



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final 30 novembre 2012

Utilisation de la géothermie profonde pour le chauffage de grands bâtiments avec des pompes à chaleur à très hautes performances



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche géothermie
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Planair SA

Crêt 108a
CH-2314 La Sagne
www.planair.ch
Impact-Concept SA
Route du Grand-Mont 33
CH - 1052 Le Mont-sur-Lausanne
www.impact-concept.ch

Auteurs:

Fabrice Rognon, Planair SA
fabrice.rognon@planair.ch

Contributions de :

Florian Bertrand, Yves Chevillat, Baptiste Krieger, Stéphanie Perret, Planair SA,

Carole Schelker et Laurent Denervaud, Impact-Concept SA,
carole.schelker@impact-concept.ch

Responsable de domaine de l'OFEN: G. Siddiqi

Chef de programme de l'OFEN: R. Minder

Numéro du contrat et du projet de l'OFEN: BFE-1081-00231/SI 500260-02

L'auteur de ce rapport porte seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.



Table des matières

1.	Introduction	6
1.1.	Situation actuelle	6
1.2.	Objectifs	6
1.3.	Marché potentiel.....	7
2.	Examen des techniques de forage à grande profondeur	9
2.1.	Les techniques disponibles	9
2.2.	Implications d'une évolution vers des profondeurs de 300 à 800 mètres.....	10
3.	Etude de l'hydrogéologie et de la thermique des roches à ces profondeurs.....	15
3.1.	Contexte général - Distinctions géologiques.....	15
3.2.	Considérations hydrogéologiques.....	16
3.3.	Considérations thermiques	16
4.	Etude des performances des sondes géothermiques à grande profondeur	20
4.1.	Méthodologie.....	20
4.2.	Test du logiciel et validation de la modélisation.....	20
4.3.	Hydrogéologie	21
5.	Performances en fonction de la profondeur	25
5.1.	Méthodologie.....	25
5.2.	Cas 1 : ferme transformée en crèche pour enfants	26
5.3.	Cas 2 : manufacture horlogère.....	29
5.4.	Généralisation à toute la gamme de puissance.....	34
6.	Court-circuit thermique.....	34
6.1.	Cas 1, crèche pour enfants	35
6.2.	Cas 2, manufacture horlogère.....	36
6.3.	Site d'Oftringen.....	36
7.	Investissements, coûts annuels, rentabilité	39
7.1.	Sondes géothermiques	39
7.2.	Production de chaleur	39
7.3.	Méthodologie - Calculs sur des cas réels	40
7.4.	Cas 1 : ferme transformée en crèche pour enfants	40
7.5.	Cas 2 : manufacture horlogère.....	41
7.6.	Investissements pour des bâtiments de 50 à 500kW	43
7.7.	Seuil de rentabilité pour des bâtiments de 50 à 500kW	44
7.8.	Utilisation de la sonde pour le rafraîchissement en été	47
8.	Aquifères profonds.....	48
9.	Nappe phréatique proche de la surface.....	49
10.	Conclusions	50
10.1.	Choix du système.....	50
10.2.	Profondeur optimale avec les techniques actuelles.....	50
10.3.	Développements pour les grandes profondeurs	50
11.	Perspectives	51
12.	Table des illustrations.....	52
13.	Abréviations	53
14.	Références bibliographiques.....	54
15.	ANNEXES.....	55
15.1.	Exemple de résultats de simulation d'Oftringen.....	55



15.2.	Cas 1, détail des paramètres de simulation de l'installation in situ.....	57
15.3.	Cas 1, détail des paramètres de simulation de l'installation avec 1 sonde de 490m	59
15.4.	Cas 2, détail des paramètres de simulation de l'installation in situ.....	61
15.5.	Cas 2, détail des paramètres de simulation de l'installation avec 4 sondes de 700m''	63
15.6.	Exemple de calcul détaillé des coûts d'investissement et des coûts annuels	65
15.7.	Hypothèses de calculs pour aquifère profond.....	66
15.8.	Hypothèses de calculs pour captage de nappe phréatique	66
15.9.	Hypothèses pour les calculs des coûts du chapitre 7.7	66



Résumé

Dans le contexte actuel du marché des pompes à chaleur, il existe un fort potentiel de marché pour les bâtiments de plus de 50kW de puissance de chauffage, notamment en rénovation de chauffages existants. Dans ce cas, la sonde géothermique verticale constitue le plus souvent la source d'énergie la plus disponible pour un système de pompe à chaleur. Ces dernières années, le marché a clairement évolué de sondes profondes de 100 à 150 mètres vers des forages de 200 à 300 mètres.

Le présent rapport traite les questions suivantes pour l'utilisation de sondes géothermiques verticales à des profondeurs de 700 à 800 mètres :

- l'adéquation des techniques actuelles pour forer à ces profondeurs,
- les développements à apporter,
- les effets sur les coûts d'investissement,
- les effets sur l'efficacité du système complet sonde et production de chaleur,
- les effets sur les coûts d'exploitation,
- l'estimation d'un surcoût maximal admissible pour atteindre la parité de coût avec les systèmes actuels peu profonds,
- comparaison avec le captage d'aquifères profonds et l'utilisation de nappes phréatiques proches de la surface.

En conclusion, les techniques actuelles ne sont pas adaptées à des profondeurs de plus de 250 mètres. Il faudrait disposer sur le marché de sondes plus résistantes à la pression.

Au-delà de 250 mètres, l'amélioration du coefficient de performance annuel moyen est inférieure au potentiel donné par le gradient géothermique. En effet, le court-circuit thermique abaisse la température du fluide caloporteur entre le pied de la sonde et la surface, il rend de la chaleur au sous-sol, perdant ainsi de précieux degrés. L'élévation de température rend impossible l'utilisation en geocooling, ce qui peut péjorer le bilan financier en cas de besoins de froid. Aux coûts des sondes et forages actuels, la sonde profonde permettrait d'abaisser les coûts annuels de 10%. Inversement, la parité de coûts annuels est atteinte si la sonde et le forage profond coûte environ CHF 15.- de plus au mètre qu'une sonde à 150 mètres.



1. Introduction

1.1. Situation actuelle

Actuellement, les champs de sondes géothermiques verticales classiques atteignent des profondeurs allant de 100 à 200 mètres. Or le nombre de sondes augmente avec la puissance et pose plusieurs problèmes : l'augmentation de la surface de terrain nécessaire pour respecter les distances minimales requises, l'augmentation des coûts de raccordements des sondes (fouilles, tubes, isolation, collecteurs) et l'allongement des délais de réalisation.

Depuis quelques années, le marché s'oriente vers des sondes plus profondes entre 200 et 300 mètres. Le captage de chaleur géothermique à des profondeurs plus importantes apporte une amélioration certaine de l'efficacité du système, notamment de la pompe à chaleur. Le présent rapport traite les questions suivantes pour des sondes géothermiques verticales à des profondeurs de 500 à 800 mètres :

- adéquation des techniques actuelles pour ces profondeurs,
- adaptations des technologies actuelles, besoins de R&D,
- effets sur les coûts dans l'investissement pour des forages profonds,
- effets sur les coûts d'exploitation du système complet,
- estimation des perspectives de rentabilité économique.

Le présent projet vise à atteindre l'objectif suivant : « 1 bâtiment - 1 forage », avec le même degré de standardisation pour les bâtiments de puissance de chauffage supérieure à 50kW que pour les villas individuelles

1.2. Objectifs

Le but principal est d'augmenter le potentiel d'application de la géothermie au chauffage des bâtiments, surtout dans la rénovation de bâtiments existants.

On constate en effet que 90% des pompes à chaleur géothermiques installées ont une puissance inférieure à 20kW. Ces puissances concernent principalement les villas. La part de marché des pompes à chaleur géothermiques qui concerne les immeubles et les industries, soit des puissances supérieures à 20kW, est de quelques pourcents seulement. Cette sous-représentation s'explique principalement par la difficulté de disposer d'une ressource suffisante de chaleur pour la pompe à chaleur.

La ressource de chaleur d'une nappe phréatique n'est, en effet, pas toujours présente ni exploitable, pas plus que ne l'est celle des lacs et des rivières. Il n'y a pas non plus toujours des rejets de chaleur à proximité.

La solution des champs de sondes est, elle aussi, souvent limitée, car ceux-ci sont chers et gourmands en surface au sol.

Finalement, la solution d'une pompe à chaleur air-eau, bien que l'air soit disponible en tout temps et partout, ne convient pas aux grandes puissances, en particulier en raison du bruit et de la taille des appareils.



Le second but est la réduction du nombre de forages qui réduit les risques d'atteintes à l'environnement. Malgré toutes les précautions et les mesures de qualité mises en œuvre actuellement, le risque de problèmes, même minime, n'est jamais nul. La réduction du nombre de forages en implantant des sondes atteignant de plus grandes profondeurs constitue de ce point de vue un pas très intéressant.

Le présent rapport fait la synthèse des résultats de recherches sur les aspects physiques, techniques, technologiques et financiers concernant la géothermie entre 300 et 800 mètres de profondeur.

1.3. Marché potentiel

Depuis quelques années, la pompe à chaleur est le système de chauffage le plus installé en Suisse. Ce succès cache une répartition inégale dans les segments de puissance, comme le montre la figure suivante.

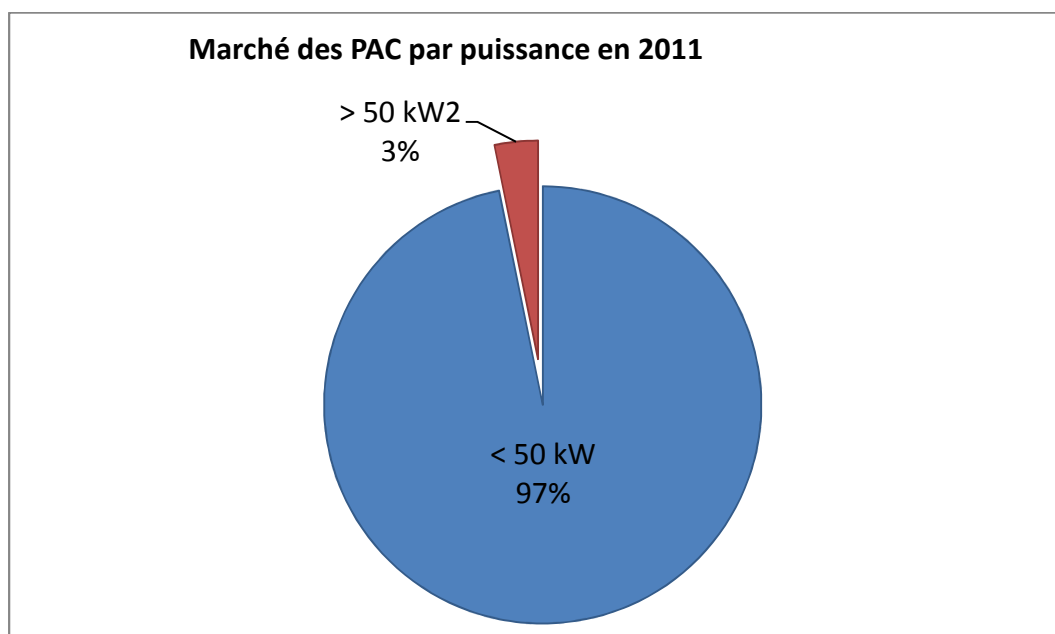


Figure 1: répartition par puissance des pompes à chaleur installées en Suisse en 2011. Source : GSP.

Le marché des pompes à chaleur est constitué à 97% d'installations de moins de 50kW, ce qui correspond à 5 sondes de 150 mètres.



Or le patrimoine bâti comporte un nombre important de bâtiments qui sont encore chauffés avec des énergies non renouvelables, comme le montre la figure suivante :

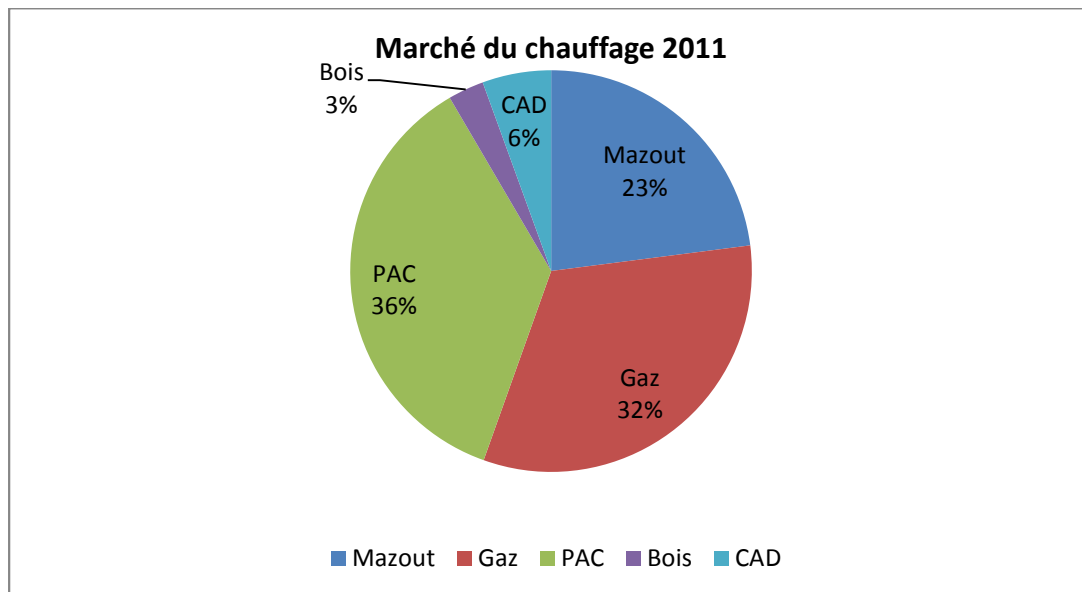


Figure 2: nombre de chauffages installés en Suisse en 2011, par système de chauffage.
Source : GSP.

Environ 50'000 chauffages sont installés chaque année en Suisse, dont 18'000 PAC de moins de 50kW, ce qui signifie que la part de marché des PAC au-dessus de 50kW est de moins de 3%. Donc le marché du chauffage en-dessus de 50kW est dominé largement par les chauffages au mazout et au gaz.

Le segment de marché en-dessus de 50kW implique des longueurs de sondes géothermiques verticales de l'ordre de 800 mètres, soit 4 à 6 sondes environ. Pour les puissances plus élevées, le nombre de sonde s'accroît et pose les problèmes suivants :

- place pour disposer les sondes sur la parcelle en respectant la distance minimale entre les sondes et la limite du terrain,
- raccords plus nombreux : fouilles, conduites, isolation, collecteurs,
- mise en œuvre difficile lors de rénovation ou en milieu urbain.



2. Examen des techniques de forage à grande profondeur

2.1. Les techniques disponibles

Une des premières étapes du projet est d'examiner les techniques de forage disponibles pour forer de 500 à 800 mètres et de comparer les coûts selon les techniques. Il s'agit de définir les possibilités actuelles en termes de forages profonds.

A l'heure actuelle, les méthodes utilisées pour l'implantation de sondes géothermiques verticales réalisées jusqu'à une profondeur de 100 à 200 mètres, et ponctuellement jusqu'à 300 voire 400 mètres sont le marteau fond de trou et le rotary.

Ces méthodes sont applicables pour des forages jusqu'à 800 mètres à certaines conditions expliquées au chapitre 2.2.

2.1.1. Marteau fond de trou

Dans le forage au marteau fond de trou, la pénétration de l'outil dans la roche (meuble ou indurée) est assurée par un mouvement de rotation associé à une frappe sur le taillant. Sur la plupart des machines, le sens de rotation de l'outil est inverse à celui du tubage, ce qui réduit les risques de blocage des cuttings.

L'installation se compose principalement d'une foreuse, d'un compresseur et d'une benne pour la récupération des cuttings et de l'eau de forage. Pour remonter les cuttings, l'eau est soit injectée à faible débit avec l'air provenant du compresseur, soit elle provient du sous-sol lorsque celui-ci est aquifère et saturé (ou qu'il existe des venues d'eau suffisantes). Les volumes sont généralement assez faibles.

L'emprise d'une installation de chantier est donc assez réduite et permet des interventions dans pratiquement toutes les situations habituellement rencontrées : villas neuves ou en rénovation, zone rurale ou urbaine.

Les entreprises utilisent généralement des compresseurs qui peuvent délivrer une pression d'environ 25 bars. Cette pression peut atteindre 30 à 35 bars pour les machines les plus performantes. La vitesse moyenne d'avancement est d'environ 20 m/h.



2.1.2. Rotary

Pour la méthode au rotary, la pénétration de l'outil s'effectue par abrasion et broyage du terrain, sans chocs, uniquement par rotation. Le maintien de l'ouverture du trou de forage est assuré par l'injection d'une boue de densité adaptée. Cette méthode implique donc l'utilisation d'une pompe à boue et d'un dessableur.

Les inconvénients liés aux boues de forage sont d'une part les volumes concernés (qui peuvent être conséquents pour des forages profonds), leur évacuation, mais également la modification de la perméabilité de l'encaissant si l'objectif visé est l'exploitation des eaux souterraines.

Dans le cas de terrains aquifères, la boue va en effet masquer en partie les informations hydrogéologiques (venues d'eau notamment), mais également plus ou moins colmater les interstices et/ou fissures des roches rencontrées, gênant la circulation ultérieure de ces eaux souterraines. Dans le cas de roches fortement fissurées, les pertes de boues peuvent être considérables et rendre cette technique inopérante.

La vitesse d'avancement est de l'ordre de 6 à 8 m/h, soit une vitesse trois fois inférieure à la méthode du marteau fond de trou.

Les avantages et inconvénients des méthodes de forages utilisées ou utilisables, pour l'exploitation des ressources géothermales à des profondeurs atteignant 800 mètres, tiennent pour une part importante aux matériaux utilisés et aux conditions géologiques rencontrées. Les machines sont sensiblement similaires pour les techniques marteau fond de trou et rotary.

2.2. Implications d'une évolution vers des profondeurs de 300 à 800 mètres

Une augmentation de la profondeur des forages est accessible aux techniques de forage utilisées actuellement. Elle demande, toutefois, une adaptation du matériel disponible et génère des surcoûts assez conséquents.

2.2.1. Sondes

Compte tenu de l'augmentation de la longueur des sondes et de leur diamètre, les prix vont notablement augmenter, de même que les frais de transport en raison de l'encombrement des bobines, de leur masse, etc...

Les sondes standards disponibles sur le marché sont de diamètres 25, 32 ou 40mm. Pour des profondeurs supérieures à 200 mètres, il convient d'utiliser des sondes de diamètre 50mm, voire plus. Il s'agit, à ce jour, d'exécution sur demande.



Des valeurs indicatives pour des sondes comprenant deux circuits en U sont récapitulées dans le Tableau 1 :

Longueur du forage (m)	Diamètre de la sonde (mm)	Prix unitaire (CHF/m)
200	32	10
500	50	15
700	63	23
900	75	32

Tableau 1: récapitulatif des coûts de sondes en fonction de la profondeur

L'augmentation du diamètre de sonde nécessite naturellement un diamètre de forage plus important. Un forage de Ø127 mm est indiqué pour les sondes de 32 mm et de 40 mm, alors que pour les sondes de 50 mm, on préconise un forage de Ø153 à 178 mm.

2.2.2. La pression et les matériaux

La résistance à la pression constitue un élément crucial. Les sondes utilisées couramment actuellement sont en PE de qualité PN16. Cette résistance à la pression permet donc une utilisation sans risque jusqu'à une profondeur de sonde de 250 mètres environ. Au-delà, il faut sélectionner la catégorie supérieure, PN25, ce qui entraîne une augmentation des coûts. Il est toutefois possible de mettre en œuvre du PN16 à condition de maîtriser le maintien d'une contre-pression lors du remplissage de la sonde et de l'injection.

Les retours d'expériences in situ montrent que ces contraintes de pression présentent des risques avérés. Plusieurs foreurs nous ont confirmé des cas de rupture de sondes profondes ces dernières années. A tel point que certaines entreprises refusent désormais de forer à plus de 250 ou 300 mètres, selon les régions. Dans chaque cas, la rupture aurait lieu à cause d'une pression trop élevée dans la zone proche du pied de la sonde. Après déformation élastique, le PE a la propriété de se fendre ou de se rompre.

Au vu de ce qui précède dans l'état actuel de la technique et des matériaux, la profondeur maximale sans prise de risque est de 250 mètres. Pour de plus grandes profondeurs, les solutions sont présentées au chapitre 10.3 et 11.



2.2.3. Tige - Tubage

Dans les investissements supplémentaires à consentir pour la géothermie profonde, il faut également tenir compte de l'acquisition des tubages et tiges de forage nécessaires pour atteindre les profondeurs visées.

Pour exemple, dans le cadre d'un chantier, une entreprise de forage a dû tuber au-delà de 200 mètres de profondeur en raison du recoupement d'une zone fortement fracturée, alors que le rocher avait été atteint à partir d'une dizaine de mètres de profondeur.

Si la longueur de tige est implicitement définie par la profondeur du forage à réaliser, celle des tubages découle de la géologie des terrains, voire des prescriptions possibles liées par exemple à la protection des eaux souterraines.

Actuellement, un forage de l'ordre de 200 mètres de profondeur implique un équipement de forage (tiges et tubages) estimé à environ CHF 70'000.-. L'évolution vers une profondeur de 500 mètres conduit à un coût global d'environ CHF 250'000.-, puis à environ CHF 400'000.- vers 800 mètres.

Il est également important de préciser que le poids des tiges et des tubages utilisés pour le forage va augmenter avec le diamètre, et que ce dernier augmente en fonction de la profondeur visée.

En effet, il est judicieux de choisir des diamètres plus importants pour la sonde lorsqu'elle atteint de plus grandes profondeurs, d'une part pour réduire les pertes de charges hydrauliques lorsque le fluide caloporteur circule, et d'autre part, afin d'augmenter la résistance mécanique de la sonde face à l'augmentation de pression en pied de sonde. On admet généralement un diamètre de 32 mm jusqu'à 160 mètres de profond, de 40 mm jusqu'à 400 mètres et de 50 mm au-delà.

Pour un Ø178 mm, la masse des tiges se situe à environ 35 kg/m, soit un total de 17'500 kg à 500 mètres et 28'000 kg à 800 mètres. A ces valeurs, s'ajoute la masse des tubages, soit 11'500 kg à 500 mètres et 18'400 kg à 800 mètres.

2.2.4. Injection - Cimentation

Les sondes sont rendues solidaires de la roche encaissante par l'injection du trou de forage d'un mélange le plus souvent composé de ciment et de bentonite (argile). Cette injection est réalisée de bas en haut.

Plus la profondeur du forage augmente, plus la pression d'injection du produit destiné à cimenter la sonde dans le trou de forage sera élevée. Au-delà d'une certaine valeur, la pression d'injection risque de détériorer les sondes par écrasement. Il est donc nécessaire de contrôler la pression dans les sondes durant la phase de cimentation du trou de forage, voire de procéder à une cimentation par palier.

L'installation des tubes d'injection supplémentaires et les manipulations induites impliqueront également un surcoût pour le forage profond.



2.2.5. Machine de forage

Pour les machines de forage utilisées actuellement et atteignant des profondeurs de l'ordre de 400 à 500 mètres, le coût global est évalué à environ CHF 700'000.-.

Le passage à des profondeurs plus importantes, soit jusqu'à environ 1000 mètres, implique de doubler quasiment le prix des machines, qui atteint alors environ CHF 1'300'000.-.

En effet, un forage plus profond induit une augmentation des longueurs de tiges et de tubage, ce qui aboutit à des masses très élevées. Celles-ci requièrent une puissance de relevage plus conséquente que celle admissible par la plupart des machines actuelles (environ 20 t).

Une adaptation de toute la logistique autour du forage découle de ces changements :

- foreuse sur camion à 4 essieux (en lieu et place d'un petit camion ou d'un engin à chenilles),
- compresseur plus puissant (plus de 30 bars),
- tubes de forage de 9 mètres,
- transport des tubes par semi-remorque (plutôt que camion ou camionnette),
- surface au sol nécessaire pour le forage d'environ 27 mètres par 4 mètres pour poser la foreuse et stocker les tubes de forage,
- accès à la zone de forage par camion uniquement,
- matériel plus grand (torches, camion).

2.2.6. Fluide de forage

Les compresseurs standards utilisés actuellement pour l'injection d'air dans la méthode de forage au marteau fond de trou ont une puissance limitée à 30, voire 35 bars.

Or, cette limite pourrait limiter la réalisation de forages au-delà de 300 à 400 mètres de profondeur, en fonction de la colonne d'eau présente dans le forage. Si la charge représentée par la colonne d'eau ne peut être compensée par le compresseur, les cuttings ne remonteraient plus à la surface et le forage deviendrait impossible.

Pour la méthode au rotary, la colonne de boue est également gênante dans le cas de l'implantation de sondes, car sa densité ne permet pas une mise en place gravitaire. Les sondes doivent être poussées mécaniquement dans le forage, à l'aide d'un train de tige spécial.

2.2.7. Coût du forage

Le coût de réalisation d'un forage pour des sondes géothermiques, en utilisant la méthode au marteau fond de trou, se situe actuellement aux environs de CHF 70.-/m pour une profondeur maximale de 160 mètres. Ce montant s'élève ensuite à environ CHF 85.-/m jusqu'à 400 mètres, puis augmente à CHF 120.-/m pour une profondeur maximale d'environ 800 mètres.



Ces valeurs, qui comprennent le forage, son équipement et la cimentation des sondes, correspondent à des moyennes pour le plateau suisse (molasse). Elles peuvent varier en fonction de la géologie locale, du nombre de sondes et de la situation du marché.

Selon les difficultés géologiques rencontrées, par exemple la présence de couches de marnes qui bouchent le trou de forage, le tubage devient indispensable. Selon la profondeur de la zone à tuber, les coûts peuvent atteindre CHF 500.- à 600.-/m pour des forages de 500 mètres de profondeur.

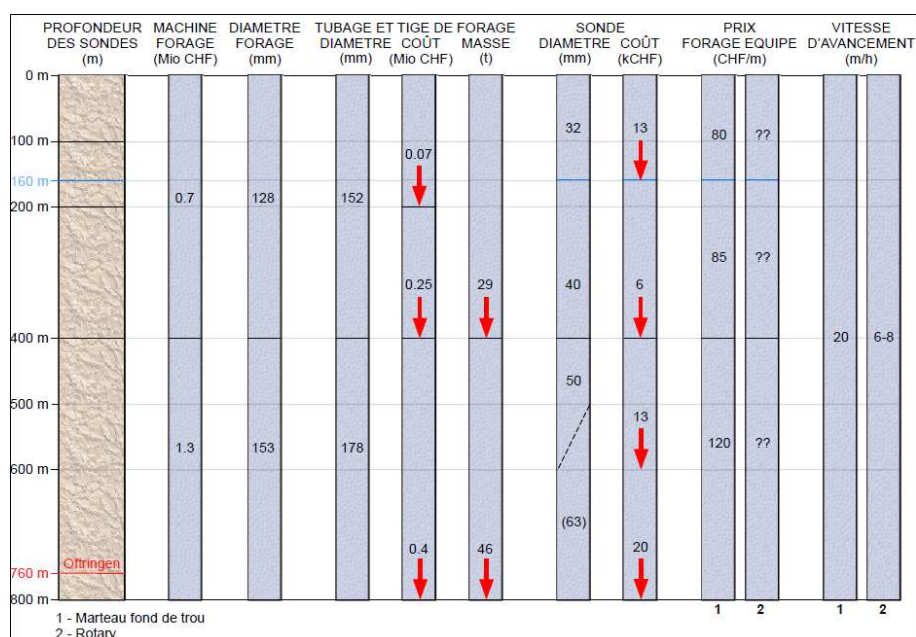


Figure 3: récapitulatif des techniques de forage et leurs caractéristiques selon la profondeur

2.2.8. Les pompes à chaleur

Le coefficient de performance s'améliore avec l'augmentation de la température de la source dite froide de la pompe à chaleur. Cependant, il convient de noter qu'une température trop élevée en sortie de sonde peut perturber le bon fonctionnement de la pompe à chaleur. En effet, la plupart des produits commercialisés actuellement tolèrent une température maximale de 20°C à l'entrée à l'évaporateur. Une température plus élevée provoque l'arrêt de la machine.



3. Etude de l'hydrogéologie et de la thermique des roches à ces profondeurs

3.1. Contexte général - Distinctions géologiques

Si l'on considère l'ensemble du territoire suisse, la réalisation de forages à des profondeurs de l'ordre de 300 à 800 mètres va conduire à recouper des contextes géologiques et hydrogéologiques qui vont présenter de fortes différences selon les régions considérées et dont l'identification a le plus souvent fait l'objet d'une synthèse cartographique (Atlas géologique de la Suisse).

On peut globalement considérer que les principales formations qui pourraient être recoupées par des sondes géothermiques sont les suivantes :

- alluvions fluviales récentes,
- dépôts fluvioglaciaires,
- roches molassiques,
- roches fissurées,
- roches karstiques,
- roches cristallines.

Ces compositions amènent à des contextes hydrogéologiques et thermiques spécifiques qui diffèrent suivant l'emplacement géographique.

Pour la Suisse, les différentes distinctions peuvent être visualisées dans la *Figure 4*.

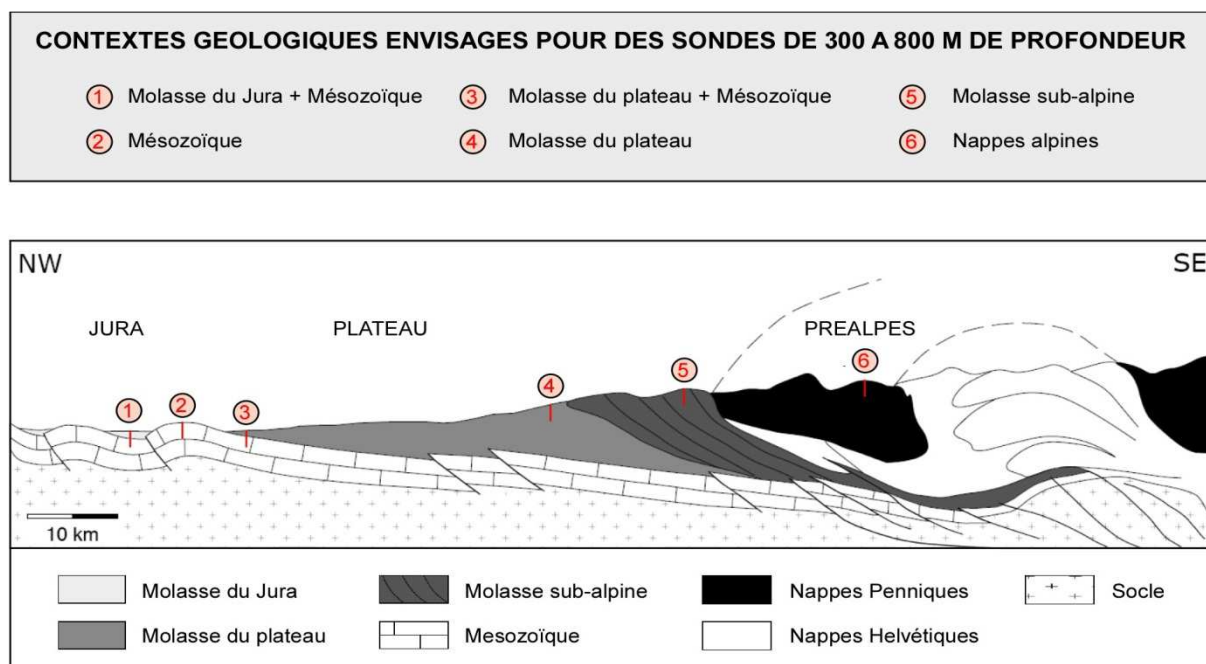


Figure 4: coupe transversale simplifiée de la Suisse, du Jura aux Préalpes en passant par le Bassin molassique, modifiée d'après BERGER (1989) et SOMMARUGA (1997) (source: Impact-Concept SA)



3.2. Considérations hydrogéologiques

Les sondages atteignant des profondeurs de 300 à 800 mètres sont relativement peu nombreux. Parmi eux, ceux dont une partie au moins des objectifs concernaient la caractérisation hydrogéologique des roches en profondeur sont en nombre plus réduit encore.

Les roches meubles sont généralement perméables pour autant que leur granulométrie soit suffisamment grossière. Il s'agit des alluvions graveleuses et/ou sablo-graveleuses possédant une perméabilité et une porosité suffisante. On les retrouve sous forme de remplissage de sillons fluvio-glaciaires et de cônes au contact entre le pied des reliefs et les zones de plaine. Ces matériaux sont donc généralement assez localisés, d'extension réduite et ont une épaisseur assez modeste (< 100 m). La majeure partie des terrains meubles de couverture est constituée de matériaux morainiques peu à pas perméables.

La molasse, dont l'extension couvre une grande part du plateau, est partagée entre des dépôts gréseux plus ou moins perméables (selon leur granulométrie) et des matériaux marneux globalement peu à pas perméables. Certains horizons marneux sont toutefois suffisamment indurés pour disposer d'une perméabilité de fissure qui autorise la circulation des eaux souterraines, avec des débits localement significatifs.

Les roches fissurées, présentes essentiellement dans le secteur des Alpes et des Préalpes, sont affectées comme leur nom l'indique d'une fissuration découlant de leur dureté et de la mise en œuvre de contraintes d'origine essentiellement tectonique. Leur perméabilité est très variable, influencée par l'ouverture des fissures, par leur colmatage éventuel, par le recouvrement des directions de fissures et par la présence éventuelle d'accidents majeurs.

Les roches cristallines peuvent être assimilées aux roches fissurées du point de vue hydrogéologique, avec des perméabilités assez faibles.

Les roches karstiques (essentiellement carbonatées) possèdent une perméabilité dite « en grand », liée à leur fracturation. A la différence des roches fissurées, les écoulements souterrains n'utilisent globalement que quelques fissures, mais qui possèdent une ouverture nettement plus conséquente découlant des phénomènes de dissolution de l'encaissant. Les écoulements souterrains sont donc très concentrés, générant un nombre restreint de sources, mais dont les débits sont très importants et très fluctuants (alimentation et vidange rapides des réservoirs).

3.3. Considérations thermiques

Dans le cadre d'installations correspondant à des puissances calorifiques de moins de 30kW, le dimensionnement des sondes géothermiques peut être réalisé à l'aide des puissances spécifiques d'extraction, telles que données par exemple dans le *Tableau 2* ci-après.



Valeurs indicatives générales	Puissance spécifique d'extraction (W/m)			
	sur 1'800 heures		sur 2'400 heures	
Sous-sol de mauvaise qualité (sédiment sec) (. < 1,5 W/(m * K)	25		20	
Sous-sol rocheux normal et sédiment saturé en eau (. = 1,5 - 3,0 W/(m * K)	60		50	
Roche compacte à conductibilité thermique élevée (. > 3,0 W/m * K)	84		70	
Minéraux respectifs				
Gravier et sable, secs	< 25		< 20	
Gravier et sable, aquifères	65	80	55	65
Dans le cas de fort courant des eaux souterraines dans le gravier ou le sable, et d'installations uniques	80	100	80	100
Argile et glaise, humides	35	50	30	40
Calcaire (massif)	55	70	45	60
Grès	65	80	55	65
Roche magmatite acide (par ex. granit)	65	85	55	70
Roche magmatite basique (par ex. basalte)	40	65	35	55
Gneiss	70	85	60	70

Tableau 2: puissance spécifique d'extraction des sondes géothermiques (sondes en double U, selon prescription VDI 4640, folio 2 – Source Dimplex SAS)

Une base de données assez conséquente a été établie par l'Université du Michigan (laboratoire de géothermie) dans le cadre du projet [4]. Ce dernier vise à utiliser les données de température du sous-sol, mesurées en forage, pour comprendre les causes et la nature de l'évolution actuelle du climat. Cette base de données recense ainsi plusieurs centaines de forages, pour lesquels on dispose de profils de température en fonction de la profondeur. Une forte proportion de forages ne dépasse toutefois pas 300 à 400 mètres de profondeur (Figure 5).

La représentation graphique du logarithme des températures pour les forages recensés par l'Université du Michigan, montrent une certaine dispersion verticale sur l'axe des températures, liée à l'implantation géographique de ces derniers, mais des gradients géothermiques relativement homogènes. Sur les 20 forages analysés, le gradient géothermique fluctue entre 5 et 49 K/km, pour une moyenne de 18.7 K/km. Les valeurs les plus basses ont été enregistrées en Biélorussie (forages Nesvizh et Pukhovstina) et la plus élevée en Bulgarie (forage W-4).

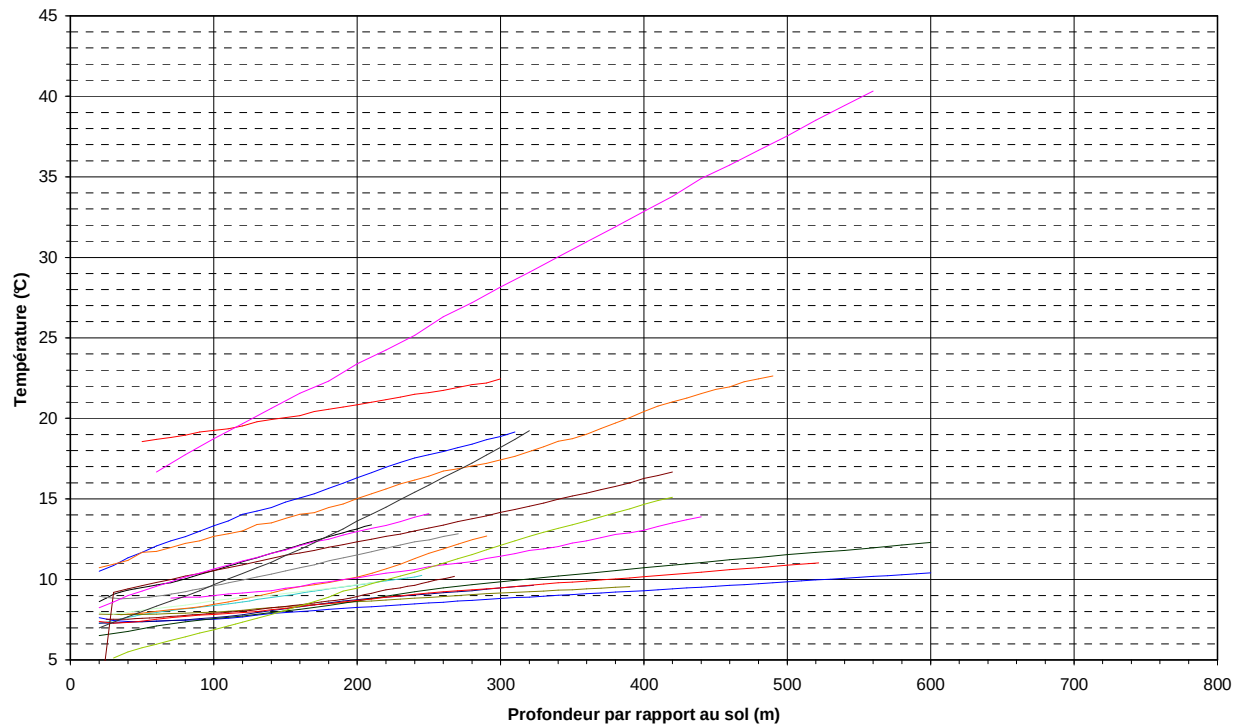


Figure 5: température du sous-sol mesurée en forage (source : Université du Michigan, Laboratoire de géothermie)

En Suisse, on admet généralement un gradient géothermique d'environ 30K par kilomètre de profondeur. Le Jura montre une certaine dispersion dans l'évolution de ces températures.

Si l'on examine maintenant au cas par cas les différentes zones géologiques délimitées en Suisse, toutes présentent des particularités ayant un impact.

Dans l'Arc jurassien, les roches calcaires composant le sous-sol sont cassantes et solubles, des réseaux karstiques peuvent se développer à la faveur de la fissuration, conduisant à la création de véritables conduits naturels au sein desquels les écoulements (air et/ou eau) se trouvent concentrés et adoptent des vitesses parfois très élevées.

Une telle situation est généralement peu favorable pour atteindre un équilibre thermique avec l'encaissant.

Pour les cas les plus fréquents, l'altitude élevée des zones d'infiltration et une saison hivernale froide et longue conduisent à des températures relativement basses pour les eaux infiltrées. La circulation d'air froid dans les réseaux fossiles ou dénoyés pourrait également constituer un caractère pénalisant pour atteindre un équilibre thermique avec l'encaissant.

Des mesures de température ont été effectuées dans les forages d'exploration et/ou d'exploitation des eaux souterraines réalisés dans l'Arc jurassien suisse ; en France pour de la prospection d'hydrocarbures et dans divers pays pour des objectifs variés.

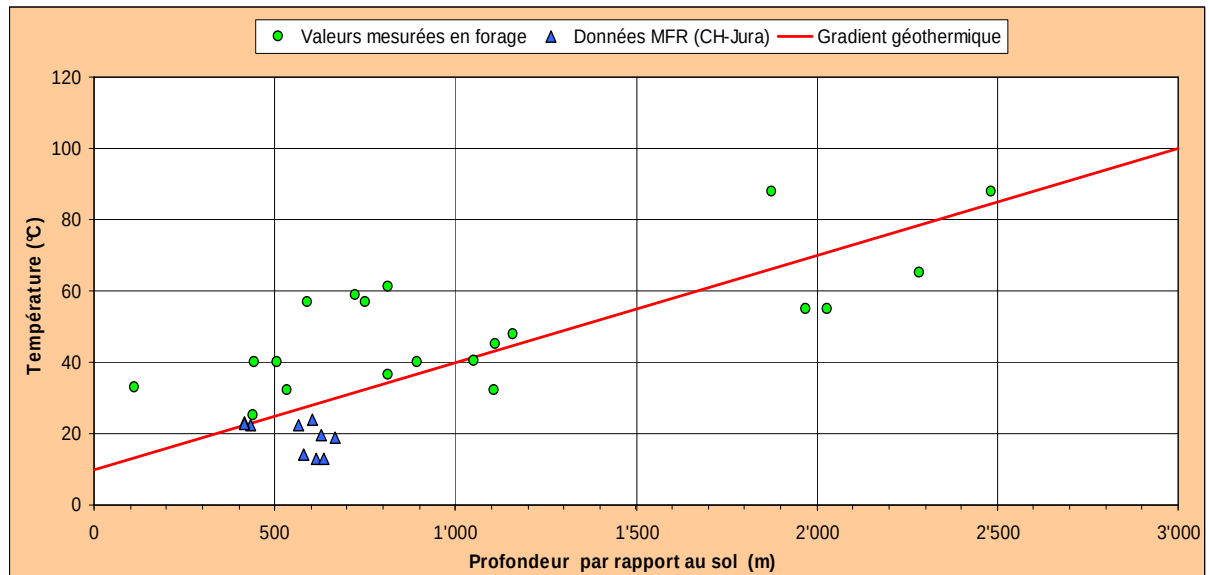


Figure 6: température des eaux souterraines mesurée sur quelques forages en Suisse (données MFR) et en France (données BRGM) et gradient géothermique moyen



4. Etude des performances des sondes géothermiques à grande profondeur

4.1. Méthodologie

L'objectif consiste à identifier précisément les gains énergétiques et donc économiques annuels puis d'intégrer les coûts d'investissement dans un calcul de coûts annuels complets (intérêts, amortissement, coûts d'exploitation).

Pour la partie technique, nous avons procédé comme suit :

- simulation de trois installations réelles mesurées in situ,
- vérification des paramètres de calcul besoins énergétiques du bâtiment, températures de fonctionnement, géologie, pompes et auxiliaires, appoint par chaudière,...
- simulation des mêmes installations avec sondes à grande profondeur.

Ensuite, pour la partie économique :

- vérification des coûts d'investissement et d'exploitation des installations de référence,
- estimation des investissements pour les mêmes installations équipées de sondes profondes,
- calcul des coûts d'exploitation en intégrant le résultat des simulations pour les coûts énergétiques,
- calcul des coûts annuels de la référence et de sa variante à grande profondeur,
- déterminer le coût maximal ou le coût cible pour atteindre la rentabilité.

Puis, nous avons simulé pour des puissances de bâtiment de 50 à 500kW le système de référence (sondes de 150m) et le système profond (sondes à 750m).

4.2. Test du logiciel et validation de la modélisation

L'outil le mieux adapté à nos simulations est sans conteste Pilesim². Mais peu d'installations de grande profondeur ont été réalisées et instrumentées pour des mesures de température à ce jour en Suisse avec des forages entre 500 et 800 mètres. L'expérience avec ce logiciel dans ce domaine est donc maigre. Avant de travailler sur la simulation de variantes, nous avons validé les paramètres et les calculs de simulation sur l'installation réalisée et mesurée en détail à Oftringen. Les différents régimes de fonctionnement mesurés sur ce site ont été simulés.

² TRNSED version 3.070, SUPSI, 2003



De cette manière, nous avons pu tester la précision de l'outil « pilesim » et comparer les valeurs calculées selon notre modèle aux résultats mesurés sur le terrain afin de valider ledit modèle.

Les paramètres utilisés et l'origine de leur choix sont décrits ci-après.

4.3. Hydrogéologie

La composition géologique du terrain des forages est issue soit des données provenant de l'Atlas géologique de la Suisse, soit des analyses de géologues plus précises.

Pour la simulation du forage d'Oftringen, nous nous sommes basés sur la description détaillée du géologue dans le cadre du projet [5]. Nous l'avons simplifiée en deux couches, une première couche calcaire de 363 mètres suivie d'une seconde couche de grès de 500 mètres.

Ci-dessous la comparaison entre la composition relevée et la composition simplifiée pour le calcul.

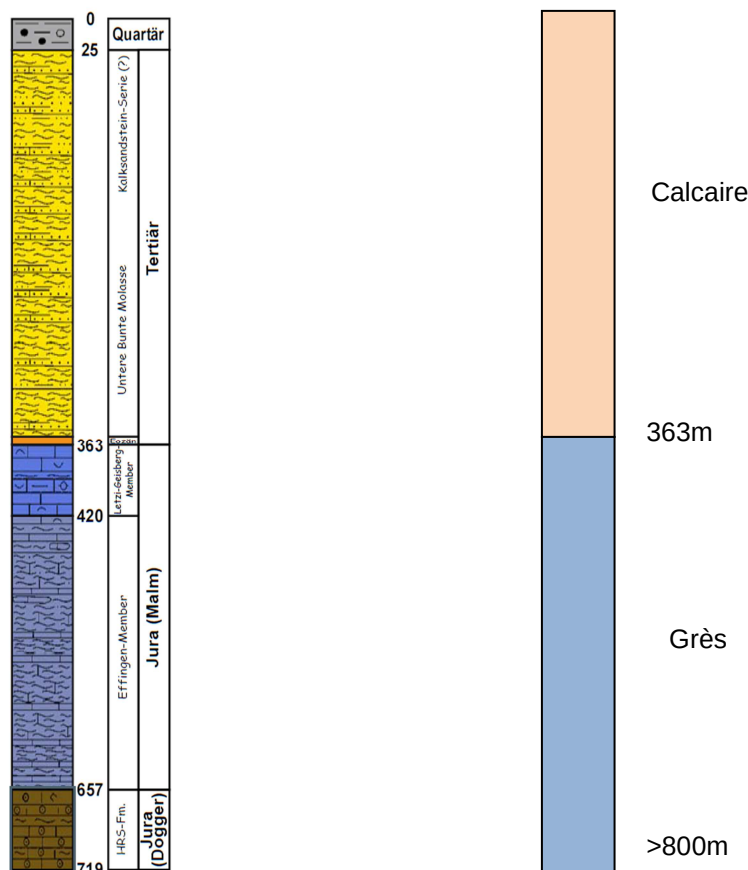


Figure 7: coupe géologique Oftringen (EBERHARD & Partner AG, 2010) et coupe géologique simplifiée pour PILESIM



La conductivité thermique du terrain est estimée par rapport à d'autres projets similaires et environnants, ou déterminée par les caractéristiques typiques des roches traversées (p.ex. normes VDI 4640 et SIA D025 & D0137). Le calcaire a une valeur typique de 2.8.

4.3.1. Forage

Les caractéristiques techniques du forage sont celles renseignées dans le rapport [5]. La profondeur est de 719 mètres. Un diamètre moyen de 0,18m a été choisi.

La température du sol a été mesurée à $T=7^{\circ}\text{C}$ et celle de fond de puits à 49°C . De ce fait, le gradient correspondant est de $\Delta T=60\text{K/km}$. Il s'agit d'une singularité remarquable puisqu'elle vaut le double de la moyenne du plateau suisse.

4.3.2. Sonde

Il y a une sonde, allant jusqu'à une profondeur de 706 mètres. Elle est composée d'un tube en double U en polyéthylène de diamètre intérieur $\varnothing_i=32\text{mm}$ et de 4mm de paroi.

Les résistances thermiques des sondes R_b et R_a , sont données par le mode d'emploi de Pilesim [8].

4.3.3. Débit et fluide utilisé

Le débit n'est pas paramétrable directement, mais il est possible d'imposer le ΔT . Le type de fluide simulé est de l'eau.

4.3.4. Consommateur

Le consommateur est symbolisé dans cette étude par un aéro-refroidisseur d'une puissance considérée constante. Plusieurs puissances ont été testées : 5, 10, 15 et 20kW.

Le modèle de simulation requiert également une PAC. Le consommateur a été matérialisé par une consommation constante d'eau chaude sanitaire de puissance constante (Figure 8). Cette puissance est calculée d'après la puissance souhaitée en tête de sonde avec un COP de 4. Ce COP a été fixé arbitrairement, le choix premier eut été un COP de 1. Cette valeur n'est pas acceptée par le logiciel. La simulation a été faite sur un laps de temps d'un mois. Les mesures avaient été effectuées quant à elles sur quelques dizaines d'heures chacune.



Ci-dessous la modélisation du bilan énergétique d'une installation de géothermie avec Pile-sim.

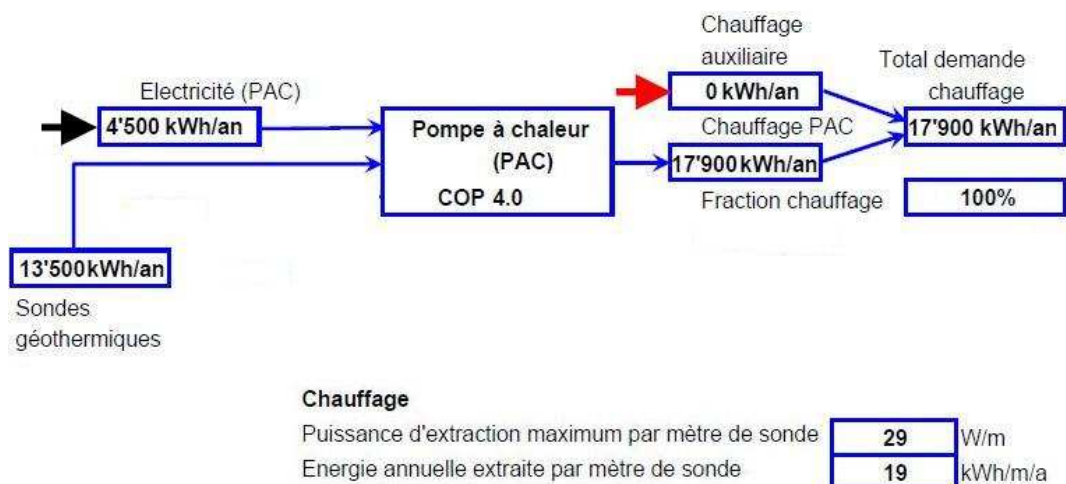


Figure 8: exemple de schéma de simulation d'Ofringen à 20kW et débit 2.5m³/h avec le logiciel PILE-SIM.

Les paramètres principaux sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Intitulé du paramètre	Symbole	Valeur	Unité
COP	COPo	4	-
Différence température à l'évaporateur de la PAC	dTevap	6	K
Nombre de sondes		1	-
Longueur moyenne de(s) sonde(s)		706	m
Diamètre moyen de(s) sonde(s) [m]		0.18	m
Resistance thermique locale de(s) sonde(s)	Rb1	0.1	K/(W/m)
Résistance thermique interne Ra de(s) sonde(s)	Ra1	0.25	K/(W/m)
Configuration de(s) sonde(s)	TypPip	en U	
Nombre de tubes dans une coupe de la sonde	NTUB	4	-
Diamètre interne de tube	DIAMI	32	mm
Température initiale sol [TGRDIN]	TGRDIN	7	°C
Gradient de température moyen en sol non-perturbé	dTGRND	60	K/km
Conductivité thermique de la couche de terrain 1	LG1	2.80	W/(mK)
Capacité thermique vol. de la couche de terrain 1	CG1	2.20	MJ/(m3K)
Epaisseur de la couche de terrain 1	HG11	363	m
Conductivité thermique de la couche de terrain 2	LG2	2.30	W/(mK)
Capacité thermique vol. de la couche de terrain 2	CG2	2.25	MJ/(m3K)
Epaisseur de la couche de terrain 2	HG2	500	m

Tableau 3: Paramètres de simulation intégrés dans Pilesim pour l'installation d'Ofringen.



Les simulations de l'installation d'Oftringen avec le logiciel Pilesim2 donnent des résultats très proches des mesures in situ. Elles sont présentées dans le Tableau 4.

Psonde [kW]	Tentrée [°C]		Tsortie [°C]	
	Simulé	Mesuré	Simulé	Mesuré
0	26.5	26	27	26
5	24	22	25	24
10	21	18	23.5	22
15	15	15	22	21
20	10.5	11	17.5	18

Tableau 4: Comparaison des températures obtenues par simulation et par mesure avec un débit de $2.5\text{m}^3/\text{h}$.

Les différences sont de 3 à 5% ce qui valide la méthode de simulation sur un cas concret, réalisé et mesuré avec précision. L'erreur de mesure des sondes de température se situant dans le même ordre de grandeur, nous estimons cette valeur valide.

On trouvera un exemple de résultat d'une simulation dans l'annexe 15.1.



5. Performances en fonction de la profondeur

Selon le potentiel de marché présenté au chapitre 1.3, la présente étude couvre la gamme de puissance de chauffage des bâtiments de 20kW à 500kW. Avec les technologies actuelles de sondes peu profondes, soit 150 mètres en moyenne, la gamme de puissance correspond à des champs de sondes de 2 à 50 sondes géothermiques verticales.

Nous divisons la gamme de puissance par paliers de 50kW. Cette puissance correspond aux besoins thermiques du bâtiment. Pour chaque catégorie, nous déterminons :

- les besoins annuels en énergie thermique pour le chauffage seul,
- l'énergie soutirée du sol,
- la longueur de sonde nécessaire et le nombre de sondes,
- la consommation d'électricité,
- le coefficient de performance annuel moyen.

Ensuite, en conservant les mêmes besoins thermiques du bâtiment, donc la même énergie à tirer du sous-sol, nous redimensionnons le système avec des sondes à 750 mètres de profondeur. Cette longueur a été choisie car c'est un multiple de la longueur de 150 mètres pour les sondes courtes et correspond bien au cas d'Oftringen.

Avec la sonde profonde, les températures dans la sonde sont plus élevées. Ainsi, la pompe à chaleur atteint de meilleurs coefficients de performance et prélève une part plus grande d'énergie dans le sous-sol que dans le cas de sondes peu profondes. Le nombre total de sondes est réduit.

Les consommations obtenues sont ensuite utilisées pour les calculs économiques au chapitre 7.

5.1. Méthodologie

Après avoir bien identifié toutes les contraintes, simulé et mesuré les performances d'une installation en fonctionnement, il est temps d'appliquer ces résultats en appliquant ces aspects techniques à des projets que l'on chiffrera plus tard en termes financiers.

Avant de simuler toutes les puissances entre 50 et 750kW par pas de 50kW pour des sondes peu profondes, nous avons validé deux puissances sur la base d'installations réalisées et instrumentées.

Les deux sites retenus sont en service et des données techniques et financières sont disponibles. Les simulations énergétiques ont été réalisées avec le logiciel Pilesim2. Pour chaque exemple, voici la démarche adoptée :

- simulation du premier exemple comme réalisé, comparaison avec mesures in situ,
- simulation du premier exemple avec sondes profondes,
- simulation du second exemple, comparaison avec les mesures in situ,
- simulation du second exemple avec sondes profondes,



Lors de la simulation à plus grande profondeur, les paramètres suivants sont maintenus identiques à ceux du cas de référence :

- la chaleur utile produite car les besoins thermiques du bâtiment sont identiques,
- la conductivité moyenne du sous-sol sur l'ensemble de la sonde ou du champ de sonde est inchangée,
- la longueur totale de sondes est identique.

Ensuite, d'autres puissances de bâtiments ont été simulées en procédant à des variations de paramètres validées lors de cet essai.

5.2. Cas 1 : ferme transformée en crèche pour enfants

Une ancienne ferme située à La Chaux-de-Fonds a été entièrement rénovée et transformée en crèche pour enfants en 2009. La chaudière à mazout a été remplacée par une pompe à chaleur de 21kW combinée à 4 sondes géothermiques de 122 mètres. Les critères déterminants pour le choix d'une pompe à chaleur étaient la part d'énergie renouvelable, le faible encombrement dans le bâtiment (contrairement aux pellets) et la facilité d'exploitation et d'entretien pour le client.



Figure 9: ancienne ferme rénovée et transformée en crèche pour enfants à La Chaux-de-Fonds.

Nous avons simulé l'installation actuelle puis plusieurs variantes avec des sondes plus profondes afin de quantifier l'évolution des performances avec l'augmentation de la profondeur des sondes.



La simulation de l'installation réalisée se présente comme suit :

Pilesim2-get-output-Fr.xls

09.05.2012

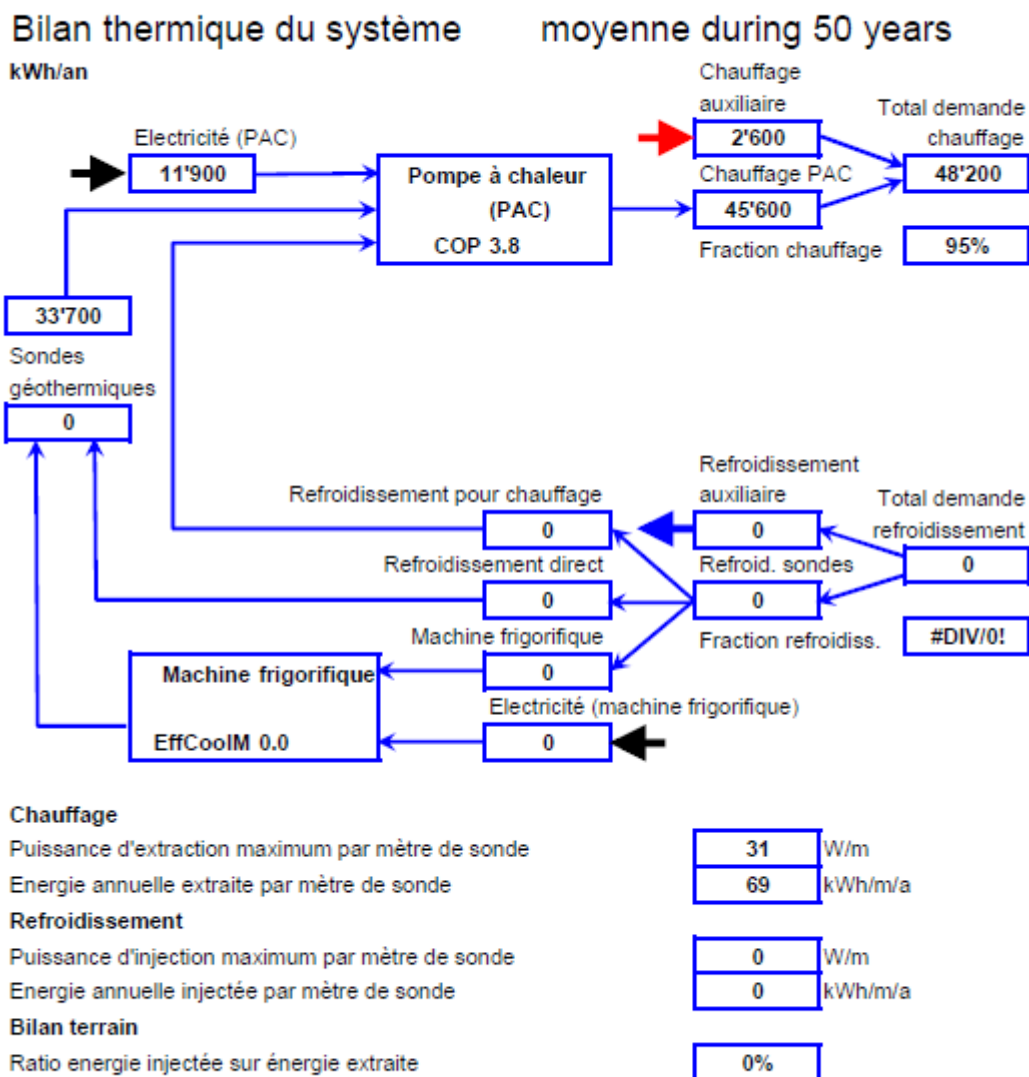


Figure 10: bilan thermique de la ferme Gallet, installation réalisée avec 4 sondes de 122 mètres chacune.

Le COP mesuré s'élève à 3.7. La différence entre les simulations et les mesures sont toujours inférieures à +/-1K pour les températures et à +/- 5% pour le COP.



Ensuite, nous avons simulé la même installation avec une seule sonde de 490 mètres de profondeur.

Pilesim2-get-output-Fr.xls

09.05.2012

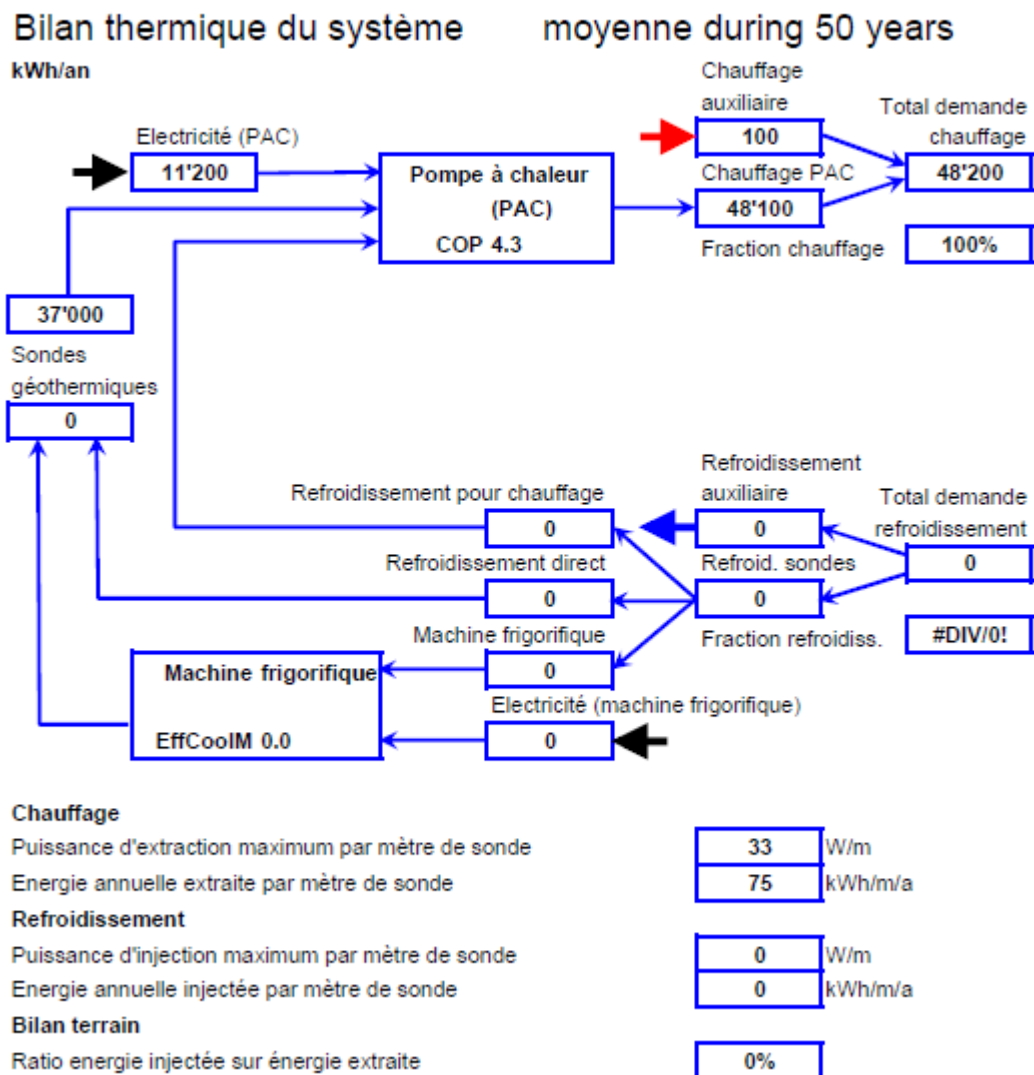


Figure 11: bilan thermique de la ferme Gallet, installation simulée avec 1 sonde de 490 mètres.

L'énergie thermique produite pour le bâtiment est la même que précédemment.



Pour la géologie, nous avons admis que la conductivité thermique du terrain restait la même. Cette hypothèse peut ne pas correspondre à des conditions réelles in situ mais présente l'avantage de rendre les variantes comparables entre elles. Seule l'influence de la température par la plus grande profondeur les distinguera.

Le coefficient de performance annuel moyen augmente à 4.3.

Puis nous avons simulé une variante intermédiaire avec 2 sondes de 245 mètres, le maximum que permettent les techniques les plus utilisées actuellement sur le marché.

Les résultats sont les suivants :

	4x122m	2x245	1x490
Chaleur produite (kWh)	48'200	48'000	48'100
Part au chauffage par la PAC (%)	100%	100%	100%
Energie prélevée sur la sonde (kWh)	35'500	36'000	37'000
COP annuel (-)	3.8	4.0	4.3

Tableau 5: cas 1, bilan énergétique et COP annuel simulés pour différentes profondeurs de sondes.

L'efficacité augmente avec la profondeur des sondes. L'énergie spécifique soutirée annuellement des sondes varie de 69 à 75kWh par mètre par an. Les courbes de températures en sortie de sonde sont stables sur 50 ans. Le système est bien en équilibre.

5.3. Cas 2 : manufacture horlogère

Le nouveau bâtiment de production de Patek Philippe SA à La Chaux-de-Fonds construit en 2008 a été équipé de deux pompes à chaleur de 80kW couplées à 19 sondes géothermiques de 150 mètres. Une chaudière à gaz assure l'appoint en hiver. A noter qu'il n'y a pas de recharge des sondes par free-cooling en été, l'installation fonctionne toujours en chauffage seul.



Figure 12: manufacture horlogère, bâtiment neuf à La Chaux-de-Fonds

L'installation actuelle en service a été simulée, puis plusieurs variantes avec des sondes plus profondes afin de quantifier l'évolution des performances avec l'augmentation de la profondeur des sondes.



Pilesim2-get-output-Fr.xls

09.05.2012

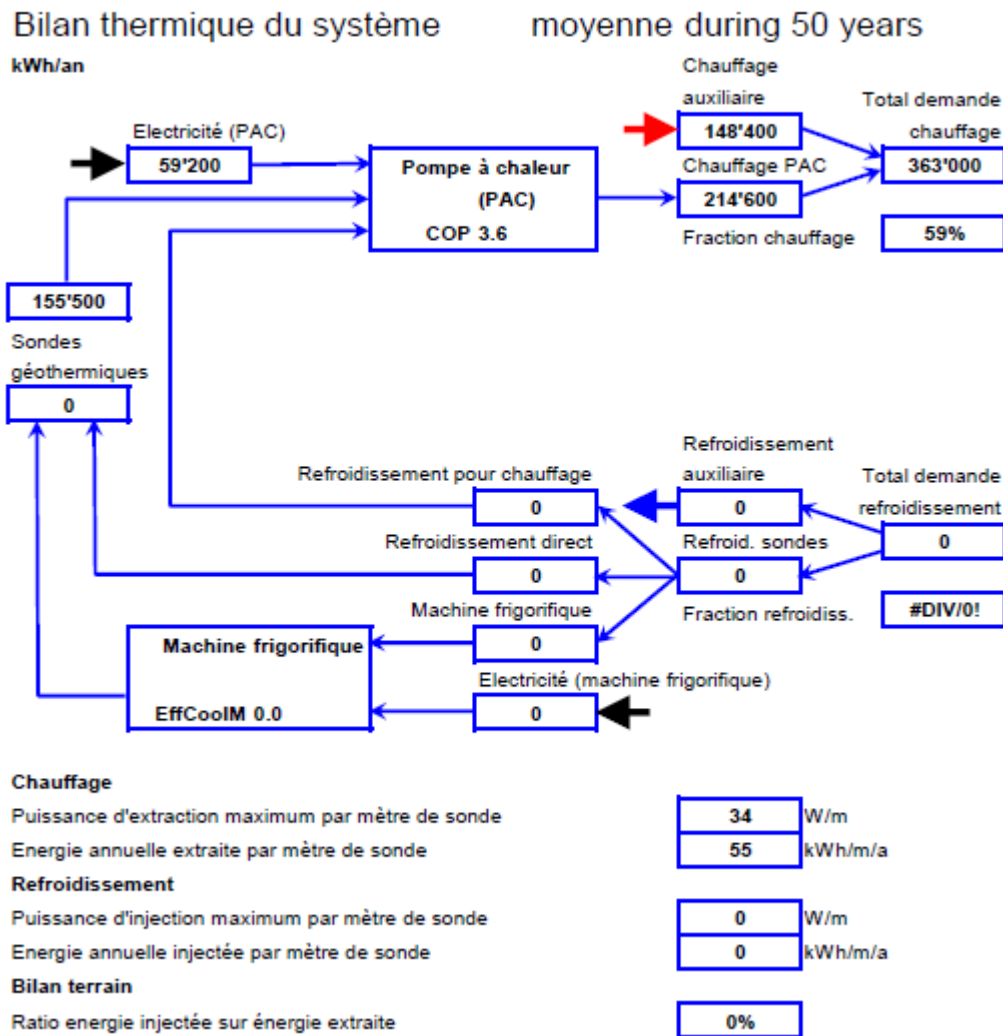


Figure 13: bilan thermique du cas 2, installation réalisée avec 19 sondes de 150 mètres chacune.

Le COP mesuré s'élève à 3.4. La différence entre les simulations et les mesures est toujours inférieure à +/-1K pour les températures et à +/- 5% pour le COP.



Pilesim2-get-output-Fr.xls

21.11.2012

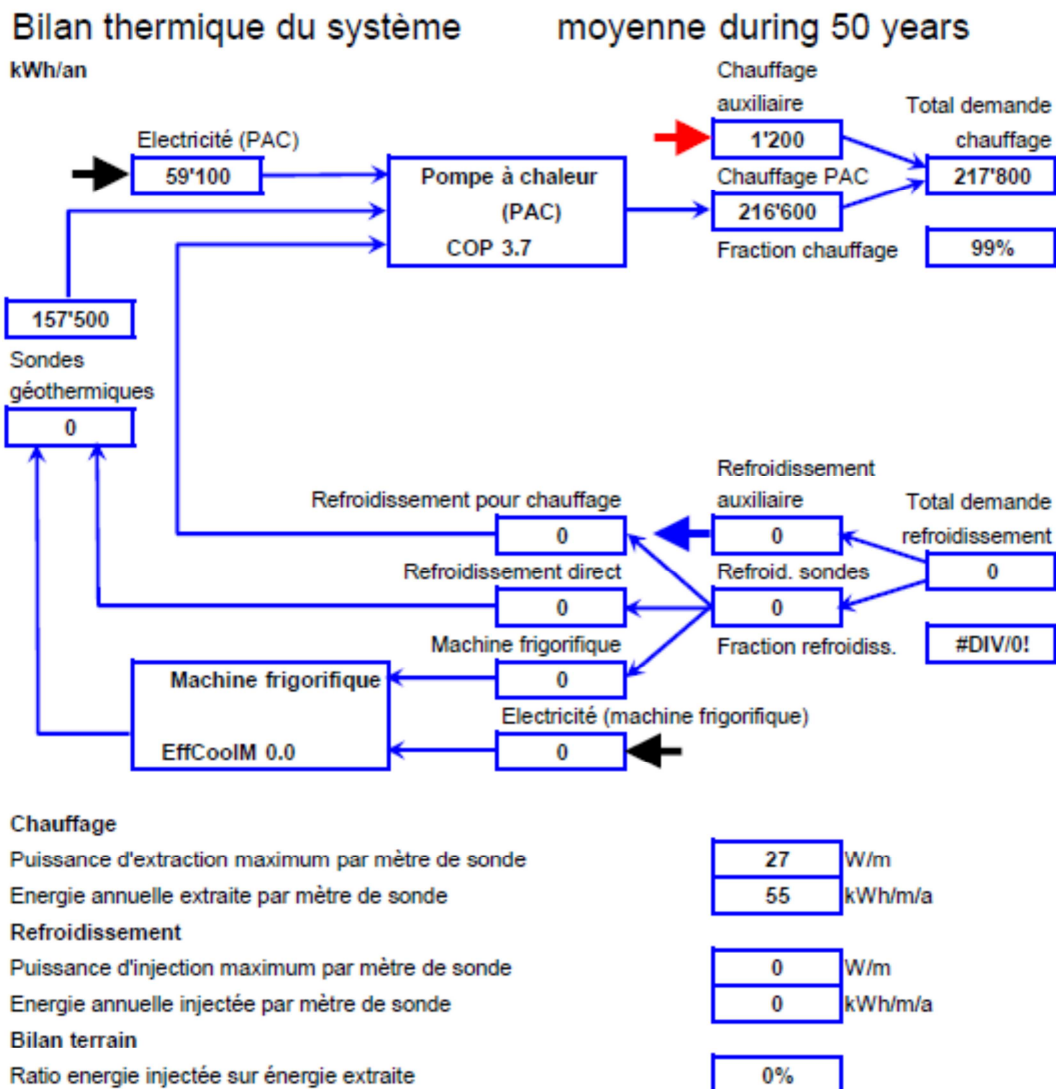


Figure 14: bilan thermique du cas 2, installation avec 12 sondes de 240 mètres chacune.



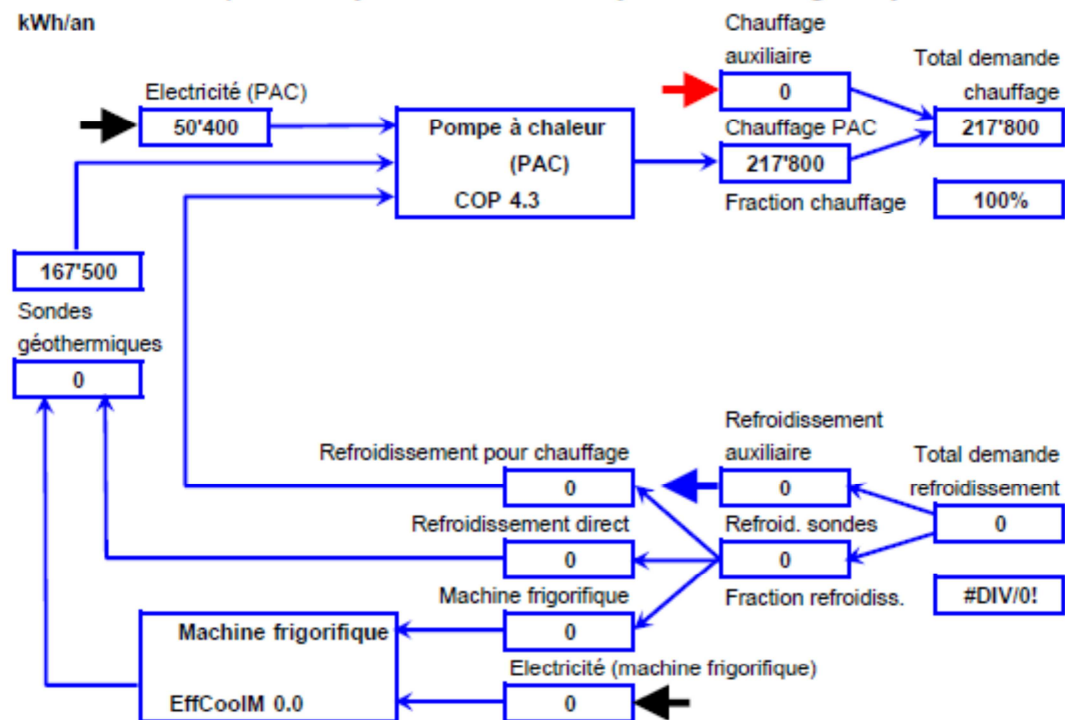
Pilesim2-get-output-Fr.xls

21.11.2012

Bilan thermique du système

moyenne during 50 years

kWh/an



Chauffage

Puissance d'extraction maximum par mètre de sonde

29 W/m

Energie annuelle extraite par mètre de sonde

60 kWh/m/a

Refroidissement

Puissance d'injection maximum par mètre de sonde

0 W/m

Energie annuelle injectée par mètre de sonde

0 kWh/m/a

Bilan terrain

Ratio energie injectée sur énergie extraite

0%

Figure 15: bilan thermique du cas 2, installation simulée avec 4 sondes de 700 mètres chacune.



La synthèse de variantes se présente comme suit:

Nombre et longueur de sonde	19x150m	12x240m	4x700
Chaleur produite (kWh)	214'000	216'600	217'800
Part au chauffage par la PAC (%)	60%	65%	65%
Energie prélevée sur la sonde (kWh)	155'500	157'500	167'500
COP annuel (-)	3.6	3.7	4.3

Tableau 6: bilan énergétique et COP annuel pour différentes profondeurs de sondes

La progression du COP annuel avec la grande profondeur est remarquable avec une élévation de 0.7.

5.4. Généralisation à toute la gamme de puissance

L'amélioration du COP annuel moyen a ensuite été calculée pour toute la gamme de puissance, de 50kW à 500kW. Avec un gradient géothermique moyen de 30K/kilomètre et des sondes à 800 mètres, l'élévation du COP annuel est de 0.8 +/-0.1.

6. Court-circuit thermique

Comme le montrent les résultats des 2 cas ci-dessus, le gain de température par une plus grande profondeur n'est pas pleinement exploité, l'augmentation d'efficacité reste en deçà des valeurs potentielles. C'est l'objet des chapitres suivants.

Ces valeurs mettent en évidence un phénomène connu (voir [6] et [7]) mais peu étudié de manière quantitative aux grandes profondeurs: le court-circuit thermique. Le fluide caloporteur qui remonte du pied de la sonde est plus chaud que le milieu environnant et une partie de l'énergie calorifique est ainsi dissipée. La température en sortie de sonde n'est pas aussi élevée que le gradient géothermique le promettait.



6.1. Cas 1, crèche pour enfants

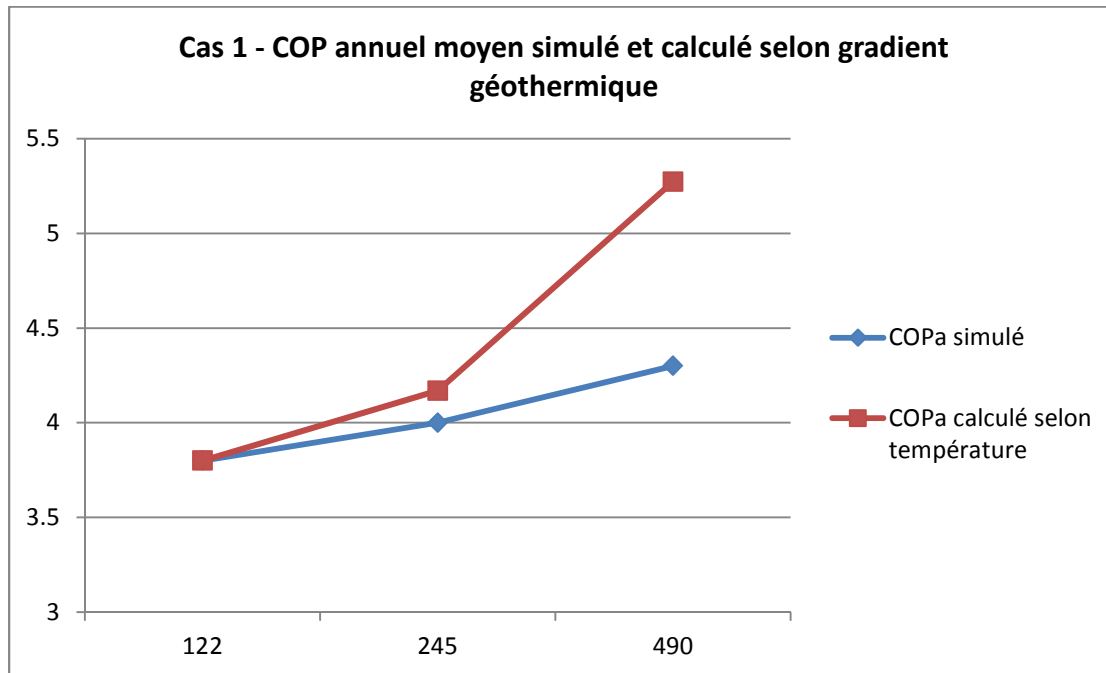


Figure 16: COPa simulé et calculé selon le gradient géothermique moyen de 30K par kilomètre.

L'accroissement du COP n'est pas proportionnel à l'élévation de température due au gradient géothermique.

En effet, avec le gradient thermique de 30K par kilomètre, la température autour de la sonde à 490 mètre devrait être de 11K plus élevée qu'à 122 mètres. Or, dans les pompes à chaleur actuellement disponibles sur le marché suisse, le COP progresse de 0.4 à 0.6 points par tranche de 5K (voir [12]). Donc dans notre cas, il devrait donc augmenter de 0.88 à 1.32 pour atteindre 4.68 à 5.12. Or il se situe à 4.3.

La raison est analysée en détail au chapitre 6.



6.2. Cas 2, manufacture horlogère

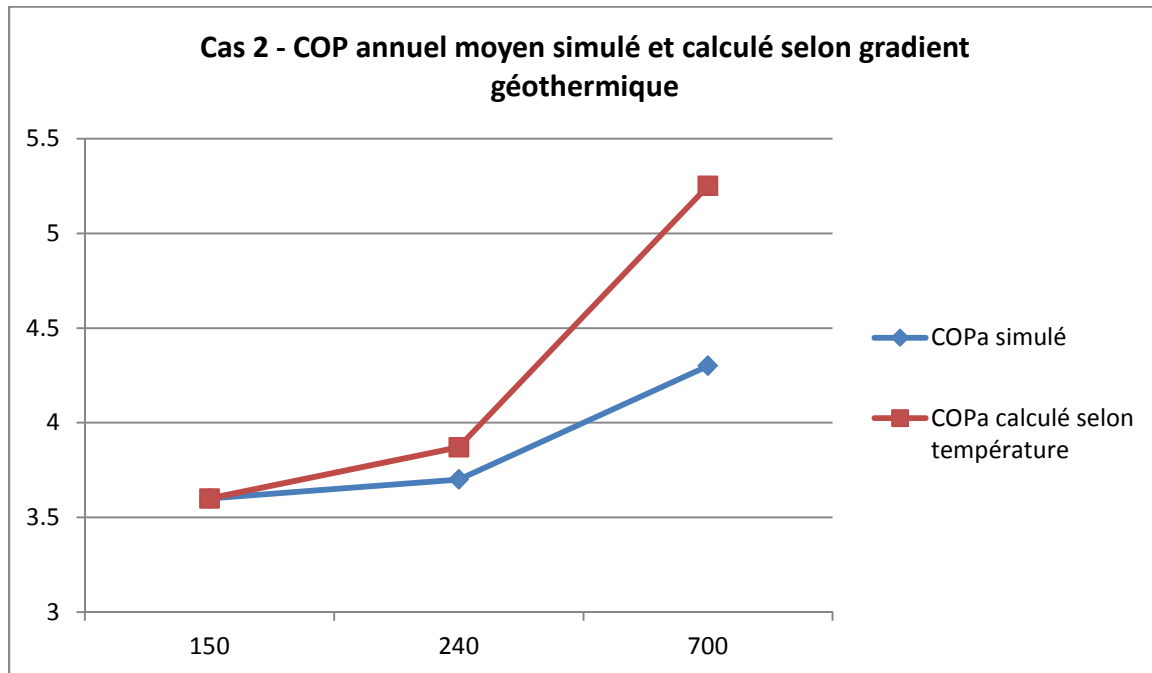


Figure 17: COPa simulé et calculé selon le gradient géothermique moyen de 30K par kilomètre.

Cependant, l'accroissement du COP n'est pas proportionnel à l'élévation de température due au gradient géothermique.

En effet, avec le gradient thermique de 30K par kilomètre, la température autour de la sonde à 700 mètres devrait être de 16K plus élevée qu'à 150 mètres. Le COP annuel devrait donc atteindre 5.25. Or il se situe à 4.3.

6.3. Site d'Oftringen

Le phénomène est clairement mis en évidence sur le site d'Oftringen. En effet, la température non perturbée en pied de sonde s'élève à 49°C. Cette valeur exceptionnellement élevée s'explique par un gradient géothermique particulièrement élevé à cet endroit : 60K par kilomètre, au lieu de 30K en moyenne suisse. Cette valeur élevée permet de mettre en évidence le phénomène.

La Figure 18 représente la température mesurée le long de la sonde au repos et les températures mesurées en exploitation.

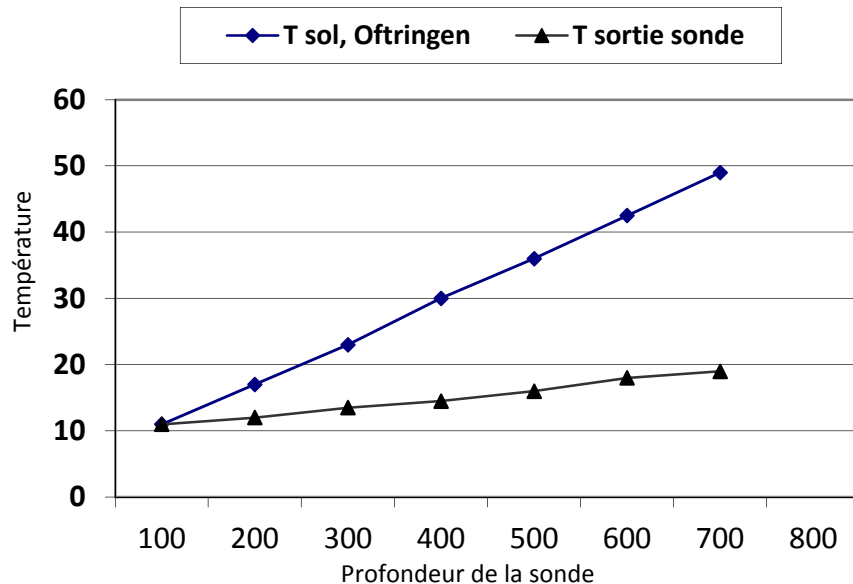


Figure 18: température à la sortie de la sonde à la surface et température du terrain en fonction de la profondeur, basée sur les mesures effectuées à Oftringen [5].

La température maximale en sortie de sonde atteint au maximum 19°C lors d'une charge de 20kW soit 28W/m. La différence de température sur la sonde s'élève à 8°C seulement. Vu le profil de température du terrain, on s'attend à des niveaux nettement plus élevés.

Grâce aux sondes de température disposées le long de la sonde, il est possible de constater l'évolution de la température du caloporteur lors de son parcours.

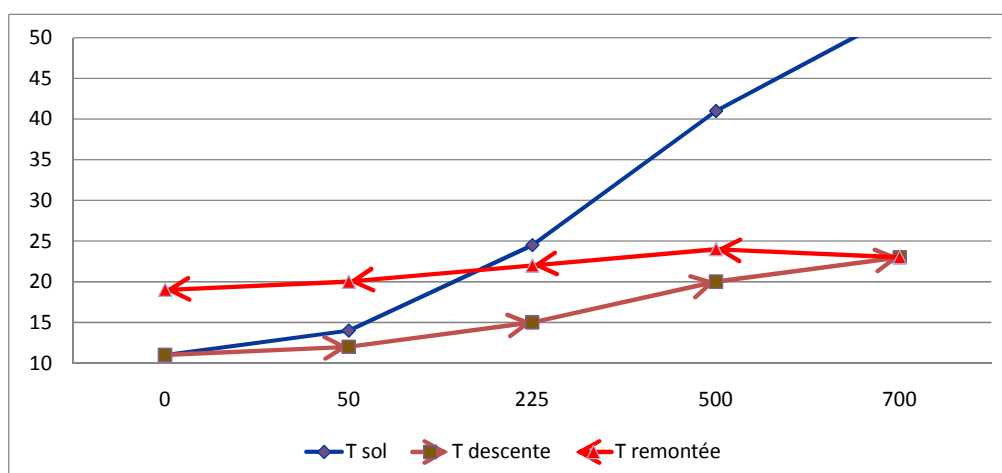


Figure 19: température de la sonde en fonction de la longueur développée de la sonde, en partant de la surface, exemple d'Oftringen. La puissance prélevée sur la sonde s'élève à 20 kW.



La température dans la sonde s'accroît en fonction de la profondeur. Passé le pied de sonde à 706 mètres, elle s'élève encore sur presque 200 mètres en remontant. Puis, deux échanges de chaleur successifs se produisent : d'abord l'eau qui remonte croise l'eau moins chaude qui descend, ensuite l'eau ascendante est plus chaude que le terrain alentours et lui redonne de l'énergie et se refroidit. Ainsi, arrivée à la surface après son parcours de 1400 mètres, l'eau est à 19°C seulement.

Le court-circuit thermique peut être diminué en posant une isolation autour des sondes sur les 100 à 200 mètres à partir de la surface, pour la sonde où le caloporteur remonte.

Ce phénomène a été constaté dans d'autres installations comme le montre la figure suivante.

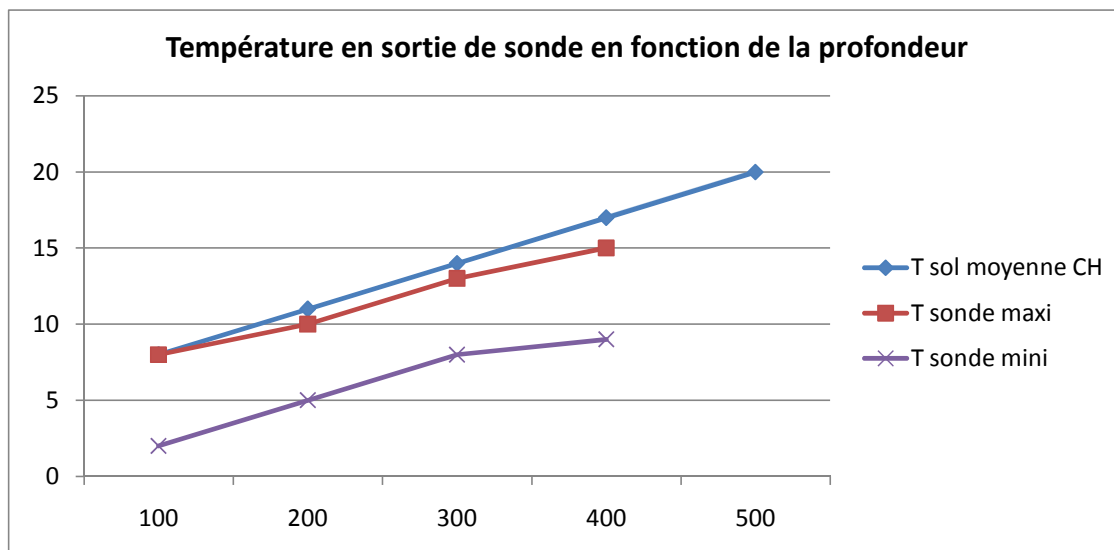


Figure 20: température moyenne du sol en Suisse, température maximale et minimale mesurée en sortie de sonde sur diverses installations en fonction de la profondeur de la (des) sonde(s).

Les valeurs nous ont été communiquées oralement car nombre d'installations sont mesurées pendant leur exploitation sans que des rapports publiés soient disponibles.

En extrapolant ces valeurs mesurées, la température en sortie de sonde pour une profondeur de 800 mètres vaut entre 11 et 18°C. Par contre, l'élévation de température par rapport à une profondeur de référence de 150 mètres vaut dans les deux cas 8K. L'amélioration correspondante du COP annuel moyen vaut, selon les machines, de 0.6 à 1.0, en tenant compte du remplacement de l'eau glycolée par de l'eau pure, ce qui réduit la puissance et l'énergie de pompage.

Dans le chapitre suivant, nous avons admis une amélioration du COP annuel de 0.8.



7. Investissements, coûts annuels, rentabilité

Le présent chapitre a pour objet de déterminer les éléments économiques suivants :

- effets sur les coûts dans l'investissement pour des forages profonds,
- effets sur les coûts d'exploitation du système complet,
- estimation des perspectives de rentabilité économique.

7.1. Sondes géothermiques

Les coûts d'investissement comprennent toute une série d'éléments dont le forage et la sonde ne sont qu'une partie. En l'absence de structure normée, nous avons regroupé les coûts selon les rubriques suivantes :

- forage et sondes. Ce montant divisé par la longueur des sondes indique le coût spécifique en CHF/mètre linéaire,
- installation du chantier, repliement du chantier, évacuation des boues, prélèvement d'échantillons, avis géologique, essais de mise en pression, assurance pour risque artésien,
- test de réponse,
- raccords de sondes aux collecteurs y compris fouilles,
- collecteurs,
- antigel (glycol).

7.2. Production de chaleur

En outre, nous avons inclus les coûts de l'installation de production de chaleur par la pompe à chaleur, à savoir :

- PAC,
- accumulateur,
- traitement d'eau,
- hydraulique entre les collecteurs des sondes, la PAC et l'accumulateur,
- montage.

Une éventuelle chaudière d'appoint n'est pas incluse. La distribution côté consommateurs de chaleur n'est pas prise en compte. Les autres coûts tels que benne et évacuation des boues, essai de pression sont inclus dans la rubrique forages et sondes.



Dans le cas de sondes profondes, nous avons admis que le circuit des sondes ne comportait que de l'eau sans antigel. Les conséquences sont :

- remplacer la PAC sol/eau par une PAC eau/eau,
- supprimer l'antigel,
- adapter la puissance de pompage du circuit des sondes.

Ces éléments influencent les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation.

7.3. Méthodologie - Calculs sur des cas réels

Comme l'estimation de coûts et surtout leur extrapolation à d'autres configurations de champ de sondes comporte un risque d'incertitude réel, nous avons procédé de la manière suivante.

7.3.1. Investissements

Nous avons relevé puis structuré les coûts d'installations réalisées et bien documentées. Puis nous avons calé notre modèle d'estimation des coûts sur ces installations. Les références sont les deux exemples d'installations citées précédemment: la crèche pour enfants et la manufacture horlogère et des informations obtenues auprès des entreprises de forages auditionnées dans le cadre de ce projet et de l'OFEN. Pour les autres puissances de bâtiment, nous avons procédé à nos propres estimations sur ces bases.

7.3.2. Coûts annuels

Ils comprennent les éléments suivants : énergie consommée, entretien et exploitation.

L'énergie consommée provient des calculs de performances et consommations du chapitre 4, en l'état, c'est-à-dire sans isolation supplémentaire de la partie haute des sondes.

Pour les annuités, nous avons admis un taux d'intérêt de 5% sur 20 ans. Les coûts annuels totaux sont la somme des annuités et des coûts d'exploitation.

Les simulations et extrapolations énergétiques des systèmes existants analysés ont été retranscrites en termes financiers. Les différents pôles de coûts annuels de tels projets ont été estimés avec les hypothèses citées.

C'est ici que se fait alors le lien entre les performances et les coûts, ce qui permet ensuite de conclure sur le surcoût de la géothermie profonde.

Un exemple détaillé avec tous les paramètres figure à l'annexe 15.6.

7.4. Cas 1 : ferme transformée en crèche pour enfants

Pour les coûts, les chiffres des décomptes finaux de l'installation réalisée ont été adaptés au cas d'une seule sonde de 490 mètres. Pour comparer avec la variante de référence, deux coûts extrêmes ont été admis pour les sondes à savoir le même que pour la variante de



base et le maximum possible pour arriver aux mêmes coûts annuels que la variante de référence. Ces différentes variantes sont récapitulées dans le tableau suivant :

	4x122m Sonde à 75.-/m	1x490 Sonde à 75.-/m	1x490 Sonde à 120.-/m
Production de chaleur selon 7.2	47'000.-	43'000.-	43'000.-
Sondes géothermiques selon 7.1	71'000.-	65'000.-	84'000.-
Coûts annuels :	13'000.-	11'500.-	13'000.-
Annuités	9'500.-	8'500.-	10'000.-
Entretien	1'000.-	1'000.-	1'000.-
Energie	2'500.-	2'000.-	2'000.-

Tableau 7: investissements et coûts annuels, regroupés par rubriques principales pour 4 sondes à 122 mètres chacune ou pour 1 sonde à 490 mètres.

Au prix des 4 sondes à 122 mètres, la variante à 490 mètres présente une économie annuelle de CHF 1'500.- soit 11% des coûts annuels.

Le surcoût amortissable correspond à un prix maximal du mètre de sonde de CHF 120.- par mètre linéaire.

Dans ce cas particulier, le placement des sondes autour du bâtiment existant et leurs liaisons ont posé de sérieux problèmes de planification : obstacles, accès, végétation (arbres). La solution avec une seule sonde aurait été bien plus facile à planifier et à réaliser.

7.5. Cas 2 : manufacture horlogère

La progression du COP annuel avec la grande profondeur est remarquable. Elle se répercute directement sur les coûts, comme le montre le tableau 5.

	19x150m Sonde à 65.-/m	4x700m Sonde à 65.-/m	4x700m Sonde à 95.-/m
Production de chaleur selon 7.2	192'000.-	185'000.-	185'000.-
Sondes géothermiques selon 7.1	262'000.-	240'000.-	325'000.-
Coûts annuels :	57'000.-	51'000.-	57'000.-
Annuités	36'000.-	34'000.-	41'000.-
Entretien	1'000.-	1'000.-	1'000.-
Energie	20'000.-	16'000.-	16'000.-

Tableau 8: investissements et coûts annuels, regroupés par rubriques principales, et coûts annuels.



Dans les différences de coûts, les éléments suivants sont en faveur des sondes profondes :

- l'amélioration du COP annuel donc la réduction des coûts de l'énergie,
- la réduction des liaisons entre sondes et des collecteurs,
- la pompe à chaleur eau/eau de puissance électrique moindre.

Néanmoins, voici les surcoûts principaux :

- mise en place de la zone de forage plus longue,
- torche plus grande.

Au prix des 19 sondes à 150 mètres, la variante avec 4 sondes de 700 mètres présente une économie annuelle de CHF 5'000.- soit 9% des coûts annuels.

Le prix maximal du mètre de sonde pour une parité des coûts annuels est de CHF 95.- par mètre.

Enfin, à parité de coûts annuels, il reste l'avantage de la réduction du champ de sondes de 19 unités à 3, ce qui peut être décisif dans bien des projets. Dans ce projet, il a été très difficile de placer les 19 sondes sur la parcelle avec les distances minimales suffisantes entre les sondes. Cet élément a bien failli compromettre la solution avec pompe à chaleur.

Dans ce type d'installation, les sondes peuvent être utilisées pour le rafraîchissement pendant l'été. Comme cité précédemment, ce mode de fonctionnement ne serait pas possible avec des forages profonds.

Il serait nécessaire d'installer un groupe de production de froid, générant un surcoût d'investissement, mais également une surconsommation d'électricité. Le bilan est clairement péjoré comme le montre le tableau suivant.

	19x150m Sonde à 65.-/m	4x700m Sonde à 65.-/m	4x700m Sonde à 95.-/m
Production de chaleur selon 7.2	192'000.-	185'000.-	185'000.-
Sondes géothermiques selon 7.1	262'000.-	240'000.-	325'000.-
Coûts annuels :	60'000.-	61'000.-	74'000.-
Annuités	36'000.-	34'000.-	41'000.-
Entretien	1'000.-	1'000.-	1'000.-
Energie	23'000.-	26'000.-	32'000.-

Tableau 9: investissements, regroupés par rubriques principales, et coûts annuels si besoins de froid pour le bâtiment.

Nous avons admis des besoins de froid équivalent à la moitié de l'énergie soutirée par année du champ de sondes pour le chauffage. La plus grande profondeur, donc la température la plus élevée dans le circuit des sondes, réduit considérablement l'énergie de refroidissement utilisable en mode geocooling. Le temps de production de froid actif augmente en conséquence, la consommation d'électricité aussi.



Même dans l'hypothèse optimiste de sondes profondes à CHF 65.- le mètre, le bilan global est ainsi péjoré tant que la solution de base à 150 mètres de profondeur serait la plus favorable.

7.6. Investissements pour des bâtiments de 50 à 500kW

Sur la base des exemples précédents, nous avons estimé les coûts pour des bâtiments de puissance thermique de 50 à 500kW et obtenons les montants suivants :

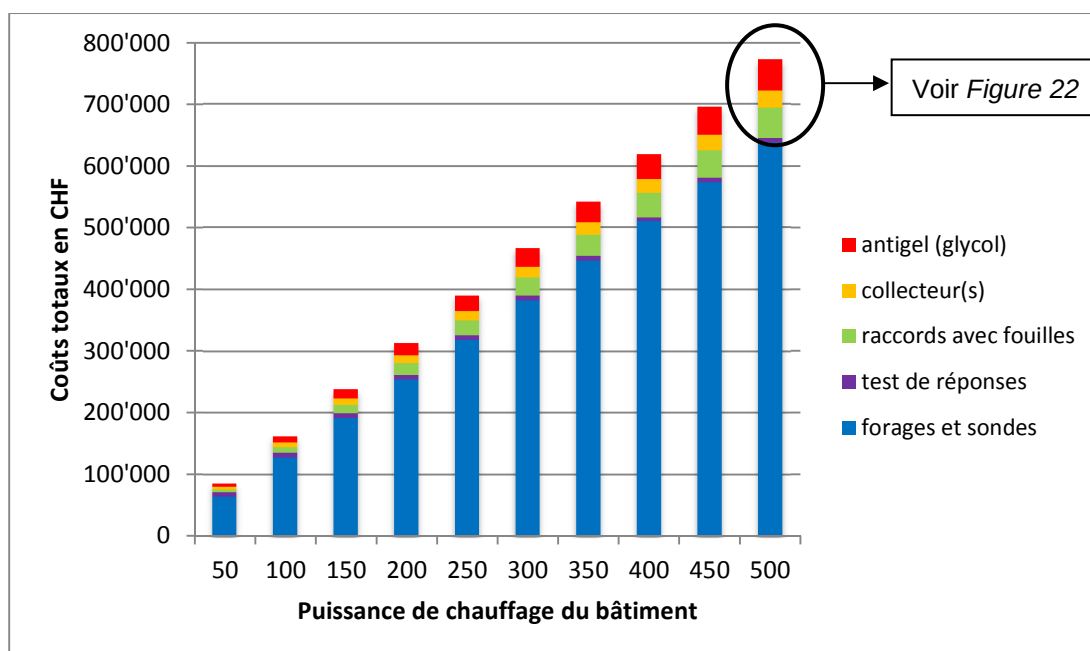


Figure 21: estimatif d'investissements totaux pour la source de chaleur complète jusqu'à l'entrée de la pompe à chaleur, pour des puissances de chauffage de 50 à 500kW

Le forage constitue l'essentiel des coûts. Cependant, les coûts dits annexes ne sont pas négligeables comme le montre la figure suivante.

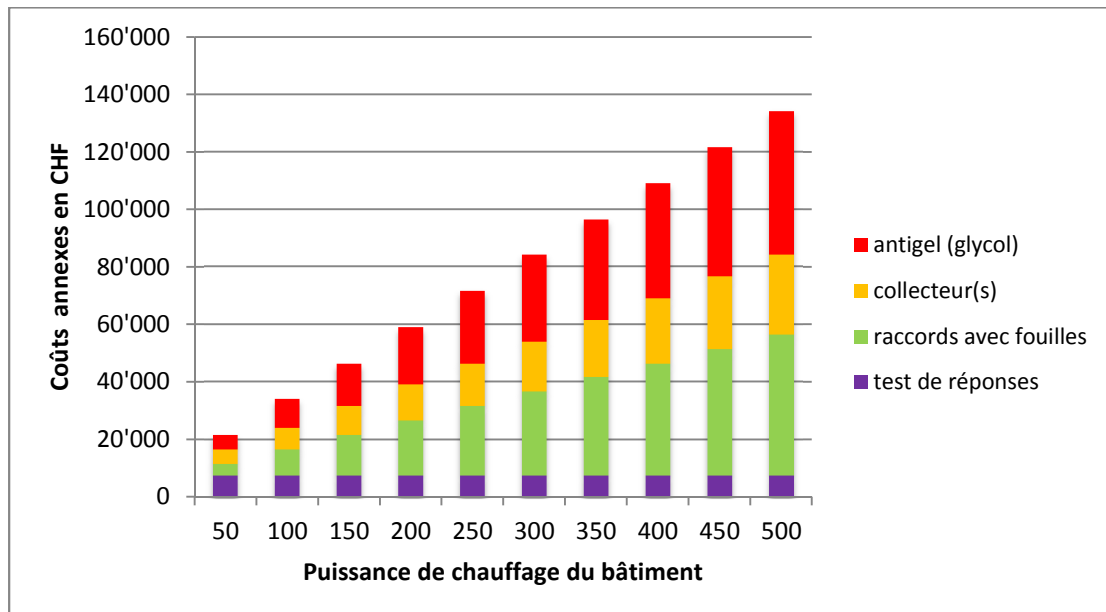


Figure 22: détail des coûts annexes des estimatifs d'investissement.

7.7. Seuil de rentabilité pour des bâtiments de 50 à 500kW

Afin de cerner l'objectif des coûts à atteindre, il convient de considérer l'ensemble des aspects économiques d'une installation, à savoir:

- investissements,
- intérêt et amortissement,
- énergie et entretien.

En effet, la mise en œuvre de sondes géothermiques de grandes profondeurs implique des surcoûts et des gains. Les surcoûts sont :

- coût du forage profond plus élevé par mètre foré,
- engins de forage plus puissants,
- sonde en matériau plus résistant.

Les économies réalisées proviennent de :

- pas d'antigel à mettre dans le circuit des sondes,
- moins d'énergie de pompage,
- coefficient de performance plus élevé grâce à la température plus élevée,
- pompe à chaleur plus petite (COP plus élevé, donc puissance électrique plus petite à puissance thermique égale),
- moins de fouilles, de raccords et de collecteurs pour les sondes.



On peut facilement remarquer ces économies, dès l'investissement, en observant la figure suivante. Les coûts annexes sont ainsi bien inférieurs pour des forages classiques.

Ils comprennent :

- le test de réponse thermique,
- les raccords sondes-collecteurs avec fouilles,
- les collecteurs,
- l'antigel.

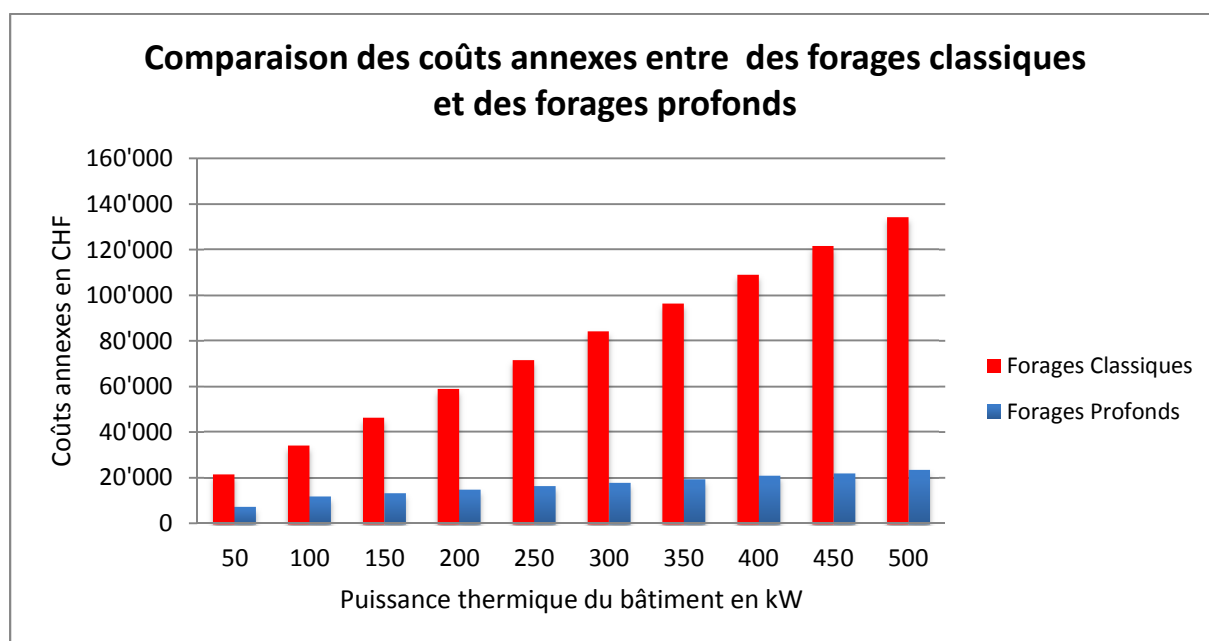


Figure 23: comparaison des coûts annexes entre forage classique à 150 m et profond à 750m.

Le gain sur les coûts d'investissement annexes peut être exprimé en coûts annuels (annuités). L'augmentation du COP annuel réduira les coûts annuels d'électricité. Additionnés, nous obtenons la réduction de coûts annuels par des sondes profondes.

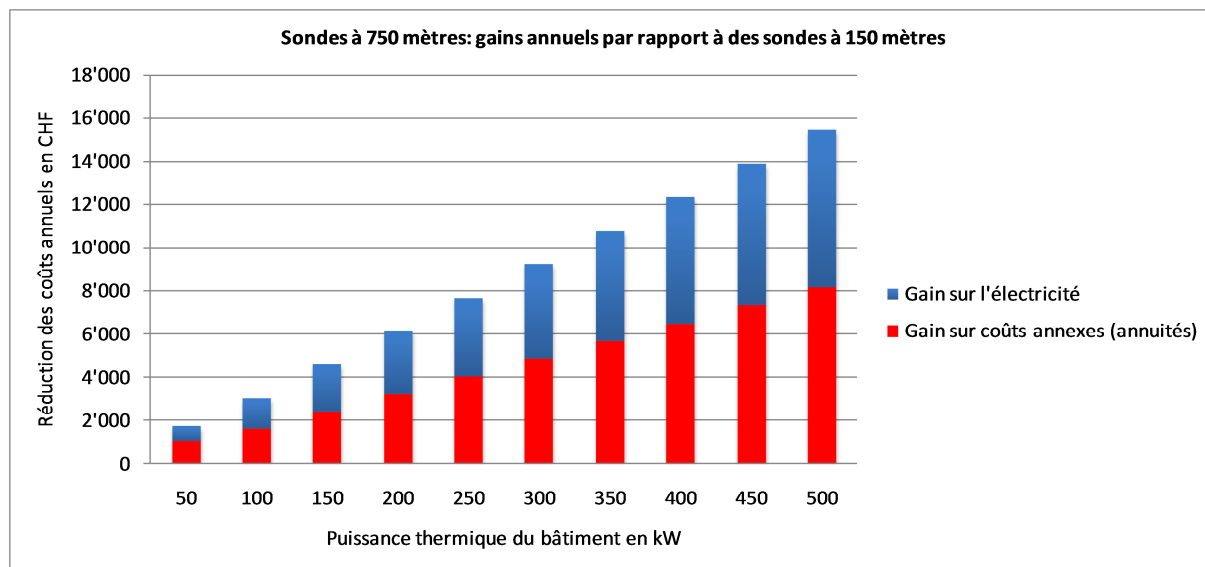


Figure 24: réduction des coûts annuels par les gains sur les coûts annexes et la consommation d'électricité.

La somme des réductions des coûts annuels possibles peut ainsi être exprimée en un investissement supplémentaire amortissable pour les forages profonds. En admettant 4% d'intérêts sur 20 ans, nous obtenons les surcoûts absolus et spécifiques suivants:

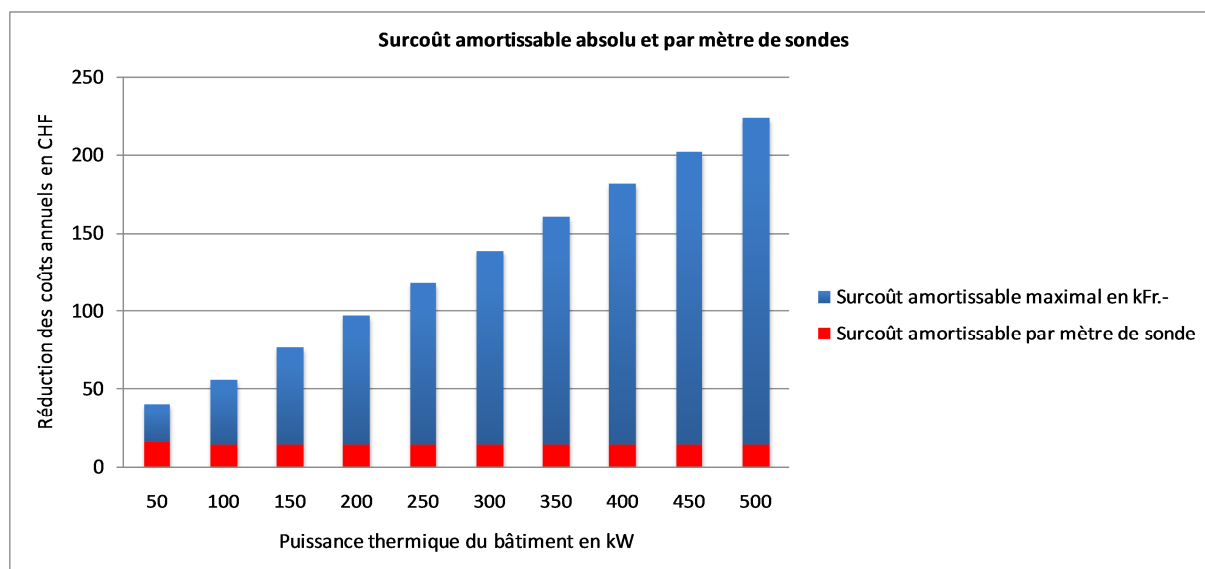


Figure 25: surcoût amortissable maximal et spécifique (par mètre de sonde) pour des sondes à 750 m au lieu de 150 m.

Le surcoût amortissable par mètre de sonde s'élève à CHF 14.- environ. Le prix de référence étant de CHF 85.- par mètre, le coût spécifique maximal s'établit à environ CHF 100.- Une variation de 10% du tarif électrique moyen influence le surcoût de 5%.



7.8. Utilisation de la sonde pour le rafraîchissement en été

Réaliser des forages géothermiques profonds amène également un inconvénient par rapport aux forages classiques : dans les projets où la profondeur n'excède pas 150 à 200 mètres, il est possible en été de rafraîchir les bâtiments, le sol étant plus froid que l'air ambiant. Dans ce cas, la pompe à chaleur est arrêtée. On parle alors de geocooling.

En atteignant des profondeurs plus importantes, la température du sol n'est plus significativement « froide ». Le rafraîchissement estival n'est donc pas possible.

Il est nécessaire d'implanter un matériel supplémentaire. Les systèmes les plus modernes de refroidissement tolèrent certes des températures de fonctionnement toujours plus élevées, mais la source froide doit se situer en-dessous de 14°C pour qu'ils fonctionnent.

Une solution pour remédier à cela consisterait à implanter une deuxième sonde en U qui serait à une profondeur moins importante (maximum 150m). Elle pourrait s'implanter dans le même forage que celui accueillant la sonde profonde, qui devra néanmoins être de diamètre plus important. Il est également envisageable de créer un autre forage qui sera spécialement dédié au rafraîchissement estival.

Les autres solutions pour obtenir du froid l'été, se rapprochent de techniques classiques à savoir l'implantation d'un groupe froid supplémentaire.

Ces solutions engagent cependant inévitablement des surcoûts. Si à faible profondeur, il était possible de rafraîchir l'été simplement en contournant la pompe à chaleur, les grandes profondeurs impliquent un matériel tiers. De plus, la production de froid par un groupe frigorifique amènera une consommation d'électricité supplémentaire importante.

Le gain énergétique et économique lié à la géothermie profonde se voit dans ce cas fortement pénalisé. Dans notre cas 2, les intérêts et amortissement augmentent de 14% et les coûts annuels de l'électricité de 39%.

En conclusion, les sondes de plus de 200 mètres de profondeur ne sont pas adaptées au geocooling.



8. Aquifères profonds

Aux profondeurs envisagées jusqu'ici, il est également possible d'utiliser l'eau présente dans des aquifères à ces profondeurs. L'avantage réside dans l'absence de court-circuit thermique puisque l'eau est captée à son gisement et transportée vers la surface.

Les coûts en fonction de la profondeur se présentent de la manière suivante :

Profondeur	500	550	600	650	700	750	800
Reconnaissance	160'000	160'000	160'000	160'000	160'000	160'000	160'000
Forage	1'800'000	1'980'000	2'160'000	2'340'000	2'520'000	2'700'000	2'880'000
Équipement	200'000	220'000	240'000	260'000	280'000	300'000	320'000
Développement	150'000	150'000	150'000	150'000	150'000	150'000	150'000
Essais	300'000	300'000	300'000	300'000	300'000	300'000	300'000
Total	2'610'000	2'810'000	3'010'000	3'210'000	3'410'000	3'610'000	3'810'000

Tableau 10: coûts pour 2 forages (captage et restitution) sur aquifère profond.

L'utilisation d'aquifères comporte une caractéristique très différente des champs de sonde : la puissance récupérée ne dépend pas de la profondeur du forage mais du débit d'eau disponible. La température de l'eau l'influence aussi mais dans une moindre mesure : elle peut varier d'un facteur 1 à 3 alors que le débit peut différer d'un facteur 1 à 20. La prévision du débit effectivement disponible est actuellement impossible.

A titre de comparaison, le coût complet pour utiliser un aquifère à 800 mètres de profondeur correspond à environ 40'000 mètres de sondes. Pour que l'investissement soit compétitif, il faut que la puissance extraite soit au moins identique. En admettant une puissance spécifique de 25 W/m pour les sondes et une différence de température tolérée sur l'aquifère de 3K, le débit minimal devrait atteindre 75 kg/s ou 272 m³/h.

Si la température est assez élevée, il est possible de se passer de pompe à chaleur ce qui compense partiellement les surcoûts.

L'utilisation d'aquifères profonds reste donc une technique très risquée, à mettre en œuvre uniquement dans des zones géologiques particulières et connues. En l'absence de couverture du risque, elle est économiquement difficilement viable.



9. Nappe phréatique proche de la surface

Dernière source d'énergie utilisable : la nappe phréatique proche de la surface. Contrairement à l'aquifère profond, la présence d'eau de nappe est soit connue soit facilement déterminée par forage et essai de pompage.

Les profondeurs usuelles sont de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Si la protection des eaux le permet, l'usage de la nappe phréatique combine les avantages de la faible profondeur donc des coûts de captage réduits avec de bonnes performances de la pompe à chaleur.

Nous avons estimé les coûts de captage et d'utilisation de la nappe phréatique pour la gamme de puissance thermiques de bâtiments de 50 à 500kW.

Coûts forage nappe

etude préliminaire	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000
forage + tuyau du puit	13'500	13'500	13'500	13'500	13'500	13'500	13'500	13'500	13'500	13'500
location pompe essai	1'400	1'400	1'400	1'400	1'400	1'400	1'400	1'400	1'400	1'400
installation chantier	2'600	2'600	2'600	2'600	2'600	2'600	2'600	2'600	2'600	2'600
tuyaux raccordement pompe	2'000	2'000	2'000	2'000	2'000	2'000	2'000	2'000	2'000	2'000
pompe	4'000	4'000	8'000	8'000	12'000	12'000	16'000	16'000	20'000	20'000
tuyaux en surface posés+fouille	12'000	12'000	14'000	14'000	16'000	16'000	18'000	18'000	20'000	20'000
chambres haut de puit (2)	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000
échangeur eau/eau	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000
filtre (selon qualité de l'eau nappe)	17'000	28'000	28'000	32'000	32'000	32'000	32'000	32'000	32'000	32'000
Circuit intermédiaire	19'500	30'000	45'000	60'000	75'000	90'000	105'000	120'000	135'000	150'000
Total	92'000	113'500	134'500	153'500	174'500	189'500	210'500	225'500	246'500	261'500

Tableau 11: coûts pour captage dans nappe phréatique.

Ces coûts sont nettement supérieurs aux coûts des sondes profondes, même dans l'hypothèse des coûts actuels :

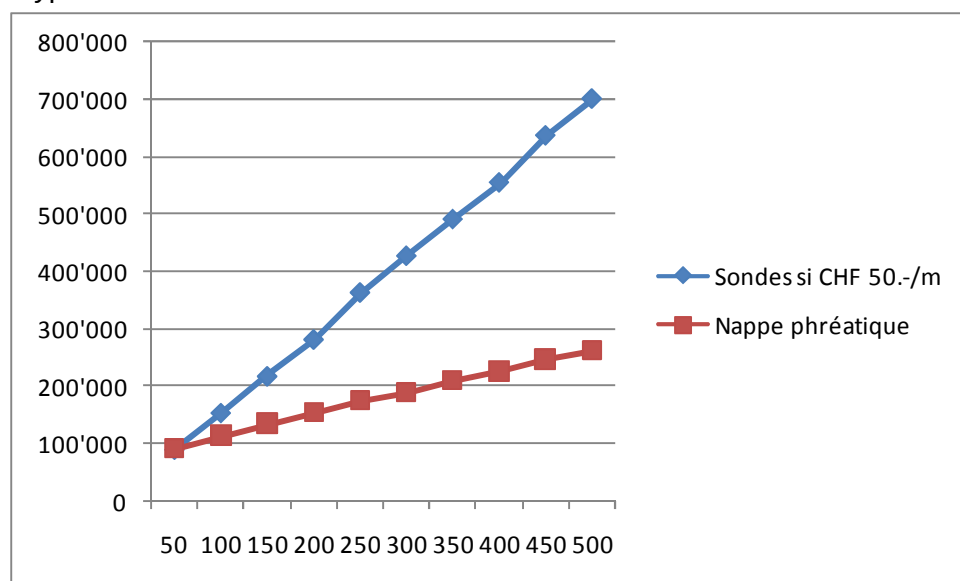


Figure 26: coûts d'investissement comparés de sondes profondes avec forage et sondes au prix très bas de CHF 50.- par mètre et captage dans nappe phréatique peu profonde. Hypothèses détaillées en annexe.



10. Conclusions

10.1. Choix du système

Dans tous les cas, la nappe phréatique proche de la surface constitue la solution la plus avantageuse, à condition que :

- elle soit présente à proximité du bâtiment à chauffer,
- son utilisation n'est pas restreinte par la protection des eaux,
- le débit est suffisant,
- les propriétés physico-chimiques de l'eau (notamment pH, présence de métaux, particules solides en suspension) conviennent à une utilisation par pompe à chaleur.

10.2. Profondeur optimale avec les techniques actuelles

L'objectif de coût maximal de CHF 80 à 100.- par mètre selon la Figure 25: *surcoût amortissable maximal et spécifique (par mètre de sonde) pour des sondes à 750 m au lieu de 150 m.* est certes ambitieux mais envisageable au stade actuel de la technique. Si la géologie est favorable, il est tout à fait réaliste. Par contre, si des problèmes géologiques surviennent, les coûts de forage peuvent atteindre CHF 300 à 500.- par mètre, compromettant le projet. Une connaissance détaillée de la géologie est donc indispensable.

Avec les techniques actuelles (sonde en U de 32, 40 ou 50mm), en l'état, le système optimal comporte les caractéristiques suivantes :

- profondeur maximale de 200 à 250 mètres,
- court-circuit thermique réduit par l'isolation du tube remontant, sur environ 100 mètres,
- utilisation limitée en geocooling.

10.3. Développements pour les grandes profondeurs

Au-delà de 250 mètres de profondeur, les techniques de forages et de sondes actuelles comportent des risques de rupture à ne pas négliger. Des développements techniques sont nécessaires. De nos contacts et réflexions, nous proposons les pistes suivantes :

- développer des sondes en double-U souples, résistantes à la pression et faiblement plus chères,
- développer un système coaxial plutôt qu'en double-U, avec la sonde intérieure en matériau isolant pour éviter le court-circuit thermique,
- la paroi extérieure devra alors être suffisamment souple pour être déroulée afin d'assurer des coûts de pose concurrentiels et surtout éviter des soudures,
- idéalement, la paroi extérieure s'adapte au terrain lors de la mise en eau. Il s'agirait alors plus d'un tissu ou d'une matière souple plutôt que d'un tube.



11. Perspectives

Lors de la correction du présent rapport, l'entreprise REHAU annonçait la mise sur le marché d'une sonde géothermique capable de résister à une pression de 100 bars et à une température maximale de 95°C. Sa mise en œuvre se présente comme celle d'une sonde classique actuelle. Elle est disponible en diamètres 40, 50 et 63mm.

Pour la résolution du court-circuit thermique, aucune solution standard n'est proposée actuellement. Il y a urgence de développement.

Si la température en sortie de sonde devait correspondre au maximum du potentiel donné par le gradient géothermique, il faudrait adapter les pompes à chaleur à des températures d'entrée de source froide de plus de 20°C.

Pour abaisser les coûts des systèmes à forages profonds, une voie consiste à se passer de pompe à chaleur, au moins pour du chauffage à basse température. Pour que cela soit possible, il faut soit se trouver dans une zone d'anomalie géologique (par exemple le site d'Oftringen avec un gradient géothermique de 60 K/km) soit forer à environ 1'000 mètres et poser une sonde ad hoc.



12. Table des illustrations

Figure 1: répartition par puissance des pompes à chaleur installées en Suisse en 2011. Source : GSP.	7
Figure 3: récapitulatif des techniques de forage et leurs caractéristiques selon la profondeur	14
Figure 4: coupe transversale simplifiée de la Suisse, du Jura aux Préalpes en passant par le Bassin molassique, modifiée d'après BERGER (1989) et SOMMARUGA (1997) (source: Impact-Concept SA)	15
Figure 5: température du sous-sol mesurée en forage (source : Université du Michigan, Laboratoire de géothermie)	18
Figure 6: température des eaux souterraines mesurée sur quelques forages en Suisse (données MFR) et en France (données BRGM) et gradient géothermique moyen	19
Figure 7: coupe géologique Oftringen (EBERHARD & Partner AG, 2010) et coupe géologique simplifiée pour PILESIM	21
Figure 8: exemple de schéma de simulation d'Oftringen à 20kW et débit 2.5m ³ /h avec le logiciel PILESIM.	23
Figure 9: ancienne ferme rénovée et transformée en crèche pour enfants à La Chaux-de-Fonds.	26
Figure 10: bilan thermique de la ferme Gallet, installation réalisée avec 4 sondes de 122 mètres chacune.	27
Figure 11: bilan thermique de la ferme Gallet, installation simulée avec 1 sonde de 490 mètres.	28
Figure 12: manufacture horlogère, bâtiment neuf à La Chaux-de-Fonds	30
Figure 13: bilan thermique du cas 2, installation réalisée avec 19 sondes de 150 mètres chacune.	31
Figure 14: bilan thermique du cas 2, installation avec 12 sondes de 240 mètres chacune.	32
Figure 15: bilan thermique du cas 2, installation simulée avec 4 sondes de 700 mètres chacune.	33
Figure 16: COPa simulé et calculé selon le gradient géothermique moyen de 30K par kilomètre.	35
Figure 17: COPa simulé et calculé selon le gradient géothermique moyen de 30K par kilomètre.	36
Figure 18: température à la sortie de la sonde à la surface et température du terrain en fonction de la profondeur, basée sur les mesures effectuées à Oftringen [5].	37
Figure 19: température de la sonde en fonction de la longueur développée de la sonde, en partant de la surface, exemple d'Oftringen. La puissance prélevée sur la sonde s'élève à 20 kW.	37
Figure 20: température moyenne du sol en Suisse, température maximale et minimale mesurée en sortie de sonde sur diverses installations en fonction de la profondeur de la (des) sonde(s).	38
Figure 21: estimatif d'investissements totaux pour la source de chaleur complète jusqu'à l'entrée de la pompe à chaleur, pour des puissances de chauffage de 50 à 500kW	43
Figure 22: détail des coûts annexes des estimatifs d'investissement.	44
Figure 23: comparaison des coûts annexes entre forage classique à 150 m et profond à 750m.	45
Figure 24: réduction des coûts annuels par les gains sur les coûts annexes et la consommation d'électricité.	46
Figure 25: surcoût amortissable maximal et spécifique (par mètre de sonde) pour des sondes à 750 m au lieu de 150 m.	46
Figure 26: coûts d'investissement comparés de sondes profondes avec forage et sondes au prix très bas de CHF 50.- par mètre et captage dans nappe phréatique peu profonde. Hypothèses détaillées en annexe.	49



13. Abréviations

- COP Coefficient de performance
- COPa Coefficient de performance annuel moyen
- CHF Francs suisses
- DN diamètre nominal
- K Kelvin
- kFr.- milliers de Francs
- kW Kilowatt
- m mètre
- mm millimètre
- PAC pompe à chaleur
- PE polyéthylène, matière plastique des sondes géothermiques
- PN pression nominale
- T température
- W Watt



14. Références bibliographiques

- [1] Utilisation de la géothermie profonde pour le chauffage de grands bâtiments avec des pompes à chaleur à très haute performance, Impact-Concept SA, Le Mont-sur-Lausanne, 2010
- [2] L'utilisation de la chaleur terrestre, Aperçu, technologies, visions, OFEN, Berne, 2006, réf. 805016f
- [3] Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel, PGN, CREGE, 2008
- [4] borehole temperatures and climate reconstruction, initiated by the International Heat Flow Commission of IASPEI, and implemented by the Geothermal Laboratory of the University of Michigan, USA, <http://www.earth.lsa.umich.edu/climate/index.html>
- [5] EBERHARD & Partner AG. Tiefen-EWS Oftringen (706 m): Direktheizen mit einer 40-mm-2-Kreis PE-Tiefen-Erdwärmesonde, – Bestimmung und Interpretation der thermodynamischen Eigenschaften bei variierenden Durchflussraten und Entzugsleistungen, BFE, Bern, 2010.
- [6] EBERHARD & Partner AG (2003). Wirtschaftlichkeitsermittlung einer Sondenisolation im obersten Abschnitt einer Erdwärmesondenanlage, Otelfingen ZH. Projekt-Nr. 30'603, Forschungsauftrag für das Bundesamt für Energie, Bern, 2003.
- [7] EBERHARD & Partner AG (2004). Isolation von Erdwärmesonden – Zusammenstellung von bisherigen Erfahrungen. Projekt-Nr. 100'465, Forschungsauftrag für das Bundesamt für Energie, Bern, 2004.
- [8] PILESIM2 – Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Energy Piles or Multiple Borehole Heat Exchangers, User Manual, Dr. Daniel Pahud, Institute for Applied Sustainability to the Built Environment, SUPSI, Lugano, 2007
- [9] Référence de la pompe à chaleur de Patek Philipe: Carrier 159kW (30RW135)
- [10] Référence de la pompe à chaleur de la ferme Gallet : Ecotherm T22H
- [11] CTA liste de prix <http://www.cta.ch/10/24/1514/1515/1512/?oid=1497&lang=fr>
- [12] Résultats du centre de test de Buchs pour PAC sol/eau et eau/eau : <http://institute.ntb.ch/fileadmin/Institute/IES/pdf/PruefResSW121019.pdf>



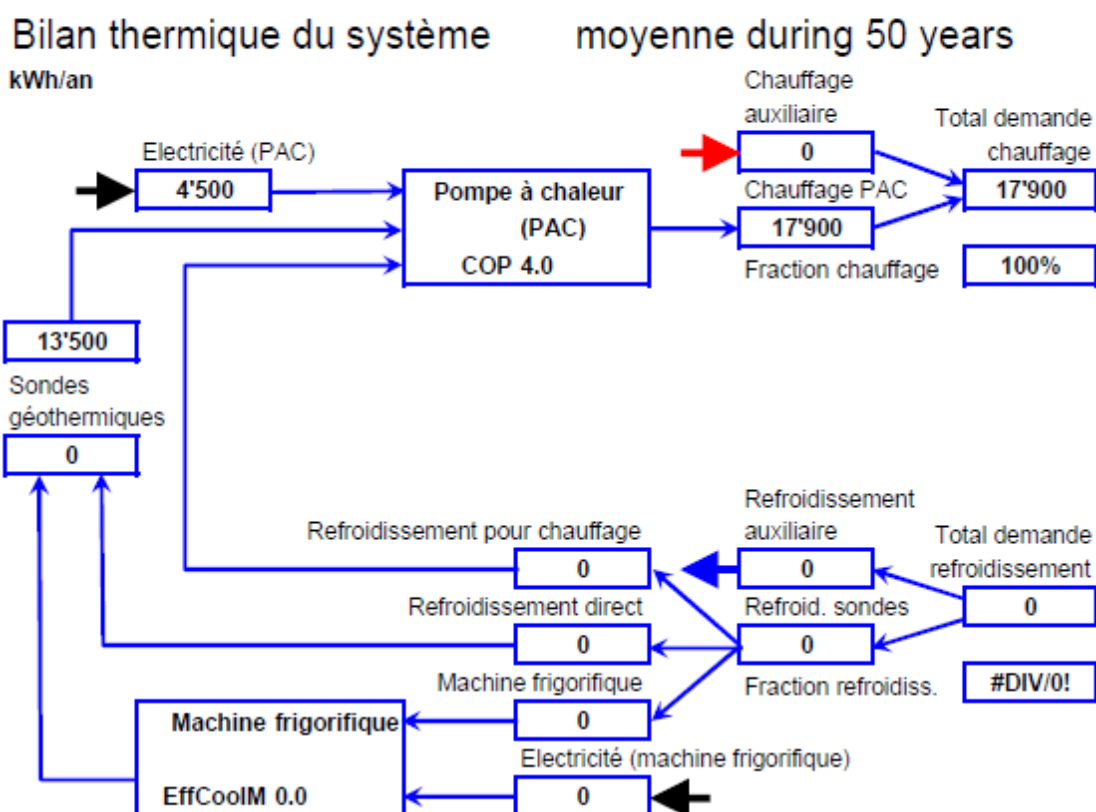
15. ANNEXES

15.1. Exemple de résultats de simulation d'Oftringen

Paramètres : 20kW et débit 2.5m³/h avec le logiciel PILESIM

Pilesim2-get-output-Fr.xls

25.04.2012



Chauffage

Puissance d'extraction maximum par mètre de sonde

29 W/m

Energie annuelle extraite par mètre de sonde

19 kWh/m/a

Refroidissement

Puissance d'injection maximum par mètre de sonde

0 W/m

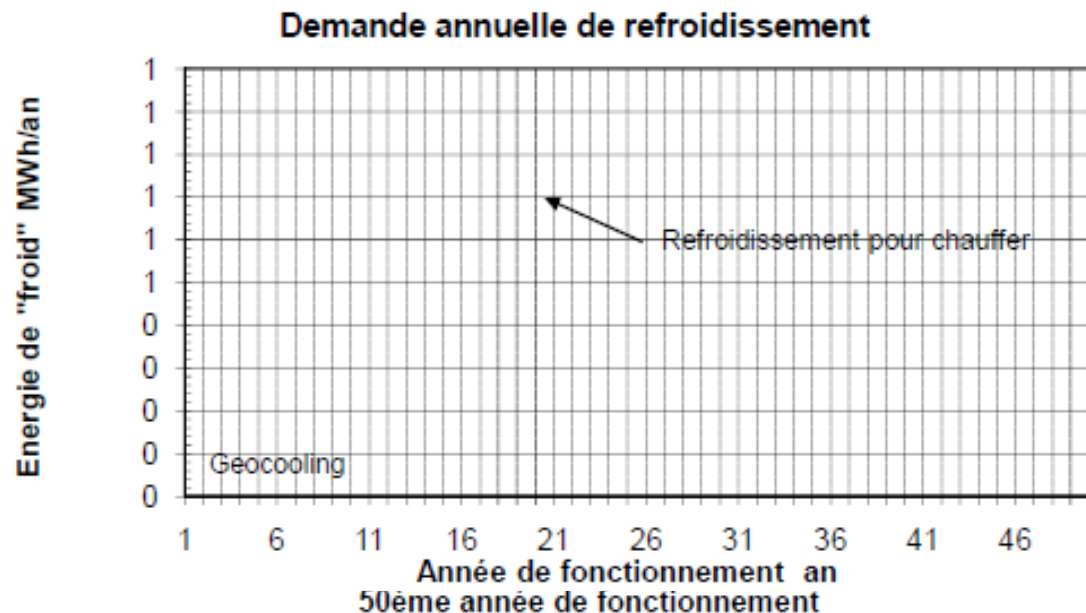
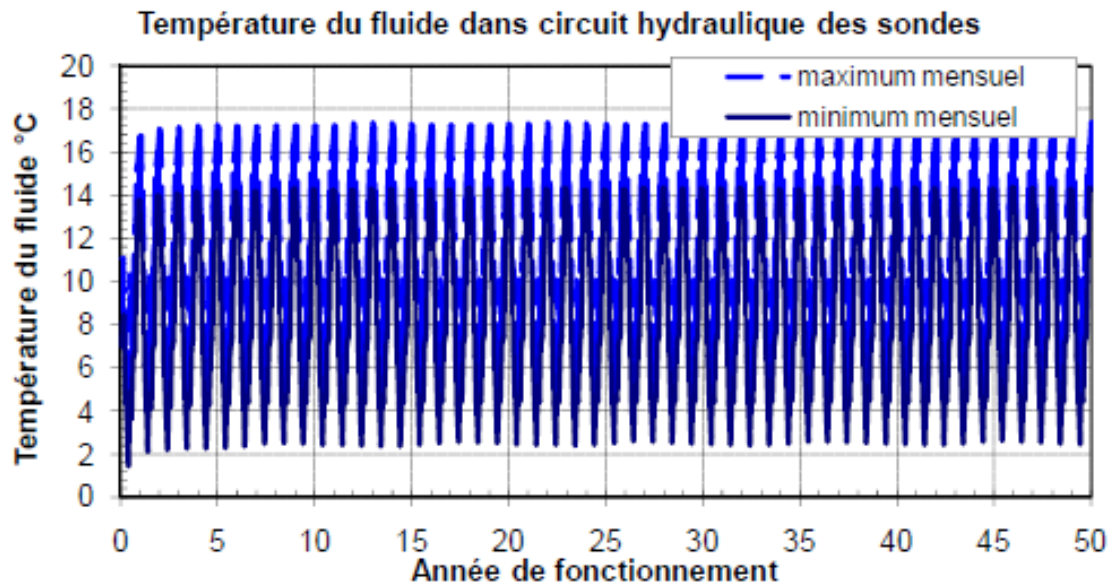
Energie annuelle injectée par mètre de sonde

0 kWh/m/a

Bilan terrain

Ratio energie injectée sur énergie extraite

0%



Remarque : la puissance visible ci-dessus correspond à la puissance après la PAC. La puissance telle que testée à Oftringen est celle en sortie de sonde, il faut donc tenir compte du COP pour retomber sur la puissance de 20kW annoncée.

15.2. Cas 1, détail des paramètres de simulation de l'installation in situ

Pilesim2-get-output-Fr.xls

09.05.2012

PILESIM parameters (This EXCEL file requires to define a 20 years simulation duration and the selection of monthly results in the PILESIM parameter list)

DeckFile	PileSim.lst
Parameter file (some parameters)	PileSim.opa
Output file (monthly values)	PileSim.out
Plot file (hourly values last simulation year)	PileSim.plt

SITE - METEO

93 input data file for loading conditions

ASSIGN C:\PILESIM2\PILEDATA\gallet48GWh.pil

21

SYSTEM TYPE

114 type o system (look at cell comment for definition)

ITYPES 0

Heating and geocooling only

ANNUAL ENERGIES

123 Annual energy demand for heating (ignored if input data file not normalised)	QhYEAR	0 [MWh]
127 Scaling factor for heating demand [ScaleH]	ScaleH	1.000 [-]
131 Annual energy demand for cooling (ignored if input data file not normalised)	QcYEAR	0 [MWh]
135 Scaling factor for cooling demand [ScaleC]	ScaleC	1.000 [-]
139 Outdoor air temperature for heating design	TexMin	-10 [°C]
143 Design forward fluid temperature for heating [TfoHea]	TfoHea	45 [°C]
145 Design forward fluid temperature for cooling [TfoCol]	TfoCol	-99 [°C]
147 Design forward-return temp. difference in cooling distribution [dTGeocool]	dTGeocool	7 [°C]
151 Relevant fluid temperature level for geocooling operation	TGEOTOP	-1

forward fluid temperature to cooling distribution

TEMPERATURE LIMITS

160 Minimum allowed fluid temperature in the piles / boreholes [TfMin]	TfMin	0 [°C]
162 Maximum allowed fluid temperature in the piles / boreholes [Tfmax]	TfMax	50 [°C]

HEAT PUMP AND COOLING MACHINE PARAMETERS

174 Design electric power of the heat pump [Pel]	Pel	6.0 [kW]
176 Design performance coefficient (COP) [COPo]	COPo	3.8 [-]
180 Constant COP and efficiency during simulation ?	ICTCOP	variable
182 Design inlet fluid temperature in evaporator	Teln	11 [°C]
184 Design outlet fluid temperature from condenser	TcOut	45 [°C]
186 Temperature difference for COP reduction	dTCOP	50 [K]
188 Temperature difference for COP stagnation	dTstag	150 [K]
190 Maximum possible COP (PAC and cooling machine)	COPmax	6.0 [-]
192 Penalty on the COP (PAC and cooling machine)	COPpen	0.0 [-]
196 Design electric power of the cooling machine [PelCOM]	PelCOM	-99.0 [kW]
198 Design efficiency of the cooling machine [EffCOM]	EffCOM	2.5 [-]
202 Design inlet fluid temperature in evaporator	TeinCo	5 [°C]
204 Design outlet fluid temperature from condenser	TcutCo	40 [°C]
206 Design inlet-outlet temp. difference in evaporator (PAC and cooling machine)	dTevap	3 [K]
208 Design inlet-outlet temp. difference in condenser (PAC and cooling machine)	dTcond	10 [K]

COUNTERFLOW HEAT EXCHANGERS

221 Design temperature loss in cooling heat exchanger [LossTCool]	LossTCool	0 [K]
224 Design temperature loss in geocooling heat exchanger [LossTGeo]	LossTGeo	0.5 [K]

INTERFACE GROUND-BUILDING

233 Room air temperature in building [TairH]	TairH	20 [°C]
235 Height of the cellar between rooms and ground [Hfloor]	Hfloor	4.0 [m]
237 Air change rate in the cellar [AchRat]	AchRat	0.0 [1/h]
239 Global room-cellar heat transfer coefficient [UCelBu]	UCelBu	##### [W/(m2K)]
241 Insulation thickness between ground and cellar [Hinsul]	Hinsul	0.20 [m]
243 Concrete thickness between ground and cellar [Hmagco]	Hmagco	0.60 [m]
245 Length of the horizontal pipes on ground [LCOEPF]	LCOEPF	40 [m]

BOREHOLES / PILES

total number of PILES or BHE [-]
average PILE or BHE length [m]
average PILE or BHE diameter [m]

Riscaldamento
4 [-]
122 [m]
0.11 [m]

average PILE or BHE thermal resistance [K/(W/m)]	0.1 [K/(W/m)]
total flow rate in PILE or BHE flow circuit when heat extraction [kg/h]	5305 [kg/h]
flow rate per PILE or BHE when heat extraction [m3/h per bore]	1.261 [m3/h per bore]
253 Diameter of PILES or BHE of type 1 [dp1]	dp1 0.11 [m]
260 Number of PILES or BHE of type 1 [N1]	N1 4 [-]
262 Average active length of PILES or BHE of type 1 [H1]	H1 122.0 [m]
264 Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 1 (K/(W/m) / 3.6 ks/h) [Rb1]	Rb1 0.1000 [K/(W/m)]
266 Internal thermal resist. Ra of pile/borehole type 1 (K/(W/m) / 3.6 ks/h) [Ra1]	Ra1 0.2500 [K/(W/m)]
271 Diameter of PILES or BHE of type 2	dp2 1.20 [m]
274 Number of PILES or BHE of type 2	N2 0 [-]
276 Average active length of PILES or BHE of type 2	H2 27.2 [m]
278 Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 2 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Rb2 0.0600 [K/(W/m)]
280 Internal thermal resistance of pile/borehole type 2 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Ra2 0.1040 [K/(W/m)]
283 Diameter of PILES or BHE of type 3	dp3 1.30 [m]
286 Number of PILES or BHE of type 3	N3 0 [-]
288 Average active length of PILES or BHE of type 3	H3 25.8 [m]
290 Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 3 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Rb3 0.0600 [K/(W/m)]
292 Internal thermal resistance of pile/borehole type 3 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Ra3 0.1040 [K/(W/m)]
295 Diameter of PILES or BHE of type 4	dp4 1.50 [m]
298 Number of PILES or BHE of type 4	N4 0 [-]
300 Average active length of PILES or BHE of type 4	H4 27.2 [m]
302 Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 4 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Rb4 0.0600 [K/(W/m)]
304 Internal thermal resistance of pile/borehole type 4 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Ra4 0.1040 [K/(W/m)]
307 Diameter of PILES or BHE of type 5	dp5 0.40 [m]
310 Number of PILES or BHE of type 5	N5 0 [-]
312 Average active length of PILES or BHE of type 5	H5 20.0 [m]
314 Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 5 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Rb5 0.0601 [K/(W/m)]
316 Internal thermal resistance of pile/borehole type 5 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Ra5 0.1040 [K/(W/m)]
319 Diameter of PILES or BHE of type 6	dp6 0.90 [m]
322 Number of PILES or BHE of type 6	N6 0 [-]
324 Average active length of PILES or BHE of type 6	H6 25.0 [m]
326 Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 6 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Rb6 0.0601 [K/(W/m)]
328 Internal thermal resistance of pile/borehole type 6 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Ra6 0.1040 [K/(W/m)]
335 Average spacing between the piles [BPILE]	BPILE 8.0 [m]
337 Number of piles/boreholes coupled in series [NSERIE]	NSERIE 1 [-]
341 Pipe configuration in pile/borehole	TypPip U-pipe
358 Pipe number in a cross section of a pile	NTUB 4 [-]
360 Inner diameter of one pipe	DIAMI 32.000 [mm]
363 Fraction of pile concrete thermal capacity	FrCapa 0.00 [%]
GROUND CHARACTERISTICS	
effective average thermal conductivity [W/mK]	2.6 [W/mK]
average ground volumetric heat capacity [kJ/m3K]	2500 [kJ/m3K]
372 Initial ground temperature [TGRDIN]	TGRDIN 8.3 [°C]
374 Mean temperature gradient in the undisturbed ground [dTGRND]	dTGRND 30.0 [K/km]
377 Thermal conductivity of ground layer 1 [LG1]	LG1 2.6 [W/(mK)]
379 Volumetric thermal capacity of ground layer 1 [CG1]	CG1 2.50 [MJ/(m3K)]
383 Thickness of ground layer 1	HG11 1000.0 [m]
388 Darcy velocity of ground water in layer 1 [DA1]	DA1 0.00E+00 [m/day]
391 Thermal conductivity of ground layer 2 [LG2]	LG2 2.6 [W/(mK)]
393 Volumetric thermal capacity of ground layer 2 [CG2]	CG2 2.50 [MJ/(m3K)]
397 Thickness of ground layer 2	HG2 10.0 [m]
401 Darcy velocity of ground water in layer 2 [DA2]	DA2 0.00E+00 [m/day]
404 Thermal conductivity of ground layer 3 [LG3]	LG3 2.0 [W/(mK)]
406 Volumetric thermal capacity of ground layer 3 [CG3]	CG3 2.20 [MJ/(m3K)]
410 Thickness of ground layer 3	HG3 1000.0 [m]
414 Darcy velocity of ground water in layer 3 [DA3]	DA3 0.00E+00 [m/day]
423 Simulate forced convection on global process	IGLOB yes
426 Simulate forced convection on local process	FLOCAL yes

15.3. Cas 1, détail des paramètres de simulation de l'installation avec 1 sonde de 490m

Pilesim2-get-output-Fr.xls

22.05.2012

PILESIM parameters (This EXCEL file requires to define a 20 years simulation duration and the selection of monthly results in the PILESIM parameter list)

DeckFile	PileSim.lst
Parameter file (some parameters)	PileSim.opa
Output file (monthly values)	PileSim.out
Plot file (hourly values last simulation year)	PileSim.plt

SITE - METEO

93 input data file for loading conditions

ASSIGN C:\PILESIM2\PILEDATA\gallet48GWh.pil

21

SYSTEM TYPE

114 type o system (look at cell comment for definition)

ITYPES 0
Heating and geocooling only

ANNUAL ENERGIES

123 Annual energy demand for heating (ignored if input data file not normalised)	QhYEAR	48 [MWh]
127 Scaling factor for heating demand [ScaleH]	ScaleH	1.000 [-]
131 Annual energy demand for cooling (ignored if input data file not normalised)	QcYEAR	0 [MWh]
135 Scaling factor for cooling demand [ScaleC]	ScaleC	1.000 [-]
139 Outdoor air temperature for heating design	TexMin	-10 [°C]
143 Design forward fluid temperature for heating [TfoHea]	TfoHea	45 [°C]
145 Design forward fluid temperature for cooling [TfoCol]	TfoCol	-99 [°C]
147 Design forward-return temp. difference in cooling distribution [dTGeocool]	dTGeocool	7 [°C]
151 Relevant fluid temperature level for geocooling operation	TGEOTOP	-1
forward fluid temperature to cooling distribution		

TEMPERATURE LIMITS

160 Minimum allowed fluid temperature in the piles / boreholes [TfMin]	TfMin	0 [°C]
162 Maximum allowed fluid temperature in the piles / boreholes [Tfmax]	TfMax	50 [°C]

HEAT PUMP AND COOLING MACHINE PARAMETERS

174 Design electric power of the heat pump [Pel]	Pel	6.0 [kW]
176 Design performance coefficient (COP) [COPo]	COPo	4.5 [-]
180 Constant COP and efficiency during simulation ?	ICTCOP	variable
182 Design inlet fluid temperature in evaporator	Teln	11 [°C]
184 Design outlet fluid temperature from condenser	TcOut	45 [°C]
186 Temperature difference for COP reduction	dTCOP	50 [K]
188 Temperature difference for COP stagnation	dTstag	150 [K]
190 Maximum possible COP (PAC and cooling machine)	COPmax	6.0 [-]
192 Penalty on the COP (PAC and cooling machine)	COPpen	0.0 [-]
196 Design electric power of the cooling machine [PelCOM]	PelCOM	-99.0 [kW]
198 Design efficiency of the cooling machine [EffCOM]	EffCOM	2.5 [-]
202 Design inlet fluid temperature in evaporator	TeinCo	5 [°C]
204 Design outlet fluid temperature from condenser	TcutCo	40 [°C]
206 Design inlet-outlet temp. difference in evaporator (PAC and cooling machine)	dTevap	3 [K]
208 Design inlet-outlet temp. difference in condenser (PAC and cooling machine)	dTcond	10 [K]

COUNTERFLOW HEAT EXCHANGERS

221 Design temperature loss in cooling heat exchanger [LossTCool]	LossTCool	0 [K]
224 Design temperature loss in geocooling heat exchanger [LossTGeo]	LossTGeo	0.5 [K]

INTERFACE GROUND-BUILDING

233 Room air temperature in building [TairH]	TairH	20 [°C]
235 Height of the cellar between rooms and ground [Hfloor]	Hfloor	4.0 [m]
237 Air change rate in the cellar [AchRat]	AchRat	0.0 [1/h]
239 Global room-cellar heat transfer coefficient [UCelBu]	UCelBu	##### [W/(m2K)]
241 Insulation thickness between ground and cellar [Hinsul]	Hinsul	0.20 [m]
243 Concrete thickness between ground and cellar [Hmagco]	Hmagco	0.60 [m]
245 Length of the horizontal pipes on ground [LCOEPF]	LCOEPF	10 [m]

BOREHOLES / PILES

total number of PILES or BHE [-]	Riscaldamento	1 [-]
average PILE or BHE length [m]		490 [m]
average PILE or BHE diameter [m]		0.16 [m]

average PILE or BHE thermal resistance [K/(W/m)]
 total flow rate in PILE or BHE flow circuit when heat extraction [kg/h]
 flow rate per PILE or BHE when heat extraction [m3/h per bore]

253	Diameter of PILES or BHE of type 1 [dp1]
260	Number of PILES or BHE of type 1 [N1]
262	Average active length of PILES or BHE of type 1 [H1]
264	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 1 (K/(W/m) / 3.6 ks/h) [Rb1]
266	Internal thermal resist. Ra of pile/borehole type 1 (K/(W/m) / 3.6 ks/h) [Ra1]
271	Diameter of PILES or BHE of type 2
274	Number of PILES or BHE of type 2
276	Average active length of PILES or BHE of type 2
278	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 2 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
280	Internal thermal resistance of pile/borehole type 2 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
283	Diameter of PILES or BHE of type 3
286	Number of PILES or BHE of type 3
288	Average active length of PILES or BHE of type 3
290	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 3 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
292	Internal thermal resistance of pile/borehole type 3 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
295	Diameter of PILES or BHE of type 4
298	Number of PILES or BHE of type 4
300	Average active length of PILES or BHE of type 4
302	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 4 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
304	Internal thermal resistance of pile/borehole type 4 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
307	Diameter of PILES or BHE of type 5
310	Number of PILES or BHE of type 5
312	Average active length of PILES or BHE of type 5
314	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 5 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
316	Internal thermal resistance of pile/borehole type 5 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
319	Diameter of PILES or BHE of type 6
322	Number of PILES or BHE of type 6
324	Average active length of PILES or BHE of type 6
326	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 6 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
328	Internal thermal resistance of pile/borehole type 6 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
335	Average spacing between the piles [BPILE]
337	Number of piles/boreholes coupled in series [NSERIE]
341	Pipe configuration in pile/borehole
358	Pipe number in a cross section of a pile
360	Inner diameter of one pipe
363	Fraction of pile concrete thermal capacity

0.1 [K/(W/m)]	
6632 [kg/h]	
6.304 [m3/h per bore]	
dp1	0.16 [m]
N1	1 [-]
H1	490.0 [m]
Rb1	0.1000 [K/(W/m)]
Ra1	0.2500 [K/(W/m)]
dp2	1.20 [m]
N2	0 [-]
H2	27.2 [m]
Rb2	0.0600 [K/(W/m)]
Ra2	0.1040 [K/(W/m)]
dp3	1.30 [m]
N3	0 [-]
H3	25.8 [m]
Rb3	0.0600 [K/(W/m)]
Ra3	0.1040 [K/(W/m)]
dp4	1.50 [m]
N4	0 [-]
H4	27.2 [m]
Rb4	0.0600 [K/(W/m)]
Ra4	0.1040 [K/(W/m)]
dp5	0.40 [m]
N5	0 [-]
H5	20.0 [m]
Rb5	0.0601 [K/(W/m)]
Ra5	0.1040 [K/(W/m)]
dp6	0.90 [m]
N6	0 [-]
H6	25.0 [m]
Rb6	0.0601 [K/(W/m)]
Ra6	0.1040 [K/(W/m)]
BPILE	8.0 [m]
NSERIE	1 [-]
TypPip	U-pipe
NTUB	4 [-]
DIAMI	40.000 [mm]
FrCapa	0.00 [%]

GROUND CHARACTERISTICS

effective average thermal conductivity [W/mK]
 average ground volumetric heat capacity [kJ/m3K]

372	Initial ground temperature [TGRDIN]
374	Mean temperature gradient in the undisturbed ground [dTGRND]
377	Thermal conductivity of ground layer 1 [LG1]
379	Volumetric thermal capacity of ground layer 1 [CG1]
383	Thickness of ground layer 1
388	Darcy velocity of ground water in layer 1 [DA1]
391	Thermal conductivity of ground layer 2 [LG2]
393	Volumetric thermal capacity of ground layer 2 [CG2]
397	Thickness of ground layer 2
401	Darcy velocity of ground water in layer 2 [DA2]
404	Thermal conductivity of ground layer 3 [LG3]
406	Volumetric thermal capacity of ground layer 3 [CG3]
410	Thickness of ground layer 3
414	Darcy velocity of ground water in layer 3 [DA3]
423	Simulate forced convection on global process
426	Simulate forced convection on local process

2.43 [W/mK]	
2213 [kJ/m3K]	
TGRDIN	8.3 [°C]
dTGRND	30.0 [K/km]
LG1	2.3 [W/(mK)]
CG1	2.20 [MJ/(m3K)]
HG11	363.0 [m]
DA1	0.00E+00 [m/day]
LG2	2.8 [W/(mK)]
CG2	2.25 [MJ/(m3K)]
HG2	500.0 [m]
DA2	0.00E+00 [m/day]
LG3	2.0 [W/(mK)]
CG3	2.20 [MJ/(m3K)]
HG3	1000.0 [m]
DA3	0.00E+00 [m/day]
IGLOB	yes
FLOCAL	yes

15.4. Cas 2, détail des paramètres de simulation de l'installation in situ

Pilesim2-get-output-Fr.xls

09.05.2012

PILESIM parameters (This EXCEL file requires to define a 20 years simulation duration and the selection of monthly results in the PILESIM parameter list)

DeckFile	PileSim.lst
Parameter file (some parameters)	PileSim.opa
Output file (monthly values)	PileSim.out
Plot file (hourly values last simulation year)	PileSim.plt

SITE - METEO

93 input data file for loading conditions

ASSIGN C:\PILESIM2\PILEDATA\PATEKV9.pil

21

SYSTEM TYPE

114 type o system (look at cell comment for definition)	ITYPES	0
	Heating and geocooling only	

ANNUAL ENERGIES

123 Annual energy demand for heating (ignored if input data file not normalised)	QhYEAR	0 [MWh]
127 Scaling factor for heating demand [ScaleH]	ScaleH	1.000 [-]
131 Annual energy demand for cooling (ignored if input data file not normalised)	QcYEAR	0 [MWh]
135 Scaling factor for cooling demand [ScaleC]	ScaleC	1.000 [-]
139 Outdoor air temperature for heating design	TexMin	-10 [°C]
143 Design forward fluid temperature for heating [TfoHea]	TfoHea	50 [°C]
145 Design forward fluid temperature for cooling [TfoCol]	TfoCol	-99 [°C]
147 Design forward-return temp. difference in cooling distribution [dTGeocool]	dTGeocool	7 [°C]
151 Relevant fluid temperature level for geocooling operation	TGEOTOP	-1
	forward fluid temperature to cooling distribution	

TEMPERATURE LIMITS

160 Minimum allowed fluid temperature in the piles / boreholes [TfMin]	TfMin	0 [°C]
162 Maximum allowed fluid temperature in the piles / boreholes [Tfmax]	TfMax	50 [°C]

HEAT PUMP AND COOLING MACHINE PARAMETERS

174 Design electric power of the heat pump [Pel]	Pel	42.0 [kW]
176 Design performance coefficient (COP) [COPo]	COPo	3.8 [-]
180 Constant COP and efficiency during simulation ?	ICTCOP	variable
182 Design inlet fluid temperature in evaporator	TeIn	11 [°C]
184 Design outlet fluid temperature from condenser	TcOut	45 [°C]
186 Temperature difference for COP reduction	dTCOP	50 [K]
188 Temperature difference for COP stagnation	dTstag	150 [K]
190 Maximum possible COP (PAC and cooling machine)	COPmax	6.0 [-]
192 Penalty on the COP (PAC and cooling machine)	COPpen	0.0 [-]
196 Design electric power of the cooling machine [PelCOM]	PelCOM	-99.0 [kW]
198 Design efficiency of the cooling machine [EffCOM]	EffCOM	2.5 [-]
202 Design inlet fluid temperature in evaporator	TeinCo	5 [°C]
204 Design outlet fluid temperature from condenser	TcutCo	40 [°C]
206 Design inlet-outlet temp. difference in evaporator (PAC and cooling machine)	dTevap	3 [K]
208 Design inlet-outlet temp. difference in condenser (PAC and cooling machine)	dTcond	10 [K]

COUNTERFLOW HEAT EXCHANGERS

221 Design temperature loss in cooling heat exchanger [LossTCool]	LossTCool	0 [K]
224 Design temperature loss in geocooling heat exchanger [LossTGeo]	LossTGeo	0.5 [K]

INTERFACE GROUND-BUILDING

233 Room air temperature in building [TairH]	TairH	20 [°C]
235 Height of the cellar between rooms and ground [Hfloor]	Hfloor	4.0 [m]
237 Air change rate in the cellar [AchRat]	AchRat	0.0 [1/h]
239 Global room-cellar heat transfer coefficient [UCelBu]	UCelBu	##### [W/(m2K)]
241 Insulation thickness between ground and cellar [Hinsul]	Hinsul	0.20 [m]
243 Concrete thickness between ground and cellar [Hmagco]	Hmagco	0.60 [m]
245 Length of the horizontal pipes on ground [LCOEPF]	LCOEPF	500 [m]

BOREHOLES / PILES

total number of PILES or BHE [-]	Riscaldamento	19 [-]
average PILE or BHE length [m]		150 [m]
average PILE or BHE diameter [m]		0.16 [m]
average PILE or BHE thermal resistance [K/(W/m)]		0.19 [K/(W/m)]

total flow rate in PILE or BHE flow circuit when heat extraction [kg/h]
 flow rate per PILE or BHE when heat extraction [m3/h per bore]

		37137 [kg/h]
		1.858 [m3/h per bore]
253	Diameter of PILES or BHE of type 1 [dp1]	dp1 0.16 [m]
260	Number of PILES or BHE of type 1 [N1]	N1 19 [-]
262	Average active length of PILES or BHE of type 1 [H1]	H1 150.0 [m]
264	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 1 (K/(W/m) / 3.6 ks/h) [Rb1]	Rb1 0.1900 [K/(W/m)]
266	Internal thermal resist. Ra of pile/borehole type 1 (K/(W/m) / 3.6 ks/h) [Ra1]	Ra1 0.2500 [K/(W/m)]
271	Diameter of PILES or BHE of type 2	dp2 1.20 [m]
274	Number of PILES or BHE of type 2	N2 0 [-]
276	Average active length of PILES or BHE of type 2	H2 27.2 [m]
278	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 2 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Rb2 0.0600 [K/(W/m)]
280	Internal thermal resistance of pile/borehole type 2 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Ra2 0.1040 [K/(W/m)]
283	Diameter of PILES or BHE of type 3	dp3 1.30 [m]
286	Number of PILES or BHE of type 3	N3 0 [-]
288	Average active length of PILES or BHE of type 3	H3 25.8 [m]
290	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 3 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Rb3 0.0600 [K/(W/m)]
292	Internal thermal resistance of pile/borehole type 3 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Ra3 0.1040 [K/(W/m)]
295	Diameter of PILES or BHE of type 4	dp4 1.50 [m]
298	Number of PILES or BHE of type 4	N4 0 [-]
300	Average active length of PILES or BHE of type 4	H4 27.2 [m]
302	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 4 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Rb4 0.0600 [K/(W/m)]
304	Internal thermal resistance of pile/borehole type 4 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Ra4 0.1040 [K/(W/m)]
307	Diameter of PILES or BHE of type 5	dp5 0.40 [m]
310	Number of PILES or BHE of type 5	N5 0 [-]
312	Average active length of PILES or BHE of type 5	H5 20.0 [m]
314	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 5 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Rb5 0.0601 [K/(W/m)]
316	Internal thermal resistance of pile/borehole type 5 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Ra5 0.1040 [K/(W/m)]
319	Diameter of PILES or BHE of type 6	dp6 0.90 [m]
322	Number of PILES or BHE of type 6	N6 0 [-]
324	Average active length of PILES or BHE of type 6	H6 25.0 [m]
326	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 6 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Rb6 0.0601 [K/(W/m)]
328	Internal thermal resistance of pile/borehole type 6 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)	Ra6 0.1040 [K/(W/m)]
335	Average spacing between the piles [BPILE]	BPILE 8.0 [m]
337	Number of piles/boreholes coupled in series [NSERIE]	NSERIE 1 [-]
341	Pipe configuration in pile/borehole	TypPip U-pipe
358	Pipe number in a cross section of a pile	NTUB 4 [-]
360	Inner diameter of one pipe	DIAMI 32.000 [mm]
363	Fraction of pile concrete thermal capacity	FrCapa 0.00 [%]

GROUND CHARACTERISTICS

effective average thermal conductivity [W/mK]
 average ground volumetric heat capacity [kJ/m3K]

		2.6 [W/mK]
		2500 [kJ/m3K]
372	Initial ground temperature [TGRDIN]	TGRDIN 7.5 [°C]
374	Mean temperature gradient in the undisturbed ground [dTGRND]	dTGRND 30.0 [K/km]
377	Thermal conductivity of ground layer 1 [LG1]	LG1 2.6 [W/(mK)]
379	Volumetric thermal capacity of ground layer 1 [CG1]	CG1 2.50 [MJ/(m3K)]
383	Thickness of ground layer 1	HG11 1000.0 [m]
388	Darcy velocity of ground water in layer 1 [DA1]	DA1 0.00E+00 [m/day]
391	Thermal conductivity of ground layer 2 [LG2]	LG2 2.6 [W/(mK)]
393	Volumetric thermal capacity of ground layer 2 [CG2]	CG2 2.50 [MJ/(m3K)]
397	Thickness of ground layer 2	HG2 10.0 [m]
401	Darcy velocity of ground water in layer 2 [DA2]	DA2 0.00E+00 [m/day]
404	Thermal conductivity of ground layer 3 [LG3]	LG3 2.0 [W/(mK)]
406	Volumetric thermal capacity of ground layer 3 [CG3]	CG3 2.20 [MJ/(m3K)]
410	Thickness of ground layer 3	HG3 1000.0 [m]
414	Darcy velocity of ground water in layer 3 [DA3]	DA3 0.00E+00 [m/day]
423	Simulate forced convection on global process	IGLOB yes
426	Simulate forced convection on local process	FLOCAL yes

15.5. Cas 2, détail des paramètres de simulation de l'installation avec 4 sondes de 700m

Pilesim2-get-output-Fr.xls

21.11.2012

PILESIM parameters (This EXCEL file requires to define a 20 years simulation duration and the selection of monthly results in the PILESIM parameter list)

DeckFile	PileSim.lst
Parameter file (some parameters)	PileSim.opa
Output file (monthly values)	PileSim.out
Plot file (hourly values last simulation year)	PileSim.plt

SITE - METEO

93	input data file for loading conditions	ASSIGN C:\PILESIM2\PILEDATA\IPATEKV10.pil	21
----	--	---	----

SYSTEM TYPE

114	type o system (look at cell comment for definition)	ITYPES	0
		Heating and geocooling only	

ANNUAL ENERGIES

123	Annual energy demand for heating (ignored if input data file not normalised)	QhYEAR	0 [MWh]
127	Scaling factor for heating demand [ScaleH]	ScaleH	1.000 [-]
131	Annual energy demand for cooling (ignored if input data file not normalised)	QcYEAR	0 [MWh]
135	Scaling factor for cooling demand [ScaleC]	ScaleC	1.000 [-]
139	Outdoor air temperature for heating design	TexMin	-10 [°C]
143	Design forward fluid temperature for heating [TfoHea]	TfoHea	-50 [°C]
145	Design forward fluid temperature for cooling [TfoCol]	TfoCol	-99 [°C]
147	Design forward-return temp. difference in cooling distribution [dTGeocool]	dTGeocool	7 [°C]
151	Relevant fluid temperature level for geocooling operation	TGEOTOP	-1
		forward fluid temperature to cooling distribution	

TEMPERATURE LIMITS

160	Minimum allowed fluid temperature in the piles / boreholes [TfMin]	TfMin	0 [°C]
162	Maximum allowed fluid temperature in the piles / boreholes [Tfmax]	TfMax	50 [°C]

HEAT PUMP AND COOLING MACHINE PARAMETERS

174	Design electric power of the heat pump [Pel]	Pel	42.0 [kW]
176	Design performance coefficient (COP) [COPo]	COPo	3.8 [-]
180	Constant COP and efficiency during simulation ?	ICTCOP	variable
182	Design inlet fluid temperature in evaporator	Teln	11 [°C]
184	Design outlet fluid temperature from condenser	TcOut	45 [°C]
186	Temperature difference for COP reduction	dTCOP	50 [K]
188	Temperature difference for COP stagnation	dTstag	150 [K]
190	Maximum possible COP (PAC and cooling machine)	COPmax	6.0 [-]
192	Penalty on the COP (PAC and cooling machine)	COPpen	0.0 [-]
196	Design electric power of the cooling machine [PelCOM]	PelCOM	-99.0 [kW]
198	Design efficiency of the cooling machine [EffCOM]	EffCOM	2.5 [-]
202	Design inlet fluid temperature in evaporator	TeinCo	5 [°C]
204	Design outlet fluid temperature from condenser	TcutCo	40 [°C]
206	Design inlet-outlet temp. difference in evaporator (PAC and cooling machine)	dTevap	3 [K]
208	Design inlet-outlet temp. difference in condenser (PAC and cooling machine)	dTcond	10 [K]

COUNTERFLOW HEAT EXCHANGERS

221	Design temperature loss in cooling heat exchanger [LossTCool]	LossTCool	0 [K]
224	Design temperature loss in geocooling heat exchanger [LossTGeo]	LossTGeo	0.5 [K]

INTERFACE GROUND-BUILDING

233	Room air temperature in building [TairH]	TairH	20 [°C]
235	Height of the cellar between rooms and ground [Hfloor]	Hfloor	4.0 [m]
237	Air change rate in the cellar [AchRat]	AchRat	0.0 [1/h]
239	Global room-cellar heat transfer coefficient [UCelBu]	UCelBu	9998.9 [W/(m2K)]
241	Insulation thickness between ground and cellar [Hinsul]	Hinsul	0.20 [m]
243	Concrete thickness between ground and cellar [Hmagco]	Hmagco	0.60 [m]
245	Length of the horizontal pipes on ground [LCOEPF]	LCOEPF	50 [m]

BOREHOLES / PILES

	total number of PILES or BHE [-]	Riscaldamento	4 [-]
	average PILE or BHE length [m]		700 [m]
	average PILE or BHE diameter [m]		0.16 [m]
	average PILE or BHE thermal resistance [K/(W/m)]		0.06 [K/(W/m)]

total flow rate in PILE or BHE flow circuit when heat extraction [kg/h]
flow rate per PILE or BHE when heat extraction [m3/h per bore]

253	Diameter of PILES or BHE of type 1 [dp1]
260	Number of PILES or BHE of type 1 [N1]
262	Average active length of PILES or BHE of type 1 [H1]
264	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 1 (K/(W/m) / 3.6 ks/h) [Rb1]
266	Internal thermal resist. Ra of pile/borehole type 1 (K/(W/m) / 3.6 ks/h) [Ra1]
271	Diameter of PILES or BHE of type 2
274	Number of PILES or BHE of type 2
276	Average active length of PILES or BHE of type 2
278	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 2 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
280	Internal thermal resistance of pile/borehole type 2 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
283	Diameter of PILES or BHE of type 3
286	Number of PILES or BHE of type 3
288	Average active length of PILES or BHE of type 3
290	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 3 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
292	Internal thermal resistance of pile/borehole type 3 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
295	Diameter of PILES or BHE of type 4
298	Number of PILES or BHE of type 4
300	Average active length of PILES or BHE of type 4
302	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 4 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
304	Internal thermal resistance of pile/borehole type 4 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
307	Diameter of PILES or BHE of type 5
310	Number of PILES or BHE of type 5
312	Average active length of PILES or BHE of type 5
314	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 5 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
316	Internal thermal resistance of pile/borehole type 5 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
319	Diameter of PILES or BHE of type 6
322	Number of PILES or BHE of type 6
324	Average active length of PILES or BHE of type 6
326	Local thermal resistance Rb of PILE/BHE type 6 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
328	Internal thermal resistance of pile/borehole type 6 (K/(W/m) / 3.6 ks/h)
335	Average spacing between the piles [BPILE]
337	Number of piles/boreholes coupled in series [NSERIE]
341	Pipe configuration in pile/borehole
358	Pipe number in a cross section of a pile
360	Inner diameter of one pipe
363	Fraction of pile concrete thermal capacity

37137 [kg/h]	
8.825 [m3/h per bore]	
dp1	0.16 [m]
N1	4 [-]
H1	700.0 [m]
Rb1	0.0600 [K/(W/m)]
Ra1	0.1040 [K/(W/m)]
dp2	1.20 [m]
N2	0 [-]
H2	27.2 [m]
Rb2	0.0600 [K/(W/m)]
Ra2	0.1040 [K/(W/m)]
dp3	1.30 [m]
N3	0 [-]
H3	25.8 [m]
Rb3	0.0600 [K/(W/m)]
Ra3	0.1040 [K/(W/m)]
dp4	1.50 [m]
N4	0 [-]
H4	27.2 [m]
Rb4	0.0600 [K/(W/m)]
Ra4	0.1040 [K/(W/m)]
dp5	0.40 [m]
N5	0 [-]
H5	20.0 [m]
Rb5	0.0601 [K/(W/m)]
Ra5	0.1040 [K/(W/m)]
dp6	0.90 [m]
N6	0 [-]
H6	25.0 [m]
Rb6	0.0601 [K/(W/m)]
Ra6	0.1040 [K/(W/m)]
BPILE	8.0 [m]
NSERIE	1 [-]
TypPip	U-pipe
NTUB	4 [-]
DIAMI	50.000 [mm]
FrCapa	0.00 [%]

GROUND CHARACTERISTICS

effective average thermal conductivity [W/mK]
average ground volumetric heat capacity [kJ/m3K]

372	Initial ground temperature [TGRDIN]
374	Mean temperature gradient in the undisturbed ground [dTGRND]
377	Thermal conductivity of ground layer 1 [LG1]
379	Volumetric thermal capacity of ground layer 1 [CG1]
383	Thickness of ground layer 1
388	Darcy velocity of ground water in layer 1 [DA1]
391	Thermal conductivity of ground layer 2 [LG2]
393	Volumetric thermal capacity of ground layer 2 [CG2]
397	Thickness of ground layer 2
401	Darcy velocity of ground water in layer 2 [DA2]
404	Thermal conductivity of ground layer 3 [LG3]
406	Volumetric thermal capacity of ground layer 3 [CG3]
410	Thickness of ground layer 3
414	Darcy velocity of ground water in layer 3 [DA3]
423	Simulate forced convection on global process
426	Simulate forced convection on local process

2.6 [W/mK]	
2500 [kJ/m3K]	
TGRDIN	7.5 [°C]
dTGRND	30.0 [K/km]
LG1	2.6 [W/(mK)]
CG1	2.50 [MJ/(m3K)]
HG11	1000.0 [m]
DA1	0.00E+00 [m/day]
LG2	2.6 [W/(mK)]
CG2	2.50 [MJ/(m3K)]
HG2	10.0 [m]
DA2	0.00E+00 [m/day]
LG3	2.0 [W/(mK)]
CG3	2.20 [MJ/(m3K)]
HG3	100.0 [m]
DA3	0.00E+00 [m/day]
IGLOB	yes
FLOCAL	yes

15.6. Exemple de calcul détaillé des coûts d'investissement et des coûts annuels

Contraintes de dimensionnement			
	Puissance Bâtiment	kW	160
	Puissance sondes	kW	116
	Puissance d'extraction	W/m	40
	Longueur à installer	m	2889
	Profondeur max désirée	m	150
	Nombre de sondes	nb	19.26
	Longueur de sonde au delà de 200m	m	0.00
Coûts			
	Installation, Mise à disposition, repliement		3'475
	Prix forage/m inférieur 200m	CHF/m	65
	Test de réponse	Pce	7'500
	Collecteur	CHF	14'630
	Raccords de sondes-Collecteurs	CHF	23'111
	Pose Collecteurs et Raccords	CHF	11'163
	Antigel (glycol)	CHF	1'000
	Benne évacuation des boues	CHF	11'556
	Prélèvement d'échantillons (ts les 2 m)	CHF	433
	Avis géologiques	CHF	850
	Assurance pour risque artésien	CHF	750
	TOTAL	CHF	262'245
	Annuité	5.00%	21'043
	PAC	CHF	99'000
	Acc. Hydrauliques	CHF	35'357
	Montage	CHF	39'600
	Traitement d'eau	CHF	7'800
	Accumulateur	CHF	10'000
	TOTAL	CHF	191'757
	Annuité	5.00%	15'387
Énergétique			
	Catalogue PAC	Régime Fctnmt	B0/W35
		Puissance	159
	COP	-	3.6
	Heures de fonctionnement	h/an	2200
	Énergie électrique consommée	kWh/an	97778
	Prix électricité	CHF/kWh	0.2
	Coût électricité /an	CHF/an	19'556
	Cout total	CHF/an	55'986

15.7. Hypothèses de calculs pour aquifère profond

Reconnaissance	entre CHF 50'000 et 150'000		
Forage	1800	CHF/m	coûts actuels (en hausse par rapport à 2008)
Equipement	200	CHF/m	mise en place crépine uniquement
Développement	entre CHF 50'000 et 100'000 selon nbre d'acidifications du terrain nécessaires		
Essais	entre CHF 100'000 et 200'000		

15.8. Hypothèses de calculs pour captage de nappe phréatique

Puit de 60 mètres

Distance à la PAC de 40 mètres

Forage et tube du puits à CHF 225.-/m

Conduites de liaison et fouilles : CHF 300.-/m et CHF 50.-/m tous les 100kW pour tenir compte de l'augmentation du diamètre.

Circuit intermédiaire proportionnel à la puissance de la source.

15.9. Hypothèses pour les calculs des coûts du chapitre 7.7

Le coût de l'antigel (glycol) a été évalué à CHF 1000.- pour une sonde de 150 mètres.

Le gain en énergie de pompage a été pris en compte dans l'évaluation par le biais de l'amélioration du COP annuel moyen.

Le coefficient de performance plus élevé grâce à la température plus élevée est pris en compte au travers de la simulation Pilesim. Les valeurs de variation du COP sont reprises des spécifications des pompes à chaleur réelles des installations [9], [10].

Le coût de la pompe à chaleur est basé sur la liste de prix d'un fournisseur [11]. A puissance équivalente on prendra pour les forages standards une PAC sol-eau (B/W), et pour les forages profonds une PAC eau-eau (W/W).

Le coût des fouilles, pour la recherche du seuil de rentabilité, est calculé à CHF 100.-/m fouillés. La distance entre les sondes est choisie à 10m. Ce coût comprend le coût des raccords.

Le coût des collecteurs pour les 5 premières sondes (s'il y a plus d'une sonde) est évalué à CHF 5'000.-. A chaque sonde excédentaire, on ajoute un surcoût de CHF 2'500.- par groupe de 5 sondes.