

Modélisation hydro-thermique d'un système géothermique : l'échangeur air-sol et le sol environnant

Wael ZEITOUN¹, Jian LIN^{2*}, Vincent MAGNET², Monica SIROUX³

¹Lebanese American University, Chouran Beirut : 1102 2801, Lebanon

² Laboratoire ICUBE, IUT Robert Schuman, 72, Route du Rhin, 67400, Illkirch-Graffenstaden

³ Laboratoire ICUBE, INSA Strasbourg, 24 Bd. de la Victoire, 67000 Strasbourg

*(auteur correspondant : jlin@unistra.fr)

Résumé - Pour les systèmes géothermiques de surface, le transfert d'humidité de sol autour de l'échangeur a un impact important sur le transfert thermique du système. Cependant, dans la littérature, très peu d'études ont été menées sur la modélisation du transfert thermique et hydrique du sol autour des systèmes géothermiques. Notre étude se concentre sur le développement et la mise en œuvre d'une simulation numérique couplée hydro-thermique pour les échangeurs air-sol (Earth-Air Heat Exchangers, EAHE), en utilisant l'environnement éléments finis MOOSE (Multiphysics Object-Oriented Simulation Environment). Elle passe en revue divers modèles existants pour les systèmes géothermiques peu profonds, en soulignant leur focalisation sur le transfert de chaleur ou sur les transferts couplés de chaleur et d'humidité. La simulation couplée développée dans ce travail intègre des formulations mathématiques détaillées et prend en compte les propriétés du sol et de l'air, les conditions aux limites ainsi que les conditions initiales, afin de représenter fidèlement des scénarios réels. Un effort significatif a été consacré au développement et à la validation de l'algorithme de simulation, qui a montré une bonne concordance avec les données expérimentales, confirmant ainsi la fiabilité du modèle pour prédire le comportement des EAHE.

Nomenclature

C_p	capacité thermique volumique, $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$	q	flux énergétique, $J \cdot m^{-2}$
D	diamètre de conduit, m	s	abscisse curviligne, m
D_θ	diffusivité d'humidité du sol, $m^2 \cdot s^{-1}$	S	section du conduit, m^2
e	densité d'énergie, $J \cdot m^{-3}$	v	vitesse du fluide, $m \cdot s^{-1}$
F	coefficient de perte de charge	z	profondeur du sol, m
H	charge du fluide, m	<i>Symboles grecs :</i>	
h	coefficient de convection, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	λ	conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
J	perte de charge, m	θ	teneur en eau volumique, $m^3 \cdot m^{-3}$
K	conductivité hydraulique du sol non saturé, $m \cdot s^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
k_{sin}	perte de charge singulière répartie linéique,	<i>Indices et exposants :</i>	
T	température, K	AB	entre point A et point B
L	longueur, m	$wall$	paroi du conduit
Q	énergie, J		

1. Introduction

La performance des échangeurs air-sol (EAHE) est étroitement liée aux fluctuations de l'environnement environnant. Plusieurs facteurs jouent un rôle crucial, notamment la température et l'humidité de l'air ambiant, les niveaux d'humidité autour du conduit, ainsi que les pro-

priétés thermophysiques du sol et du conduit. La distribution de l'humidité dans le sol est influencée par divers mécanismes de transfert de l'humidité dans les milieux poreux. Par exemple, lors d'événements pluvieux, l'eau s'infiltre dans le sol, guidée par les propriétés hydrauliques déterminées par la composition et le type de sol. Ce mouvement de l'eau affecte les propriétés thermophysiques du sol, influençant ainsi le transfert de chaleur entre le conduit et le sol. Pour ces raisons, le transfert d'humidité dans le sol autour de l'EAHE doit être soigneusement modélisé afin d'obtenir une représentation précise de la performance des EAHE dans les simulations numériques.

Les approches de modélisation numérique ont progressivement augmenté en complexité pour mieux représenter le comportement des EAHE. TITTELEIN ET AL. [1] ont proposé un modèle numérique basé sur la discrétisation de l'EAHE en sections perpendiculaires au conduit et la résolution du problème de conduction à l'aide de la méthode des facteurs de réponse, permettant de réduire le temps de calcul. Cependant, le transfert couplé de chaleur et d'humidité ainsi que les propriétés variables de l'air n'ont pas été pris en compte. CUNY ET AL. [2] ont développé un modèle bidimensionnel par éléments finis évaluant l'influence des revêtements de sol et de la teneur en humidité sur la performance thermique des EAHE, validé expérimentalement. Toutefois, les propriétés de l'air ont été supposées constantes et le transfert d'humidité du sol n'a pas été modélisé dynamiquement. À la place, les événements pluvieux ont été reproduits expérimentalement pour générer des profils d'humidité du sol, qui ont ensuite été imposés dans les simulations, une méthode nécessitant des données étendues sur l'humidité du sol pour chaque événement. TAURINES ET AL. [3] ont introduit un modèle tridimensionnel par volumes finis dépendant du temps, couplé aux transferts de chaleur, de vapeur et de liquide dans le sol à l'aide d'une formulation basée sur la charge matricielle. Cependant, ce modèle a été développé pour une configuration spécifique et ne tenait pas compte des propriétés variables de l'air à l'intérieur de l'échangeur. GAN [4] a développé un modèle numérique tridimensionnel général intégrant le transfert transitoire de chaleur et d'humidité avec des propriétés de sol variables dans le temps et l'espace, ainsi que les interactions entre l'atmosphère, le sol et l'échangeur de chaleur. Ce modèle a été appliqué pour simuler le fonctionnement des EAHE pour le chauffage, le refroidissement et la ventilation. Néanmoins, les propriétés de l'air ont été supposées constantes le long du conduit. GAN [4] a également démontré que la négligence des interactions dynamiques entre l'échangeur et son environnement conduit à une surestimation substantielle de la performance thermique (jusqu'à 463 % pour un échangeur terre-liquide et plus de 100 % pour un EAHE), soulignant l'importance de prendre en compte les variations transitoires de l'humidité du sol induites par la pluie et l'infiltration, ainsi que les effets de l'écoulement d'air, tels que les pertes de charge associées aux longues longueurs de conduit, aux géométries complexes et aux composants mécaniques.

En s'appuyant sur les limites identifiées dans la littérature sur la modélisation des EAHE et le transfert d'humidité du sol, cette étude se concentre sur le développement d'un cadre de modélisation entièrement couplé intégrant le transfert de chaleur transitoire, le transfert d'humidité dans les sols non saturés et l'écoulement d'air au sein des systèmes EAHE.

2. Principe de modélisation de l'échangeur air-sol (EAHE)

2.1. Modélisation du transfert thermique du sol

L'équation aux dérivées partielles utilisée pour résoudre le champ de température dans le sol est dérivée du principe de conservation de la chaleur et de la loi de Fourier pour la conduction thermique dans les solides. Cette équation s'écrit :

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

où :

- C_p est la capacité thermique volumique (en $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), définie comme $C_p = \rho c_p$, avec ρ la densité du sol et c_p sa capacité thermique massique,
- λ est la conductivité thermique (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) du sol.

Dans cette étude, ces deux propriétés (C_p et λ) sont considérées comme variables dans le domaine de résolution, car elles dépendent de la teneur en eau du sol.

2.2. Modélisation du transfert hydrique du sol

Le modèle de transfert d'humidité est basé sur le modèle de transfert d'humidité de PHILIP ET DE VRIES [5]. Ce modèle repose sur l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (2)$$

Cette équation dépend de deux propriétés du sol :

- la conductivité hydraulique non saturée K ,
- la diffusivité isotherme de l'humidité D_θ .

Ces deux propriétés ont été discutées, et leurs méthodes d'estimation ont été expliquées dans [6]. K et D_θ dépendent de la teneur en eau volumétrique θ , et sont donc considérées comme variables dans le domaine de résolution.

2.3. Modélisation de l'air dans l'échangeur

La résolution des équations de Navier-Stokes en trois dimensions peut être coûteuse en termes de calcul. Il est généralement préférable de simplifier ces équations en un système unidimensionnel lorsque les conditions le permettent. Un régime permanent d'un écoulement turbulent (nombre de Reynolds $Re > 27000$) est considéré dans le modèle de l'air.

2.3.1. Équation de conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse en régime permanent est donnée par :

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = \nabla \rho \cdot \mathbf{v} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

En remplaçant par la vitesse moyenne du fluide (U) sur la section transversale du tube et en discrétisant l'écoulement unidimensionnel, on obtient la formule suivante :

$$\rho_i U_i - \rho_{i-1} U_{i-1} = 0 \quad (4)$$

2.3.2. Conservation de la quantité de mouvement

On réécrit le théorème de Bernoulli généralisé sous forme linéique en faisant tendre un point A vers un point B et en divisant par la longueur L . On note H la charge moyenne en temps sur une section S :

$$\frac{\partial H}{\partial L} + \lim_{L \rightarrow 0} \left(-\frac{H_e}{L} + \frac{J_{AB}}{L} \right) = 0. \quad (5)$$

Le terme $d_e = \lim_{L \rightarrow 0} H_e/L$ correspond à une densité linéique de charge gagnée par le fluide à cause d'une éventuelle machine apportant de l'énergie au fluide (ventilateur). Le dernier terme correspond à la version linéique de la perte de charge. On obtient donc :

$$\frac{\partial H}{\partial L} - d_e + \frac{F}{D} \frac{v^2}{2g} + k_{sin} \frac{v^2}{2g} = 0. \quad (6)$$

k_{sin} correspondant à la perte de charge singulière répartie sur la longueur de la singularité.

2.3.3. Conservation de l'énergie

La puissance noble perdue par le fluide et convertie en chaleur à cause de la viscosité vaut :

$$\Delta Q_{AB} = \rho g v S J_{AB}, \quad [\Delta Q_{AB}] = \text{J.s}^{-1}. \quad (7)$$

D'autre part, l'équation de conservation de l'énergie en régime stationnaire s'écrit :

$$\nabla e \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{q} = \sigma \quad (8)$$

avec $\mathbf{q}$ le flux de chaleur par conduction et σ le terme source compté positivement si le fluide gagne de la chaleur. On supposera ici que :

$$de = \rho c_p dT, \quad [e] = \text{J.m}^{-3} \quad (9)$$

avec c_p la capacité thermique massique de l'air, supposée constante. En détaillant le bilan d'énergie pour un tronçon $d\ell$ de puits, on obtient :

$$Sv \frac{\partial e}{\partial s} + S \frac{\partial q}{\partial s} = \sigma = \lim_{L \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Q_{AB}}{L} \right) + \pi D h_{wall} (T_{wall} - T). \quad (10)$$

Le premier terme du membre de droite correspond à la chaleur gagnée par le fluide à cause des pertes de charges, et le dernier terme correspond à l'énergie gagnée grâce à l'échange convectif avec la paroi du mur. On a finalement :

$$-Sv \frac{\partial e}{\partial s} - S \frac{\partial q}{\partial s} + S \rho g v \left[\frac{F}{D} \frac{v^2}{2g} + k_{sin} \frac{v^2}{2g} \right] + \pi D h_{wall} (T_{wall} - T) = 0, \quad (11)$$

Le coefficient de convection h_{wall} sera calculé à l'aide d'une corrélation expérimentale (Mac Adams ou Dittus-Boettler) valable pour le cas des conduites circulaires en convection forcée :

$$h_{wall} = \frac{\lambda Nu}{D}, \quad Nu = A Re^n Pr^m, \quad Re = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (12)$$

avec $A = 0.023$, $n = 0.8$, $m = 0.4$.

2.4. Algorithme général de modélisation

L'algorithme représenté dans Fig. 1 décrit le processus complet de simulation des échangeurs air-sol (EAHE) dans le code élément finis MOOSE (Multiphysics Object-Oriented Simulation Environment), intégrant plusieurs étapes de calcul pour garantir la précision et la cohérence. Le processus commence par une phase d'initialisation, où les fichiers d'entrée et le maillage sont lus, définissant ainsi le domaine de calcul. Le sol est initialisé avec les conditions initiales respectives. Le modèle d'écoulement d'air est initialisé pour assurer la cohérence du maillage entre le domaine 3D du sol et le domaine 1D de l'écoulement d'air, identifier les nœuds du sol à utiliser pour la température de paroi et calculer l'abscisse curviligne le long du conduit.

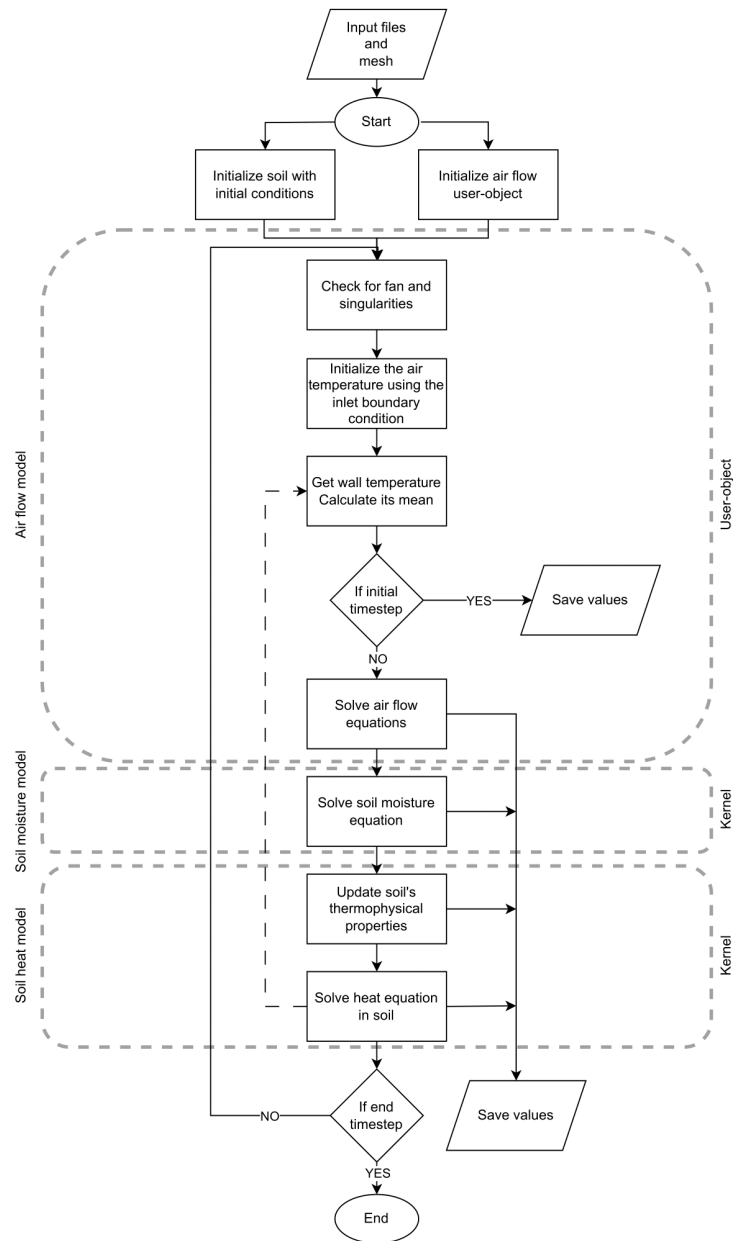


Figure 1 : Algorithme de simulation des échangeurs air-sol (EAHE).

3. Géométrie et maillage du modèle EAHE

3.1. Géométrie de la simulation

La géométrie du système réel comporte certaines spécifications techniques qui n'ont pas été intégrées dans la géométrie de simulation. En effet, les parties d'entrée et de sortie du conduit enterré, qui sont verticales et pénètrent dans le sol jusqu'à la profondeur du conduit, n'ont pas été modélisées. Cette omission est justifiée par le fait que les échanges thermiques dans ces sections sont considérés comme négligeables, la température du sol près de la surface étant proche de celle de l'air ambiant. L'épaisseur du conduit n'a pas été prise en compte dans la géométrie, car son effet est implicitement intégré dans la modélisation des échanges thermiques entre l'air et le sol.

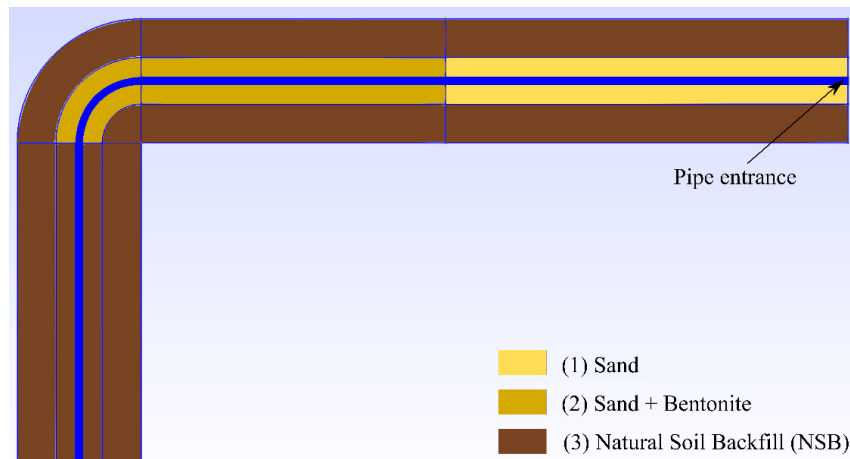


Figure 2 : Vue de dessus de la géométrie de simulation de l'échangeur air-sol (EAHE)

Outre ces simplifications, les trois sections de l'échangeur air-sol (EAHE) expérimental avec différents types de sol d'enrobage ont été modélisées dans la géométrie de simulation selon les dimensions réelles du système : les sections (1) et (2) mesurent chacune 10,4 m et la section (3) mesure 8,2 m. Fig.2 montre la vue de dessus de la géométrie de l'EAHE.

3.2. Maillage du modèle EAHE

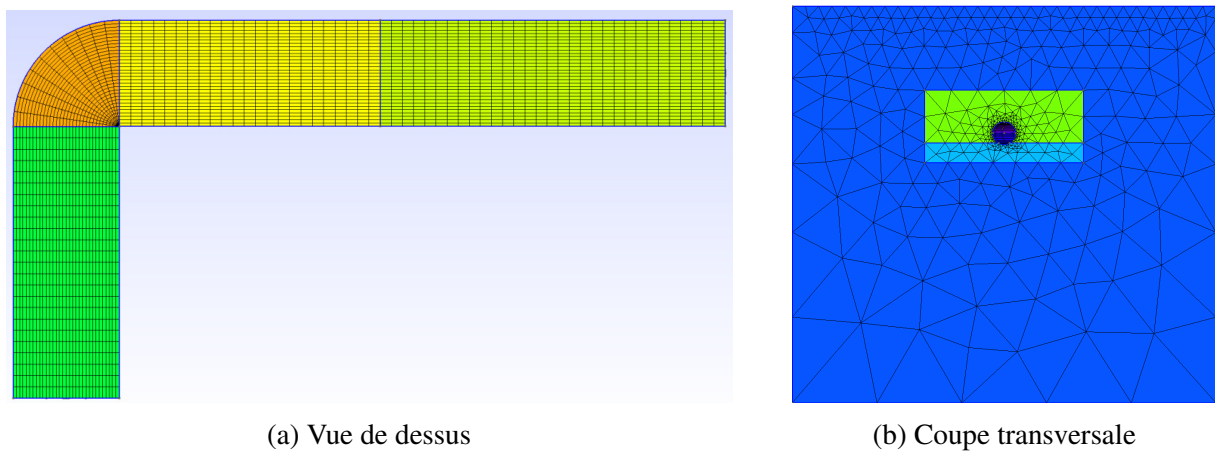


Figure 3 : Maillage du modèle de l'échangeur air-sol (EAHE)

Après une analyse de maillages avec 3 différentes tailles de mailles (nombre d'éléments = 71200, 95200 et 120000), comme la différence maximale entre les résultats est inférieure à 1 %, le maillage avec le nombre d'éléments = 71200 a été retenu pour la simulation. Fig. 3 montre le maillage en 3D du modèle EAHE.

4. Validation du modèle EAHE avec données expérimentales

La simulation a été réalisée sur une période d'une semaine, du 12 au 18 janvier 2015. Plusieurs types de données ont été obtenus à partir de cette simulation de l'échangeur air-sol (EAHE), incluant les variables liées à l'écoulement d'air (vitesse, pression et température) ainsi

que les variables liées au domaine du sol (teneur en eau et température). En plus de ces variables, la variation des propriétés du sol a également été enregistrée et peut être consultée. En raison des contraintes de longueur de l'article, seules l'évolution de la température de l'air et l'humidité du sol seront présentées.

4.1. Température de l'air

La Fig.4 ci-dessous montre la variation de la température d'entrée en fonction du temps ainsi que la comparaison entre les températures de sortie simulées et mesurées à la sortie du conduit. Il est à noter qu'à la sortie du conduit, un capteur de température d'air (A2) est présent en plus de celui situé au milieu de la troisième section de l'EAHE. Comme attendu d'après la section précédente, le graphique montre un très bon accord entre les données mesurées et simulées. La différence entre les deux augmente légèrement vers la fin du conduit. Malgré cela, la différence n'excède pas 1,5 °C dans le pire des cas, et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) indique un bon accord entre les données.

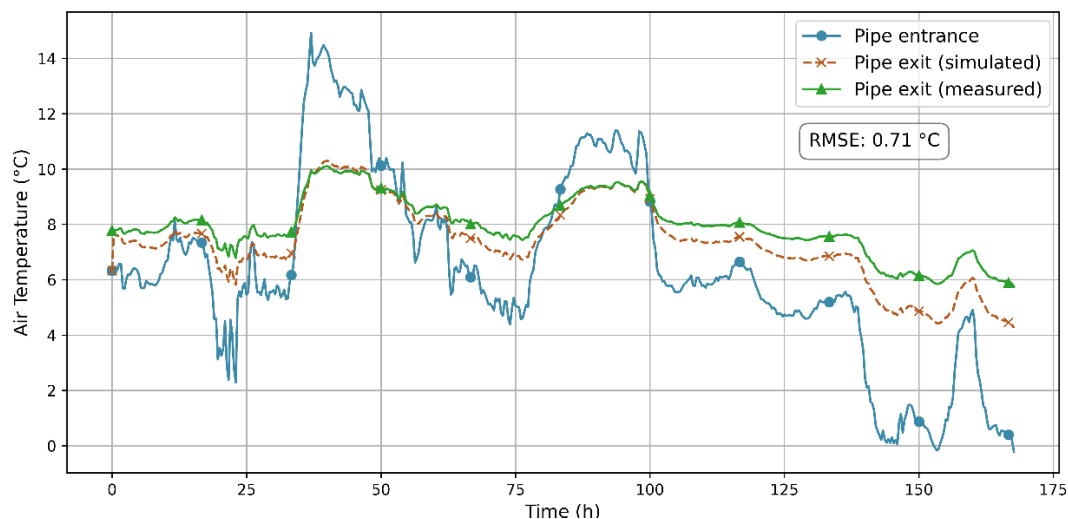


Figure 4 : Comparaison des températures mesurées et simulées à l'entrée et à la sortie de l'EAHE

4.2. Humidité du sol

Pendant la période étudiée, deux capteurs d'humidité étaient encore fonctionnels, mais le capteur de la section en sable-bentonite a cessé de fonctionner. Il est déjà établi que la teneur en eau volumétrique reste presque constante tout au long de l'année dans cette section. Les données enregistrées par les deux autres capteurs ont été comparées aux résultats de simulation de la teneur en eau volumétrique, et les courbes sont présentées dans Fig.5 ci-dessous. Comme le montre cette figure, il existe une différence entre les deux courbes dans la première section : la simulation montre une augmentation progressive, tandis que les données mesurées présentent une hausse brutale. Finalement, les deux courbes deviennent très proches. Dans la dernière section, la comparaison est meilleure, bien qu'il soit encore visible que l'augmentation simulée est plus lente que celle des valeurs mesurées par les capteurs. Cette augmentation brutale de l'humidité de sol dans la première section peut être liée à la présence d'une mince couche de gravats (environ 20 cm) au dessus de la couche d'enrobage de l'échangeur, qui n'est pas prise

en compte dans la modélisation numérique.

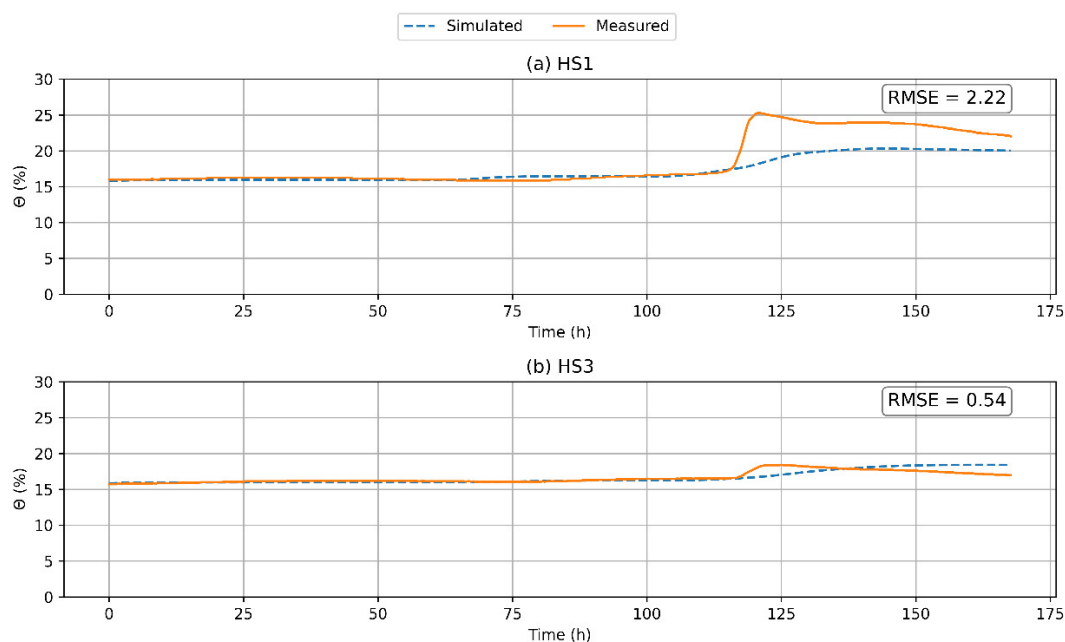


Figure 5 : Comparaison des variations de la teneur en eau volumétrique entre les valeurs simulées et mesurées dans les sections 1 (a) et 3 (b).

5. Conclusion

Ce travail présente une nouvelle approche de simulation couplée des EAHE, développée pour surmonter des limitations des modèles existants dans la littérature. Ce modèle innovant intègre :

- Un couplage complet entre les transferts transitoires de chaleur et d'humidité dans les sols non saturés.
- Une représentation tridimensionnelle des géométries complexes des conduits et de leur environnement.
- La prise en compte des variations spatio-temporelles des propriétés thermophysiques du sol et de l'air.

Références

- [1] P. Tittlein, A. Achard, E. Wurtz, Modelling earth-to-air heat exchanger behaviour with the convolutive response factors method, *Applied Energy*, vol.86 (2009), 1683-1691.
- [2] M. Cuny, J. Lin, M. Siroux, V. Magnenet, C. Fond, Influence of coating soil types on the energy of earth-air heat exchanger, *Energy and Buildings*, vol. 158 (2018), 1000-1012.
- [3] K. Taurines, S. Giroux-Julien, M. Farid, C. Ménézo, Numerical modelling of a building integrated earth-to-air heat exchanger, *Applied Energy*, Vol. 296(2021), 117030.
- [4] G. Gan, Dynamic thermal simulation of horizontal ground heat exchangers for renewable heating and ventilation of buildings, *Renewable Energy*, Vol. 103 (2017), 361-371.
- [5] J. R. Philip, D. A. De Vries, Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Transactions, *American Geophysical Union*, Vol. 38 (1957), 222.
- [6] W. Zeitoun, J. Lin, V. Le Houerou, M. Siroux, Study of hydro-thermal transfer in shallow geothermal system : experimental determination of isothermal moisture diffusivity of soils, *European Geothermal Congress 2025*, Zurich (Switzerland), 6-10 october 2025.