

Optimisation des performances d'un champ de sonde par injection de coulis à haute performance thermique

Sandrine PINCEMIN*, Vincent PARTENAY, Peter RIEDERER

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment,
290, route des Lucioles - BP 209, 06904 Sophia Antipolis cedex

* (auteur correspondant : sandrine.pincemin@cstb.fr)

Résumé

Une des solutions analysées dans le projet MESSIB et présentée dans cette étude est le stockage par chaleur sensible dans le sol (champ de sonde et pompe à chaleur réversible) pour des applications de chauffage et de refroidissement. Or, un des facteurs limitant d'un tel système est le transfert thermique entre le sol et les sondes. Un fluide fortement conducteur dont le rôle est le remplissage de la porosité du sol et l'intensification des transferts thermiques entre le sol et les sondes a donc été développé. Afin d'identifier les gains de performance par l'utilisation d'un tel coulis, un modèle dynamique du système a été développé sous Matlab/Simulink[®]. Le modèle utilisé et les résultats obtenus en termes de performance globale pour différents climats européens (22 sites) sur une année sont présentés et commentés ici.

Nomenclature

CFM fluide à forte conductivité

GPF coefficient de performance annuel

R_{inj} Rayon d'injection, *m*

T température, *K*

Symboles grecs

ε porosité, %

λ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

Indices et exposants

s sol

1. Introduction

Les énergies utilisées traditionnellement pour le chauffage ou le rafraîchissement sont le pétrole, le charbon et l'électricité. Toutefois, il n'est pas intéressant d'utiliser du pétrole qui brûle à plus de 1000°C pour créer une ambiance intérieure à 20-25°C. De même, dans le cas de l'électricité, il n'apparaît pas non plus rentable d'utiliser directement cette énergie à fort potentiel pour des applications de chauffage. Des solutions prenant en compte un stockage thermique et visant une utilisation mieux adaptée des énergies ont donc été testées dans le cadre du projet européen MESSIB. Ce projet a pour objectif le développement, l'évaluation et la démonstration de systèmes de stockage d'énergie multi-sources pour le bâtiment. Basés sur des nouveaux matériaux, technologies ou méthodes de contrôles le but est de permettre une réduction significative de la consommation du bâtiment, la diminution des gradients thermiques et des variations de température ainsi que la gestion active de la demande énergétique.

Dans le cas du stockage dans le sol, la solution étudiée vise le petit résidentiel et est basée sur l'injection à forte pression d'un fluide fortement conducteur (ou CFM) dans le sol, d'un champ de sondes et d'une pompe à chaleur connectée à un plancher chauffant. La présence du CFM va permettre d'accroître les transferts thermiques entre le sol et le champ de sonde comme présenté sur la figure 1. L'injection à forte pression permettra au CFM de pénétrer dans le sol et de bien remplir la porosité quelque soit la nature de ce dernier.

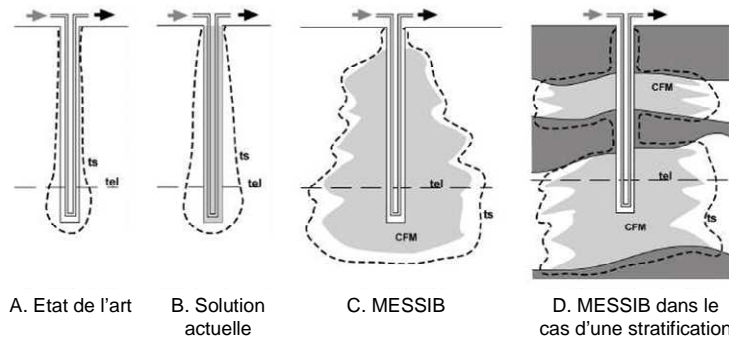


Figure 1 : Présentation de la solution étudiée dans le projet MESSIB

L'utilisation d'un tel fluide a pour objectifs de diminuer la taille des sondes utilisées par intensification des transferts thermique et de diminuer la consommation du bâtiment. Des simulations numériques ont donc été réalisées afin d'estimer dans quelles conditions et pour quel type de configuration ces objectifs sont atteints. Un modèle dynamique réalisé sous Matlab/Simulink[®] a donc été développé afin de permettre la réalisation d'une étude paramétrique qui sera détaillée par la suite.

2. Structure générale du modèle développé

L'analyse de la pertinence de l'utilisation d'une telle solution est réalisée sur plusieurs sites en Europe et vingt-deux climats différents ont été analysés. Afin de mener ces modélisations, un outil flexible a été construit sous Matlab/Simulink[®]. Les différents systèmes décrits dans cet outil sont : le bâtiment équipé d'un plancher chauffant, la pompe à chaleur et son système de régulation, le champ de sonde avec ou sans CFM et les organes annexes tels que les pompe de circulation. Seuls les systèmes principaux sont présentés dans cette section.

2.1. Modèle de bâtiment

En se basant sur la typologie française des bâtiments, le choix s'est porté sur une maison résidentielle typique de 100m² (Mozart, figure 2), dont les principales caractéristiques sont présentées sur la figure 2 et dans le tableau 1. La définition du bâtiment a été établie selon les principes de la réglementation thermique RT2005.

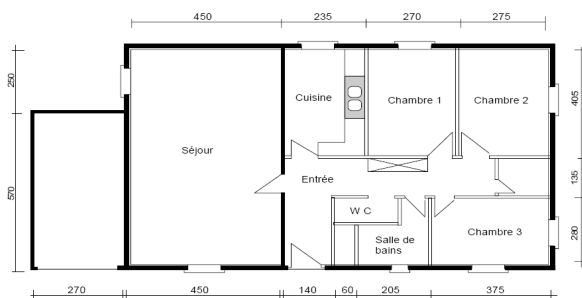


Figure 2 : Maison Mozart

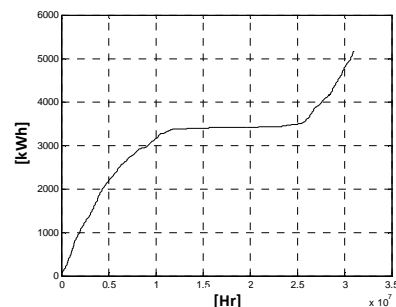


Figure 3 : Consommation annuelle de la maison Mozart sous le climat de la Rochelle

La vérification du comportement thermique annuel bâtiment est présentée sur la figure 3. Il apparaît alors que les performances du bâtiment sont bien en accord avec la RT2005, la consommation annuelle est voisine de 50 kWh.m².an⁻¹.

Elément	Surface [m ²]	Matériaux	e [m]	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ² .K ⁻¹]	c _p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Mur externe	70,69	Bloc creux en béton de sable à parois épaisses, 2 alvéoles	0,02	920	1,05	2000
		Polystyrène expansé	0,08	1200	0,04	16
		Plaque de plâtre	0,01	800	0,35	850
Mur interne	67,1	Plaque de plâtre	0,01	800	0,35	850
		Vide	0,03	-	-	-
		Plaque de plâtre	0,01	800	0,35	850
Sol	99,84	Béton	0,15	920	1,75	2300
		Polystyrène extrudé	0,08	1200	0,033	35
		Béton	0,14	920	1,75	2300
		Carrelage	0,01	850	1,3	800
Plafond	99,84	Laine de verre	0,16	980	0,047	100
		Plaque de plâtre	0,01	800	0,35	850
Mur en contact avec une pièce non chauffée	14,50	Béton	0,2	920	1,75	2300
		Polystyrène expansé	0,08	1200	0,04	16
		Plaque de plâtre	0,01	800	0,35	850
Porte extérieure	2,04	Bois	0,5	2720	0,22	500
Vitrage	15,02	Double vitrage de type 4/10/4				

Tableau 1 : Caractéristiques et propriété thermique du bâtiment Mozart

2.2. Modèle de pompe à chaleur

Le modèle de pompe à chaleur utilisé est le type 668 de TRNSYS 17, qui selon une méthodologie développée au CSTB a été traduit afin d'être compatible avec Matlab/Simulink® [1].

2.3. Modèle de sondes géothermique

Le modèle de sonde géothermique est basé sur la résolution d'un problème de conduction par différences finies, un maillage 3D du sol couplé aux sondes géothermiques (U ou double U) a donc été réalisé. La figure 4, partie gauche, présente les trois sous-systèmes du modèle de sonde :

- Le sous-système supérieur qui représente la partie du sol soumise aux variations climatiques et qui prend en compte les propriétés thermiques initiales du sol.

- Le sous-système sonde qui permet de décrire précisément le champ de sonde (maillage 3D) et qui est couplé à un modèle de tuyau pour le calcul des transferts thermiques entre le fluide de travail et les sondes, ainsi que pour le calcul de la résistance thermique de forage (R_b). Le maillage est alors plus fin aux nœuds de couplage entre les deux modèles (figure 4, droite).

- Le sous système inférieur permet de prendre en compte les transferts thermiques entre le bas du champ de sonde et le sol.

Par la suite, le modèle ainsi défini a été validé avec le modèle DST, développé par Hellstöm et al en 1996 [2] et considéré comme une référence en termes de précision du comportement thermique des champs de sonde [3].

2.4. Analyse paramétrique

L'outil développé a pour objectif de tester la pertinence de l'utilisation d'un fluide à forte conductivité thermique pour accroître les transferts thermiques entre le sol et le champ de

sonde et pour permettre la diminution de la consommation dans le bâtiment. Les performances étant différentes selon la nature du sol, les données climatiques, les propriétés thermiques du fluide et la distance selon laquelle le CFM est en interaction avec le système sol/champ de sonde (rayon d'injection, R_{inj}), une étude paramétrique a donc été nécessaire. Les paramètres retenus sont les suivants :

- Conductivité thermique du sol, λ_{Sol} : 1 $W.m^{-1}.K^{-1}$, 2 $W.m^{-1}.K^{-1}$, 3 $W.m^{-1}.K^{-1}$
- Conductivité thermique du CFM, λ_{CFM} : 1 $W.m^{-1}.K^{-1}$, 3 $W.m^{-1}.K^{-1}$, 5 $W.m^{-1}.K^{-1}$
- Rayon d'injection du CFM, R_{inj} : 0 m, 2m, 4m.
- 22 sites

La grandeur évaluée afin de pouvoir comparer les performances des solutions testées est le coefficient de performance global (GPF), qui prend en compte les performances en chauffage et en climatisation sur l'année.

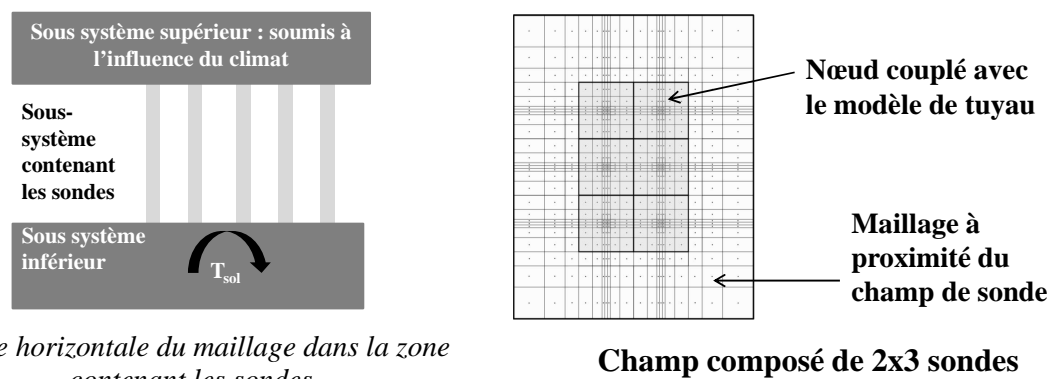


Figure 4 : Description du modèle du champ de sondes et du maillage associé

3. Résultats numériques et discussion

Afin d'éviter les répétitions, les résultats ne seront présentés que pour trois sites (Munich, Madrid et Trappes) qui permettent de couvrir une grande variété de climats observables en Europe.

3.1. Conductivité thermique du sol

L'influence de la conductivité thermique du sol est présentée sur la figure 5 pour Munich, Madrid et Trappes, dans une configuration sans injection de CFM. L'influence du sol est donc un paramètre très important sur les performances du système. L'intensification du GPF peut atteindre 8,5%, pour Munich lorsque la conductivité passe de 1 à 3 $W.m^{-1}.K^{-1}$. On constate de plus que l'influence est plus importante sur les climats froids comme Munich et Trappes.

3.2. Influence du rayon d'injection

L'influence du rayon d'injection du CFM est présentée sur la figure 6. On constate que l'évolution est la même quelque soit le site considéré. Un rayon d'injection inférieur à 2 mètres est suffisant pour améliorer les transferts thermiques. Au-delà il n'y a plus de changement sur le GPF.

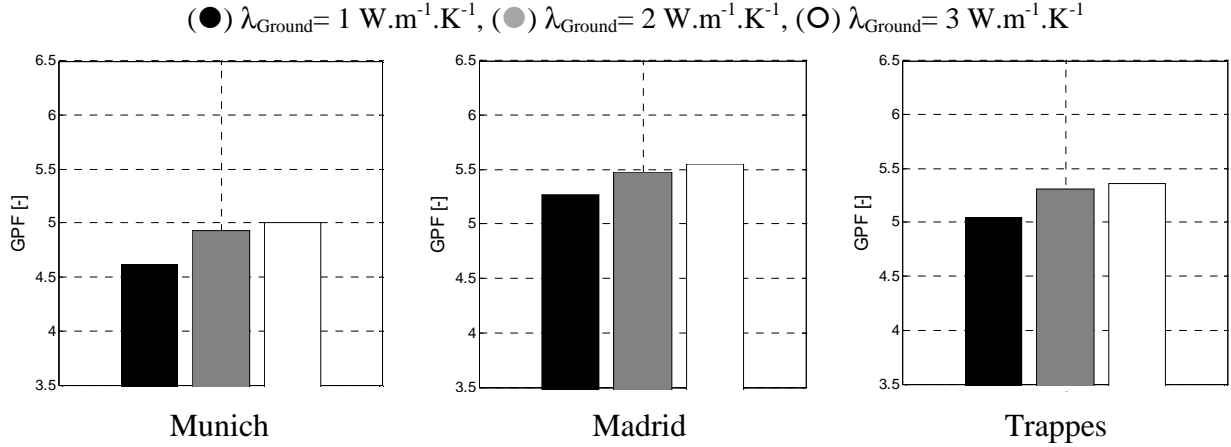


Figure 5: Influence de la conductivité thermique du sol, $\lambda_{\text{CFM}} = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $R_{\text{inj}} = 0\text{m}$

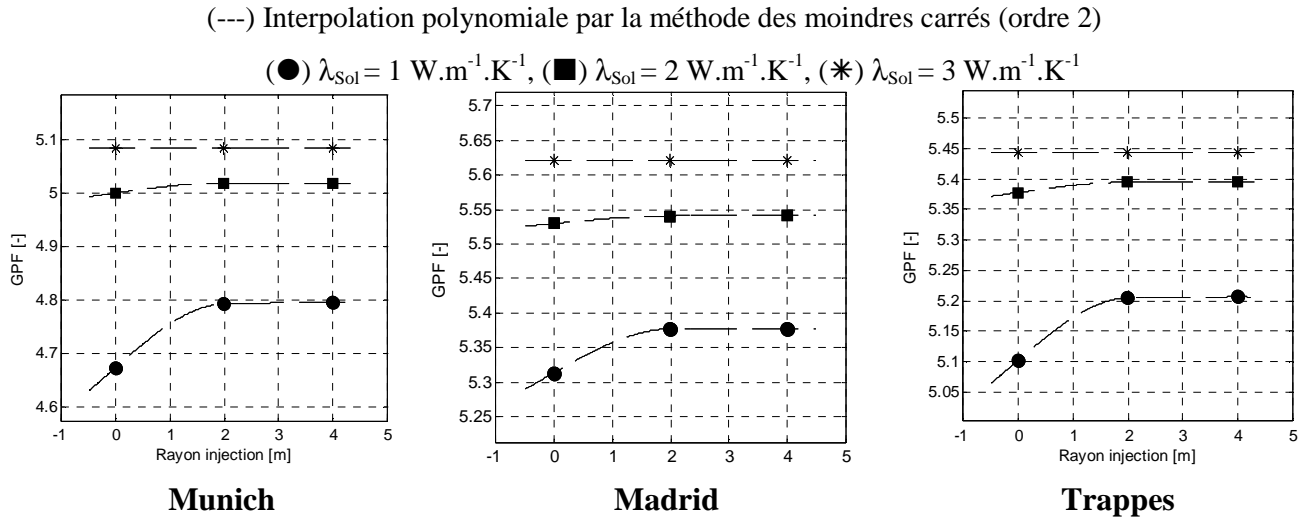


Figure 6: Influence du rayon d'injection sur le GPF $\lambda_{\text{CFM}} = 3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

3.3. Influence de la conductivité thermique du CFM

De la même façon l'influence de la conductivité thermique du CFM a été évaluée. Les résultats sont présentés dans le tableau 2. On constate que l'intensification du GPF est d'autant plus importante que la valeur initiale de la conductivité du sol est faible et qu'il y a peu d'effet lorsque l'on atteint des valeurs de conductivité de l'ordre de 2 ou 3 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

	$\lambda_{\text{CFM}} [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$					
	3			5		
$\lambda_{\text{Sol}} [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	1	2	3	1	2	3
Munich	3.88	2.26	1.97	6.01	3.25	2.66
$\Delta\text{GPF} [\%]$ Madrid	2.10	1.14	1.39	3.07	1.99	1.88
Trappes	3.10	1.95	1.76	4.83	2.79	2.37

Tableau 2: Influence de la conductivité thermique du CFM. La référence pour les calculs est GPF ($R_{\text{inj}} = 2 \text{ m}$, $\lambda_{\text{CFM}} = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) pour chacun des sols considérés

3.4. Analyse globale

Une présentation globale des résultats est réalisée sur la figure 7 pour 8 pays différents. Sur cette figure est représenté le GPF pour un sol sans modification et le GPF modifié moyen qui est calculé en réalisant une moyenne de tous les cas étudiés lors de l'étude paramétrique pour chacun des pays retenus et ce pour les trois valeurs de conductivité thermique de sol retenues.

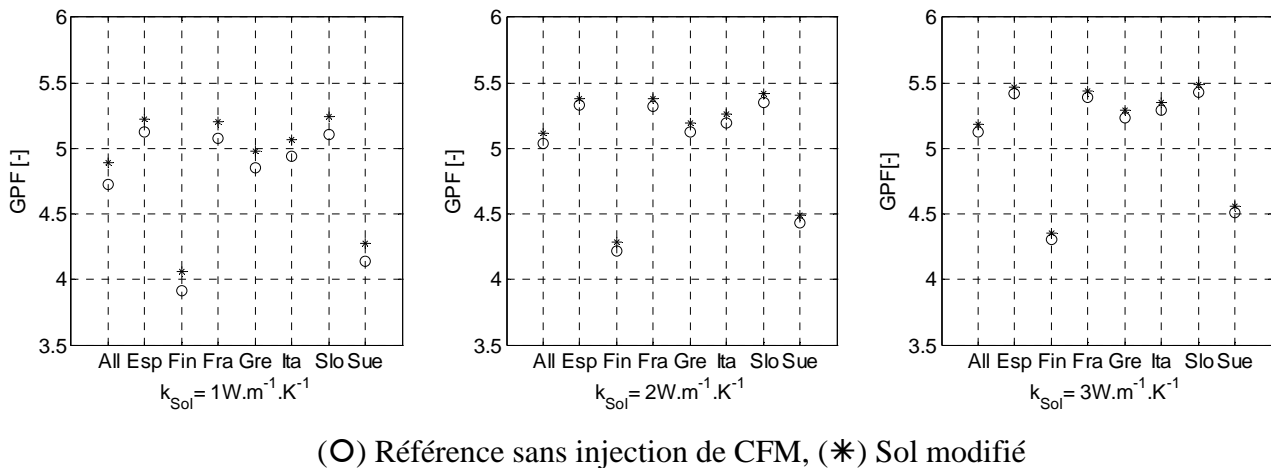


Figure 7: Impact moyen de l'utilisation du CFM sur le GPF pour trois natures de sols différents.

D'après les résultats de la figure 7, on constate que pour tous les pays analysés, les effets du CFM ne sont perceptibles que lorsque le sol a une très faible valeur de conductivité thermique. Les résultats observés au-delà de $1\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ne sont pas suffisamment élevés pour considérer cette solution.

4. Conclusion

Un outil de simulation prenant en compte des modèles de bâtiment, de champ de sonde et de pompe à chaleur a été développé afin de mener une étude paramétrique sur l'utilisation d'un fluide à forte conductivité thermique. Les résultats obtenus sur les 22 sites retenus, ont permis de montrer que l'utilisation d'un tel matériau est intéressante seulement dans le cas où la conductivité thermique du sol est très faible, inférieure à $1\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Références

- [1] Peter Riederer, Werner Keilholz, Vanessa Ducreux, Coupling of TRNSYS with Simulink – a method to automatically export and use TRNSYS models within Simulink and vice versa, *Proceeding of Building simulation, Glasgow, Scotland*, (2009)
- [2] Daniel Pahud, Goran Hellström, *The New Duct Ground Heat Model for TRNSYS*, (1996).
- [3] Vincent Partenay, développement d'une méthodologie d'évaluation des performances de système de pompe à chaleur géothermiques, *thèse de doctorat de l'université de Savoie*, octobre 2010.

Remerciements

Cette étude bénéficie du soutien financier de la communauté européenne (7^e PCRD) dans le cadre du projet européen MESSIB.