



Rapport final du 06 décembre 2016

Projet SIRIUS

4 Bâtiments Minergie ® ECO, utilisant des pompes à chaleur géothermiques profondes pour la production de chaleur





Date : 06 décembre 2016

Lieu : Lausanne

Prestataire de subventions :

Confédération suisse, représentée par
L'Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme pilote, de démonstration et Programme-phare
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :

Société Services industriels de Lausanne
Place Chauderon 23, CH-1002 Lausanne
<http://www.lausanne.ch/thematiques/services-industriels.html>

Auteurs :

Francesco Barone, Services industriels de Lausanne, francesco.barone@lausanne.ch

Direction du programme de l'OFEN : Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

Suivi du projet pour l'OFEN : Rudolf Minder, rudolf.minder@bluewin.ch
Céline Weber, cweber@focus-e.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/500769-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen, Adresse postale : 3003 Berne
Tél. +41 58 462 56 11 · fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.ofen.admin.ch



Résumé

La Ville de Lausanne a l'ambition de réaliser l'éco-quartier des Plaines-du-Loup selon le standard « société à 2000 Watts ». Le début des travaux est prévu en 2018. Afin d'atteindre ce standard, le bilan thermique joue un rôle déterminant. Diverses options sont envisagées pour le chauffage. L'une des plus prometteuses étant la mise en œuvre de pompes à chaleurs (PAC) couplées à des sondes géothermiques profondes (entre 500 et 800m).

Toutefois, si la réalisation et l'exploitation de PAC avec des sondes géothermiques traditionnelles jusqu'à 150-200 mètres sont bien maîtrisées, l'extension vers des profondeurs de l'ordre de 500 mètres et au delà, implique un processus de réflexion et d'optimisation conséquent.

Afin d'avoir un retour d'expérience suffisant avant de déployer cette technologie à l'échelle de l'éco-quartier, la ville de Lausanne a lancé en 2011, par le biais des Services industriels (SiL), un projet pilote dans le cadre de la construction d'un nouveau îlot de 4 immeubles en milieu urbain (projet Sirius).

Le projet a démarré concrètement en 2012 par l'installation de la première sonde géothermique double-U et la chaleur a été délivrée par l'installation en automne 2014.

S'agissant d'un projet de démonstration, un système de monitoring faisant recours à des fibres optiques a été choisi afin de mesurer la température du champ de sondes en fonction de la profondeur. Ce système a permis de dresser des bilans énergétiques à différents niveaux du forage et ensuite d'évaluer les performances thermiques de la sonde en fonction de la profondeur.

Abstract

The city of Lausanne has the ambition to realize an eco-district on the Plaines-du-Loup according to the standard "2000 Watt society". The beginning of the construction work is scheduled for 2018. To achieve this standard, the heat balance plays a key role. Various options are being considered for heating.

One of the most promising solutions is the implementation of heat pumps (HP) coupled with deep geothermal probes (between 500 to 800 m). However, if the construction and operation of HP with traditional geothermal probes down to 150-200 meters are well controlled, extending to depths of the order of 500 meters and more implies an important process of reflection and optimization.

To have some experience before investing in this technology for the entire eco-district, the city of Lausanne, through the Services industriels (SiL), launched in 2011 a demonstration project, called Sirius, on a small district project of 4 buildings with 8 deep geothermal probes of 500 meters deep.

The project started effectively in 2012 with the drilling of the first geothermal double-U probe and heat was delivered by the system in autumn 2014.

Due to his demonstration component, a fiber optic distributed temperature system (DTS) was chosen for the temperature measurements of the geothermal field to calculate energy



balances at different depth levels of the probe and then to assess the performance of the geothermal probe.



Table des matières

Résumé	3
Abstract	3
1. Introduction	7
2. Contexte du projet	7
3. Etat des lieux	8
3.1 Caractéristiques des sondes géothermiques en U (standard)	8
3.2 Résistance thermique du fluide	11
3.3 Résistance thermique du conduit.....	13
3.4 Matériel de remplissage.....	14
4. Analyse du problème et exemple réel	15
5. Optimisation de la sonde	17
5.1 Remplissage différent	18
5.2 Géométrie	18
5.3 Utilisation d'écarteurs.....	19
5.4 Isolation du conduit en montant.....	22
6. Le COP de la PAC	23
7. Estimation du COPA à partir des températures extrêmes	23
8. Paramètres influents et optimisation du champ de sondes	25
9. Simulation de champs de sondes géothermiques	28
9.1 Application au champ de sondes Sirius	31
10. Chantier de réalisation	34
10.1 Introduction	34
10.2 Forages et sondes géothermiques	35
10.3 Problèmes géologiques	36
10.4 Problème sur une sonde géothermique	40
10.5 Système de mesure DTS	41
11. Test de réponse thermique et mesures avec le DTS	42
11.1 Mise en place du TRT	42
11.2 Résultat du TRT	46
12. Production de chaleur	51
12.1 Schéma de principe de la production	51
12.2 Régulation et monitoring.....	53
13. Monitoring sondes géothermiques	53



13.1	Logiciel de traitement des données	55
13.2	Evolution des températures des sondes géothermiques	58
13.3	Comparaison avec les simulations	60
14.	Evaluation des performances des sondes géothermiques.....	64
15.	Evolution des températures des sondes géothermiques.....	69
16.	Performances de l'installation	71
17.	Aspects économiques.....	73
18.	Pistes d'optimisation des PAC	74
19.	Conclusions	76
20.	Remerciements	78
21.	Bibliographie	79
ANNEXES	81



1. Introduction

La démarche participative "Quartier 21", initiée par la Ville de Lausanne en 2002-2003, a permis à la population d'exprimer ses besoins et ses attentes. Il en est ressorti notamment que la Ville devait intervenir sur le marché du logement en construisant, toutes catégories confondues, quelque 3 000 logements respectant les critères de développement durable. Ce programme a fait l'objet du préavis n° 2005/45 « Création de 3'000 nouveaux logements à Lausanne », dans lequel figurent les parcelles offrant des possibilités constructives qui permettraient de concrétiser relativement rapidement ce programme. Le projet Sirius fait partie de cet inventaire.

Accessible depuis l'avenue de Morges et la rue Couchirard, le projet Sirius propose un ensemble cohérent de quatre bâtiments implantés sur les angles du périmètre de construction de manière à former un îlot fermé comportant des passages sur l'intérieur de la parcelle.

La mixité des affectations a été garantie par le choix d'une affectation différente pour chaque bâtiment: trois sont destinés au marché locatif dont un bâtiment de logements protégés, un de logements subventionnés, un en marché libre; un bâtiment est destiné à la vente en PPE [1].

La surface de plancher totale compte 14'088 m² et la surface de référence énergétique est de 10'427 m². Ce programme de 104 nouveaux logements répond aux exigences du label Minergie Eco®.

2. Contexte du projet

La Ville de Lausanne a l'ambition de réaliser l'éco-quartier des Plaines-du-Loup selon le standard « société à 2000 Watts » dans sa vision à 2150. Afin d'atteindre ce standard, le bilan thermique joue un rôle déterminant. Diverses options ont été évaluées pour la production de chaleur, l'une des plus prometteuses étant la mise en œuvre de pompes à chaleurs (PAC) connectées à des sondes géothermiques profondes (entre 500 et 800 m).

Toutefois, si la réalisation et l'exploitation de PAC avec des sondes géothermiques traditionnelles jusqu'à environ 150-200 mètres sont bien maîtrisées, l'extension vers des profondeurs de l'ordre de 500 mètres et au-delà, implique un processus de réflexion et d'optimisation important. Pour ce faire la Ville a désiré réaliser en saisissant, en 2011, l'opportunité du projet « 3000 logements » et en particulier celui du projet Sirius, semblable en termes de densité et mixité d'affectations au futur projet des Plaines du Loup.

L'installation « pilote et démonstration Sirius » prévoyait l'installation de huit sondes géothermiques d'environ 500 mètres de profondeur.

Ce projet avait comme but de réaliser des tests couvrant les étapes d'une telle réalisation, à savoir : forages, installation des sondes, mise en place du matériel de remplissage, chaîne d'acquisition de données, validation des modèles et paramètres, évaluation du COP et du COPA, suivi de la température du terrain etc.

Les travaux de construction des bâtiments ont démarré en 2012 avec une mise en service des installations de production de chaleur en 2014 (entrée des habitants en 2015).

Les enseignements tirés de ce projet pilote devront être valorisés dans le cadre du futur éco-quartier et pourront, sans nul doute, être très utiles pour tous projets de rénovation ou nouvelle construction en Suisse, à l'échelle d'un quartier d'habitations.



3. Etat des lieux

Comme il a été relevé précédemment, les PAC géothermiques sont bien maîtrisées pour des profondeurs standard (jusqu'à 200 mètres environ). Pour cette raison, la première étape du projet a consisté dans la compilation des données et ensuite la comparaison et l'analyse en termes de coefficients de performance (COP et COPA) de plus de 80 installations géothermiques de différentes profondeurs (de 50 à 1200 mètres) et puissances (de 5 à 600 kW), dans plusieurs pays. Cette étude comparative montre qu'à partir d'une longueur d'environ 300 mètres, le gain des performances des PAC est très faible en appliquant les technologies standard¹.

Les sondes géothermiques font partie de la catégorie des systèmes géothermiques de faible profondeur (ou faible enthalpie) [3]. Les sondes géothermiques profondes (au delà de 500 mètres) se rapprochent plus des systèmes géothermiques de moyenne profondeur et pour cette raison présentent les mêmes problématiques. Les technologies des sondes profondes doivent pour cela évoluer en s'inspirant des technologies de la moyenne profondeur pour mieux conserver, par exemple, la température dans le fluide caloporteur.

Pour pouvoir améliorer le rendement de la sonde, il est indispensable de comprendre quelles sont ses caractéristiques et sur quels paramètres il est possible d'intervenir.

3.1 Caractéristiques des sondes géothermiques en U (standard)

Une sonde géothermique est en fait un simple échangeur de chaleur entre le terrain et le fluide caloporteur; l'objectif donc de l'optimisation de cet échangeur est l'augmentation de la température à la sortie de la sonde en réduisant la résistance thermique entre le fluide et le terrain. Nous verrons au chapitre 4 que le coefficient de performance de la PAC dépend aussi de la température à l'évaporateur, donc du côté de la source de chaleur.

Si l'on exclut le terrain, dont les caractéristiques ne peuvent pas être changées, le système sonde géothermique est constitué principalement de trois éléments: fluide caloporteur, échangeur et matériel de remplissage.

Pour mieux comprendre l'origine du problème de l'optimisation de l'échangeur, un schéma est représenté ci-dessous :

¹ En accord avec l'étude de M. Matthey et D. Pahud : *Recherche des paramètres permettant d'élever la température moyenne des fluides circulants dans des sondes en terre verticales et destinées à l'alimentation de pompes à chaleur*. Rapport final OFEN 194398, Bern, 1996 [2].

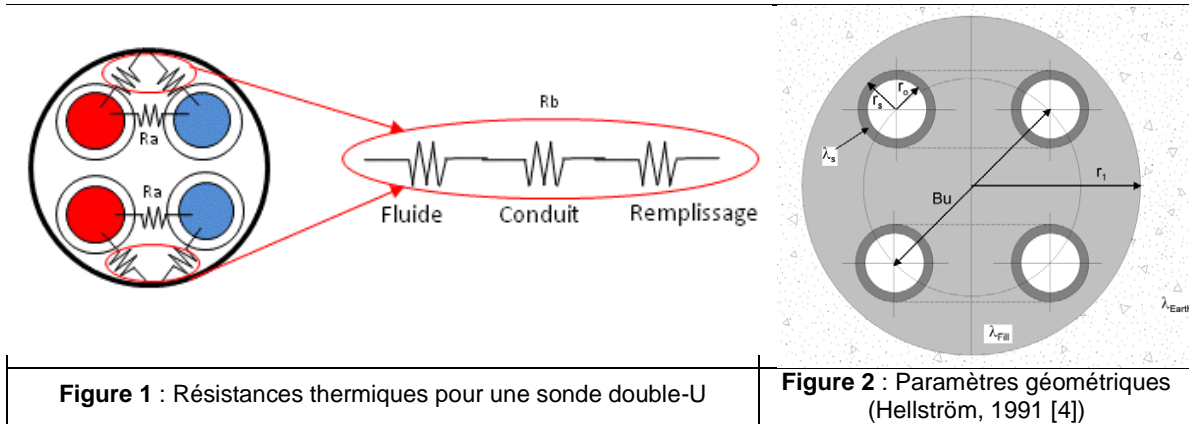


Figure 1 : Résistances thermiques pour une sonde double-U

Figure 2 : Paramètres géométriques (Hellström, 1991 [4])

La résistance thermique entre le terrain et le fluide, R_b , est donnée par la somme des résistances thermiques des trois éléments, fluide, conduit et remplissage.

Dans le cas d'une sonde double-U cette résistance peut être calculée grâce à l'équation suivante, définie par Hellström [4] :

$$R_b = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot \lambda_{Fill}} \cdot \left[\beta + \ln\left(\frac{r_1}{r_o}\right) + \ln\left(\frac{r_1}{Bu}\right) + \sigma \cdot \ln\left(\frac{r_1^4}{r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}}\right) - \frac{\frac{r_o^2}{Bu^2} \left[1 - \sigma \cdot \frac{\frac{1}{4} Bu^4}{\left(r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}\right)} \right]^2}{\left\{ \frac{1+\beta}{1-\beta} + \frac{r_o^2}{Bu^2} \left[1 + \sigma \cdot \frac{Bu^4 \cdot r_1^4}{\left(r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}\right)^2} \right] \right\}} \right] \quad (3.1)$$

$$\sigma = \frac{\lambda_{Fill} - \lambda_{Earth}}{\lambda_{Fill} + \lambda_{Earth}} \quad (3.1a)$$

$$b = \frac{Bu}{2 \cdot r_1} \quad (3.1b)$$

$$\beta = \lambda_{Fill} \cdot \left[\frac{1}{r_o \cdot \alpha} + \frac{1}{\lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{r_s}{r_o}\right) \right] \quad (3.1c)$$

λ_{Fill} = conductivité thermique du matériel de remplissage

λ_{Earth} = conductivité thermique du terrain α = coefficient d'échange convectif

λ_s = conductivité thermique du conduit

La résistance R_b est donc fonction des caractéristiques géométriques de la sonde, du matériel de remplissage et du conduit, mais est indépendante de la profondeur (donc de la température). En effet dans l'équation 3.1 la profondeur et le gradient thermique n'interviennent pas dans le calcul de R_b , ni les échanges de température entre les fluides en



montant et en descendant sont pris en compte. Cependant, le paramètre B_u , qui indique la position réciproque des conduits dans le forage, influence également l'interaction thermique entre les conduits, tout comme la température du fluide caloporteur. Pour prendre en compte dans le modèle l'interaction entre le fluide en montant et en descendant une autre résistance thermique interne, R_a (cf. figure 1 ci-dessus), doit être définie. Pour une sonde double-U avec une configuration symétrique, cette résistance est définie par l'équation suivante [4] :

$$R_a = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{\text{Fill}}} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{2} \cdot b \cdot r_1}{r_o} \right) - \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot b \cdot r_1}{r_o} \right) - \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \ln \left(\frac{1-b^4}{1+b^4} \right) \right] + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \alpha} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln \left(\frac{r_3}{r_o} \right) \quad (3.2)$$

Les paramètres b et σ sont obtenus à partir des équations 3.1a et 3.1b ci-dessus.

Les trois termes de l'équation 3.2 correspondent respectivement à :

- la résistance thermique du remplissage entre les conduits (échange par conduction) ;
- la résistance entre le fluide et le conduit (échange convectif) ;
- la résistance de la paroi du conduit (échange par conduction).

Cette résistance, tenant compte des interactions thermiques entre les fluides en montant et en descendant, permet de calculer la résistance thermique réelle de la sonde, R_b^* :

$$R_b^* = R_b + \frac{1}{3R_a} \cdot \left(\frac{\Delta T}{\dot{q}} \right)^2 \quad (3.3)$$

\dot{q} =puissance de soutirage (W/m)

ΔT = différence de température du fluide entre l'entrée et la sortie de la sonde (K)

Idéalement, si cette résistance était nulle, la température du fluide serait équivalente à celle du terrain. Dans la réalité, une différence comprise entre 5 et 10 °C est attendue.

Si on analyse attentivement la section pour des profondeurs différentes, on se rend compte que des valeurs élevées de R_b et de R_a près de la surface pourraient limiter un refroidissement du fluide montant, dans le cas où sa température serait beaucoup plus élevée que celle du fluide descendant et du terrain en surface (typiquement dans le cas de sonde profonde).

Par contre, cette résistance devrait tendre à zéro vers le bas du forage, pour réduire la différence de température entre le fluide et le terrain (d'une température plus élevée par effet du gradient géothermique).

En effet si l'on exprime la différence de température entre le fluide à l'entrée et à la sortie de la sonde en fonction de la longueur de la sonde et de la puissance de soutirage, on trouve :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.4)$$



$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot H \quad (3.5)$$

$$R_b^* = R_b + \frac{1}{3R_a} \cdot \left(\frac{H}{\dot{m} \cdot c_p} \right)^2 \quad (3.6)$$

\dot{m} = débit massique (kg/s)

c_p = chaleur spécifique du fluide caloporteur (J/kgK)

H = longueur de la sonde (m)

Ce résultat très important démontre que la résistance thermique réelle d'une sonde géothermique, R_b^* , est fonction du carré de la profondeur. L'effet négatif des interactions thermiques entre les conduits devient donc de plus en plus important dans les cas des échangeurs profonds. L'intérêt d'avoir une résistance interne, R_a , élevée pourrait permettre de compenser en partie ces pertes de chaleur. Il est fondamental de séparer les contributions positives des échanges thermiques avec le terrain de celles négatives des interactions internes entre conduits. Une sonde géothermique idéale devrait avoir une résistance interne R_a élevée et une résistance R_b nulle. Dans la pratique, les paramètres qui permettraient de modifier ces résistances (type de conduit et géométrie, le régime d'écoulement et le matériel de remplissage) sont les mêmes (cf. équations 3.1 et 3.2). Pour tenter de trouver une solution, qui soit différente d'un compromis, il faut donc se poser la question si ces résistances doivent être constantes tout au long de la sonde, et sur quels paramètres il est possible d'intervenir.

L'influence de ces paramètres sur les performances du capteur sera analysée dans les paragraphes suivants.

3.2 Résistance thermique du fluide

La résistance thermique du fluide dépend de sa conductivité et du régime d'écoulement. L'échange thermique entre le fluide et la paroi du conduit se fait principalement par convection. Le coefficient d'échange thermique par convection est fonction du régime d'écoulement, caractérisé par le nombre de Reynolds (Re), lequel représente le rapport entre les forces d'inerties et les forces de viscosité du fluide et s'exprime avec la formule suivante :

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (3.7)$$

U : vitesse moyenne d'écoulement du fluide [m/s]

D : diamètre interne du conduit [m]

ν : viscosité cinématique du fluide [m²/s]

Un flux turbulent complètement développé ($Re > 4000$) permet de réduire sensiblement la résistance thermique du fluide par rapport à un flux laminaire ($Re < 2300$). Ce phénomène s'explique avec quelques notions de mécanique des fluides sur la couche limite de la paroi.



Cette couche étant plus épaisse pour un régime laminaire, la résistance thermique du fluide augmente. Une diminution du débit entraîne deux effets opposés sur le deuxième terme de l'équation 3.6:

- diminution de cette contribution avec une relation directement proportionnelle au débit par effet de l'augmentation de la résistance R_a (à cause de la relation inversement proportionnelle qui lie cette résistance au coefficient d'échange convectif, α , eq. 3.2 qui est fonction du débit);
- augmentation de cette contribution avec une relation inversement proportionnelle au carré du débit.

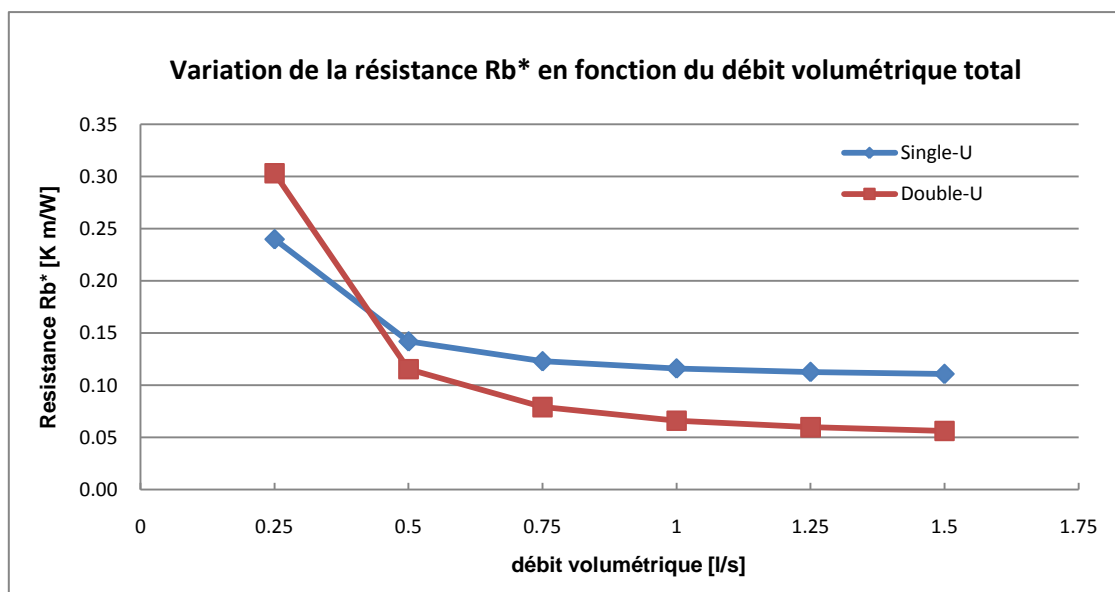
Donc globalement une baisse de débit entraîne une augmentation du deuxième terme de l'équation 3.6.

En ce qui concerne le premier terme de l'équation 3.6, la résistance R_b , qui dépend du coefficient d'échange convectif α (eq. 3.1c), est aussi inversement proportionnelle au débit.

Le résultat donc de la réduction du débit se traduit avec une augmentation de la résistance globale R_b^* , à travers une relation inversement proportionnelle ($\sim \frac{1}{\dot{m}}$).

Un flux turbulent, par contre, permet de réduire la couche limite par effet des vortex qui se forment et, donc, de réduire la R_b^* . Un débit typique pour une sonde double-U avec un diamètre interne de 40 mm est de 0,5 l/s (0.25 l/s par branche), en utilisant de l'eau comme fluide caloporteur.

La température agit aussi indirectement sur la détermination du nombre de Reynolds à travers la viscosité du fluide. Pour des températures plus élevées, la viscosité diminuant, le nombre de Reynolds augmente. Le graphique suivant représente la variation de la résistance R_b^* en fonction du débit volumétrique, pour les deux types de sondes (single-U et double-U) ayant un diamètre interne de 40 mm et une longueur de 200 mètres:



Graphique 5 : variation de la résistance R_b^* en fonction du débit volumétrique



Pour dresser les courbes du graphique ci-dessus, les calculs des R_b^* ont été faits en considérant comme fluide caloporteur de l'eau pure à une température moyenne de 10 °C et comme matériel de remplissage de la bentonite (conductivité 0.78 W/m/K). Les débits représentés au graphique 5 pour les deux sondes correspondent au débit total, donc la vitesse du flux à l'intérieur du conduit pour la sonde double-U est exactement la moitié de celle en single-U. Cette remarque est fondamentale pour comprendre que pour une résistance globale R_b^* , une sonde double-U, correctement utilisée, peut réduire sensiblement la puissance de pompage. En effet, pour obtenir une $R_b^*=0,11$ K/(W/m), le débit total passe de 0,5 l/s pour la sonde double à 1,5 l/s pour la single-U. Ce résultat semble apparemment contradictoire avec les lois de la mécanique des fluides, car pour le même débit, la sonde single-U présente des Reynolds doubles par rapport à l'autre sonde et donc une résistance thermique inférieure sur la paroi (couche limite plus mince). Cela signifie en fait que la contribution de la résistance thermique du fluide pour un régime turbulent complètement développé (0,5 l/s pour la sonde single-U et 1 l/s pour la double), confrontée aux autres résistances, est inférieure et tend à zéro. Ce raisonnement est confirmé par l'asymptote horizontale des courbes, qui souligne encore une fois qu'il est inutile d'augmenter le débit total, et donc la puissance de pompage, mais il est plus important d'intervenir sur la résistance thermique du remplissage et celle du conduit (eq. 3.1) pour tenter de baisser la valeur de R_b^* . Par contre, en regardant la tendance de la courbe pour des faibles débits, surtout celle de la sonde double, on constate clairement l'effet de la transition entre le régime laminaire et le turbulent ($2300 < Re < 4000$): la résistance de la sonde liée au débit augmente avec une loi exponentielle et R_b^* dépasse celle de la sonde single-U. Pour ce débit, 0,25 l/s, le régime dans la sonde double est proche du laminaire ($Re=2500$) et les contributions de la résistance thermique du fluide, couche limite épaisse, et du rapport $\frac{1}{m}$ ne sont plus négligeables. Dans la sonde single-U, par contre, le régime est turbulent ($Re \sim 6000$), ce qui permet une amélioration des prestations par rapport à la sonde double par effet de la réduction de la couche limite et donc d'un meilleur coefficient d'échange convectif.

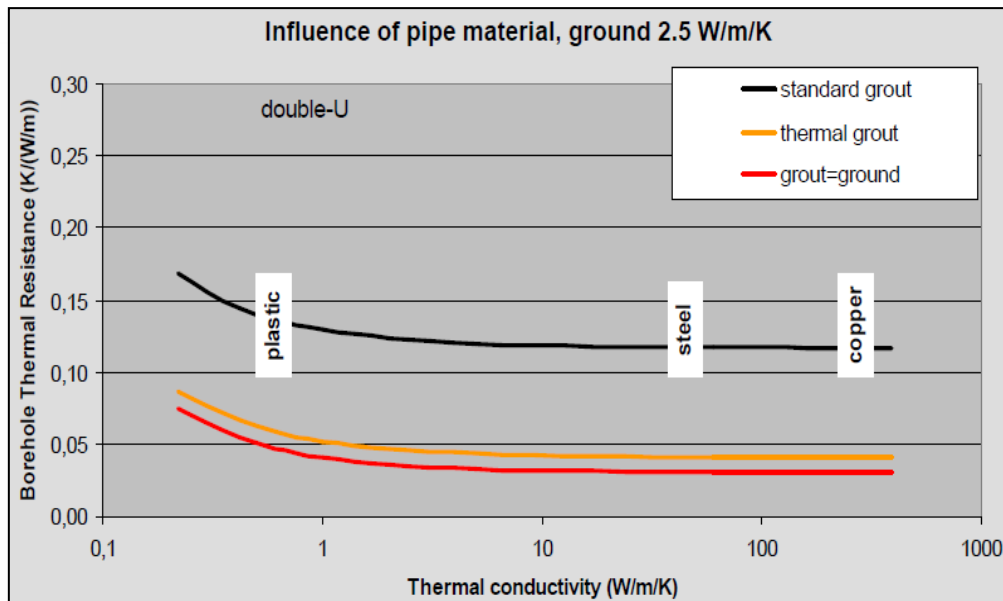
Comme conséquence, si on choisit d'utiliser comme capteur une sonde double pour obtenir une résistance thermique totale faible par rapport à une sonde simple-U, il est indispensable de garantir un débit total minimum, dans ce cas supérieur à 0,5 l/s, sinon au final on risquera de se retrouver avec une résistance thermique qui sera plus élevée que la sonde simple-U. Il est aussi indispensable de faire un bilan entre l'énergie utilisée par les pompes pour atteindre un régime turbulent et le gain effectif conséquent sur l'extraction de la chaleur du terrain par effet de la réduction de la résistance thermique effective de la sonde (R_b^*) ; une étude sur cette question est proposée par Matthey et Pahud [2].

3.3 Résistance thermique du conduit

La résistance thermique du conduit, est une résistance liée à un échange thermique purement par conduction. Sa valeur est inversement proportionnelle à la conductivité du matériel utilisé pour le conduit et à son épaisseur. La conductivité thermique du matériel est extrêmement variable, de 0,32 W/m/K pour du PE à 380 W/m/K pour du cuivre. Malgré cette grande différence (presque un rapport 1/1000), le gain conséquent à l'utilisation d'un matériel plus performant n'est malheureusement pas directement proportionnel. Les épaisseurs assez petites du conduit, entre 3 et 5 mm, jouent un rôle important et peuvent peut-être expliquer la raison de cette variation limitée. Le graphique suivant montre la variation de la



résistance thermique totale en fonction de la résistance du matériel des conduits (courbe noir), comparée avec des solutions qui utilisent des matériaux de remplissage améliorés (courbes jaune et rouge).



Graphique 6 : influence de la conductivité thermique du matériel du conduit sur la résistance thermique globale de la sonde (les matériaux « plastic », « steel » et « copper » sont indiqués comme référence)

La tendance des trois courbes en fonction de la conductivité thermique du conduit est claire et donne une indication évidente par rapport au paramètre de la sonde sur lequel il faut baser l'optimisation. Ce sujet sera traité dans le paragraphe suivant.

3.4 Matériel de remplissage

Un mélange bentonite-ciment est utilisé couramment pour le remplissage des forages, son rôle principal consiste à étanchéifier le forage afin d'éviter le mélange des eaux souterraines par des eaux de surface, souvent polluées. En effet, la bentonite est une argile qui possède une bonne stabilité dans le temps et qui permet de séparer les aquifères éventuellement rencontrés sur les différents niveaux; malheureusement sa basse conductivité thermique, $0,79 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, par rapport à des valeurs typiques du terrain entre 2 et $4 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, représente une grande résistance pour le flux thermique. Dans les dernières années, la recherche s'est orientée sur des remplissages à base de bentonite « dopée » avec des matériaux conducteurs comme le graphite et le silicium, capables d'améliorer la conductivité du mélange jusqu'à $2 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ (ThermoCem®). Cette approche est justifiée dans le cas traditionnel de sonde peu profonde, où l'objectif est l'augmentation de la conductivité entre l'échangeur et le terrain sur toute la profondeur. Il ne faut pas oublier que dans le cas de sondes profondes, une augmentation de la conductivité du matériel de remplissage, près de la surface, risque de produire des effets non désirés, à cause des deux contributions négatives liées à la réduction de R_a et de R_b :

- celui du court circuit, augmenté par la meilleure conductivité entre les conduits par effet du matériel de remplissage plus performant;
- le refroidissement ultérieur du fluide montant qui réchauffe le terrain, à cause de la meilleure conductivité du matériel de remplissage également.



Le remplissage de la sonde avec des matériaux solides est caractéristique des installations de l'Europe centrale et soumis à une réglementation; en Suède par contre les forages sont normalement remplis d'eau jusqu'à quelques mètres de la surface. Cette solution, apparemment pas très efficace à cause de la faible conductivité thermique de l'eau, 0,59 W/(m*K), améliore l'échange de chaleur entre la sonde et le terrain par effet des flux convectifs naturels qui se forment dans l'eau de remplissage ; dans le test de réponse thermique, cet effet correspond à une réduction de la résistance totale (d'un facteur d'environ 4 selon Gustafsson et Westerlund [4]). En effet une puissance de soutirage plus élevée augmente la différence de température entre le fluide caloporteur et l'eau de remplissage, en générant des flux à l'intérieur du forage par effet de la variation de la densité de l'eau. L'échange de chaleur entre la sonde et le terrain dans ce cas ne se fait plus purement par conduction, mais aussi par convection et le système a l'avantage de se régler automatiquement en fonction de la puissance soutirée.

Par contre, un remplissage avec de l'eau comporte des contraintes sur le choix du fluide caloporteur, typiquement de l'eau pour éviter les risques de contamination des nappes phréatiques, et donc sur les températures de fonctionnement. C'est pour cette raison qu'en Suisse toutes les installations étudiées utilisent des matériaux solides, la solution utilisant l'eau n'étant pas prévue dans l'aide à l'exécution « Exploitation de la chaleur du sol et du sous-sol » éditée par l'OFEV en 2009.

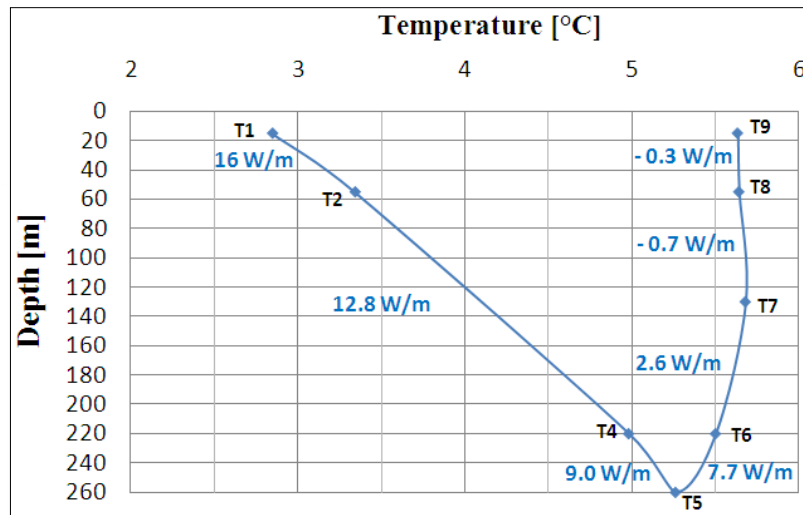
4. Analyse du problème et exemple réel

Pour obtenir une température élevée à la sortie de la sonde, il semble logique de réaliser un forage profond pour profiter du gradient géothermique.

Les équations théoriques du paragraphe 3.1 indiquent cependant que la résistance globale de la sonde R_b^* augmente avec la profondeur. Avec la sonde standard en double-U, l'augmentation du gradient ne permettrait pas forcément d'augmenter la température à la sortie de la sonde, car les pertes de chaleur sont supérieures dans les capteurs profonds.

La température moyenne du fluide caloporteur est fonction du gradient géothermique et donc de la profondeur du capteur; il est fondamental que cette température reste la plus élevée possible.

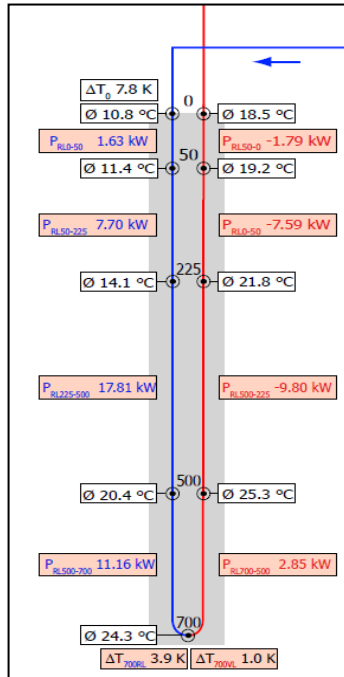
De manière générale, la majeure partie de l'échange thermique a lieu dans le conduit descendant, la différence entre la température moyenne du fluide et le terrain étant plus élevée dans la partie en descendant. Ceci est particulièrement visible sur le graphique suivant, qui se réfère à une sonde géothermique simple U :



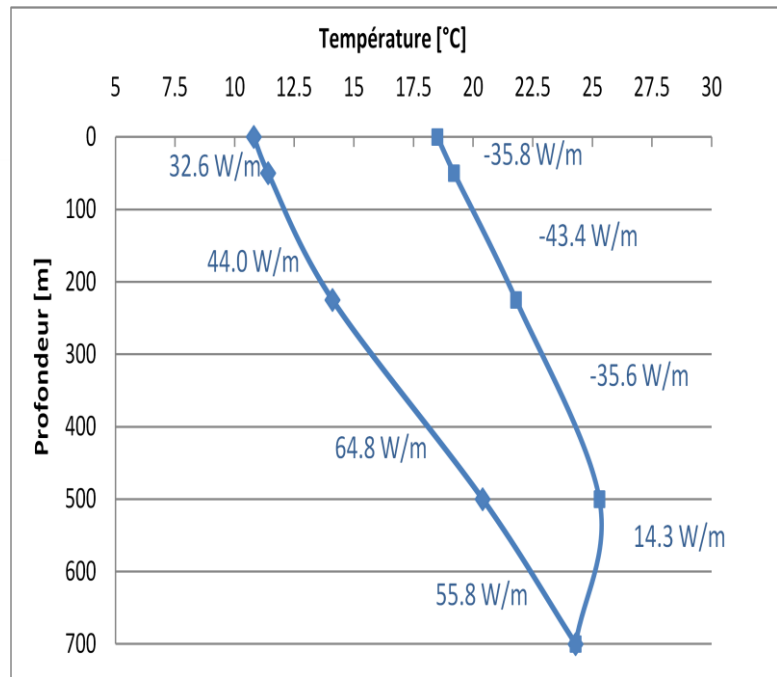
Graphique 7 : profil de température d'une sonde de 260 mètres en fonction de la profondeur (Acuna, [6])

Pour la sonde représentée dans ce graphique, environ 75% de l'échange thermique se fait dans le conduit descendant, ce qui permet d'atteindre presque la température maximale déjà au pied de la sonde. La contribution énergétique apportée par la partie droite du graphique (fluide qui remonte vers la surface) est très faible, voire même négative dans la partie supérieure, laquelle présente une tendance inverse des puissances de soutirage, soit un refroidissement de la sonde par effet du terrain et du fluide froid descendant. Ces considérations sont spécifiques à la sonde simple U étudiée par Acuna [6] mais, de manière générale, le graphique 7 donne une idée sur l'évolution de la température en fonction de la profondeur qui est valable pour d'autres sondes.

Un autre exemple d'installation réalisée à Oftringen [7], avec une sonde descendant à environ 700 mètres, permet de comprendre l'importance de l'optimisation du capteur pour des installations profondes. En effet, dans ce cas le gradient géothermique mesuré lors du forage étant élevé, environ $0.06^{\circ}\text{C}/\text{m}$, ceci a conduit à la réalisation d'un système de chauffage direct, donc sans pompe à chaleur, mais en faisant recours à un ventilateur-convecteur, pour tester la sonde. La température du fluide caloporteur mesurée à la sortie de la sonde lors de la mise en service était d'environ 20°C , ce qui semblait un bon résultat ; par contre, si on considère qu'au démarrage la température à 700 mètres était de presque 50°C , on comprend que le potentiel du forage n'est pas complètement exploité. Les graphiques ci dessous, issus du rapport rédigé pour l'OFEN, montrent les températures pour les différents niveaux de la sonde.



Graphique 8 : sonde Oftringen [7]



Graphique 9 : profil de températures de la sonde en fonction de la profondeur

Sur le graphique 8 sont aussi reportées les valeurs des puissances d'échange thermique (kW), calculées avec un bilan énergétique entre les niveaux (les températures, le débit et les propriétés du fluide étant connus); dans le graphique 9, les valeurs des puissances spécifiques (W/m) indiquées, sont obtenues en divisant simplement la puissance d'échange thermique par la longueur du tronçon correspondant à l'échange. Les valeurs positives sont relatives à une augmentation de la température, dans ce cas il y a une extraction de chaleur du terrain. Les puissances négatives sont liées à une baisse de température et correspondent à une perte de chaleur. Le sens de l'échange thermique est opposé et se dirige dans ce cas vers l'extérieur (réchauffement du terrain et du conduit descendant).

On s'aperçoit tout de suite que, dans le conduit montant, ces puissances sont presque toutes négatives, pour un total d'environ 19 kW. La somme des puissances d'extraction est de 40 kW, ce qui fait un bilan de +21 kW de puissance thermique extraite de la sonde, mais avec des pertes d'environ 50%.

Dans la réalisation de cette sonde, aucune précaution n'a été prise pour éviter l'interaction thermique entre les conduits. Le matériel de remplissage utilisé est du type ThermoCem®, qui est sûrement bien adapté pour améliorer l'échange en profondeur, mais peut être pas le meilleur choix pour réduire, proche de la surface, les échanges de chaleur avec le terrain et entre les conduits.

Par contre, l'équipement utilisé pour le monitoring et le bon travail d'analyse qui a été effectué sur ce système sont des éléments fondamentaux qui permettront de faire avancer la recherche dans ce domaine.

5. Optimisation de la sonde



Comme expliqué dans le paragraphe 3.1, la résistance interne R_a doit être la plus élevée possible près de la surface, pour limiter les échanges de chaleur entre les deux conduits. Cette résistance est le résultat de trois contributions: géométrie, matériel du conduit et matériel de remplissage entre les conduits. Il faut donc intervenir sur ces éléments pour changer la valeur de R_a en fonction de la profondeur, tout en conservant une résistance thermique R_b plutôt basse pour permettre un bon échange de chaleur entre la sonde et le terrain.

5.1 Remplissage différent

Dans le cas des capteurs profonds, un remplissage avec un matériel différent en fonction de la profondeur permettrait de réaliser une résistance thermique progressive vers la surface, en améliorant le rendement de la sonde. En effet, cette solution a été utilisée pour une installation moyennement profonde, 400 mètres, à Zurich. Dans ce cas, le remplissage a été effectué avec trois matériaux ayant une résistance thermique différente, en mettant le plus conducteur en profondeur et en utilisant de la bentonite avec deux pourcentages différents d'eau pour la partie supérieure. Cette solution a permis à la fois d'optimiser l'échange thermique en profondeur grâce à une conductivité du matériel de $\lambda=2$ W/m K et de réduire les pertes en montant grâce à la basse conductivité de la bentonite (R_a plus élevée). L'utilisation de différents types de remplissage permet de contourner aussi un autre problème; en effet, ces matériaux de remplissage performants ne sont pas beaucoup utilisés pour des applications profondes, car étant donnée leur densité supérieure à celle de la bentonite classique d'environ 50%, la pression litostatique du matériel sur les parois de la sonde devient trop importante et risque de déformer les conduits et parfois de les écraser complètement. Cet effet ne doit pas être sous-estimé pour des applications profondes et, un procédé correct lors de l'installation du capteur dans le forage, peut réduire les déformations sur la sonde. La méthode la plus utilisée consiste à remplir la sonde avec de l'eau avant de couler le matériel dans le forage; la pression exercée par la colonne d'eau (par exemple 50 bar pour 500 mètres) s'oppose à celle du remplissage, permettant d'utiliser une sonde avec une épaisseur de paroi plus faible et donc une résistance thermique inférieure.

5.2 Géométrie

Un changement de géométrie pourrait également être une piste d'amélioration. En effet, les sondes géothermiques profondes se rapprochent de plus en plus vers des technologies liées à la moyenne profondeur, lesquelles pourraient inspirer des développements.

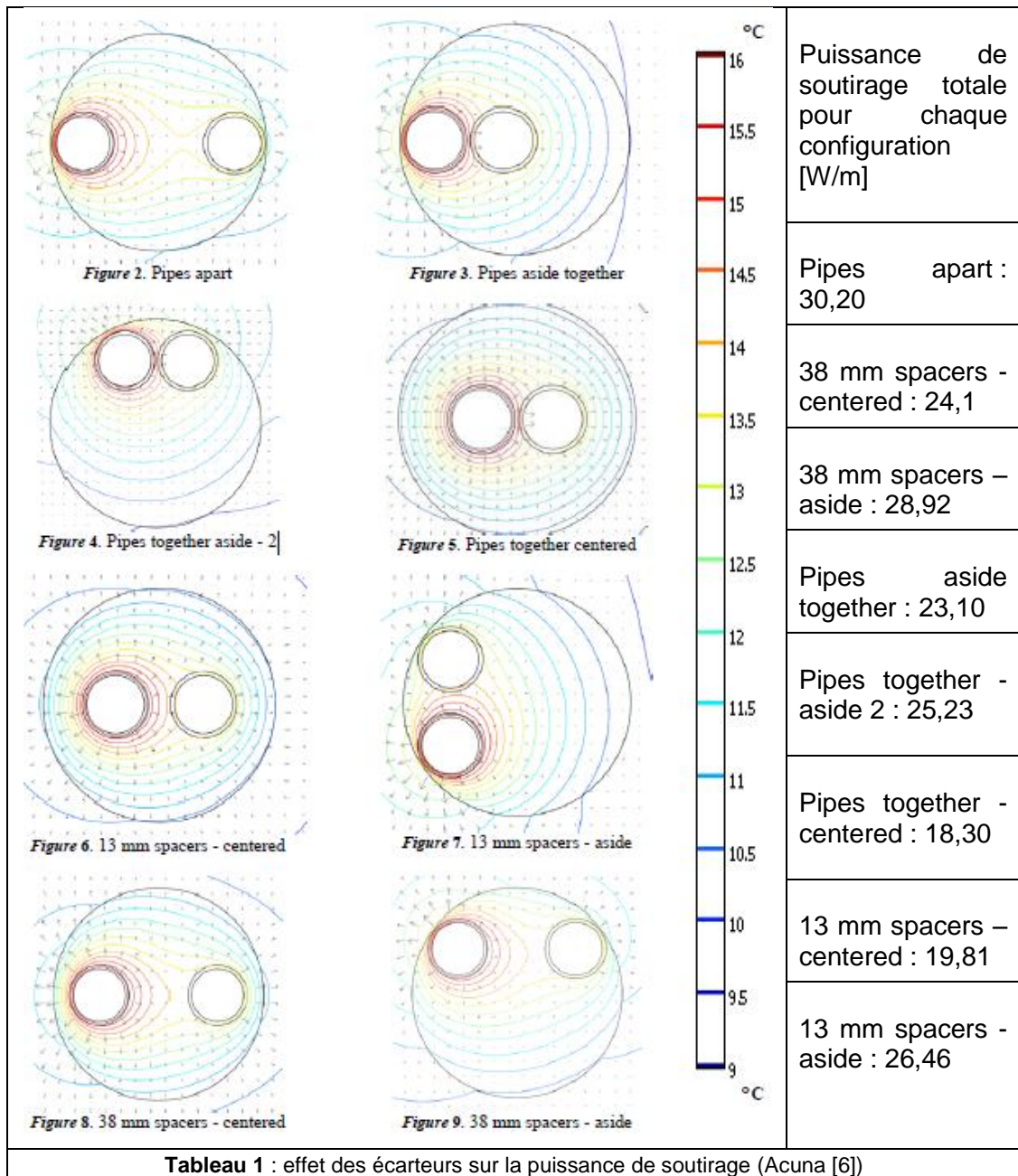
Par exemple, pour l'exploitation de la chaleur du sous-sol de moyenne profondeur, on fait en général recours à des échangeurs coaxiaux. Le fluide est injecté dans l'espace annulaire, se réchauffe en descendant vers le fond du forage et remonte par un tuyau central, plus petit et pouvant être isolé pour limiter les échanges avec le fluide, plus froid, qui descend.

Des applications de ce type sont en cours de développement pour le futur quartier des Plaines-du-Loup à Lausanne, pour lequel des sondes géothermiques de 800 mètres sont prévues.

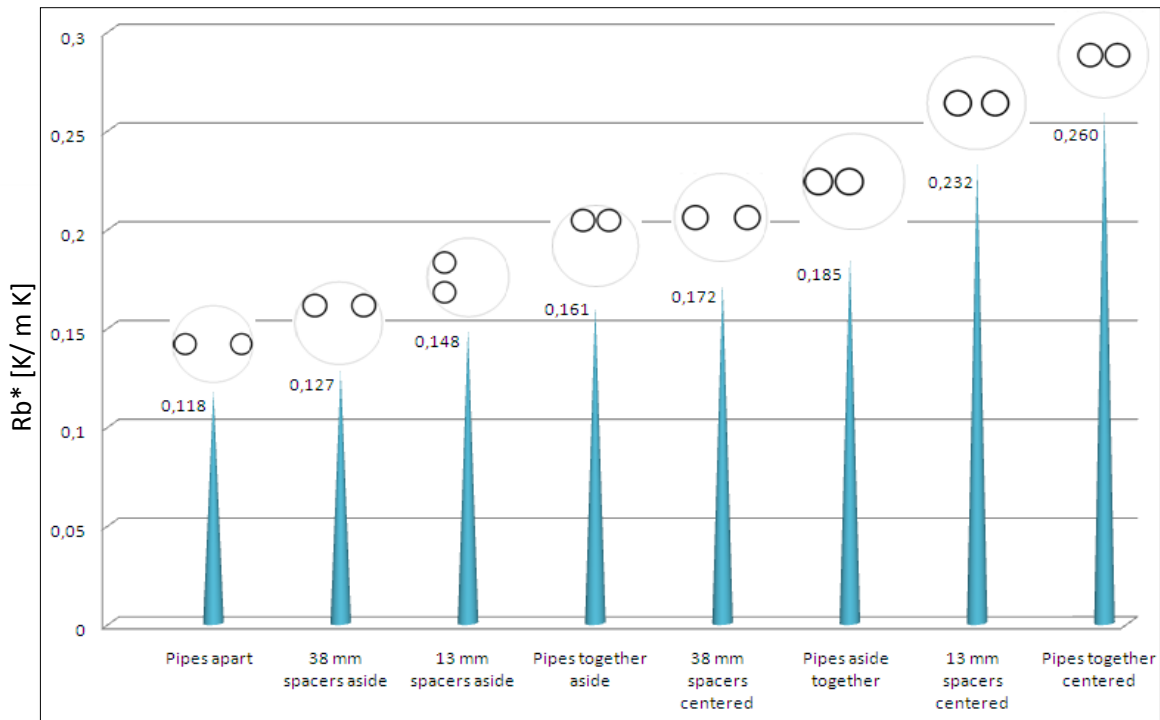


5.3 Utilisation d'écarteurs

Une autre solution pour tenter d'optimiser le système en réduisant le court circuit thermique est représentée par des éléments écarteurs (spacer) introduits pour éloigner les conduits. Dans ce cas, on intervient sur les paramètres géométriques de l'équation 3.2 pour obtenir une augmentation de la résistance thermique interne R_a et une réduction de la résistance R_b . Les effets sur la puissance de soutirage sont visibles ci-dessous dans le tableau 1, issu d'une étude réalisée par Acuna et Palm [6] et présentent clairement les effets négatifs du court circuit thermique pour une sonde single-U de 100 mètres:





Dans le graphique suivant, la variation conséquente de la résistance R_b^* est représentée en fonction de la position réciproque des conduits, pour la même sonde :



Graphique 10 : impact des écarteurs et de la position des conduits sur la résistance thermique Rb^* (Acuna [6])

Il est intéressant de remarquer qu'une sonde équipée avec des écarteurs (spacers) ne présente pas forcément une résistance Rb^* inférieure. La disposition des conduits dans la section de la sonde est un autre paramètre qu'il faut considérer et qui agit sur la valeur de Ra et de Rb . En effet, des conduits séparés, mais bien centrés à l'intérieur du forage, présentent une résistance Rb plus élevée à cause de l'augmentation de la résistance thermique avec le terrain (épaisseur du matériel plus importante). C'est pour cette raison que d'autres systèmes ont été étudiés, comme, par exemple, des écarteurs à ressort qui poussent les conduits vers la paroi du forage permettant de maximiser la distance entre les conduits et en améliorant le contact avec la paroi du forage (ex. GeoClip). L'utilisation de ce type de système a donc un effet positif multiple sur la résistance effective Rb^* , car ces éléments agissent à la fois sur la résistance interne (Ra), laquelle augmente en fonction de la distance entre les conduits, et sur la résistance entre la sonde et le terrain (Rb inférieure), par effet de la réduction de l'épaisseur du matériel entre les deux. Les effets de cette solution sont visibles dans le tableau qui suit :



GeoClip™: Equivalent Borehole Conductivity & Increase in Heat Transfer Rate										
Grout Material		Conductivity improvement achieved by placing GHEX pipes "Along Outer Wall" of the Borehole: 								
		Ø25mm GHEX pipe			Ø32mm GHEX pipe			Ø40mm GHEX pipe		
Bentonite Silica Sand	T.C. Grout 	114 mm* Bore	127 mm Bore	150 mm Bore	114 mm* Bore	127 mm Bore	150 mm Bore	114 mm Bore	127 mm* Bore	150 mm Bore
	(w/m °K)	(w/m °K)	(w/m °K)	(w/m °K)	(w/m °K)	(w/m °K)	(w/m °K)	(w/m °K)	(w/m °K)	(w/m °K)
1:0	0.78	1.37	1.38	1.45	1.30	1.32	1.38	1.23	1.26	1.32
1:1	0.99	1.71	1.77	1.83	1.64	1.68	1.75	1.56	1.59	1.66
1:2	1.19	2.08	2.13	2.22	1.97	2.03	2.11	1.89	1.92	2.01
1:3	1.38	2.42	2.48	2.58	2.30	2.35	2.46	2.18	2.23	2.32
1:4	1.58	2.75	2.82	2.93	2.61	2.68	2.79	2.48	2.54	2.65
Increase		74.45%	78.65%	86.15%	65.82%	69.81%	76.94%	57.66%	61.46%	68.21%

* MINIMUM RECOMMENDED BOREHOLE DIAMETER

Tableau 2 : variation de la conductivité thermique équivalente du remplissage en utilisant des écarteurs GeoClip™

Les valeurs indiquées sont données par « GBT » qui est le fournisseur de ces éléments et doivent être considérées avec précaution. Ce tableau montre l'influence des écarteurs sur la conductivité moyenne du remplissage. En effet, en utilisant un remplissage en bentonite pure (0.78 W/mK, première ligne des valeurs), le recours à des écarteurs permettrait d'augmenter la conductivité moyenne du remplissage entre 1.37 et 1.45 W/mK (en fonction du diamètre du forage) pour la sonde de 25 mm de diamètre, ce qui serait équivalent à utiliser un mélange 1:3 de bentonite et sable (quatrième ligne des valeurs) avec une sonde sans écarteurs.

L'utilisation de ce type d'écarteurs à ressort semble une solution très intéressante pour des installations peu profondes, mais risque de ne pas produire les mêmes effets positifs pour des sondes profondes. En effet, l'installation de ces éléments écarteurs pourrait améliorer le contact thermique entre le fluide montant, chaud, et le terrain plus froid. Il est donc nécessaire de bien étudier les niveaux de température du fluide et du terrain, pour pouvoir ensuite calculer la longueur optimale sur laquelle insérer les écarteurs.

Comme tout élément qui vient se rajouter à une installation standard, la pose d'écarteurs entraîne des coûts supplémentaires lors de l'installation des sondes dans le forage. En effet, l'application de ces éléments sur les conduits, tous les 3-4 mètres, nécessite un arrêt du système de pose. Surtout dans le cas de sondes profondes, le redémarrage de ce système peut être très difficile à cause des frottements des conduits contre les parois du forage. Une solution à la fois plus rapide et efficace des écarteurs consiste à utiliser un conduit de remplissage, centré, avec un diamètre plus élevé, par exemple de 40 mm, qui permet d'éloigner les conduits et sert ensuite comme tuyau d'injection du matériel de remplissage. Cette solution a été finalement appliquée au projet Sirius. La totalité des sondes a été injectée en utilisant 3 tuyaux d'injection de différentes longueurs. Ceci a permis, d'une part, d'éviter l'écrasement de la sonde par la pression du matériel de remplissage en réalisant l'injection en trois étapes et, d'autre part d'ajouter des éléments, les tuyaux d'injection, permettant d'éloigner les conduits de la sonde et de réduire la conductivité du remplissage (la conductivité thermique du plastique étant moins bonne que celle du matériel de remplissage).



5.4 Isolation du conduit en montant

Dans le paragraphe précédent, l'utilisation de plusieurs matériaux de remplissage ayant une résistance variable, a été indiquée comme une des solutions pour réduire l'échange entre les conduits, en augmentant la résistance interne R_a . Cette solution augmente par contre aussi la résistance R_b entre le fluide et le terrain, car le matériel de remplissage est moins conducteur. Dans le cas d'une sonde profonde, cet aspect pourrait améliorer le rendement de la sonde, en limitant les échanges thermique du fluide montant.

L'adoption d'une isolation de type classique Tubolit® (isolation des tuyaux de chauffage) uniquement sur le conduit montant semble être une bonne approche.

Cette solution a été étudiée sur deux installations existantes en Suisse. La première, à Otelfingen [8], est équipée avec deux sondes à 220 mètres, l'une isolée sur les 20 derniers mètres, pour permettre une comparaison. La seconde [9], à Aarau, a été réalisée avec 16 sondes de 150 mètres, dont 8 sont isolées sur les 8 derniers mètres. Les résultats indiquent une augmentation du COPA de 8% à 10% dans les deux cas. Malheureusement cette solution entraîne des coûts supplémentaires autres que l'isolation : en effet la réalisation d'un forage avec un diamètre plus grand est nécessaire pour permettre une installation facile des sondes isolées (plus volumineuses). Les temps d'amortissement de l'investissement sont d'environ 15 ans pour l'installation à 220 mètres et de 18 ans pour celle à 150 mètres. Ce résultat n'est pas étonnant car, en descendant plus en profondeur, la température moyenne du fluide caloporteur augmente et donc la nécessité d'éviter tout échange avec le terrain devient évidente ; par conséquent l'investissement plus élevé dans le cas de la sonde à 220 mètres, avec 20 mètres d'isolation, est rentabilisé plus rapidement par rapport à celui de la sonde à 150 mètres.

L'isolation du conduit montant pourrait devenir très intéressante pour des applications profondes, car même un retour sur l'investissement de 15 ans permettrait une économie d'énergie non négligeable en tenant compte d'une durée de vie de la sonde d'environ 40 ans.

Par contre, l'effet isolant obtenu en appliquant de la Tubolit® est aussi réduit par la pression litostatique du matériau de remplissage, lequel a tendance à écraser la mousse, réduisant la résistance thermique de l'isolant. Pour cette raison une utilisation de ce produit, ou similaire, pour une isolation sur une longueur supérieure est en général déconseillée.

C'est finalement cette solution d'amélioration de la sonde qui a été retenue dans le cadre du projet Sirius. La totalité des sondes a été équipée avec une couche isolante de quelques millimètres (2 environ) en polypropylène, laquelle a été installée à la fabrication sur les deux conduits en montant jusqu'à 120 mètres de profondeur.

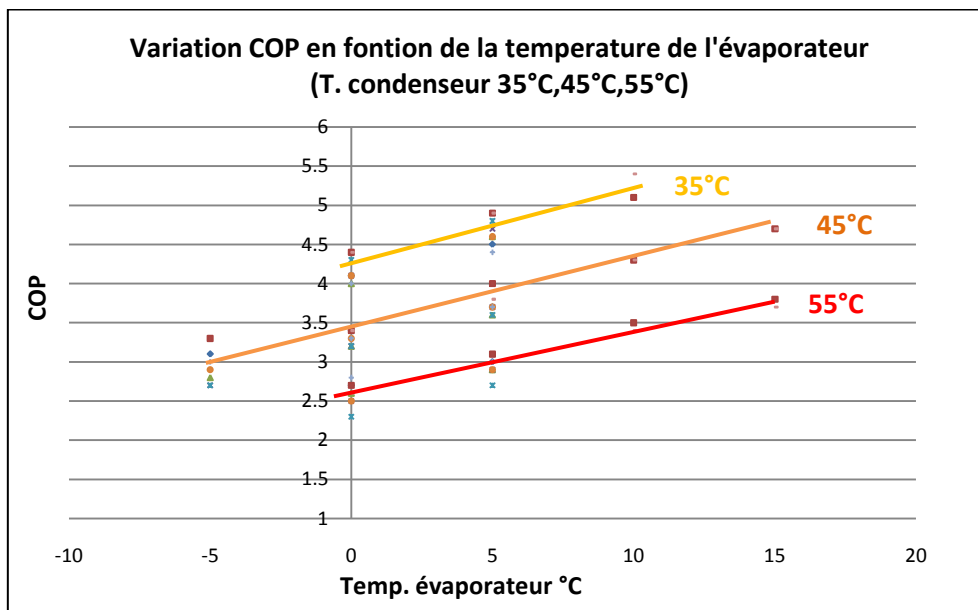


6. Le COP de la PAC

Les niveaux de température à la sortie de la sonde, et en particulier les températures à l'évaporateur de la PAC, ont une influence sur son coefficient de performance (COP).

Les valeurs de COP prises en compte dans le modèle développé par les SiL pour les simulations sont issues des tests réalisés par le *Wärmepumpen-Testzentrum* de Buchs (WPZ) sur des pompes à chaleur d'une puissance thermique comparable à celles prévues dans le projet Sirius, soit entre 50 et 80 kW_{th}.

Le graphique suivant représente, pour trois différentes températures du condenseur, la variation du COP de la pompe à chaleur, en fonction de la température à l'évaporateur, qui correspond, grosso modo, en utilisant un bon échangeur, à la température à de sortie de la sonde (PAC en mode chauffage).



Graphique 11 : variation du COP en fonction des températures de l'évaporateur pour 3 températures au condenseur.

La tendance des trois courbes est claire et la relation qui lie la température de l'évaporateur et le COP est linéaire. La pente de la courbe de régression passe de 0.124 à 0.074 pour une variation de température au condenseur de 35°C à 55°C. Pour une température au condenseur plus élevée, la même variation de température sur l'évaporateur a moins d'influence sur le COP (droite moins inclinée).

Une augmentation de la température à l'évaporateur de 10°C comporte en moyenne, sur les PAC étudiées, une augmentation du COP de respectivement 1.24 et 0.74 pour des températures au condenseur de 35°C et 55°C (soit 27% et 13% sur le COP).

Une réduction de la différence de température entre l'évaporateur et le condenseur correspond à une augmentation du COP, d'où l'intérêt de garder des températures basses au condenseur et de tenter d'augmenter celles à l'évaporateur. Rappelons que cette dernière, dans le cas de PAC géothermiques, est liée à la profondeur du forage.

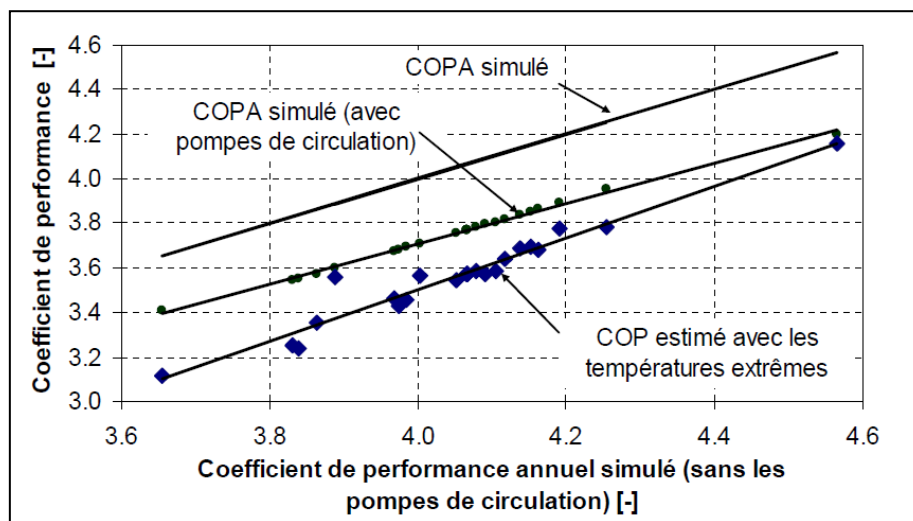
7. Estimation du COPA à partir des températures extrêmes

Comme il a déjà été montré dans le paragraphe précédent, les niveaux de température à l'évaporateur et au condenseur jouent un rôle très important dans la détermination du COP,



qui est un coefficient de performance instantané, strictement lié aux conditions de fonctionnement.

A partir des températures extrêmes des fluides à la sortie du condenseur et à l'entrée de l'évaporateur, il est possible de faire une estimation du coefficient de performance annuel (COPA) du système. En utilisant la température minimale du fluide caloporteur à la sortie des sondes et la température maximale de la production de chaleur, on trouve un COP minimum instantané, qui est très proche du coefficient de performance annuel. Cette approche est confirmée par une étude de Pahud, sur une installation de pompe à chaleur géothermique près de Lugano [10]. Le graphique suivant est issu de ce rapport et montre l'erreur d'approximation commise en utilisant cette méthode. Le COP obtenu avec les températures extrêmes est comparé au COPA évalué sur plusieurs simulations :



Graphique 12 : comparaison entre COPA simulé et COP estimé avec les températures extrêmes

Selon ce graphique, pour tous les cas simulés, l'estimation du COPA sur la base des températures extrêmes donne un résultat conservatif par rapport aux simulations avec pompes de circulation. L'estimation du COPA est de 0.4 à 0.5 points plus basse que la valeur du COPA simulé sans pompes de circulation, ce qui correspond à une marge de sécurité de 10 à 15%. En comparant le COP estimé avec les températures extrêmes et le COPA qui contient l'énergie électrique des pompes de circulation (circuits sondes et condenseur), l'erreur d'estimation est réduite à moins de 10%, soit de 0.1 à 0.3 points.

En d'autres termes, la détermination du COPA par les températures extrêmes, permet d'obtenir une estimation conservatrice des performances de l'installation, tout en considérant les consommations auxiliaires.

En considérant les tendances du COP et du COPA, avec les pompes de circulation, on observe que, pour des COPA élevés, l'incidence des consommations auxiliaires est supérieure. En effet, dans le cas de systèmes plus performants, l'influence des consommations électriques est plus ressentie par l'installation. Il est donc très important, dans un projet visant un COPA élevé, de ne pas sous estimer l'incidence des pompes de circulation sur les prestations globales du système. Pour cette raison un dimensionnement



précis du circuit hydraulique permettrait de limiter les pertes de charge et maintenir le COPA le plus élevé possible.

8. Paramètres influents et optimisation du champ de sondes

Plusieurs configurations ont été évaluées à l'aide du logiciel EWS² pour comprendre l'influence de la configuration et de la distance utilisée pour un champ de sondes. En effet l'influence mutuelle entre les sondes n'est pas négligeable et l'on commettrait une grosse erreur d'approximation sur les températures en n'intégrant pas dans les calculs l'interaction thermique entre des sondes.

L'interaction thermique entre les sondes est un phénomène très complexe qui dépend non seulement de la distance entre les capteurs et de la configuration utilisée, mais également du temps de fonctionnement. Chaque configuration est décrite par une courbe typique, qui prend le nom de fonction g (g-fonction), développée pour la première fois par Eskilson [11]. Le calcul de la valeur g permet de calculer la température de la paroi externe de la sonde après un certain temps de fonctionnement. Les équations suivantes sont utilisées pour ce calcul :

$$T_b(t) = T_m - \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda} g\left(Es, \frac{r_b}{H}\right) \quad \text{eq. 8.1} \quad \text{ou} \quad \dot{q} = \frac{T_m - T_b(t)}{R_g(t)} \quad \text{eq.8.2}$$

$$R_g(t) = \frac{1}{2\pi\lambda} g\left(Es, \frac{r_b}{H}\right) \quad \text{eq.8.3}$$

T_b(t)= température de la paroi pour un temps de fonctionnement t (T)

T_m= température moyenne du terrain avant l'extraction (°C)

q̇=puissance d'extraction (W/m)

R_g(t)=résistance thermique variable en fonction du temps

Es= Eskilson number

r_b= rayon du forage (m)

H= profondeur forage (m)

Le paramètre R_g(t) représente en effet une résistance thermique variable avec le temps, qui permet de calculer, selon l'équation suivante, avec la résistance R_b* (résistance effective de la sonde), la température du fluide à la sortie de la sonde après un certain temps de fonctionnement de l'installation:

$$T_{\text{out}} = T_m - (R_g(t) + R_b^*) \quad \text{eq. 8.4}$$

Cette résistance R_g(t) est directement proportionnelle à la valeur de g ; par conséquent, la température du fluide caloporteur est inversement proportionnelle à g. Une variation de g

² Autor : Huber Energietechnik AG (HETAG)



comporte relativement le même changement sur la température mais en sens inverse ; par exemple, à une baisse de 10% de g correspond une augmentation de la température de 10%.

Le nombre d'Eskilson est un paramètre très important dans la détermination de la fonction g et donc de la température de sortie du fluide caloporteur. En effet Es dépend des caractéristiques de la sonde et du terrain et est défini par les équations suivantes :

$$Es = \frac{t}{t_s} \quad \text{eq. 8.5}$$

$$t_s = \frac{H^2}{9a} \quad \text{eq. 8.6}$$

t = temps de fonctionnement (s)

t_s = temps typique de la sonde (s)

a = diffusivité thermique du terrain

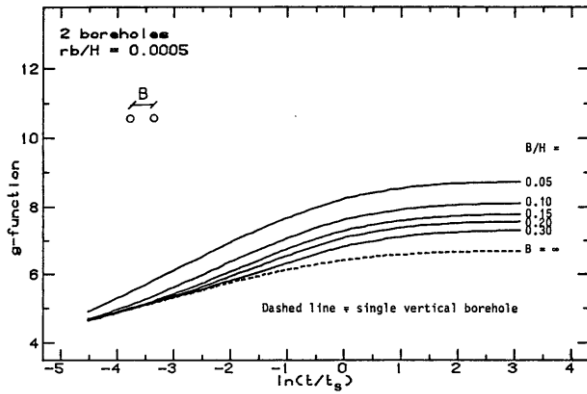
Selon les différents cas, une fois calculé Es , il est possible de déterminer la valeur de g , grâce aux équations suivantes :

$$g\left(Es > 1, \frac{r_b}{H}\right) = \ln\left(\frac{H}{2r_b}\right) \quad (r_b \ll H) \quad \text{eq. 6.7}$$

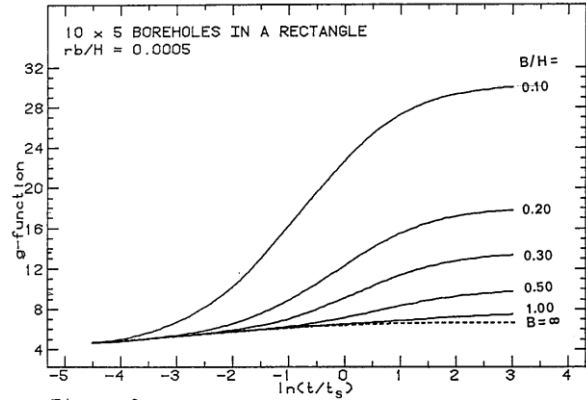
$$g\left(\frac{5r_b^2}{at_s} < Es < 1, \frac{r_b}{H}\right) = \ln\left(\frac{H}{2r_b}\right) + \frac{1}{2}\ln(Es) \quad \text{eq. 6.8}$$

Ces équations permettent de calculer la fonction g pour toutes les configurations possibles en utilisant le modèle de superposition (Superposition Borehole Model) développé par Eskilson. Dans ce modèle, l'interaction entre les sondes est calculée avec le paramètre adimensionnel B/H , qui tient compte de la distance B entre les sondes et de leurs profondeurs H .

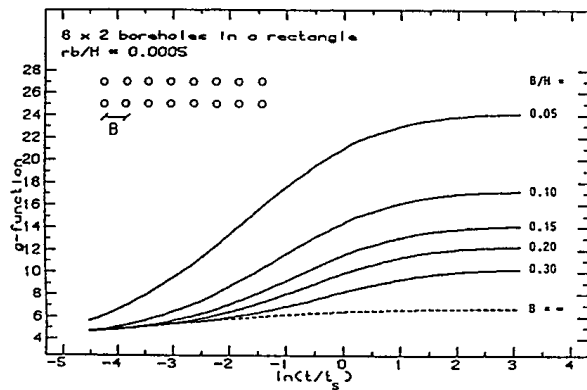
Les graphiques suivants représentent plusieurs fonctions g pour différentes configurations :



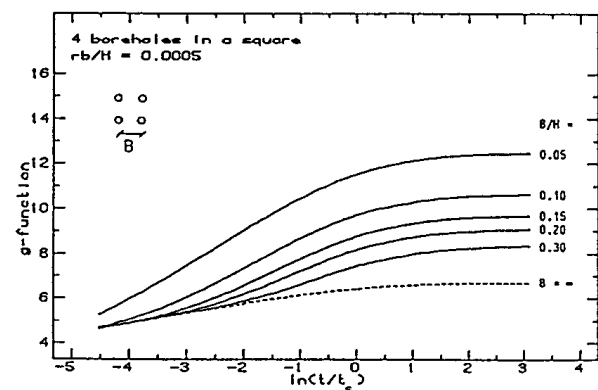
Graphique 13: impact du rapport B/H sur la fonction-g



Graphique 14: impact du rapport B/H sur la fonction-g



Graphique 15: impact du rapport B/H sur la fonction-g



Graphique 16: impact du rapport B/H sur la fonction-g

On comprend immédiatement que la variation du rapport B/H, et donc de l'espacement entre les sondes, comporte une influence différente en fonction de la configuration géométrique utilisée, tout en gardant la même tendance. En effet, la réduction de la distance entre les sondes, pour la même profondeur (B/H inférieur), amplifie la tendance de la fonction g, typique de la configuration. Avec l'augmentation du nombre de sondes, la fonction g devient de plus en plus sensible à la variation de ce rapport : dans ce cas, les interactions entre les capteurs deviennent importantes car les rayons d'influence sont superposés et contiennent des surfaces d'intersection supérieures.

Pour cette raison, le dimensionnement d'un champ de sondes comportant plus de quatre éléments nécessite une approche particulière, surtout dans le cas de capteurs profonds. D'ailleurs cette valeur de quatre sondes est indiquée par la norme SIA 384/6 comme limite entre un dimensionnement traditionnel et une étude particulière de l'installation.

Le rayon d'influence thermique de la sonde est directement proportionnel à la profondeur de la sonde et à la distance entre les sondes, comme illustré dans les graphiques ci-dessous :

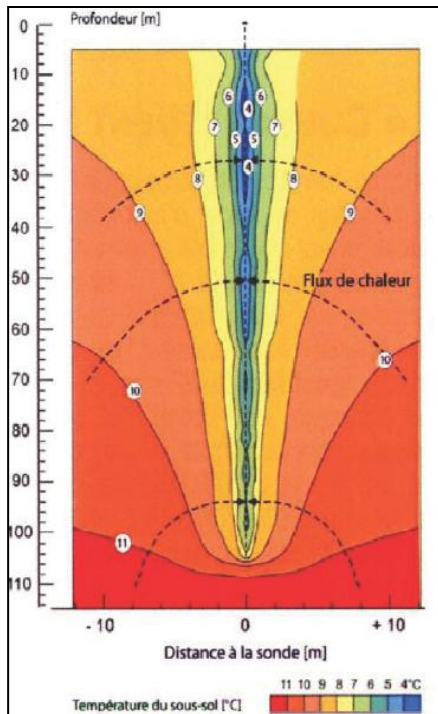
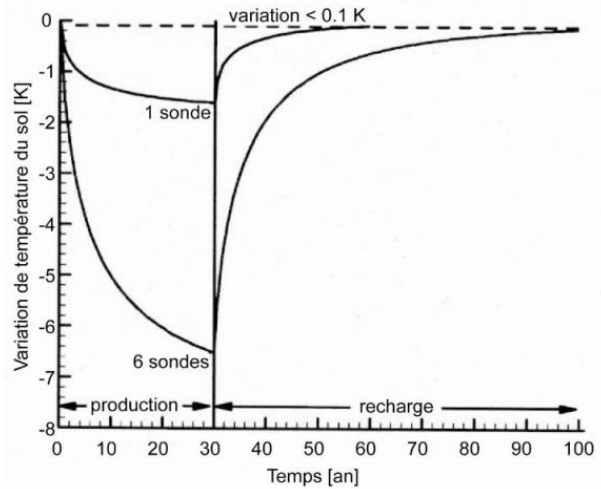


Figure 3 : isothermes à proximité d'une sonde de 100 mètres (Rybach [12])



Graphique 17 : variation de la température du sol en fonction du temps (Signorell et al. [13])

Dans le cas de sondes profondes, pour tenter de limiter la baisse de température du fluide caloporteur, en fonction du temps, on peut agir au niveau du champ sur la distance et la disposition des capteurs sur le terrain et sur leur profondeur.

Lors des simulations réalisées (graphiques en annexe), les résultats démontrent qu'au moins un écartement de 5% (rapport B/H) doit être respecté entre les sondes pour limiter l'influence mutuelle. Au delà, les pertes de charge et de température et les coûts de raccordement deviennent plus importants que le gain effectivement réalisé en augmentant cette distance.

Au niveau de l'exploitation du système, il est possible d'agir sur les heures de fonctionnement en réduisant la puissance d'extraction. En général, le temps de fonctionnement est compris entre 1800 et 2500 heures par an, en fonction des besoins de chaleur du bâtiment (dépendant des caractéristiques climatiques et de l'efficacité énergétique de l'enveloppe).

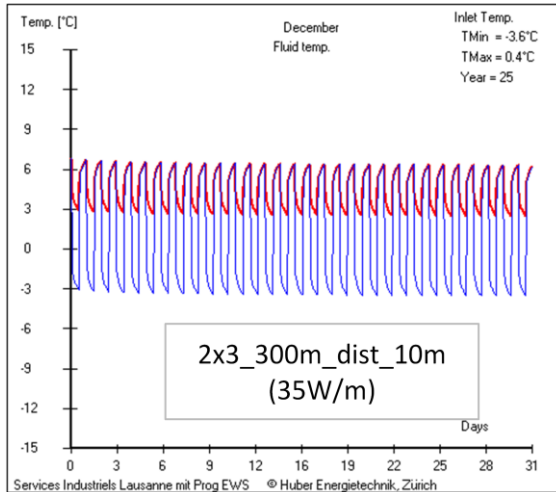
Dans le cas où la place disponible est restreinte et la distance entre les sondes est inférieure au rayon d'influence, une augmentation de la profondeur permet d'améliorer les performances du système par l'effet positif du gradient thermique. Toutefois, on ne peut pas appliquer de manière générale cette approche, car elle est valable pour une configuration définie des sondes et pour une puissance totale d'extraction donnée.

Ces considérations faites, une baisse de température excessive, dépendante d'un espacement réduit entre les sondes, peut être compensée par une augmentation de la longueur des sondes afin de réduire la puissance de soutirage spécifique (W/m) et profiter en même temps du gradient géothermique. Un bon dimensionnement du champ de sondes permet d'optimiser la puissance de soutirage et d'avoir des températures du fluide caloporteur plus élevées, tout au long de l'utilisation, pour la même profondeur des sondes.

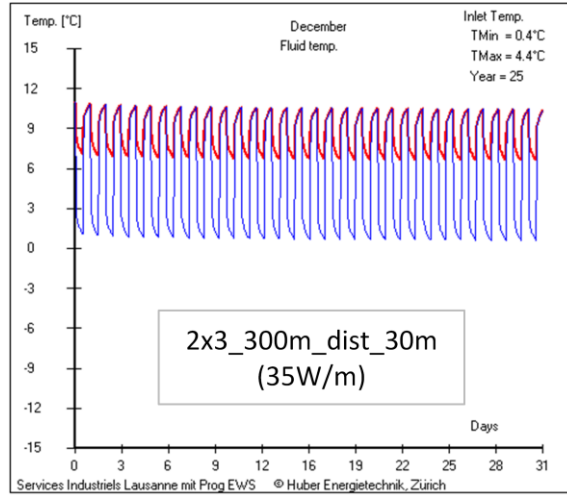
9. Simulation de champs de sondes géothermiques



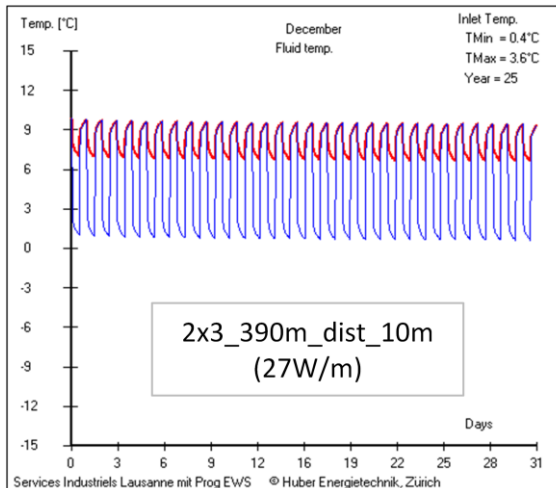
Des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel EWS pour essayer de comprendre quelle est l'influence de l'écartement et de la profondeur des sondes et pouvoir corroborer les hypothèses faites au chapitre précédent. Ces calculs ont été réalisés en tenant compte d'un pincement à l'évaporateur de 6°C pour une puissance d'extraction totale fixée à 63 kW. Les résultats sont reportés ci-dessous :



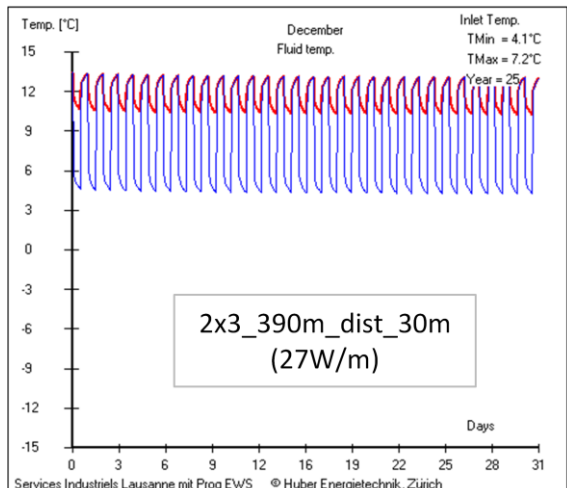
Graphique 18: Evolution des températures aller et retour d'un champ de sondes de 300 m espacées de 10 m, durant un mois



Graphique 19: Evolution des températures aller et retour d'un champ de sondes de 300 m espacées de 30 m, durant un mois



Graphique 20: Evolution des températures aller et retour d'un champ de sondes de 390 m espacées de 10 m, durant un mois



Graphique 21: Evolution des températures aller et retour d'un champ de sondes de 390 m espacées de 30 m, durant un mois

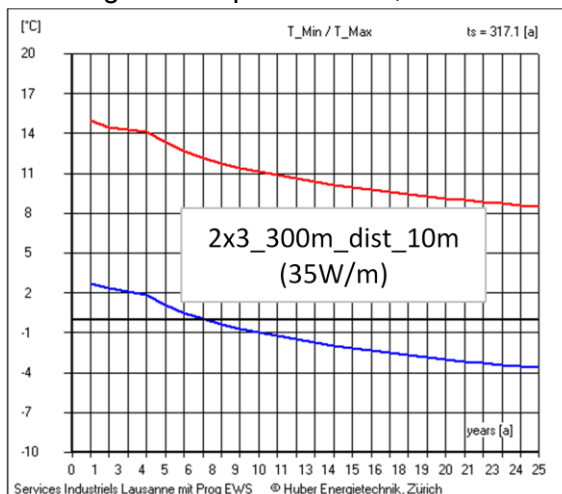
Ces graphiques montrent, pour quatre configurations différentes, la température du fluide en entrée (bleu) et en sortie (rouge) de la sonde, pour le mois de décembre, à la 25^e année d'utilisation. Les températures indiquées en haut à droite, dans chaque graphique, correspondent aux valeurs minimale et maximale, à la sortie de l'évaporateur, enregistrées sur toute la durée du fonctionnement. Dans ce cas, c'est la température minimale qui nous intéresse, pour laquelle on aura le COP inférieur. En confrontant donc les graphiques 19 et 20, on s'aperçoit que, pour la même puissance d'extraction totale et la même configuration (2x3), une augmentation de 30% de la longueur des sondes permet de compenser la baisse de température conséquente à un espacement limité entre les sondes, 10 mètres dans ce cas. Par contre, il est clair que la configuration du graphique 20 et en particulier l'espacement entre les sondes, n'est pas optimisé et la longueur supplémentaire sert



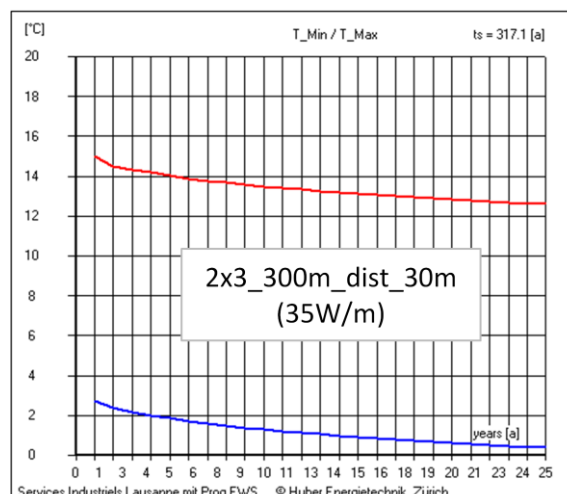
seulement à limiter la baisse de température. En effet, si ces sondes, 390 mètres, étaient utilisées dans une configuration optimisée, graphique 21, on pourrait obtenir une augmentation de la température de 3.7°C, par rapport à la variante avec des sondes de 390 mètres espacées de seulement 10 mètres.

Cette augmentation de 30% de la longueur des sondes (dans ce cas 90 mètres x 6 sondes, soit 540 mètres de plus en tout), comporte un surcoût non négligeable d'environ CHF 37'000 (68 CHF/m HT). Le choix de la configuration est donc très important pour optimiser le système et garantir une distance minimale la plus élevée possible. Ceci permet de réduire les coûts de forage et d'installation des sondes en optimisant les performances du système à long terme. Cet aspect est souvent sous-évalué lors de l'estimation des performances d'un champ de sondes et les règles de dimensionnement standards ne peuvent pas s'appliquer, en général, à toutes les situations.

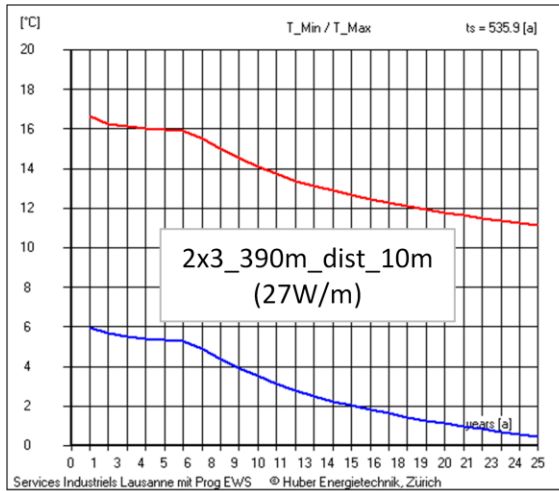
L'interaction entre les sondes dépend en effet de plusieurs paramètres de la sonde et du terrain. Par exemple, pour un sol ayant une faible conductivité thermique, le rayon d'influence entre les capteurs est réduit (la puissance de soutirage sera aussi inférieure, car elle est fonction de la conductivité du terrain) ; pour un terrain moyennement conducteur (2-2.5W/mK), l'interaction entre les capteurs, pour un espacement limité, est très forte et réduit la période d'utilisation dans laquelle on profite de l'inertie du terrain. Les graphiques suivants permettent de voir l'évolution de la température minimale (bleu) et maximale (rouge), pour les configurations précédentes, sur les 25 ans d'utilisation :



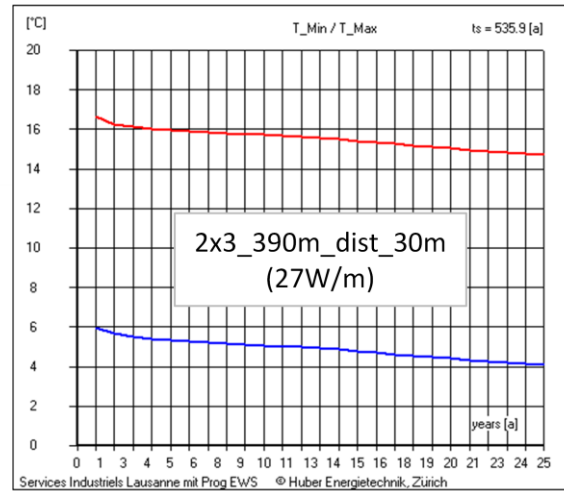
Graphique 22: températures minimale et maximale d'un champ de sondes de 300 m espacées de 10 m, durant 25 ans



Graphique 23: températures minimale et maximale d'un champ de sondes de 300 m espacées de 30 m, durant 25 ans



Graphique 24: températures minimale et maximale d'un champ de sondes de 390 m espacées de 10 m, durant 25 ans



Graphique 25: températures minimale et maximale d'un champ de sondes de 390 m espacées de 30 m, durant 25 ans

Le changement de tendance pour les courbes des configurations avec un espacement sous-dimensionné de 10 mètres est évident. Cette dernière dépend de la profondeur et de la distance entre les sondes. Une augmentation de cette distance permet d'obtenir une baisse de la température plus régulière à long terme, en profitant des températures plus élevées par rapport à un champ de sondes mal dimensionné.

Pour des surfaces disponibles restreintes (typiquement en milieu urbain), l'augmentation de la profondeur pour compenser la diminution de la température représente une solution intelligente, mais coûteuse. Dans ce cas (graphique 24), il est possible de profiter, pendant les premières années (5-6 ans), des contributions positives du gradient thermique et de l'augmentation du volume de la ressource exploitée. Ceci permet d'avoir des performances meilleures à court terme, par rapport à la solution optimisée à 300 mètres (graphique 23). En effet, dans la configuration à 390 mètres non optimisée, on atteint la température minimale de départ de la configuration optimisée à 300 mètres après seulement 13 ans de fonctionnement. Pendant les 12 premières années de fonctionnement, la température à la sortie des sondes non optimisées à 390 mètres sera supérieure par rapport à celle des sondes optimisées à 300 mètres. Par contre, après 25 ans d'utilisation, les températures sont équivalentes car le champ de sondes optimisé a récupéré rapidement la différence. Cette tendance est confirmée en comparant les pentes des deux courbes: la température de la configuration non optimisée continue rapidement sa descente. Par contre, celle de la configuration optimisée est plutôt stable, avec une asymptote proche de la valeur de la température obtenue après la 25^e année, ce qui signifie que l'équilibre entre l'énergie soutirée et l'énergie géothermique a été atteint.

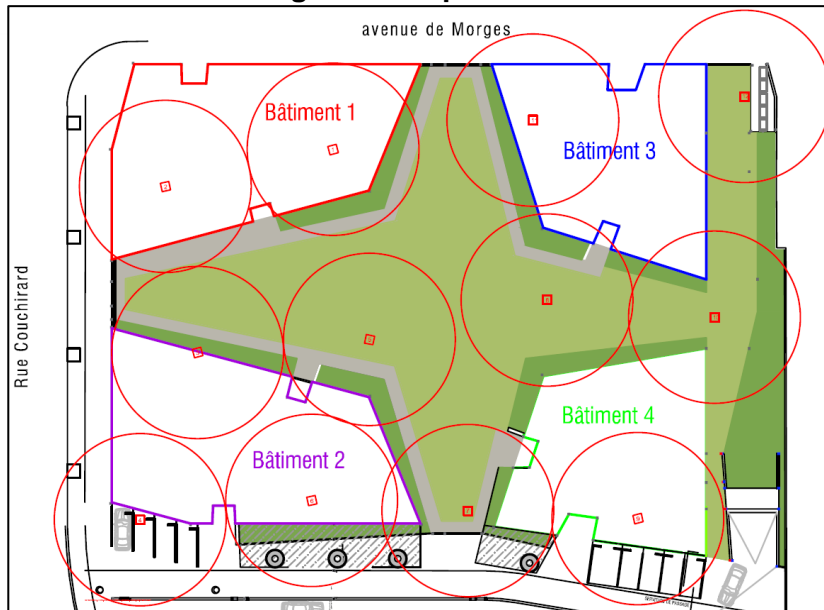
9.1 Application au champ de sondes Sirius

Avant tout, le défi du projet Sirius était de réaliser un champ de sondes profondes en milieu urbain. Le projet initial prévoyait dix sondes à 350 mètres. En faisant le choix de passer à une chaufferie par bâtiment, le nombre a été porté à douze et la profondeur à environ 330 mètres, pour avoir trois sondes par bâtiment. La limite de 500 mètres, pour la variante profonde, découle de la limite maximale que les machines de forage existantes pour des sondes géothermiques étaient capables d'atteindre. Les configurations, en particulier en



terme d'espacement, on été choisies sur la base la base des simulations réalisées à l'aide du logiciel EWS, présenté au chapitre précédent. Les deux configurations de champ de sondes suivantes ont été comparées :

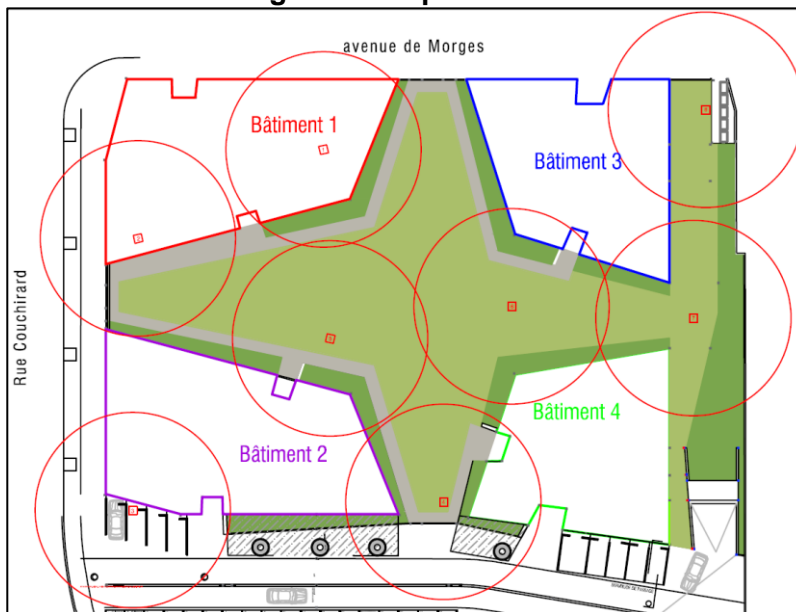
12 sondes géothermiques de 330 mètres



Espacement de 20-25 mètres

Figure 4 : schéma d'implantaion des sondes à 330 mètres (les 4 bâtiments aux angles sont visibles ainsi que les aménagements extérieurs en vert)

8 sondes géothermiques de 500 mètres



Espacement de 25-30 mètres

Figure 5 : schéma d'implantaion des sondes à 500 mètres (les 4 bâtiments aux angles sont visibles ainsi que les aménagements extérieurs en vert)

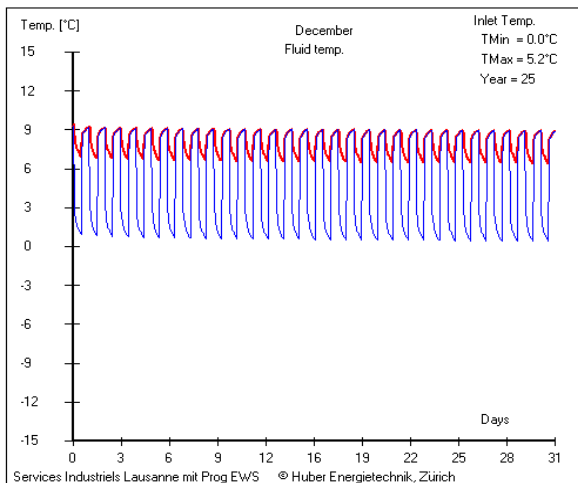
Dans un premier temps, pour la simulation du comportement du champ de sondes, la discrétisation des installations de production (une centrale par bâtiment ou une seule pour le projet), n'a pas été considérée. Pour les deux configurations, la puissance totale des PAC s'élève à 200 kWth et une installation solaire d'environ 140 m² produisant ~80'000 kWh/an participe à la production d'eau chaude sanitaire. Aucune recharge du terrain venant du freecooling ou d'un excédant de la production solaire n'a été prise en compte.



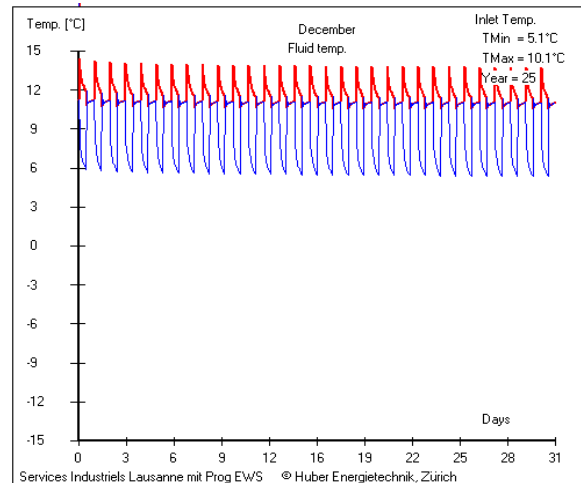
Un écartement différent et optimisé en fonction de la profondeur (environ 5%), conformément aux résultats du chapitre 8, a été appliqué aux deux champs de sondes géothermiques. Le rapport entre l'écartement et la profondeur est meilleur pour la variante à 330 mètres (~6.5%) que pour la variante à 500 mètres (5.5%) car la place à disposition ne permettait pas d'écarter ultérieurement le nombre de sondes prévu sans générer des conflits avec les limites de construction, le bâti et les constructions souterraines.

A relever aussi que pour implanter sur le plan la totalité du champ de sondes à 330 mètres en maintenant l'écartement optimal, une partie des sondes a été placée majoritairement sous les bâtiments.

Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution des températures à l'entrée (en rouge) et à la sortie (en bleu) de l'évaporateur de la PAC pour le mois de décembre de la 25^e année de fonctionnement.



Graphique 26 : évolution des températures aller (rouge) et retour (bleu) du champ de sondes à 330 mètres.



Graphique 27 : évolution des températures aller (rouge) et retour (bleu) du champ de sondes à 500 mètres.

La différence de température entre les deux configurations est d'environ 5 °C et devrait correspondre, selon les considérations faites précédemment, à une augmentation du COP de +15% au bénéfice de la variante à 500 mètres.

Les niveaux de températures de la variante à 500 mètres, largement positives, permettent d'utiliser de l'eau pure dans les sondes comme fluide caloporteur. Pour la simulation de la variante à 330 mètres, les températures étant proches de 0 °C, un mélange d'eau et de glycol (taux à 30%) a été utilisé.

La comparaison des résultats de ces simulations montre également que le profil des températures n'est pas le même dans les deux configurations.

En effet, le profil des températures « aller » de la variante à 500 mètres (graphique 27) présente des pointes qui ne sont pas présentes sur l'autre configuration.

Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait que, à l'arrêt, la chaleur qui est stockée dans l'eau des sondes, en profondeur, est poussée vers la surface à chaque redémarrage de l'installation. Si cette explication devait s'avérer correcte, cette chaleur représenterait une marge d'exploitation supplémentaire, même après 25 ans.



Ce phénomène et la comparaison entre le comportement simulé et mesuré seront traités aux chapitres suivants.

10. Chantier de réalisation

10.1 Introduction

Le projet de construction des 4 bâtiments a débuté en l'été 2012 par la déconstruction du garage qui occupait la parcelle.

La réalisation d'un forage à 500 mètres avec des techniques standard pour les sondes géothermiques était une première et, pour cette raison, les travaux de forage avaient été prévus en deux étapes, la première devant débuter en parallèle avec la déconstruction pour avoir assez de temps pour organiser la suite des travaux.

La première étape prévoyait la pose d'au moins une sonde géothermique pour tester et valider, le cas échéant, les techniques de forage, vérifier la faisabilité d'installer une sonde de 500 mètres dans le forage et vérifier la fiabilité des matériaux standard pour des sondes profondes.

Dans le cas de succès d'implantation, cette sonde géothermique aurait été utilisée pour réaliser un test de réponse thermique afin d'affiner la simulation et d'optimiser le champ de sondes à construire.

L'implantation du solde des sondes était ensuite prévue dans une deuxième étape, principalement sous le parking souterrain, en fonction de l'avancement des travaux de terrassement, selon la configuration suivante :

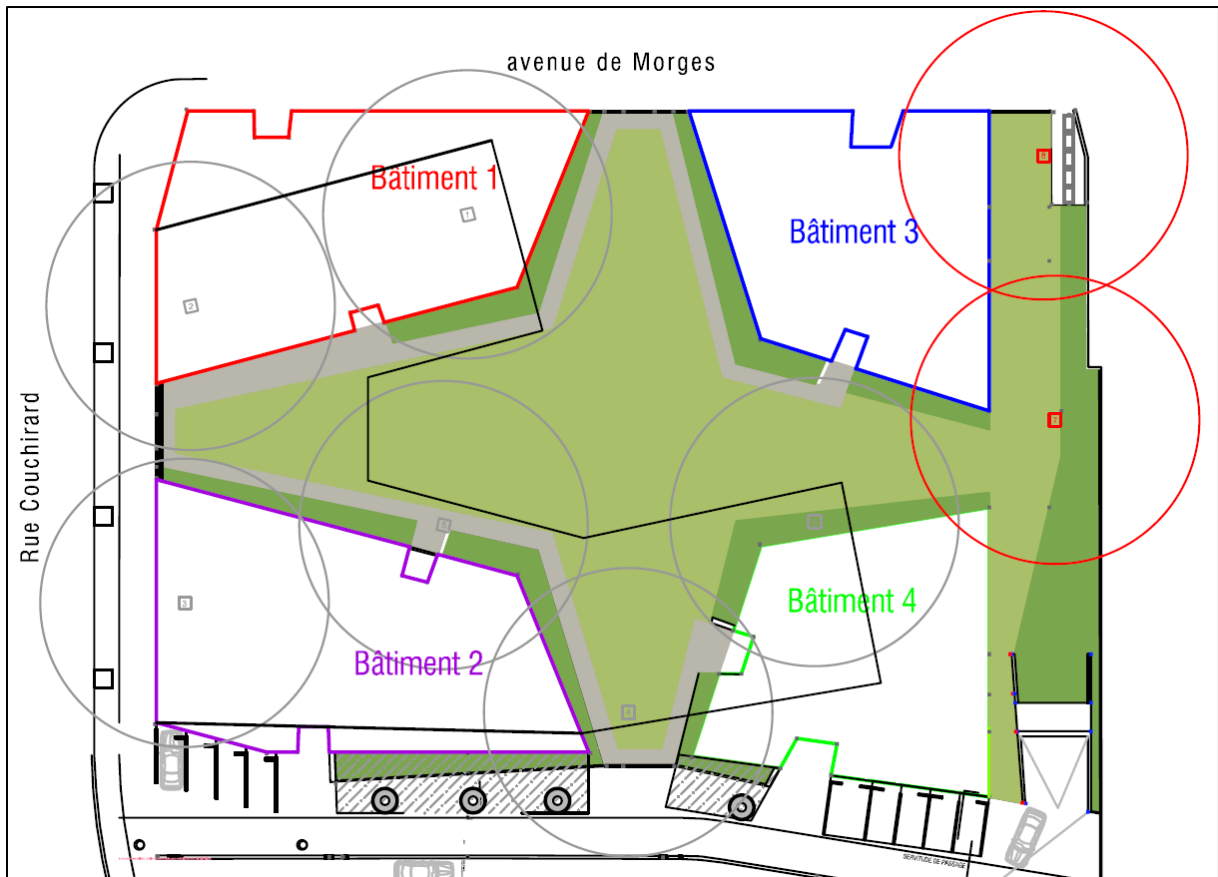


Figure 6 : schéma d'implantation des sondes, avec périmètre du parking souterrain (6 sondes dans le parking en couleur grise).

Comme on peut le remarquer sur ce schéma d'implantation, 6 sondes géothermiques sur 8 se trouvent sous le parking souterrain, en forme de « C », qui relie 3 des 4 bâtiments du projet (le bâtiment en haut à droite de la figure 6 ne possède pas de niveau souterrain).

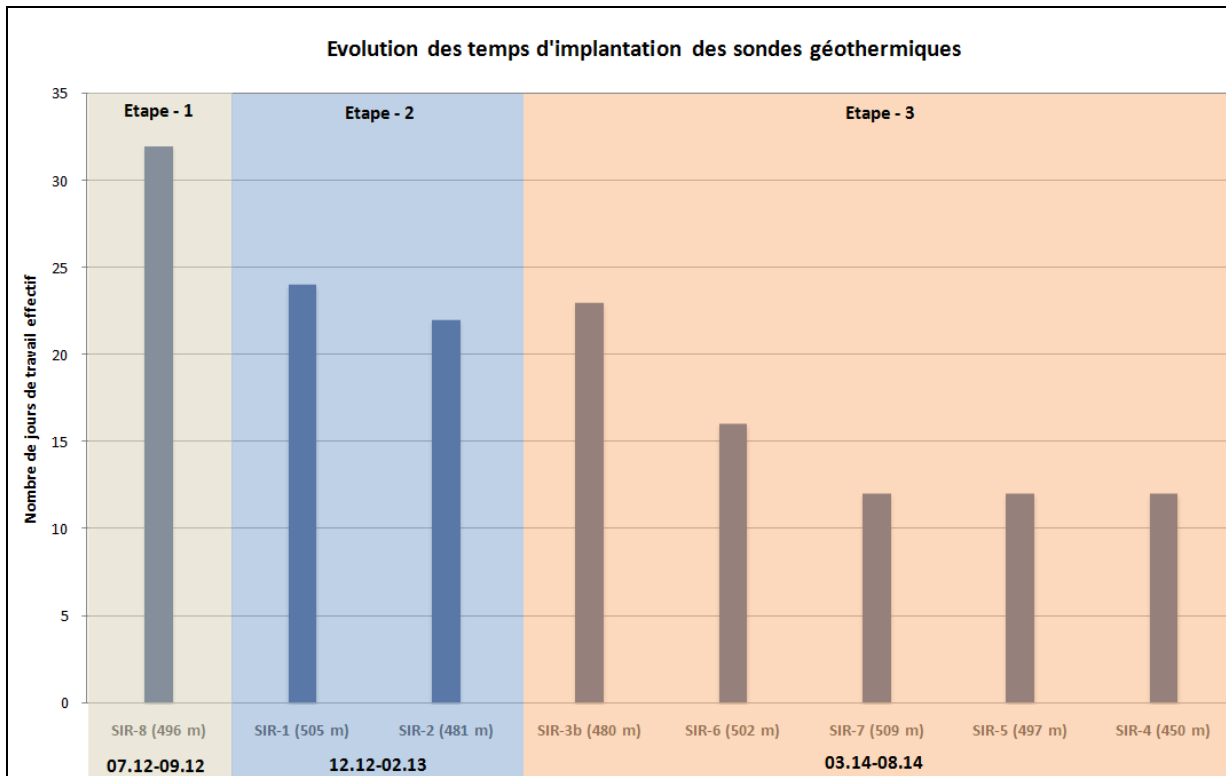
Chaque bâtiment est relié à 2 sondes géothermiques d'une profondeur comprise entre 450 et 500 mètres, en fonction des besoins en chaleur.

Le délai de réalisation des sondes en fond de fouilles avait été estimé à environ 3 mois et le planning des forages intégré au projet de construction des bâtiments.

10.2 Forages et sondes géothermiques

L'implantation des sondes géothermiques a finalement été réalisée en 3 étapes et pas en 2 étapes comme prévu, entre l'été 2012 et le début de l'année 2014. Les raisons de ce changement de planning sont liées principalement aux conditions géologiques qui seront traitées plus dans le détail au chapitre suivant.

L'évolution des temps de réalisation, en jours de travail, est reportée sur le graphique ci-dessous :



Graphique 28 : Evolution des temps d'implantation des sondes géothermiques (en jours ouvrables)

La courbe d'apprentissage de l'entreprise de forage (Augsburger Forages SA à Lucens), qui a su réagir aux problèmes rencontrés, est bien visible sur le graphique.

Pour la troisième étape, une nouvelle foreuse, plus puissante, a été utilisée, mais le gain de temps escompté pour l'implantation de la sonde avec une machine plus performante a été annulé, sur le premier forage réalisé avec la nouvelle machine, par les multiples réglages de la machine.

Les profondeurs de pose des sondes géothermiques sont indiquées entre parenthèses à droite de la référence de la sonde. La moyenne des profondeurs de pose des sondes est de 490 mètres, avec un maximum et un minimum de respectivement 509 mètres et 450 mètres. La longueur totale installée du champ de sondes est de 3920 mètres.

10.3 Problèmes géologiques

La géologie rencontrée lors du premier forage était exactement inverse à celle qui était attendue sur la base de l'étude hydrogéologique réalisée en amont des travaux et du relevé géologique d'un forage situé à proximité, à Montelly. Alors que sur cette base il était attendu une prédominance de grès, la géologie rencontrée présente une prédominance de marnes avec alternance de grès.

Ce type de géologie n'est pas propice à l'installation de sondes géothermiques car le forage a tendance à se refermer suite au gonflement des marnes et aux éboulements, qui empêchent la pose de la sonde géothermique.

En effet, avant d'installer la sonde, la mesure du forage a indiqué qu'il était fermé à environ 120 mètres. Après nettoyage complet du forage et nouvelle mesure, un nouveau bouchon au tour des 190 mètres a été identifié.



Une analyse approfondie des échantillons a donc été réalisée par le géologue conseil des SiL afin d'identifier les passages à risque.

Une dizaine de passages sensibles, correspondant à un changement de géologie (alternance de marnes et de grès), ont été identifiés jusqu'à une profondeur d'environ 400 mètres.

A titre d'exemple, sur l'extrait du log géologique reporté ci-dessous, sont indiqués les passages comportant un risque d'éboulement (flèches rouges).

Projet SIRIUS - Sondes géothermiques profondes à l'av. de Morges 137, Lausanne

LOG LITHOLOGIQUE ET TECHNIQUE DU FORAGE SIR-8

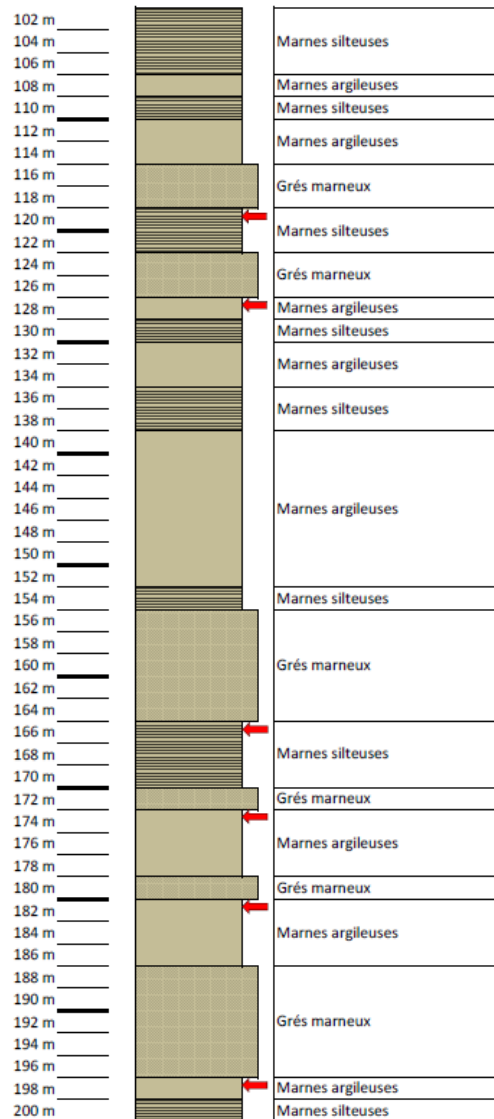


Figure 7 : exemple de log lithologique et technique avec identification des passages sensibles (flèches rouges)

Afin de maintenir le forage ouvert et garantir ainsi la pose de la sonde géothermique au delà de 400 mètres, la solution mise en place par l'entreprise de forage a consisté dans l'installation provisoire d'un tubage métallique jusqu'à 380 mètres. Pour ce faire, le forage déjà réalisé a dû être rélargi (élargi) pour permettre l'installation du tubage qui avait un diamètre supérieur.



Grace à cette solution, la sonde géothermique a pu être implantée à une profondeur de 496 mètres.

Le forage a ensuite été injecté avec un mélange de ciment et bentonite sur 3 paliers, pour éviter d'écraser la sonde géothermique par effet de la densité supérieure du mélange par rapport à la pression hydrostatique de l'eau dans la sonde.

Les tests de circulation et d'étanchéité, conformes aux attentes, ont permis de valider que ces opérations avaient été réalisées dans les règles de l'art.

S'agissant d'une sonde géothermique standard en polyéthylène, résistant à une pression nominale de 16 bar (PN16), le fabricant avait donné des indications précises et des valeurs limites de pression pour le test d'étanchéité, qui ne devait pas dépasser les 2.5 bar, relatifs, en tête de sonde.

Compte tenu des opérations supplémentaires, le délai à disposition pour la réalisation des 6 sondes géothermiques en fond de fouille n'aurait permis que la réalisation de 2 sondes sur 6. Le planning de construction des bâtiments ne pouvant pas être retardé par le projet de géothermie, il a donc été décidé de réaliser uniquement 2 sondes sous le parking et de reporter à une troisième étape l'implantation des sondes restantes. Cette décision a nécessité la modification de la géométrie du champ de sondes et l'installation des sondes sur la surface disponible en dehors des bâtiments, selon le schéma d'implantation suivant :

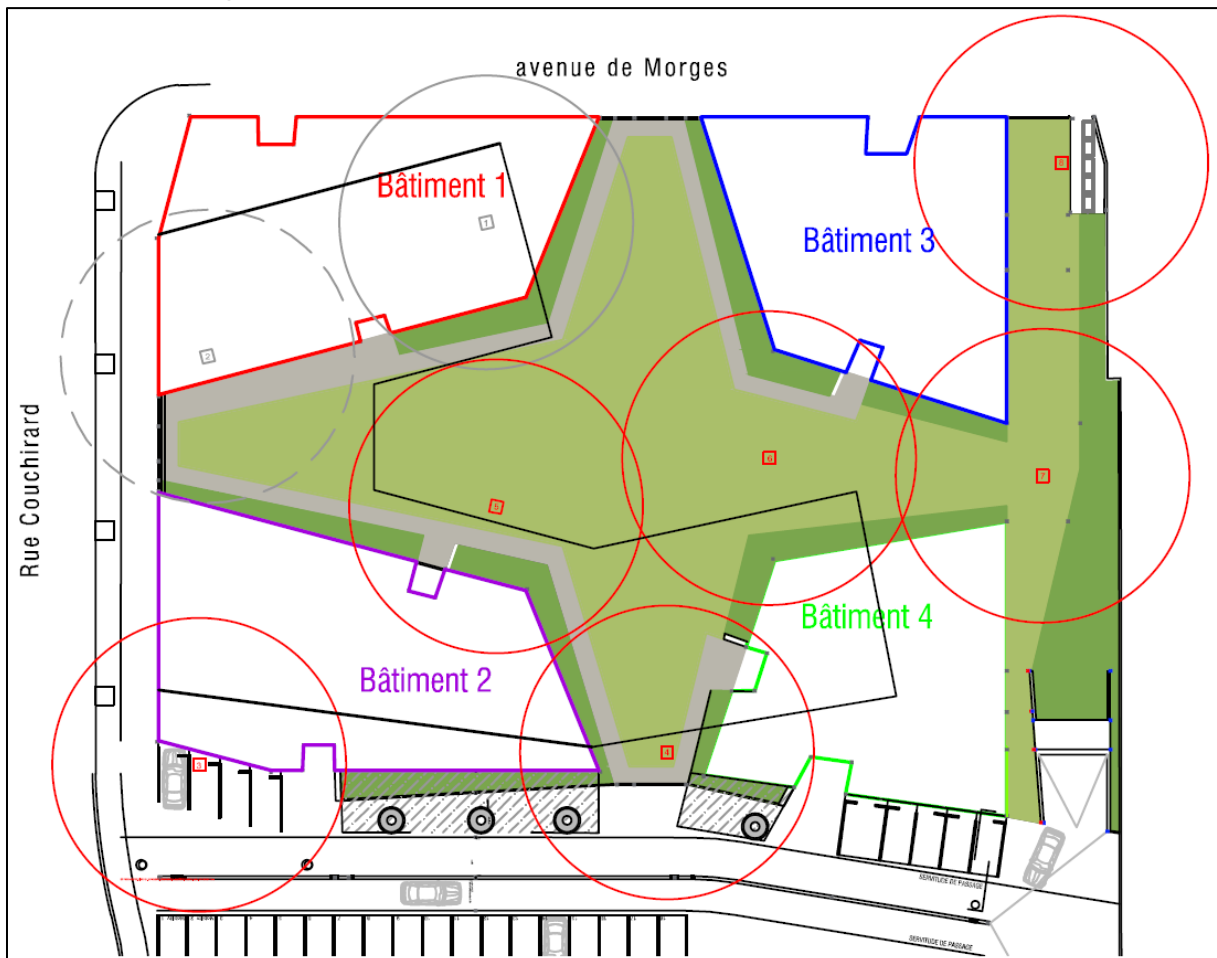


Figure 8 : schéma d'implantation du champ de sondes dans la configuration réalisée (la sonde n° 2 est représentée en traitillé car elle est hors service, plus de détails au chapitre suivant)



Si la variante de champ de sondes à 330 mètres avait été retenue, il aurait été très compliqué, voire impossible, d'implanter la totalité des sondes dans cet espace en garantissant un espacement optimal, même en admettant l'installation du double de sondes sous le parking (4 sondes de 330 mètres); en effet les conditions géologiques étaient problématiques jusqu'à environ 400 mètres et auraient rendu difficile même la pose des sondes à plus de 300 mètres. L'objectif d'implanter une longueur totale de 950 mètres par paire de sonde, avec une profondeur de pose minimale à 450 mètres, a donc été atteint.



10.4 Problème sur une sonde géothermique

Les tests de circulation de la sonde SIR-2 (la troisième part ordre chronologique) se sont révélés positifs immédiatement après la pose. Toutefois, après quelques jours, au moment de la réception de la sonde, la circulation d'un brin était impossible. Sur la base de différents tests, il a été conclu que, probablement, une cavité s'était formée lors du forage à 200 mètres et que la sonde avait épousé le profil de cette cavité puis s'était pincée sous l'effet de son propre poids. La détermination de la profondeur du pincement a été possible grâce aux capteurs à fibre optique installés dans la sonde pour la mesure de la température (plus de détails au chapitre suivant).

Pour la suite du projet, deux ans plus tard par rapport à la pose de la première sonde, il a donc été décidé de faire recours à un autre fabricant qui proposait des sondes renforcées, spécialement conçues pour des applications profondes (jusqu'à 800 mètres) et qui n'étaient pas encore prêtes au démarrage du projet.

La sonde défectueuse n'a pas pu être remplacée, d'une part pour des questions de planning du projet de construction des bâtiments (il n'y avait tout simplement plus de temps à disposition pour implanter une sonde de remplacement dans le parking) et, d'autre part, pour des questions de place à disposition sur la surface inoccupée par le bâti et la volonté de maintenir un espacement optimal entre les sondes (cf. figure 8).



10.5 Système de mesure DTS

Un système de mesure des températures des sondes à été installé pour évaluer les performances des sondes et définir les interactions thermiques entre les conduits et le terrain et entre les sondes géothermiques, sur le long terme.

Pour effectuer ces bilans thermiques tout au long de la sonde, il était indispensable de connaître les températures du fluide caloporteur en fonction de la profondeur et le débit d'écoulement.

Pour satisfaire aux exigences évoquées, un système de mesure à fibres optiques a été choisi. Ce système a l'avantage d'utiliser un seul câble pour la mesure de la température en permettant une résolution métrique et une précision allant jusqu'au dixième de degré.

Cette mesure de température en fonction de la profondeur permet de calculer des bilans énergétiques à différents niveaux du forage et ensuite d'évaluer l'efficacité de la sonde en fonction de la profondeur. Le but de ce projet était aussi d'évaluer si une solution de sonde géothermique à 500 mètres était intéressante par rapport à des sondes moins profondes et d'identifier la portion de la sonde utile à l'échange thermique et les pistes d'optimisation à creuser.

L'installation du câble à l'intérieur de la sonde double-U a été possible uniquement dans les premières sondes en PN16 (soit les sondes standard), grâce à la conception d'un nouveau pied de sonde de la part du fabricant. Le câble avec les fibres optiques a en suite été introduit par soufflage dans les tubes de la sonde, avec le même principe que pour l'installation d'un réseau multimédia. Pour ce faire, la sonde a été déroulée sur toute sa longueur afin de faciliter l'installation.

Les photos ci-dessous montrent quelques passages de cette installation :



Figure 9 : déroulement de la sonde pour l'installation de la fibre



Figure 10 : procédure d'installation de la fibre dans la sonde par soufflage

Le câble installé dans la sonde a un diamètre extérieur de 4 mm contient deux fibres optiques multi mode *graded index type* 50µm (diamètre du cœur) /125µm (diamètre du revêtement du cœur) et également deux fibres single-mode 9µm (diamètre du cœur) /125µm (diamètre du revêtement du cœur) permettant d'utiliser différents systèmes de mesure DTS à l'avenir. Pour cette particularité, le câble a été commandé à Nexans SA et a été fourni avec



une protection métallique permettant de résister à une pression supérieure à 50 bar, équivalente à la pression hydrostatique au pied de la sonde.

L'installation du câble à l'intérieur de la sonde géothermique n'a pas été possible sur les sondes renforcées utilisées lors de la troisième étape du projet, car le pied de la sonde était réalisé en une seule pièce métallique (cf données techniques des sondes en annexe). Il a donc été décidé d'installer le câble dans le forage au moment de la pose de la sonde géothermique pour pouvoir quand même mesurer l'évolution des températures moyennes du forage en fonction de la profondeur.

Le schéma ci-dessous résume les deux types d'installation pour la mesure des températures :

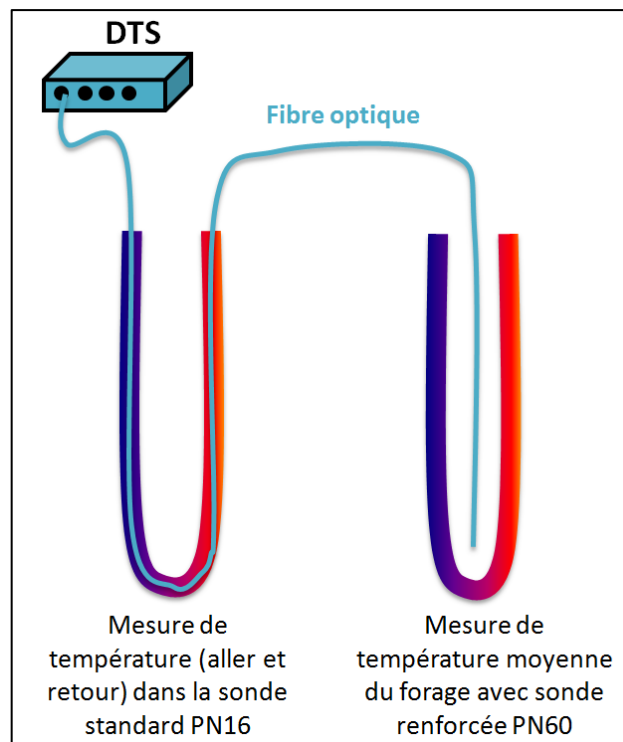


Figure 11 : schéma d'installation de la fibre optique dans les sondes standard (PN16) et dans le forage avec sondes renforcées (PN60)

11. Test de réponse thermique et mesures avec le DTS

11.1 Mise en place du TRT

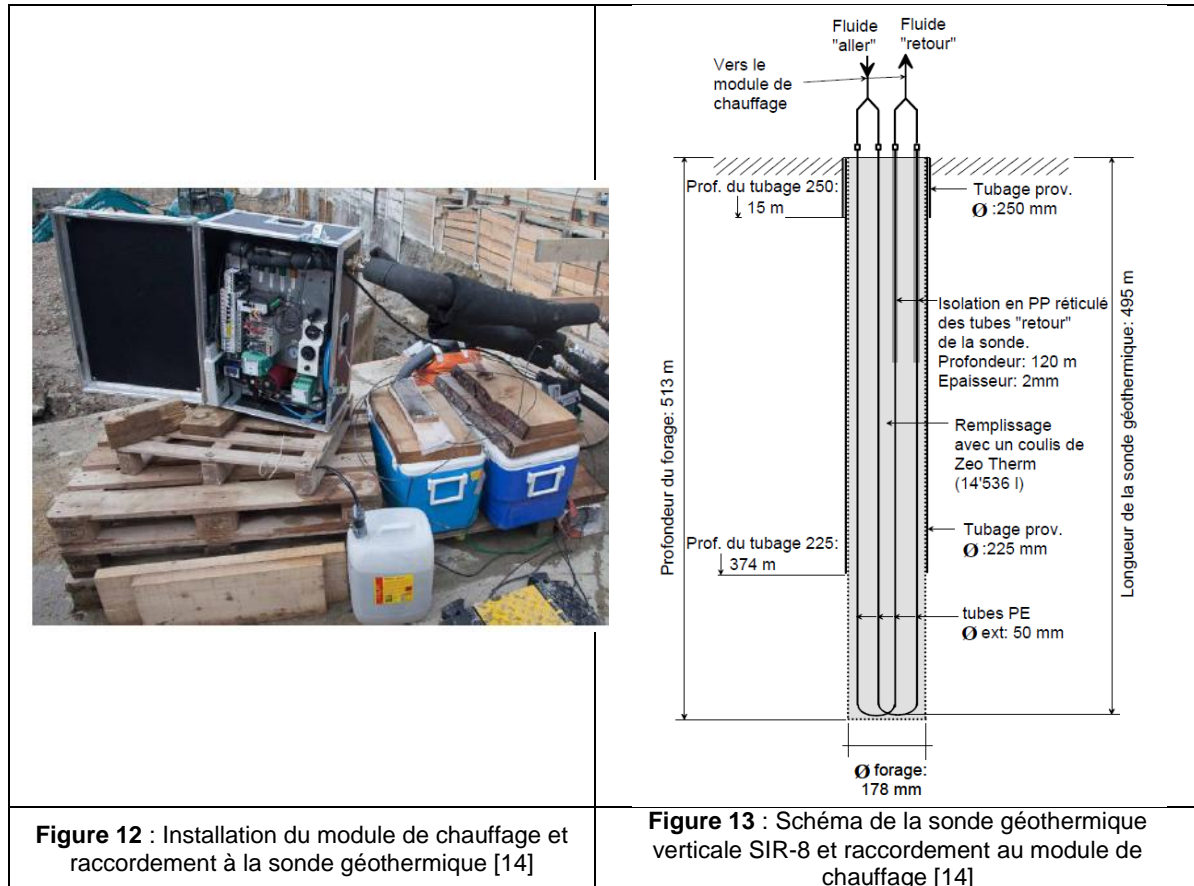
Comme déjà expliqué auparavant, afin de permettre un dimensionnement optimal du champ de sondes géothermiques, un test de réponse thermique (TRT) a été commandé à l'entreprise Swiss Geo Testing SàrL (SGT) à Nax.

Le but de ce test était aussi de vérifier si les modules de chauffage normalement utilisés pour des TRT sur des sondes moins profondes pouvaient encore être utilisés pour des profondeurs plus importantes, et donnaient des bons résultats.

Le module mis à disposition par la société SGT pour ce test (photo de l'installation ci-dessous) était constitué de deux corps de chauffe pouvant fournir une puissance totale de 18 kW, comparable à la puissance frigorifique extraite en phase d'exploitation.



Un système complet de mesures et d'acquisition de données (températures, débit, consommation électrique, pression) est également intégré dans ce module de chauffage. L'acquisition des données est réalisée au moyen d'un Data-Logger pour l'enregistrement des paramètres fournis par 8 capteurs.



En parallèle au TRT, une mesure de la température du fluide dans la sonde en fonction de la profondeur a été commandée au laboratoire EFLUM de l'EPFL, afin de vérifier les échanges thermiques de la sonde avec le terrain avant, pendant et après le test et de valider le TRT.

Les deux bouts du câble à fibre optique à la sortie de la sonde standard ont été bouclés dans deux bains de calibration sur une longueur d'environ 10 mètres. A la sortie du bain froid contenant de la glace fondante à 0 °C, les deux fibres ont été branchées aux canaux 1 (Ch1) et 2 (Ch2) de l'unité DTS par des connecteurs type E2000, qui ont été soudés aux fibres. Les deux fibres à la sortie du bain chaud (~30 °C) ont été soudées entre elles pour former une boucle et permettre au DTS de mesurer aller-retour (~ 2060 mètres) en alternant les deux canaux.

La figure ci dessous montre le principe de l'installation concernant la mesure avec la fibre optique :

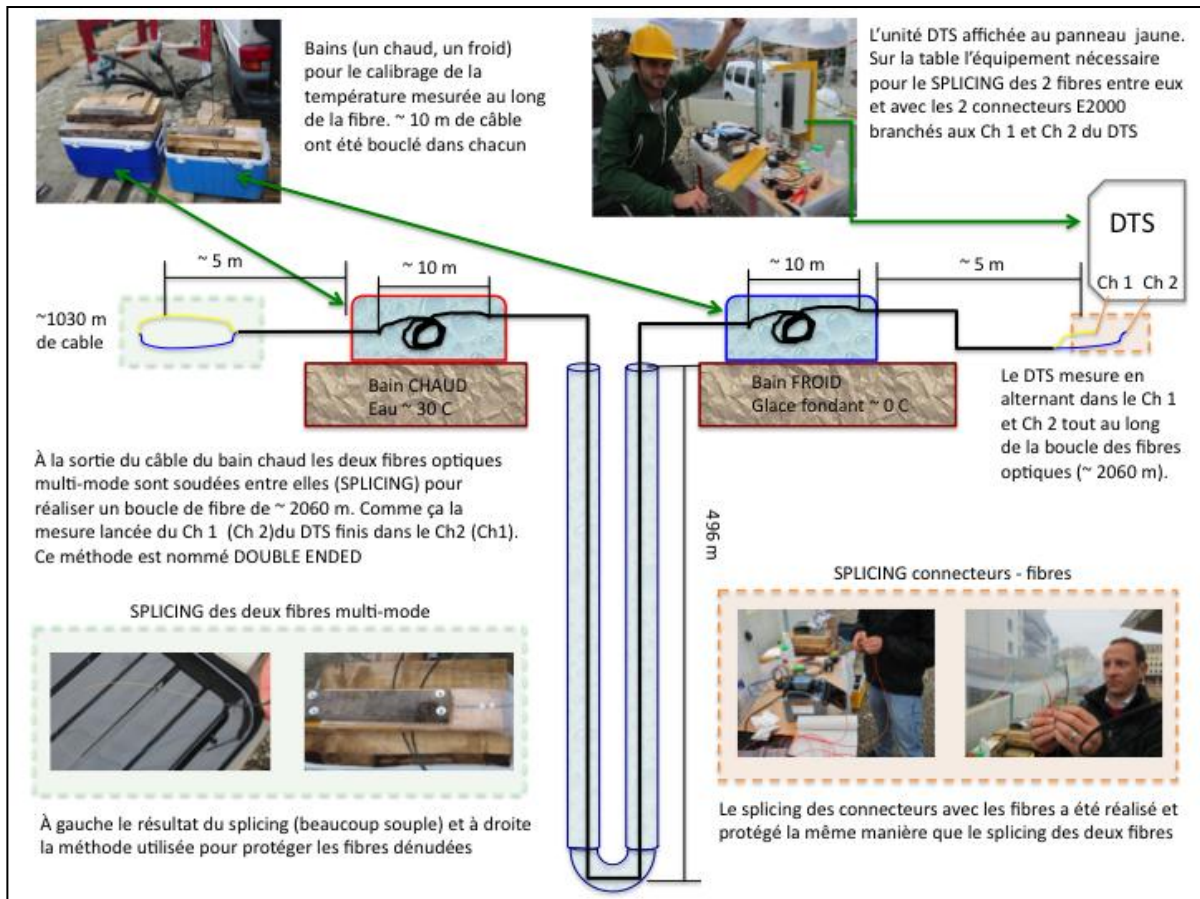
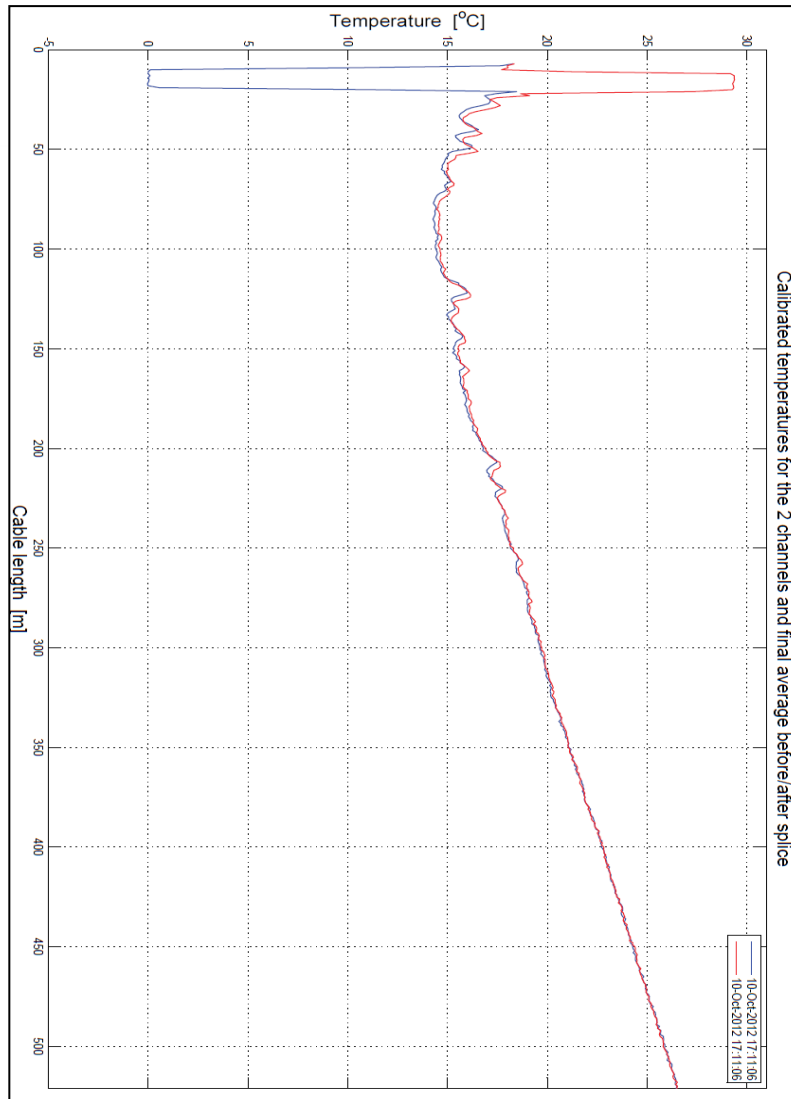


Figure 14 : Esquisse de l'installation du système de mesure de température le long de la fibre optique [15]



Une des premières mesures réalisées avec ce système est reportée ci-dessous :



Graphique 29 : Profil des températures mesurées avec la fibre optique avant le démarrage du TRT

Les paliers des températures mesurées dans les bains de calibration sont clairement visibles dans la partie haute du graphique. Le gradient géothermique est clairement identifiable, la température reste constante autour des 15°C jusqu'à environ 100 mètres, pour ensuite croître de manière régulière jusqu'au fond du forage, où la température atteint 26,6 °C. Le gradient géothermique moyen calculé est de 3.06 °C/m, qui est une valeur correspondante à la moyenne du plateau suisse.



11.2 Résultat du TRT

Comme pour les tests de circulation et d'étanchéité, le fabricant de la sonde géothermique standard (PN16) a fourni une limite supérieure de température ne devant pas être dépassée lors du TRT. En effet, la résistance mécanique du polyéthylène est fortement dépendante de la température. Pour éviter tout dommage, à la sonde le TRT a donc été réalisé en imposant une contrainte sur la pression maximale en tête de sonde à 2 bar relatifs et une température maximale à l'entrée de la sonde de 25°C, selon les prescriptions du fabricant.

Le TRT a commencé par une mise en circulation sur environ une journée, sans l'activation du chauffage, pour mesurer la température initiale du terrain.

Le chauffage a été activé le jour suivant, une fois la température du fluide en équilibre avec le terrain.

Suite aux limitations évoquées avant, la durée du TRT en mode « chauffage » a été écourtée car, après un peu moins de 20h, la température du fluide en entrée de la sonde avait atteint 25 °C.

Le TRT s'est poursuivi sur encore une journée en maintenant la circulation du fluide dans la sonde et sans chauffage, pour retrouver la température initiale du terrain.

Les résultats du TRT sont reportés dans le tableau suivant :

	Sonde SGV
Température moyenne initiale de la couche de terrain ¹⁾	18.7 ± 0.2 [°C]
Conductivité thermique moyenne de la couche de terrain ¹⁾	1.88 ± 0.10 [W/(mK)]
Résistance thermique effective de la sonde dans les conditions du test et pour un Ø moyen de 215 mm	0.13 ± 0.02 [K/(W/m)]

1) sur les premiers 495 m de profondeur du terrain (voir les commentaires ci-dessous)

Tableau 3 : Résultat du test de réponse thermique réalisé sur la sonde géothermique test (2012) [14]

Ces valeurs sont valables pour les conditions d'un test réalisé avec un régime d'écoulement non-laminaire et un débit moyen de 2.72 m³/heure.

De l'eau pure a été utilisée pour la réalisation de ce TRT du terrain. Avec un débit de 2.72 m³/heure, en faisant circuler un mélange d'eau et d'antigel comme fluide caloporteur, le régime d'écoulement aurait probablement été de type laminaire dans les tubes et aurait produit comme résultat une augmentation de la résistance thermique effective moyenne de la sonde géothermique (R_b).

La valeur de la conductivité thermique λ du terrain donnée ci-dessus est probablement trop faible étant donné les conditions du TRT. Cette valeur correspondrait plutôt à une valeur moyenne entre la conductivité thermique du matériau d'injection de la sonde et celle du terrain. En effet, la durée réduite de ce TRT, qui a atteint la température maximale fixée (25 °C) en seulement 19 h de chauffage, n'a pas permis d'avoir suffisamment de données pour une détermination exacte des paramètres thermiques du terrain.

Les tables (SIA) donnent pour ce matériel (Molasse et Calcaire marneux) une valeur de λ comprise entre 2.5 et 2.9 [W/(m.K)], éventuellement encore plus élevée grâce à la pression qui règne aux alentours de 500 m de profondeur.

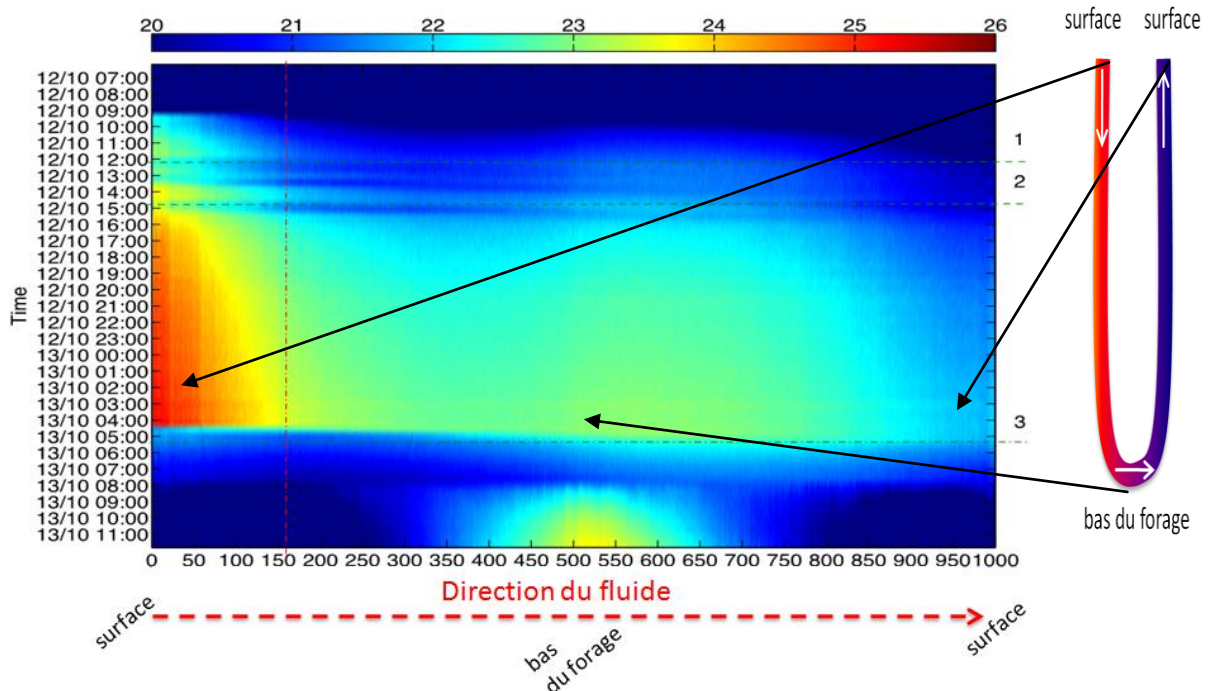
De plus la puissance injectée pendant la phase de chauffage du test (env. 23 W/m) était très inférieure à la puissance utilisable pour une sonde de cette profondeur. Il est donc fort probable que l'échange de chaleur ne se soit répercuté pratiquement qu'entre les tubes de la sonde et n'ait intéressé que très peu le terrain en profondeur [14].



Cette hypothèse est confirmée par les mesures réalisées par le laboratoire EFLUM au moyen du câble à fibre optique installé dans la sonde géothermique.

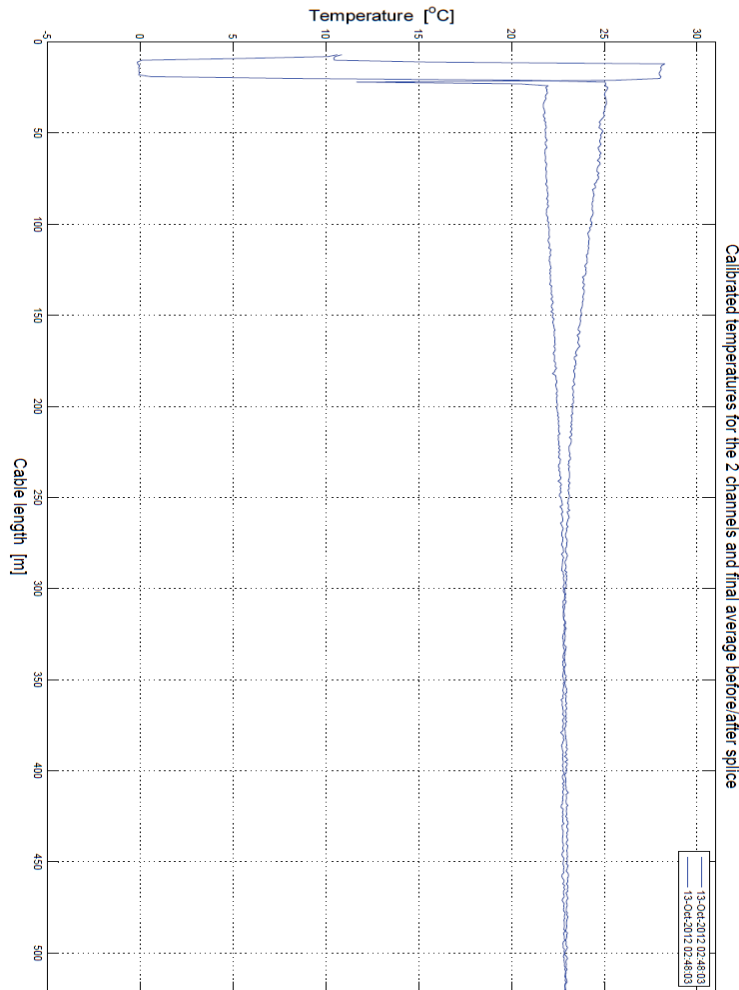
Sur le graphique ci-dessous sont reportées les valeurs de températures mesurées en fonction de la distance (en abscisses) et du temps (en ordonnées) avant, pendant et après la phase de chauffage du TRT.

Pour une meilleure compréhension du graphique : le fluide se déplace de gauche à droite, soit de la surface vers la profondeur. La moitié de la distance correspondant au pied de la sonde, à environ 500 mètres de profondeur le fluide remonte vers la surface après avoir passé le coude à 180°.



Graphique 30 : Mesure des températures le long de la sonde pendant le TRT [15]

Les lignes 1 et 2 (à environ 12h et 15h du 12/10) correspondent à deux coupures du chauffage du module et la ligne 3 (à environ 4h du 13/10) à l'arrêt du chauffage causé par une augmentation excessive de la température. Entre les points 2 et 3, le TRT s'est déroulé correctement. La ligne verticale en traitillés rouges correspond à la profondeur avant laquelle la dissipation de chaleur dans le sol est importante. Au dessous de 150 mètres la chaleur est encore dissipée par la sonde dans le terrain de manière décroissante jusqu'à environ 250 mètres, comme on peut le constater plus clairement sur le graphique suivant, sur lequel sont reportées les valeurs de température du fluide dans les brins aller et retour, mesurées juste avant la coupure du chauffage.



Graphique 31 : Profil des températures mesurées avec la fibre optique pendant le TRT

Toute la puissance du module de chauffage est dissipée jusqu'à 250 mètres de profondeur, puis la température reste constante à environ 23 °C jusqu'à 500 mètres. Sur le graphique ci-dessus les paliers de température des baignoires de calibration sont bien visibles comme au graphique 29.

Compte tenu des limitations imposées par le fabricant, une puissance plus élevée n'aurait pas permis de solliciter thermiquement la sonde sur toute la profondeur (en instaurant une différence de températures entre le fluide et le terrain), la température maximale aurait été atteinte simplement plus rapidement.

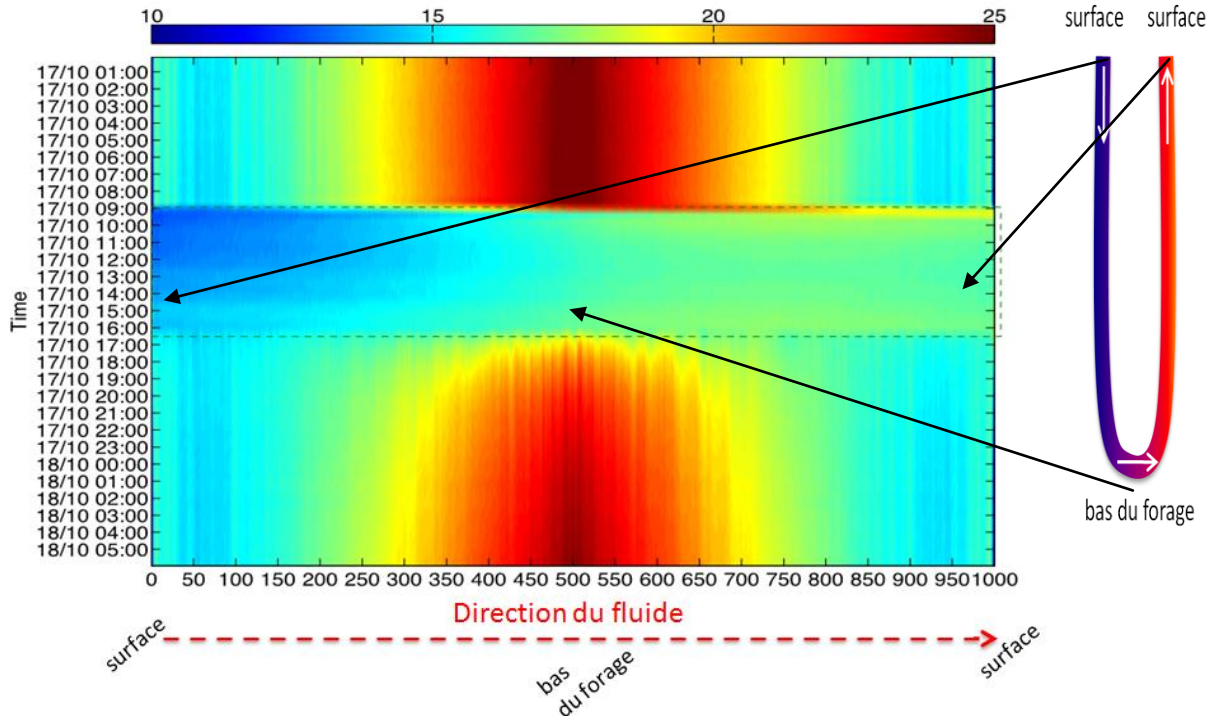
Ces mesures nous permettent donc de confirmer que la conductivité thermique du terrain calculée pour ce TRT est plutôt celle du terrain sur les premiers 200 mètres à partir de la surface.

Afin de vérifier le comportement de la sonde dans des conditions proches de l'exploitation future, un deuxième test « à froid » a été mené en injectant dans la sonde de l'eau froide, à environ 12 °C, provenant du réseau d'eau. A la sortie de la sonde géothermique, l'eau, à une température proche de 18°C, a été évacuée dans le réseau des eaux usées.

Pour éviter de gaspiller un volume trop important d'eau potable, le test a été réalisé sur quelques heures et a été interrompu dès que les températures étaient stabilisées.



Comme pour le TRT, l'EFLUM était chargé du monitoring des températures dans la sonde géothermique avec le câble à fibre optique. Sur le graphique suivant est reportée l'évolution des températures en fonction du temps et de la profondeur, de la même manière que pour le graphique 28 :



Graphique 32 : Mesure des températures le long de la sonde pendant le test « à froid » TRT [15]

Avant de démarrer le test « à froid », afin de pouvoir comparer les résultats avec le TRT, il a fallu attendre que les conditions initiales entre les tests soient comparables, c'est-à-dire que l'équilibre thermique entre la sonde et le forage soit atteint et que le gradient géothermique se rétablisse dans le forage. Ce qui était le cas environ 3 jours après la fin du TRT, comme on peut le voir sur le graphique 32.

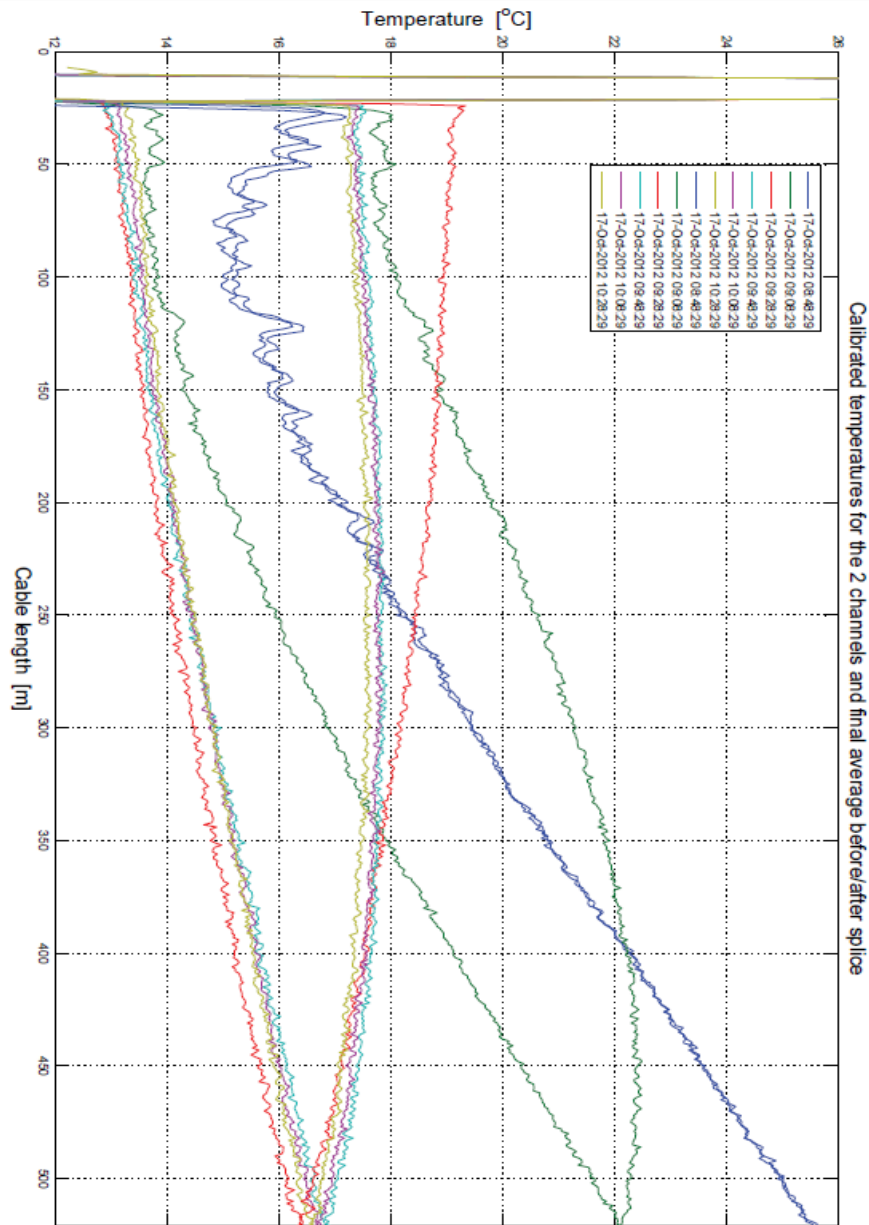
L'échelle des températures a été modifiée par rapport au graphique 30 du TRT « à chaud » pour augmenter la résolution. En effet, la température moyenne pour ce test « à froid » était d'environ 15 °C alors que pour le TRT « à chaud » elle était proche de 23°C.

Le test « à froid » a démarré le 17 octobre, au matin. Il est bien visible dans la zone délimitée par les lignes en traitillé vert, dans laquelle on remarque clairement un front froid qui se propage rapidement (~20 minutes après le début du test) de la surface vers environ 300-350 mètres de profondeur.

Après 16h00, à l'arrêt de l'écoulement de l'eau froide, le retour du système vers une condition d'équilibre est bien visible avec le gradient géothermique qui commence à se rétablir.

Il semble que, 13h après l'arrêt du test, le profil des températures dans la sonde géothermique soit proche des conditions initiales mais pas encore à l'équilibre.

Comme pour le TRT, un graphique montrant l'évolution des températures dans les brins de la sonde est proposé ci-dessous, pour montrer les résultats du test sous une autre forme.



Graphique 33 : Profils des températures mesurées avec la fibre optique pendant le test « à froid » sur quelques heures

La résolution temporelle étant fixée à 20 minutes (température moyenne enregistrée) les courbes reportées au graphique ci-dessus montrent l'évolution des températures aller /retour de la sonde à chaque intervalle. La première mesure, juste avant le démarrage du test « à froid », est représentée par la courbe bleue ayant un profil identique au gradient géothermique, sans différence de températures (pas de circulation) entre l'aller et le retour.

La deuxième courbe est la verte, 20 minutes après le démarrage du test. La température en bas de la sonde a déjà baissé de 4 °C environ et la différence de température entre l'aller et le retour de la sonde est déjà bien établie et d'environ 4 °C.

La courbe en rouge représente la température de l'eau 40 minutes après le démarrage du test. Une augmentation de la température de l'eau à la sortie de la sonde par rapport à la courbe précédente est clairement visible. La chaleur stockée en profondeur a été



« poussée » vers la surface. La méthode utilisée pour le test « à froid » ne permet pas d'imposer une puissance fixe d'extraction mais plutôt une température stable d'injection, ce qui implique que la différence de température pour cette courbe est supérieure par rapport aux autres. Avec une pompe à chaleur, qui impose une différence de température en fonction d'une puissance donnée, la température de réinjection dans la sonde aurait été, dans le cas réel, plus élevée.

Le débit de circulation dans la sonde, pour ce test, était d'environ 0.9 kg/s (0.45 kg/s par circuit) et la puissance moyenne extraite à partir de la sonde a été d'environ 18.8 kW, comparable aux futures conditions d'exploitation.

La courte durée du test et l'instabilité de la puissance d'extraction n'ont pas permis de tirer des conclusions quant à la conductivité thermique du terrain, mais ce test a montré qu'une puissance plus élevée était nécessaire pour solliciter thermiquement une part plus importante de la sonde.

12. Production de chaleur

En ce qui concerne la variante retenue pour la production de chaleur, finalement le choix s'est porté sur une centrale de production de chaleur par bâtiment aussi bien pour des questions administratives que techniques.

Pour des questions administratives concernant le client, le fait d'avoir une chaufferie par bâtiment, simplifiait la gestion des quatre bâtiments qui était confiée à plusieurs gérances au vu des affectations différentes de chacun des bâtiments. Le fait de s'affranchir d'un réseau de distribution et des pertes de distribution relatives à chaque raccordement permettait également une grande simplification dans le calcul des clefs de répartition des pertes.

Pour des questions techniques, s'agissant d'un système de production de chaleur par pompe à chaleur (PAC), une décentralisation des installations était intéressante afin d'abaisser les températures de départ des PAC en se rapprochant au maximum de la température nécessaire au besoin de chaleur. Dans le cas d'un réseau de distribution (voire plusieurs réseaux de distribution à deux niveaux de température par exemple), afin de garantir les niveaux de température aux collecteurs de chaque bâtiment, la température de la production aurait dû tenir compte d'une perte de quelques degrés liée aux pertes de chaleur.

Comme déjà évoqué au chapitre d'introduction, le COP de la pompe à chaleur est inversement proportionnel à la température de la production de chaleur (température au condenseur). A titre d'exemple, pour une baisse de la température au condenseur de 5°C, le COP augmente d'environ 8%, ce qui veut dire que la pompe à chaleur consomme 8% d'énergie électrique en moins [16].

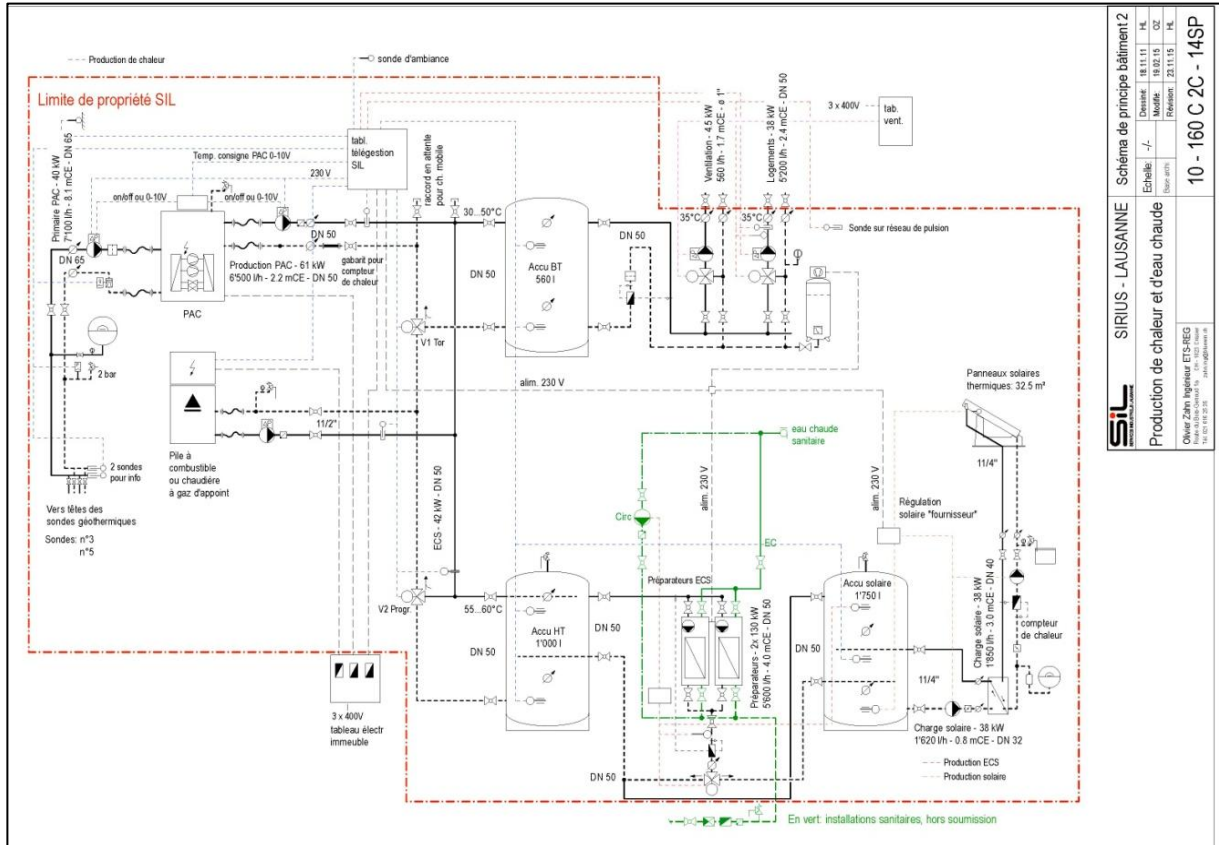
Les installations solaires thermiques étaient quant à elles déjà prévues par bâtiment, ce qui a été un argument technique supplémentaire pour finalement réaliser une installation de production de chaleur par bâtiment.

12.1 Schéma de principe de la production

Le schéma de principe initial pour la production de chaleur prévoyait 4 installations identiques sur le principe, avec une différence pour la chaufferie du bâtiment 1 (protégé) en termes de puissance.



Le schéma de principe d'une installation type est reporté ci-dessous :



SIRIUS - LAUSANNE		Schéma de principe bâtiment 2	
Production de chaleur et d'eau chaude		Échelle: -/-	Dessiné: 18.11.11 H.K.
Cable Ziani Ingénieur ETS-RES		Approuvé: 25.11.15 H.K.	Modifié: 18.02.15 O.Z.
10 - 160 C.2C - 14SP		Révisé: 25.11.15 H.K.	

Figure 15 : Schéma de principe de la production de chaleur

Dans ce schéma le périmètre en traitillé rouge définit la limite de propriété des installations et de prestation des SiL dans le cadre du contracting chaleur.

La production de chaleur est assurée par une PAC à deux allures, d'une puissance totale d'environ 60 kW, reliée à deux sondes géothermiques et à une installation solaire thermique qui participe à la production de chaleur pour l'eau chaude sanitaire, selon les exigences légales de la LVLEne 2006³, avec une surface variable entre 32 et 40 m² en fonction des besoins en eau chaude sanitaire.

Concernant la production d'eau chaude sanitaire, il a été décidé de recourir à des préparateurs d'eau chaude semi-instantanés qui permettaient de réchauffer directement l'eau du réseau jusqu'à la température de consigne fixée à 55°C. Le but étant d'éviter de monter à des niveaux de températures trop élevés avec la PAC pour les cycles d'antigel.

Une pile à combustible est également représentée sur le graphique mais n'a pas encore été installée. Le système a été dimensionné pour satisfaire aux besoins de chaleur même sans cet apport ultérieur. Il s'agit d'une opportunité saisie par les SiL dans le cadre du projet européen EnE.field concernant le déploiement de piles à combustible d'une taille de quelques kW. Les piles à combustible, dont les puissances thermique et électrique devraient être respectivement d'environ 2 kW et 2.5 kW, devraient être installées entre 2016 et 2017.

³ LVLEne citer l'article + explications



Elles participeront uniquement à la production d'eau chaude sanitaire et l'électricité produite sera injectée sur le réseau.

Ce schéma de production de chaleur devait initialement être reproduit sur les 4 bâtiments. Cependant, suite au problème rencontré sur la 3^e sonde installée, qui a ensuite été mise hors service, le schéma de principe du bâtiment 1 (en haut à gauche sur la figure 8) a dû être adapté pour utiliser la sonde restante, en bon état.

Plusieurs variantes ont été évaluées, allant de la PAC électrique couplée à la sonde géothermique avec un appoint gaz (chaudière ou couplage chaleur force) à la PAC à gaz. Finalement, c'est cette dernière option qui a été retenue, pour des questions de performances énergétique et économique. Une chaudière d'appoint gaz a également été installée pour couvrir les pics (que quelques heures par année) et assurer la sécurité, s'agissant d'un bâtiment habité par des personnes âgées.

Pour plus de détails, la liste du matériel installé dans les chaufferies est fournie en annexe.

12.2 Régulation et monitoring

En ce qui concerne la régulation, la PAC (y.c. la PAC à gaz) est pilotée par la télégestion des SiL avec un signal 0-10V fixant la température de consigne à assurer en sortie de condenseur. La régulation intégrée à la PAC gère de son côté l'enclenchement en cascade des deux compresseurs, la libération du circulateur primaire et du circulateur secondaire, les sécurités et l'équilibrage des heures de fonctionnement des compresseurs.

La température de consigne de l'accumulateur basse température, pour le chauffage, est fonction de la demande du groupe chauffage. Une courbe de chauffe en fonction de la température extérieure, avec un maximum à 40°C par -10°C ext. convient bien pour ces installations. En fonction des besoins, le système de télégestion des SiL pilote la vanne tout ou rien pour charger soit l'accumulateur pour le chauffage soit celui de l'eau chaude sanitaire, en modifiant bien évidemment les températures de consigne de la PAC.

Grâce au système de mesure mis en place, d'une part, pour mesurer les températures dans les forages avec le système DTS HALO-Sensornet (cf. documentation en annexe) et, d'autre part, dans le cadre du contracting énergétique pour le monitoring du système de production de chaleur, il est possible de réaliser des bilans sur les installations exploitées et de les comparer.

Les chapitres suivants traiteront de ces aspects.

13. Monitoring sondes géothermiques

Après le raccordement hydraulique des sondes géothermiques vers les PAC, un raccordement des fibres optiques a été réalisé à partir de chaque sonde vers le système de mesure DTS. Une sorte de boîte de dérivation, étanche, est installée dans chaque chambre de sonde pour protéger la soudure entre les fibres connectées, comme on peut le voir sur la photo ci-dessous :



Figure 16 : Chambre de sonde avec raccordement des fibres dans la boîte de dérivation

Un tube en polyéthylène de 25 mm de diamètre a été posé dans le terrain pour permettre l'installation du câble à la fin du chantier et le protéger. Sur le schéma ci-dessous sont reportées les liaisons nécessaires pour la pose du câble (en bleu clair). Un symbole résumant le type d'installation du câble dans le forage est affiché à côté de chaque sonde pour indiquer si le câble est installé dans la sonde géothermique, dans le forage, avec ou sans boucle pour assurer la continuité de la fibre optique (ceci pour réduire le nombre de canaux d'enregistrement sur le DTS).

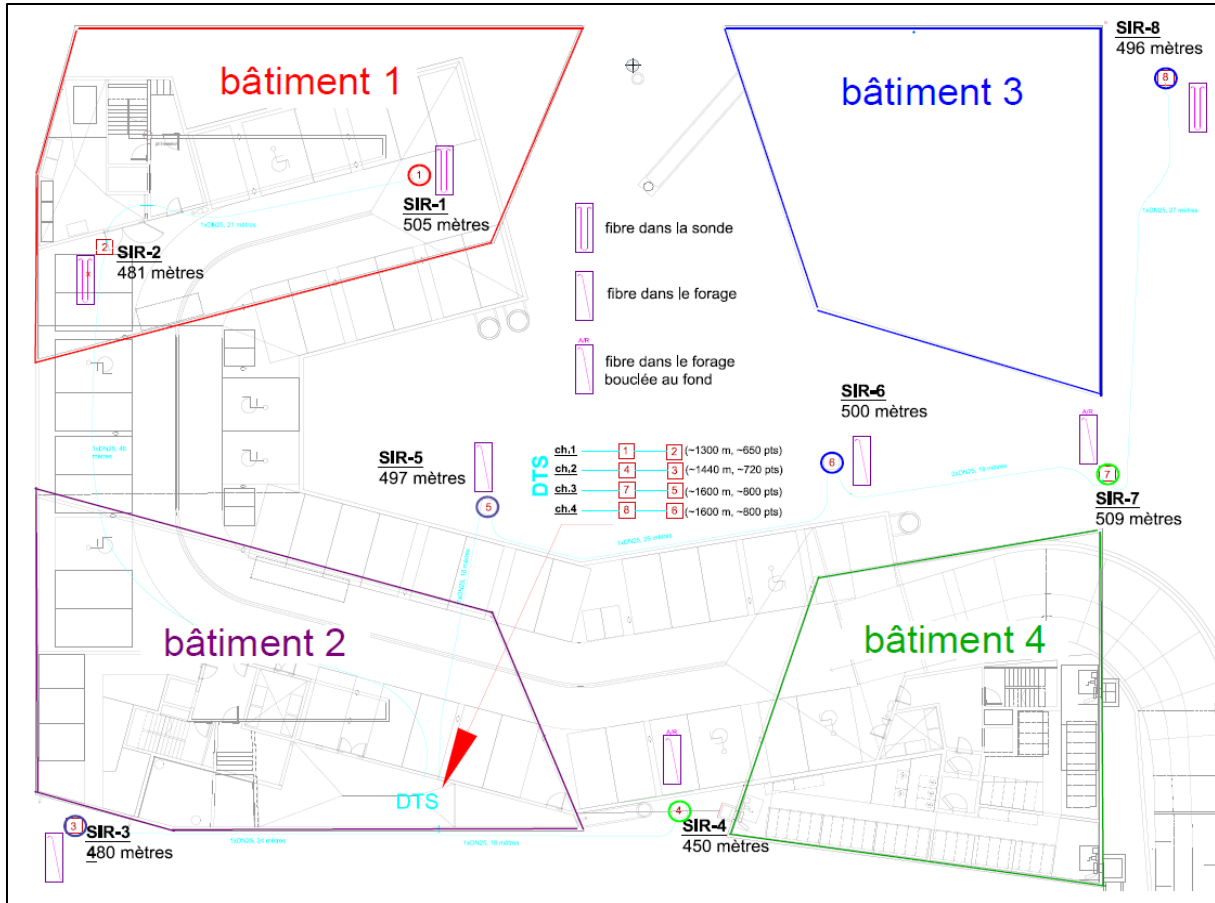


Figure 17 : Plan d'implantation des sondes équipées avec les fibres optiques

13.1 Logiciel de traitement des données

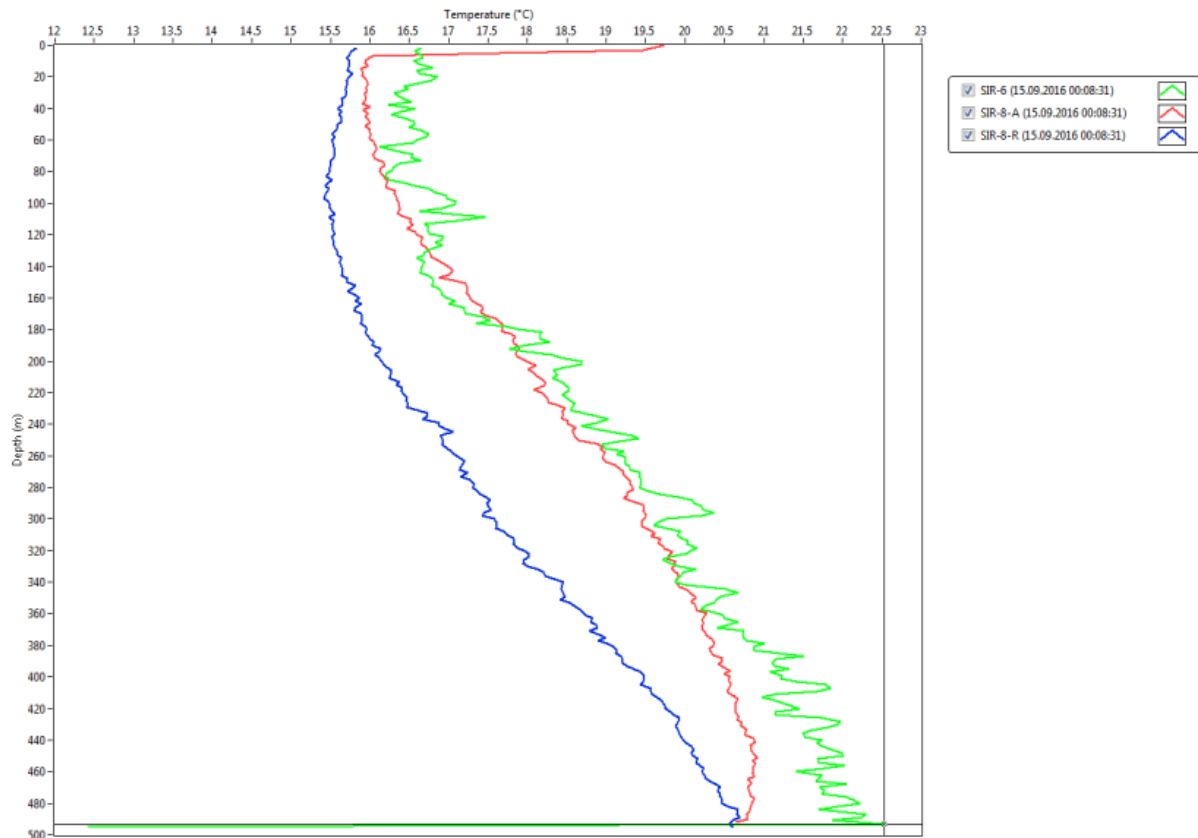
L'installation d'un système de mesure DTS permettant de suivre l'évolution des températures des forages dans le temps a été motivée par le caractère pilote du projet. L'investissement dans ce système de mesure a été possible grâce aussi à la subvention de l'OFEN pour les projets pilotes et de démonstration. En effet, le but du projet Sirius était, entre autre, après l'installation des sondes géothermiques profondes, de vérifier leur performance en mesurant les échanges avec le terrain et comprendre dans quelle mesure l'augmentation de la profondeur était une solution intéressante en comparaison avec des sondes moins profondes. Il s'agissait également, avec ce système de mesure, de vérifier si des optimisations pouvaient être apportées aux sondes pour en augmenter leur rendement d'échange.

Le système de mesure DTS HALO Sensornet, permet de mesurer la température avec une résolution spatiale de 2 mètres, ce qui est largement suffisant pour ce projet. La quantité de données enregistrées par le système à chaque mesure est d'environ 3000 points (cf figure ci-dessus). Pour la première année d'exploitation la fréquence d'enregistrement a été fixée à 20 minutes, soit environ 10'000 points par heure. Avec une masse de presque 90 millions de valeurs de températures sur la première année d'exploitation, un outil spécifique a dû être développé pour le traitement des données.



Le développement de l'outil SIRIUS-DataXplorer a été confié par les SiL à l'entreprise ITN en association avec le bureau GéoAzimut et le service informatique de la Ville de Lausanne qui a développé la base de données.

Le logiciel SIRIUS-DataXplorer permet de visualiser deux types de graphiques. Sur le premier les valeurs de température sont représentées en fonction de la profondeur pour un temps donné, qui peut être choisi. Un exemple est reporté ci-dessous :

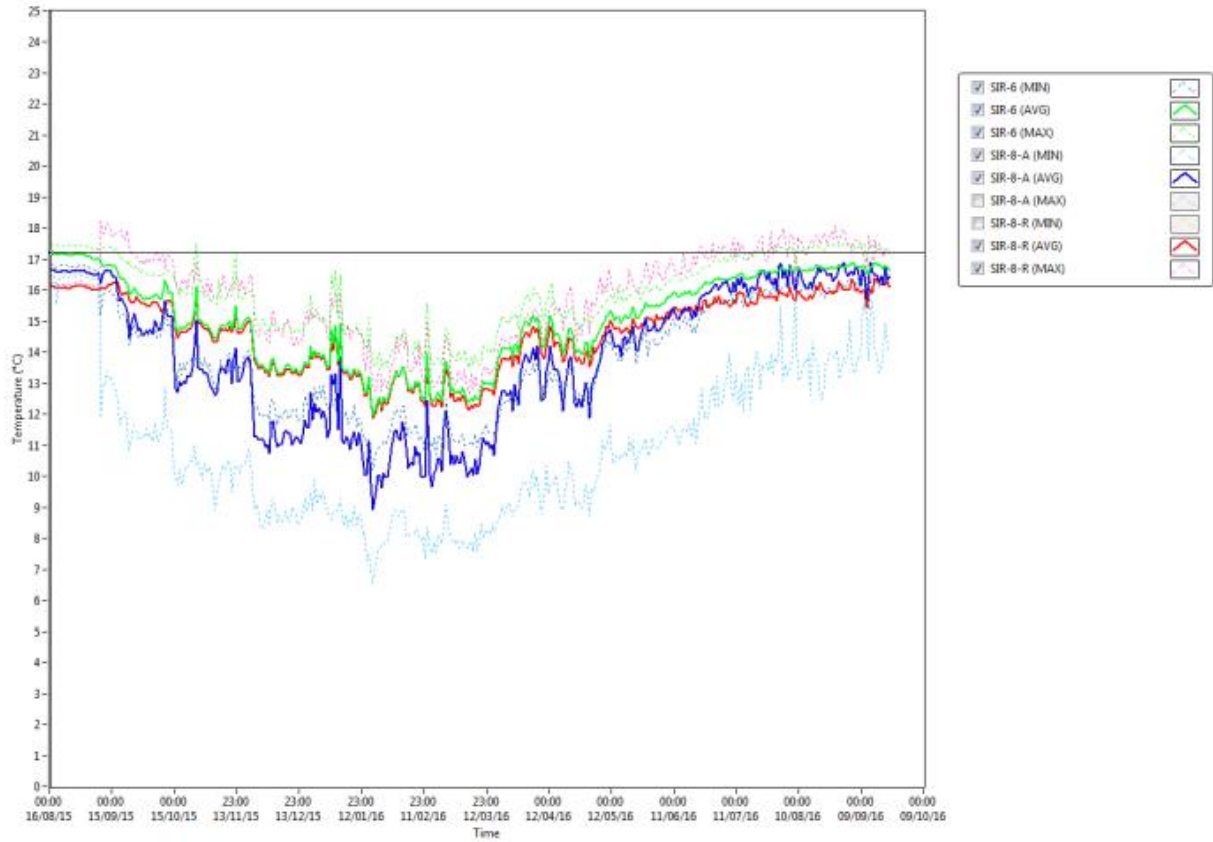


Graphique 34 : Profils de température des sondes SIR-6 et SIR 8 (A/R) en fonction de la profondeur et à un instant « t ».

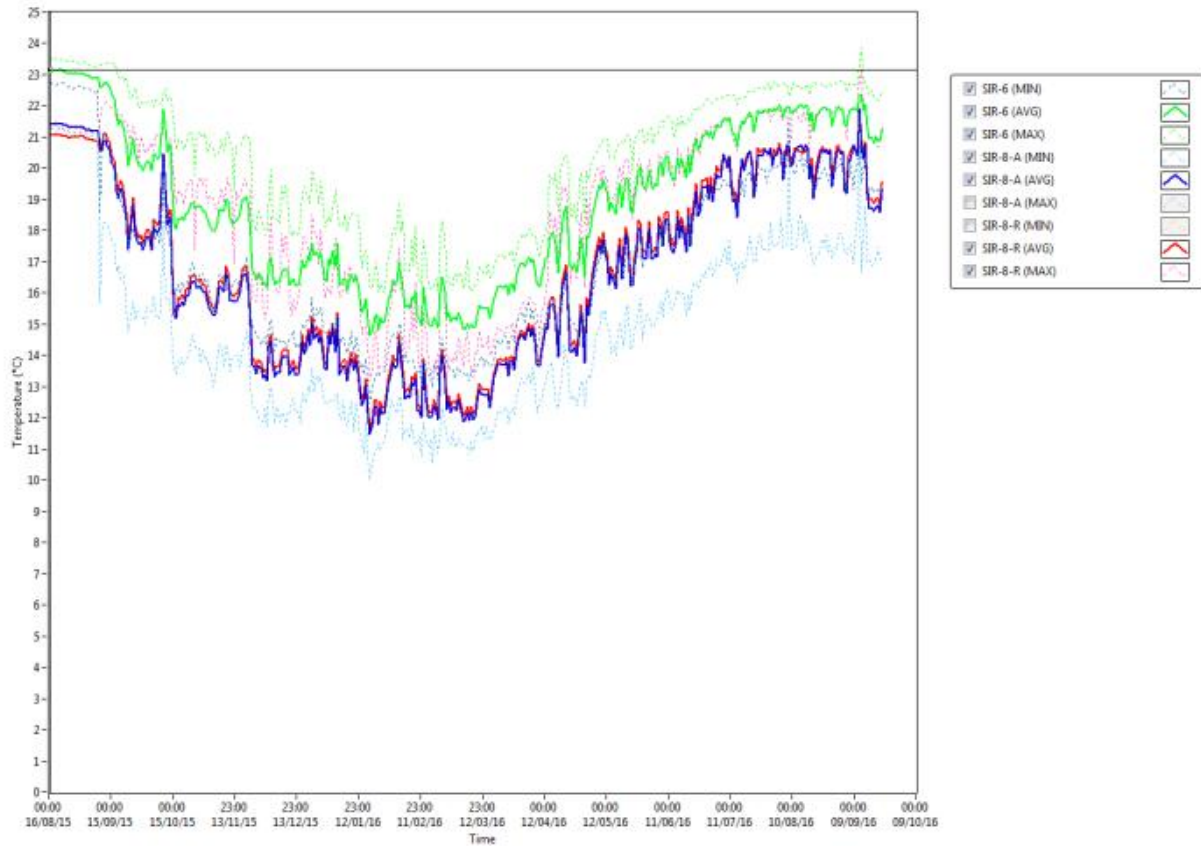
Un deuxième type de graphique permet de visualiser l'évolution de la température à une certaine profondeur en fonction du temps. Les moyennes horaires, journalières et mensuelles peuvent être choisies pour la résolution temporelle.



Deux exemples pour des profondeurs différentes sont reportés ci-dessous et à la page suivante :



Graphique 35 : Evolution des températures des sondes SIR-6 et SIR-8 (A/R) à 10 mètres de profondeur (résolution journalière sur une année)



Graphique 36 : Evolution des températures des sondes SIR-6 et SIR-8 (A/R) à 480 mètres de profondeur (résolution journalière sur une année)

En quelques secondes les graphiques sont générés et ils peuvent être exportés en format image ou dans un tableur pour un traitement ultérieur.

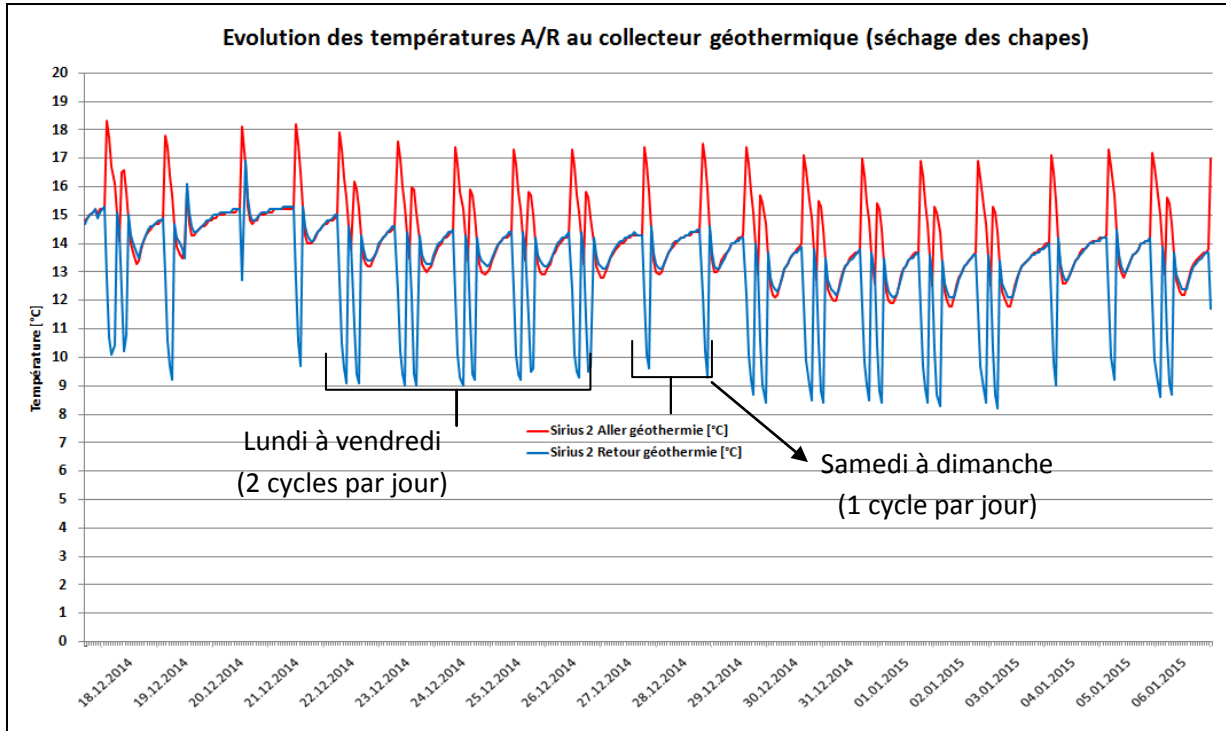
13.2 Evolution des températures des sondes géothermiques

Les installations de production de chaleur ont été utilisées avant l'arrivée des habitants dans les appartements, pour maintenir hors gel les bâtiments et participer au séchage des chapes entre fin 2014 et le printemps 2015.

Le séchage des chapes des bâtiments avec des PAC géothermiques est fortement déconseillé car une utilisation 24h/24h sur plusieurs jours à la puissance maximale pourrait porter au gel de l'installation.

L'opportunité présentée par ce besoin en chaleur a été saisie pour mettre en service les installations avant l'entrée des habitants afin de tester les PAC et les sondes dans des conditions limites, tout en contrôlant leur fonctionnement pour éviter le gel. Après avoir réalisé quelques simulations à l'aide du logiciel EWS, le choix s'est porté sur une durée de fonctionnement journalière de 8 heures, à pleine puissance (60kW), réparties sur deux périodes équivalentes de 4 heures. Le weekend, un seul cycle de 4 heures a été prévu pour vérifier l'impact d'un soutirage moins conséquent, sur les températures dans le forage.

Au graphique ci-dessous sont reportées les mesures des températures aller (avant la PAC, courbes rouges) et retour (après la PAC, courbes bleues) aux collecteurs géothermiques d'une installation:



Graphique 37 : Evolution horaire des températures aux collecteurs géothermiques (avant et après la PAC)

Les deux cycles journaliers sont clairement visibles sur le graphique, ainsi que le cycle unique du weekend. La température de l'eau au collecteur aller de la géothermie atteint en moyenne sur une heure un niveau proche de 18°C. Une différence de 5°C est prélevée sur d'eau qui circule dans l'échangeur de la PAC avec un débit d'environ 2 kg/s (soit 7.2 m³/h) et qui est en suite réinjectée dans les sondes à une température comprise entre 8 et 9 °C. Après une baisse d'environ 1 °C sur la première semaine, la température maximale au niveau du collecteur aller des sondes se stabilise à environ 17°C lors du premier cycle (le matin) et à 15 °C lors du deuxième cycle (l'après-midi). La température minimale aller des sondes reste toujours supérieure à 13 °C.

Le soutirage moins intense du weekend permet de réduire légèrement la baisse de température et de récupérer quelques dixièmes de degré en particulier après quelques semaines d'exploitation, mais son influence n'est pas très significative.

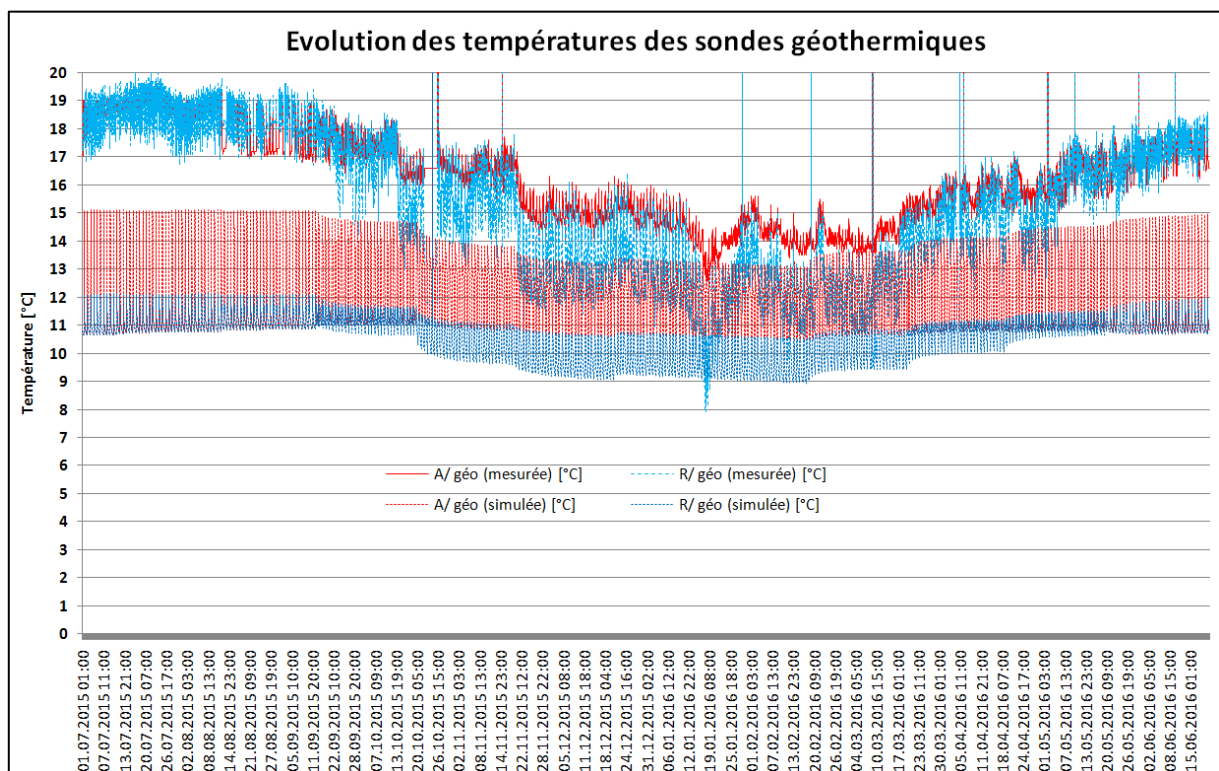


13.3 Comparaison avec les simulations

En phase d'exploitation, en plus de calculer la performance des sondes géothermiques profondes, le but de ce projet consistait également à vérifier l'écart entre les simulations réalisées sur le champ de sondes et les valeurs mesurées, pour une validation du logiciel utilisé.

Suite au test de réponse thermique réalisé sur la première sonde, les paramètres du terrain et de la sonde (conductivité du terrain, capacité thermique, résistance thermique) ont été introduits dans le logiciel EWS pour la simulation.

Dans le graphique ci-dessous sont reportées les courbes des températures mesurées (lignes continues) et simulées (lignes traitillées) pour une installation.



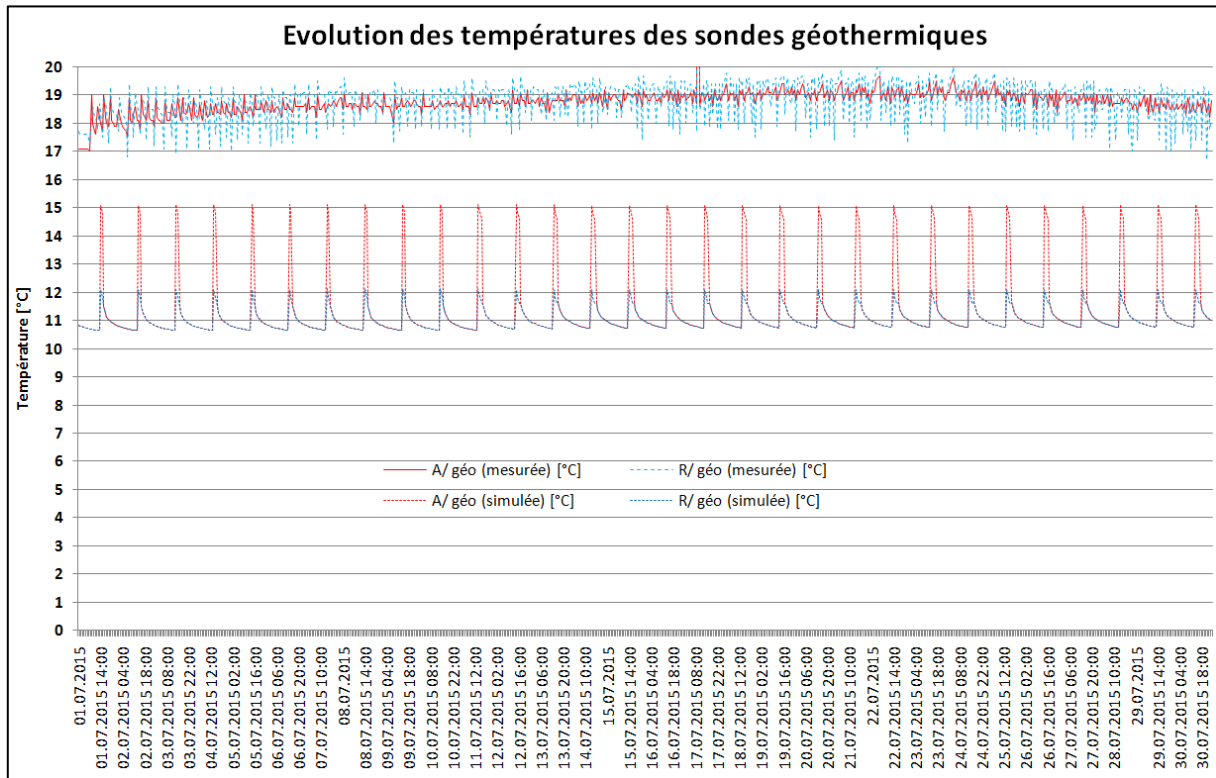
Graphique 38 : Evolution des températures « aller » et « retour » mesurées aux collecteurs géothermiques

L'écart entre les valeurs est très élevé en été. La température moyenne mesurée est supérieure d'environ 4 °C à la valeur simulée, mais ceci est probablement dû au fait que la température des sondes géothermiques est mesurée dans les collecteurs qui se trouvent en chaufferie et dont la température a tendance à s'équilibrer avec celle du local, à plus de 20°C. En été, entre fin juin et fin août, l'installation solaire permet de satisfaire la quasi-totalité des besoins en ECS et la PAC fonctionne seulement pendant quelques dizaines de minutes par jour sur plusieurs enclenchements. La valeur moyenne horaire est enregistrée dans le système de télégestion.

De ce fait, le logiciel utilisé ne permettant que d'introduire des heures de fonctionnement journalières par mois, les résultats de la simulation ne peuvent pas être comparés avec le



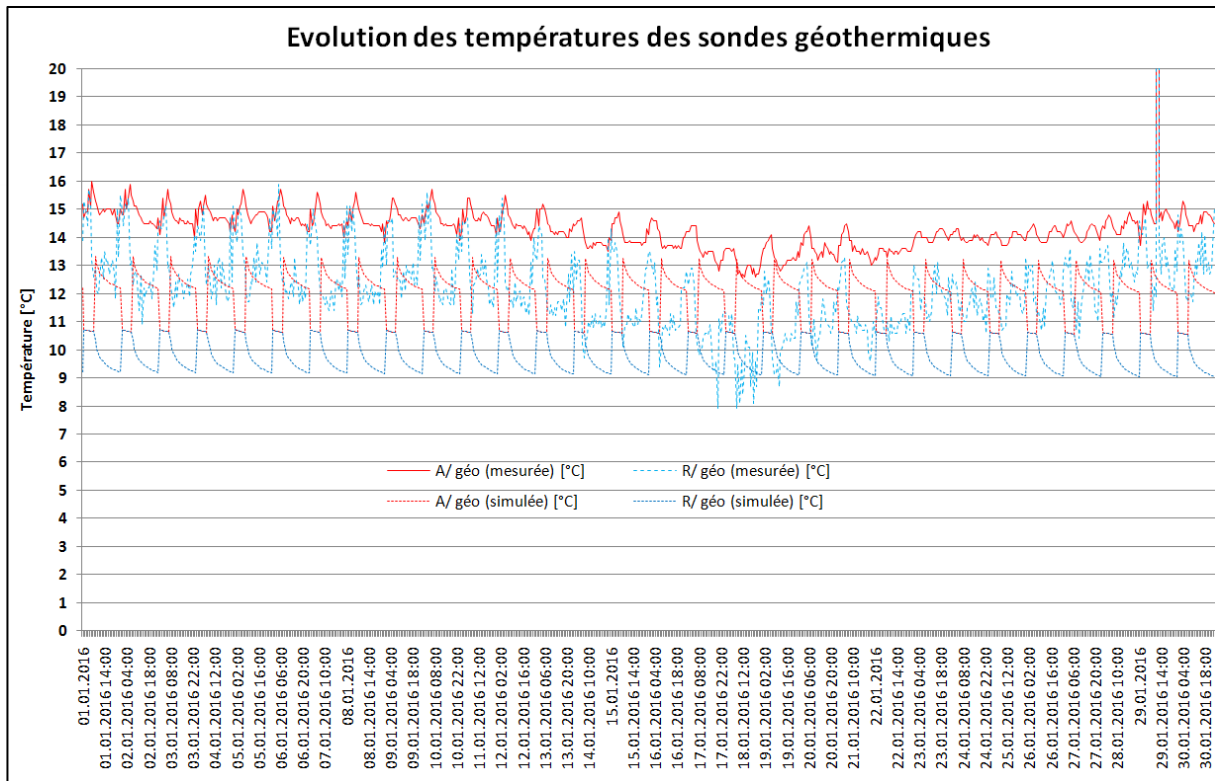
fonctionnement très ponctuel de la production de chaleur, qui s'enclenche seulement quelques minutes (cf graphique ci-dessous) :



Graphique 39 : Evolution des températures « aller » et « retour » mesurées aux collecteurs géothermiques en été

En considérant le graphique ci-dessus, on remarque bien que la durée de fonctionnement de la PAC n'est jamais très longue : la différence de température entre l'aller et le retour des valeurs mesurées est très faible (max 2 °C entre « A/géo (mesurée) » et « R/géo (mesurée) ») alors que la puissance de la PAC et le débit sont toujours les mêmes.

En hiver, lorsque la durée de fonctionnement de la PAC est plus longue et les sondes plus sollicitées, l'écart entre les valeurs des températures mesurées et simulées se réduit. C'est-à-dire que la résolution minimale horaire du logiciel permet de reproduire assez correctement le fonctionnement réel. La différence entre les températures moyennes mesurées et simulées est d'environ +2 °C, toujours en faveur des valeurs mesurées, comme il est possible de le constater sur le graphique ci-dessous :



Graphique 40 : Evolution des températures « aller » et « retour » mesurées aux collecteurs géothermiques en hiver

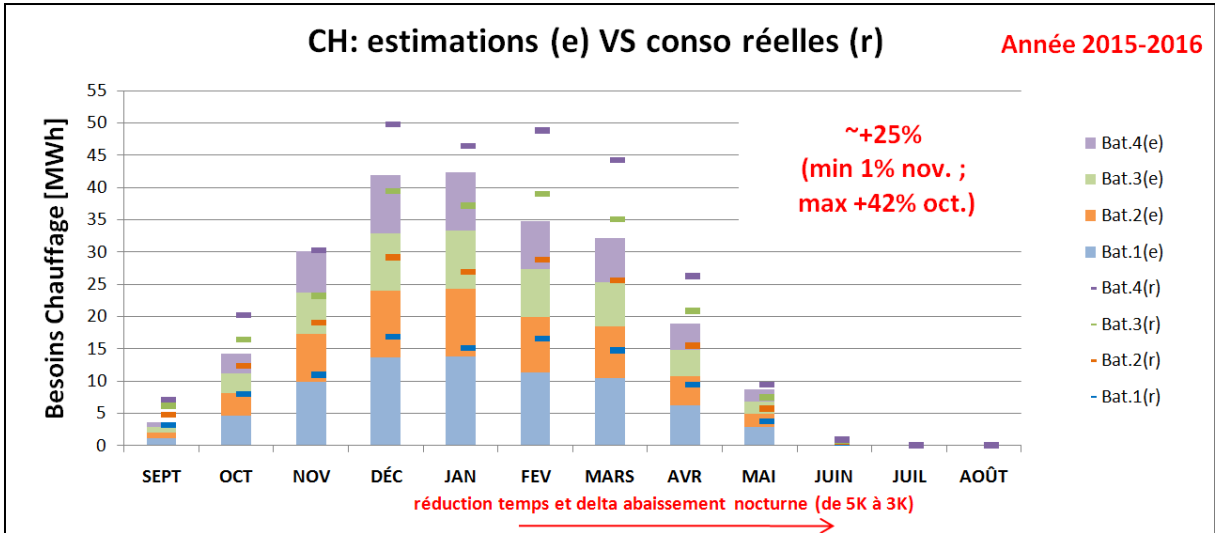
Globalement, sur toute l'année, les résultats de la simulation sont plus pessimistes que les valeurs mesurées, en utilisant comme paramètres de la simulation les valeurs issues du TRT. Pour rappel, la mesure des températures est faite au niveau des collecteurs, ce qui pourrait en partie expliquer cet écart, surtout en été.

Cependant, la tendance des courbes de température simulées est similaire à celle des valeurs mesurées et le fait que le logiciel utilisé, et en particulier les hypothèses prises à partir du TRT soient plus pessimistes que la réalité, introduit un bon coefficient de sécurité au niveau des résultats, ce qui est préférable.

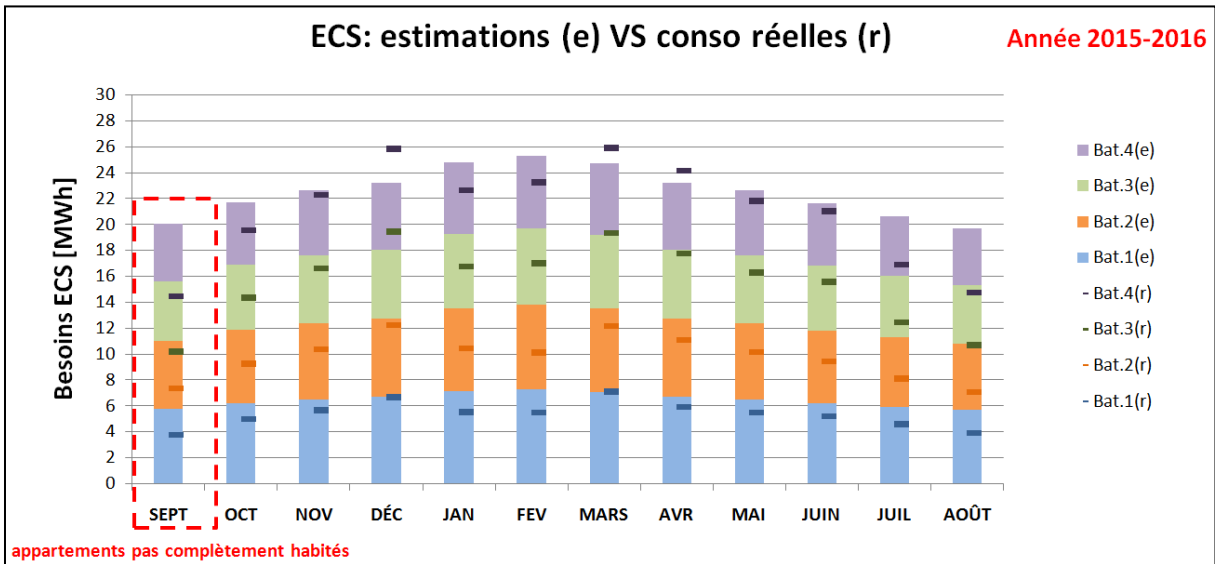
Pour cette installation, par rapport aux simulations, la quantité d'énergie réellement extraite à partir du champ de sondes est supérieure d'environ 2'000 kWh sur les ~73'000 kWh attendus (~+3% par rapport aux estimations). Ce qui permet de pouvoir comparer donc les résultats des simulations par rapport aux valeurs mesurées.

Plus généralement, l'écart entre les besoins de chaleur des bâtiments et les consommations réelles est tout à fait correct pour une première année d'exploitation.

Sur les graphiques suivant sont reportés les besoins en chaleur estimés par bâtiment (histogramme) et les valeurs réelles de consommation toujours par bâtiment (marqueur), pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire :



Graphique 41 : Comparaison entre les valeurs de consommations « chauffage » estimées et réelles



Graphique 41 : Comparaison entre les valeurs de consommations « eau chaude sanitaire » estimées et réelles

En ce qui concerne le chauffage, la surconsommation est d'environ 25%. A relever que, fin janvier, la régulation a été modifiée en réduisant l'abaissement nocturne de 5 °C à 3 °C. Cette modification a été nécessaire car, lors du soutirage intense en début de journée, les températures de départ du chauffage étaient légèrement en dessous de la consigne, la PAC étant « occupée » par la production d'ECS.

En ce qui concerne les consommations d'ECS, malgré des écarts assez importants entre chaque bâtiment, probablement liés aux différentes affectations, les consommations réelles sont globalement proches des estimations.

Les bâtiments «subventionné» et «marché libre» présentent sur l'année des surconsommations de l'ordre de 15%.



14. Evaluation des performances des sondes géothermiques

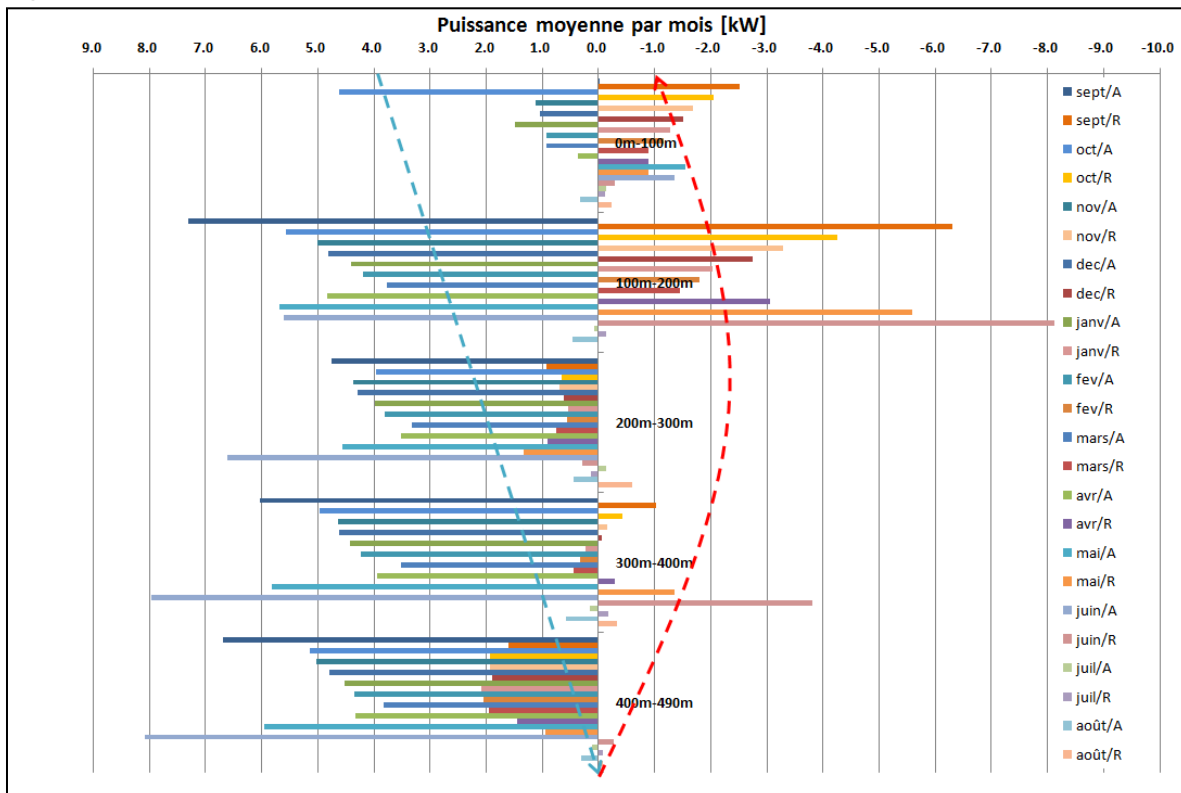
Comme déjà annoncé aux chapitres précédents, un des buts du projet Sirius était de mesurer les performances des sondes géothermiques profondes installées, en faisant des bilans énergétiques tout au long de la sonde.

Pour ce faire, un système de mesure faisant recours à des fibres optiques a été mis en place (cf chapitre précédent).

Le débit circulant dans chaque paire de sondes étant fixe, un bilan thermique peut être fait tout au long de la sonde afin de comptabiliser les gains et les pertes thermiques de l'échangeur.

Pour rappel, les PAC installées sur le projet Sirius ont deux allures, mais le débit reste constant indépendamment de la puissance fournie. Ceci a permis de pouvoir différencier les deux niveaux de puissance d'exploitation des sondes, en fonction de la différence de température de l'eau mesurée entre l'aller et le retour au niveau des collecteurs géothermiques.

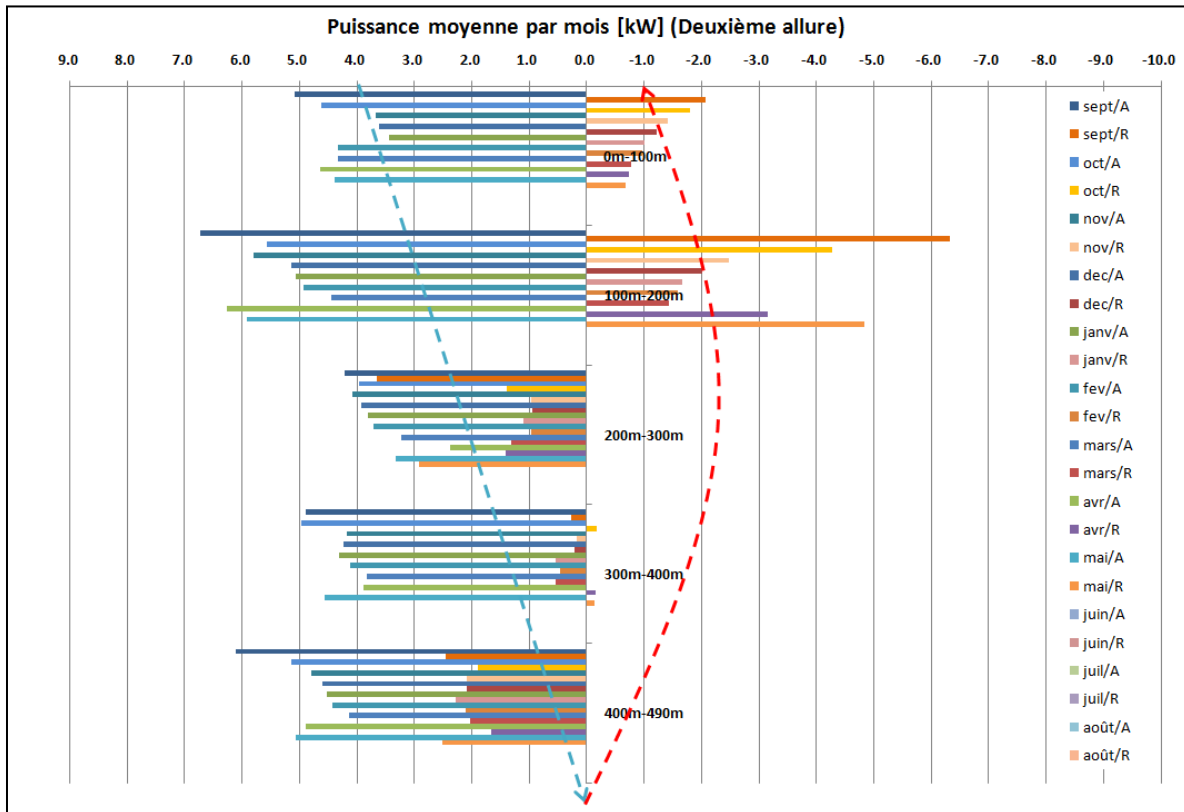
Sur le graphique ci-dessous sont reportées les puissances thermiques mensuelles soutirées (signe positif) et cédées (signe négatif) au terrain pour l'aller (gamme de couleurs « froides », dans le graphique ci-dessous) et le retour de la sonde (gamme de couleurs « chaudes », dans le graphique ci-dessous), sur 5 sections allant de la tête au pied de la sonde, durant une année d'exploitation. Les lignes traitillées bleues et rouges sont indicatives et représentent le sens d'écoulement du fluide dans la sonde.



Graphique 42 : Evolution des puissances moyennes mensuelles soutirées et cédées au terrain par une sonde sur 5 sections de profondeur.



Le graphique suivant a été obtenu en considérant uniquement les valeurs relatives à une exploitation de la sonde géothermique avec la deuxième allure de la PAC (soit une puissance plus élevée) :



Graphique 43 : Evolution des puissances moyennes mensuelles (en deuxième allure) soutirées et cédées au terrain par une sonde sur 5 sections de profondeur.

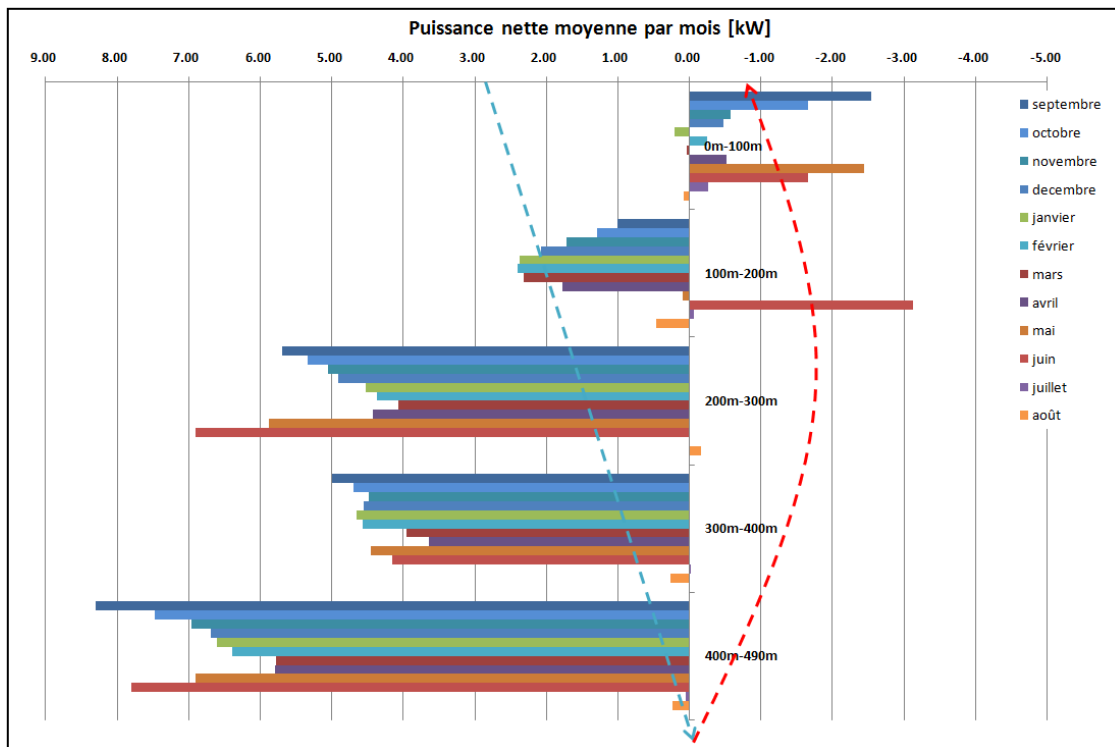
En analysant ces graphiques, les considérations suivantes peuvent être faites :

- Globalement, la contribution du retour de la sonde entre 0 et 200 mètres est négative, c'est-à-dire que la chaleur prélevée en profondeur est cédée au terrain (les graphiques avec le bilan global seront présentés après).
- La couche d'isolation installée entre 0 et 120 mètres de profondeur n'est probablement pas assez isolante pour conserver la chaleur, mais l'approche est validée par ces mesures. En effet la perte de température de 0 à 100 mètres est inférieure à celle entre 100 et 200 mètres, malgré le fait que la différence de température entre le retour de la sonde et le terrain et entre le retour de la sonde et l'aller soit supérieure dans la section proche de la surface et donc les pertes de chaleur devraient être plus élevées.
- En fonction de la puissance prélevée, la contribution du premier niveau (0-100 mètres) est plus ou moins importante. Ceci peut s'expliquer par le fait que, le débit étant constant à une augmentation de la puissance d'extraction (deuxième allure de la PAC), la température de réinjection dans la sonde est plus basse et permet d'exploiter aussi les premières couches du terrain se trouvant à une température inférieure par rapport aux couches plus profondes.
- Les contributions de juillet et août sont pratiquement inexistantes, le solaire thermique fournissant la majeure partie des besoins pour l'eau chaude sanitaire. Le fonctionnement de la PAC est sporadique et de courte durée, la puissance moyenne horaire résultante est très faible.



Maintenant, il est important de faire un bilan des contributions par section, pour identifier les portions de terrain qui ont été les plus exploitées. En effet, en prenant comme exemple la section 100m-200m, on s'aperçoit que la contribution positive tout au long de l'année est comparable à celle des niveaux inférieurs. Cependant, la contribution négative (déperdition dans le terrain) est aussi très importante, à tel point que cette section n'a finalement que très peu contribué à la puissance totale extraite.

Les graphiques ci-dessous ont été obtenus simplement en faisant la différence des contributions positives et négatives pour chaque section.

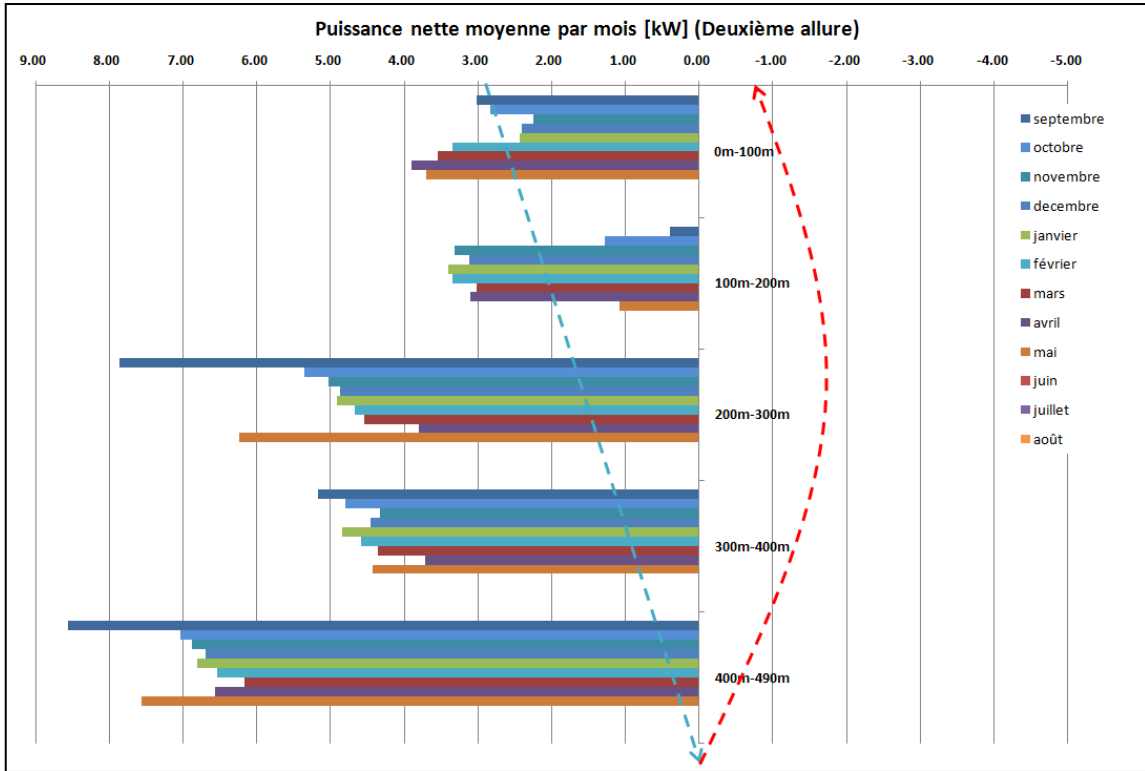


Graphique 44 : Evolution des bilans de puissances moyennes mensuelles soutirées et cédées au terrain par une sonde sur 5 sections de profondeur.

En fonction de la saison, la contribution de la première section est variable, passant de négative à nulle, légèrement positive en janvier et de nouveau négative. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la température de réinjection vers la sonde était plus basse en hiver à cause de l'exploitation intensive des sondes géothermiques (écart de plus de 6 °C entre le maximum, en été, et le minimum en hiver).

La contribution de la deuxième section, entre 100 m et 200 m, augmente en allant vers la saison d'hiver (maximum en février), diminue au printemps et devient finalement négative en juin.

Ce graphique, sur lequel est représenté le bilan global de puissance par section, peut être comparé avec le graphique suivant, relatif aux bilans pour un fonctionnement de la PAC en deuxième allure (puissance d'extraction sur les sondes plus élevée) :



Graphique 45 : Evolution des bilans de puissances moyennes mensuelles (en deuxième allure) soutirées et cédées au terrain par une sonde sur 5 sections de profondeur.

Comme déjà indiqué, lorsque la PAC fonctionne en deuxième allure, le débit de circulation dans les sondes étant constant, la température de réinjection vers les sondes est plus basse comparée au fonctionnement en première allure car la différence de températures entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur augmente.

Par rapport au graphique 41, la contribution positive de la première section (0m-100m) est très visible et intéressante. A partir de 200 mètres les puissances moyennes prélevées sont comparables et proches aux bilans mensuels globaux, ce qui veut dire que la puissance supplémentaire prélevée est fournie quasi entièrement par les deux premières sections de la sonde, de 0 à 200 mètres.

Une optimisation des débits de circulation, ou plutôt une variation du débit de circulation en fonction de la puissance de la PAC permettrait de mieux exploiter les sondes sur toute la longueur.

Cette option semblait être possible au moment de la commande, mais finalement sa mise en place s'est révélée plus compliquée que prévu compte tenu du modèle de PAC et des auxiliaires choisis.

Des discussions sont en cours avec le fabricant pour trouver une solution satisfaisante afin d'assurer une différence de température constante entre l'aller et le retour de la sonde.

Dans le tableau ci-dessous sont reportées les valeurs moyennes de puissance extraite à partir d'une sonde géothermique (SIR-8) :

Mois	Puissance moyenne extraite	Puissance moyenne extraite
------	----------------------------	----------------------------



	(moyenne 1 ^{ère} et 2 ^{ème} allure) [kW]	(2 ^{ème} allure uniquement) [kW]
Septembre 2016	16.3	25
Octobre 2016	16.5	21.3
Novembre 2016	17.2	21.8
Décembre 2016	17.4	21.5
Janvier 2016	18.1	22.4
Février 2016	17.2	22.5
Mars 2016	15.4	21.6
Avril 2016	14.1	21.1
Mai 2016	14.5	23
Juin 2016	13.5	0
Juillet 2016	0.2	0
Août 2016	0	0
Moyenne (sans juillet et août)	16	22

Tableau 4 : Récapitulatif des puissances moyennes mensuelles extraites tous modes de fonctionnement confondus (1^{ère} et 2^{ème} allure) et en 2^{ème} allure.

La puissance moyenne extraite sur une année d'exploitation, tous modes de fonctionnement confondus, est d'environ 16 kW par sonde, si on exclut les mois de juillet et août pendant lesquels les sondes ont été très peu exploitées, les installations solaires couvrant la majeure partie des besoins en eau chaude sanitaire.

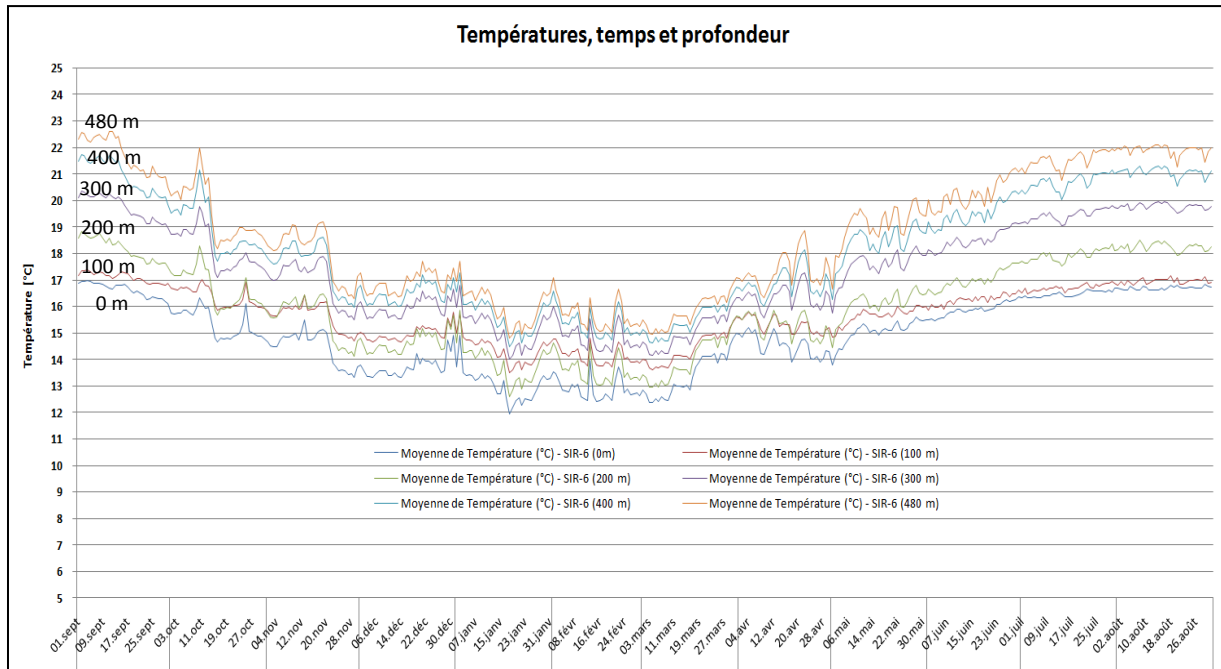
Avec un fonctionnement de la PAC en deuxième allure, la puissance moyenne extraite est d'environ 22 kW par sonde. Sur les 3 installations avec PAC électriques, sur plus de 3500 heures de fonctionnement, la PAC a fonctionné en 2^{ème} allure environ un tiers du temps, principalement pour la production d'eau chaude sanitaire.



15. Evolution des températures des sondes géothermiques

Grace au logiciel SIRIUS-DataXplorer, développé pour ce projet, il est possible de réaliser rapidement des graphiques montrant l'évolution des températures des sondes en fonction de leur profondeur.

Le graphique ci-dessous est produit à partir des données mesurées par le système DTS. Pour une meilleure compréhension, l'évolution des températures moyennes journalières est reportée pour une seule sonde géothermique. D'autres graphiques sont disponibles en annexe de ce rapport.



Graphique 46 : Evolution annuelle des températures de la sonde SIR-6 pour 6 profondeurs différentes

La différence entre les températures moyennes journalières au début de l'exploitation, en septembre, est d'environ 5.5°C. L'écart entre les températures aux différentes profondeurs se comprime en fonction de l'exploitation de la sonde, en atteignant un minimum d'environ 3 °C en mi-janvier 2016. Lorsque la sonde est moins sollicitée (à partir du mois d'avril), les températures des niveaux plus profonds, au delà de 200 mètres, (courbes « 300 m », « 400 m » et « 480m » du graphique ci-dessus) remontent plus rapidement vers les niveaux de température initiaux par rapport aux couches de terrain proches de la surface (courbes de « 0 m » et « 100 m ») dont les courbes de température ont une pente moins marquée.

A noter le croisement entre les courbes 100 et 200 mètres. En effet, à partir de mi-octobre et jusqu'au mois d'avril, la température moyenne journalière du forage à 200 mètres de profondeur est inférieure de presque un degré par rapport à la courbe de température à 100 mètres. Ceci pourrait être expliqué en se référant aux graphiques précédents relatifs aux puissances moyennes (cf graphiques 42 et 44). Il est possible que les déperditions de chaleur compensent l'abaissement de température dans la section entre 0 et 100 mètres et qu'à partir de 200 mètres les déperditions seraient inférieures et ne permettraient pas de compenser l'abaissement de température. D'ailleurs, au début de l'exploitation (en septembre), la tendance de la courbe « 100 m » montre un abaissement moins marqué que les autres courbes.





16. Performances de l'installation

A des fins de facturation, des relevés mensuels sont effectués sur les installations du projet Sirius.

Un bilan des énergies en entrée et en sortie du système est réalisé mensuellement, ce qui donne un coefficient de performance global du système.

On parlera dans ce cas de JAZ 3 (soit Jahresarbeitszahl), ou COPA 3, pour le COP-système même s'il s'agit COP mensuels et pas annuels (cf. schéma ci-dessous) :

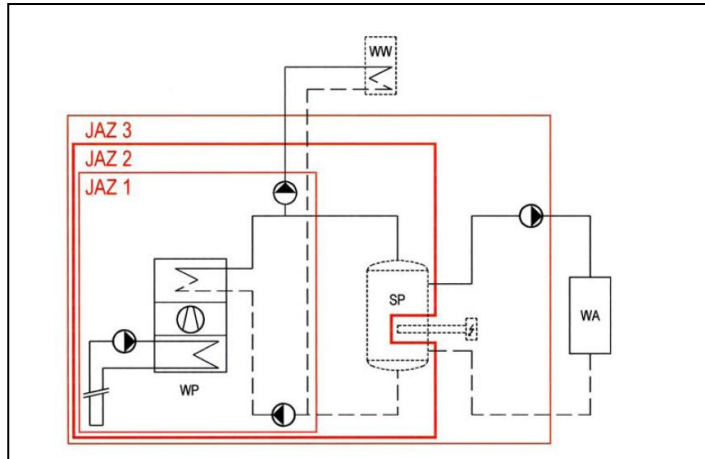
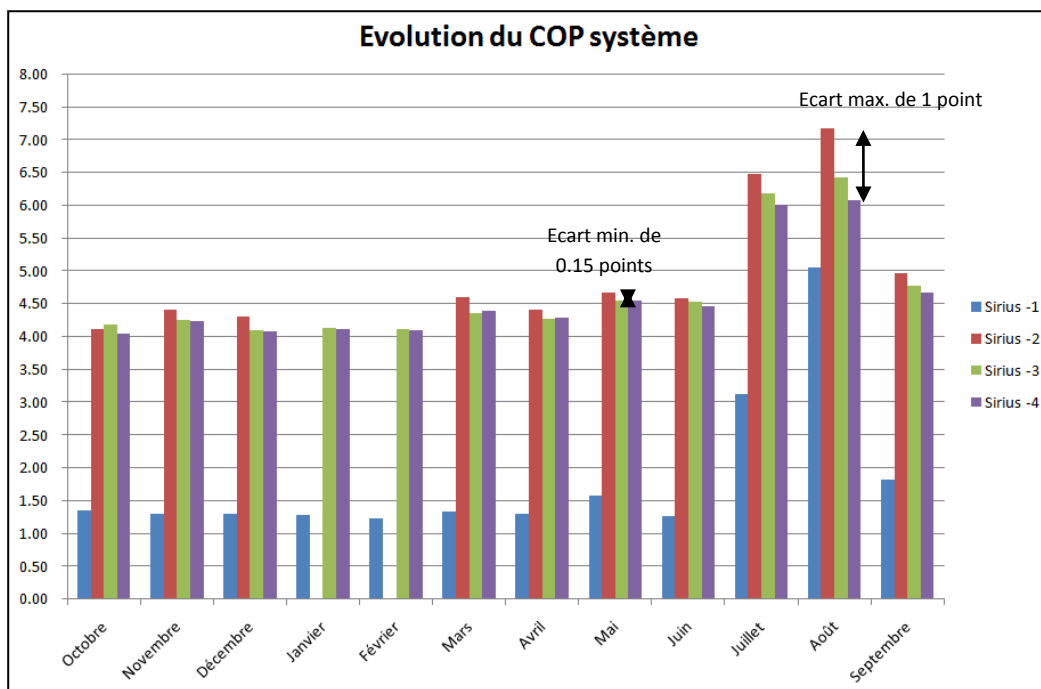


Figure 18 : Schéma indiquant les limites pour le calcul des différentes COP ou JAZ [17].

L'évolution du COP-système mensuel des installations est reportée au graphique suivant :



Graphique 47 : Evolution du COP-système mensuel pour les 4 installations.

Le COP-système est plutôt stable tout au long de l'année, mis à part la saison estivale (Juillet et Août) pendant laquelle la production solaire couvre la majeure partie des besoins en eau chaude sanitaire.



Le COP des installations électriques sont proches, avec un écart maximum d'environ 1 point du COP en été et un minimum au mois de mai, inférieur à 0.15.

L'écart en été est sans doute dû à la grande variation des consommations d'eau chaude sanitaire, qui sont plus élevées sur le bâtiment 4 par rapport au bâtiment 2. Les installations solaires ayant une surface identique, la part solaire est plus importante pour le bâtiment qui consomme moins d'eau chaude. La PAC fonctionne donc moins et le COP-système bénéficie des très bons COP de l'installation solaire.

Le COP de l'installation avec PAC à gaz (celle du bâtiment 1) est aussi très stable et ressent l'effet positif du solaire en été.

Le COPA moyen (il s'agit bien, dans ce cas, du COP annuel) des installations électriques, pondéré sur la quantité d'énergie fournie mensuellement, est de 4.38 et pour l'installation au gaz (PAC gaz +chaudière) il est de 1.47.

Le COPA calculé à partir des températures extrêmes selon chapitre 7, avait été estimé pour les installations électriques à 4.3 et pour l'installation au gaz à 1.4.

Il est encore tôt pour tirer des conclusions, il faudra suivre l'évolution du COPA et des températures du champ de sondes sur une durée d'au moins 10 ans pour comparer les valeurs simulées aux mesures réelles.



17. Aspects économiques

Avant de passer aux conclusions, ce chapitre traitera brièvement des aspects économiques du projet et en particulier des investissements réalisés, qui sont reportés au tableau suivant :

Position	Description	Montant HT
Maç-GC	Fosses en béton, fouilles	fr. 30'000
Electricité	Tableaux électriques, racc. des PAC, des sondes et des compteurs	fr. 90'000
	Matériel de mesure standard (sondes et compteurs)	fr. 30'000
Prod. de chaleur	PAC, distribution, régulation et mise en service	fr. 274'000
	Forage et pose de 7 sondes géothermiques*	fr. 460'000
Distr. et isolation	Isolation distribution en chaufferie	fr. 25'000
Solaire thermique	Solaire thermique, accus, préparateurs ECS	fr. 255'000
Sanitaire	Raccordements sondes géoth., collecteurs	fr. 50'000
Honoraires	CVS, hydrogéologue et électricien (suivi réalisée par SiL pas inclus)	fr. 83'000
Mesures spéciales	Coût matériel de mesure DTS pour sondes géothermiques	fr. 105'000
Divers		fr. 20'000
	TOT	fr. 1'422'000

*la sonde géothermique hors service a été prise en charge par l'assurance et en partie par l'entreprise.

Tableau 5 : Récapitulatif des coûts du projet

L'installation des sondes géothermiques profondes, leurs raccordements et le GC représentent plus d'un tiers des investissements.

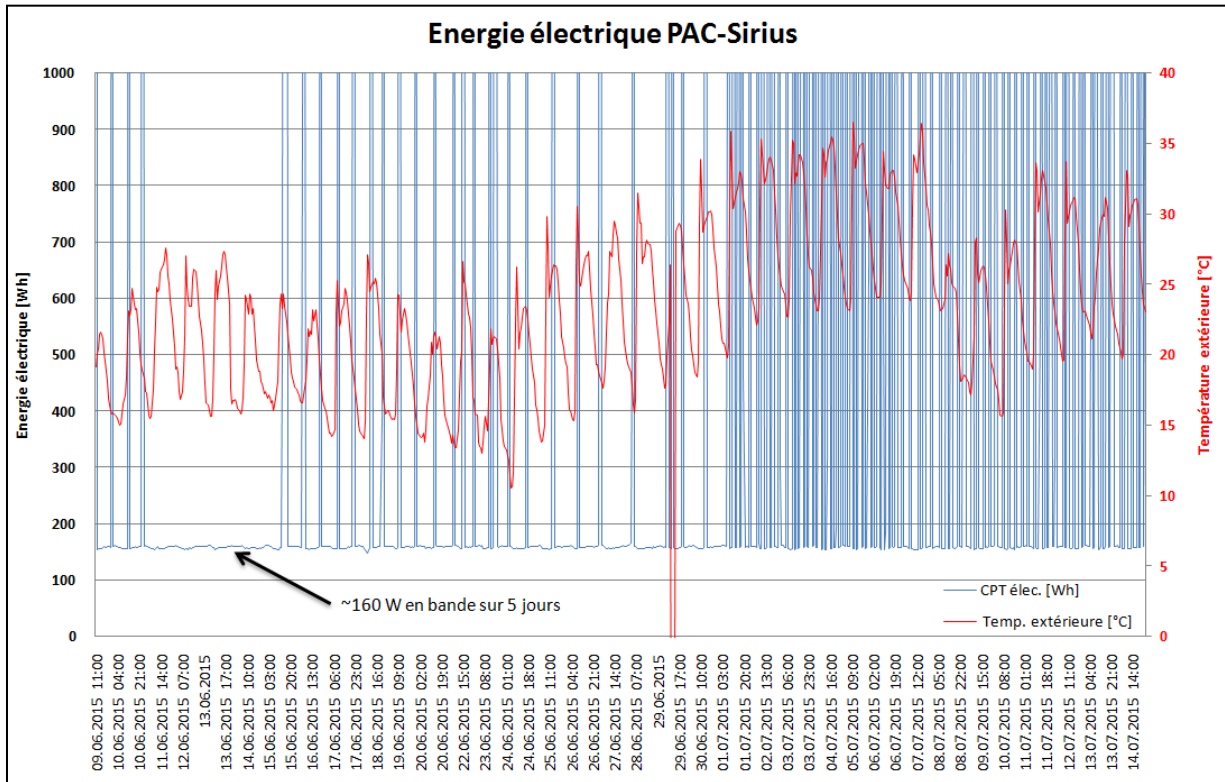
Le prix pour le forage et la pose des sondes géothermiques ne tient pas compte des opérations supplémentaires visant à garantir la pose des sondes, ces coûts étant assumés par l'entreprise selon les engagements contractuels.



18. Pistes d'optimisation des PAC

Les premiers jours d'exploitation, un suivi détaillé des installations a permis d'identifier une consommation relativement élevée des PAC en stand-by.

Sur le graphique ci-dessous est reportée la consommation électrique d'une PAC en fonction de la température extérieure :



Graphique 45 : Consommation électrique de la PAC sur un mois et identification d'une consommation en bande en stand-by

Le seuil de consommation minimum par heure se situe à environ 160 Wh et est bien visible au début de l'exploitation avec une consommation en bande sur 5 jours. Le même comportement a été identifié sur les 3 PAC électriques et a été signalé au fabricant. Cette consommation serait liée au chauffage des carters des compresseurs, qui sert à maintenir l'huile à une température garantissant une bonne viscosité (min. 15°C).

Des discussions sont en cours pour savoir si ce chauffage peut être coupé, compte tenu du fait que les PAC sont installées dans des chaufferies et que la température intérieure est proche de 20°C.

La consommation des chauffages des compresseurs représente environ 5% de la consommation globale de la PAC. Même si les surcoûts d'exploitation induits par cette consommation sont anecdotiques par rapport au reste des charges, c'est dans un souci d'efficacité et d'économie d'énergie que cette démarche est menée par les SiL.

D'autres mesures d'optimisation sont prévues, comme par exemple la variation du débit en fonction de la puissance de la PAC, car sur la première année d'exploitation, le débit de circulation de l'eau dans les sondes a été fixé sur la puissance maximale alors que les PAC



fonctionnent seulement le 30% du temps en deuxième allure. Une économie d'énergie de quelques pourcents est attendue suite à cette modification. Cette dernière mesure de réduction du débit aura des impacts sur l'exploitation optimale des couches supérieures du terrain (cf chapitre 14) qui ne sont pas encore connus, mais le but est d'améliorer l'exploitation des couches du terrain proches de la surface.



19. Conclusions

Dans un premier temps, avant de réaliser un projet visant l'installation de PAC reliée à des sondes géothermiques profondes, un important travail de recherche sur l'état de l'art en Europe a été fait.

Les paramètres caractérisant le comportement des sondes géothermiques ont également été étudiés afin de comprendre le fonctionnement du système.

Ensuite, les résultats des simulations entre différentes variantes de champs de sondes ont été comparés dans le but d'estimer l'effet de l'augmentation de la profondeur des sondes géothermiques et d'analyser la variation d'autres paramètres comme, par exemple, l'écartement.

En effet, un écartement entre les sondes de 5% par rapport à la profondeur (rapport B/H) paraît une bonne solution pour réduire la percée thermique du champ de sondes et en assurer une exploitation durable dans le temps, en tout cas dans les conditions géologiques de Lausanne (Molasse).

Si la place à disposition ne le permet pas, l'augmentation d'environ +30% de la profondeur des sondes permet de compenser l'abaissement de la température du champ de sondes et en assurer aussi une exploitation durable.

La combinaison de ces deux effets est bénéfique et c'est l'approche qui a été appliquée au projet Sirius.

Une part importante des travaux d'avant projet a été consacrée à l'identification des paramètres théoriques qui caractérisent le comportement des sondes géothermiques. Le but principal était de comprendre sur quels paramètres il était intéressant d'agir afin de réduire les pertes de température et maximiser ainsi la température à la sortie de la sonde.

Suite à cette analyse, il a été conclu que la sonde géothermique double-U n'est pas optimale pour l'extraction de la chaleur à une profondeur de 500 mètres et que, en tous cas au début du projet, ils n'existaient pas d'autres solutions industrielles de sonde géothermique, comme par exemple les sondes coaxiales, pour extraire la chaleur à ces profondeurs tout en limitant les pertes de température.

Les travaux de développement d'une nouvelle géométrie de sonde profonde, plus performante (ex. coaxiale), ont donc été reportés à une étape ultérieure, dans le cadre du projet d'éco-quartier des Plaines-du-Loup.

Pour les sondes double-U de 500 mètres prévues sur le projet Sirius, les améliorations se sont finalement concentrées sur la mise en place d'une couche isolante sur les conduits en montant, de 120 mètres de profondeur jusqu'à la surface, et à l'installation de plusieurs tuyaux d'injection (3 au total) permettant, d'une part, de réaliser une injection en trois paliers et, d'autre part, d'écarter les tubes de la sonde.

En ce qui concerne le système de mesure, un effort particulier a été consacré à l'installation de câbles à fibre optique dans les sondes géothermiques pour pouvoir mesurer la température en fonction de la profondeur. Ce volet, en plus de la sur-profondeur des sondes, fait de ce projet un pilote car, à notre connaissance, l'utilisation des fibres optiques pour la mesure de température dans les sondes géothermiques était une première en Suisse.

Le système DTS donne pleine satisfaction, tout comme le logiciel SIRIUS-DataXplorer qui a été développé dans le cadre de ce projet pour le traitement de la masse de données provenant du DTS. Cependant, même si le fabricant du système DTS indique qu'aucune



calibration n'est nécessaire, il est fortement recommandé d'en faire une (comme celle réalisée par le laboratoire EFLUM de l'EPFL) avant de démarrer la campagne d'acquisition.

Par rapport au chantier d'implantation des sondes géothermiques, malgré les difficultés liées à la géologie, 8 sondes géothermiques ont pu être implantées dans des forages ayant une profondeur supérieure à 450 mètres, qui était l'objectif minimum du projet.

Ce projet a démontré que la réalisation des forages au delà de 450 mètres de profondeur est faisable, en ayant recours à des techniques de forage standards des sondes géothermiques, même dans des terrains peu compétents.

La pose des sondes géothermiques est une des opérations plus problématique. L'utilisation de sondes renforcées permet d'assurer une exploitabilité de la sonde sur le long terme et de prendre moins de risques en phase d'installation par rapport aux sondes géothermiques standards (PN16).

Sur les 8 sondes géothermiques prévues, 7 sondes sont exploitées depuis plus d'un an avec de bons résultats. La sonde géothermique défectueuse (installée sous le parking) a été mise hors service.

Les performances des sondes ont été calculées par section de profondeur et les mesures ont permis d'identifier quelles sections de la sonde contribuent finalement à la puissance nette extraite.

Le comportement à long terme et l'évolution des puissances d'extraction en fonction de la profondeur doit encore être suivi pendant quelques années pour tirer des conclusions, mais les premières intuitions seront utiles pour identifier des pistes d'amélioration.

Les installations sont exploitées maintenant depuis plus d'un an. Les COPA attendus sont proches et légèrement supérieurs aux valeurs simulées, mais avant de tirer des conclusions, il faudra attendre encore quelques années d'exploitation.

Finalement, même du côté des PAC, qui sont des produits connus et standards, certaines pistes d'optimisation ont été identifiées et d'autres seront encore étudiées à l'avenir pour tenter d'augmenter leur efficacité.

La variation du débit dans les sondes en fonction de la puissance d'extraction paraît une piste d'optimisation évidente, mais pour des installations de ce type (gamme de puissance de 60 kW), sans circulateur intégré, sa mise en œuvre est plutôt complexe...



20. Remerciements

L'Office fédéral de l'énergie est remercié pour le soutien financier de ce projet et en particulier du système de mesure DTS, qui n'aurait pas pu être installé sans la subvention pour les projets pilotes et de démonstration.

Je tiens à remercier également la Direction des SiL pour la confiance et le soutien qui m'a été accordé lors de la réalisation du projet qui, comme tout projet pilote, a connu des problèmes et des difficultés qui ont été finalement résolus avec une encore plus grande satisfaction.

Et finalement, je remercie également le maître d'ouvrage du projet immobilier (Coopérative Cité Derrière) pour la patience et la collaboration, les entreprises (Augsburger Forages SA et Bernard Chevalley SA en particulier), les mandataires (bureau CVS Zahn et Alpgeo Sàrl) et tous les collègues, qui ont permis de mener à bien ce projet passionnant.



21. Bibliographie

- [1] U. Liman, N. Waelti. Préavis 2011/24. Projet de construction de quatre bâtiments, comprenant au total 104 logements, un commerce, des espaces communautaires, un parking souterrain de 49 places et 7 places de parc extérieures, sis à l'avenue de Morges 139 et à la rue Couchirard 6. Lausanne 2011.
- [2] M. Matthey et D. Pahud. Recherche des paramètres permettant d'élever la température moyenne des fluides circulants dans des sondes en terre verticales et destinées à l'alimentation de pompes à chaleur. Rapport final OFEN 194398, Bern, 1996
- [3] Catégories de géothermie. <http://geothermie-schweiz.ch>
- [4] Hellström, G. (1991). Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Theory. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden. ISBN 91-628-0290-9
- [6] J. Acuña, Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers, Licentiate Thesis 2010, KTH School of Industrial Engineering and Management, Division of Applied Thermodynamic and Refrigeration, STOCKHOLM, pp 62-67.
- [7] M. Eberhard, O. Sachs, Tiefen-EWS Oftringen (706 m):Direktheizen mit einer 40-mm-2-Kreis PETiefen-Erdwärmesonde– Bestimmung und Interpretation der thermodynamischen Eigenschaften bei variierenden Durchflussraten und Entzugsleistungen, Bundesamt für Energie BFE Forschungsprogramm Geothermie, Bern. 2010.
- [8] Dr. Mark Eberhard EBERHARD & Partner. Wirtschaftlichkeitsermittlung einer Sondenisolation im obersten Abschnitt einer Erdwärmesondenanlage Otelfingen ZH. AG Schachenallee 29, 5000 Aarau. Novembre 2003
- [9] Dr. Mark Eberhard EBERHARD & Partner. Erdwärmesondenfeld Aarau, Heizen und Kühlung („Free-Cooling“) eines grossen Bürogebäudes mit teilweise wärmeisolierten Erdwärmesondes. AG Schachenallee 29, 5000 Aarau, Octobre 2005.
- [10] D. Pahud, B. Lachal, Mesure des performances thermiques d'une pompe à chaleur couplée sur des sondes géothermiques à Lugano (TI). Rapport OFEN n. 240135. Bundesamt für Energie BFE Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen. Bern. 2004
- [11] P. Eskilson. Thermal analysis of heat extraction boreholes, Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, S-22100 Lund, Sweden (1987).
- [12] Rybach L., 2001. Status and prospects of geothermal heat pumps (GHP) in Europe and worldwide; sustainability aspects of GHPs. Chapter 2.1, International summer school on direct application of geothermal energy. Int. Geothermal Days Germany : 85-100.
- [13] Signorelli S., Kohl T. & Rybach L., 2004. Sustainability of production from borehole heat exchanger fields. 29 Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford : 356-361.
- [14] G. Steinmann, Projet Sirius - Sondes géothermiques profondes- Test de réponse thermique du terrain, Swiss Géo Testing Sàrl, Nax, octobre 2012.



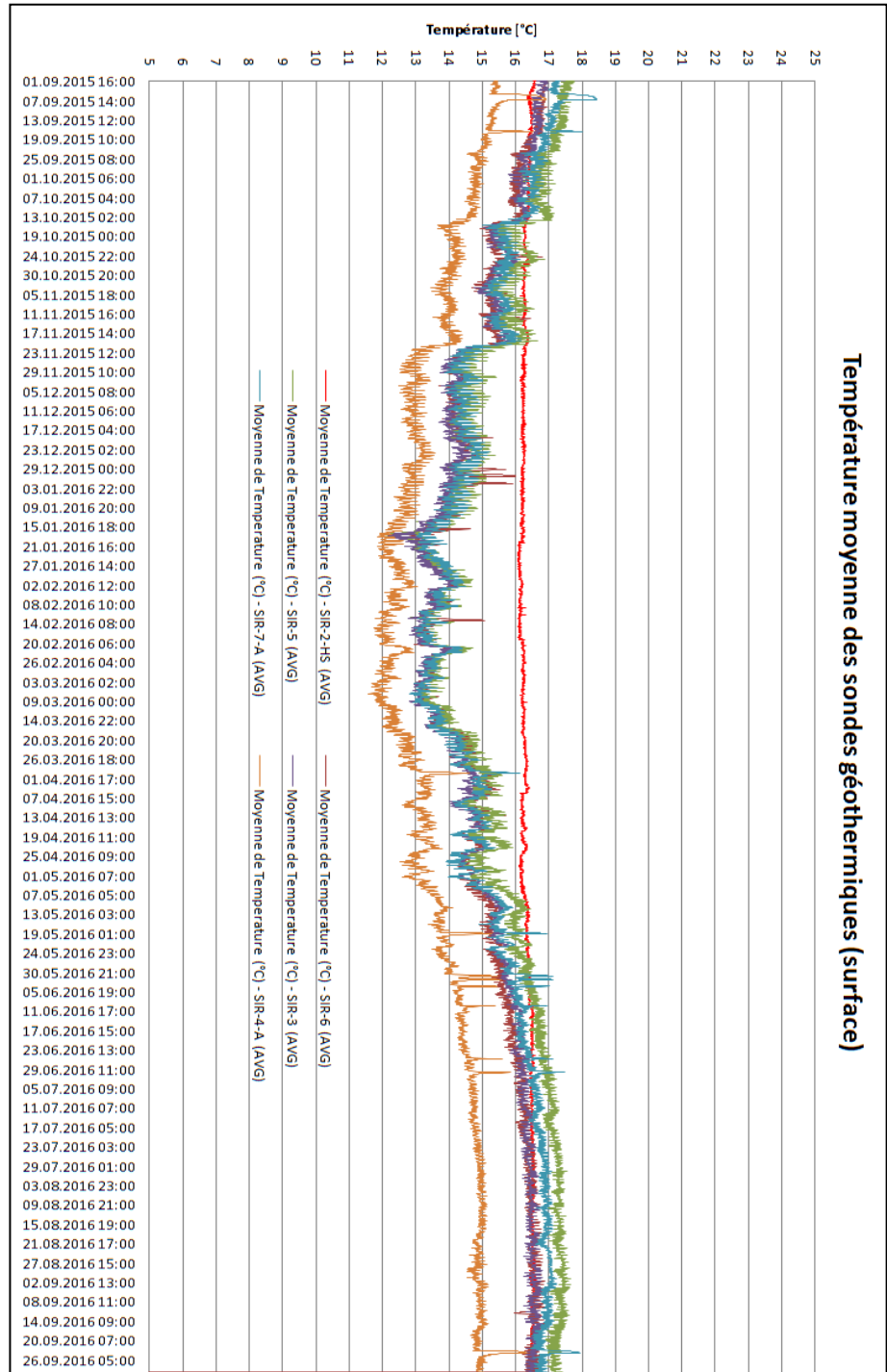
- [15] F.Ciocca, H. Huwald, Projet Sirius - Sondes géothermiques profondes-Travaux de mesure et recherche sur deux sondes géothermiques de 500 m. SCHOOL OF ARCHITECTURE, CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING (ENAC), Laboratory of Environmental Fluid Mechanics and Hydrology (EFLUM), Lausanne, Février 2013.
- [16] R.Phillips, Pompes à chaleur – Questions et réponses- Réponses aux questions des personnes qui souhaitent mieux connaître les pompes à chaleur. Office fédéral de l'énergie (OFEN), Février 2010.
- [17] M. Erb, P. Hubacher, M. Ehrbar. Analyse in situ d'installations de pompes à chaleur Anis 1996-2003, Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2004.



ANNEXES



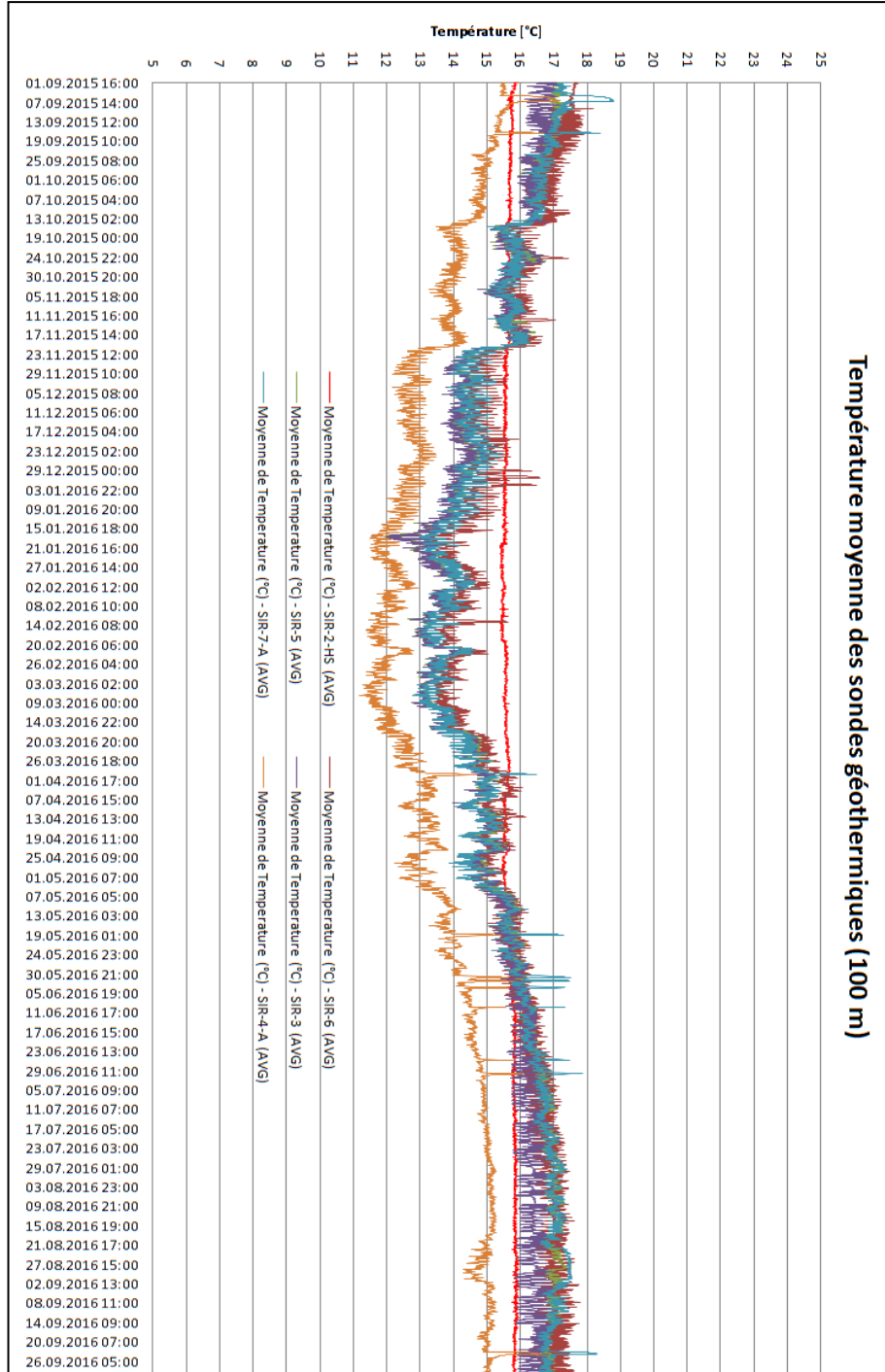
ANNEXE A.1 – Evolution des températures des sondes géothermiques



Graphique A.1 : Evolution des températures moyennes des forages (en surface) sur une année



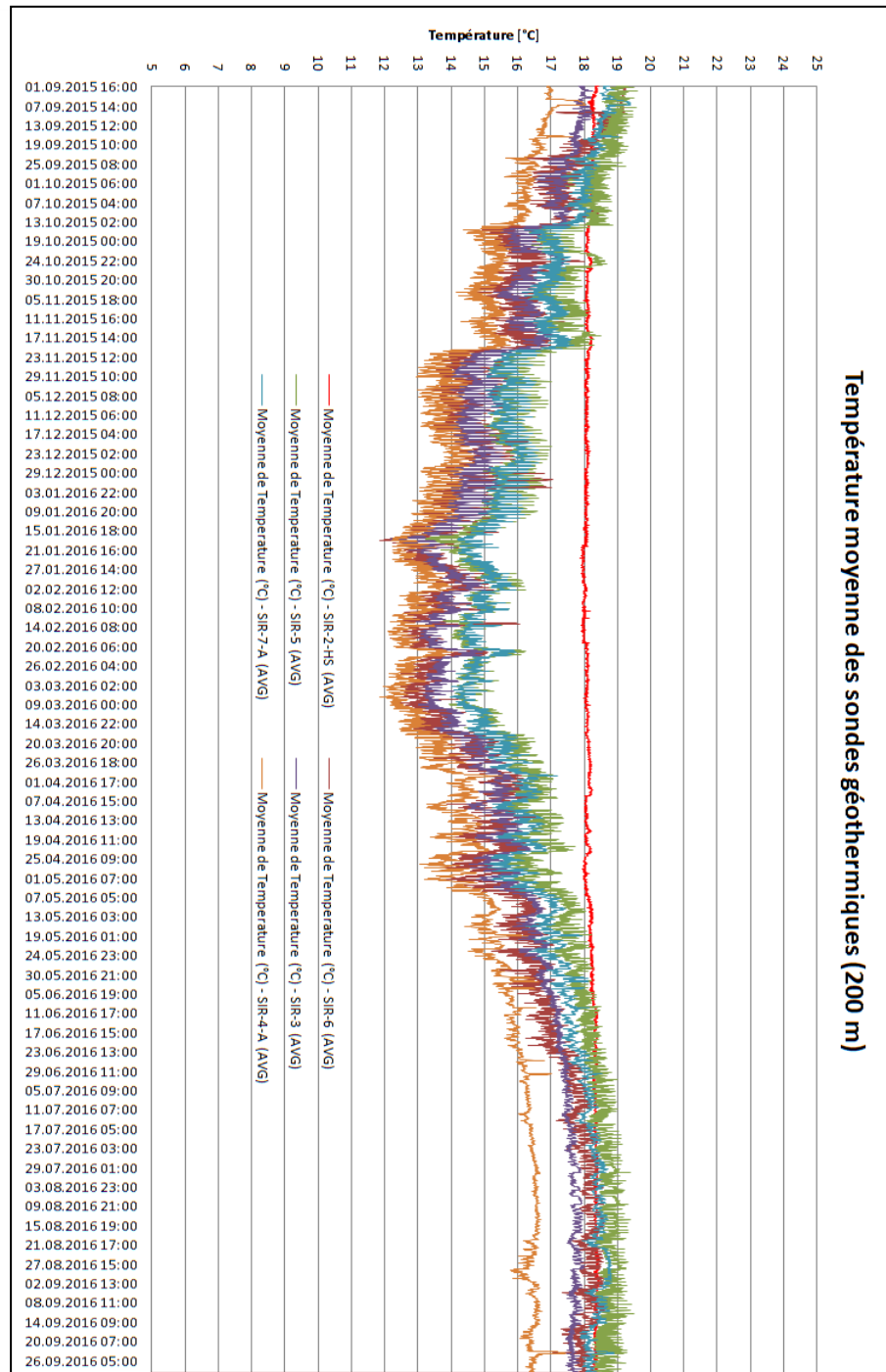
ANNEXE A.2 – Evolution des températures des sondes géothermiques



Graphique A.2 : Evolution des températures moyennes des forages (à 100 mètres de profondeur) sur une année



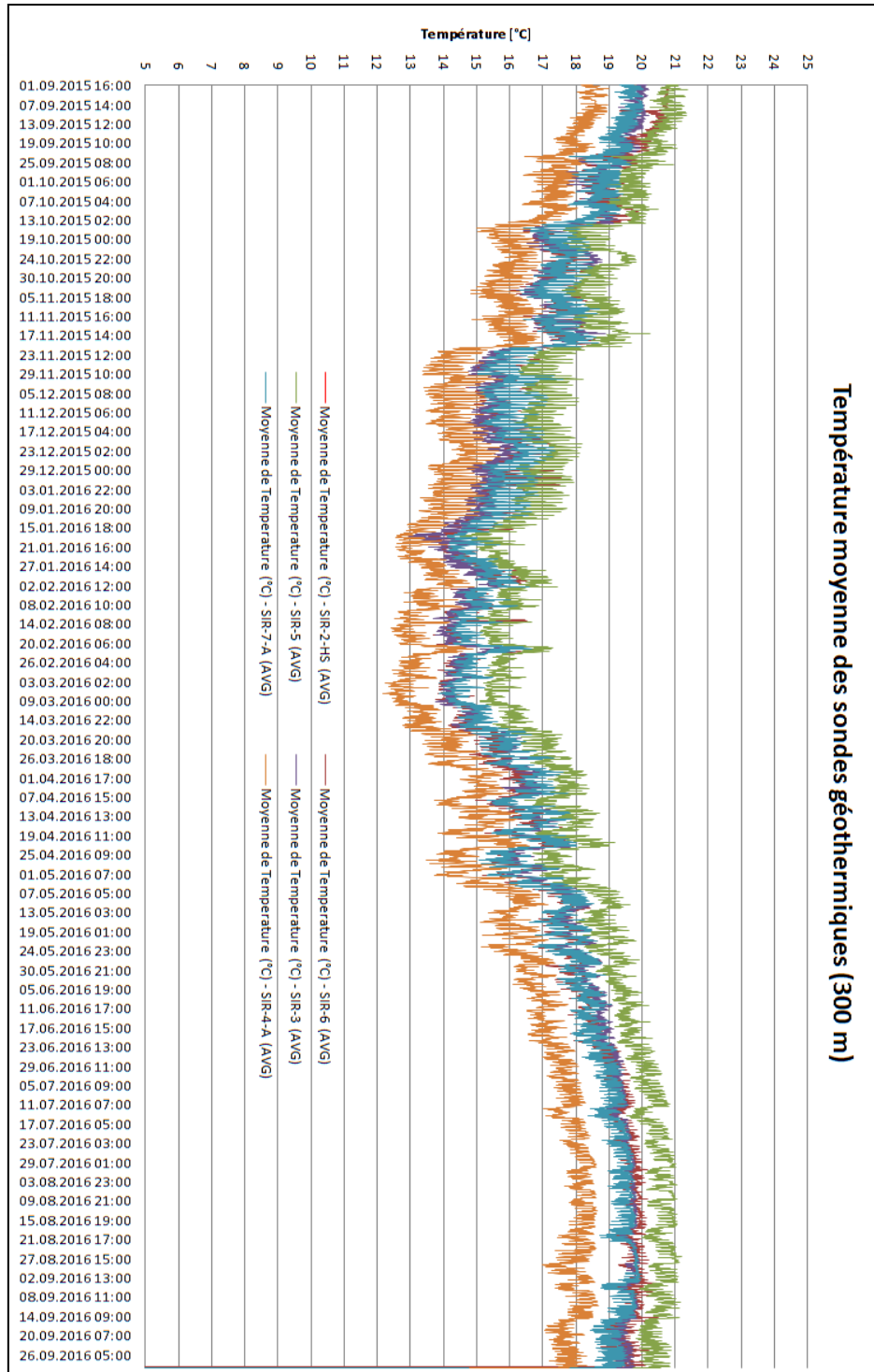
ANNEXE A.3 – Evolution des températures des sondes géothermiques



Graphique A.3: Evolution des températures moyennes des forages (à 200 mètres de profondeur) sur une année



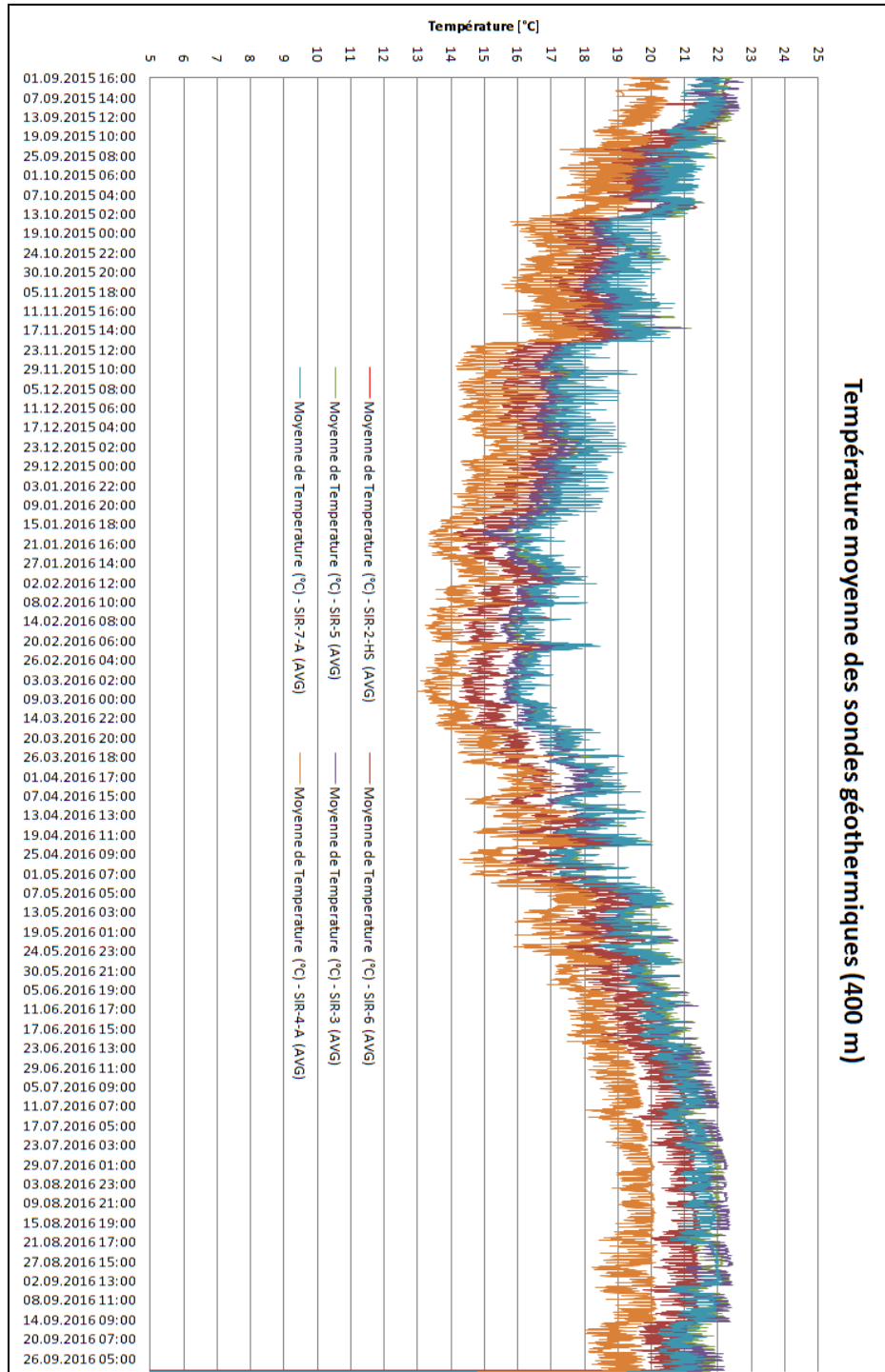
ANNEXE A.4 – Evolution des températures des sondes géothermiques



Graphique A.4: Evolution des températures moyennes des forages (à 300 mètres de profondeur) sur une année



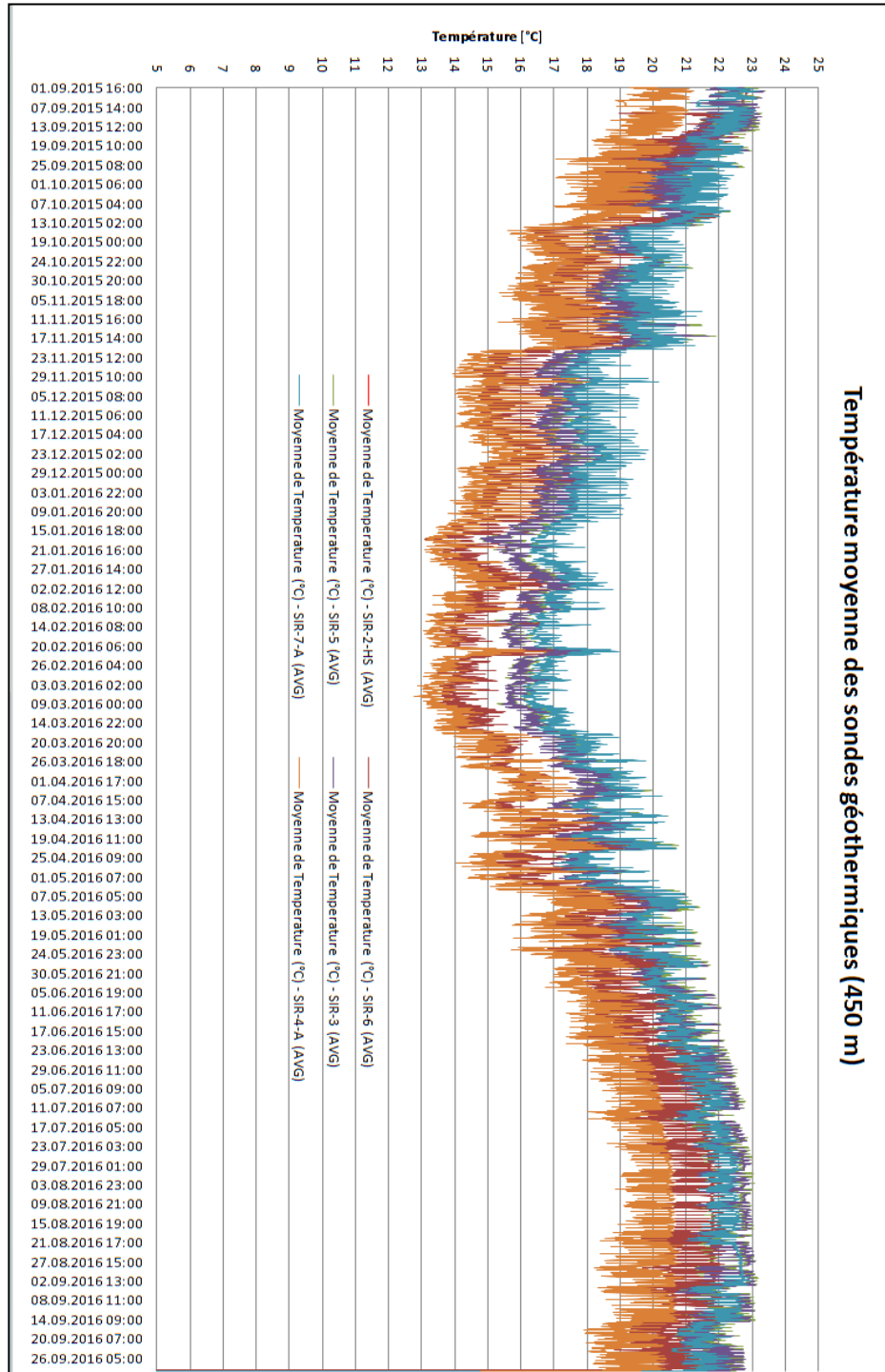
ANNEXE A.5 – Evolution des températures des sondes géothermiques



Graphique A.5: Evolution des températures moyennes des forages (à 400 mètres de profondeur) sur une année



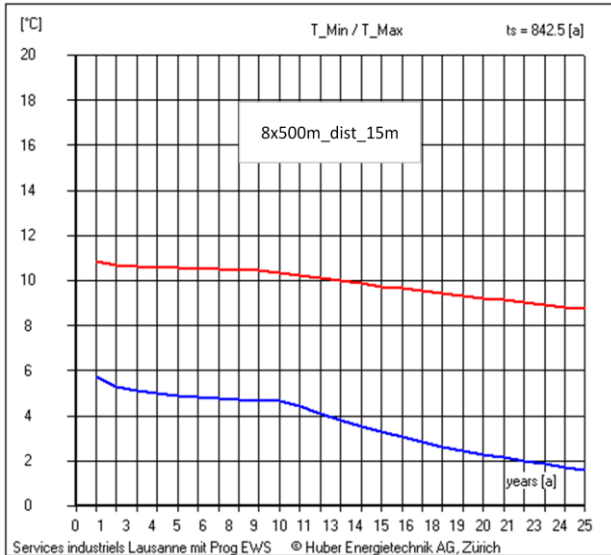
ANNEXE A.6 – Evolution des températures des sondes géothermiques



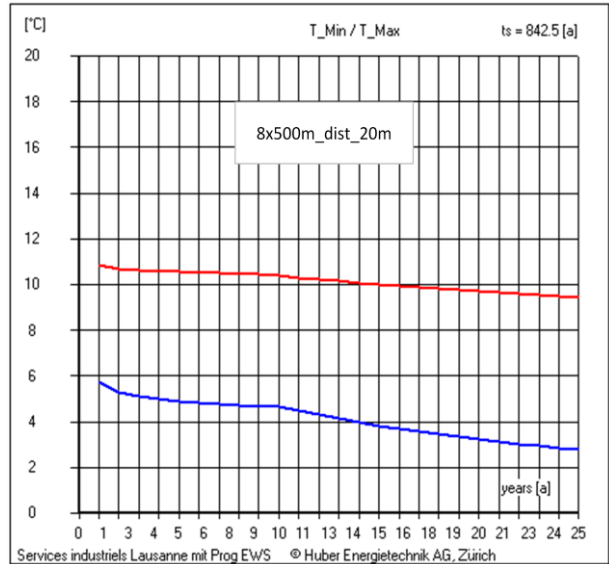
Graphique A.6: Evolution des températures moyennes des forages (à 480 mètres de profondeur) sur une année



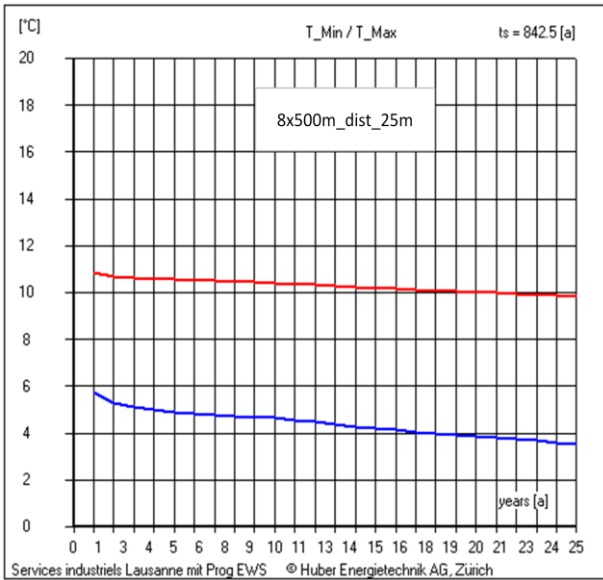
ANNEXE B – Simulations et comparaisons de l'effet de l'espacement sur le champ de sondes



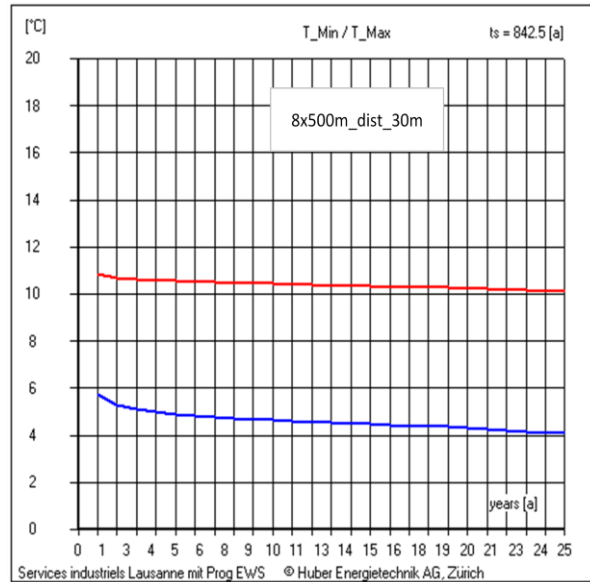
Graphique B.1 : Evolution des températures minimale et maximale dans le temps pour un champ de sondes de 500 m (espacement de 15 mètres)



Graphique B.2 : Evolution des températures minimale et maximale dans le temps pour un champ de sondes de 500 m (espacement de 20 mètres)



Graphique B.3 : Evolution des températures minimale et maximale dans le temps pour un champ de sondes de 500 m (espacement de 25 mètres)



Graphique B.4 : Evolution des températures minimale et maximale dans le temps pour un champ de sondes de 500 m (espacement de 30 mètres)



ANNEXE C – Caractéristiques techniques des PAC installées en chaufferie

Hoval Thermalia® dual (60-90), dual H (43-90), dual X (43-90), dual R (43-90)
Pompe à chaleur saumure/eau - eau/eau

Hoval

■ Description

Hoval Thermalia® dual

Pompe à chaleur saumure/eau - eau/eau

- Pompe à chaleur saumure/eau - eau/eau avec deux niveaux de puissance
- Boîtier stable avec profils de cadre en alu et nouveaux coins de liaison en plastique. Avec pieds réglables, amortisseurs de vibrations et parois latérales démontables en tôle d'acier peinte par poudre, avec isolations phonique et thermique optimales
- Fonctionnement extrêmement silencieux grâce à la construction à triple amortissement
- Face de commande devant avec commande de pompe à chaleur et avec régulateur de chauffage TopTronic® T/NWP intégré
- Parois latérales et frontales démontables pour le contrôle et l'entretien
Couleur gris agate (RAL 7038)
- Avec 2 compresseurs Spiral (Scroll)
- Avec échangeurs de chaleur à plaques (condenseur et évaporateur) en acier inoxydable (1.4401)
- Deux circuits frigorifiques séparés avec vanne d'expansion thermostatique, sécheur de filtre avec regard, collecteur de liquide et pressostats haute et basse pression
- Relais de protection moteur et thermostat antigel
- Avec limiteur de courant de démarrage électronique
- Avec la charge de fluide frigorigène, complètement câblée prête pour le raccordement, pour placement à l'intérieur du bâtiment
Thermalia® dual (60-90) avec R407C
Thermalia® dual H (43-90) avec R134a
Thermalia® dual X (43-90) avec R407C et 134a
- Hoval Thermalia® dual R - avec fonction supplémentaire de refroidissement par l'inversion du circuit

Raccordements électriques

- Raccordement vers l'arrière.

Commande de pompe à chaleur

- Tableau de commande avec régulateur de chauffage TopTronic® T/NWP incorporé, monté sur la pompe à chaleur
- Fonction de régulation (par régulateur) intégrée pour:
 - 1 circuit mélangeur
 - 1 circuit de chauffage direct
 - circuit de charge de chauffe-eau
- Extension possible des fonctions par différents modules-clé
- Les sondes nécessaires doivent être commandées séparément.

Exécution sur demande

- Possibilité d'intégrer un régulateur de chauffage supplémentaire dans le tableau de commande

Livraison

- Pompe à chaleur entièrement assemblée et emballée



Thermalia® dual		Température de départ max. °C	Puissance chauffage		Puissance frigorifique	
Type	Fluide frigorigène		B0W35 kW	W10W35 kW	B15W7 kW	B20W12 kW
(80)	R407C	62	57,3	77,5	-	-
(74)	R407C	62	74,0	96,2	-	-
(90)	R407C	62	86,1	113,0	-	-
H (43)	R134a	67	27,7	37,4	-	-
H (80)	R134a	67	37,0	52,0	-	-
H (74)	R134a	67	46,0	62,0	-	-
H (90)	R134a	67	56,0	78,0	-	-
X (43)	1 x R407C, 1 x R134a	67 ¹	35,6	48,2	-	-
X (80)	1 x R407C, 1 x R134a	67 ¹	47,2	64,8	-	-
X (74)	1 x R407C, 1 x R134a	67 ¹	60,0	79,1	-	-
X (90)	1 x R407C, 1 x R134a	67 ¹	71,1	95,5	-	-
R (43)	R407C	62	43,5	58,9	40,5	46,8
R (80)	R407C	62	57,3	77,5	57,3	66,2
R (74)	R407C	62	74,0	96,2	69,9	80,8
R (90)	R407C	62	86,1	113,0	85,0	98,2

¹ Seulement avec circuit R 134a



Homologations

Suisse/Allemagne/Autriche

Hoval Thermalia® dual (80)	SW ² AIT- projet n°	2.04.00816.1.0
Hoval Thermalia® dual (60)	WW ³ AIT- projet n°	2.04.00816.1.0
Hoval Thermalia® dual (74)	SW ² AIT- projet n°	2.04.00816.1.0
Hoval Thermalia® dual (74)	WW ³ AIT- projet n°	2.04.00816.1.0

Données vérifiées par AIT Austrian Institute of Technology

La série Thermalia® dual (60-90) et Thermalia® dual H (43-90) est homologuée par la Commission des labels de qualité CH.

² Saumure/eau

³ Eau/eau



Hoval Thermalia® dual (60-90), dual H (43-90), dual X (43-90), dual R (43-90)

Hoval

■ Caractéristiques techniques

Hoval Thermalia® dual H (43-90) avec R134a

Type		H (43)		H (60)		H (74)		H (90)	
Allure		1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
• Puissance de chauffage (Q)	pour B0W35	kW ¹		13,8 27,7		18,5 37,0		23,0 46,0	
	pour W10W35	kW ¹		18,7 37,4		26,0 52,0		31,0 62,0	
• Puissance absorbée	pour B0W35	kW ¹		3,1 6,2		4,3 8,5		5,3 10,5	
	pour W10W35	kW ¹		3,2 6,5		4,6 9,1		5,5 11,0	
• Chiffre de puissance	pour B0W35	COP		4,5		4,4		4,4	
	pour W10W35	COP		5,8		5,7		5,6	
• Poids de service		kg (env.)		590		610		625	
• Compresseur	Type	2 x Scroll (Spiral) hermétique							
• Circuits	Pièces	2							
• Etages de puissance		50 %/50 %							
• Remplissage fluide frigorigène R134a	kg	2 x 9,0		2 x 10,5		2 x 11,0		2 x 11,5	
• Condenseur/évaporateur	Type	Echangeur de chaleur à plaques - double circuit							
• Matériel		Acier inoxydable V4A, AISI 316, 1.4401							
• Raccords de tuyau avec tuyau de raccordement flexible	Rp	2"		2"		2"		2"	
Débit volumique nominal et résistance pompe à chaleur saumure/eau									
• Chauffage	m ³ /h	3,3		4,6		5,7		6,9	
• ΔP	kPa	1,5		1,7		1,6		1,6	
• ΔT	K					7			
• Source de chaleur	m ³ /h	5,1		7,1		8,9		10,7	
• ΔP	kPa	4,2		4,7		4,5		4,5	
• ΔT	K					4			
Débit volumique nominal et résistance pompe à chaleur eau/eau									
• Chauffage	m ³ /h	4,6		6,4		8,0		9,6	
• ΔP	kPa	3,0		3,4		3,1		3,2	
• ΔT	K					7			
• Source de chaleur	m ³ /h	5,2		7,5		9,3		11,2	
• ΔP	kPa	3,8		4,6		4,3		4,4	
• ΔT	K					5			
• Pression d'exploitation									
• Côté chauffage et source de chaleur	bar	6							
• Valeurs limites d'exploitation - voir diagrammes gamme d'utilisat.									
• Lieu d'installation									
• Exploitation	min./max.	°C				5/40			
• Stockage	min./max.	°C				-15/50			
Caractéristiques électriques ³									
• Tension	V	3 x 400							
• Fréquence	Hz	50							
• Plage de tension	V	380-420							
• Courant d'exploitation compresseur 1 + compresseur 2 I _{max}	A	25		33		37		47	
• Courant de démarrage compresseur ⁴	A	32		42		50		64	
• Courant de démarrage compresseur 1 + compresseur 2	A	44		58		68		87	
• Courant principal (protection externe) installations saumure	A	32		40		40		50	
	Type	C, D, K		C, D, K		C, D, K		C, D, K	
• Courant principal (protection externe) installations eau de la nappe phréatique	A	32		40		50		63	
	Type	C, D, K		C, D, K		C, D, K		C, D, K	
• Courant de commande (protection externe)	A	13		13		13		13	
	Type	B, C, D, K, Z		B, C, D, K, Z		B, C, D, K, Z		B, C, D, K, Z	

¹ kW = valeurs normalisées selon AWP. Valeurs B0W35 avec 25 % éthylène-glycol (Antifrogen N)² Valeur réelle (1 compresseur en exploitation)³ Les valeurs des Caractéristiques électriques sont valables pour une alimentation électrique de 3 x 400 V⁴ Valeur pour 1 compresseur



Hoval Thermalia® dual (60-90), dual H (43-90), dual X (43-90), dual R (43-90)

Hoval

■ Caractéristiques techniques
Performances

Hoval Thermalia® dual H (43-90) avec R134a

Type		dual H (74) I			dual H (74) II			dual H (90) I			dual H (90) II				
Départ	Source de chaleur	Q	P	COP	Q	P	COP	Q	P	COP	Q	P	COP		
t _s (°C)	Fluide t _i (°C)	kW	kW		kW	kW		kW	kW		kW	kW			
30	Brine (saumure)	-5	19,5	4,7	4,2	39,1	9,3	4,2	23,9	5,8	4,1	47,9	11,6	4,1	
		-2	21,8	4,8	4,6	43,6	9,6	4,6	26,8	6,0	4,5	53,6	11,9	4,5	
		0	23,5	4,9	4,8	47,0	9,7	4,8	28,9	6,0	4,8	57,8	12,1	4,8	
		2	25,2	5,0	5,1	50,4	9,9	5,1	31,1	6,1	5,1	62,1	12,3	5,1	
		5	28,1	5,1	5,5	56,1	10,1	5,5	34,6	6,3	5,5	69,3	12,5	5,5	
	Eau	8	30,4	5,0	6,1	60,8	10,0	6,1	38,1	6,3	6,0	76,2	12,7	6,0	
		10	32,0	5,1	6,3	64,1	10,2	6,3	40,3	6,4	6,3	80,5	12,8	6,3	
		12	33,0	5,2	6,4	66,0	10,3	6,4	41,8	6,5	6,4	83,5	13,0	6,4	
		14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	Brine (saumure)	-5	19,2	5,0	3,8	38,4	10,0	3,8	23,4	6,2	3,8	46,7	12,4	3,8	
		-2	21,4	5,2	4,2	42,8	10,3	4,2	26,0	6,4	4,1	52,0	12,8	4,1	
		0	23,0	5,3	4,4	46,0	10,5	4,4	28,0	6,5	4,3	56,0	13,0	4,3	
		2	24,7	5,3	4,6	49,4	10,7	4,6	30,2	6,6	4,6	60,4	13,2	4,6	
		5	27,5	5,5	5,0	54,9	10,9	5,0	33,5	6,8	5,0	67,1	13,5	5,0	
	Eau	8	29,7	5,4	5,5	59,4	10,8	5,5	36,9	6,9	5,4	73,8	13,7	5,4	
		10	31,0	5,5	5,6	62,0	11,0	5,6	39,0	7,0	5,6	78,0	13,9	5,6	
		12	32,1	5,6	5,8	64,2	11,2	5,8	40,5	7,1	5,7	80,9	14,1	5,7	
		14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		15	33,5	5,7	5,9	67,0	11,4	5,9	42,4	7,2	5,9	84,7	14,4	5,9	
40	Brine (saumure)	-5	18,8	5,4	3,5	37,6	10,8	3,5	22,8	6,6	3,4	45,5	13,3	3,4	
		-2	20,9	5,6	3,8	41,8	11,1	3,8	25,3	6,8	3,7	50,7	13,7	3,7	
		0	22,5	5,7	4,0	45,0	11,3	4,0	27,2	7,0	3,9	54,4	13,9	3,9	
		2	24,1	5,8	4,2	48,2	11,5	4,2	29,3	7,1	4,1	58,6	14,2	4,1	
		5	26,8	5,9	4,5	53,5	11,8	4,5	32,6	7,3	4,5	65,1	14,6	4,5	
	Eau	8	28,9	5,9	4,9	57,9	11,7	4,9	35,7	7,4	4,8	71,5	14,8	4,8	
		10	30,4	5,9	5,1	60,9	11,9	5,1	37,8	7,5	5,0	75,7	15,0	5,0	
		12	31,3	6,0	5,2	62,6	12,1	5,2	39,1	7,6	5,1	78,3	15,3	5,1	
		14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		15	32,6	6,2	5,3	65,3	12,4	5,3	40,9	7,8	5,2	81,9	15,6	5,2	
45	Brine (saumure)	-5	18,4	5,8	3,2	36,8	11,6	3,2	22,2	7,1	3,1	44,3	14,1	3,1	
		-2	20,4	6,0	3,4	40,8	11,9	3,4	24,6	7,3	3,4	49,3	14,6	3,4	
		0	21,9	6,1	3,6	43,8	12,2	3,6	26,5	7,5	3,6	53,0	14,9	3,6	
		2	23,5	6,2	3,8	47,0	12,4	3,8	28,4	7,6	3,7	56,8	15,2	3,7	
		5	26,1	6,4	4,1	52,2	12,7	4,1	31,6	7,8	4,0	63,1	15,7	4,0	
	Eau	8	28,2	6,3	4,5	56,3	12,6	4,5	34,7	8,0	4,3	69,3	16,0	4,3	
		10	29,6	6,4	4,6	59,2	12,8	4,6	36,6	8,1	4,5	73,2	16,2	4,5	
		12	30,5	6,5	4,7	60,9	13,1	4,7	37,9	8,3	4,6	75,9	16,5	4,6	
		14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		15	31,7	6,7	4,7	63,4	13,4	4,7	39,6	8,5	4,7	79,2	16,9	4,7	
50	Brine (saumure)	-5	18,0	6,2	2,9	36,0	12,4	2,9	21,6	7,5	2,9	43,1	15,1	2,9	
		-2	20,0	6,4	3,1	40,1	12,8	3,1	24,0	7,8	3,1	48,1	15,6	3,1	
		0	21,4	6,5	3,3	42,8	13,1	3,3	25,7	8,0	3,2	51,5	15,9	3,2	
		2	22,9	6,7	3,4	45,8	13,3	3,4	27,6	8,1	3,4	55,2	16,3	3,4	
		5	25,4	6,9	3,7	50,8	13,7	3,7	30,7	8,4	3,6	61,3	16,8	3,6	
	Eau	8	27,4	6,8	4,0	54,8	13,6	4,0	33,6	8,6	3,9	67,1	17,2	3,9	
		10	28,7	6,9	4,1	57,4	13,9	4,1	35,4	8,7	4,1	70,9	17,5	4,1	
		12	29,5	7,1	4,2	59,1	14,1	4,2	36,7	8,9	4,1	73,4	17,8	4,1	
		14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		15	30,7	7,2	4,3	61,5	14,5	4,3	38,3	9,1	4,2	76,6	18,3	4,2	
55	Brine (saumure)	-5	17,6	6,6	2,7	35,3	13,3	2,7	21,1	8,0	2,6	42,2	16,0	2,6	
		-2	19,5	6,9	2,8	39,1	13,7	2,8	23,5	8,3	2,8	46,9	16,6	2,8	
		0	20,9	7,0	3,0	41,8	14,0	3,0	25,0	8,5	2,9	50,1	17,0	2,9	
		2	22,3	7,2	3,1	44,6	14,3	3,1	26,8	8,7	3,1	53,6	17,4	3,1	
		5	24,7	7,4	3,3	49,4	14,8	3,3	29,8	9,0	3,3	59,6	18,0	3,3	
	Eau	8	26,6	7,3	3,6	53,2	14,7	3,6	32,6	9,2	3,5	65,2	18,4	3,5	
		10	27,9	7,5	3,7	55,7	15,0	3,7	34,4	9,4	3,7	68,7	18,8	3,7	
		12	28,6	7,6	3,7	57,3	15,2	3,7	35,6	9,6	3,7	71,2	19,2	3,7	
		14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		15	29,8	7,8	3,8	59,6	15,6	3,8	37,1	9,9	3,8	74,1	19,7	3,8	
60	Brine (saumure)	-5	17,3	7,1	2,4	34,5	14,2	2,4	20,7	8,5	2,4	41,4	17,1	2,4	
		-2	19,1	7,4	2,6	38,2	14,7	2,6	22,9	8,9	2,6	45,7	17,7	2,6	
		0	20,4	7,5	2,7	40,8	15,0	2,7	24,4	9,1	2,7	48,9	18,2	2,7	
		2	21,8	7,7	2,8	43,6	15,4	2,8	26,1	9,3	2,8	52,2	18,6	2,8	
		5	24,0	7,9	3,0	48,0	15,9	3,0	28,9	9,6	3,0	57,8	19,3	3,0	
	Eau	8	25,8	7,9	3,3	51,7	15,8	3,3	31,6	9,9	3,2	63,2	19,8	3,2	
		10	27,1	8,1	3,4	54,2	16,1	3,4	33,3	10,1	3,3	66,6	20,2	3,3	
		12	27,7	8,2	3,4	55,4	16,4	3,4	34,5	10,3	3,3	68,9	20,7	3,3	
		14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		15	28,8	8,4	3,4	57,7	16,9	3,4	35,9	10,6	3,4	71,8	21,3	3,4	

- Q - Puissance de chauffage (kW)
- P - Puissance absorbée (kW)
- COP - Chiffre de puissance
- t_i - Source de chaleur (évaporateur) température d'entrée (°C)
- t_s - Température de sortie (départ du chauffage) au condenseur (°C)

Donnée de puissance

Fluide	ΔT	eau/antigel *	
Source de chaleur			
Brine (saumure)	3 K	75 %	25 %
Eau	5 K	100 %	-
Chauffage			
Eau	7-10 K	100 %	-

Facteur de correction de puissance

	Part de produit antigel			
	20 %	25 %	30 %	40 %
Q	1,01	1	0,99	0,98
P	1,005	1	0,995	0,99

* Produit antigel: éthylène-glycol par ex. Antifrogen N



ANNEXE D PAC-gaz ROBUR GAHP-GS/WS

3 INFORMATIONS D'ORDRE GÉNÉRAL ET CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

			GAHP GS LT	GAHP GS HT
Température d'entrée de l'eau chaude	maximal pour le chauffage	°C	45	55
	maximal pour l'ACS	°C		60
	température minimum en service continu**	°C	20	30
Débit eau chaude	nominal	l/h	3250	3170
	maximale	l/h		4000
	minimale	l/h		1400
Pertes de charge eau chaude	au débit eau nominale (BoW50)	bar	0,49 (2)	
Température de l'air extérieur (bulbe sec)	maximale	°C	45	
	minimale	°C	0	
Gradient thermique	nominal	°C	10	
	méthane G20 (nominal)	m ³ /h	2,72 (3)	
Consommation de gaz	G30 (nominal)	kg/h	2,03 (4)	
	G31 (nominal)	kg/h	2,00 (4)	
CONDITIONS D'EXPLOITATION des sources renouvelables				
Débit eau sources renouvelables (avec glycolique 25%)	nominal (BoW50)	l/h	3020	
	maximale	l/h	4000	
	minimale	l/h	2000	
Pertes de charge sources renouvelables	au débit eau nominale	bar	0,51 (2)	
Température d'entrée sources renouvelables	maximale	°C	45	
Température de sortie sources renouvelables	minimale	°C	-10	-5
CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES				
Alimentation	Tension	V	230	
	Type		Single-phase	
	Fréquence	Hz	50	
Puissance électrique	nominal	kW	0,47 (5)	
Degré de protection	IP		X5D	
DONNÉES D'INSTALLATION				
Puissance sonore L _w (maxi)		dB(A)	70,4 (7)	
Pression acoustique L _p à 5 mètres (maxi)		dB(A)	48,4 (8)	
Température minimale de stockage		°C	-30	
Pression maximale en service		bar	4	
Débit eau de condensation maximale		l/h	4,0	
Volume d'eau à l'intérieur de l'appareil	Côté chaud	l	4	
	Côté froid	l	3	
Raccords eau	type		F	
	fil	" G	1 1/4	
Raccord gaz	type		F	
	fil	" G	3/4	
Connexion décharge SOUPAPE DE SÉCURITÉ		" G	1 1/4	
Raccord d'évacuation des fumées	Diamètre (Ø)	mm	80	
	Pertes de charge résiduelles	Pa	80	
	Configuration des produits		C63	
Dimensions	Largeur	mm	848 (6)	
	Hauteur	mm	1278	
	Profondeur	mm	690	
Poid	En service	kg	300	
DONNÉES GÉNÉRALES				
TYPE D'INSTALLATION			C13, C33, C43, C53, C63, C83, B23P, B33	
FLUIDE FRIGORIFIQUE	AMMONIAC R717	kg	7	
	EAU H2O	kg	10	
PRESSION MAXIMALE ADMISSIBLE		bar	35	

* données testé da VDE e DWGW-Forschungstelle.

** en transitoire, températures inférieures sont admissibles.

Notes:

- Conformément à la norme EN12309-2, évaluée sur le débit calorifique réel. Pour des conditions de fonctionnement différentes des conditions nominales, voir les tableaux du Manuel de conception.
- Pour des débits différents du débit nominal, voir les tableaux du manuel de conception.
- PCI 34,02 MJ/m³ (1013 mbar – 15 ° C).
- PCI 46,34 MJ/kg (1013 mbar – 15 ° C).
- ± 10% en fonction de la tension d'alimentation et de la tolérance sur l'absorption des moteurs électriques.
- Dimensions d'encombrement sans conduits d'évacuation des fumées (voir Figure 3.1 → 13).
- Valeurs de puissance sonore relevées par méthode intensimétrique selon la norme EN ISO 9614.
- Valeurs maximum de pression acoustique, en champ libre, avec facteur de directionnalité 2.



Tableau 3.2 – Données techniques WS

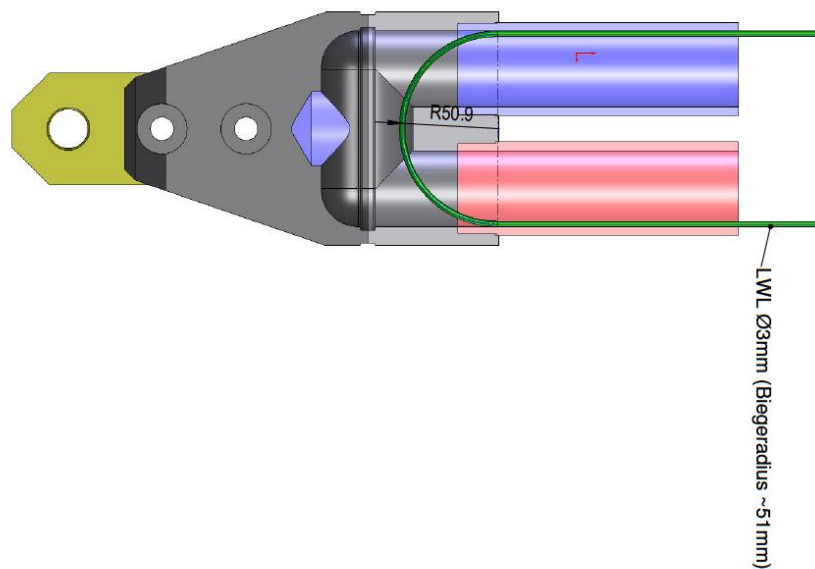
			GAHP WS
FONCTIONNEMENT POUR LE CHAUFFAGE			
POINT DE FONCTIONNEMENT W10W50	G.U.E. efficacité de l'utilisation du gaz	%	166 (1)
	Puissance thermique	kW	41,6 (1)
	Puissance récupéré des sources renouvelables	kW	16,6
POINT DE FONCTIONNEMENT W10W65	G.U.E. efficacité de l'utilisation du gaz	%	143 (1)
	Puissance thermique	kW	35,8 (1)
	Puissance récupéré des sources renouvelables	kW	11,5
DÉBIT CALORIFIQUE	Nominal (1013 mbar - 15°C)	kW	25,7
	réel max	kW	25,2
Classe d'émission NOx			5
Émission NOx		ppm	25
Émission CO		ppm	36
Température de sortie de l'eau chaude	maximal pour le chauffage	°C	65
	maximal pour ECS	°C	70
Température d'entrée de l'eau chaude	maximal pour le chauffage	°C	55
	température minimum en service continu**	°C	20
Débit eau chaude	nominal	l/h	3570
	maximale	l/h	4000
	minimale	l/h	1400
Pertes de charge eau chaude	au débit eau nominale (W10W50)	bar	0,57 (2)
Température de l'air extérieur (bulb sec)	maximale	°C	45
	minimale	°C	0
Gradient thermique	nominal	°C	10
Consommation de gaz	méthane G20 (nominal)	m3/h	2,72 (3)
	G30 (nominal)	kg/h	2,03 (4)
	G31 (nominal)	kg/h	2,00 (4)
CONDITIONS D'EXPLOITATION des sources renouvelables			
Débit eau sources renouvelables	nominal (W10W50)	l/h	2850
	maximale	l/h	4700
	minimale	l/h	2300
Pertes de charge sources renouvelables	au débit eau nominale	bar	0,38 (2)
Température d'entrée sources renouvelables	maximale	°C	45
Température de sortie sources renouvelables	minimale	°C	3
CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES			
Alimentation	Tension	V	230
	Type		Single-phase
	Fréquence	Hz	50
Puissance électrique	nominal	kW	0,47 (5)
Degré de protection	IP		X5D
DONNÉES D'INSTALLATION			
Puissance sonore Lw (maxi)		dB(A)	70,4 (7)
Pression acoustique Lp à 5 mètres (maxi)		dB(A)	48,4 (8)
Température minimale de stockage		°C	-30
Pression maximale en service		bar	4
Débit eau de condensation maximale		l/h	4,0
Volume d'eau à l'intérieur de l'appareil	Côté chaud	l	4
	Côté froid	l	3
Raccords eau	type		F
	fil	* G	1 1/4
Raccord gaz	type		F
	fil	* G	3/4
Connexion décharge SOUPAPE DE SÉCURITÉ		* G	1 1/4
Raccord d'évacuation des fumées	Diamètre (Ø)	mm	80
	Pertes de charge résiduelles	Pa	80
	Configuration des produits		C63
Dimensions	Largeur	mm	848 (6)
	Hauteur	mm	1278
	Profondeur	mm	690
Poid	En service	kg	300
DONNÉES GÉNÉRALES			
TYPE D'INSTALLATION			C13, C33, C43, C53, C63, C83, B23P, B33
FLUIDE FRIGORIFIQUE	AMMONIAC R717	kg	7,7
	EAU H2O	kg	10
PRESSION MAXIMALE ADMISSIBLE		bar	35



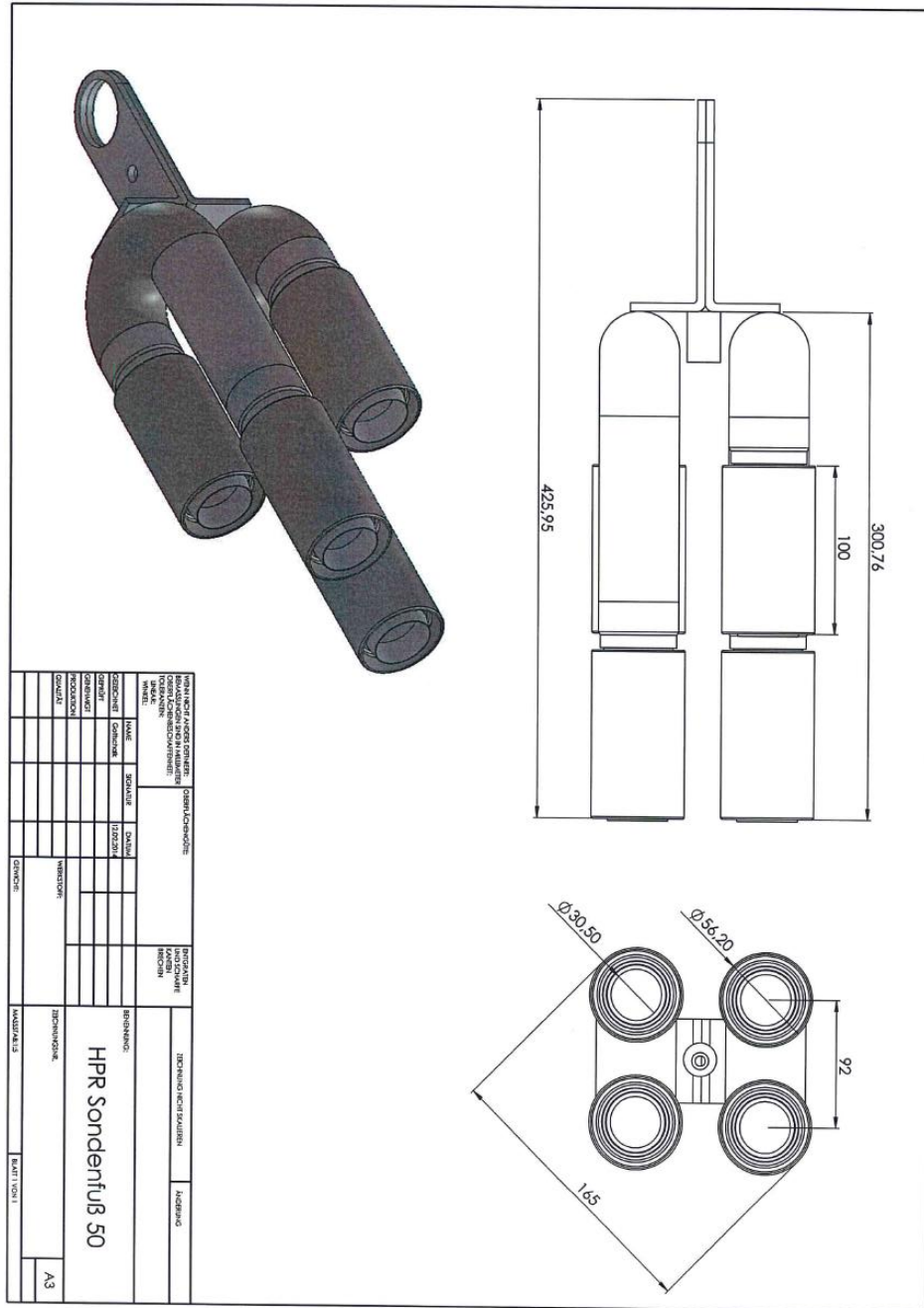
ANNEXE E – Sondes géothermiques



HakaGerodur



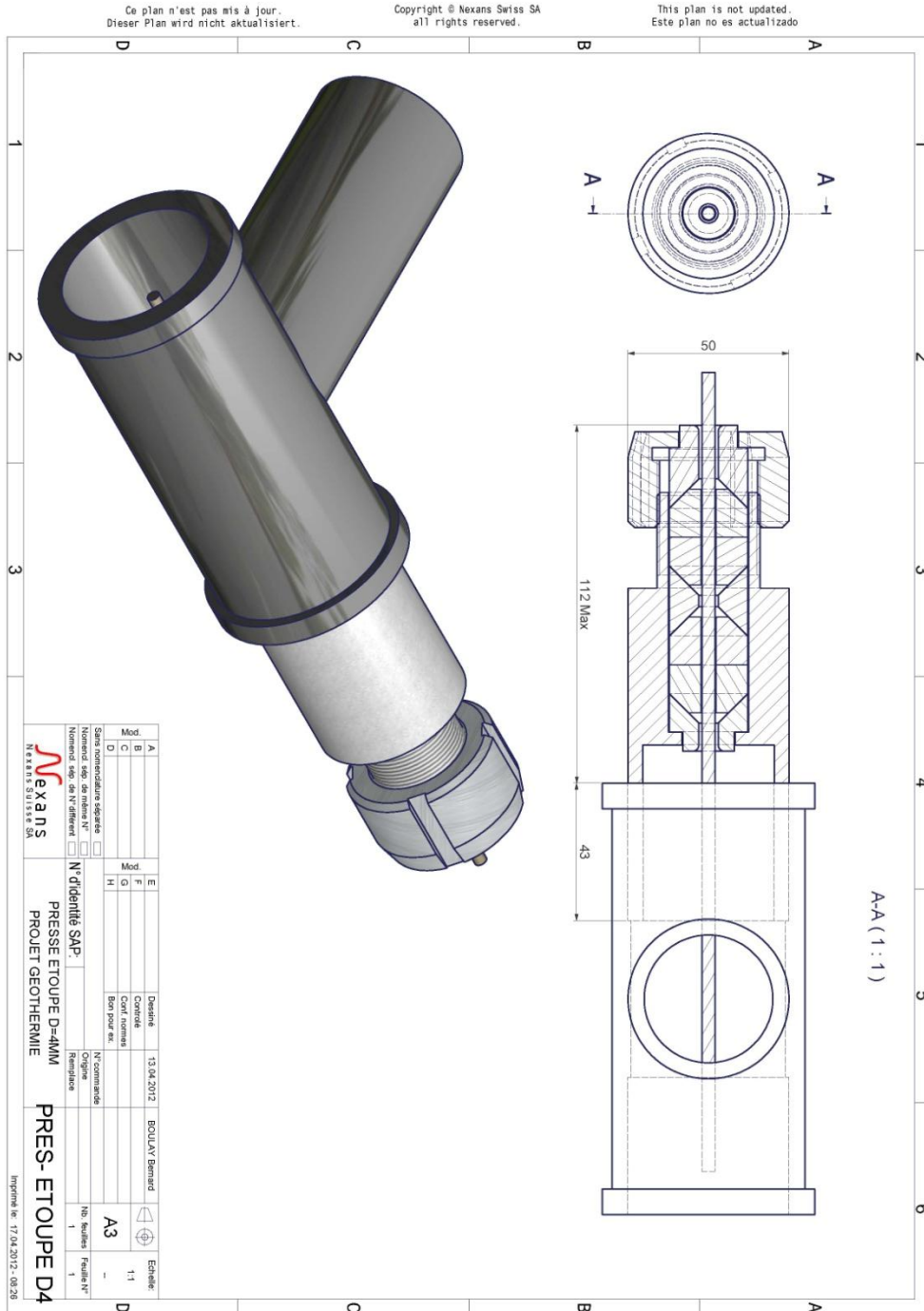
Annexe E.1 : Pied de sonde spécial réalisé par HAKAGerodur pour l'installation de la fibre optique



Annexe E.2 : Pied de la sonde renforcée (sonde RAUGEO de REHAU)



ANNEXE F – Raccord en « T » pour fibre optique



Annexe F.1 : Presse étoupe spécial, développé pour sortir la fibre optique en tête de la sonde géothermique



ANNEXE F – Système de mesure DTS

14.2012 DITEMP LIGHT RAMAN OTDR

For distributed temperature sensing



GENERAL DESCRIPTION

The DiTemp[®] is a unique tool for the evaluation of distributed temperature over several kilometers. It is a powerful diagnostic instrument for the identification and localization of potential problems. It allows the monitoring of local temperature at thousands of locations by means of a single optical fiber and in just one shot. Its inherent high stability and self-referenced principle of operation, allows on-line or off-line long-term monitoring of large structures.

TECHNICAL DESCRIPTION

The measuring principle is based on the RAMAN effect and the Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) method. Laser pulses are coupled into the fibers where the photons interact with the molecules of the fiber material. Some photons are scattered backwards and they carry information on the thermal motion of the molecules they were scattered by. Consequently, the spectrum of the backscattered light carries information on temperature of the fibers. This effect can be used to measure temperature along the optical fiber.

The spectral analysis is combined with measuring the propagation time of the laser pulses along the fiber (radar principle) as the speed of light in the fiber is known. Scanning the entire length of the fiber by short intervals (e.g. 1m) the temperature profile along the fiber is determined. It is important to know that the measured temperature of each interval is the average temperature of that individual fiber section. Due to the high speed of light, fiber lengths of many kilometers can be scanned within fractions of a second.

The system consists of reading unit, sensing cable and accessories (External multiplexer up to 8Ch, connection boxes, extension cables, splice protectors etc.). The optical fibers which are integrated into robust cables, are the temperature sensitive elements and allow the measurement of temperature profiles at arbitrary times, quasi-continuously with a high spatial and temperature resolution along the cable. This is a requirement for the investigation of thermal processes.

The system is used in a wide range of applications that require distributed temperature sensing, such as temperature monitoring of concrete in massive structures, waste disposal sites, on- and off-shore sites in gas and oil industry, hot spots, cold spots and leakage detection of flow lines and reservoirs, building installations, just to name a few.



FEATURES

- Entry level system
- Short measuring time
- Long-term stability
- Cost effective



PERFORMANCES

Reading Unit RU	DL4: DiTemp Light RU up to 4 km
Measurement Range	
Number of channels	Inbuilt multiplexer with 2 or 4 Ch
Optical fibre typology	Multi Mode MM
Spatial resolution [*]	2 m
Sampling resolution	2m typical, 1 m on request
Temperature Dynamic range	-25°C to +80°C with Ordinary Temperature sensing cable -25°C to +300°C with High Temperature sensing cable
Temperature resolution [*] <small>(At 4 km for spat. res. of 2 m)</small>	0.5°C for 15 seconds measuring time; 0.25°C for 1 minute measuring time; 0.1°C for 5 minutes measuring time
Measuring time [*]	Min.10 seconds

** these parameters depend on each-other*

TECHNICAL CHARACTERISTICS

Power supply	AC Power:100 / 240 V (50 / 60 Hz) DC Power: 24 or 48 (optional power adapter)
Power consumption	40 / 50 W max.
Operating environment	Operating temperature: +5°C to +40°C Storage temperature: -15°C to + 65°C Relative humidity: 5% to 95% non condensing
Optical connectors	E2000 APC
Dimensions	H x W x D: 87 x 435 x 445 mm Weight: 9 kg

ORDERING INFORMATION

Option: External Relay Alarm Module 24 switches including alarm software

Option: DC power adapter