

# Dimensionnement de sondes géothermiques verticales pour des applications de chauffage / rafraîchissement par pompes à chaleur

Méthode de dimensionnement de l'ASHRAE

Un outil simple d'application

Conclusion

Par Mikael Philippe, BRGM ; Michel Bernier, École Polytechnique de Montréal ; Dominique Marchio, Mines ParisTech ; Odile Cauret, EDF R&D

Les concepteurs d'installation de pompes à chaleur géothermiques sont encore peu équipés pour dimensionner correctement les installations sur sondes verticales en tenant compte de la nature du sol, des conditions climatiques et des particularités thermiques du bâtiment.

En Europe, le dimensionnement de sondes géothermiques s'effectue généralement à l'aide de ratios proposés correspondant à la puissance thermique spécifique maximale extractible au sol en W/m. De tels ratios, modulés suivant divers critères tels que le type de sols rencontrés et le taux d'utilisation de la pompe à chaleur, sont ainsi fournis par la directive allemande VDI 4640 et la norme suisse SIA 384/6, qui font office de documents de référence pour le dimensionnement des installations de sondes géothermiques verticales (SGV) de faible puissance en Europe. Pour les installations de champs de SGV de plus grande ampleur (à partir de quatre SGV selon la norme SIA ou une puissance maximale extractible de 30 kW selon la VDI), il est recommandé d'effectuer des simulations à pas de temps horaire et de dimensionner les SGV à l'aide de logiciels permettant de prendre en compte les interactions entre les différentes SGV. Les logiciels les plus courants utilisés pour dimensionner de telles installations sont les suivants : TRNSYS, EED, PILESIM, EWS. L'objectif de cet article est de proposer une feuille de calcul EXCEL permettant un dimensionnement précis et rapide de SGV uniques et un pré-dimensionnement de champs de SGV. Cet outil est intermédiaire entre des ratios de dimensionnement et des logiciels de dimensionnement spécifique et est ainsi facile d'utilisation tout en réalisant un dimensionnement précis de l'installation. La mise en œuvre de cette feuille de calcul est illustrée au travers de deux exemples : l'un pour une SGV unique en mode chauffage, l'autre pour un champ de SGV en mode rafraîchissement.

La mise en œuvre de cette feuille de calcul est illustrée au travers de deux exemples : l'un pour une SGV unique en mode chauffage, l'autre pour un champ de SGV en mode rafraîchissement.

## Méthode de dimensionnement de l'ASHRAE

Kavanaugh et Rafferty proposent une équation de dimensionnement de SGV, validée par l'ASHRAE et inscrite au ASHRAE Handbook. Cette équation a été restructurée par Bernier et s'écrit alors sous la forme suivante :

$$L = \frac{q_h R_b + q_y R_{10y} + q_m R_{1m} + q_h R_{6h}}{T_m - (T_g + T_p)}$$

$T_m$  est la température moyenne du fluide dans le forage,  $T_g$  la température du sol non perturbé (avant installation de PAC géothermique) et  $T_p$  une correction de cette température qui intervient dans le cas où on installe un champ de sondes, les unes influençant alors les autres ( $T_p = 0$  dans le cas d'une seule sonde).  $q_y$ ,  $q_m$  et  $q_h$  (en W) représentent respectivement, le prélèvement thermique au sol moyen annuel, le maximum des prélèvements mensuels et le prélèvement maximal horaire.  $R_{10y}$ ,  $R_{1m}$  et  $R_{6h}$  (en m.K/W) sont des résistances thermiques du sol correspondant aux périodes de 10 ans, 1 mois et 6 heures. Ces valeurs se situent

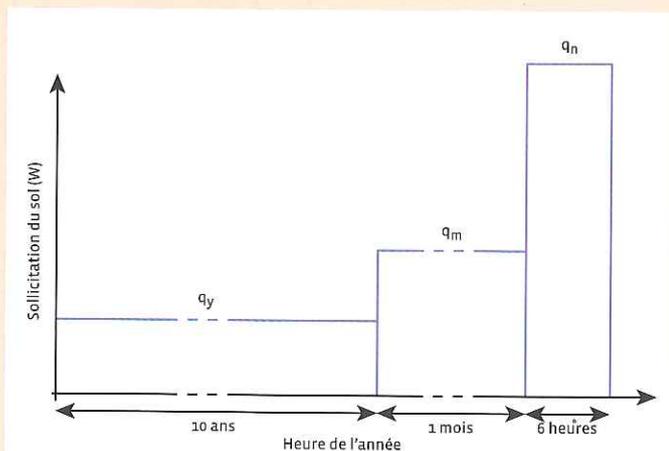


Figure 1 Scénario de dimensionnement suivant la méthode de l'ASHRAE.

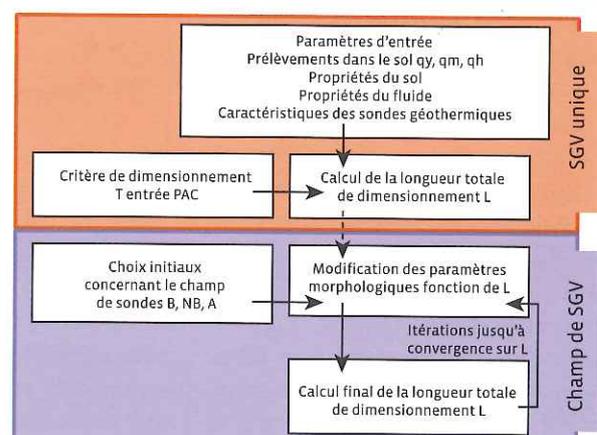


Figure 2 Procédure de dimensionnement d'une SGV unique ou d'un champ de sondes géothermiques verticales en une seconde étape.

généralement entre 0,1 et 0,3 m.K/W, les faibles valeurs étant associées aux sols à haute conductivité thermique. Enfin,  $R_b$  est la résistance thermique totale [m.K/W] du puits (entre le fluide et le sol juste en contact). Cette valeur varie entre 0,05 m.K/W (sonde à double U avec coulis à haute conductivité) et 0,2 m.K/W (sonde à simple U avec coulis de bentonite standard).

L'équation a été obtenue en supposant que les échanges dans le sol sont purement conductifs et en négligeant les transferts d'humidité.

Le dimensionnement est basé sur un scénario "extrême" en mode chauffage ou climatisation: une sollicitation moyenne annuelle  $q_y$  pendant dix ans, une sollicitation d'un mois  $q_m$  correspondant au mois le plus froid (resp. le plus chaud), six heures à la sollicitation  $q_h$  correspondant aux conditions du dimensionnement en chauffage (resp. en rafraîchissement). Le schéma de la **Figure 1** illustre ce scénario correspondant à la succession des trois sollicitations du sol  $q_y$ ,  $q_m$  et  $q_h$ . Cette méthode présente ainsi l'avantage de prendre en compte de manière simplifiée l'historique de la sollicitation thermique du sol durant les dix années précédant le point de dimensionnement. Le résultat du dimensionnement sera ainsi plus précis que celui proposé par les règles du SIA et de la VDI.

### Un outil simple d'application

Le calcul effectif par l'équation nécessite un calcul complexe des résistances thermiques  $R_{10y}$ ,  $R_{1m}$  et  $R_{6h}$ . Afin de faciliter la résolution pour le concepteur de l'installation, l'ensemble de ces calculs ont été entrés dans une feuille de calcul EXCEL. Cette feuille de calcul peut être utilisée soit en application "chauffage" (la plus courante), soit en application refroidissement (charges comptées négatives en cas de prélèvement de chaleur dans le sol). Elle est téléchargeable à partir du site Géothermie Perspectives hébergé par le BRGM à l'adresse suivante:

[www.geothermie-perspectives.fr/calcul/dim\\_SGV.xls](http://www.geothermie-perspectives.fr/calcul/dim_SGV.xls)

Cette feuille de calcul permet le dimensionnement d'une SGV unique mais aussi d'un champ de SGV suite à une seconde étape tel qu'illustré en **Figure 2**. Afin d'illustrer l'utilisation de la feuille de calcul, deux cas

1 <sup>er</sup> JEU DE PARAMETRES		UNITES	SGV unique	Champ de SGV
<b>Sollicitations thermiques du sol</b>				
puissance de pointe	$q_h$	W	-4000	191000
puissance mensuelle maximale	$q_m$	W	-2000	29400
puissance annuelle moyenne	$q_y$	W	-500	1500
<b>Propriétés du sol</b>				
conductivité thermique	$\lambda$	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	3,4	1,7
diffusivité thermique	$a$	m <sup>2</sup> .jour <sup>-1</sup>	0,110	0,064
température du sol non perturbé	$T_g$	°C	15	13
<b>Propriétés du fluide</b>				
capacité thermique massique	$C_p$	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	4200	3850
débit masse total par kW de puissance de pointe	$m_{fls}$	kg.s <sup>-1</sup> .kW <sup>-1</sup>	0,060	0,050
température max/min d'entrée de pompe à chaleur	$T_{flHP}$	°C	5	35
<b>Caractéristiques du forage</b>				
rayon du forage	$r_{bore}$	m	0,075	0,080
résistance thermique spécifique du forage	$R_b$	m.K.W <sup>-1</sup>	0,199	0,090
<b>1<sup>er</sup> JEU DE RESULTATS</b>				
<b>Calcul des résistances thermiques spécifiques du sol</b>				
court terme (sollicitation de 6 heures)	$R_{6h}$	m.K.W <sup>-1</sup>	0,063	0,103
moyen terme (sollicitation d'1 mois)	$R_{1m}$	m.K.W <sup>-1</sup>	0,105	0,203
long terme (sollicitation de 10 ans)	$R_{10y}$	m.K.W <sup>-1</sup>	0,112	0,224
<b>Calcul de la longueur totale de SGV sans interactions</b>				
température de sortie de pompe à chaleur	$T_{outHP}$	°C	0,2	40,2
température moyenne du fluide dans le forage	$T_m$	°C	2,6	37,6
longueur totale	$L$	m	106,3	1752,9
<b>2<sup>nd</sup> JEU DE PARAMETRES</b>				
<b>Caractéristiques du champs de SGV</b>				
distance entre forages	B	m		5
nombre de forages	NB	-		20
facteur de forme du champ de SGV	A	-		1,25
<b>RESULTATS FINAUX</b>				
<b>Calcul de la longueur totale de SGV (avec prise en compte de <math>T_p</math>)</b>				
<b>1<sup>ère</sup> itération</b>				
ratio distance-profondeur	B/H	-		0,057
logarithme du temps adimensionné	$\ln(t_{10y}/t_s)$	-		-1,295
pénalité de température	$T_p$	°C		0,971
longueur totale de SGV	L	m		1824,9
<b>2<sup>ème</sup> itération</b>				
ratio distance-profondeur	B/H	-		0,055
logarithme du temps adimensionné	$\ln(t_{10y}/t_s)$	-		-1,376
pénalité de température	$T_p$	°C		0,930
longueur totale de SGV	L	m		1821,8
<b>3<sup>ème</sup> itération</b>				
ratio distance-profondeur	B/H	-		0,055
logarithme du temps adimensionné	$\ln(t_{10y}/t_s)$	-		-1,372
pénalité de température	$T_p$	°C		0,932
longueur totale de SGV	L	m		1821,9
<b>4<sup>ème</sup> itération</b>				
ratio distance-profondeur	B/H	-		0,055
logarithme du temps adimensionné	$\ln(t_{10y}/t_s)$	-		-1,372
pénalité de température	$T_p$	°C		0,932
longueur totale de SGV	L	m		1821,9
<b>5<sup>ème</sup> itération</b>				
ratio distance-profondeur	B/H	-		0,055
logarithme du temps adimensionné	$\ln(t_{10y}/t_s)$	-		-1,372
pénalité de température	$T_p$	°C		0,932
longueur totale de SGV	L	m		1821,9
<b>Résultats finaux</b>				
longueur totale de SGV	L	m		1821,9
Profondeur des SGV	H	m		91,1

**Figure 3** Feuille de calcul pour le dimensionnement de SGV uniques ou en champ.

d'exemple sont traités dans la feuille modèle de la **Figure 3** l'un pour dimensionner une SGV unique en mode chauffage pour une maison individuelle, l'autre pour un champ de SGV pour un bâtiment tertiaire avec des besoins à la fois de chaud et de froid, le dimensionnement étant effec-

tué pour le mode rafraîchissement (besoins de froid plus importants).

#### > Cas de la SGV unique

Prenons le cas d'une maison individuelle qui a uniquement des besoins de chauffage. La PAC couvre les besoins nominaux du bâtiment et a une puissance de 5,3 kW; compte



Tête de sonde après insertion dans le forage et cimentation.



Vue d'ensemble des départs de sondes géothermiques.

tenu de son COP, elle prélève 4 kW au sol dans ses conditions nominales. Les prélèvements  $q_h$ ,  $q_m$  et  $q_y$  ont été pré-calculés et sont respectivement de 4 kW (déjà connu), 2 kW et 0,5 kW. Pour les déterminer, on peut utiliser une simulation horaire ou les estimer par la méthode des heures équivalentes à puissance nominale. Dans cet exemple, on considère que durant le mois le plus chargé, la charge du bâtiment est la moitié de la charge nominale, ce qui conduit à  $q_m = 2$  kW. La charge moyenne annuelle est de 1/8 de

la charge nominale soit  $q_y = 0,5$  kW. Le sol a des caractéristiques de granit ( $\lambda = 3,4$  W.m-1.K-1 et  $a = 0,11$  m<sup>2</sup>.jour-1) et a une température initiale de 15 °C. Le fluide choisi dans cet exemple est de l'eau sans antigel; on veillera donc à ce que le fluide n'atteigne pas une température négative en entrée ou sortie de la pompe à chaleur. Le diamètre de forage est de 150 mm. La résistance thermique du forage  $R_b$  (convection interne, épaisseur du tube, coulis de remplissage) est supposée de 0,199 m.K/W, ce qui correspond

à une valeur de  $R_b$  typique d'un forage simple U avec un espacement moyen entre les deux tubes et un coulis de bentonite standard. À titre d'exemple, des valeurs de résistance  $R_b$  pour des configurations de SGV typiques dans des forages de diamètre 150 mm sont données en **Tableau 1**.

Le critère de dimensionnement en mode chauffage porte sur la température minimum d'entrée à l'évaporateur de la pompe à chaleur après mise en régime du sol suivant le scénario défini en **Figure 1**. On choisit

## GUIDES TECHNIQUES : COMPRENDRE ET MAÎTRISER LA GÉOTHERMIE



### LA GÉOTHERMIE, QUELLES TECHNOLOGIES POUR QUELS USAGES ?



Cet ouvrage fait le point sur les différentes technologies mises en œuvre aujourd'hui et les perspectives d'avenir qu'offre cette énergie.

OUVRAGE TOUT PUBLIC.  
2<sup>ÈME</sup> ÉDITION, 2008. 15€

### LES POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES SUR CHAMPS DE SONDES



Cet ouvrage a pour ambition de présenter l'ensemble des éléments à connaître avant d'initier une opération de PAC sur champs de sondes.

GUIDE TECHNIQUE DESTINÉ AUX PROFESSIONNELS.  
1<sup>ÈRE</sup> ÉDITION, 2012. 45 €

NOUVEAUTÉ 2012

### LA GÉOTHERMIE ET LES RÉSEAUX DE CHALEUR, GUIDE DU MAÎTRE D'OUVRAGE.



Cet ouvrage s'intéresse plus particulièrement aux caractéristiques et spécificités du sous-sol pour alimenter un réseau de chaleur, nouveau ou existant, et à l'adéquation des ressources et des besoins de surface.

GUIDE TECHNIQUE DESTINÉ AUX MAÎTRES D'OUVRAGES AINSI QU'À LEURS CONSEILS.  
1<sup>ÈRE</sup> ÉDITION, 2010. 45 €

### LES POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES À PARTIR DE FORAGE SUR AQUIFÈRE



Cet ouvrage a pour ambition de présenter l'ensemble des éléments à connaître avant d'initier une opération de PAC sur aquifère.

GUIDE TECHNIQUE DESTINÉ AUX PROFESSIONNELS.  
2<sup>ÈME</sup> ÉDITION, 2012. 45 €

NOUVEAUTÉ 2012

Renseignements et commandes : [ademe.fr](http://ademe.fr) et [editions.brgm.fr](http://editions.brgm.fr)

ici une température de 5 °C afin d'éviter que le fluide ne ressorte de la pompe à chaleur à une température négative. Le calcul conduit à une longueur de SGV de 106,3 m. À titre de comparaison, le ratio de dimensionnement proposé par la VDI 4640 pour ce dimensionnement (sol de type granit et faible taux d'utilisation à pleine charge de la pompe à chaleur) serait de 53 m (ratio de 75 W.m<sup>-1</sup>). Cet écart important s'explique essentiellement pour deux raisons :

1) la VDI 4640 n'est pas adaptée aux SGV de type simple U et ne s'applique pas ici ;  
 2) le dimensionnement préconisé par la VDI 4640 prend en compte un fluide de type eau glycolée permettant un fonctionnement à des températures négatives, ce qui autorise une longueur de SGV plus courte que dans l'exemple présent.

Par ailleurs, il est intéressant de remarquer la sensibilité aux différents paramètres. Par exemple, si la température initiale du sol (non perturbé) est de 10 °C au lieu de 15 °C, la longueur augmente à 178,3 m (68 % de plus). Quant à l'influence de la résistance thermique du forage, si on choisit un matériau de remplissage de type "coulis amélioré" ( $R_b = 0,098 \text{ m.K/W}$ ), cela conduit à une longueur de SGV de 73,6 m, soit une diminution de 31 %. La conductivité thermique a également une influence importante sur la longueur de SGV : un sol de faible conductivité thermique, 1,3 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, implique une longueur de SGV nécessaire de 174,1 m (64 % de longueur en plus).

#### ► Cas d'un champ de sondes

Dans un second exemple, les données sont issues d'une simulation dynamique d'un bâtiment de bureaux de 5 000 m<sup>2</sup> situé à La Rochelle. Le dimensionnement s'effectue également en rafraîchissement, les sollicitations thermiques du sol  $q_{hv}$ ,  $q_m$  et  $q_y$  étant plus élevées en mode rafraîchissement. Les valeurs pour  $q_{hv}$ ,  $q_m$  et  $q_y$  sont ainsi respectivement de 191 kW, 29,4 kW et 1,5 kW. Les valeurs caractéristiques du sol utilisées pour le calcul correspondent à celles d'un terrain argileux. Le fluide utilisé est un mélange eau/monopropylène-glycol à une teneur volumique de 30 %. Le forage a un diamètre de 160 mm. La résistance thermique du forage  $R_b$  est supposée connue égale à 0,09 m.K.W<sup>-1</sup> (obtenue par analyse d'un test de réponse thermique par exemple).

**Tableau 1** Valeurs typiques de résistance thermique de forage  $R_b$  (forage de 150 mm de diamètre)

Arrangement des tuyaux dans le forage				
Distance centre à centre des tuyaux [cm]	8,3	8,3	11,7	11,7
Matériau de remplissage	Résistance thermique de forage $R_b$ [m.K/W]			
Coulis de bentonite standard	0,199	0,132	0,146	0,071
Coulis amélioré	0,098	0,061	0,088	0,042

Dans un tel cas de pré-dimensionnement d'un champ de SGV, l'utilisation de la feuille de calcul nécessite une étape de calcul supplémentaire du fait de la pénalité  $T_p$  dans l'équation 1. Cette valeur, qui traduit les interactions thermiques des différentes SGV du champ, dépend de la profondeur du forage qui est initialement inconnue. La procédure suivante en deux étapes est alors proposée afin de calculer cette pénalité  $T_p$  et d'affiner le dimensionnement en conséquence :

1) On suppose une valeur de  $T_p = 0 \text{ °C}$  comme pour un forage unique. Ceci donne une première approximation de la longueur de sonde. Dans l'exemple présent, cette valeur initiale est de 1 752,9 m.

2) Sur la base de cette première approximation, on entre B (la distance entre sondes, NB (leur nombre) et A (le facteur de forme du champ de sondes, rapport de sa longueur sur sa largeur), la morphologie de champ de sondes prise en compte par la feuille de calcul étant à maille carrée. Selon les caractéristiques du sol, on peut choisir une solution plus ou moins compacte.

Dans le cas présent, nous choisissons  $B = 5 \text{ m}$ ,  $NB = 20$ ,  $A = 1,25$  (champ de 5x4 sondes espacées de 5 m). Après avoir renseigné ces variables, une seconde série de calculs est réalisée comprenant cinq itérations,  $T_p$  étant réévaluée à chaque itération en fonction de la longueur de sonde précédemment obtenue. Après ces itérations, le calcul converge vers une valeur de 1 821,9 m au total soit des forages de 91,1 m de profondeur. La pénalité de température  $T_p$  vaut 0,93 °C après dix ans d'exploitation. Cette valeur assez basse est due au fait que l'interférence entre puits est faible dans ce cas, car le bilan net des puissances échangées avec le sol en été et en hiver est presque équilibré dans cet exemple (valeur de  $q_y$  peu élevée). À titre de comparaison, le dimensionnement du champ de

SGV de cet exemple a été effectué avec les mêmes paramètres à l'aide du logiciel GEOEASE développé par M. Bernier et propriété d'EDF R&D. Le logiciel GEOEASE fait partie des logiciels de référence de dimensionnement de champs de SGV et a été validé par confrontation aux autres logiciels disponibles. Le calcul effectué à l'aide de ce logiciel GEOEASE donne une longueur totale de 1 833 m, soit seulement une augmentation de 0,6 % par rapport à la longueur totale de sonde donnée par la feuille de calcul EXCEL.

#### Conclusion

Un outil de dimensionnement de type feuille de calcul EXCEL, basé sur la méthode de dimensionnement de SGV unique et champ de SGV recommandée en Amérique du Nord, a été présenté. Deux exemples d'application ont permis d'illustrer sa mise en œuvre dans des cas complémentaires (dimensionnement en chauffage d'une SGV unique et en rafraîchissement d'un champ de SGV). Cet outil est tout à fait adapté pour dimensionner avec une bonne précision des SGV uniques pour installations typiques de bâtiments résidentiels et permet de s'affranchir de ratios parfois inappropriés, voire de réaliser une étude de sensibilité aux incertitudes (nature du sol, besoins, COP de la pompe à chaleur). En revanche, pour un champ de SGV, cet outil ne permet pas d'effectuer un dimensionnement réel d'installations, mais uniquement un pré-dimensionnement permettant une estimation rapide du coût de l'installation. Pour le dimensionnement final de l'installation, il conviendra d'utiliser des logiciels plus évolués permettant des simulations plus fines du fonctionnement des échangeurs géothermiques mais aussi des systèmes et du comportement thermique du bâtiment. ■ 25-82