

# Étude expérimentale et numérique d'un échangeur air/sol intégré au bâtiment

Kévin TAURINES<sup>1\*</sup>, Christophe MÉNÉZO<sup>2</sup>, Stéphanie GIROUX-JULIEN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, CETHIL UMR 5008, INSA de Lyon - Villeurbanne

<sup>2</sup> LOCIE UMR 5271, Université de Savoie Mont-Blanc - Le Bourget-du-Lac

<sup>3</sup> Université de Lyon, CETHIL UMR 5008, Université Claude Bernard Lyon 1 - Villeurbanne

\*(auteur correspondant : kevin.taurines@insa-lyon.fr)

**Résumé** - Les échangeurs air-sol (EAHE) sont des réseaux de canaux enterrés qui permettent de préchauffer ou rafraîchir l'air entrant dans le bâtiment. Ces systèmes semblent être pertinents pour réaliser des économies d'énergie mais souffrent souvent d'un manque de place et d'un surcoût dus à l'enfouissement des tuyaux. L'échangeur considéré ici est une fondation géothermique dotée d'une large cavité qui lui confère en plus de sa fonction structurelle une fonction thermique. Deux fondations ont été mises en oeuvre et instrumentées sur un EHPAD et un modèle numérique 3D a été développé en parallèle. La confrontation expérimentale / numérique de la température d'air dans la fondation montre un écart maximal de 1.5°C.

## Nomenclature

$a$	albedo, -	<i>Symboles grecs</i>	
$C$	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$\epsilon$	émissivité, -
$CE$	transferts convectifs, $W.m^{-2}$	$\lambda$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$h_c$	coefficient d'échange convectifs, $W.m^{-2}.K^{-1}$	$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$LR$	transferts radiatifs GLO, $W.m^{-2}$	$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$
$\dot{m}$	débit massique, $kg.s^{-1}$	$\phi$	débit volumique, $m^3.s^{-1}$
$P$	puissance, $W$	<i>Indices et exposants</i>	
$S$	surface, $m^2$	<i>air</i>	air circulant
$SR$	transferts radiatifs CLO, $W.m^{-2}$	<i>amb</i>	air ambiant
$T$	température, $K$	<i>ciel</i>	voute céleste
$w$	humidité absolue, $kg_{vap}.kg_{airsec}^{-1}$	$i$	maille considérée
		<i>paroi</i>	paroi de la cavité
		<i>vap</i>	vapeur

## 1. Introduction

Les échangeurs air-sol (plus connus sous le nom de puits canadiens) ont été largement étudiés à la fois par des approches numériques [1] [2] [3] [4] et expérimentales [5] [6] [7] [8]. Dans [1], les auteurs ont développé un modèle couplant les transferts de masse et de chaleur dans le volume de sol considéré et dans les tuyaux. Les équations prennent en compte des transferts 2D dans les directions axiale et radiale. Les conditions aux limites ne sont pas explicitement modélisées, une température de sol non perturbé est utilisée à la place. Ce modèle est validé sur des données expérimentales pour une période étendue sur 13 journées estivales. Gauthier et al. [2] ont mené une étude numérique basée sur un modèle 3D en différences finies d'un EAHE situé sous un bâtiment. Ce modèle permet de représenter des propriétés non homogènes de sol, des conditions aux limites dynamiques et des transferts de chaleur et d'humidité au sein des gaines ventilées. Les transferts de masse dans le sol ont été considérés négligeables par les auteurs. Ce modèle a également été validé sur des données expérimentales, mais une fois encore

sur une période relativement courte de 3 jours. Trzaski et Zawada [3] ont développé un modèle transitoire quasi-3D en éléments finis, prenant en compte les transferts de chaleur sensible et la présence d'humidité dans le sol via un facteur correctif sur la conductivité thermique.

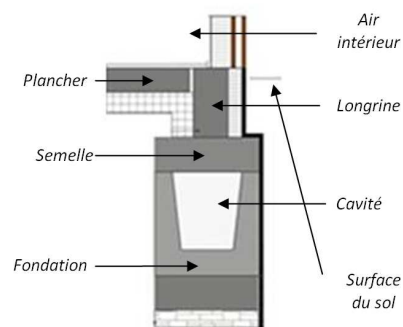
Hollmuller a développé dans son travail de thèse [5] à la fois un modèle analytique et un modèle 3D en éléments finis d'échangeur air-sol. Le modèle analytique a pour vocation de dimensionner et de fournir une meilleure compréhension des échangeurs air-sol, mais n'est pas très flexible pour représenter des systèmes dont la géométrie est complexe. Son modèle numérique palliant cette limite est basé sur les mêmes hypothèses que le modèle de Gauthier et al. [2]. Il a également mené une étude expérimentale sur plusieurs bâtiments et serres horticoles, qui lui ont servi à valider ce modèle sur des périodes de plusieurs mois. Dans [4], [6] et [7], les auteurs résolvent les équations de Navier-Stokes pour décrire l'évolution de la température et la vitesse d'air dans les conduites. La teneur en eau n'est pas considérée, et une température de sol non perturbé sert de condition aux limites. Les auteurs de [6] et [7] ont également mis au point une étude expérimentale leur permettant de valider leur modèle sur des périodes de 2 jours.

Le système étudié ici, i.e. une fondation géothermique, répond à la problématique du manque de place pour l'intégration d'échangeur air-sol aux bâtiments. Cette fondation préfabriquée en béton creuse a été développée par l'entreprise Patrick CESHIN. A la lumière des travaux référencés ci-dessus, cet article présente le modèle numérique implémenté (2), l'instrumentation mise en oeuvre (3). Puis les premiers résultats expérimentaux (résultats) que l'on confronte à ceux obtenus par le modèle. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet FUI 16 FONDA-THERM, visant à terme une véritable intégration énergétique de ce composant au bâtiment et ce à travers différents types de couplages (PAC, composants PVT, etc.).

## 2. Modélisation de la fondation



(a) Vue pendant la pose



(b) Vue en coupe

Figure 1: Présentation du composant Fondatherm

L'élément modélisé dans cet article est celui présenté sur la Figure 1 : la fondation mesure 45m de long, sa cavité a une section de 35 cm x 45 cm et est placée à 1.6 m de profondeur. Le modèle s'appuie principalement sur ceux développés par Hollmuller [5] et Gauthier et al. [2]. Il est basé sur la méthode des volumes finis. Le maillage est cartésien compte tenu de la géométrie de la fondation. L'élément de sol dans lequel la fondation est modélisée mesure 4,6m x 45m x 4m et est constitué de matériaux de type "sable" sur les 90 premiers cm (en surface), et de type "pierre" sur le reste. Une moitié de la face supérieure du sol est en contact avec l'environnement, c'est à dire exposée directement aux conditions météorologiques. La

	Conductivité ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	Masse volumique ( $kg.m^{-3}$ )	Chaleur massique ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
Sable	1,97	1650	800
Pierre	2,3	1500	900
Béton armé	2,9	2430	880
Polystyrène	0,03	30	1400

Tableau 1 : Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés

deuxième moitié est en contact avec le plancher du bâtiment. Le plancher, interface entre le volume de sol et l'air intérieur est simplement modélisé par une dalle béton parallélépipédique de 12cm d'épaisseur reposant sur une couche de polystyrène extrudé de 6cm.

Les propriétés thermophysiques de l'ensemble des matériaux sont répertoriées dans le Tableau 1. Le maillage retenu est celui présenté sur la Figure 2a. A proximité de la fondation, où les sollicitations thermiques sont caractérisées par les constantes de temps les plus rapides, le maillage est resserré : la taille caractéristique d'une maille est 9cm x 4.5m x 10cm. Au total, 7060 mailles servent à discrétiser spatialement le sol et la fondation.

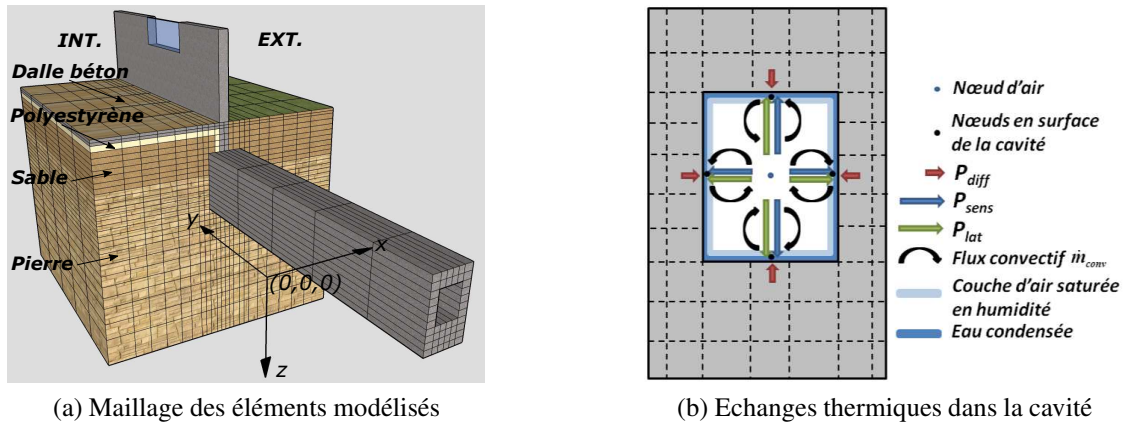


Figure 2: Maillage et phénomènes physiques retenus pour le modèle

Les transferts de chaleur dans le sol sont supposés purement conductifs, et traités en 3D, selon l'équation 1.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Les conditions aux limites thermiques suivantes sont utilisées dans le modèle :  $\frac{\partial T}{\partial y}|_{x=0} = \frac{\partial T}{\partial y}|_{x=4.6} = \frac{\partial T}{\partial y}|_{y=0} = \frac{\partial T}{\partial y}|_{y=45} = 0$  pour les bords verticaux,  $T(x, y, z = 4m) = 19 + 0.5 \exp\left(-\frac{4}{1.49}\right) \cos\left(2.10^{-7}t - \frac{4}{1.49}\right)$  pour le fond [1], et  $T(z = 0, 0 < x < 2.3) = 20^\circ C$  sur la moitié de la surface du sol donnant sur l'intérieur du bâtiment. Sur la moitié de la surface exposée au climat, la condition est donnée par l'équation 2.

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z}|_{z=0, 2.3 < x < 4.6} = CE_i + LR_i + SR_i \quad (2)$$

où  $\lambda_i$  et  $T_i$  sont respectivement la conductivité et la température de la surface du sol,  $CE_i = h_c (T_{amb} - T_i)$  le flux convectif échangé avec  $h_c = 5.678 \left(0.775 + \frac{0.35V_{vent}}{0.304}\right)$  [10],  $LR_i = \sigma \epsilon_i (T_{ciel}^4 - T_i^4)$  le flux radiatif grandes longueurs d'ondes avec  $T_{ciel} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5}$  la température de ciel, et  $SR_i = (1 - a) G$  les échanges radiatifs courtes longueurs d'ondes avec  $a$  l'albedo du sol et  $G$  l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal. Enfin, la paroi interne de la fondation (dans la cavité) échange de la chaleur sensible et latente avec l'air circulant à l'intérieur. La température et l'humidité absolue de l'air en chaque maille dépend de l'état de la précédente selon les équations 3 et 4.

$$T_{air,i+1} = T_{air} - \frac{P_{sens,i}}{(C_{air} + C_{vap}w_{air,i}) \cdot \rho_{air,i}\phi_{air}} \quad (3)$$

$$w_{air,i+1} = w_{air,i} - \frac{\dot{m}_{vap,i}}{\rho_{air,i}\phi_{air}} \quad (4)$$

Le flux de vapeur  $\dot{m}_{vap} = (w_{air} - w_{paroi}) \frac{S_{paroi}h}{C_{air}}$  est donné par la méthode de Lewis, et est schématisé sur la Figure 2b. Les équations 2 à 4 sont résolues de façon itérative. Le pas de temps de simulation est fixé à 1h dans la suite de cet article. Il est contraint par l'échantillonnage des fichiers météorologiques utilisés.

### 3. Étude expérimentale à l'échelle 1 : Instrumentation d'un EHPAD

Dans le cadre du projet FONDATHERM, l'entreprise Patrick Ceschin a installé sur un Etablissement Hospitalier pour Personnes Âgées Dépendantes (EHPAD) situé à Val-de-Mercy dans l'Yonne deux fondations de 45m de long enterrées à 1.6m de profondeur. Chacune est connectée à une centrale de traitement d'air (CTA) double flux avec échangeur thermique. Ces installations servent à alimenter en air frais deux ailes du bâtiment dont la surface est d'environ 430 m<sup>2</sup>. Ce bâtiment est occupé depuis début janvier 2015. Les positions des fondations et des CTA sont explicitées sur la Figure 3a. Une vue globale du bâtiment est également donnée sur la Figure 3b. L'air circulant dans la fondation est extrait par des prises situées à environ 8 m des entrées des fondations. De même, deux gaines aérauliques isolées d'une vingtaine de mètres chacune relie les sorties des fondations à l'entrée des CTA. Le débit d'air circulant dans chacune des fondations et injecté ensuite dans chacune des ailes du bâtiment est constant et d'environ 450 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Cela correspond à un renouvellement d'air de l'ordre d'un volume par heure.

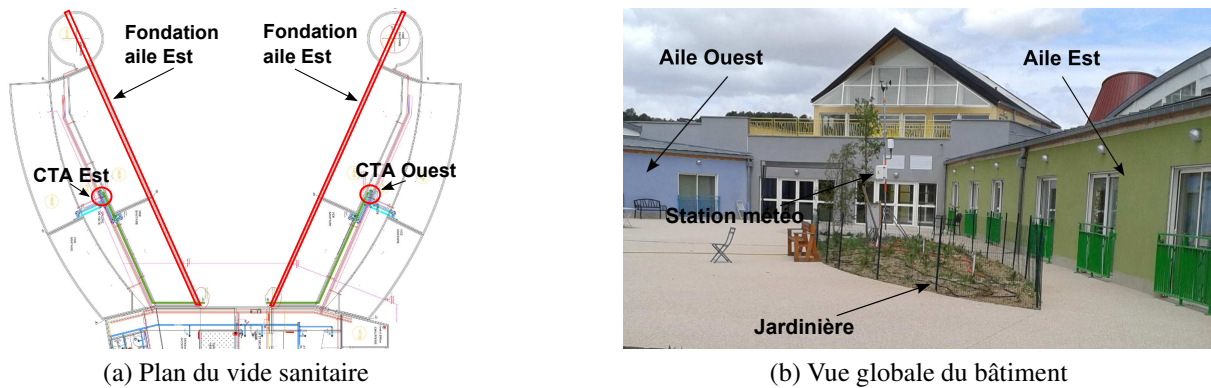


Figure 3: Présentation du site étudié

### 3.1. Présentation de l'instrumentation mise en place

Ce bâtiment a fait l'objet d'une instrumentation complète : les fondations, mais aussi leur environnement proche est étudié. L'instrumentation a été conçue afin de prendre en compte au mieux les spécificités de la fondation par rapport aux échangeurs air-sol traditionnels, à savoir l'influence simultanée des sollicitations climatique, souterraine et provenant du bâtiment, la faible profondeur d'enfouissement, la largeur importante de la cavité et la paroi en béton. Pour ces raisons, un suivi en température mais aussi en teneur en eau du sol a été mis en place, et ce pour plusieurs profondeurs et sections le long d'une fondation, du côté extérieur comme du côté du vide sanitaire. Un suivi en température des parois dans la cavité de la fondation a également été réalisé. Les divers flux d'air entrant et sortant des deux CTA ont été instrumentés, ainsi que la consommation électrique du ventilateur. Les principales données climatiques locales sont aussi enregistrées toutes les 10 minutes. L'ensemble des sondes de mesure ainsi que leurs principales caractéristiques sont répertoriées dans le Tableau 2. Les premiers résultats issus des mesures réalisées sont présentés ci-dessous.

### 3.2. Premiers résultats expérimentaux et confrontation avec le modèle

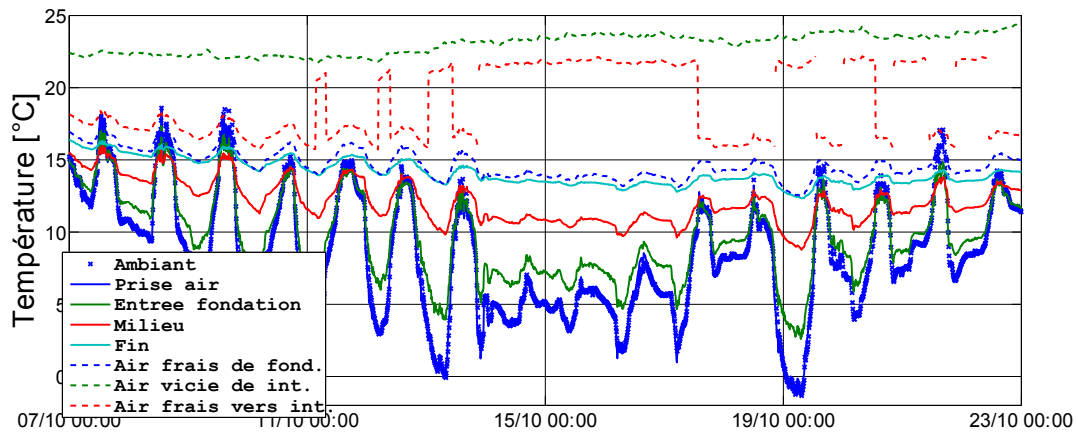
La période du 7 au 23 octobre 2015 est analysée sur les graphes qui suivent. Les résultats pour les deux fondations Est et Ouest étant très similaires sur cette période, seuls ceux sur la fondation Ouest seront présentés ici.

La Figure 5 représente les sollicitations météorologiques ainsi que la température du sol sur la période considérée. L'onde thermique extérieure est amortie par le sol avoisinant. L'amplitude de la température en sortie de la fondation est par exemple divisée par 5 par rapport à la température extérieure. La température du sol au niveau de la fondation (1.6 m de profondeur) se situe entre 15.8 et 18.2 °C sur l'ensemble de la période, alors que la température d'air ambiant évolue entre -1.3 et 18.6 °C. Sur la période étudiée, le rayonnement solaire atteint 800  $W.m^{-2}$  pour les jours les plus ensoleillés et 200  $W.m^{-2}$  pour les moins ensoleillés.

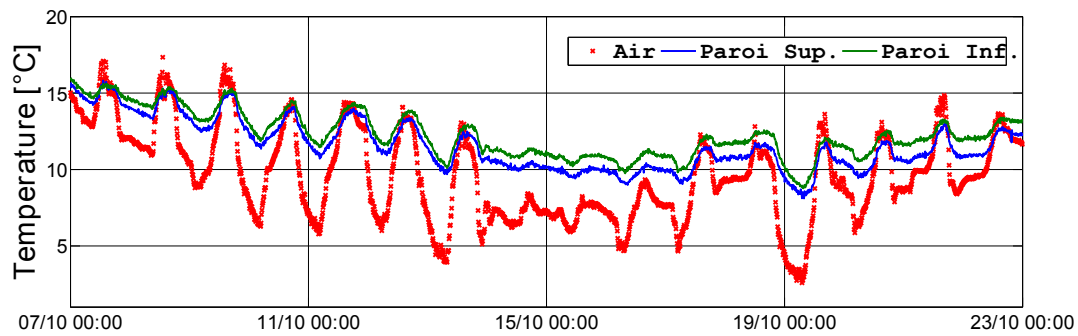
La Figure 4 met en évidence que le fonctionnement de la fondation correspond tout à fait à celui attendu pour une période hivernale : l'élévation de la température de l'air extérieur (croix bleue ou ligne bleue pleine) atteint parfois 12 °C. La température de l'air en sortie de la fondation (ligne bleue ciel) est relativement stable et comprise entre 12.5 et 17.5 °C. La Figure 4a montre que cet air est légèrement réchauffé (maximum 1 °C) lors de son passage dans la gaine aéraulique vers l'entrée de la CTA (tirets bleus). Lorsque sa température est inférieure à 15°C, la batterie de préchauffage de la CTA se déclenche. Plus de détails sont donnés sur les Figures 4b et 4c où les températures d'air et des parois supérieures et inférieures de la cavité sont représentées.

Un écart d'environ 1°C entre la paroi inférieure et supérieure est observé sur la première demi-longueur et devient négatif sur la partie restante de la fondation. Ce phénomène peut pour l'instant être attribué au fait qu'un flux thermique provient de la longrine, et qu'une partie de l'énergie qui sert à réchauffer l'air provient du bâtiment lui-même. Ce type de phénomène avait déjà été mis en évidence pour des échangeurs air-sol classiques par Hollmuller [9] concernant le cas d'un système situé sous le plancher d'un bâtiment. L'auteur a montré que ce type de phénomène est préjudiciable à l'efficacité de ce système. Des données plus complètes, sur des périodes plus étendues doivent être analysées afin de mieux comprendre ce problème.

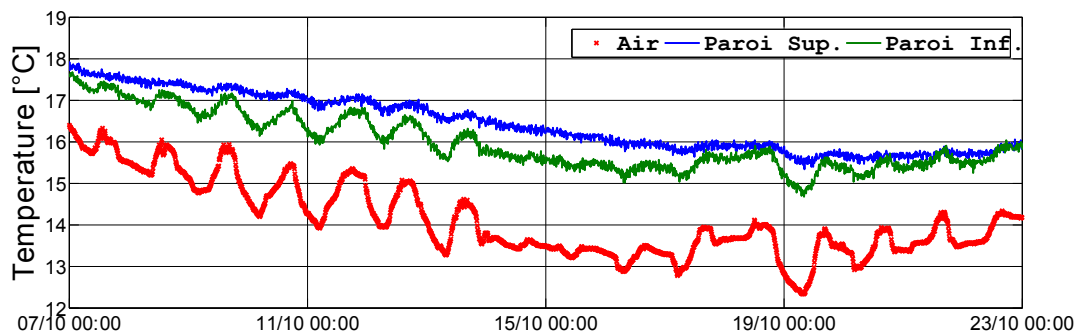
La confrontation du modèle présenté dans le paragraphe précédent à ces mesures est présentée sur la Figure 6. Les mesures de température et d'humidité relative de l'air ambiant et en entrée



(a) Général



(b) Entrée de la fondation



(c) Sortie de la fondation

Figure 4: Evolution de la température d'air lors de son passage dans la fondation Ouest

de la fondation, du rayonnement solaire et de vitesse de vent ont servi de données d'entrée au modèle. La durée de la simulation est de 21 minutes (dont 18 pour la construction et la réduction du système) avec un processeur Core i7 2.7GHz sous Windows 7. La dynamique des oscillations est relativement bien reproduite, mais un écart relativement important est observé entre mesures et prédictions obtenues, atteignant parfois plus de 1.5 °C. Plusieurs explications sont envisageables. Premièrement, peu d'informations sont disponibles sur le sol avoisinant la fondation. Sa complexité (multiplicité des couches, matériaux non homogènes, etc.) est un frein à sa caractérisation. Les valeurs attribuées à ses caractéristiques thermiques ne sont peut être donc pas représentatives. Ensuite, les transferts de masse dans le sol n'ont pas été pris en compte. Enfin le débit d'air a été supposé égal à celui annoncé lors du dimensionnement de la CTA, ce qui ne correspond pas forcément à la réalité. Des mesures ont été planifiées afin de le préciser.

Milieu instrumenté	Grandeur mesurée	Type et nombre de sondes	Précision	
Conditions météo	Temp. et hum. rel.	1 Sensirion SHT-75		
	Ray. solaire	3 pyran. Hukseflux LP02	±8%	
	Vitesse et dir. vent	1 aném.-gir. Young W. Sentry	±0.5m.s <sup>-1</sup>	
	Pluviométrie	1 pluvio. Young 52202	±3%	
Sol (aile Est)	Côté terrasse	Temp. et ten. en eau	12 Delta-T SM300	T : ±0.5°C
	Côté vide sanitaire	Temp. et ten. en eau	6 Delta-T SM300	θ : ±2.5%
Fondations	Surface cavités	Temp. de surface	24 Pt-100 Prosensor SPCT	±0.1°C
	Air circulant	Temp. et hum. rel.	8 Sensirion SHT-75	
CTA	Air frais de fondation	Temp. et hum. rel.	2 Sensirion SHT-75	T : ±0.5°C
	Air frais vers bât.	Temp. et hum. rel.	2 Sensirion SHT-75	HR : ±4%
	Air vicié de bât.	Temp. et hum. rel.	2 Sensirion SHT-75	
	Cons. élec.		2 compteurs MCI Contax	-

Tableau 2 : Instruments utilisés sur l'EHPAD étudié

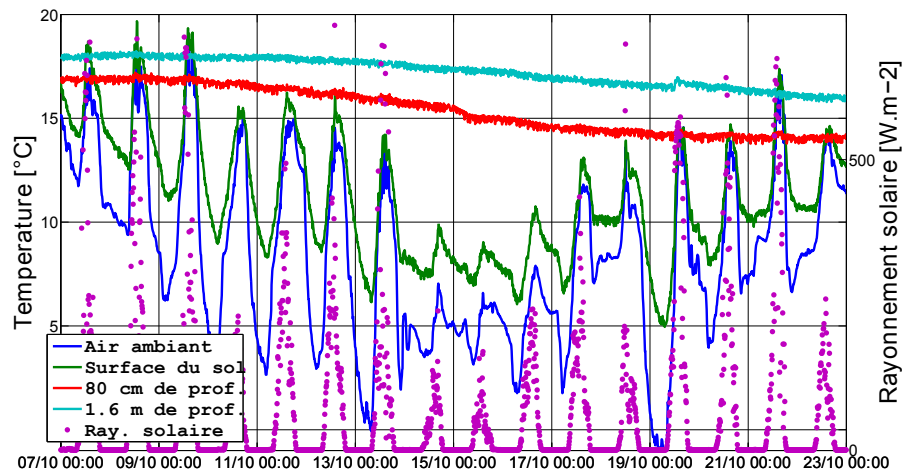


Figure 5: Sollicitations : données météo et températures du sol avoisinant

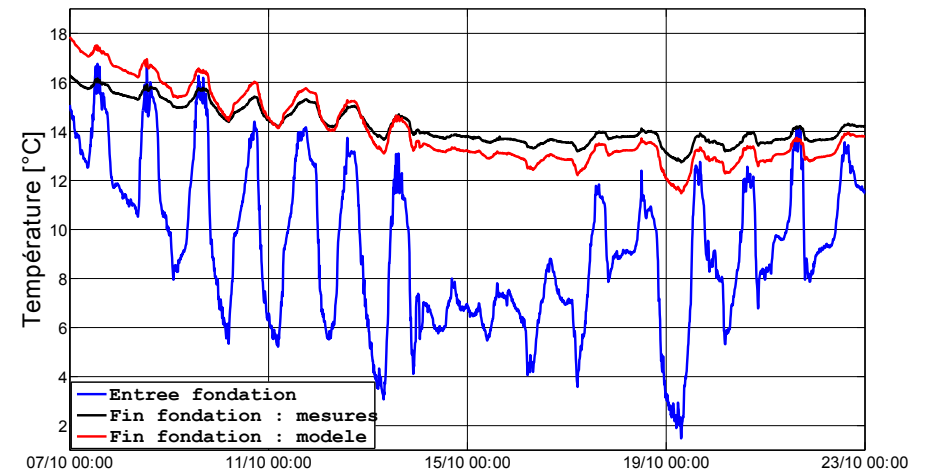


Figure 6: Confrontation données numériques / données expérimentales

## 4. Conclusion

Un modèle 3D de sol incluant une fondation géothermique ventilée a été présenté et confronté aux résultats d'une étude expérimentale menée sur un bâtiment neuf équipé de deux fondations géothermiques de 45 m de long. La performance de la fondation, bien que relative à la courte période étudiée ici (15 jours en octobre), est très intéressante. Le préchauffage de l'air est au maximum de 12 °C. Un phénomène de "pont thermique" ayant lieu au niveau des longrines du bâtiment semble observé et est susceptible de pénaliser l'efficacité du système.

Les écarts constatés entre les mesures et le modèle s'expliquent très certainement par l'utilisation de paramètres non représentatifs, notamment ceux permettant de caractériser le sol. Des méthodes d'optimisation seront utilisées afin de déterminer les paramètres les plus représentatifs. Ces résultats mettent également en exergue une déficience du modèle physique qui néglige la présence d'humidité dans le sol. Un modèle de transfert couplés de chaleur et de masse est à cet effet en cours de développement afin de considérer l'impact de la teneur en eau ce qui n'est jusqu'à présent que peu renseigné dans les travaux référencés.

## Références

- [1] G. Mihalakakou, M. Santamouris, D. Asimakopoulos, Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers, *Solar Energy*, 53 (1994b) 301-305.
- [2] C. Gauthier, M. Lacroix, H. Bernier, Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses, *Solar Energy*, 60 (1997) 333-346.
- [3] A. Trzaski, B. Zawada, The influence of environmental and geometrical factors on air-ground tube heat exchanger energy efficiency, *Building and Environment*, 46-7 (2011) 1436-1444.
- [4] R.S. Brum, J. Vaz, L.A.O. Rocha, E.D. Dos Santos, L.A. Isoldi, A new computational modeling to predict the behavior of Earth-Air Heat Exchangers, *Energy and Buildings*, 63 (2013) 395-402.
- [5] Pierre Hollmuller, *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique*, Université de Genève (2002).
- [6] V. Bansal, R. Misra, G.D. Agrawal, J. Mathur, Performance analysis of earth ?pipe ?air heat exchanger for winter heating, *Energy and buildings*, 41 (2009) 1151-1154.
- [7] V. Bansal, R. Misra, G.D. Agarwal, J. Mathur, Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied Energy*, 103 (2013) 1-11.
- [8] L. Ozgener, O. Ozgener, Energetic performance test of an underground air tunnel system for greenhouse heating, *Energy* 35 (2010) 4079-4085.
- [9] P. Hollmuller, B.M. Lachal, Air-soil heat exchangers for heating and cooling of buildings : Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance, *Applied Energy*, 119 (2014) 476-487.
- [10] V. Badescu, Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house, *Renewable Energy*, 32 (2007) 845-855.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la BPI finançant ce travail dans le cadre du projet Fondatherm - FUI 16.