

Rapport final, 19 novembre 2015

Simulations de champs de sondes géothermiques mesurés

Auteur

Daniel Pahud, LESBAT – HEIG-VD – HESSO

La présente étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie. La responsabilité du contenu incombe exclusivement à l'auteur.

Adresse

Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du Bâtiment, HEIG-VD, Av. des Sports 20, CH-1401 Yverdon-les-Bains

Tél. 024 557 61 44, Fax 024 557 73 87, info@lesbat.ch, www.lesbat.ch

Contenu

1	Introduction	4
2	Objectif	5
3	Méthodologie	5
3.1	Modèle de simulation	6
3.2	Choix des paramètres de simulation	6
3.3	Comparaison simulation - mesures	7
4	Résultats	8
4.1	Mesures disponibles de champs de sondes géothermiques	8
4.2	Comparaison simulation - mesures	8
4.3	Analyse de sensibilité	13
4.4	Analyse à long terme	16
4.5	Analyse du profil d'extraction et d'injection de chaleur	18
5	Conclusions	20
6	Remerciements	21
7	Références	21
8	Liste des illustrations et des tableaux	21
9	Liste des annexes	22

1 Introduction

La réalisation d'installations avec sondes géothermiques se fait depuis de nombreuses années et les technologies impliquées sont matures et bien éprouvées (sondes géothermiques et pompes à chaleur). Le succès de ces installations géothermiques peut se mesurer avec la longueur totale des nouvelles sondes géothermiques posées chaque année. Les statistiques publiées par le groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur GSP permettent de se faire une idée (cf. illustration 1).

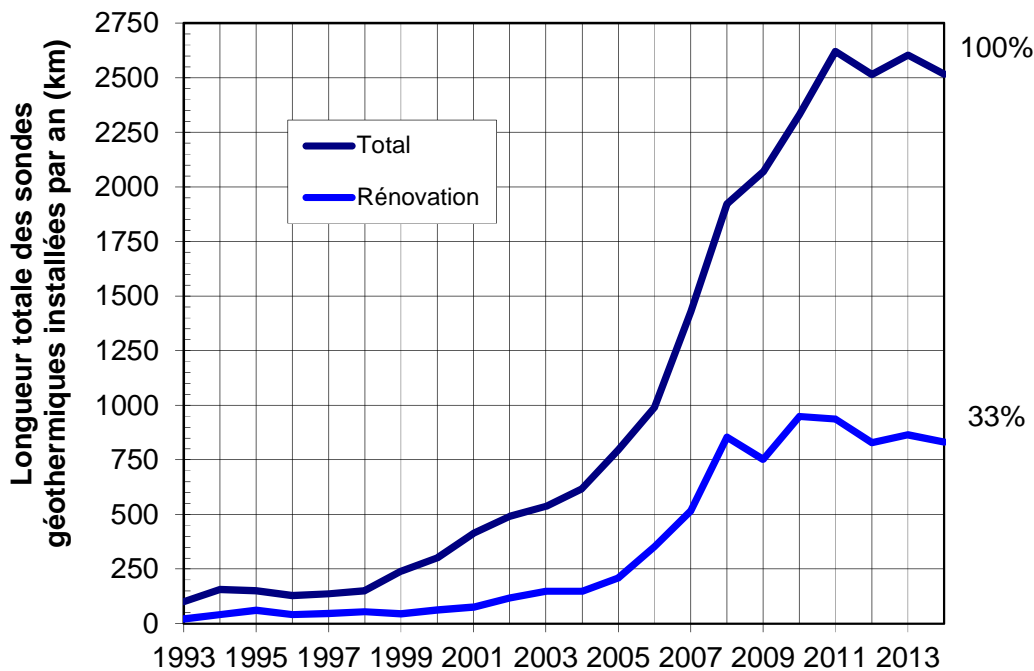


Illustration 1: Longueur totale des nouvelles sondes géothermiques posées par année en Suisse (source : GSP)

Le développement et la diffusion de ces installations conduisent, d'une part, à réaliser des champs de sondes géothermiques toujours plus grands et puis, d'autre part, à une densification des petites installations toujours plus importantes dans certaines zones.

Les discussions relatives à une surexploitation de la ressource géothermique et les influences négatives entre installations voisines sont toujours plus fréquentes. Des études ont été réalisées, dont on peut mentionner celle qui a été mandatée par la ville de Zurich et qui s'est terminée en 2014 [1].

Dans ce contexte, il est important de disposer d'outils de simulation valides, car ils sont utilisés non seulement pour le dimensionnement d'un champ de sondes géothermiques, mais aussi pour faire des projections dans le futur et dans l'espace. Les résultats qu'ils fournissent doivent permettre de donner des réponses fiables et satisfaisantes aux discussions en cours. Leur validité doit être éprouvée dans des situations toujours plus complexes.

2 Objectif

L'objectif principal du projet est de simuler des installations géothermiques existantes et de confronter les résultats avec les mesures. Il s'agit d'observer comment les calculs permettent de reproduire les mesures et de savoir si des simulations exécutées selon les pratiques actuelles comportent une marge de sécurité dans la prédiction du comportement thermique du terrain et des sondes.

Ceci implique avant tout de pouvoir disposer des mesures d'installations géothermiques qui soient exécutées avec une résolution temporelle élevée (mesures horaires) sur une longue période de marche (plusieurs années). D'autre part, si les mesures détaillées de l'installation ne sont pas disponibles depuis sa mise en marche, il est indispensable de connaître au minimum les énergies annuelles transférées afin de pouvoir reconstruire l'historique de l'utilisation de l'installation.

Dans la mesure du possible, les critères de sélection des installations mesurées sont :

- installation pour le chauffage uniquement ;
- installation avec plusieurs sondes géothermiques ;
- disposer de plusieurs années de mesures, idéalement une dizaine d'années ;
- les données techniques de l'installation, sondes géothermiques et terrain inclus, sont connues et disponibles.

3 Méthodologie

Dans un premier temps, il s'agit de choisir un programme de simulation adapté pour la simulation d'un ou plusieurs champs de sondes géothermiques, qui soit suffisamment diffusé et utilisé comme référence pour la plupart des programmes de calculs d'installations avec sondes géothermiques.

Dans un deuxième temps le programme de simulation doit être correctement paramétré, c'est-à-dire de la même façon que dans la phase de planification de l'installation. Il ne s'agit pas de calibrer les paramètres de simulations pour reproduire les mesures.

Finalement les résultats des simulations sont comparés aux mesures. Les puissances transférées dans le champ de sondes sont données en entrée au programme de simulation, et les températures de fluide simulées sont comparées à celles mesurées.

3.1 Modèle de simulation

L'outil de calcul sélectionné pour l'étude est TRNSBM, qui n'est autre que le programme SBM (Superposition Borehole Model) [2], intégré dans le software TRNSYS (Transient System Simulation) [3]. SBM a été développé à l'université de Lund en Suède et permet de simuler un nombre arbitraire de sondes géothermiques disposées dans une configuration arbitraire (cf. illustration 2).

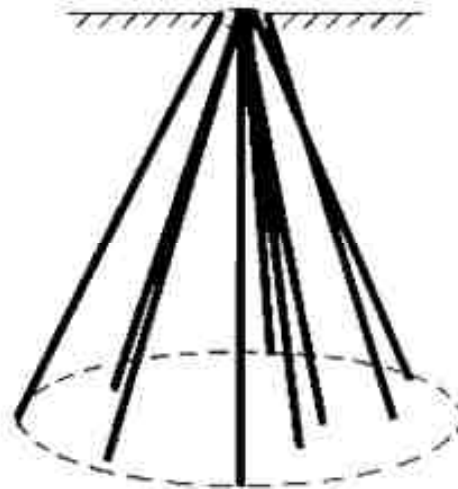


Illustration 2: Le programme SBM permet la simulation d'un nombre arbitraire de sondes géométriques disposées dans une configuration arbitraire

Le programme SBM a été validé à diverses reprises et il est à l'origine de nombreuses fonctions-g utilisées par divers programmes de dimensionnement de sondes géothermiques (EED Earth Energy Designer, EWS Erdwärmesonden, etc.).

La version 2012 de TRNSBM [4], compatible avec TRNSYS version 16 et plus, validée sur les mesures d'une installation avec 3 sondes géothermiques, est utilisée dans cette étude. Elle est plus précise que la version précédente (tous les calculs sont exécutés en « double-précision »), et son utilisation dans TRNSYS offre la possibilité de prendre en compte la capacité thermique du fluide et des sondes ainsi que les transferts thermiques des raccords en surface entre les sondes et le ou les distributeurs.

3.2 Choix des paramètres de simulation

Les paramètres de calcul relatifs au terrain, aux sondes géothermiques et aux performances thermiques de la pompe à chaleur sont fixés à leurs valeurs de planification et doivent être conformes à la norme 384/6 sur les sondes géothermiques [5]. De cette façon les paramètres de calcul incluent les marges de sécurité prévues par la norme. Ces dernières sont plus ou moins importantes en fonction de la précision de la source d'information disponible ou de l'analyse pour

la détermination des deux paramètres les plus importants relatifs à la caractérisation thermique du terrain (conductivité thermique et température naturelle du terrain).

3.3 Comparaison simulation - mesures

Les mesures, pour autant qu'elles soient réalisées avec une précision satisfaisante, permettent de refléter le fonctionnement réel d'une installation. Ce dernier dépend des caractéristiques du terrain et des sondes, mais aussi de l'utilisation des sondes dans le système, et donc de leur intégration dans le concept énergétique du système. Ce sont autant de données à entrer dans un programme de simulation afin de pouvoir dimensionner correctement les sondes.

Dans cette étude, la façon d'utiliser les sondes est fixée par les mesures. Cela signifie que le profil horaire des puissances thermiques transférées dans le circuit des sondes est élaboré à partir des mesures et donné en entrée au programme de simulation. Ce dernier permet de simuler le profil horaire des températures du fluide caloporteur circulant dans le circuit des sondes et de le comparer aux mesures effectuées. La température du fluide, qu'elle soit simulée ou mesurée, est définie par la moyenne arithmétique de la température d'entrée et de sortie du champ de sondes. La procédure suivie pour la simulation et la comparaison mesures – simulation est illustrée par l'illustration 3.

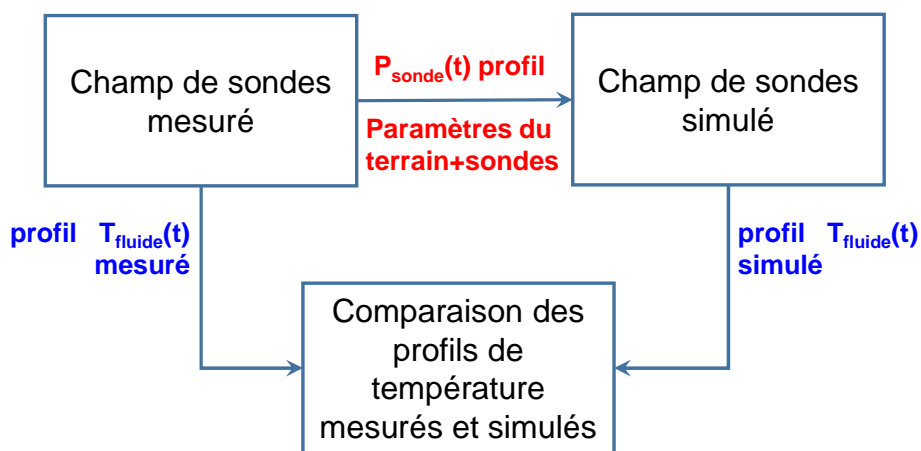


Illustration 3: La simulation du profil de température du fluide caloporteur est basée sur le profil des puissances thermiques transférées par les sondes géothermiques et les paramètres définissant le terrain et les sondes

4 Résultats

4.1 Mesures disponibles de champs de sondes géothermiques

Les mesures d'une dizaine de champs de sondes géothermiques et d'un champ de pieux énergétiques ont pu être obtenues et exploitées pour l'étude.

A l'exception du champ de pieux énergétiques, qui sont au nombre de 300 avec une profondeur de 30m, les champs de sondes géothermiques présentent des caractéristiques dans l'éventail suivant :

- nombre de sondes géothermiques : 3 – 62
- profondeur des sondes : 80 – 250 m
- espacement entre les sondes : 5 – 9 m
- nombre d'années de marche du champ de sondes : 2 – 11 ans

On peut encore relever que les formations géologiques rencontrées ont des conductivités thermiques comprises entre 2 et 4 W/(mK). Pas d'écoulement significatif de l'eau souterraine n'a été constaté.

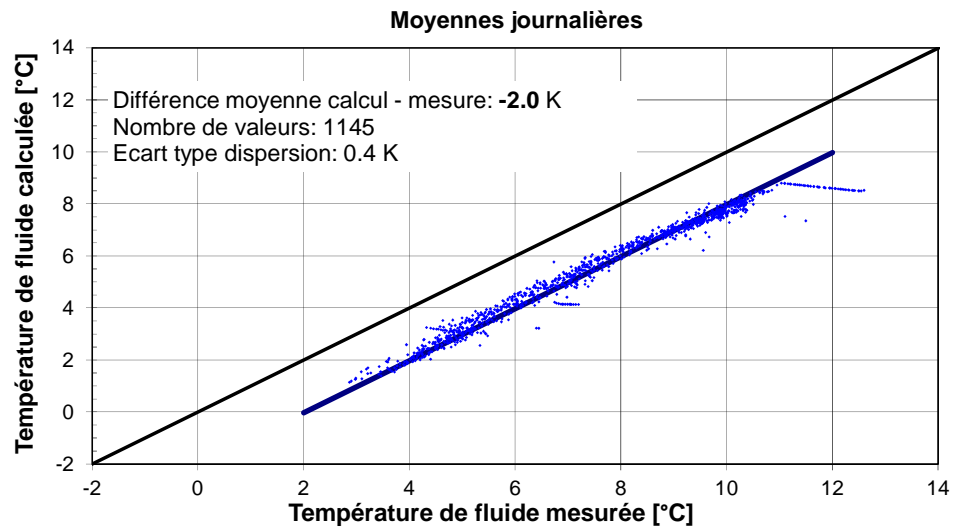
On peut encore relever qu'une partie des installations géothermiques ont été dimensionnées sur la base d'un test de réponse thermique (TRT). Pour ce qui est de leur utilisation, les sondes géothermiques sont utilisées en pure extraction de chaleur dans quelques installations et comme stockage de chaleur dans d'autres. Pour terminer, le régime d'écoulement du fluide dans les tubes des sondes géothermiques est laminaire dans certaines installations et turbulent dans d'autres. Toutes les sondes géothermiques sont formées par des tubes formant deux U (double-U). Le contact thermique entre les tubes et le terrain est assuré par l'injection dans le forage d'un matériau de remplissage.

4.2 Comparaison simulation - mesures

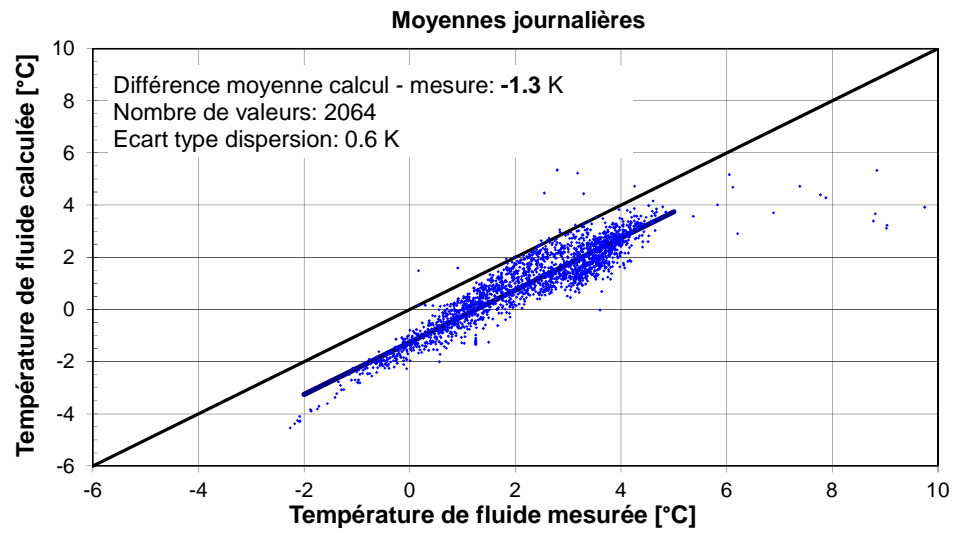
Dans un premier temps, les champs de sondes sont simulés sur la base des paramètres tels que décrits dans le chapitre précédent. Afin d'exécuter les simulations selon la plupart des programmes de simulation, la capacité thermique du fluide et des sondes, de même que les raccords horizontaux entre les têtes de sonde et les distributeurs ne sont pas pris en compte. L'ensemble des paramètres de simulation établis dans ces conditions définissent les paramètres **nominaux**.

Afin de comparer les simulations avec les mesures, la température journalière moyenne du fluide caloporteur est utilisée. Elle est définie comme étant la moyenne pondérée par la puissance thermique transférée (en valeur absolue) de la température moyenne entrée – sortie du champ de sondes. Une comparaison qualitative est fournie avec les graphiques des 11 installations analysées (l'analyse détaillée de chaque installation fait l'objet des annexes de ce rapport).

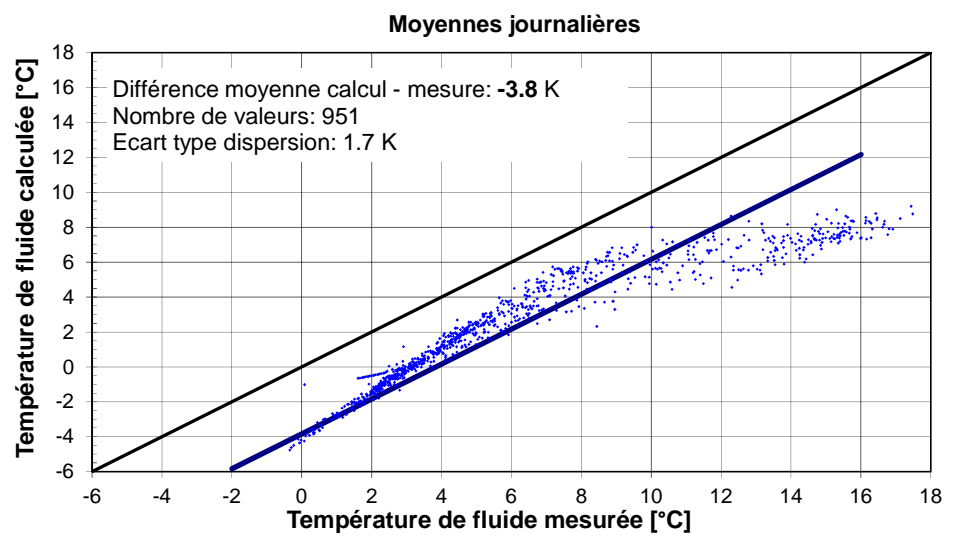
Installation 1



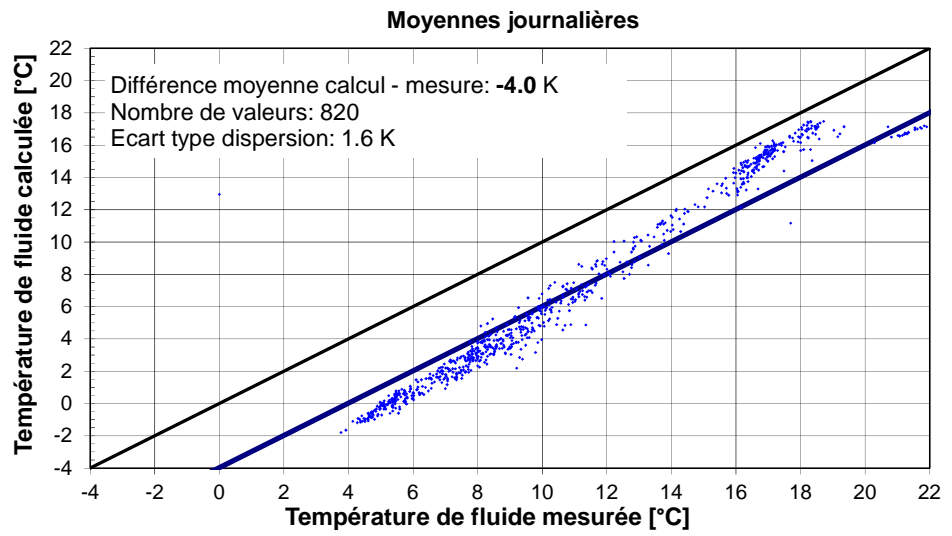
Installation 2



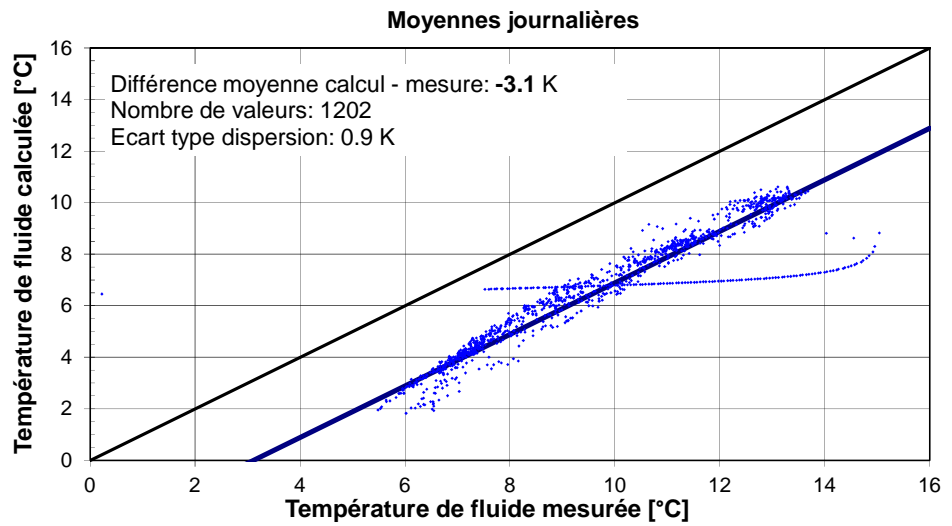
Installation 3



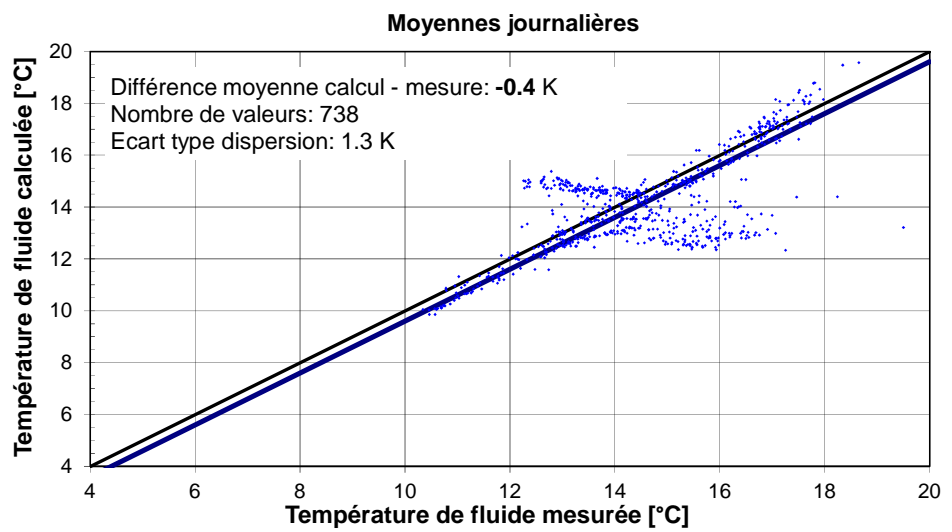
Installation 4



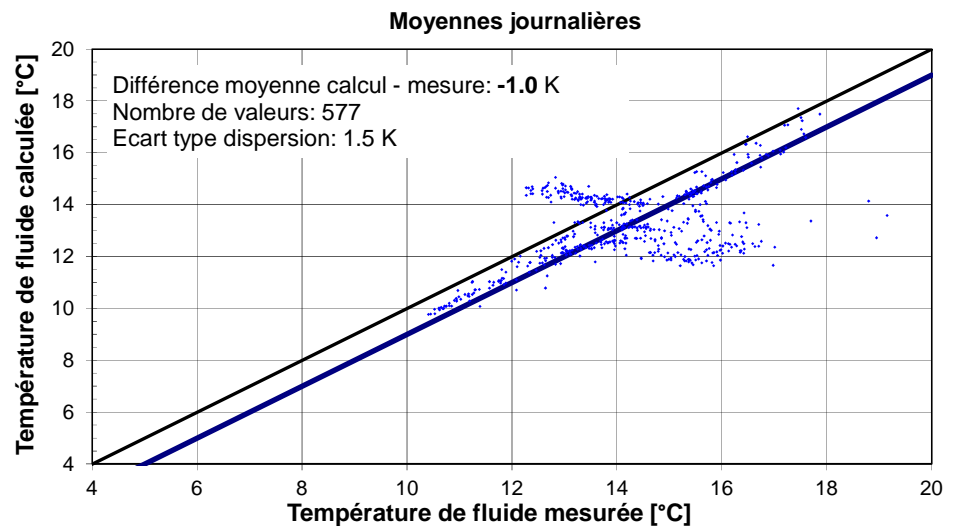
Installation 5



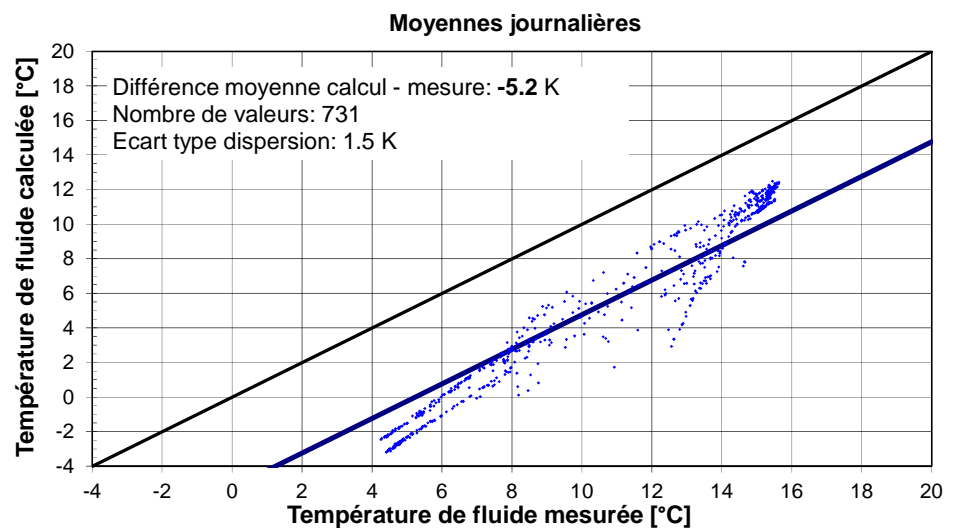
Installation 6



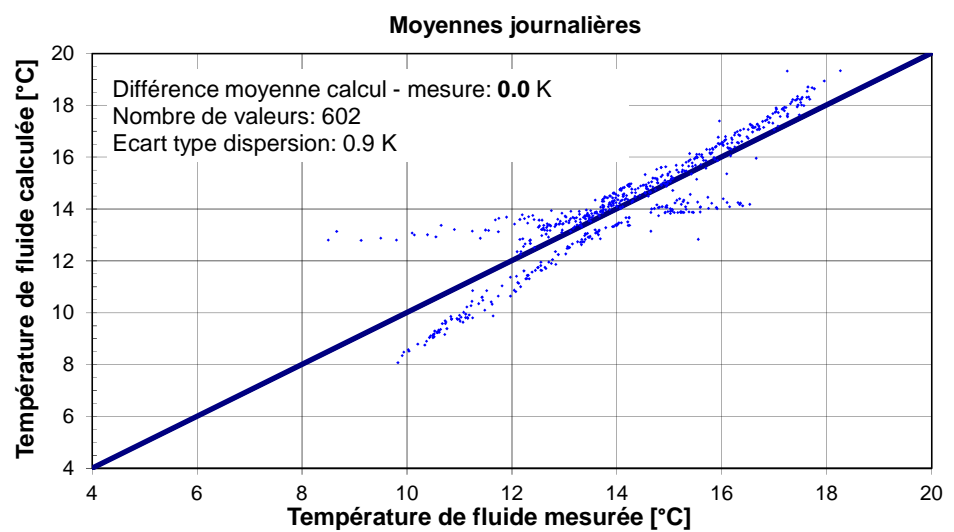
Installation 7



Installation 8



Installation 9



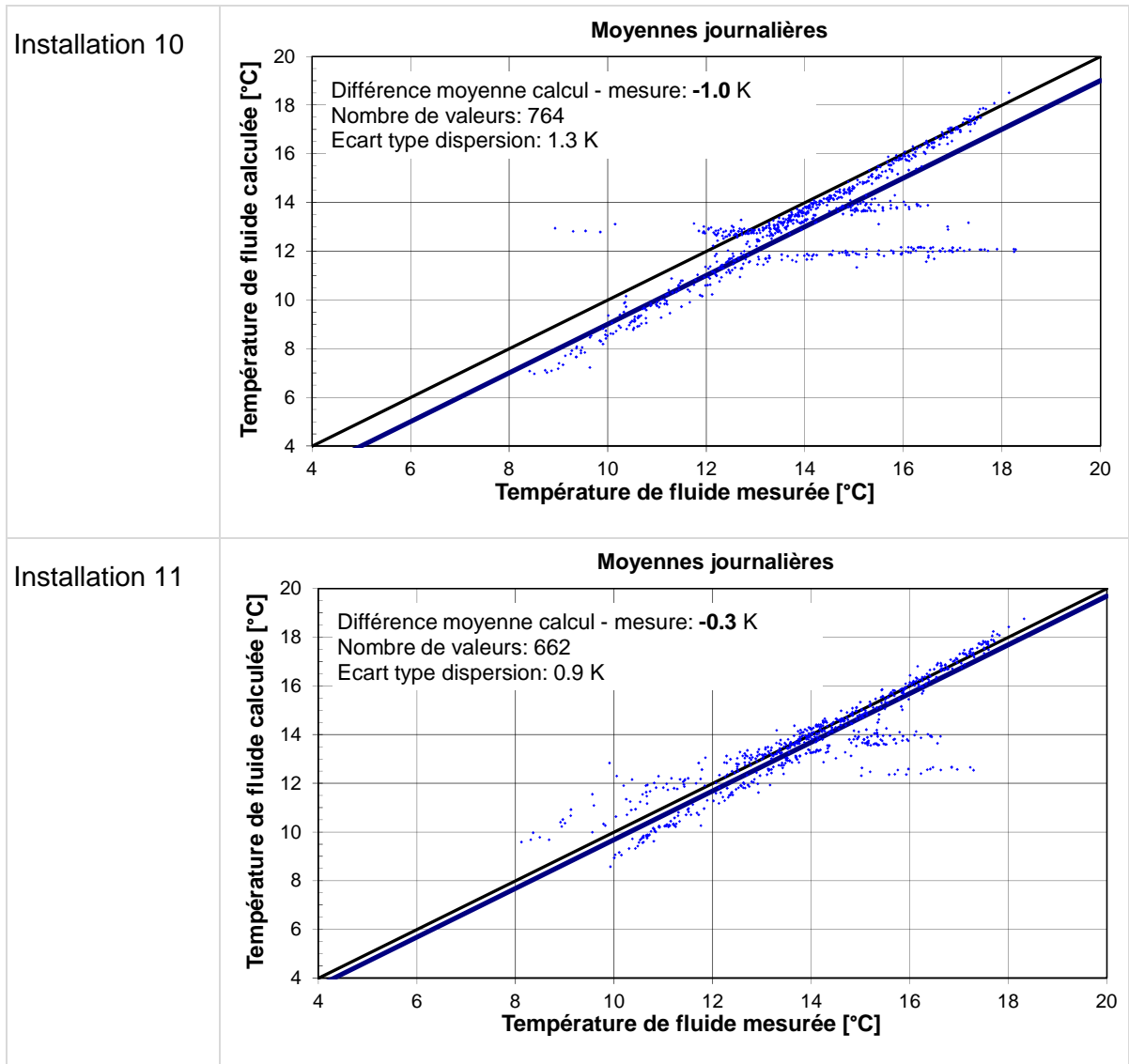


Illustration 4: Comparaison simulation – mesures des températures de fluide en valeurs journalières pour les 11 installations analysées

Pour certaines installations, des points se détachent et s'alignent dans une direction qui ne correspond pas à la tendance de l'ensemble des points (installations 1 et 5). Ils correspondent typiquement à un trou de mesure qui a été comblé par une simple interpolation. On remarque également des nuages de points qui se détachent de la tendance observée (par exemple les installations 6 et 7). Ces écarts sont observés pour des énergies journalières transférées très petites et la différence mesure – calcul peut être reconduite à des imprécisions de mesure (cf. annexes 6 et 7).

D'une manière générale, la différence de température entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées est toujours négative durant les périodes d'extraction de chaleur, et ceci pour toutes les installations analysées. Cela signifie que, pour l'extraction d'une puissance thermique donnée, les

simulations surestiment toujours l'abaissement de température du fluide dans les sondes géothermiques. Le modèle de simulation, avec l'établissement des paramètres nominaux de simulation, permet de dimensionner un champ de sondes géothermiques de façon conservative pour le chauffage (extraction de chaleur du terrain). Pour les champs de sondes géothermiques, la différence de température varie de 0 à -4K. Seule l'installation 8 montre une différence plus importante (-5.2 K). Il s'agit de pieux énergétiques, et cet écart s'explique par la non prise en compte de la capacité thermique du fluide et des pieux, et des transferts thermiques des raccords horizontaux entre les pieux et les distributeurs (cf. section suivante).

La plupart des installations fonctionnent également en injection de chaleur (installations 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10 et 11). Une analyse plus détaillée (cf. annexes) permet également de conclure que les simulations sont conservatives relativement aux mesures pour un dimensionnement des sondes pour le refroidissement (injection de chaleur dans le terrain). En d'autres termes, pour l'injection d'une puissance thermique donnée, les simulations surestiment toujours l'élévation de température du fluide dans les sondes géothermiques.

4.3 Analyse de sensibilité

La différence moyenne entre les températures journalières simulées et mesurées est utilisée comme indicateur pour quantifier la prise en compte des effets suivants :

- la capacité thermique du fluide et des sondes, de même que les transferts thermiques des raccords horizontaux entre les têtes de sonde et les distributeurs (Cas Nom+C+H) ;
- les marges de sécurité prises sur la température initiale et la conductivité thermique du terrain sont enlevées et les effets sont cumulés aux précédents (Cas Nom+C+H+T+L).

Dans la table 1, la différence de température moyenne est montrée pour toutes les installations. Comme les champs de sondes des installations 6 à 11, incluant également le champ de pieux énergétiques, sont exploités comme des stockages de chaleur, la différence de température indiquée est évaluée en extraction de chaleur uniquement. Pour chaque installation, le régime d'écoulement du fluide caloporteur dans les sondes est indiqué, de même que l'existence d'un test de réponse thermique (TRT). Ce dernier permet de déterminer les paramètres clés du terrain avec une marge de sécurité plus faible (TRT), voire négligeable (e-TRT : test de réponse thermique étendu).

Différence moyenne simulation – mesure (extraction de chaleur)	Cas Nominal	Cas Nom+C+H	Cas Nom+C+H+T+L
Installation 1 Turbulent, pas de TRT	-2.0 K	-1.5 K Effet de +0.5K	-0.3 K Effet de +1.2K
Installation 2 Laminaire, pas de TRT	-1.3 K	+0.1 K Effet de +1.4K	+1.4 K Effet de +1.3K
Installation 3 Laminaire, pas de TRT	-3.8 K	-3.3 K Effet de +0.5K	-1.9 K Effet de +1.4K
Installation 4 Laminaire, pas de TRT	-4.0 K	-2.5 K Effet de +1.5K	-1.5 K Effet de +1.0K
Installation 5 Turbulent, pas de TRT	-3.1 K	-2.7 K Effet de +0.4K	-1.5 K Effet de +1.2K
Installation 6 Turbulent, e-TRT	-0.4 K	-0.2 K Effet de +0.2K	-0.2 K ¹⁾
Installation 7 Turbulent, e-TRT	-0.6 K	-0.5 K Effet de +0.1K	-0.5 K ¹⁾
Installation 8 (pieux) Laminaire, TRT	-6.0 K	-0.8 K Effet de +5.2K	-0.4 K Effet de +0.4K
Installation 9 Turbulent, e-TRT	-1.2 K	-1.2 K Effet de +0.0K	-1.2 K ¹⁾
Installation 10 Turbulent, e-TRT	-1.2 K	-1.2 K Effet de +0.0K	-1.2 K ¹⁾
Installation 11 Turbulent, e-TRT	-1.1 K	-0.8 K Effet de +0.3K	-0.8 K ¹⁾

¹⁾ les marges de sécurité pour la température initiale et la conductivité thermique du terrain ont été négligées car un e-TRT a été réalisé

Tableau 1: Différence de température moyenne journalière entre les simulations et les mesures en extraction de chaleur

Les marges de sécurité sur les paramètres du terrain sont utiles dans le cas de 1 installation (installation 2). Il est difficile d'en tirer une statistique, mais on peut formuler les deux observations suivantes :

- les simulations permettent de prédire l'abaissement de température du fluide dans les sondes avec une marge de sécurité et donc de dimensionner de façon conservative un champ de sondes géothermique pour l'extraction de chaleur ;
- lorsqu'un TRT ou un e-TRT est exécuté, le champ de sondes géothermiques est dimensionné de façon sensiblement plus précise. La surestimation de l'abaissement de température, observée entre 0.4 et 1.2 K, est conservative et proche de la précision des mesures.

On peut également observer comment les effets capacitifs des pieux et les transferts de chaleur des raccords horizontaux en surface sont importants avec des pieux énergétiques (installation 8).

Dans la table 2, la différence de température moyenne est montrée en injection de chaleur. Seules les installations 6 à 11 sont concernées.

Différence moyenne simulation – mesure (injection de chaleur)	Cas Nominal	Cas Nom+C+H	Cas Nom+C+H+T+L
Installation 6 Turbulent, e-TRT	+0.2 K	+0.1 K Effet de -0.1K	+0.1 K ¹⁾
Installation 7 Turbulent, e-TRT	-0.6 K	-0.6 K Effet de 0.0K	-0.6 K ¹⁾
Installation 8 (pieux) Laminaire, TRT	-4.4 K	+0.6 K Effet de +5.0K	+0.6 K Effet de 0.0K
Installation 9 Turbulent, e-TRT	+0.5 K	+0.6 K Effet de +0.1K	+0.6 K ¹⁾
Installation 10 Turbulent, e-TRT	-0.3 K	-0.1 K Effet de +0.2K	-0.1 K ¹⁾
Installation 11 Turbulent, e-TRT	+0.1 K	+0.2 K Effet de +0.1K	+0.2 K ¹⁾

¹⁾ les marges de sécurité pour la température initiale et la conductivité thermique du terrain ont été négligées pour un e-TRT

Tableau 2: Différence de température moyenne journalière entre les simulations et les mesures en injection de chaleur

Une différence de température négative signifie, cette fois, que l'élévation de température du fluide simulée est plus faible que celle mesurée. Dans ce cas les simulations ne sont pas conservatives et les cases du tableau 2 sont indiquées en gris. Mais on peut observer que la différence moyenne simulation – mesure reste inférieure à 1 K en valeur absolue pour les 5 champs de sondes simulés. Elle est de l'ordre de grandeur de l'erreur de mesure et donc jugée raisonnable.

4.4 Analyse à long terme

Les installations 1 à 5, conçues pour fonctionner essentiellement en extraction de chaleur, sont simulées sur une cinquantaine d'années. L'évolution à long terme de la température du fluide dans le circuit des sondes est calculée pour les deux cas de figure suivants :

- valeurs nominales des paramètres relatifs à l'installation et aux besoins de chaleur. Cette situation s'apparente à la phase de planification et se base sur des hypothèses de dimensionnement. Les paramètres de simulation pour le terrain et les sondes correspondent au cas nominal. Les besoins de chaleurs nominaux sont transposés sur les sondes en se basant sur les caractéristiques nominales de la pompe à chaleur, définies par son point de fonctionnement B0W35. Cette hypothèse est conservatrice car en réalité la pompe à chaleur fonctionne avec des conditions de température moins favorables. Elle conduit à un surdimensionnement des sondes qui donne non seulement une marge de sécurité supplémentaire mais aussi une réserve pour les futures générations de pompe à chaleur ;
- valeurs calibrées des paramètres relatifs à l'installation et aux besoins de chaleur. Cette situation devrait se rapprocher des performances réelles de l'installation, dans la mesure où son exploitation se poursuit de la même manière dans les années futures. Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques sont calibrés pour reproduire les mesures. La conductivité thermique du terrain est augmentée le cas échéant. Les besoins de chaleur calibrés sont déterminés sur la base des mesures de l'énergie annuelle extraite des sondes, de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée maximum.

Un profil d'extraction de chaleur type doit être élaboré et donné en entrée aux simulations dans les deux cas de figure décrits ci-dessus. Il est défini de la façon la plus simple possible avec des pulses constants mensuels, sur lesquels sont superposés, à la fin de chaque mois, un pulse d'extraction de pointe (se référer aux annexes pour plus de détails). Il est construit de façon à reproduire les puissances d'extraction de pointe et l'énergie annuelle extraite du terrain.

Les différences observées entre les deux cas de figure permettent d'évaluer l'influence des hypothèses de dimensionnement sur l'évolution à long terme de la température de fluide.

Dans le tableau 3, les températures minimums atteintes du fluide après 50 ans sont listées.

Température de fluide minimum après 50 ans	Projection basée sur les valeurs nominales	Projection basée sur les valeurs calibrées	Différence
Installation 1 Turbulent, pas de TRT	-5.6°C	-1.8°C	3.8 K
Installation 2 Laminaire, pas de TRT	-13.2°C	-8.5°C	4.7 K
Installation 3 Laminaire, pas de TRT	-8.2°C	-0.7°C	7.5 K
Installation 4 Laminaire, pas de TRT	-5.5°C	-0.5°C	5.0 K
Installation 5 Turbulent, pas de TRT	-6.2°C	-0.4°C	5.8 K

Tableau 3: Simulation de la température de fluide minimum après 50 ans de marche du système basée sur les paramètres nominaux et les paramètres calibrés des installations

On peut observer la différence importante entre le cas nominal et le cas calibré en ce qui concerne la prédiction de la température minimum du fluide après 50 ans. Les paramètres relatifs au terrain et les sondes ne créent qu'une partie de la différence. L'autre partie résulte de l'utilisation effective des sondes, et donc des besoins de chaleur en terme de puissance de pointe et d'énergie annuelle, et des performances thermiques de la pompe à chaleur (PAC), qui va répercuter sur les sondes des puissances et des énergies extraites en fonction de son coefficient de performance (COP).

Il faut relever que les simulations ont été exécutées avec des profils d'extraction de chaleur sur les sondes géothermiques qui ont été établis avec un COP constant. C'est la raison pour laquelle les températures négatives les plus basses ne sont pas réalistes, mais elles sont le signe d'un sous-dimensionnement du champ de sondes relativement à l'exploitation que l'on aimerait en faire.

Les deux cas simulés représentent deux extrêmes qui conduisent à des températures de fluide à long terme qui peuvent varier de 4 à 8 K. Ils permettent de prendre conscience de l'importance avec laquelle l'utilisation d'un champ de sondes géothermiques, utilisé sans recharge annuelle significative, a de l'influence sur l'abaissement à long terme de la température du fluide.

Toutefois les prédictions ont été faites avec un profil de demande de chaleur extrêmement simplifié, et il s'agit de savoir si cette simplification introduit à son tour une erreur dans l'abaissement de la température minimum du fluide. Cette question fait l'objet de l'analyse développée dans la section suivante.

4.5 Analyse du profil d'extraction et d'injection de chaleur

Les besoins thermiques à satisfaire et leur historique ont une influence décisive sur la température du fluide dans les sondes géothermiques. Dans cette section, les besoins thermiques mesurés en valeurs horaires sont pris comme référence, et utilisés pour générer un profil simplifié, caractérisé par des pulses d'extraction ou d'injection mensuels et une puissance de pointe à la fin de chaque mois.

La procédure suivie pour générer le profil simplifié est illustrée dans l'illustration 5.

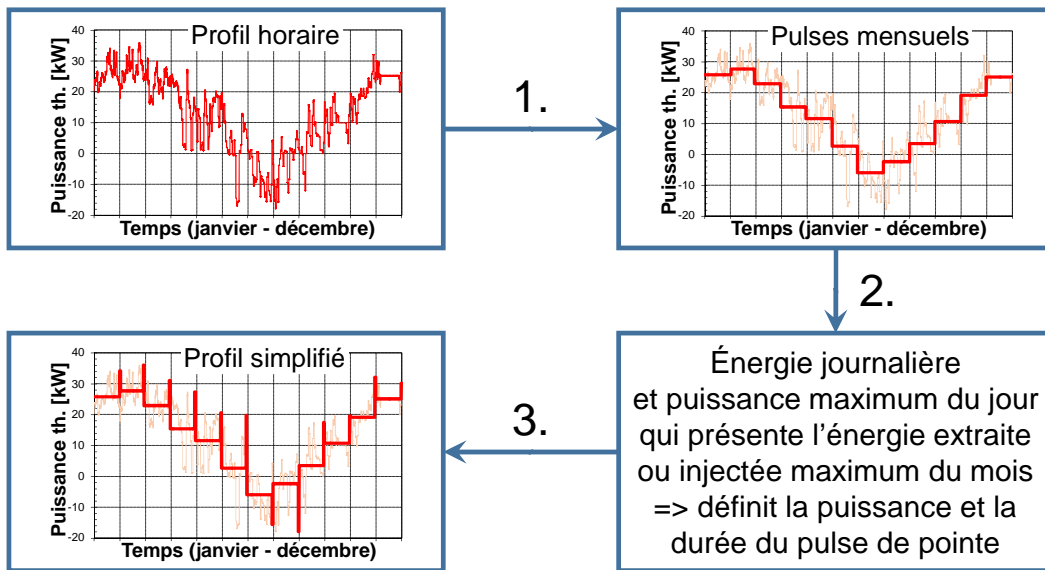


Illustration 5: Procédure suivie pour l'élaboration d'un profil simplifié d'extraction et d'injection de chaleur

Les étapes montrées dans l'illustration 5 sont les suivantes :

1. Les pulses mensuels permettent de recalculer, avec un pulse de puissance constante, l'énergie mensuelle nette qui a été transférée dans le terrain ;
2. Le jour du mois avec l'énergie journalière transférée maximum est recherché. Si le bilan mensuel est une extraction nette de chaleur, il s'agit du jour avec l'énergie extraite maximum. Dans le cas contraire, c'est le jour avec l'énergie injectée la plus grande ;
3. Au jour pour lequel l'énergie transférée est maximum correspond une puissance maximum. Cette dernière définit la puissance du pulse de pointe. La durée du pulse de pointe, quant à elle, doit permettre de recalculer l'énergie journalière maximum sur la base de la puissance du pulse de pointe et de la puissance du pulse mensuel. Pour chaque mois un pulse de pointe est calculé de la sorte. Il est superposé au pulse mensuel à la fin du mois.

Pour chaque installation, la simulation de la variante calibrée est simulée avec le profil horaire et le profil simplifié. La comparaison des températures minimum et maximum annuelles permet d'apprécier comment les températures du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié. Dans la table 4, les écarts obtenus sont donnés dans des intervalles pour chaque installation, car la comparaison des valeurs extrêmes est faite pour chaque année dont on dispose d'un profil en valeurs horaires.

Influence d'un profil de chaleur simplifié	Ecart sur la température minimum annuelle	Ecart sur la température maximum annuelle
Installation 1	de -0.2 à -0.1K	-
Installation 2	de -0.8 à -0.1K	-
Installation 3	de 0.0 à +0.1K	de -0.2 à 0.0K
Installation 4	de -0.8 à -0.7K	+0.3K
Installation 5	de -0.3 à +0.1K	-
Installation 6	de -0.5 à +0.6K	de +0.3 à +0.6K
Installation 7	de -0.4 à +0.1K	+0.6K
Installation 8	de -0.1 à +0.0K	de +0.0 à +0.5K
Installation 9	de -0.4 à +0.6K	de +0.0 à +0.4K
Installation 10	de -1.3 à -0.2K	de +0.8 à +1.0K
Installation 11	de -0.2 à +0.7K	+0.8K

Tableau 4: Influence d'un profil de chaleur simplifié sur les températures minimums et maximums annuelles du fluide caloporteur

Lorsqu'une seule valeur est indiquée, cela signifie qu'une seule année a pu être prise en compte dans l'évaluation de l'écart de température. Un écart négatif sur la température minimum signifie que le profil de chaleur simplifié conduit à une température de fluide minimum plus basse que celle obtenue avec un profil de chaleur en valeurs horaires. De même, un écart positif signifie une température maximum plus élevée avec le profil de chaleur simplifié.

L'erreur sur les températures extrêmes, introduite avec un profil de chaleur simplifié, est tout à fait raisonnable. Elle a tendance à être conservatrice et reste pratiquement toujours inférieure à 1K.

Les différences de température significatives observées dans la section précédente (4.4 Analyse à long terme) sont donc bien causées par la manière dont les sondes sont utilisées.

5 Conclusions

La disponibilité des mesures d'une dizaine de champs de sondes géothermiques a permis d'observer comment la simulation de leur comportement thermique permet de reproduire les mesures. Un modèle de simulation de champs de sondes, notamment utilisé pour le calcul des fonctions-g, a été sélectionné pour l'étude et paramétré en se référant aux valeurs de planification et en conformité avec la norme 384/6 sur les sondes géothermiques.

Les simulations thermiques des installations permettent de bien reproduire les mesures. L'abaissement de la température du fluide dans les sondes est prédit avec une marge de sécurité, ce qui permet de dimensionner de façon conservatrice un champ de sondes géothermiques conçu pour l'extraction de chaleur. Lorsqu'un TRT ou un e-TRT (Test de Réponse Thermique étendu) est exécuté, la marge de sécurité est plus faible et la surestimation de l'abaissement de température, observée entre 0.4 et 1.2K, est proche de la précision des mesures. En injection de chaleur, la différence de température mesure – simulation est raisonnable et reste inférieure à 1K en valeur absolue.

Une analyse à long terme, réalisée pour un horizon temporel de 50 ans, a montré que le degré d'utilisation d'un champ de sondes, conçu pour fonctionner en extraction de chaleur, a une importance capitale sur l'abaissement de la température du fluide à long terme. La manière dont les sondes géothermiques sont exploitées, en particulier la puissance de pointe et l'énergie annuelle extraite, ont une grande influence sur les performances thermiques du champ. Des besoins thermiques aussi réalistes que possible sont donc décisifs sur la prédiction des performances thermiques à long terme d'un champ de sondes géothermiques.

Relativement à un profil de chaleur précis en valeurs horaires, un profil de chaleur simplifié, construit avec des pulses mensuels moyens et une puissance de pointe à la fin de chaque mois, permet de recalculer les températures de fluide minimum et maximum annuelles avec un écart généralement conservateur et inférieur à 1K.

Le dimensionnement d'un champ de sondes géothermiques est basé sur la prédiction de la température extrême du fluide circulant dans les sondes, que ce soit en extraction de chaleur pour du chauffage ou en injection de chaleur pour du refroidissement. La comparaison des valeurs simulées et mesurées a montré que les simulations sont toujours plus pessimistes que la réalité, ce qui est déjà un bon signe pour le futur des installations existantes. D'autre part, comme une sonde géothermique est avant tout un échangeur de chaleur avec le terrain, les températures extrêmes du fluide sont très différentes de la température moyenne du terrain dans la zone occupée par les sondes. Par conséquent, une température de fluide extrême qui devient inférieure à la valeur minimum admissible ne signifie pas que le terrain ne peut plus fournir d'énergie et que l'installation doit être arrêtée. Un profil de chaleur simplifié, qui permet de calculer les

températures extrêmes avec une bonne précision, indique que celles-ci dépendent en premier lieu des puissances de pointe et de l'énergie annuelle nette que le champ de sondes doit satisfaire.

Il y a donc deux moyens d'agir pour limiter une température de fluide qui devient trop basse : une recharge thermique du champ de sondes, qui agit sur la diminution de l'énergie annuelle nette transférée par celles-ci, et une réduction de la puissance de pointe extraite par mètre de sonde, qui peut être réalisée avec une PAC moins puissante ou une augmentation du nombre de sondes.

6 Remerciements

Le LESBAT remercie chaleureusement toutes les personnes et tous les bureaux d'ingénieurs qui ont été contactés dans le cadre de ce projet et qui ont contribué au bon déroulement de l'étude.

7 Références

- [1] Wagner R. und Weisskopf T (2014): Erdsondenpotential in der Stadt Zürich. Schlussbericht. Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik, Stadt Zürich.
- [2] Eskilson P. (1986): Superposition Borehole Model. Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- [3] Klein S. A. et al. (2007): TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 16.1. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- [4] Pahud D. (2012): The Superposition Borehole Model for TRNSYS 16 or 17 (TRNSBM). User Manual for the April 2012 Version. Internal Report. ISAAC - DACD- SUPSI, Switzerland.
- [5] SIA Norme 384/6 (2010): Sondes géothermiques. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, Suisse.

8 Liste des illustrations et des tableaux

Illustration 1: Longueur totale des nouvelles sondes géothermiques posées par année en Suisse (source : FWS)	4
Illustration 2: Le programme SBM permet la simulation d'un nombre arbitraire de sondes géométriques disposées dans une configuration arbitraire.....	6
Illustration 3: La simulation du profil de température du fluide caloporteur est basée sur le profil des puissances thermiques transférées par les sondes géothermiques et les paramètres définissant le terrain et les sondes	7

Illustration 4: Comparaison simulation – mesures des températures de fluide en valeurs journalières pour les 11 installations analysées.....	12
Tableau 1: Différence de température moyenne journalière entre les simulations et les mesures en extraction de chaleur	14
Tableau 2: Différence de température moyenne journalière entre les simulations et les mesures en injection de chaleur.....	15
Tableau 3: Simulation de la température de fluide minimum après 50 ans de marche du système basée sur les paramètres nominaux et les paramètres calibrés des installations	17
Illustration 5: Procédure suivie pour l'élaboration d'un profil simplifié d'extraction et d'injection de chaleur	18
Tableau 4: Influence d'un profil de chaleur simplifié sur les températures minimums et maximums annuelles du fluide caloporteur	19

9 Liste des annexes

Annexe 1:	Installation 1
Annexe 2:	Installation 2
Annexe 3:	Installation 3
Annexe 4:	Installation 4
Annexe 5:	Installation 5
Annexe 6:	Installation 6
Annexe 7:	Installation 7
Annexe 8:	Installation 8
Annexe 9:	Installation 9
Annexe 10:	Installation 10
Annexe 11:	Installation 11