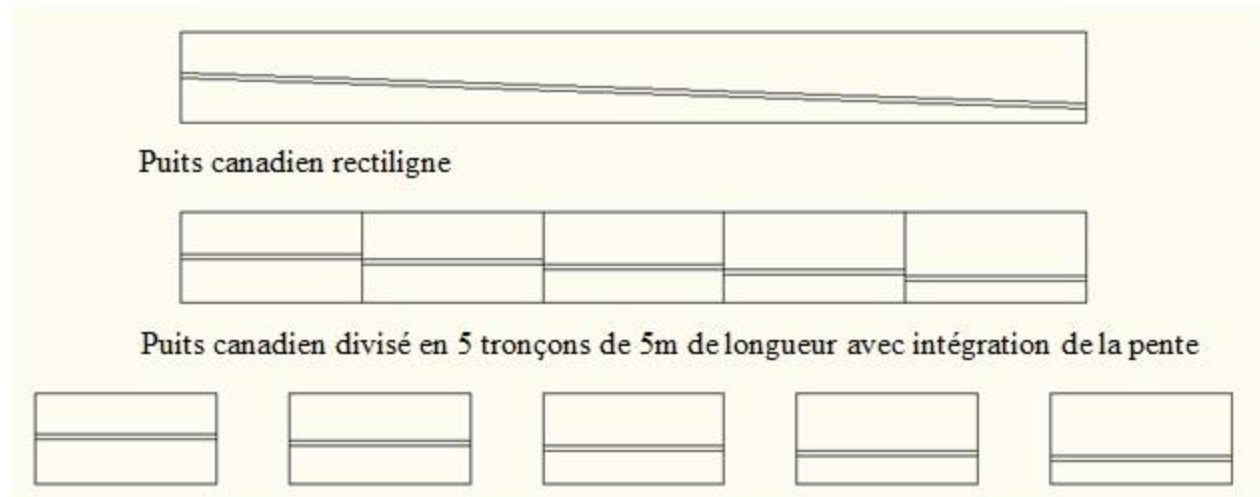
- Moyenne des erreurs absolues et erreur maximale

$$\epsilon_a = \frac{\sum_{i=1}^{8760} |T_{\text{mesurée } i} - T_{\text{simulée } i}|}{8760}$$

Modèle numérique Pseudo 3D

Modèle pseudo 3D

- Tubes discrétisés sur leur longueur
- Transfert de chaleur intégré sur la longueur et flux de chaleur supposé constant sur un tronçon.



Modèle numérique (Pseudo 3D sans condensation)

Conditions limites

- Frontière 1 :

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = \varphi_0 + h_{\text{air}} \cdot (T_{\text{ext}} - T) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{amb}}^4 - T^4)$$

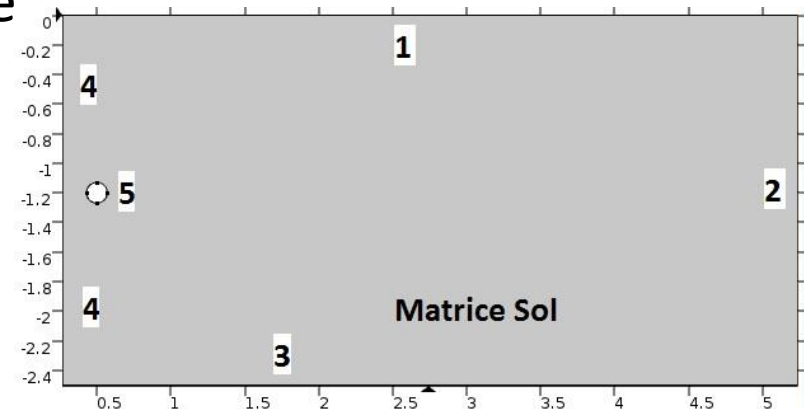
- Frontière 2 : adiabatique

- Frontière 3 : condition de Dirichlet – Température constante

- Frontière 4 : Symétrie – Adiabatique

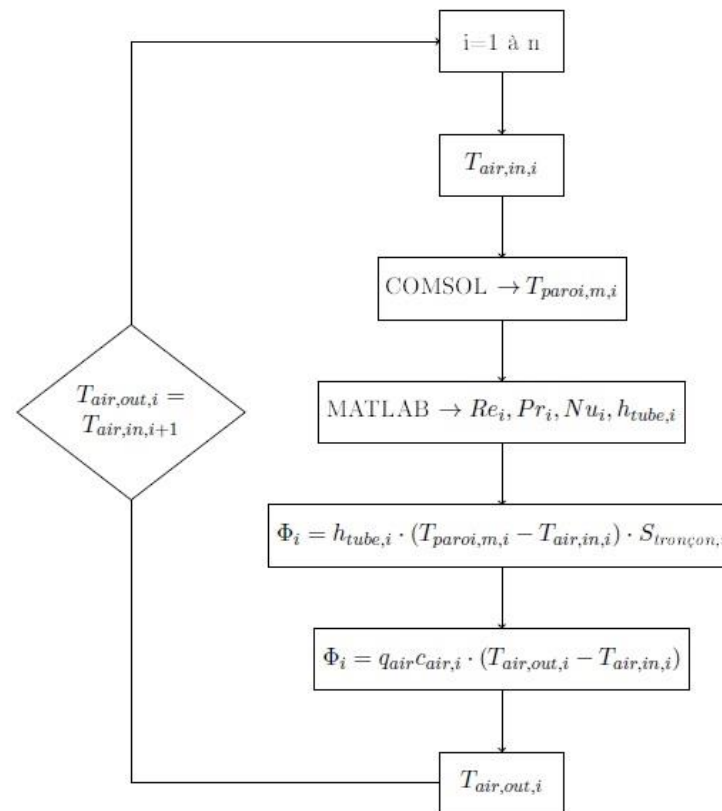
- Frontière 5 : condition de Fourier

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



Modèle numérique (Pseudo 3D sans condensation)

Intégration le long du tube



Modèle numérique (Pseudo 3D sans condensation)

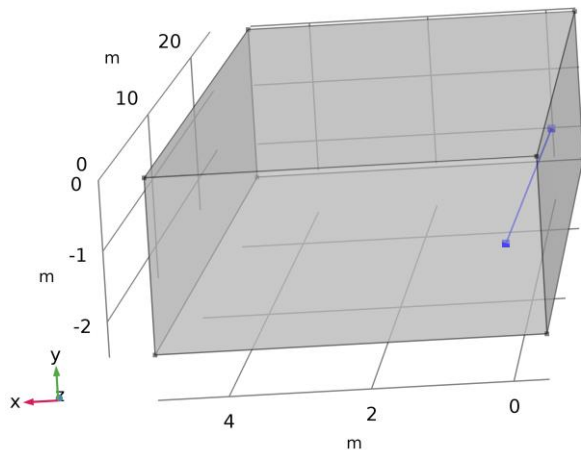
Modèle retenu : $e_a = 0,7 \text{ }^{\circ}\text{C} - e_{\max} = 2,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- Discrétisé en 5 tronçons avec pente
- $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $c = 1000 \text{ J/(kg.K)}$, $\lambda = 0,58 \text{ W/(m.K)}$
- Profondeur de nappe = 2,5m
- Gnielinski – h_{tube}
- $h_{\text{air}} = 0 \text{ à } 30,24 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ pour $d = 55\text{m}$
- Maillage normal

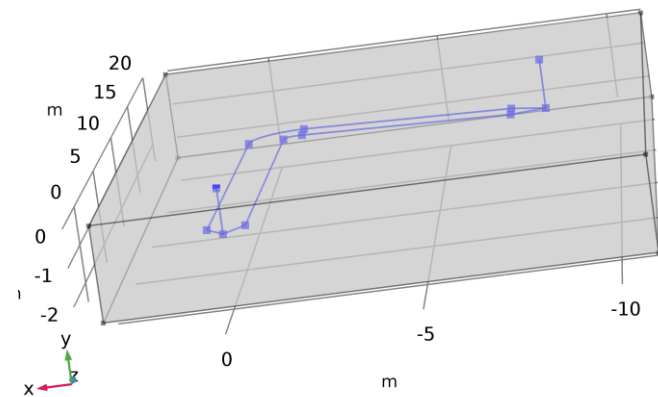
Modèles numériques 3D

Module COMSOL Multiphysics

- Comportement thermique du sol - transfert de chaleur dans les solides
- Modélisation du puits - transfert de chaleur en conduite



Modèle 3D simplifié



Modèle 3D complet

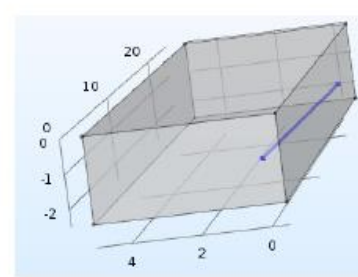
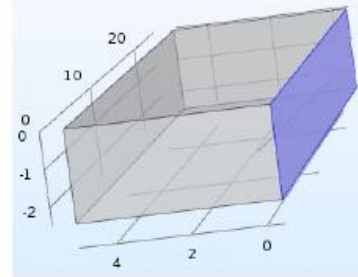
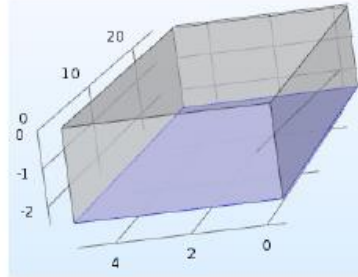
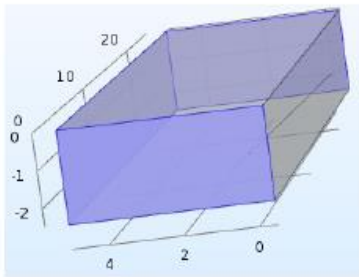
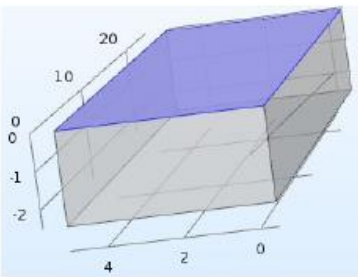
Modèles numériques 3D

Conditions limites

- Identique au modèle pseudo 3D sans condensation à l'exception de la frontière 5
- Frontière 5 : transfert de chaleur en conduite
 - résistance de film interne forfaitaire de 3,66 Nusselt (calcul de la sous-couche visqueuse)
 - conduction au sein du matériau composant le tuyau (ép : 1mm et $\lambda = 0,49 \text{ W/(m.K)}$)
- Frontière 4 : Modèle 3D simplifié
 - Plan de symétrie (adiabatique)

Modèles numériques 3D

Conditions limites



Frontière 1

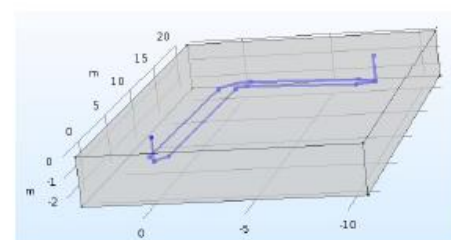
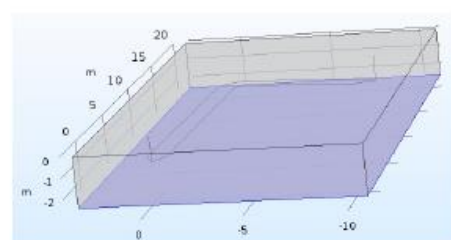
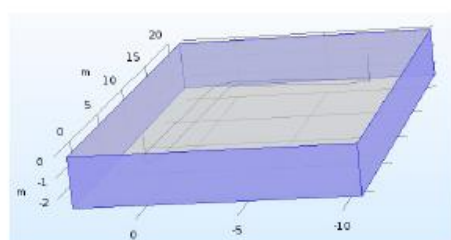
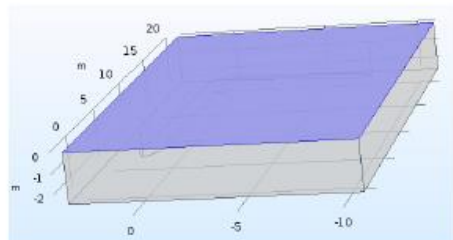
Frontière 2

Frontière 3

Frontière 4

Frontière 5

Conditions limites du modèle 3D simplifié



Frontière 1

Frontière 2

Frontière 3

Frontière 5

Conditions limites du modèle 3D complet

Modèles numériques 3D

Modèle 3D simplifié : $e_a = 0,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $e_{\max} = 3,46 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Modèle 3D complet : $e_a = 0,92 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $e_{\max} = 3,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Conclusion

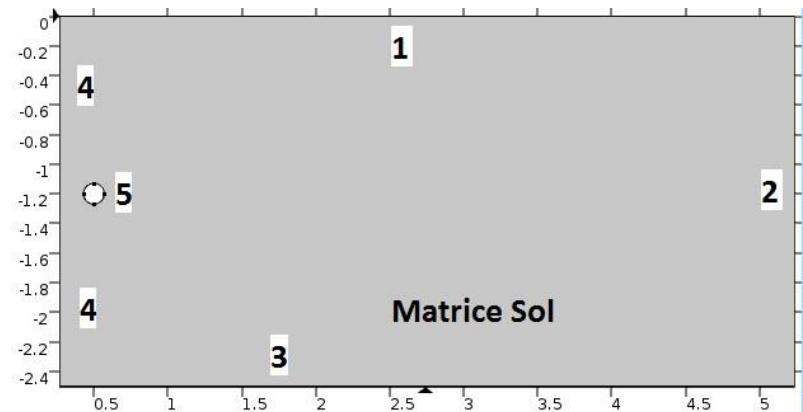
- Résultats des modèles 3D moins précis que le modèle pseudo 3D
- Temps de calcul plus important
- Hypothèses simplificatrices validées
 - Parties verticales du puits et coudes négligés
- Validation du modèle pseudo 3D

Modèle numérique (Pseudo 3D avec condensation)

Conditions limites

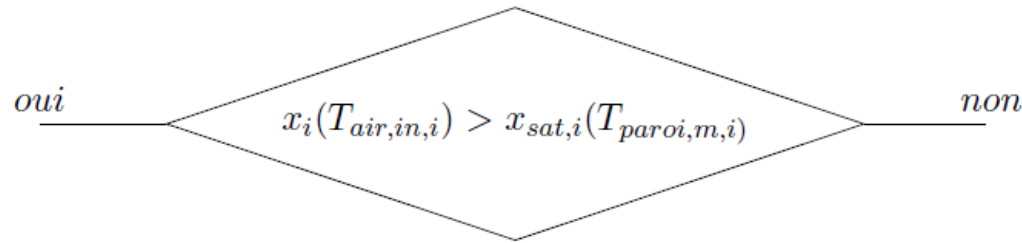
- Identique au modèle pseudo 3D sans condensation à l'exception de la frontière 5 qui intègre la condensation
- Frontière 5 : condition de Fourier (1^{er} temps) et condition de Neumann (2^{ème} temps)

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = h_{\text{tube}} \cdot \frac{c_a}{c_H} \cdot (T_{\text{air}} - T_{\text{paroi}}) + \varphi_0$$



Modèle numérique (Pseudo 3D avec condensation)

Algorithme de résolution



- Loi de Fick pour le transfert de matière : $M = K_D \cdot (Y_{air} - Y_{sat})$
- Densité de flux total échangé (mélange air-eau, $Le = 1$)

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

$$\varphi_0 = \frac{h_{tube}}{c_H} \cdot (c_v \cdot (x \cdot T_{air} - x_{sat}(T_{paroi,m}) \cdot T_{paroi,m}) + L_c \cdot (x - x_{sat}(T_{paroi,m})))$$

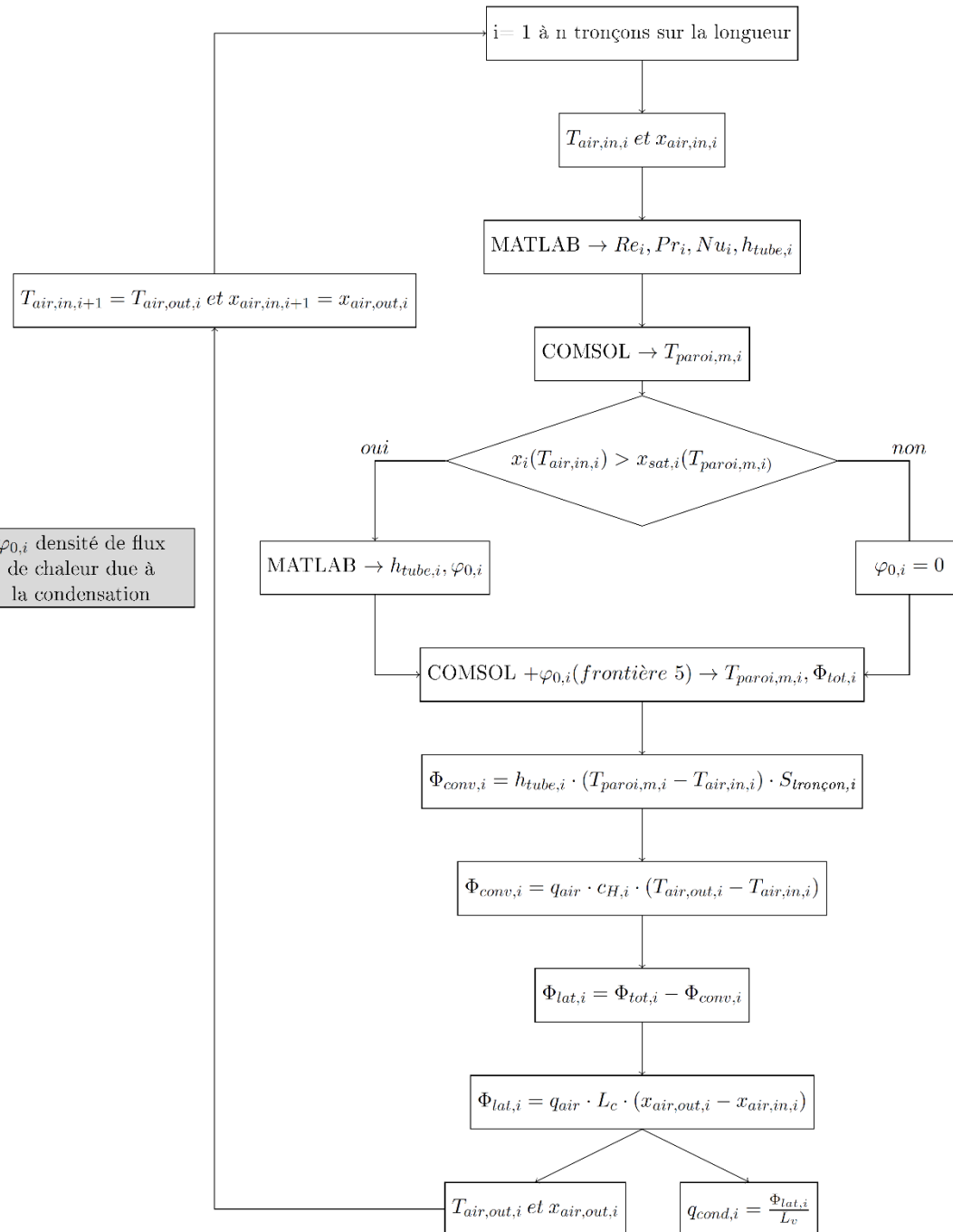
Algorithm

- $T_{paroi,m}$
- Φ_{tot}

$$\Phi_{tot} = q_{air} \cdot S_{troncon} \cdot (x_{air,out} - x_{air,in})$$

- Calcul de

$\varphi_{0,i}$ densité de flux de chaleur due à la condensation



de Φ_{conv} et

$\Phi_{conv} = q_{air} \cdot S_{troncon} \cdot (x_{air,out} - x_{air,in})$

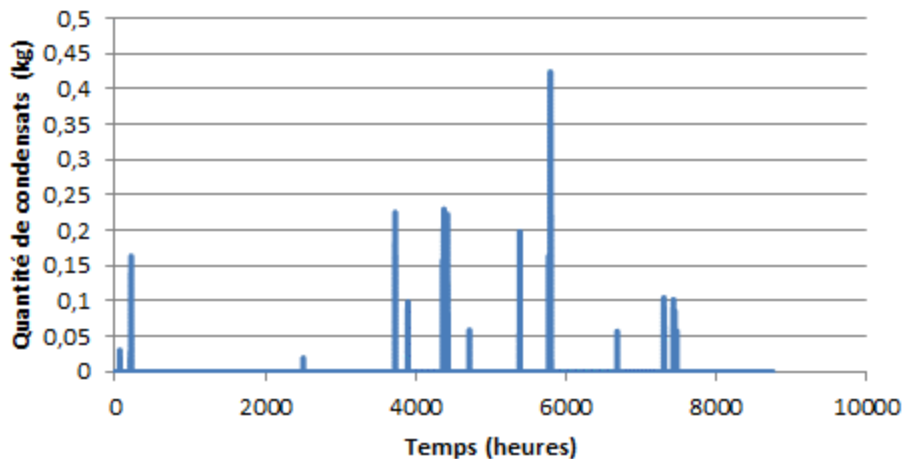
Modèle numérique (Pseudo 3D avec condensation)

Résultats : $e_a = 0,72 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $e_{\max} = 2,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$

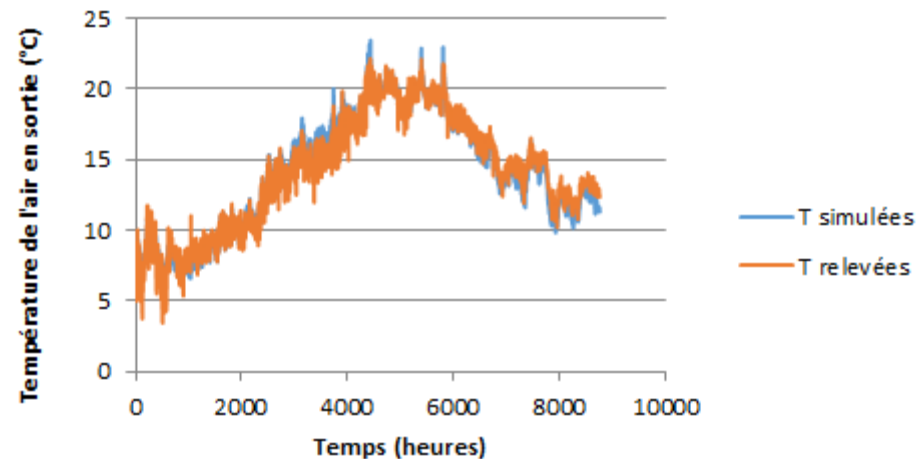
Condensation : 25,22 kg/an

Températures des condensats : de 3 à 23°C

Quantité de condensats produite en 2015



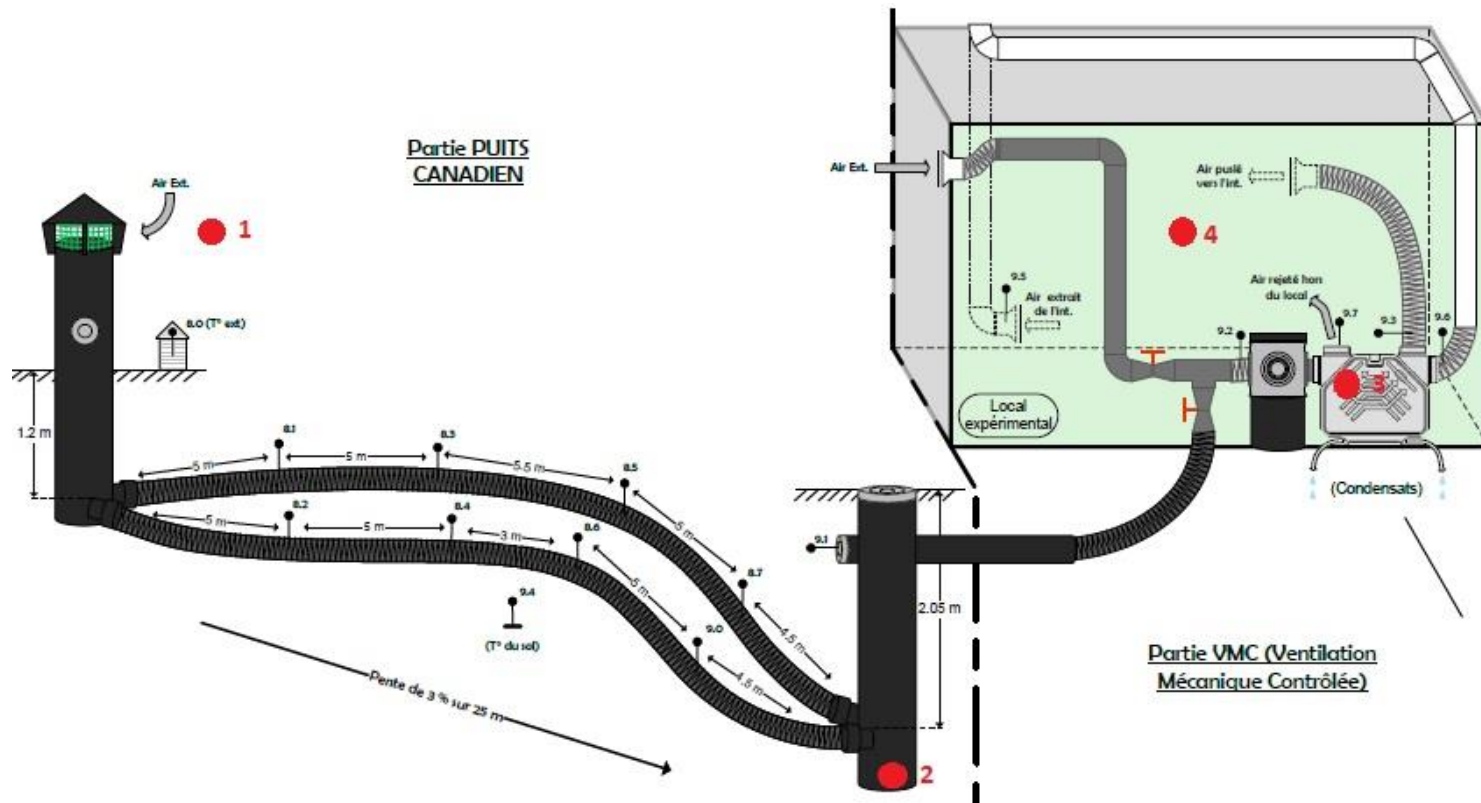
Température de l'air à la sortie du puits en 2015



Microbiologie

Campagnes d'échantillonnage

- 2 campagnes, 4 stations, 3 échantillons – 24 échantillons



Microbiologie

Analyses métagénomiques

- Amplification des ARNr 16S à partir d'amorces universelles Fungi, Bactérie, Protozoaire par la technique de PCR
- Adjonction d'un tag ou étiquette de reconnaissance pour chaque échantillon.
- Multiplexage
- Séquençage haut-débit Illumina - Laboratoire externe
- Traitement des résultats par bioinformatique

Conclusions

Modèle pseudo 3D avec condensation

- Modèle validé par les relevés expérimentaux
- Condensation présente (3 à 23°C) – développement de microorganismes psychrophiles
- Risque sanitaire faible – filtration

Merci pour votre attention