

Modélisation d'une fondation géothermique ventilée naturellement par réduction de modèle.

Kévin TAURINES^{1,2*}, Christophe MENEZO², Stéphanie GIROUX-JULIEN³

¹Université de Lyon, CETHIL UMR 5008, INSA de Lyon, Villeurbanne

²Chaire INSA/EDF « Habitat et Innovations Energétique », Villeurbanne

³Université de Lyon, CETHIL UMR 5008, Université Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne

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

Résumé - Face aux exigences de confort thermique croissantes de la part des usagers des bâtiments mais aussi aux contraintes de rationalisation des consommations énergétiques, les systèmes passifs contribuant au conditionnement des ambiances apparaissent comme étant une solution prometteuse par rapport aux enveloppes statiques, standard de la réglementation actuelle. Les échangeurs air-sol (plus connus sous le nom de puits canadiens ou puits provençaux), permettent selon les besoins de préchauffer ou rafraîchir l'air extérieur injecté dans le bâtiment en bénéficiant de la capacité de charge et de décharge thermique du sol.

L'intégration de systèmes passifs en double-façade commence à émerger, en revanche celui de type puits canadien est assez limité. D'une part, ces composants souffrent souvent d'un manque de place sur le terrain d'implantation du bâtiment et d'un surcoût important nécessaire à l'enfouissement des gaines de ventilation. D'autre part, le système n'est pas complètement passif puisque son fonctionnement implique généralement le recours à une ventilation mécanique. C'est pourquoi cette étude envisage un couplage entre une cheminée solaire et un échangeur air-sol innovant composant d'enveloppe : une fondation géothermique. La cheminée solaire permet d'optimiser ce système de prétraitement de l'air, en réduisant la consommation électrique du ventilateur. En effet, en s'échauffant au sein de la cheminée, l'air va créer un tirage naturel dans le bâtiment engendrant ainsi une circulation naturelle dans l'échangeur. En outre, la fondation préfabriquée en béton, creuse, remplace la conduite classique d'un puits canadien (généralement en PVC). Puisque les fondations sont indissociables de tout bâtiment, la réalisation de tranchée ou de déblais/remblais supplémentaires devient inutile et l'emprise au sol du bâtiment est ainsi réduite.

L'objet de ce travail est donc le développement d'un modèle thermo-aérodynamique de la fondation géothermique, et de son couplage avec une cheminée solaire. Le modèle de fondation est dynamique et basé sur la méthode des volumes finis. Il prend en compte les transferts de chaleur sensible en 3D dans le sol, ainsi que les échanges sensibles et latents entre l'air circulant et les parois internes de la fondation. Le modèle de cheminée solaire s'appuie sur l'évaluation des transferts de chaleur en 1D perpendiculairement à la section fluide pour estimer l'élévation en température de l'air, et ainsi la dépression induite dans le bâtiment puis dans la fondation. Le modèle doit permettre d'évaluer les performances d'une situation réelle, c'est-à-dire un bâtiment équipé d'une fondation géothermique de plusieurs dizaines de mètres et de mener une analyse sur une année complète. Une étude relativement précise de la fondation nécessite un maillage fin, ce qui, sous les conditions précédentes, implique d'avoir recours à une technique réduction de modèle d'état afin d'obtenir des résultats en un temps de calcul raisonnable. Plusieurs méthodes visant à réduire le problème de conduction de la chaleur en 3D dans le sol sont donc mises en place et comparées dans le but d'identifier le meilleur compromis précision/temps de calcul. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet FUI 16 Fondatherm, financé par la BPI.

2. Modélisation d'un élément de fondation ventilée et d'une cheminée solaire

La fondation FONDATHERM (FUI 16) en béton préfabriquée (**Figure 1** (b)) est dotée d'une large cavité (**Figure 1** (a)) qui la transforme en conduite sous-terrainne et lui confère, en plus de sa fonction structurelle, une fonction thermique comparable à celle d'échangeurs air-sol traditionnels.

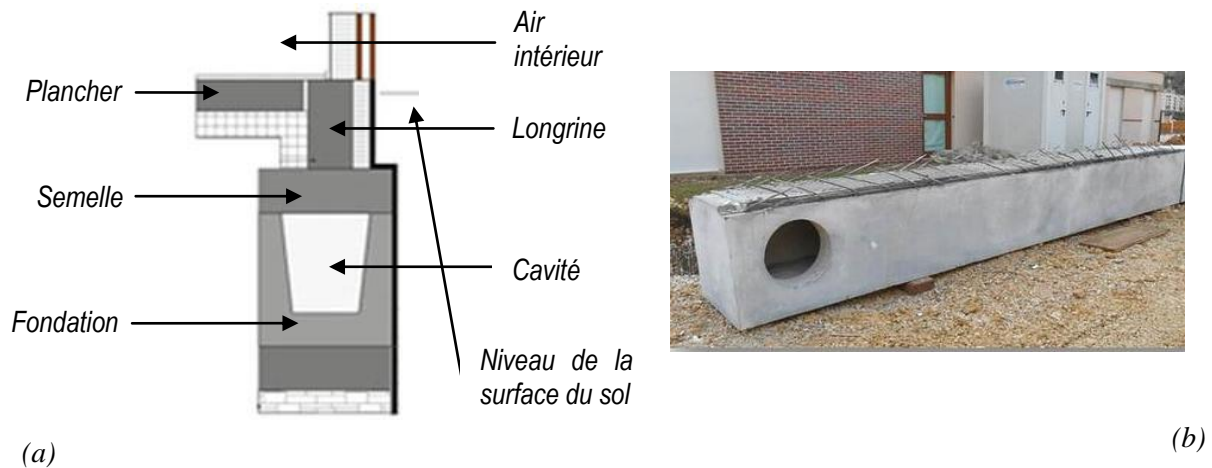


Figure 1 : Vue en coupe du produit Fondatherm (a) et produit réel avant pose (b)

L'élément modélisé est celui présenté sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** : la fondation fait 20 m de long, et la cavité 35 cm de large par 45cm de haut, dont le bord supérieur est placé à 70cm de profondeur. La modélisation est basée 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 10m x 4m, et est constitué des matériaux « sable sec » sur les 50 premiers centimètres, et « pierre » sur le reste. Une moitié de la face supérieure du sol est en contact avec l'environnement, la seconde avec l'air intérieur du bâtiment (**Figure 1**). Le plancher, modélisant l'interface entre le sol et l'air intérieur, est constitué par une dalle béton de 12cm d'épaisseur accolée à une couche de polystyrène extrudé de 6cm. Les propriétés thermophysiques de l'ensemble des matériaux suscités sont répertoriées dans le **Tableau 1**. Le maillage retenu est celui représenté sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Près de la fondation, le maillage est resserré : la taille caractéristique d'une maille est 9cm x 1m x 10cm. Au total, 6180 mailles servent à discrétiser spatialement le sol et la fondation.

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques des matériaux modélisés

	Conductivité thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Masse volumique [kg.m ⁻³]	Chaleur massique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Sable sec	0,27	800	1650
Pierre	0,4	700	2000
Béton armé	2	880	2430
Polystyrène	0.03	30	1400

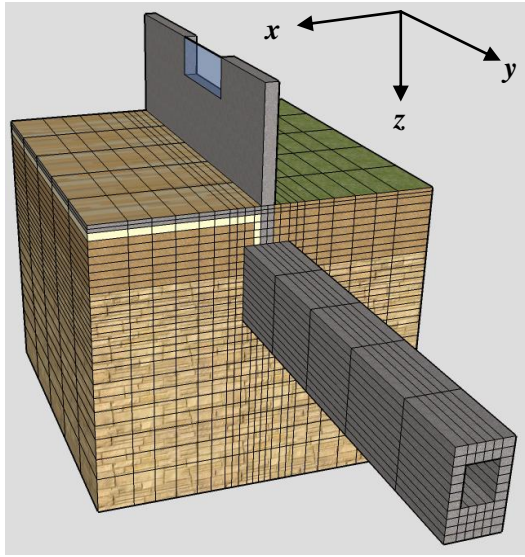


Figure 2 : Maillage de la fondation

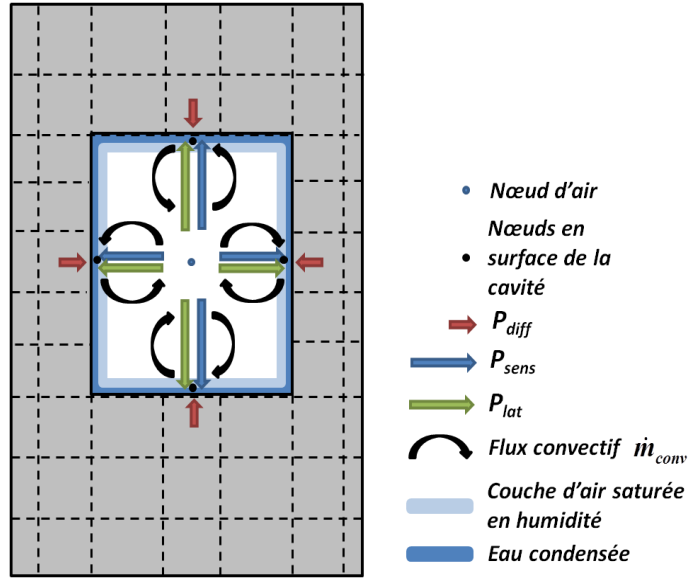


Figure 3 : Récapitulatif des échanges sensibles et latents dans la cavité de la fondation

La conduction dans le sol est traitée en 3D. Le modèle comporte 5 types de conditions aux limites :

- Les parois verticales du modèle sont supposées adiabatiques ;
- Une condition de Dirichlet est imposée sur la surface horizontale du fond. Sa température est une fonction périodique dépendant du temps tel que dans [3]
- Une condition aux limites de type Neumann est imposée sur une moitié de la surface horizontale supérieure exposée aux conditions climatiques (*Equation 1*). L'autre moitié est soumise à une condition de type Dirichlet : la température imposée y est constante et égale à 20°C ;

La paroi de la cavité échange de la chaleur sous forme sensible et latente avec l'air circulant dans la fondation, tel qu'illustré sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Ces transferts sont modélisés de la même façon que dans [6] en négligeant cependant les frottements de l'air sur la paroi.

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z_i} = CE - LR + SR \quad (z_i = 0) \quad (1)$$

avec λ_i la conductivité thermique de la maille de la surface de sol considérée, $CE = h_{sur}(T_{amb} - T_{sur})$ [W.m⁻²] le flux convectif échangé où $h_{sur} = 5.678 \cdot (0.775 + 0.35 \cdot \frac{V_{vent}}{0.304})$, $LR = \sigma \cdot \epsilon_{sur} \cdot (T_{sky}^4 - T_{sur}^4)$ [W.m⁻²] le flux radiatif GLO où $T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5}$ et T_{sur} [K] désignent respectivement la température de ciel et de surface de la maille, et $SR = (1 - a)G$ [W.m⁻²] les échanges radiatifs CLO où a [-] est l'albédo du sol et G [W.m⁻²] est l'irradiation solaire horizontale. La température d'air, l'irradiation solaire et la vitesse de vent sont données par un fichier météo Meteonorm.

En prenant en compte les échanges sensible et latent calculés pour une maille d'air donnée, l'état de la maille suivante est donné par les *Equations 2 et 3*.

$$T_{air,i+1} = T_{air,i} - \frac{P_{sens,i}}{(C_{air} + C_{vap}w_{air,i}) \cdot \rho_{air,i}\Phi_{air}} \quad (2)$$

$$w_{air,i+1} = w_{air,i} + \frac{\dot{m}_{lat,i}}{\rho_{air,i}\Phi_{air}\Delta t} \quad (3)$$

avec $T_{air,i}$ resp. $T_{air,i+1}$ [°C] la température d'air de la maille courante resp. de la maille suivante, C_{air} resp. C_{vap} [J.kg⁻¹.K⁻¹] la chaleur massique de l'air resp. de la vapeur, ρ_{air} [kg.m⁻³] et Φ_{air} [m³.s⁻¹] la masse et le débit volumique de l'air, w_{air} [kg_{vap}.kg⁻¹] l'humidité absolue de l'air circulant et où $P_{sens} = S_{paroi}h_{paroi}(T_{air} - T_{paroi})$ [W] est la puissance sensible échangée, et $\dot{m}_{lat} = (w_{air} - w_{paroi}) \cdot \frac{S_{paroi}h}{C_{air}}$ [kg_{vap}.s⁻¹] le flux de vapeur obtenu grâce à l'approche de Lewis avec T_{paroi} [°C] la température de surface de la maille donnant sur la cavité, w_{paroi} [kg_{vap}.kg⁻¹] l'humidité absolue de la couche superficielle d'air saturée, S_{paroi} [m²] sa surface, h_{paroi} [W.m⁻².K⁻¹] le coefficient d'échange convectif. Δt est le pas de temps de simulation, valant 1h dans la suite de l'article. Il est contraint par l'échantillonnage des fichiers météo utilisé, et choisi identique à celui utilisé par Hollmuller [6]. La résolution des équation 1 à 3 se fait de façon itérative.

La longueur totale de la cheminée est $L = 4$ m, sa largeur est de $l_{lame} = 3$ m, et l'épaisseur de la lame d'air¹ est de $h_{lame} = 0,125$ m. L'inclinaison de cette cheminée est donnée par l'angle θ par rapport à l'horizontale. Le modèle thermique présenté dans cette section s'appuie sur ceux développés par [7,8], basée sur l'analogie électrique présentée **Figure 3**.

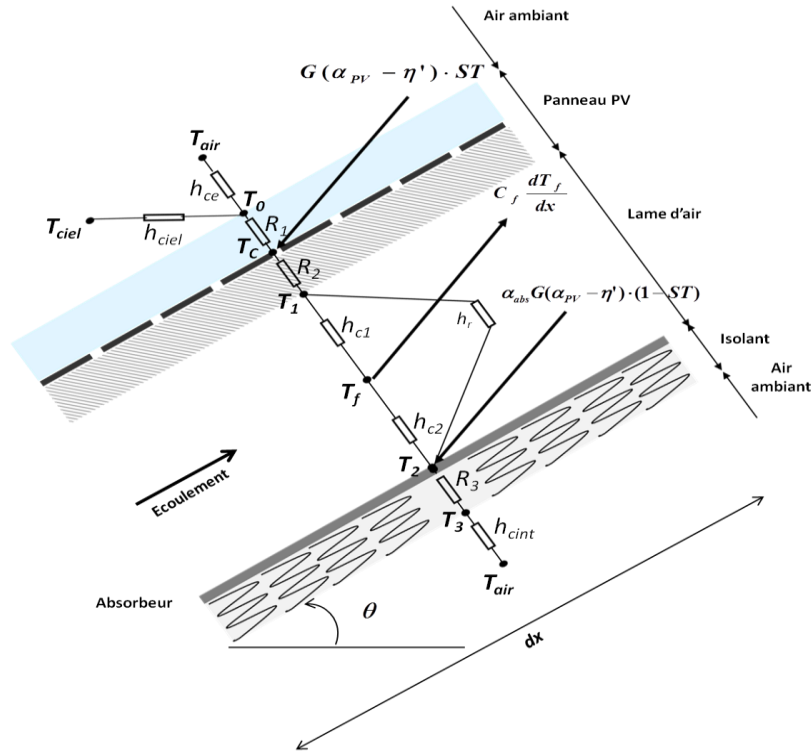


Figure 4 : Analogie thermique électrique 1D pour le modèle de cheminée solaire

¹ Les dimensions ont été choisies par rapport à l'étude bibliographique réalisée par Bambrook sur les dimensions des systèmes PVT fréquemment rencontrés dans la littérature, et sont tout à fait cohérentes par rapport au débit souhaité (0.07 m³.s⁻¹)

Celle-ci considère un flux unidimensionnel perpendiculaire à la lame d'air. Un bilan énergétique établi pour chaque longueur élémentaire dans le sens de l'écoulement permet, grâce à une résolution itérative, d'obtenir la distribution de température T_{sc} de la lame d'air. L'expression du débit massique dans la cheminée est alors donnée par l'Equation 4 [9] :

$$\Phi_{air, mass} = C_d \rho_{air} l_{lame} h_{lame} \sqrt{2gL \sin(\theta) \cdot \frac{T_{sc, out} - T_{int}}{2T_{int}}} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (4)$$

avec C_d un coefficient de pertes de charge, $T_{sc, out}$ la température de l'air en sortie de la cheminée, et $T_{int} = 20$ °C la température de l'air de la pièce.

Si le débit que peut fournir la cheminée est nul ou presque, un ventilateur mécanique prends le relais, et assure un renouvellement d'air de 1 vol. hr^{-1} soit $0.07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ environ en supposant que la fondation supporte une maison de 100 m^2 et 2.5 m de hauteur sous plafond.

3. Réduction du modèle de fondation géothermique ventilée naturellement

Le modèle de conduction de la chaleur en 3D dans le sol peut se mettre sous la forme d'un système linéaire de la forme donnée par l'Equation.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{C}}\mathbf{T}(t) = \mathbf{A}\mathbf{T}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Y}(t) = \mathbf{H}\mathbf{T}(t) \end{cases} \quad (5)$$

où \mathbf{T} et \mathbf{U} représentent respectivement les vecteurs des températures et des sollicitations, de taille n , et \mathbf{Y} le vecteur des variables observées. Des études de [9,10] ressortent les méthodes de l'agrégation linéaire (AL) et la méthode de symétrisation interne (ou méthode de Moore, M) comme étant performantes et relativement facile à mettre en œuvre. Chacune permet, par un changement de base approprié, de se ramener à un système d'ordre réduit $r \ll n$.

Dans les cas présents, les deux méthodes suscitées sont utilisées pour réduire le modèle de conduction de la chaleur en 3 dimensions dans le sol. De plus une troisième méthode, combinant la méthode de Moore et une décomposition de domaine (DD) est appliquée. La DD consiste à découper le sol (comprenant la fondation) en 3 sous domaines. Le premier contient les trois premières couches de sol à la surface. Le deuxième est une portion englobant la fondation en béton. La troisième est constituée du volume de sol restant non compris dans les deux premiers sous domaines. Ces trois méthodes de réduction sont appliquées successivement au modèle décrit dans la section 1 (**Figure 2** et **Tableau 1**). Dans les deux cas, les modèles sont exécutés avec un fichier météo du climat lyonnais, sur la première semaine de janvier.

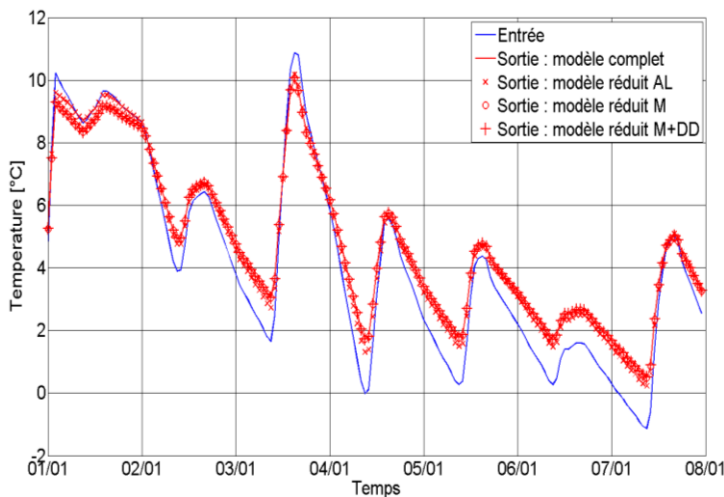
Dans chaque tableau est reporté le temps² nécessaire à la construction du système, à sa réduction et à sa résolution (« Temps d'initialisation »), le temps de calcul nécessaire pour déterminer l'état du système sur la période considérée (« Temps de calcul »), et l'ordre de réduction du modèle (le modèle complet faisant référence). La méthode de l'agrégation linéaire permet de réduire le temps de calcul par plus de 5. Le temps d'initialisation est plus important que celui du modèle complet, mais pour des simulations de longue durée (de l'ordre de l'année), il sera largement compensé par le gain sur le temps de calcul. Cependant, la précision du modèle réduit n'est absolument pas satisfaisante, et laisse penser qu'un problème subsiste dans le code de calcul car les résultats obtenus dans [9,10] sont plus concluants. La

² Temps de calcul effectué avec un processeur Core i7 2.7GHz sous Windows 7

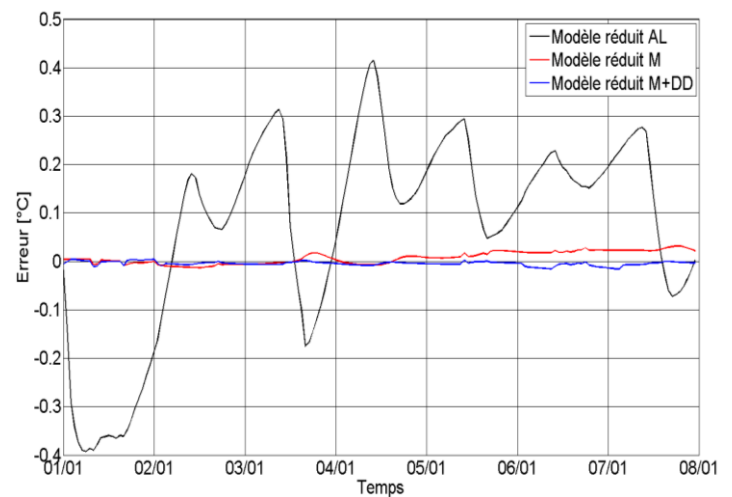
méthode de Moore est plus précise avec un écart maximum par rapport à la référence de 0.032°C sur la semaine considérée. Celle-ci souffre cependant d'un temps d'initialisation important (induit par le calcul des Grammiens de commandabilité et d'observabilité). Même si le temps de calcul est effectivement réduit, il ne l'est pas suffisamment pour compenser les lourds calculs préliminaires. De plus, la méthode de Moore n'est plus applicable lorsque le nombre de nœuds du système est trop important : il est par exemple impossible de modéliser un système de plus de 10000 mailles, le point limitant étant la RAM de l'ordinateur utilisé. La méthode M+DD est la plus performante en termes de temps de calcul, de temps d'initialisation, et de précision. La faiblesse de la méthode de Moore est ainsi corrigée : du fait de la décomposition, le calcul des matrices de passages dans la base équilibrante est plus rapide. Le temps de calcul est divisé par près de 23 par rapport au modèle complet, le temps d'initialisation n'est augmenté que sensiblement, et l'écart maximal obtenu par rapport au modèle complet de référence est de 0.016°C .

Tableau 2 : Performances des méthodes de réduction : temps de calcul et ordre des modèles réduits

	Temps d'initialisation [s]	Temps de calcul [s]	Nombre de nœuds du modèle
Modèle complet	441.5	159.9	6180
Modèle réduit Agrégation linéaire	826.1	30.2	901
Modèle réduit Moore	3463.1	26.9	642
Modèle réduit Moore + Décomposition de domaine	646.4	7.0	643+428+845



(a)



(b)

Figure 5 : Evolution de la température d'air en sortie de la fondation pour le modèle complet et les modèles réduits (a) et écart entre les modèles réduits et le modèle complet (b)

Conclusion

Un modèle 3D en volumes finis de fondation géothermique ventilée a été développé, prenant en compte les échanges de chaleur sensible et latente dans la cavité. Son couplage avec un modèle simplifié de double-peau photovoltaïque, dont l'objectif est de réduire la consommation du ventilateur nécessaire à la circulation de l'air dans la fondation, a été

entrepris. Les opportunités de réduction de ce modèle ont été analysées. La méthode de l'agrégation linéaire, sous réserve de validité, ne permet pas de réduire efficacement le modèle tout en conservant une précision suffisante. La méthode de Moore est beaucoup plus satisfaisante en termes de précision et de réduction, mais elle souffre cependant d'un lourd calcul d'initialisation, non compensé par les gains de temps de calcul. Elle n'est en outre plus applicable lorsque le système devient trop important. Enfin, la méthode de Moore couplée à une décomposition de domaine est à la fois précise et rapide, et devrait permettre de modéliser des systèmes plus importants, sur des périodes beaucoup plus longues.

D'autres méthodes seront envisagées afin de pouvoir modéliser des fondations de l'ordre de la cinquantaine de mètre de long sur une année complète tout en traitant des problèmes non linéaires induits par les transferts de masse dans le sol. On pense en particulier à des techniques telles que la Proper Generalized Decomposition (PGD). Enfin, la pertinence de cette approche sera validée par rapport à des études disponibles dans la littérature, et confrontée à des données expérimentales qui doivent être obtenus sur une expérimentation en vraie grandeur durant le projet FONDATHERM, notamment sur un EHPAD en Bourgogne, équipé de deux fondations de plus de 40m de long, dont l'instrumentation est en cours.

Références

- [1] Tiwari, A., Sodha, M.S., 2007. Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91 p. 17–28
- [2] Bansal, V., Misra, R., Agarwal, G. D., Mathur, J., 2013. Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied Energy* Volume 103, p. 1–11.
- [3] Brum, R.S., Vaz, J., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E.D., Isoldi, L.A., 2013. A new computational modeling to predict the behavior of Earth-Air Heat Exchangers, *Energy and Buildings* 63, p. 395–402
- [4] Ozgener, L., Ozgener, O., 2010. Energetic performance test of an underground air tunnel system for greenhouse heating, *Energy* 35, p. 4079-4085.
- [5] Vaz, J., Sattler, M.A., Brum, R.S., Dos Santos, E.D., Isoldi, L.A., 2014. An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE), *Energy and Buildings* 72, p. 122–131.
- [6] Hollmuller, P., Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique, Ph.D. Thesis, Université de Genève, 2002.
- [7] Bambrook, S., Investigation of photovoltaic / thermal air systems to create a zero energy house in Sydney, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, 2011.
- [8] Mathur, J., Mathur, S., Anupma, 2006. Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy and Buildings* 38, p. 1156–1163.
- [9] Ménézo, C., Contribution à la modélisation du comportement thermique des bâtiments par couplage de modèles réduits. Ph.D Thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1999.
- [10] Kim, E.J., Development of numerical models of vertical ground heat exchangers and experimental verification: Domain decomposition and state model reduction approach, Ph.D. Thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.

Remerciements

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