



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

RAPPORT

POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES

**ANALYSE DE DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE CAPTEURS
ENTERRÉS**

FÉVRIER 2015

ÉDITO

Le Grenelle Environnement a fixé pour les bâtiments neufs et existants des objectifs ambitieux en matière d'économie et de production d'énergie. Le secteur du bâtiment est engagé dans une mutation de très grande ampleur qui l'oblige à une qualité de réalisation fondée sur de nouvelles règles de construction.

Le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a pour mission, à la demande des Pouvoirs Publics, d'accompagner les quelque 370 000 entreprises et artisans du secteur du bâtiment et l'ensemble des acteurs de la filière dans la réalisation de ces objectifs.

Sous l'impulsion de la CAPEB et de la FFB, de l'AQC, de la COPREC Construction et du CSTB, les acteurs de la construction se sont rassemblés pour définir collectivement ce programme. Financé dans le cadre du dispositif des certificats d'économies d'énergie grâce à des contributions importantes d'EDF (15 millions d'euros) et de GDF SUEZ (5 millions d'euros), ce programme vise, en particulier, à mettre à jour les règles de l'art en vigueur aujourd'hui et à en proposer de nouvelles, notamment pour ce qui concerne les travaux de rénovation. Ces nouveaux textes de référence destinés à alimenter le processus normatif classique seront opérationnels et reconnus par les assureurs dès leur approbation ; ils serviront aussi à l'établissement de manuels de formation.

Le succès du programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » repose sur un vaste effort de formation initiale et continue afin de renforcer la compétence des entreprises et artisans sur ces nouvelles techniques et ces nouvelles façons de faire. Dotées des outils nécessaires, les organisations professionnelles auront à cœur d'aider et d'inciter à la formation de tous.

Les professionnels ont besoin rapidement de ces outils et « règles du jeu » pour « réussir » le Grenelle Environnement.

Alain MAUGARD

Président du Comité de pilotage du Programme
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »
Président de QUALIBAT



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS

« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

Ce programme est une application du Grenelle Environnement. Il vise à revoir l'ensemble des règles de construction, afin de réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

AVANT-PROPOS

Afin de répondre au besoin d'accompagnement des professionnels du bâtiment pour atteindre les objectifs ambitieux du Grenelle Environnement, le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a prévu d'élaborer les documents suivants :

Les Recommandations Professionnelles « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents techniques de référence, préfigurant un avant-projet NF DTU, sur une solution technique clé améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur vocation est d'alimenter soit la révision d'un NF DTU aujourd'hui en vigueur, soit la rédaction d'un nouveau NF DTU. Ces nouveaux textes de référence seront reconnus par les assureurs dès leur approbation.

Les Guides « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents techniques sur une solution technique innovante améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur objectif est de donner aux professionnels de la filière les règles à suivre pour assurer une bonne conception, ainsi qu'une bonne mise en œuvre et réaliser une maintenance de la solution technique considérée. Ils présentent les conditions techniques minimales à respecter.

Les Calepins de chantier « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des mémentos destinés aux personnels de chantier, qui illustrent les bonnes pratiques d'exécution et les dispositions essentielles des Recommandations Professionnelles et des Guides « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 ».

Les Rapports « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » présentent les résultats soit d'une étude conduite dans le cadre du programme, soit d'essais réalisés pour mener à bien la rédaction de Recommandations Professionnelles ou de Guides.

Les Recommandations Pédagogiques « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents destinés à alimenter la révision des référentiels de formation continue et initiale. Elles se basent sur les éléments nouveaux et/ou essentiels contenus dans les Recommandations Professionnelles ou Guides produits par le programme.

L'ensemble des productions du programme d'accompagnement des professionnels « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » est mis gratuitement à disposition des acteurs de la filière sur le site Internet du programme : <http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr>



Sommaire

1 - Introduction	5
2 - Limites de dimensionnement des sondes verticales	6
2.1. • Généralités	6
2.1.1. • Description	6
2.1.2. • Contraintes de dimensionnement	7
2.2. • Comparaison des méthodes de dimensionnement	7
2.2.1. • Les méthodes disponibles	7
2.2.2. • Comparaison des méthodes disponibles	8
2.3. • Méthode de dimensionnement retenue	9
2.4. • Conclusion sur le dimensionnement des sondes géothermiques verticales	11
3 - Étude des corbeilles géothermiques	12
3.1. • Généralités	12
3.1.1. • Description	12
3.1.2. • Dimensionnement	13
3.2. • Les simulations menées	14
3.2.1. • Le modèle	14
3.2.2. • Les hypothèses de calculs	15
3.3. • Résultats des simulations	15
3.4. • Conclusion de l'étude sur les corbeilles géothermiques	20
4 - Étude des capteurs double couche	21
4.1. • Généralités	21
4.1.1. • Description	21
4.1.2. • Dimensionnement	22
4.2. • Les simulations menées	22
4.2.1. • Le modèle	23
4.2.2. • Les hypothèses de calculs	23
4.3. • Résultats des simulations	24
4.4. • Conclusion de l'étude sur les capteurs double couche	28

Introduction

1



Dans le cadre d'une installation de chauffage équipée d'une pompe à chaleur géothermique, le capteur vertical ou sonde géothermique verticale est une solution intéressante par son gain de place sur le terrain. Cependant, des contre-références peuvent apparaître dans le cas d'un mauvais dimensionnement.

Ce document présente une étude sur les limites de dimensionnement des sondes géothermiques verticales avec notamment une analyse des méthodes existantes.

Deux études complémentaires portent sur d'autres techniques de capteurs géothermiques. Les thèmes en sont les suivants :

- l'état de l'offre des corbeilles géothermiques ainsi que les analyses technique et dimensionnelle ;
- le pré-dimensionnement des capteurs double couche.

Ce travail a été réalisé par le COSTIC (Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques).



Limites de dimensionnement des sondes verticales

2



Les sondes géothermiques verticales sont utilisées en habitat individuel (surface chauffée supérieure à 150 m² avec 2 sondes au minimum), en maisons individuelles groupées (champ de sondes), en petit collectif voire en petit tertiaire. Il s'agit d'une technique éprouvée. Cependant, des contre-références peuvent apparaître notamment dans le cas d'un mauvais dimensionnement. Cette étude recense les différentes méthodes de dimensionnement existantes et définit les valeurs limites de puissance d'extraction.

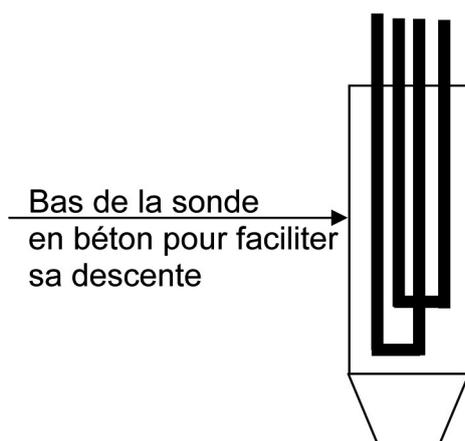
2.1. • Généralités

2.1.1. • Description

Une sonde géothermique verticale est un vocable de plus en plus utilisé pour désigner un capteur de chaleur vertical d'une profondeur de 80 à 100 m en France voire au-delà dans d'autres pays européens.

Elle est constituée d'un ou plus couramment de deux tubes en U en polyéthylène haute densité (PEHD) de DN 32 mm dans lesquels circule un liquide caloporteur (généralement un mélange eau-glycol). Après s'être réchauffé dans le terrain, le fluide est refroidi de 3 à 4 K dans l'évaporateur d'une pompe à chaleur.

Pour une maison individuelle, la sonde est intégrée dans un forage d'un diamètre de l'ordre de 125 à 165 mm. Une fois la sonde posée, l'espace entre le forage et les tubes est comblé par l'injection d'un ciment à prise hydraulique (par exemple un mélange ciment-bentonite) par le bas de la sonde à l'aide d'un cinquième tube. Ceci permet d'assurer un bon contact thermique entre la sonde et le terrain et d'éviter le risque d'infiltration d'eau.



▲ Figure 1 : Exemple d'une sonde géothermique verticale en configuration double U

2.1.2. • Contraintes de dimensionnement

Il est reconnu que les caractéristiques thermiques des roches traversées par le forage et leur état de saturation en eau jouent un rôle essentiel pour le dimensionnement de la longueur des sondes géothermiques. Le calcul de la longueur de sonde, ajustée en fonction de la puissance thermique de la pompe à chaleur, doit être mené de manière rigoureuse.

Par exemple, la température minimale dans les sondes en fin d'hiver (température moyenne du fluide caloporteur entre aller et retour) ne doit pas être inférieure à $-1,5\text{ °C}$. En pratique, il est même recommandé de prévoir une longueur de sonde suffisante pour ne pas descendre en-dessous de 0 °C .

Un sous-dimensionnement de la longueur des sondes aura pour conséquence une baisse excessive de la température des sondes avec une diminution des performances de l'installation (surconsommation d'énergie, baisse du coefficient de performance...). Dans les cas les plus extrêmes, cela peut provoquer un gel des sondes et du sous-sol entraînant un affaissement du terrain au moment du dégel.

2.2. • Comparaison des méthodes de dimensionnement

2.2.1. • Les méthodes disponibles

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement des sondes géothermiques verticales. Les méthodes couramment utilisées en France ou en Europe sont les suivantes :

- Les règles AFPAC et UECF/FFB avec une puissance thermique d'extraction spécifique maximale de 50 W/m linéaire de tube et une énergie soutirée maximale de 100 kWh/(m.an) . Ce ratio est utilisé sous la responsabilité du foreur qui peut éventuellement le réduire en fonction de la nature du terrain ;



- La directive allemande VDI 4640 qui donne des valeurs de référence et des procédures d'utilisation sur les systèmes géothermiques. Cette directive, appliquée en Allemagne, est aussi reconnue dans certains pays européens comme la Suisse et l'Autriche ;
- La méthode suisse développée pour des conditions climatiques en Suisse par l'Office Fédéral de l'Énergie en Suisse (OFEN) ;
- La norme suisse SIA 384/6, éditée en français en 2010, apporte des exigences sur la conception, le dimensionnement, la réalisation et l'entretien des installations équipées de sondes géothermiques verticales. La méthode de calcul est détaillée dans la norme. Des logiciels de calculs spécialisés peuvent être utilisés comme EED, PileSim... ;
- L'outil BRGM qui est une feuille de calcul Excel dont la formule de calcul est basée sur une équation de dimensionnement de sonde géothermique verticale validée par l'ASHRAE. Cette feuille de calcul permet le dimensionnement d'une sonde géothermique verticale seule mais aussi d'un champ de sondes ;
- L'outil EDF, développé par la Division Recherche et Développement. Basés sur des simulations dynamiques, les résultats ont permis d'élaborer un abaque de dimensionnement pour des conditions de températures d'eau nominales de $-3/0^{\circ}\text{C}$ (à 30% de glycol). Les puissances extractibles dépendent essentiellement de la nature de sol et en particulier de sa conductivité thermique (en $\text{W}/(\text{m.K})$), du temps de fonctionnement annuel de l'installation (qui dépend lui-même du climat, du bâtiment et de son niveau d'isolation ainsi que des fonctions assurées par la pompe à chaleur : chauffage, ECS et refroidissement) ;
- L'outil développé spécifiquement pour cette étude par le COSTIC. Il s'agit d'une modélisation simple des échanges d'une sonde géothermique verticale en double U. Elle est basée sur différents modèles analytiques existants tenant compte des contraintes dues aux échanges convectifs entre le fluide caloporteur et la paroi intérieure du tube.

Note

Par rapport aux outils BRGM et EDF, le temps de fonctionnement de la pompe à chaleur n'est pas pris en compte dans l'outil du COSTIC.

2.2.2. • Comparaison des méthodes disponibles

Le tableau de la (Figure 2) présente les valeurs de puissance thermique d'extraction spécifique obtenues à partir des différentes méthodes existantes citées précédemment.

Deux cas de sols sont considérés, caractérisés par leur conductivité thermique λ :

- un sol avec argile, $\lambda=1,2 \text{ W}/(\text{m.K})$;
- un sol avec granite, $\lambda=3,0 \text{ W}/(\text{m.K})$.



Pour les méthodes qui tiennent compte de ce paramètre, le temps de fonctionnement considéré est de 2400 h/an.

Puissance thermique d'extraction spécifique W/m	VDI 4640	SIA 384/6	BRGM	EDF	COSTIC
Argile $\lambda=1,2$ W/(m.K)	20	30	33	23	38
Granite $\lambda=3,0$ W/(m.K)	55 à 70	50	52	42	40

▲ Figure 2 : Comparaison des limites de dimensionnement obtenues avec les différentes méthodes (la puissance est exprimée par mètre linéaire de tube)

La norme VDI 4640, couramment utilisée comme référence, semble optimiste dans certains cas. Elle donne par exemple les puissances thermiques d'extraction spécifique (par mètre linéaire de tube) suivantes :

- pour 1800 h de fonctionnement annuel et un sol de type argile : 25 W/m ;
- pour 2400 h de fonctionnement annuel et un sol de type argile : 20 W/m ;
- pour 1800 h de fonctionnement annuel et un sol de type granite : 65 à 85 W/m ;
- pour 2400 h de fonctionnement annuel et un sol de type granite : 55 à 70 W/m.

Pour l'argile sec, la valeur de puissance thermique d'extraction spécifique maximale donnée par la norme VDI 4640 (20 W/m) semble correcte. En revanche, pour le granite, la valeur est supérieure à celle obtenue par les autres méthodes. Il convient donc probablement de considérer une valeur inférieure à celle considérée par la norme.

Ces calculs montrent également que, selon la nature de sol, notamment pour l'argile, la puissance thermique d'extraction spécifique peut être considérablement réduite jusqu'à une valeur de l'ordre de 20 W/m (données VDI, EDF). Les valeurs de l'ordre de 30 W/m correspondent à un calcul réalisé avec de l'argile humide ($\lambda=1,65$ W/(m.K)).

2.3. • Méthode de dimensionnement retenue

Une méthode de dimensionnement a été élaborée à partir des travaux d'EDF. Elle prend notamment en compte les deux paramètres influents suivants : température du sol et temps de fonctionnement.

Influence de la conductivité thermique du sol

Plus la conductivité thermique du sol est élevée, plus la puissance thermique prélevée au sol est importante avec des variations plus ou moins grandes. Cependant, sur une profondeur de plusieurs dizaines de mètres, la conductivité thermique du sol (conductivité thermique



moyenne dans le cas de plusieurs couches géologiques présentes) est généralement comprise entre 1,5 et 2,5 W/(m.K).

Influence du temps de fonctionnement

L'influence du temps de fonctionnement sur la puissance extractible du sol conduit à considérer les trois cas suivants :

- **Cas 1** : la pompe à chaleur assure le chauffage seul dans des bâtiments neufs ou BBC, correspondant à un temps de fonctionnement annuel de 1000 h (zone climatique H3) à 1500 h (zone climatique H1) ;
- **Cas 2** : la pompe à chaleur assure le chauffage seul dans des bâtiments existants non rénovés, correspondant à un temps de fonctionnement annuel de 2000 h (zone climatique H3) à 2400 h (zone climatique H1) ;
- **Cas 3** : la pompe à chaleur assure le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, quel que soit le type de bâtiment. Le temps de fonctionnement annuel est supérieur à 3500 h, en raison de la production d'ECS.

Il est possible de définir un abaque de dimensionnement de la puissance d'extraction thermique spécifique en fonction de la conductivité thermique (Figure 3).

La zone de dimensionnement est délimitée par deux valeurs de conductivité thermique :

- Pour un sol peu conducteur ou si aucune valeur d'extraction thermique spécifique n'est connue, la conductivité thermique est considérée égale à 1,5 W/(m.K) ;
- Pour un sol bon conducteur, la conductivité thermique est considérée égale à 2,5 W/(m.K).

Note

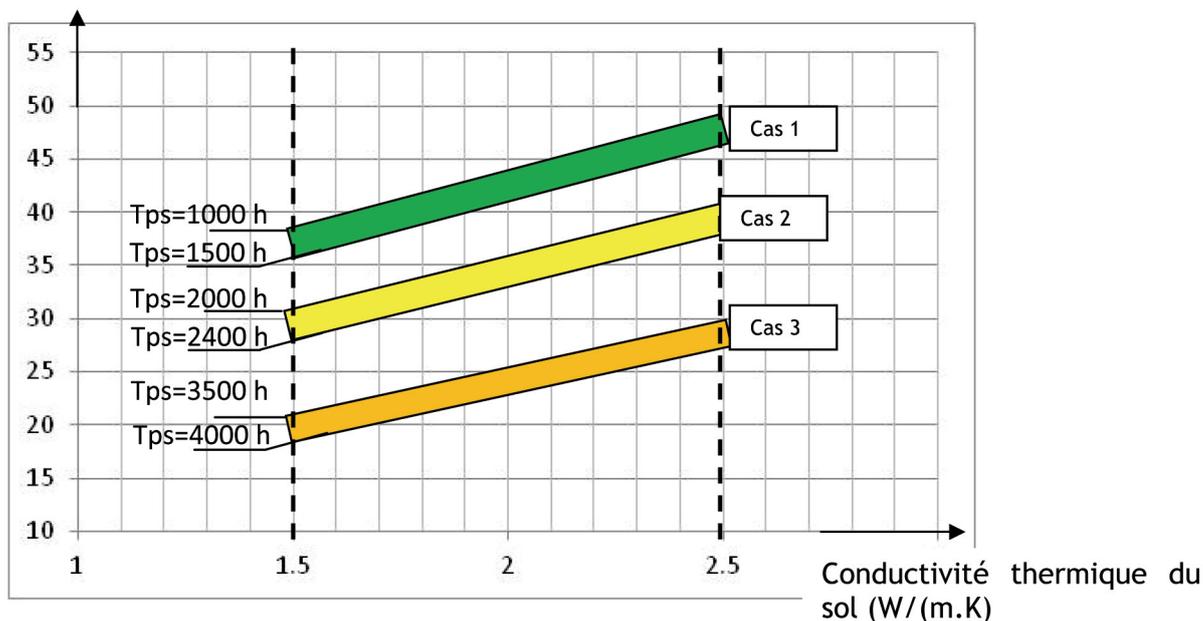
Pour les sols moyens, la conductivité thermique est considérée proche de 2 W/ (m K).



En pratique, en absence d'étude géologique préalable, notamment au moment du devis, la conductivité thermique du sol doit être considérée de 1,5 W/(m.K). Suivant le profil de forage réalisé par le foreur, la puissance thermique d'extraction spécifique est ensuite adaptée.



Puissance thermique
d'extraction spécifique
(W/m)



▲ Figure 3 : Puissance thermique d'extraction spécifique (par mètre linéaire de tube) en fonction de la nature de sol et du temps de fonctionnement annuel

Note

Dans le cas d'une installation neuve (RT 2012), pour une installation réversible (chauffage et rafraîchissement), une puissance thermique d'extraction spécifique de 45 à 60 W/m peut être envisagée.

2.4. • Conclusion sur le dimensionnement des sondes géothermiques verticales

Les écarts importants entre les résultats obtenus montrent bien que les méthodes de dimensionnement actuelles ne peuvent en aucun cas être utilisées pour un dimensionnement final d'une installation. Elles ne servent qu'à un pré-dimensionnement des sondes.

La méthode de dimensionnement basée sur l'abaque élaboré suite aux travaux d'EDF semble la plus pertinente. Elle permet à la fois de tenir compte des temps de fonctionnement ainsi que de la conductivité thermique du sol.

Si un mode rafraîchissement est prévu en été (rafraîchissement par les sondes géothermiques ou par la pompe à chaleur), la puissance thermique d'extraction spécifique du sol est améliorée. Elle dépend alors de nombreux paramètres avec en particulier le besoin de rafraîchissement par rapport au besoin de chauffage et les temps de fonctionnement respectifs. Dans ce cas, comme pour un fonctionnement en chauffage/rafraîchissement/ECS, il est préférable d'utiliser un outil dédié pour le dimensionnement de l'installation.



Étude des corbeilles géothermiques

3



La technique de captage d'énergie du sol utilisant des « corbeilles géothermiques » est apparue depuis quelques années dans l'habitat individuel. Des offres de fabricants mettent en avant les avantages de cette solution par rapport aux sondes géothermiques, notamment du point de vue du coût de réalisation. Cependant, les valeurs de dimensionnement annoncées diffèrent suivant les fabricants.

L'objectif est de mettre en évidence les échanges thermiques au niveau des tubes de la corbeille par un modèle simplifié et de déterminer une valeur limite de puissance thermique d'extraction spécifique en Watt par mètre linéaire de tube. Cette valeur pourra ensuite être comparée avec celles annoncées par les différents fabricants.



Cette étude considère des conditions de mise en œuvre spécifiques.

Compte tenu du manque de retours d'expériences sur cette technique, aucune règle de dimensionnement ne peut en être déduite.

3.1. • Généralités

3.1.1. • Description

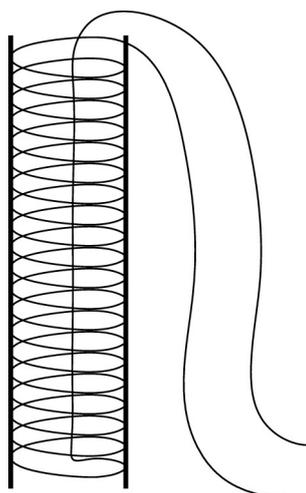
Une corbeille géothermique est constituée d'un tube de polyéthylène mis en spirale de forme conique ou cylindrique (Figure 4). Le tube résistant aux UV et au gel, d'une longueur de 40 à 100 m selon les fabricants, est généralement fixé sur une structure en forme de panier. Un fluide caloporteur (eau et antigel) y circule et capte la chaleur du sol environnant.



Comme pour les sondes géothermiques classiques, ce fluide transmet, par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur, son énergie thermique au fluide de la pompe à chaleur, laquelle alimente le système de chauffage en eau chaude.

Le sommet des corbeilles est enterré à une profondeur de 1 à 1,5 m afin qu'elles ne soient pas situées dans la zone du terrain soumise au gel. La corbeille étant enfouie à une profondeur comprise entre 1,5 et 3,5 m, cela permet de s'affranchir des variations journalières de la température et de disposer de variations de température saisonnières non synchrones avec la surface.

Ces installations prélevant de l'énergie au terrain, sa température baisse au cours de la saison de chauffage. Pendant la période estivale, le terrain doit retrouver un nouvel équilibre thermique. Ainsi, la température du sol est la plus élevée au mois de novembre (environ 13°C) c'est-à-dire au début de la période de chauffage et elle est minimale en fin de printemps (environ 7°C) lorsque le chauffage n'est plus nécessaire.



▲ Figure 4 : Exemple de corbeille géothermique

3.1.2. • Dimensionnement

Actuellement, il n'existe pas de règle de dimensionnement pour les corbeilles géothermiques. Les valeurs de puissance d'extraction sont essentiellement données par les fabricants. Elles varient de 0,7 à 2 kW pour une corbeille selon son diamètre, sa longueur de tube, le diamètre extérieur de tube... La puissance thermique d'extraction spécifique rapportée au mètre linéaire de tube varie entre 6 et 17,5 W/m, valeurs remises en cause par un certain nombre d'acteurs professionnels.



3.2. • Les simulations menées

Il s'agit d'étudier la diffusion thermique dans le sol afin d'estimer le risque d'apparition de gel autour de l'échangeur géothermique. Le but est de visualiser les températures du sol obtenues à l'intérieur et à l'extérieur d'une corbeille géothermique et d'observer l'apparition de températures négatives après un certain temps de fonctionnement. Une étude paramétrique a été réalisée permettant de comparer différents scénarii et positionnements des tubes entre eux.

Les simulations ont été réalisées sous tableur Excel.

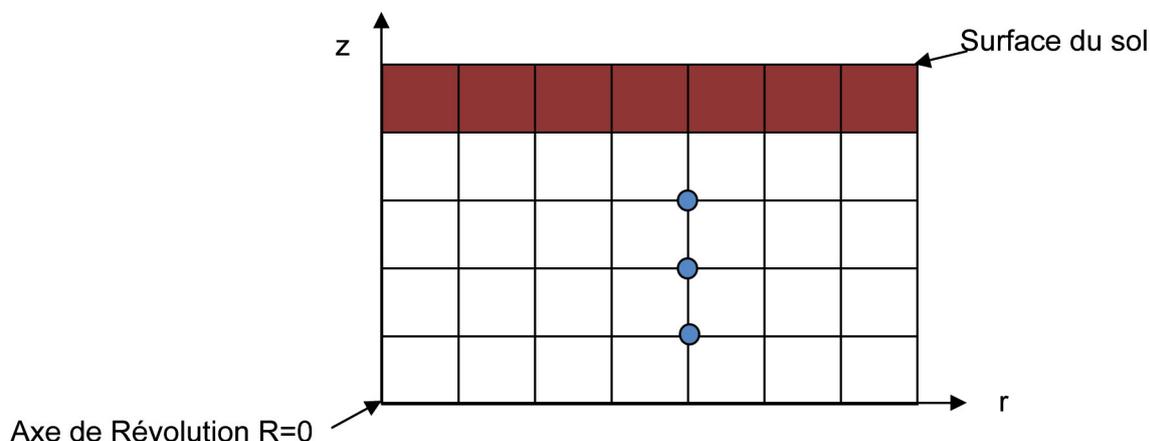
L'outil développé prend en compte l'influence de la viscosité cinématique sur les échanges thermiques. En effet, la viscosité cinématique varie de façon conséquente selon la proportion d'antigel. Un taux de glycol important et un fonctionnement à des températures en-dessous de zéro degré entraînent un écoulement laminaire qui défavorise les échanges thermiques, la puissance frigorifique diminue et la performance de la pompe à chaleur chute.

3.2.1. • Le modèle

Afin d'étudier l'échange corbeille-sol, une section de sol a été étudiée. Au lieu de considérer un cylindre complet, nous avons supposé un tube enroulé en spirale avec un pas entre les tubes et défini un axe de révolution.

La résolution s'est donc effectuée en coordonnée cylindrique pour une moitié de la corbeille en 2D avec une symétrie axiale.

Le sol modélisé est représenté par un maillage rectangulaire uniforme (Figure 5). Chaque nœud du maillage du sol constitue un nœud de calcul pour lequel une température de sol est calculée. La partie en rouge sur la figure représente la surface du sol considérée à une température constante. Les points bleus correspondent aux tubes du capteur géothermique. Ils sont à une température fixée.



▲ Figure 5 : Vue en coupe de la corbeille modélisée

3.2.2. • Les hypothèses de calculs

Les hypothèses suivantes ont été retenues :

- la température extérieure de paroi du tube est de -2°C , soit une température moyenne du fluide caloporteur de l'ordre de $-4,5^{\circ}\text{C}$;
- la puissance linéique apportée au fluide caloporteur est égale à 8 W/m sans période de régénération ;
- deux durées de fonctionnement continues de 6 et 8 h/jour ;
- les propriétés physiques du fluide caloporteur et du tube sont constantes ;
- la viscosité cinématique est d'environ $1,37 \cdot 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ pour le fluide caloporteur considéré à une température de $-4,5^{\circ}\text{C}$;
- le débit de fluide caloporteur est constant ;
- la température de surface de sol est égale à 10°C ;
- deux types de sol avec une conductivité thermique différente : λ de 1,8 et $2,3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- deux types de corbeilles : la première avec un diamètre de 1 m, un tube de diamètre 25 mm extérieur et une longueur de tube de 100 m ; la seconde avec un diamètre de 0,38 m, un tube de diamètre 25 mm extérieur et une longueur de tube de 40 m ;
- deux pas de tubes : 0,08 et 0,12 m ;
- une profondeur d'enfouissement de 1 m.

Par ailleurs, le sol est supposé être un matériau homogène dans lequel seul un échange par conduction a lieu. L'échange entre la paroi extérieure du tube et le sol est considéré parfait. Les tubes sont supposés être des sources ponctuelles dans le sol à température constante égale à la température de la paroi extérieure.

Note

Il est tenu compte d'un remblaiement de la corbeille par cimentation, par méthode ascendante à l'aide d'un tube perdu par injection d'un coulis de remplissage depuis la base du trou jusqu'à la cote d'environ 1 m de profondeur du terrain naturel pour faciliter la tranchée de liaison. La cimentation permet de favoriser les échanges entre les tubes et le terrain et de réaliser un remblaiement correct sans vide d'air.

3.3. • Résultats des simulations

Pour chaque corbeille simulée, les résultats obtenus sont présentés sous la forme d'une image présentant les évolutions de températures entre la température de paroi extérieure du tube de la corbeille (bleu) et la température de sol (rouge). Il est ainsi possible de comparer les températures du sol à proximité des parois des tubes.



Les images présentent ainsi une vue en coupe de la corbeille avec des températures données à une profondeur de 2,50 m.

Rappelons que les simulations sont réalisées à une puissance d'extraction fixe de 8W/m linéaire de tube.

Influence du temps de fonctionnement

Sur la (Figure 6) sont comparés les résultats de simulation d'une corbeille en fonction du temps de fonctionnement. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- un diamètre de 1 m ;
- une profondeur d'enfouissement de 1 m ;
- un pas de tubes de 0,08 m ;
- un coefficient de conductivité thermique de sol de 1,8 W/(m.K).

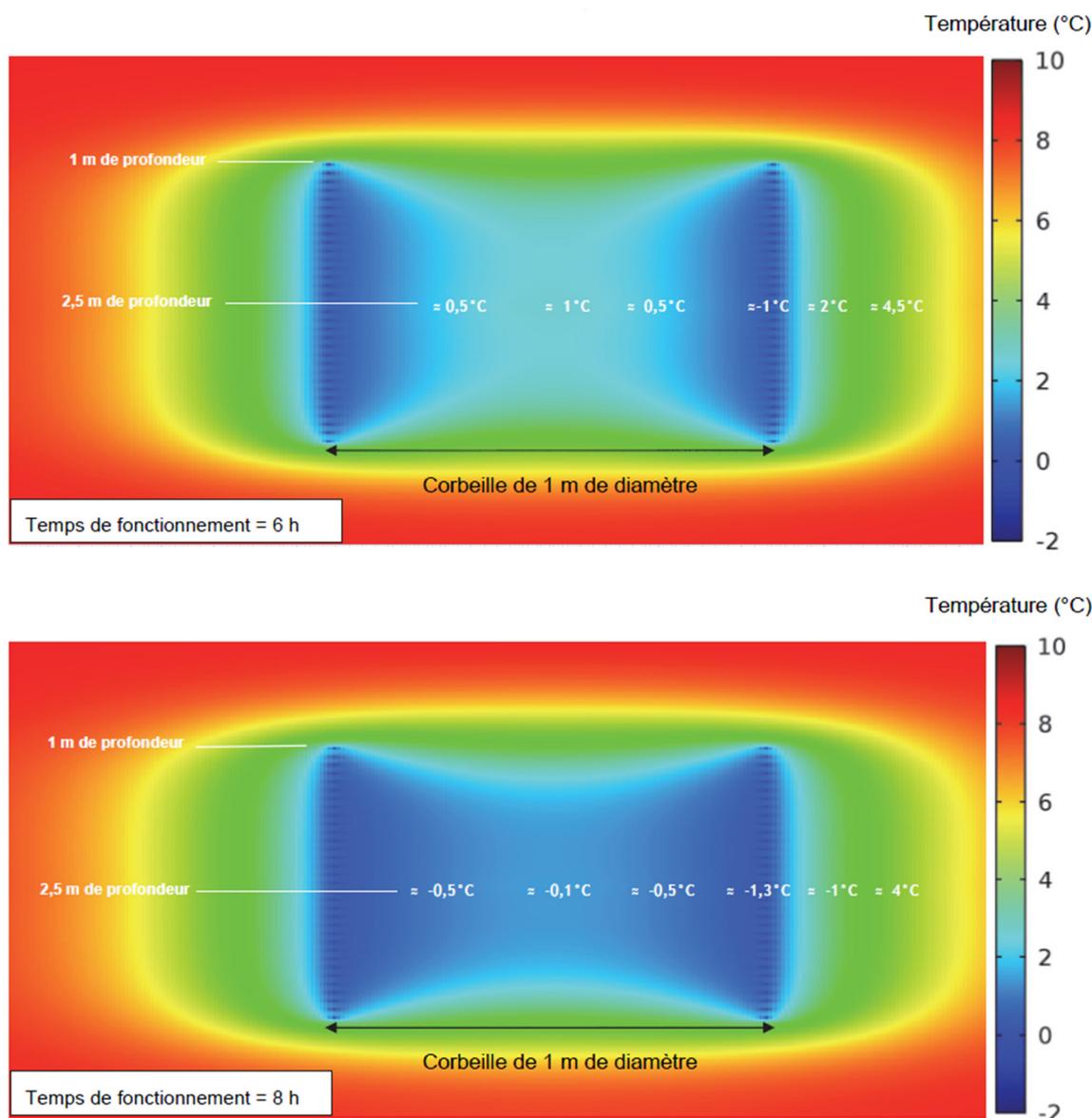
Les calculs sont menés pour des temps de fonctionnement de 6 h et de 8 h.

Avec un temps de fonctionnement plus élevé (de 8 h), les températures négatives se généralisent à l'intérieur de la corbeille, même si elles restent du même ordre de grandeur : par exemple $-0,1^{\circ}\text{C}$ au centre de la corbeille à une profondeur de 2,50 m. Entre les tubes, la température chute légèrement pour atteindre $-1,3^{\circ}\text{C}$ au bout de 8 h au lieu de -1°C au bout de 6 h. A l'extérieur de la corbeille, à environ 0,25 m, la température de sol chute de 0,5 K entre 6 h et 8 h de fonctionnement.

Notons que les résultats sont obtenus avec un temps de fonctionnement continu, sans tenir compte de périodes d'arrêt donc sans régénération possible. Il s'agit par conséquent d'un cas extrême.

Note

Dans le cas d'une corbeille avec un pas de tube de 0,12 m, les tendances sont similaires. Excepté les températures faiblement négatives obtenues entre les tubes ($-0,2^{\circ}\text{C}$) au bout de 8 h de fonctionnement, les températures de sol restent positives. Ces simulations ne sont pas illustrées dans ce rapport.



▲ Figure 6 : Évolutions des températures (en °C) dans le sol pour une corbeille de 1 m de diamètre, un pas de tubes de 0,08 m, une conductivité de sol de 1,8 W/(m.K) et un temps de fonctionnement de 6 h et 8 h

Influence du pas des tubes

Sur la (Figure 7) sont comparés les résultats de simulation d'une corbeille en fonction de la variation du pas de tubes. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- un diamètre de 1 m ;
- une profondeur d'enfouissement de 1 m ;
- un coefficient de conductivité thermique de sol de 1,8 W/(m.K) ;
- un temps de fonctionnement de 8 h.

Les calculs sont effectués pour des pas de tube 0,08 et 0,12 m.

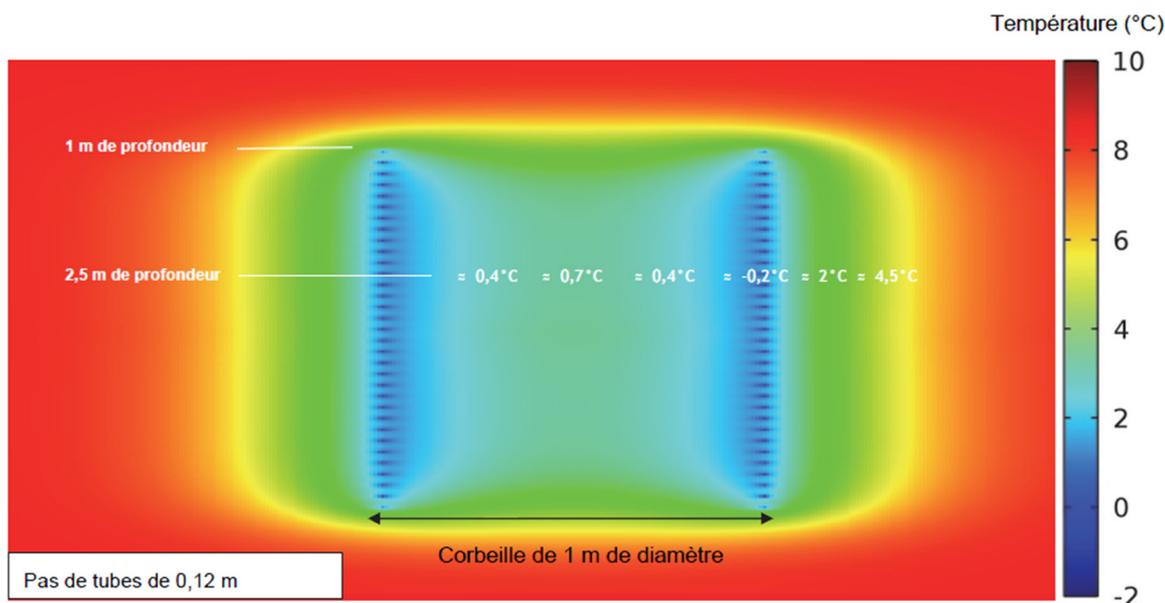
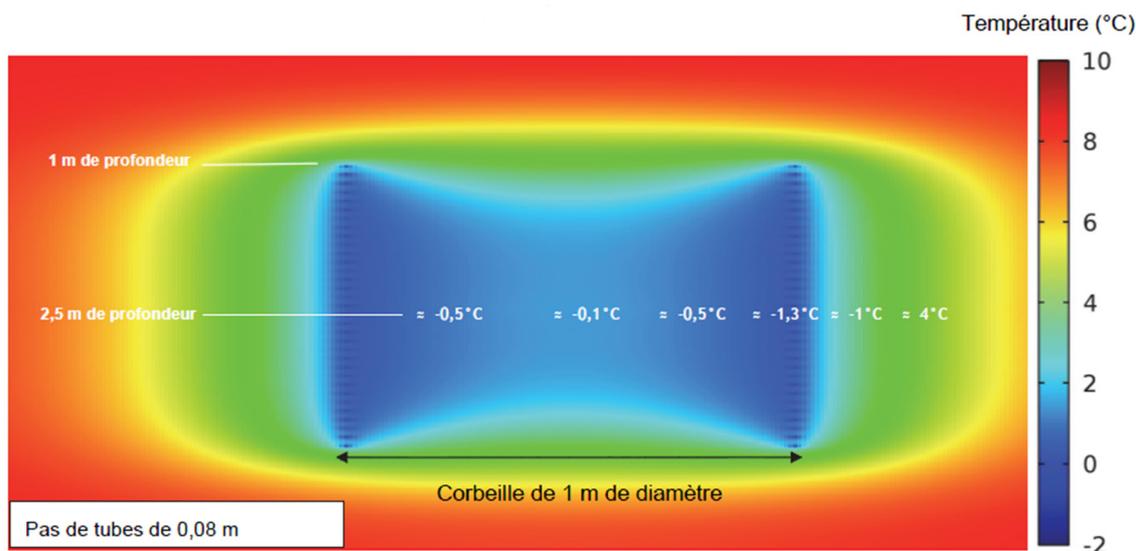
Les simulations étant menées avec une puissance constante de 8 W/m linéaire de tube, avec un pas de tubes plus grand, les températures augmentent autour des tubes. En effet, les températures de sol sont légèrement négatives autour des tubes (environ $-1,3^{\circ}\text{C}$) avec un pas



de 0,08 m après 8 h de fonctionnement alors qu'elles sont proches de zéro entre les tubes (environ $-0,2^{\circ}\text{C}$) avec un pas de 0,12 m.

De même, au centre de la corbeille, la température de $-0,1^{\circ}\text{C}$ environ pour un pas de 0,08 m devient positive jusqu'à atteindre une température de $0,7^{\circ}\text{C}$ pour un pas de 0,12 m.

Un plus grand pas de tubes permet de conserver des températures légèrement positives dans le sol et à l'intérieur de la corbeille même si elles sont légèrement négatives entre les tubes. Une formation de gel trop rapide est ainsi évitée.



▲ Figure 7 : Évolutions des températures (en $^{\circ}\text{C}$) dans le sol pour une corbeille de 1 m de diamètre, une conductivité de sol de $1,8\text{W}/(\text{m.K})$, un temps de fonctionnement de 8 h et un pas de tubes de 0,08 et 0,12 m

Note

Les tendances sont similaires pour les corbeilles d'un diamètre de 0,38 m. Cependant, les températures de sol obtenues sont plus basses et plus homogènes à l'intérieur de la corbeille (environ -1°C pour un pas de 0,08 m et environ $-0,3^{\circ}\text{C}$ pour un pas de 0,12 m après un temps de fonctionnement de 8 h). Ces simulations ne sont pas illustrées dans ce rapport.

Influence de la conductivité thermique

Sur la (Figure 8) sont comparés les résultats de simulation d'une corbeille en fonction de la valeur de la conductivité thermique du sol. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

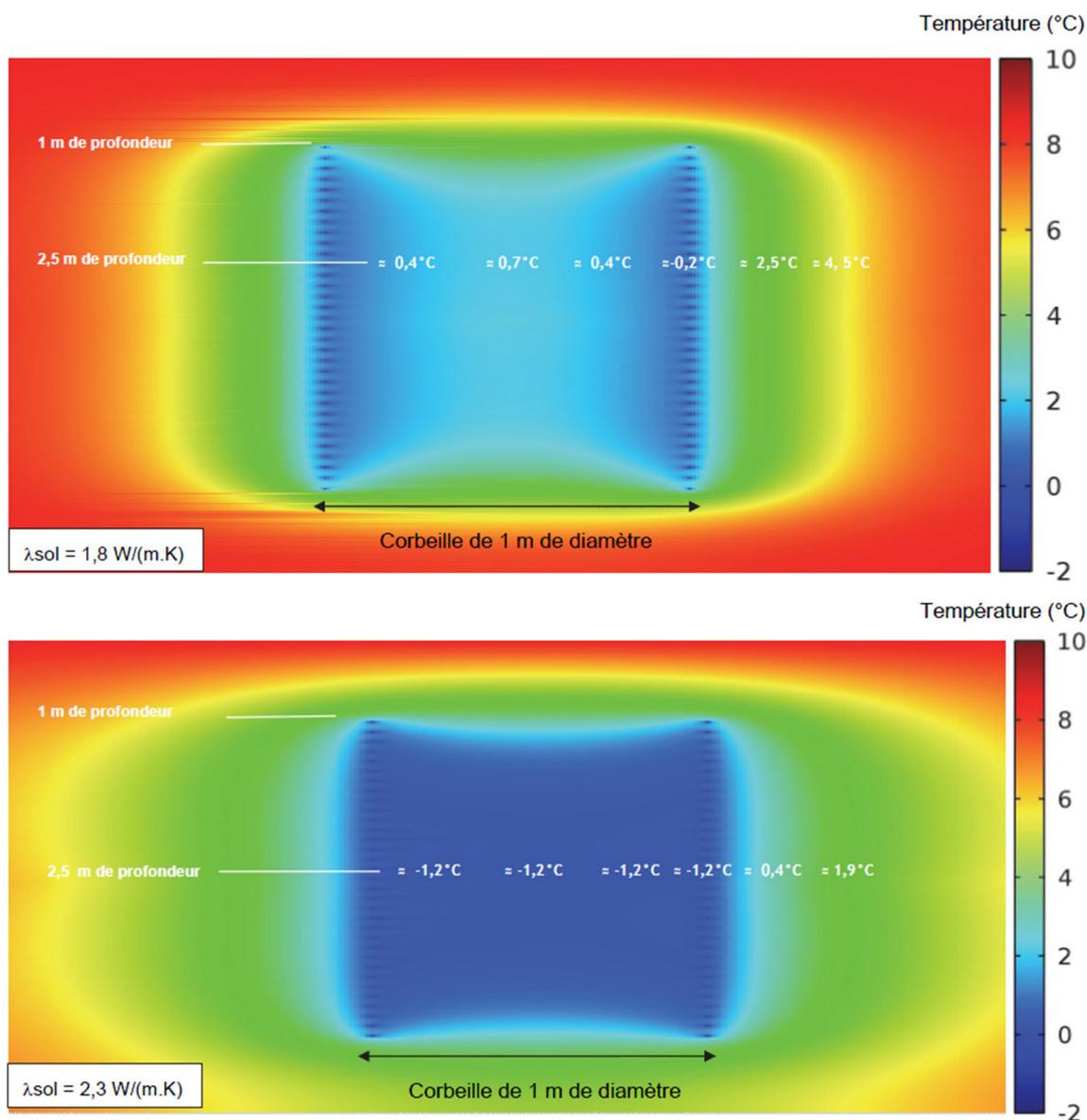
- un diamètre de 1 m ;
- une profondeur d'enfouissement de 1 m ;
- un pas de tubes de 0,12 m ;
- un temps de fonctionnement de 8 h.

Les calculs sont menés pour des conductivités thermiques du sol de 1,8 et 2,3 W/(m.K).

Avec une augmentation du coefficient de conductivité thermique, les températures deviennent plus basses dans le sol à l'intérieur de la corbeille, pour un même temps de fonctionnement.

Pour une conductivité de 2,3 W/(m.K), une température moyenne de sol relativement constante est obtenue à l'intérieur de la corbeille, de l'ordre de $-1,2^{\circ}\text{C}$. Elle varie entre 0,4 à 0,7°C avec un coefficient de conductivité thermique de 1,8 W/(m.K).

L'échange thermique est donc favorisé par un coefficient de conductivité thermique plus élevé. Cependant, même si la température du sol obtenue est plus basse, il est probable que sa régénération thermique soit également favorisée par cette augmentation de conductivité thermique.



▲ Figure 8 : Évolutions des températures (en °C) dans le sol pour une corbeille de 1 m de diamètre, d'un pas de tubes de 0,12 m, un temps de fonctionnement de 8 h et une conductivité de sol de 1,8 et 2,3 W/(m.K)

3.4. • Conclusion de l'étude sur les corbeilles géothermiques

Les résultats des simulations ont montré, pour un fonctionnement en chauffage, qu'il convient de favoriser les corbeilles d'un diamètre minimal de 1 m avec un pas d'au moins 0,12 m. Cependant, même dans ce cas, les températures obtenues à l'intérieur de la corbeille ne sont que légèrement positives (de l'ordre de $0,5^\circ\text{C}$). Par conséquent, la puissance thermique d'extraction spécifique doit rester inférieure à 8 Watts par mètre linéaire de tube.

Pour obtenir ces résultats, il a été considéré un remblaiement permettant le meilleur échange thermique possible entre les tubes et le terrain. Pour cela et notamment pour éviter tout risque de formation de vide d'air, le remblaiement doit s'effectuer par cimentation avec injection d'un coulis de remplissage comme pour les sondes géothermiques verticales.

Étude des capteurs double couche

4



Une variante de la technique de capteurs enterrés horizontalement en décapage utilisée en habitat individuel est la disposition de tubes sur deux hauteurs. Cette technique, couramment appelée « double couche » permet, a priori, de gagner de la surface par rapport à la disposition classique des capteurs horizontaux.

L'objectif est de mettre en évidence les échanges thermiques au niveau des tubes de ce type de capteur par un modèle simplifié et de déterminer une valeur limite de puissance thermique d'extraction spécifique en W/m de tube.



Cette étude considère des conditions de mise en œuvre spécifiques.

Compte tenu du manque de retours d'expériences sur cette technique, aucune règle de dimensionnement ne peut en être déduite.

4.1. • Généralités

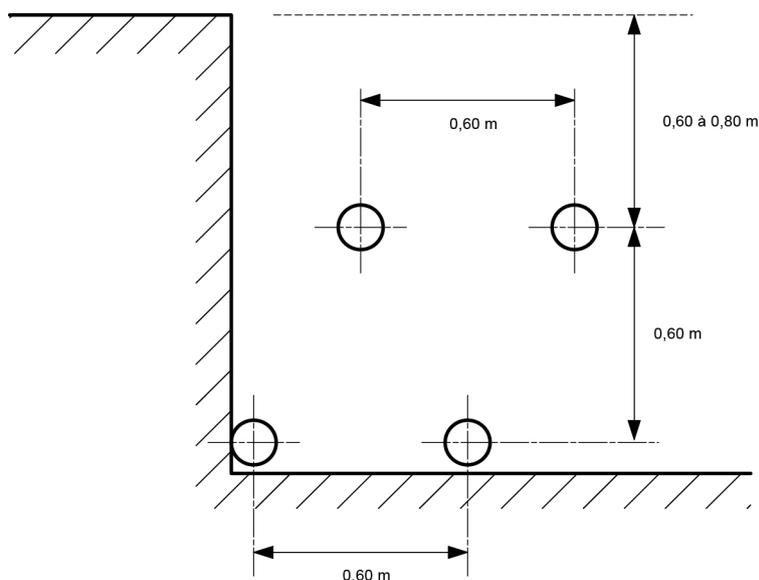
4.1.1. • Description

La couche supérieure du capteur est généralement disposée à 20 cm en dessous de la profondeur hors gel sur toute la surface du terrain. De fait, les profondeurs courantes de pose des tubes supérieurs sont de 0,60 ou 0,80 m.

La couche inférieure est prévue avec un écart minimal de 0,60 m par rapport à la couche supérieure afin de faciliter le remblaiement.



La (Figure 9) présente un exemple de disposition d'un capteur double couche. Les tubes placés sur le même plan sont écartés de 0,60 m.



▲ Figure 9 : Exemple de disposition d'un capteur horizontal en double couche

4.1.2. • Dimensionnement

Actuellement, il n'existe pas de règle de dimensionnement pour les capteurs double couche. La seule référence de dimensionnement de ces capteurs reste l'adaptation des puissances des capteurs géothermiques horizontaux. La puissance maximale d'extraction spécifique généralement considérée est de l'ordre de 10 Watts par mètre linéaire de tube.

4.2. • Les simulations menées

Il s'agit d'étudier la diffusion thermique dans le sol afin d'estimer le risque d'apparition de gel au niveau du capteur double couche. Le but est de visualiser les températures du sol obtenues à proximité et entre les tubes et d'observer l'apparition de températures négatives après un certain temps de fonctionnement.

Une étude paramétrique a été réalisée permettant de comparer différents scénarii.

Un modèle simple d'échange a été développé au COSTIC pour déterminer et vérifier sommairement des valeurs de pré-dimensionnement pour les capteurs double couche. Une valeur de puissance d'extraction spécifique de 8 W/m linéaire de tube a été considérée.

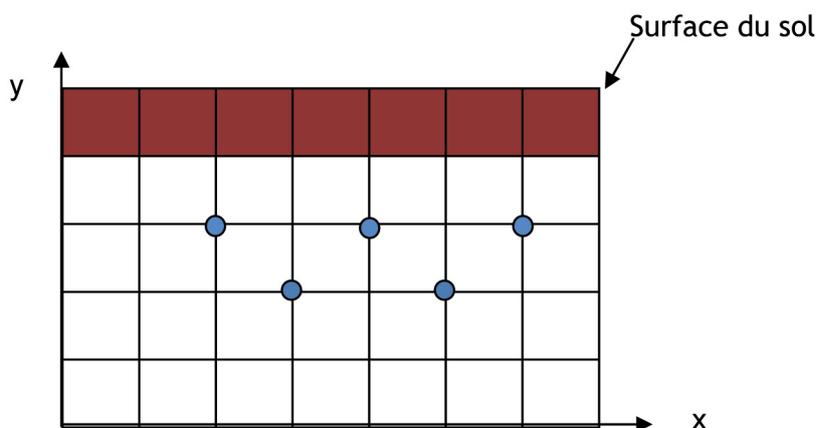
Les simulations ont été réalisées sous tableur Excel.



4.2.1. • Le modèle

Afin d'étudier les capteurs horizontaux double couche, une section de sol a été étudiée. Cette section est prise relativement éloignée des courbures de bout de capteurs afin de s'affranchir des effets « de bord » et de pouvoir modéliser l'ensemble en 2D.

Le sol modélisé est donc représenté par un maillage rectangulaire uniforme (Figure 10). Chaque nœud du maillage du sol constitue un nœud de calcul pour lequel une température de sol est calculée. La partie en rouge sur la figure représente la surface du sol considérée à une température constante. Les points bleus correspondent aux tubes du capteur géothermique. Ils sont à une température fixée.



▲ Figure 10 : Vue du maillage du sol pour les capteurs horizontaux double couche modélisés

4.2.2. • Les hypothèses de calculs

Les hypothèses suivantes ont été retenues :

- la température extérieure de paroi du tube est de -2 °C , soit une température moyenne du fluide caloporteur de l'ordre de $-4,5\text{ °C}$;
- la puissance linéique apportée au fluide caloporteur est de 8 W/m sans période de régénération ;
- deux profondeurs d'enfouissement de la première couche : $0,60$ et $0,80\text{ m}$;
- une distance entre les deux couches de $0,60\text{ m}$;
- une couche comprend 4 tubes ;
- deux pas de tubes : $0,60$ et $0,40\text{ m}$;
- deux durées de fonctionnement continues de 6 et 8 h/jour ;
- les propriétés physiques du fluide caloporteur et du tube sont constantes ;
- le débit de fluide caloporteur est constant ;
- la température de surface de sol est égale à 10 °C ;
- deux types de sol avec une conductivité thermique différente : λ de $1,8$ et $2,3\text{ W/(m.K)}$.



Par ailleurs, le sol est supposé être un matériau homogène dans lequel seul un échange par conduction a lieu. L'échange entre la paroi extérieure du tube et le sol est considéré parfait. Les tubes sont supposés être des sources ponctuelles dans le sol à température constante égale à la température de la paroi extérieure.

Note

Pour permettre une meilleure régénération, les tubes sont disposés en quinconce.

La première couche de tubes repose à même le sol décapé, plan, dégagé de tout accident. Une attention particulière est portée sur le risque de blesser les tubes. Il convient de faire attention à tout point dur de roches ou de cailloux. Dans ces cas, un lit de sable d'une épaisseur minimale de 150 mm est nécessaire.

La suite du remblaiement est réalisée mécaniquement avec la terre déplacée à l'aide d'un engin de faible charge (pilonneuse, mini-pelle...). L'opération est à renouveler pour la seconde couche.

Il est recommandé de mouiller et tasser la terre au niveau de la première couche avant d'installer la couche supérieure.

4.3. • Résultats des simulations

Pour chaque cas simulé, les résultats obtenus sont présentés sous la forme d'une image présentant les évolutions de températures entre la température de paroi extérieure du tube de la corbeille (bleu) et la température de sol (rouge). Il est ainsi possible de comparer les températures du sol à proximité des parois des tubes.

Le capteur double couche est présenté par une vue en coupe avec des températures données dans le plan des tubes, à des profondeurs de 0,80 et 1,40 m et de 0,60 et 1,20 m selon les cas. Quelques valeurs à proximité des tubes sont aussi indiquées.

Rappelons que les simulations sont réalisées à une puissance d'extraction fixe de 8 W/m linéaire de tube.

Influence du temps de fonctionnement

Sur la (Figure 11) sont comparés les résultats de simulation d'un capteur double couche en fonction du temps de fonctionnement. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

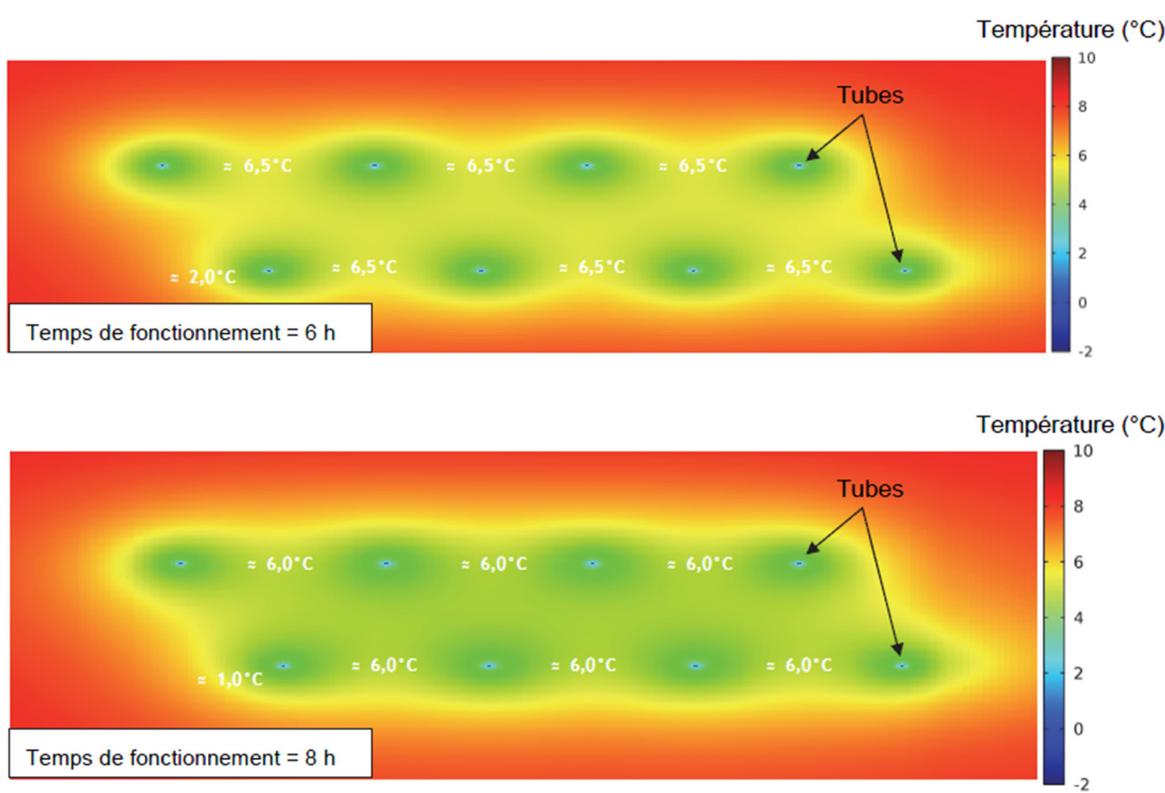
- des profondeurs d'enfouissement de 0,80 et 1,40 m ;
- un pas de tubes de 0,60 m ;
- un coefficient de conductivité thermique de sol de 1,8 W/(m.K).

Les calculs sont menés pour des temps de fonctionnement de 6 h et de 8 h.

La (Figure 11) montre que quel que soit le temps de fonctionnement, les températures de sol restent positives et aucune température négative n'est observée. Après 8 h de fonctionnement continu, les températures

autour du tube sont plus basses (environ 1°C au lieu d'environ 2°C pour 6 h). Entre les tubes, la température chute légèrement pour atteindre 6°C au bout de 8 h au lieu de 6,5°C au bout de 6 h.

Dans le cas d'un capteur avec des profondeurs d'enfouissement de 0,60 et 1,20 m avec un pas de tubes de 0,40 m, les résultats sont similaires. Même si les températures obtenues à proximité des tubes au bout de huit heures de fonctionnement sont plus basses (environ 0,4°C au lieu d'environ 0,6°C pour 6 h), les températures de sol restent positives. Un temps de fonctionnement de huit heures par rapport à un temps de six heures entraîne l'apparition de températures légèrement plus faibles (de l'ordre de 0,5°C) entre les tubes. Cependant, aucune température négative n'est atteinte. Ces simulations ne sont pas illustrées dans ce rapport.



▲ Figure 11 : Évolutions des températures (en °C) dans le sol pour un capteur double couche avec des profondeurs de 0,80 et 1,40 m, un pas de tubes de 0,60 m, une conductivité de sol de 1,8 W/(m.K) et un temps de fonctionnement de 6 h et 8 h

Influence du pas et de la profondeur des tubes

Sur la (Figure 12) sont comparés les résultats de simulations d'un capteur double couche lorsque le pas et les profondeurs des tubes sont modifiés. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- un coefficient de conductivité thermique de sol de 1,8 W/(m.K) ;
- un temps de fonctionnement de 8 h.

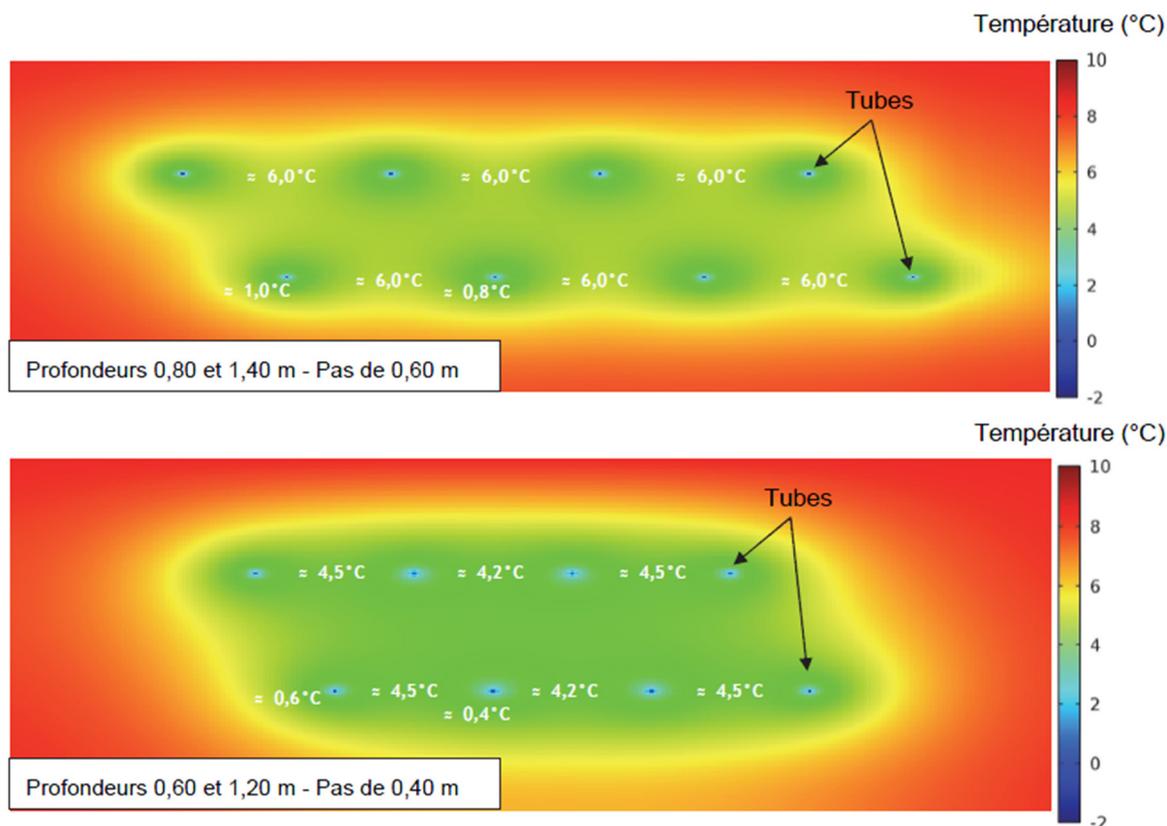
Les calculs sont menés pour :

- des profondeurs de 0,80 et 1,40 m et un pas de 0,60 m ;
- des profondeurs de 0,60 et 1,20 m et un pas de 0,40 m.



Avec des profondeurs d'enfouissement moindres et un pas de tubes plus faible, des températures plus basses ($4,5^{\circ}\text{C}$ au lieu de 6°C) sont atteintes dans le sol. Toutefois, même si la température à proximité du tube chute (de 1 à $0,6^{\circ}\text{C}$), il n'y a aucune température négative entre les tubes.

Une plus faible profondeur d'enfouissement couplée à une diminution du pas de tubes entraîne un abaissement de la température du sol autour et entre les tubes sans forcément provoquer une formation de gel.



▲ Figure 12 : Évolutions des températures (en $^{\circ}\text{C}$) dans le sol pour un capteur double couche avec une conductivité de sol de $1,8\text{W}/(\text{m.K})$, un temps de fonctionnement de 8 h et différentes profondeurs et pas de tubes

Influence de la conductivité thermique

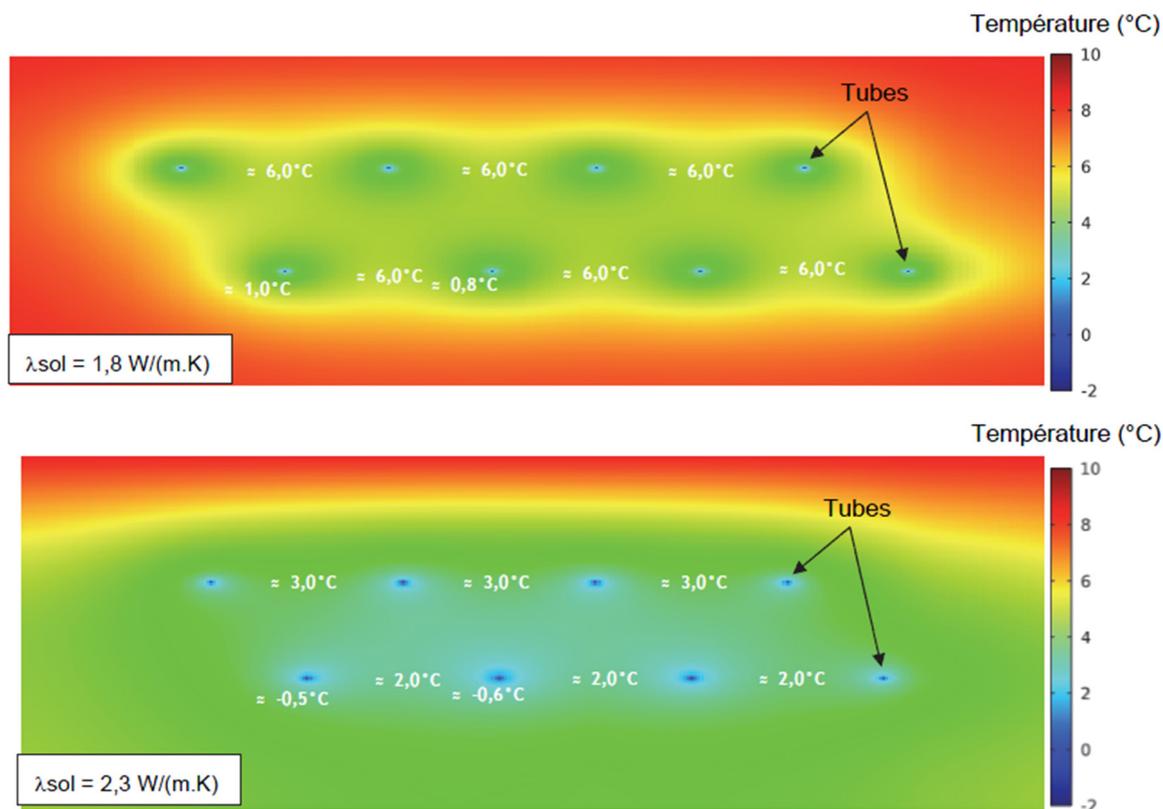
Il s'agit de comparer les résultats de simulations d'un capteur double lorsque le coefficient de conductivité thermique du sol augmente de $1,8$ à $2,3\text{W}/(\text{m.K})$. Le temps de fonctionnement est de 8 h.

Les calculs sont menés pour :

- des profondeurs de 0,80 et 1,40 m et un pas de 0,60 m (Figure 13) ;
- des profondeurs de 0,60 et 1,20 m et un pas de 0,40 m (Figure 14).

Pour des profondeurs d'enfouissement de 0,80 et 1,40 m (Figure 13), un coefficient de conductivité thermique du sol plus élevé de $2,3\text{W}/(\text{m.K})$ engendre des températures plus basses dans le sol, pour un même temps de fonctionnement. Une température moyenne de sol relativement constante est obtenue entre les deux couches, de l'ordre de 2°C .

La température à proximité du tube peut être faiblement négative, environ $-0,5$ à $-0,6^{\circ}\text{C}$.

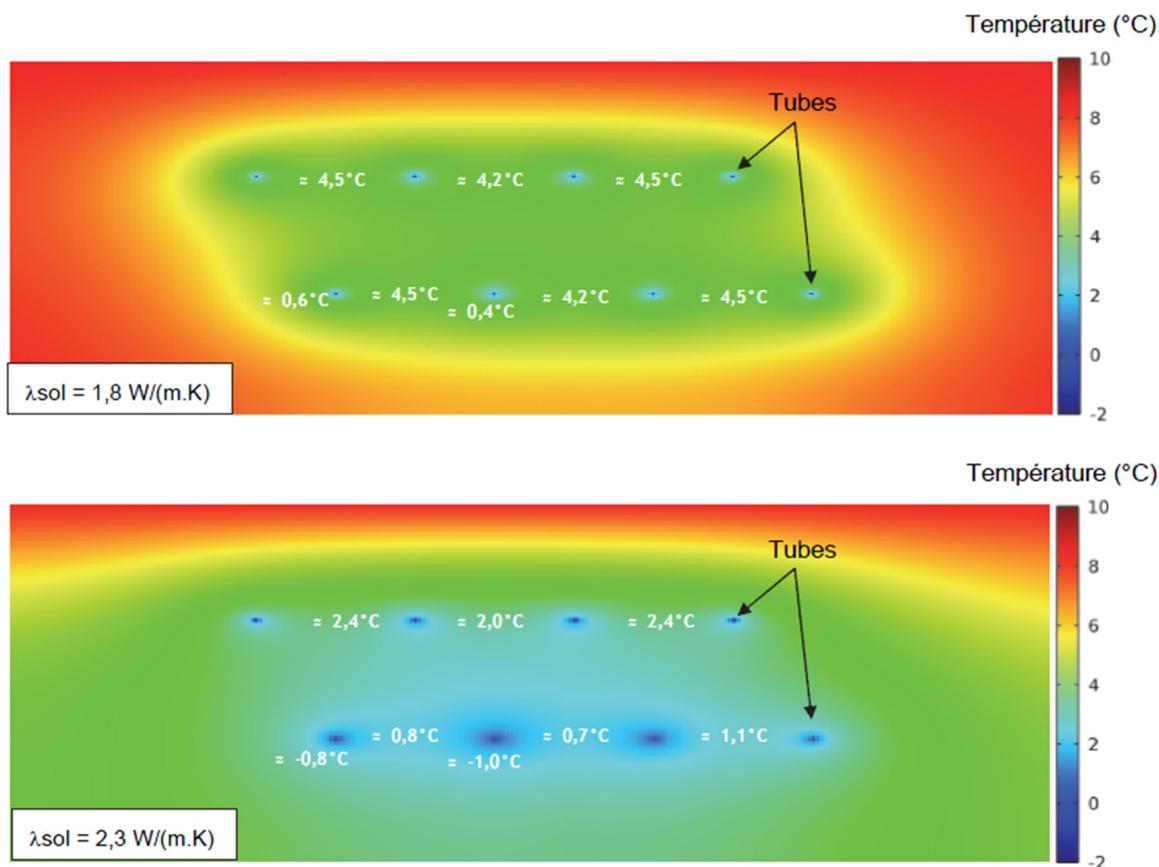


▲ Figure 13 : Évolutions des températures (en $^{\circ}\text{C}$) dans le sol pour un capteur double couche avec un pas de tubes de $0,60 \text{ m}$, des profondeurs de $0,80$ et $1,40 \text{ m}$, un temps de fonctionnement de 8 h et une conductivité de sol de $1,8$ et $2,3 \text{ W}/(\text{m.K})$

Dans le cas de plus faibles profondeurs d'enfouissement (de $0,60$ et $1,20 \text{ m}$), couplées à une diminution du pas de tubes de $0,60$ à $0,40 \text{ m}$ (Figure 14), le coefficient de conductivité thermique du sol plus élevé de $2,3 \text{ W}/(\text{m.K})$ induit aussi des températures plus basses dans le sol, pour un même temps de fonctionnement.

La moyenne des températures de sol entre les tubes est plus basse que dans le cas précédent (de l'ordre de 1K). Une zone de températures négatives (d'environ -1°C) apparaît autour des tubes, notamment de la couche inférieure.

L'échange thermique est donc favorisé par un coefficient de conductivité thermique plus élevé. Cependant, même si la température du sol obtenue est plus basse, il est probable que sa régénération thermique soit également favorisée par cette augmentation de conductivité thermique.



▲ Figure 14 : Évolutions des températures (en °C) dans le sol pour un capteur double couche avec un pas de tubes de 0,40 m, des profondeurs de 0,60 et 1,20 m, un temps de fonctionnement de 8 h et une conductivité de sol de 1,8 et 2,3 W/(m.K)

4.4. • Conclusion de l'étude sur les capteurs double couche

Les résultats des simulations montrent que l'utilisation de capteurs enterrés horizontaux disposés en double couche nécessite de se limiter à une puissance de l'ordre de 8 Watts par mètre linéaire de tube. En effet, la superposition des tubes et les interactions induites engendrent une régénération plus difficile du sol, à l'origine d'un risque de gel.

Les températures de sol obtenues montrent qu'il est préférable de prévoir des profondeurs d'enfouissement des couches de 0,80 et 1,40 m avec un pas de 0,60 m.

Pour atteindre ces résultats, afin de permettre une meilleure régénération, une disposition en quinconce a été privilégiée. Il a également été considéré un remblaiement permettant le meilleur échange thermique possible entre les tubes et le terrain pour les deux couches superposées. Pour cela des précautions sont à prendre sur le remblaiement avec un tassement de terre ou de sable au niveau de chaque couche.

PARTENAIRES du Programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ;
- Association des industries de produits de construction (AIMCC) ;
- Agence qualité construction (AQC) ;
- Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment (CAPEB) ;
- Confédération des organismes indépendants de prévention, de contrôle et d'inspection (COPREC Construction) ;
- Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) ;
- Électricité de France (EDF) ;
- Fédération des entreprises publiques locales (EPL) ;
- Fédération française du bâtiment (FFB) ;
- Fédération française des sociétés d'assurance (FFSA) ;
- Fédération des promoteurs immobiliers de France (FPI) ;
- Fédération des syndicats des métiers de la prestation intellectuelle du Conseil, de l'Ingénierie et du Numérique (Fédération CINOV) ;
- GDF SUEZ ;
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie ;
- Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement ;
- Plan Bâtiment Durable ;
- SYNTEC Ingénierie ;
- Union nationale des syndicats français d'architectes (UNSFA) ;
- Union nationale des économistes de la construction (UNTEC) ;
- Union sociale pour l'habitat (USH).

Les productions du Programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont le fruit d'un travail collectif des différents acteurs de la filière bâtiment en France.



POMPES À CHALEUR
GÉOTHERMIQUES

ANALYSE DE DIFFÉRENTES
TECHNIQUES DE CAPTEURS
ENTERRÉS

FÉVRIER 2015

Pour une installation de chauffage équipée d'une pompe à chaleur géothermique, le dimensionnement de l'échangeur géothermique est un point à la fois délicat et primordial pour la pérennité des performances de l'installation.

Les sondes géothermiques verticales constituent une solution intéressante par le gain de place sur un terrain. Mais les différentes méthodes de dimensionnement utilisées en France ou en Europe n'aboutissent pas toutes au même résultat.

Deux autres types de capteurs géothermiques, moins courants à ce jour, sont également analysés dans cette étude :

- les corbeilles géothermiques ;
- et les capteurs double couche.



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS

« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

Ce programme est une application du Grenelle Environnement. Il vise à revoir l'ensemble des règles de construction, afin de réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

