HAL
open science

Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiment

Stéphane Thiers, Bruno Peuportier

To cite this version:

Stéphane Thiers, Bruno Peuportier. Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiment. Journée thématique SFT-IBPSA : froid solaire et confort d'été, Apr 2007, Aix-les-Bains, France. pp.96-103. hal-00216068

HAL Id: hal-00216068

https://hal.science/hal-00216068v1

Submitted on 6 Feb 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODELISATION THERMIQUE D'UN ECHANGEUR AIR-SOL POUR LE RAFRAICHISSEMENT DE BATIMENTS

Stéphane **THIERS** [a,*], Bruno **PEUPORTIER** [a]

[a] *Centre Énergétique et Procédés, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France*

RÉSUMÉ

L'échangeur air-sol est un système de rafraîchissement du bâtiment très peu consommateur d'énergie qui exploite d'inertie thermique du sol. Un modèle a été développé, qui tient compte des principaux phénomènes intervenant durant l'échange air-sol. Il se compose de deux éléments : un modèle thermique de sol et un modèle d'échangeur. Le premier calcule la température du sol « non perturbé » à partir du bilan énergétique à la surface du sol, de l'influence d'un bâtiment proche et de la puissance géothermique. Le second utilise la température du sol calculée pour déterminer la température de l'air en sortie d'échangeur. Ce modèle a été intégré à un outil de simulation thermique du bâtiment. Deux bâtiments réels équipés chacun d'un échangeur air-sol instrumenté ont permis de confronter les résultats de simulation à des mesures, validant ainsi le modèle sur les configurations étudiées.

Mots Clés : *Simulation thermique, Echangeur air-sol, Bilan énergétique, Température du sol, Modélisation.*

NOMENCLATURE

Symboles :

a	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
a_{lat}	constante empirique = 103 $Pa.K^{-1}$
alb	coefficient d'albedo, -
A_X	amplitude d'un signal X quelconque
b_{lat}	constante empirique = 609 Pa
c	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
c_{lat}	constante empirique = 0,0168 $K.Pa^{-1}$
f	paramètre empirique défini dans [1], -
G	rayonnement solaire incident, $W.m^{-2}$
geo	norme du gradient géothermique, $K.m^{-1}$
h	coefficient d'échange thermique surfacique, $W.m^{-2}.K^{-1}$
$\dot{m}$	débit massique, $kg.s^{-1}$
N	nombre total, -
n	rang de l'harmonique, -
r	distance au centre de la dalle du bâtiment proche, m
r_a	humidité relative de l'air, -
T	température, K
t	temps, s
UA	conductance thermique, $W.K^{-1}$
v_{vent}	vitesse du vent au niveau du sol, $m.s^{-1}$.
$\overline{X}$	moyenne annuelle pour une variable X quelconque
Z_0	distance limite d'influence du bâtiment, m
z	profondeur sous la surface du sol, m

Lettres grecques :

ε	emissivité, -
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
σ	constante de Stefan-Boltzmann = $5{,}67.10^{-8}$ $W.m^{-2}.K^{-4}$
σ_{bat}	coefficient d'influence du bâtiment proche, -
Φ	densité de flux, $W.m^{-2}$
φ_X	déphasage d'un signal X quelconque, rad
ω	pulsation, $rad.s^{-1}$

Indices / Exposants :

air	de l'air
air-tube	entre l'air et le tube
amb	ambiant
bat	du bâtiment
ciel	équivalent de ciel
cond	conductif
conv_sens	convectif sensible
conv_lat	convectif latent
eq	équivalent
h	d'harmoniques
rad_r	radiatif reçu
rad_sc	radiatif émis vers le ciel
sol	du sol
surf	de la surface
surf_sol	de la surface du sol
surf_sol,n	de la surface du sol pour l'harmonique de rang n

* auteur correspondant
adresse électronique : stephane.thiers@ensmp.fr

1. INTRODUCTION

Un bâtiment présentant de faibles besoins de chauffage (type Passivhaus ou Minergie) est un bâtiment à très faibles déperditions thermiques et tirant parti d'apports solaires passifs. Pour atteindre ces performances, diverses techniques doivent être mises en oeuvre, telles qu'une forte isolation par l'extérieur, une bonne étanchéité et une gestion de la ventilation par le biais d'un échangeur double flux. Pour assurer le confort d'été sans passer par des équipements de climatisation fortement consommateurs d'énergie, l'échangeur air-sol – appelé communément puits canadien ou puits provençal – constitue une solution intéressante de plus en plus mise en œuvre.

Afin de dimensionner correctement l'échangeur air-sol, ce dernier doit être intégré au bâtiment dès sa conception. Or, actuellement très peu de logiciels d'aide à la conception et de simulation intègrent ce type d'équipement.

Outre le modèle dynamique à éléments finis développé par Hollmuller [2] pour le logiciel TRNSYS, plusieurs modèles d'échangeurs air-sol ont déjà été proposés, notamment par Benkert *et al.* [3], Bojić *et al.* [4], De Paepe et Janssens [5], Dibowski [6], Zweifel [7], Al Ajmi *et al.* [8], Ghosal et Tiwari [9] ou encore Badescu [10]. L'analyse de ces différents modèles a permis d'identifier les principaux phénomènes physiques mis en œuvre par l'échangeur air-sol, tels que la profondeur d'enfouissement et le nombre des tubes, le débit de l'air dans les tubes, la nature et le taux d'humidité du sol, l'échange thermique en surface du sol.

Le modèle proposé ici est conçu pour pouvoir être utilisé pour le dimensionnement de l'échangeur et pour la conception de bâtiments, notamment à l'aide d'outils accessibles aux professionnels du bâtiment. Ce modèle s'appuie notamment sur le modèle analytique d'Hollmuller [2] et sur celui mis en œuvre au sein du logiciel GAEA [11]. Les caractéristiques recherchées sont : la cohérence vis-à-vis des phénomènes physiques mis en jeu, la simplicité de la structure du modèle et la précision des résultats fournis. Enfin, ce modèle est valable pour les deux modes d'utilisation possibles de l'échangeur air-sol : rafraîchissement ou préchauffage.

2. MODELISATION

L'échange thermique entre le sol et l'air circulant dans les tubes dépend de la structure de l'échangeur, de la température d'entrée de l'air et de la température du sol à proximité des tubes. Si la première température constitue une sollicitation qui peut être fournie par un fichier de données météorologiques, la seconde doit nécessairement être calculée, faute de mesures. C'est pourquoi le modèle réalisé est structuré en deux parties. Une première partie calcule la température en tout point du sol, hors influence de l'échangeur (température du sol « non perturbé »). Cette température est utilisée comme condition aux limites du système étudié. Une deuxième partie, constituant le modèle d'échangeur proprement dit, calcule la température de l'air en sortie d'échangeur (Figure 1).

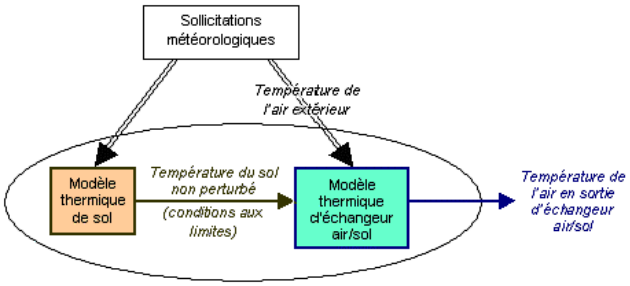

Figure 1. Structure du modèle d'échangeur air-sol

2.1 Le modèle thermique de sol

Ce modèle, développé en collaboration avec l'INSA de Toulouse, s'appuie sur divers travaux, spécialement ceux de Mihalakakou *et al.* [12] et de Hagentoft [13].

Le sol y est considéré comme un milieu homogène et invariable, caractérisé par une conductivité thermique λ_{sol}, une masse volumique ρ_{sol} et une capacité calorifique massique c_{sol}. La variation temporelle du taux d'humidité du sol – due à l'infiltration d'eau – est négligée et aucune nappe phréatique n'est prise en compte sous la zone d'implantation de l'échangeur. Le sol s'apparente donc à un massif semi-infini.

Le modèle est construit comme la superposition de trois phénomènes indépendants :

1 : La conduction dans le sol du signal de température provenant de la surface du sol (effet des conditions atmosphériques)

2 : La conduction du flux thermique provenant d'un bâtiment situé à proximité de la portion de sol considérée (influence du bâtiment sur la température du sol)

3 : La conduction d'un flux thermique en provenance du sous-sol (flux géothermique)

Chacun de ces phénomènes est associé à des conditions aux limites spécifiques.

En raison de la linéarité du phénomène de conduction, il est possible de les combiner pour raisonner par superposition, comme l'ont fait Mihalakakou *et al.* [14] (Figure 2).

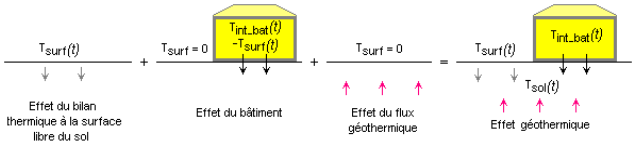

Figure 2. Superposition des trois termes du modèle thermique de sol

- Effet du bilan thermique à la surface du sol

Soit un signal de température sinusoïdal, de pulsation ω, appliqué à la surface d'un massif semi-infini :

$$T_{surf}(t)=\overline{T_{surf}}+A_{surf}\cdot\sin\left(\omega\cdot t-\varphi_{surf}\right) \quad (1)$$

La propagation de ce signal dans le massif est un cas d'école [15]. L'expression de la température à la profondeur z dans le massif, vaut :

$$T(z,t)=\overline{T_{surf}}+A_{surf}\cdot\exp\left(-\frac{z}{\delta(\omega)}\right)\cdot\sin\left(\omega\cdot t-\varphi_{surf}-\frac{z}{\delta(\omega)}\right) \quad (2)$$

avec :

$$\delta(\omega)=\sqrt{\frac{2\cdot a}{\omega}} \quad (3)$$

la profondeur de pénétration du signal dans le massif pour la pulsation ω.

Pour être appliquée au cas du sol, cette solution nécessite la connaissance de la température de surface du sol en fonction du temps ; la période temporelle d'étude nécessaire est d'une année, ce qui correspond au cycle saisonnier complet et à la durée de simulation du bâtiment. Pour évaluer cette température, un bilan thermique est réalisé à la surface du sol, fortement inspiré de celui établi par Mihalakakou *et al.* [12] mais dont l'expression des solutions a été partiellement retravaillée. Ce bilan (4) intègre l'ensemble des flux : le flux conductif vers le sol, le flux radiatif solaire reçu, le flux radiatif émis vers le ciel et les flux convectif et latent échangés avec l'air (Figure 3).

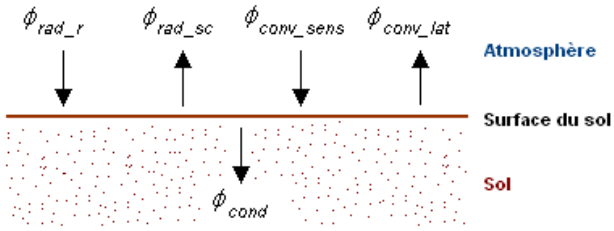

Figure 3. Bilan des flux thermiques à la surface du sol

$$\phi_{cond}=\left(\phi_{rad_r}-\phi_{rad_sc}\right)+\left(\phi_{conv_sens}-\phi_{conv_lat}\right) \quad (4)$$

En reprenant partiellement les notations de [12], ce bilan s'exprime avec :

$$\phi_{cond}=-\lambda_{sol}\cdot\left.\frac{dT_{sol}}{dz}\right|_{z=0} \quad (5)$$

$$\phi_{rad_r}=(1-alb)\cdot G \quad (6)$$

$$\phi_{rad_sc}=\varepsilon_{sol}\cdot\sigma\cdot\left(T_{surf_sol}^4-T_{ciel}^4\right) \quad (7)$$

$$\phi_{conv_sens}=h_{surf}\cdot\left(T_{amb}-T_{surf_sol}\right) \quad (8)$$

$$\phi_{conv_lat}=c_{lat}\cdot f\cdot h_{surf}\cdot\left[\left(a_{lat}\cdot T_{surf_sol}+b_{lat}\right)-r_a\cdot\left(a_{lat}\cdot T_{amb}+b_{lat}\right)\right] \quad (9)$$

où a_{lat}, b_{lat}, c_{lat} sont des constantes empiriques[1] et f un paramètre empirique sans unité[2]. h_{surf} est calculé par la formule empirique [12] :

$$h_{surf}=0{,}5+1{,}2\cdot\sqrt{\overline{v}_{vent}} \quad (10)$$

Le bilan est simplifié en prenant :

$$\phi_{conv_sens}-\phi_{rad_sc}=h_{eq}\cdot\left(T_{amb}-T_{surf_sol}\right) \quad (11)$$

où h_{eq} est la valeur moyenne de l'échange utilisée par le modèle de bâtiment du logiciel COMFIE, tabulée dans [16][3].

À partir d'une décomposition en série de Fourier des sollicitations météorologiques (rayonnement solaire G, température de l'air T_{amb}) sur une période fondamentale d'un an, ce bilan permet d'exprimer la température de surface du sol comme une somme de fonctions sinusoïdales du temps. Ainsi, en notant :

$$X(t)=\overline{X}+\sum_{n=1}^{N_h}A_{X,n}\cdot\sin\left(n\cdot\omega\cdot t-\varphi_{X,n}\right) \quad (12)$$

la décomposition en série de Fourier d'une sollicitation météorologique X (X pouvant aussi bien être G que T_{amb}), la température de surface du sol obtenue à l'aide du bilan de puissance à la surface du sol vaut :

$$T_{surf_sol}(t)=\overline{T}_{surf_sol}+\sum_{n=1}^{N_h}A_{surf_sol,n}\cdot\sin\left(n\cdot\omega\cdot t-\varphi_{surf_sol,n}\right) \quad (13)$$

avec :

$$\overline{T}_{surf_sol}=\frac{\left(1-\alpha_{surf_sol}\right)\overline{G}+h_r\cdot\overline{T}_{amb}+\left(h_r-h_e\right)\cdot\frac{b_{lat}}{a_{lat}}}{h_e} \quad (14)$$

---

[1] a_{lat} = 103 Pa.K^{-1}, b_{lat} = 609 Pa, c_{lat} = 0,0168 K.Pa^{-1} [1]

[2] Pour un sol nu : saturé : f = 1 ; humide : f = 0,6 à 0,8 ; sec : f = 0,4 à 0,5 ; aride : f = 0,1 à 0,2.
Pour un sol couvert de végétation, cette valeur doit être multipliée par 0,7. [1]

[3] h_{eq} vaut 12,6 W.m^{-2}.K^{-1} pour un sol abrité du vent, 20 W.m^{-2}.K^{-1} pour un sol moyennement exposé au vent et 50 W.m^{-2}.K^{-1} pour un sol particulièrement exposé au vent.

et pour tout harmonique de rang n :

$$\tan(\varphi_{surf_sol,n}) = \frac{(h_{cond}(n\cdot\omega)+h_e)Y_{2,n} - h_{cond}(n\cdot\omega)Y_{1,n}}{-(h_{cond}(n\cdot\omega)+h_e)Y_{1,n} - h_{cond}(n\cdot\omega)Y_{2,n}} \quad (15)$$

$$A_{surf_sol,n} = \frac{Y_{1,n}\cdot\sin(\varphi_{surf_sol,n}) + Y_{2,n}\cdot\cos(\varphi_{surf_sol,n})}{h_{cond}(n\cdot\omega)} \quad (16)$$

où h_e, h_r, $h_{cond}(\omega)$, $Y_{1,n}$ et $Y_{2,n}$ sont cinq variables intermédiaires destinées à alléger l'écriture.

$$h_e = h_{eq} + h_{surf}\cdot c_{lat}\cdot a_{lat}\cdot f \quad (17)$$

$$h_r = h_{eq} + h_{surf}\cdot c_{lat}\cdot a_{lat}\cdot f\cdot r_a \quad (18)$$

$$h_{cond}(\omega) = \frac{\lambda_{sol}}{\delta(\omega)} \quad (19)$$

et pour toute composante harmonique de rang n :

$$Y_{1,n} = (1-alb)\cdot A_{G,n}\cdot\cos(\varphi_{G,n}) + h_r\cdot A_{T_{amb},n}\cdot\cos(\varphi_{T_{amb},n}) \quad (20)$$

$$Y_{2,n} = -(1-alb)\cdot A_{G,n}\cdot\sin(\varphi_{G,n}) - h_r\cdot A_{T_{amb},n}\cdot\sin(\varphi_{T_{amb},n}) \quad (21)$$

En pratique, N_h, le nombre d'harmoniques pris en compte est limité, du fait que l'atténuation du signal avec la profondeur est d'autant plus rapide que la période correspondante est courte. Se limiter au seul harmonique fondamental peut entraîner une erreur de plus d'un degré sur la température du sol à certains moments de l'année pour une profondeur de 2 m, correspondant à la profondeur d'enfouissement maximale pour les échangeurs air-sol courants. Par contre, deux ou trois composantes harmoniques suffisent à assurer une bonne précision du calcul [17].

- Influence du bâtiment

Soit un bâtiment situé à proximité du lieu d'implantation de l'échangeur air-sol. Son influence sur la température en un point du sol est représentée par un terme correctif, caractérisé par un coefficient d'influence du bâtiment, $\sigma_{bat}(r,z)$. Ce coefficient dépend de la distance de ce point au centre de la dalle du bâtiment, r, et de la profondeur de ce point sous la surface du sol, z ; la dalle est supposée directement en contact avec la surface du sol (Figure 4).

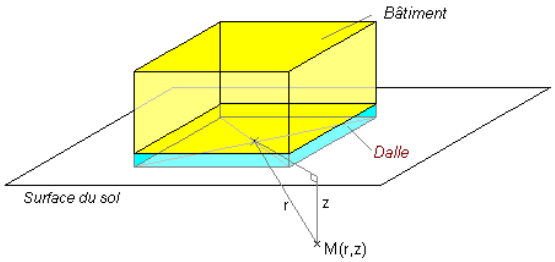

Figure 4. Repérage d'un point M du sol

Ce coefficient a été défini comme suit :

- Si $z\in[0,Z_0]$ et $r\in[0,Z_0]$, alors

$$\sigma_{bat}(r,z) = \left(1-\frac{z}{Z_0}\right)\left(1-\frac{r}{Z_0}\right)$$

- Si $r>Z_0$ ou $z>Z_0$, alors $\sigma_{bat}(r,z)=0$.

où Z_0 est la distance limite au delà de laquelle l'influence du bâtiment proche est négligeable.

Le terme correctif introduit suppose que la température de la surface inférieure du bâtiment, en contact avec le sol, est fixe sur l'année. Plus l'influence du bâtiment sera forte et plus la température moyenne du sol sera proche de la température de la surface inférieure du bâtiment, d'une part, et moins l'influence des conditions météorologiques sera perceptible. La température moyenne de la surface inférieure de la dalle du bâtiment, $\overline{T}_{surf_bat}$, est déduite des formules établies par Hagentoft [13].

- Flux géothermique

Le flux géothermique est modélisé comme un gradient de température vertical uniforme, dont la norme est notée *geo*.

- Expression de la température du sol

L'expression finale de la température du sol est :

$$T_{sol}(r,z,t) = geo.z + \sigma_{bat}(r,z)\cdot\overline{T}_{surf_bat} + \quad (22)$$

$$(1-\sigma_{bat}(r,z))\left[\overline{T}_{surf_sol} + \sum_{n=1}^{N_h} A_{surf_sol,n}\cdot\exp\left(-\frac{z}{\delta(n\cdot\omega)}\right)\cdot\sin\left(n\cdot\omega\cdot t - \varphi_{surf_sol,n} - \frac{z}{\delta(n\cdot\omega)}\right)\right]$$

2.2 Le modèle thermique d'échangeur air-sol

Ce modèle suppose que l'échangeur thermique est constitué de tubes parallèles placés dans un plan horizontal et également distants les uns des autres. Ces tubes sont alimentés par un distributeur d'entrée et l'air est évacué en sortie par un collecteur (Figure 5)

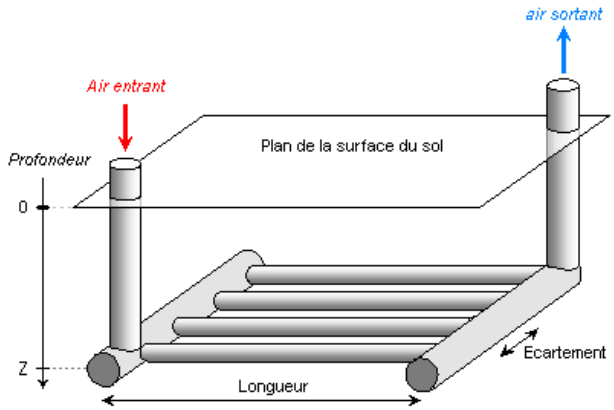

Figure 5. Géométrie de l'échangeur air-sol modélisé

Seul l'échange thermique au niveau des tubes est considéré. Les tubes sont suppposés identiques et le sol est supposé présenter des propriétés homogènes autour des tubes. Afin de tenir compte des aspects dynamiques et spatiaux de l'échange thermique, les tubes et le sol à son voisinage sont représentés par un maillage, utilisé pour appliquer une représentation par volumes finis. Ce maillage comprend plusieurs mailles cylindriques concentriques, d'axe horizontal (Figure 6), représentant, l'air à l'intérieur des tubes (*air*), le tube (*tube*), et deux mailles de sol (*sol1* et *sol2*). La maille *sol2* qui englobe l'ensemble des tubes a pour rôle la prise en compte de l'interaction thermique entre les tubes adjacents. Les mailles sol1 et sol2 sont subdivisées en demi-mailles hautes et basses afin de différencier les conditions aux limites au dessus et au dessous du domaine maillé.

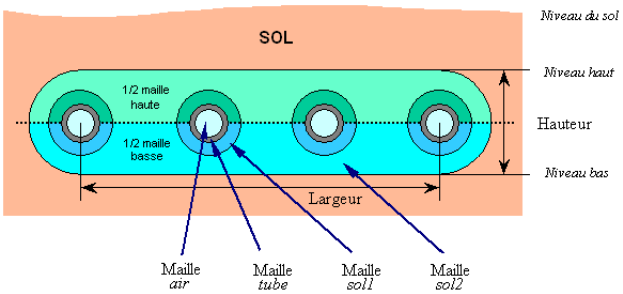

Figure 6. Aspect du maillage (coupe transversale)

Ces mailles sont découpées régulièrement en dix sections verticales de manière à former le maillage complet (Figure 7).

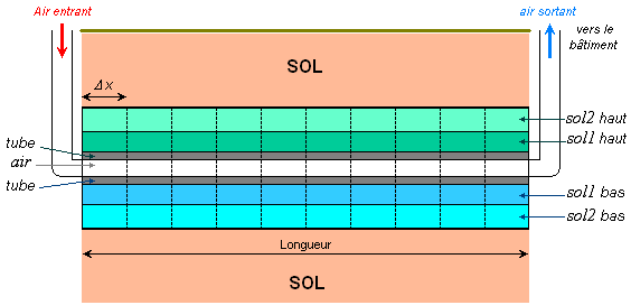

Figure 7. Aspect du maillage (coupe longitudinale)

La température de chaque maille est supposée uniforme à tout instant. Les échanges conductifs intervenant dans les directions horizontales et verticales sont considérés comme négligeables par rapport aux échanges conductifs intervenant radialement dans les plans verticaux. Ces derniers sont seuls pris en compte dans le modèle, sous la forme de résistances thermiques. Une inertie thermique est associée à chaque maille sous la forme d'une capacité thermique.

Comme chaque tube est identique aux autres, le problème peut-être ramené à celui d'un seul tube. Cette simplification permet de limiter le nombre total de mailles à 60. Les conditions aux limites du modèle sont : la température de l'air, à l'entrée de la maille *air*, et la température du sol, calculée, à l'aide du modèle thermique de sol présenté plus haut, sur les surfaces hautes et basses de la maille *sol2*.

Le modèle numérique est résolu pas à pas, en réalisant, pour chaque élément longitudinal, un bilan thermique sur la maille *air*, d'une part (23), et un bilan thermique sur chacune des mailles *tube*, *sol1* et *sol2*, d'autre part.

$$c_{air} \cdot \dot{m}_{tube} \cdot \Delta T_{air} = UA_{air-tube} \cdot (T_{tube} - \overline{T}_{air}) \qquad (23)$$

Le système d'équations obtenu est écrit sous la forme matricielle suivante :

$$C \cdot \frac{dT}{dt} = A \cdot T + E \cdot U \qquad (24)$$

où C représente la matrice diagonale des capacités thermiques des mailles, T le vecteur des températures des différentes mailles, A la matrice tridiagonale des coefficients d'échange entre mailles, E la matrice des coefficients d'échange entre mailles et sollicitations et U le vecteur des sollicitations (température de l'air et du sol). La méthode de résolution de ce système d'équations différentielles est celle de Bacot *et al.* [18]. Ici, la simplification par analyse modale n'est pas nécessaire, en raison du faible nombre d'équations.

3. MISE EN OEUVRE

Le logiciel d'aide à l'éco-conception de bâtiments, COMFIE, développé depuis une quinzaine d'année à l'École des Mines de Paris, est un logiciel de simulation thermique s'appuyant sur une programmation orientée objet. Le modèle thermique du bâtiment est multizone. La résolution des équations passe par une analyse modale [16].

Le modèle d'échangeur air-sol conçu a été mis en œuvre sous la forme d'un module de calcul additionnel à ce logiciel. La température de l'air en sortie de l'échangeur est combinée aux différents débits de ventilation dans chaque zone ventilée pour déterminer finalement la valeur de l'énergie thermique fournie à chaque zone du bâtiment durant chaque pas de temps.

Une interface utilisateur ergonomique, développée par Izuba Energies, permet de saisir facilement des différents paramètres d'entrée nécessaires (Figure 8).

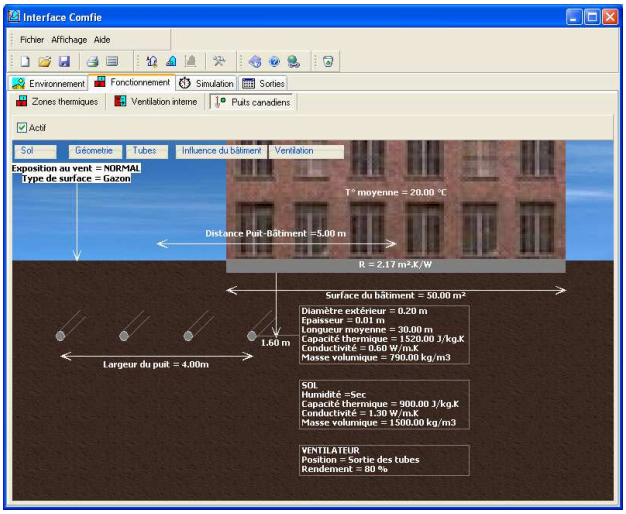

Figure 8. Aperçu de l'interface utilisateur du module

4. VALIDATION

4.1 Étude de sensibilité

Une étude de sensibilité du modèle aux différents paramètres a permis de vérifier que les paramètres prépondérants étaient constitués par le dimensionnement de l'échangeur (nombre et longueur des tubes, profondeur d'enfouissement) et le débit de ventilation de l'échangeur, mais aussi par le rayonnement solaire incident et les propriétés thermiques du sol. Ces deux derniers éléments influent particulièrement sur la température du sol « non perturbé » calculée par le modèle thermique de sol. Les propriétés thermiques du sol et le dimensionnement de l'échangeur interviennent sur l'efficacité de l'échange thermique avec l'air. Enfin, le débit de ventilation influe notablement sur la température en sortie d'échangeur, du fait qu'un accroissement de débit n'induit pas un accroissement de la puissance instantanée déposée (ou puisée en hiver) dans le sol.

L'influence du dimensionnement de l'échangeur sur ses performances – représentées par la réduction des degrés-jours d'inconfort (DJI) à 27 °C par rapport à une référence sans système de rafraîchissement – est mise en évidence sur la Figure 9.

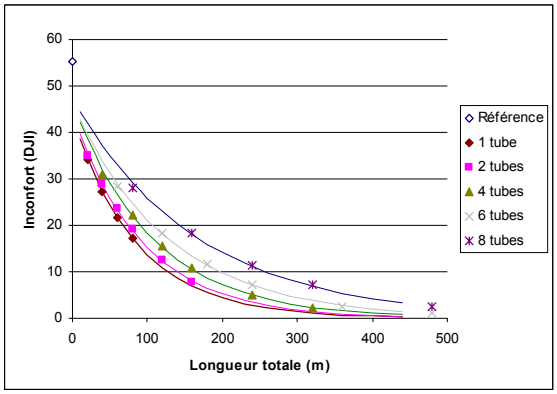

Figure 9. Influence de la longueur et du nombre des tubes sur l'inconfort d'été à débit total constant

4.2 Expérimentation de Presles

Le modèle a été testé sur une installation instrumentée située à Presles, en Val d'Oise (95). Il s'agit d'une pièce destinée à l'accueil de personnes âgées, particulièrement sujette à la surchauffe durant l'été. L'objectif de l'installation est de réduire la durée et l'intensité des périodes d'inconfort thermique estivales.

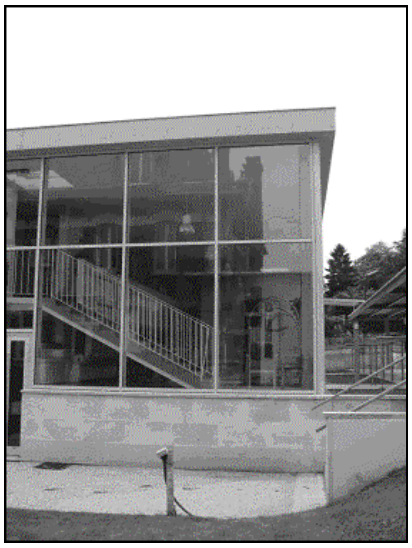

Figure 10. Façade nord-ouest de la pièce équipée

L'échangeur air-sol équipant le bâtiment est constitué de 8 tubes en polyéthylène de 160 mm de diamètre et de 50 m de long, placés en parallèle à 1,6 m sous la surface du sol, dans le jardin jouxtant le bâtiment. Le débit de ventilation nominal est de 1200 $m^3.h^{-1}$, soit un renouvellement d'air de 1,4 volume par heure.

La confrontation des données simulées et des mesures effectuées durant une année révèle une assez bonne adéquation des deux séries (Figure 11).

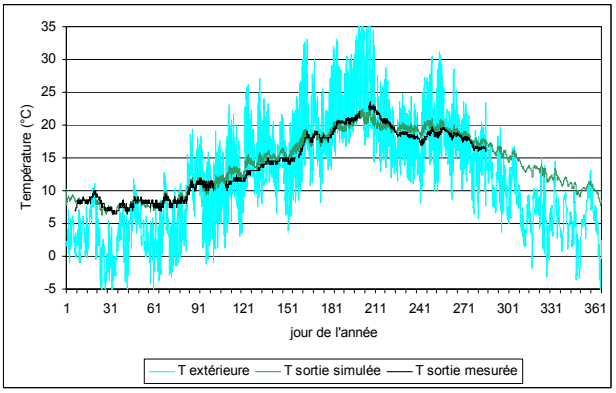

Figure 11. Confrontation des températures simulées et mesurées de l'air en sortie d'échangeur

Les courbes des températures mesurées et simulées sont très proches. L'erreur de la simulation est inférieure à 2 °C durant plus de 98 % du temps et se trouve centrée autour de +0,3 °C (Figure 12). Cette erreur est du même ordre de grandeur que celles relevées sur les simulations réalisées par le logiciel GAEA [11].

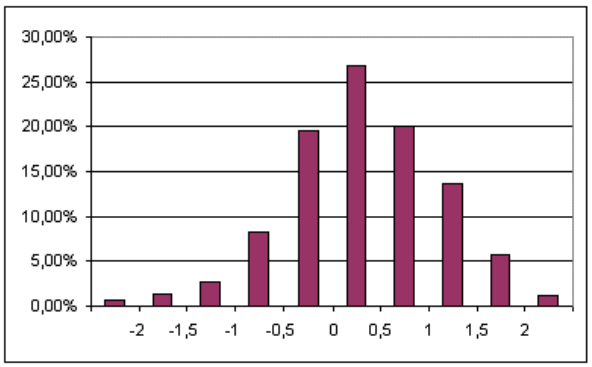

Figure 12. Répartion statistique des écarts de température en °C (1er cas)

4.3 Expérimentation de Montigny-lès-Cormeilles

Une analyse analogue a été réalisée sur une autre installation, équipant des bureaux à Montigny-lès-Cormeilles, également situé en Val d'Oise (95). La répartition statistique des écarts observés sur une année reste centrée mais est plus étalée que précédemment (erreur inférieure à 2 °C durant plus de 94 % du temps) (Figure 13).

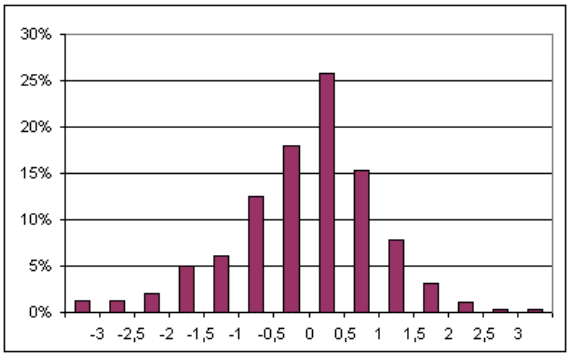

Figure 13. Répartition statistique des écarts de température en °C (2ème cas)

5. CONCLUSION

Le modèle développé intègre la plupart des phénomènes thermiques intervenant dans l'échange entre l'air et le sol, à l'exception de l'infiltration d'eau dans le sol.

Le modèle thermique de sol tient compte de nombreux paramètres, ce qui rend le modèle adapté à tout type de situation réelle. Par contre, son étalonnage n'a pas encore été complètement finalisé, faute de relevés de température de sol.

Le modèle d'échangeur air-sol comporte un maillage limité (60 mailles) rendant sa mise en œuvre peu complexe.

Les résultats obtenus sur deux cas réels s'accompagnent d'une erreur assez faible sur la température de sortie de l'air. L'influence de cet écart est encore plus faible sur la température des locaux rafraîchis. Néanmoins, l'étalonnage du modèle à partir de ses nombreux paramètres d'entrée – particulièrement les propriétés du sol – reste encore délicat. Une validation plus approfondie serait donc utile.

Le modèle présenté ici est aujourd'hui diffusé comme module de calcul intégré au logiciel COMFIE. Son utilisation permet d'évaluer l'amélioration du confort d'été apportée par l'échangeur air-sol dès la conception d'un bâtiment.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été soutenue par l'ADEME, l'entreprise Canada Clim (Conception et installation de puits canadiens) et la région Languedoc-Roussillon.

RÉFÉRENCES

[1] **PENMAN**, H. L. *Vegetation and hydrology*, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Royaume-Uni, (1963), cité par [6] et [12].

[2] **HOLLMULLER**, P., *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments*, Thèse de doctorat, Faculté des sciences de l'Université de Genève, 125 p., (2002).

Disponible en ligne. URL : http://www.unige.ch/cyberdocuments/theses2002/HollmullerP/these.html

[3] **BENKERT**, S., **HEIDT**, F. D. et **SCHÖLER**, D., Calculation tool for earth heat exchangers GAEA, *Proceedings of IBPSA Conference*. Prague, (1997).

[4] **BOJIĆ**, M., **TRIFUNOVIĆ**, N., **PAPADAKIS**, G. et **KYRITSIS**, S., Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building, *Energy*, Vol. 22 (12), pp. 1151-1158, (1997).

[5] **DE PAEPE**, M. et **JANSSENS**, A., Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers, *Energy and Buildings*, Vol. 35 (4), pp. 389-397, (2003).

[6] **DIBOWSKI**, H. G., *Auf Basis umfangreicher Messdatensätze experimentell und numerisch validierte Regeln zur optimierten Auslegung von Luft-Erdwärmetauschern.* Thèse de doctorat. Universität Kassel, Kassel, Allemagne, 225 p., (2003).

[7] **ZWEIFEL**, G., *A simplified model of a Ground to Air Heat Exchanger*, Hochschule für Technik+Architektur Luzern (HTA Luzern), Horw, Suisse, (2004).

[8] **AL AJMI**, F., **LOVEDAY**, D. L., **HANBY**, V. I., The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate, *Building and Environment*, Vol. 41 (3), pp. 235-244, (2005).

[9] **GHOSAL**, M. D. et **TIWARI**, G. N., Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse, *Energy conversion and management*, Vol. 47 (13-14), pp. 1779-1798, (2006).

[10] **BADESCU**, V. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house, *Renewable energy*. Vol. 32 (5). pp. 845-855. (2007).

[11] **BENKERT**, S. et **HEIDT**, F. D., *Abschlussbericht zum Projekt : Validierung des Programms "Graphische Auslegung von ErdwärmeAustauschern GAEA" mit Hilfe von Messdaten im Rahmen des Verbundprojekts "Luft-/Erdwärme tauscher" der AG Solar NRW*. FG Bauphysik & Solarenergie, Universität Siegen, 89 p. (2000).
Disponible en ligne. URL : http://nesa1.uni-siegen.de/softlab/download/abschlussbericht.PDF

[12] **MIHALAKAKOU**, G., **SANTAMOURIS**, M., **LEWIS**, J. O. et **ASIMAKOPOULOS**, D. N., On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles, *Solar Energy*, Vol 60, Nos. 3/4, pp. 181-190, (1997)

[13] **HAGENTOFT**, C.-E., *Heat loss to the ground form a building. Slab on the ground and cellar*, Thèse de doctorat, Lund Institute of Technology, Lund, Suède, 216 p., (1988).

[14] **MIHALAKAKOU**, G., **SANTAMOURIS**, M., **ASIMAKOPOULOS**, D.N. et **ARGIRIOU**, A., On the ground temperature below buildings, *Solar energy*. Vol. 55 (5), pp. 355-362, (1995).

[15] **MARCHIO**, D. et **REBOUX**, P., *Introduction aux transferts thermiques*, Les Presses de l'École des Mines, Paris, (2003).

[16] **PEUPORTIER**, B., **BLANC-SOMMEREUX**, I. *COMFIE, passive solar design tool for multizone buildings : Manuel des utilisateurs,* Version 3.3, Centre d'énergétique, Ecole des Mines de Paris, 92 p., (1994).

[17] **JACOVIDES**, C.P., **MIHALAKAKOU**, G., **SANTAMOURIS**, M. et **LEWIS**, J.O., On the ground temperature profile for passive cooling applications in buildings, *Solar energy,* Vol. 57 (3), pp. 167-175, (1996).

[18] **BACOT**, P., **NEVEU**, A. et **SICARD**, J., Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment, *Revue Générale de Thermique*, n°267, Paris, (1984).