

ANNEXE A: Installation 1

Table des matières

A1. Installation 1	2
A1.1. Mesures disponibles	2
A1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques.....	3
A1.3. Géologie	5
A1.4. Sondes géothermiques	6
A2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 1.....	6
A2.1. Température minimum annuelle du fluide	6
A2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide	9
A2.3. Analyse de sensibilité.....	12
A3. Simulation à long terme de l’installation 1	14
A3.1. Evolution à long terme avec les paramètres nominaux	14
A3.2. Evolution à long terme avec les paramètres calibrés.....	17
A4. Analyse du profil de chaleur de l’installation 1	18
A4.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 1.....	18
A4.2. Température de fluide minimum annuelle	20

A1. Installation 1

L'installation 1 fonctionne depuis plus de 11 ans. Toutes les mesures sont disponibles en valeurs horaires dès la 8e année de fonctionnement. Pour les années précédentes seul le bilan d'énergie annuel est connu.

A1.1. Mesures disponibles

Les mesures utilisées de l'installation 1 sont :

- températures d'entrée et de sortie de l'évaporateur de la PAC ;
- températures d'entrée et de sortie du condenseur de la PAC ;
- énergie électrique consommée par le compresseur de la PAC ;
- énergie thermique fournie au condenseur de la PAC ;
- température de l'air extérieur.

Il s'agit d'établir les évolutions de la puissance thermique extraite des sondes géothermiques et de la température du fluide caloporteur dans le circuit des sondes, défini comme étant la moyenne des températures aller et retour du fluide.

Les valeurs d'énergie sont enregistrées par un système de type M-Bus. Par conséquent elles ne coïncident pas forcément : l'énergie extraite à l'évaporateur de la PAC pendant 1 heure n'est pas toujours obtenue par la soustraction de l'énergie électrique absorbée au compresseur à l'énergie délivrée au condenseur. Les valeurs horaires de l'énergie extraite des sondes sont donc déterminées par l'énergie électrique mesurée et le COP. Ce dernier dépend des niveaux de température dans le condenseur et l'évaporateur. La relation de dépendance, établie avec les mesures, est montrée dans la figure A1.1.

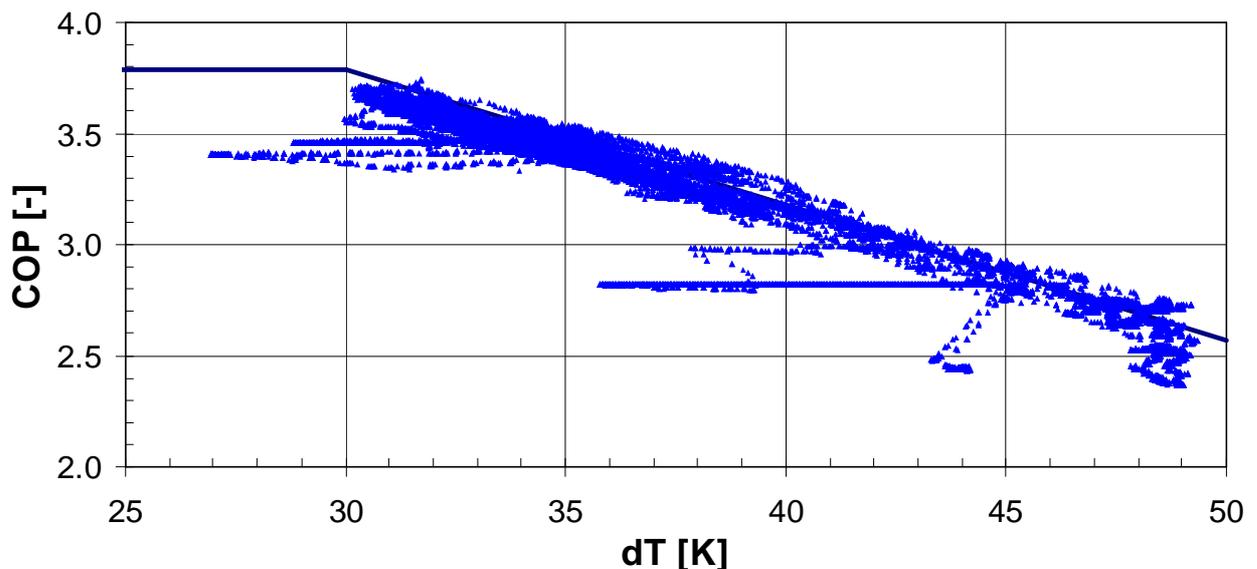
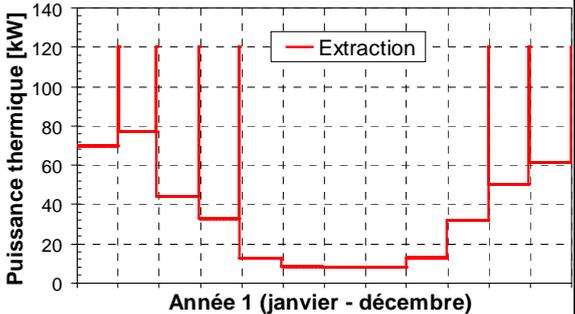
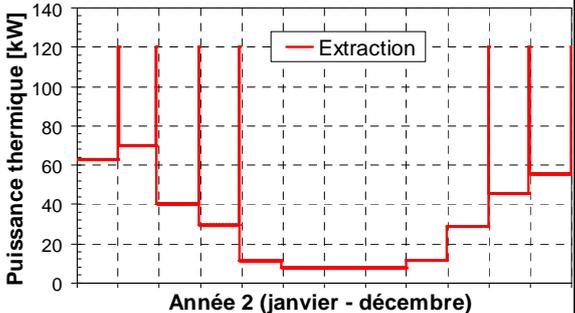
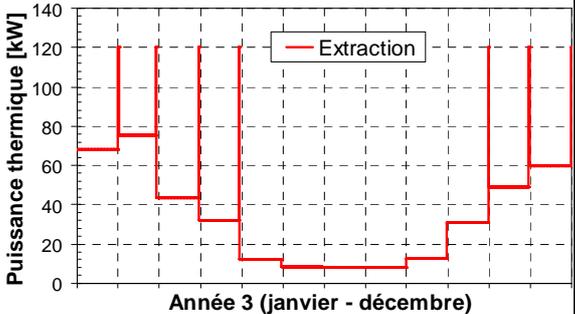


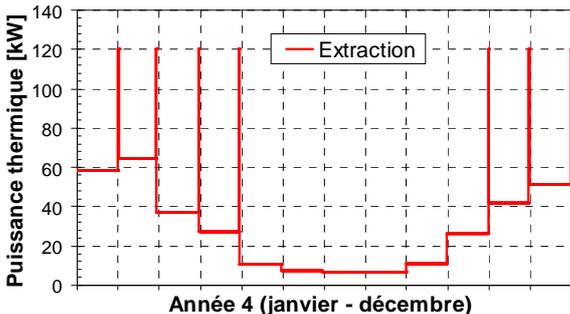
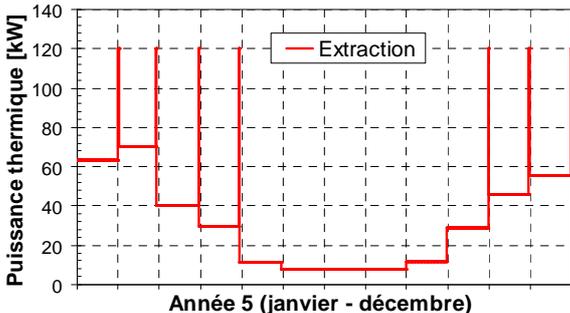
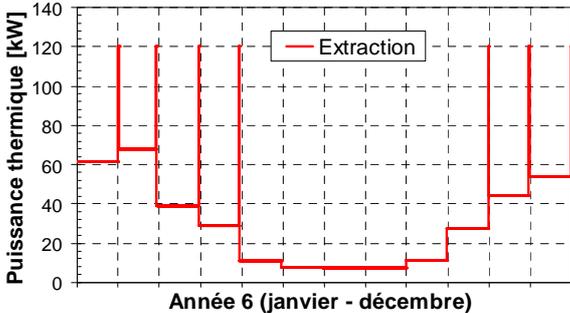
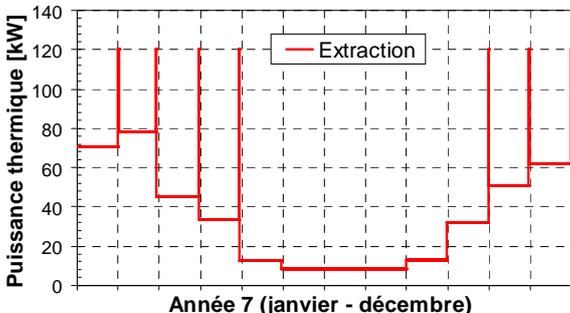
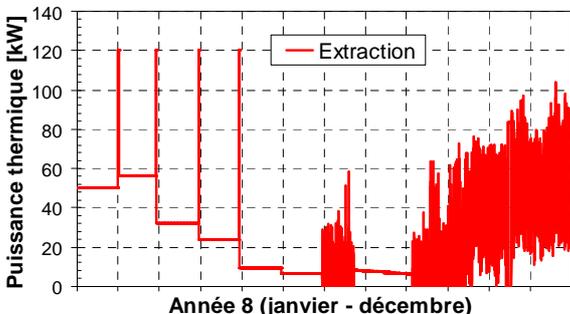
Figure A1.1 Dépendance du COP de la PAC en fonction de la différence de température dT entre l'eau dans le condenseur et le fluide caloporteur dans l'évaporateur. Les mesures sont montrées en moyennes hebdomadaires. La courbe interpolée permet de recalculer l'énergie thermique délivrée au condenseur à partir de l'énergie électrique mesurée.

La différence de température dT est la différence de température entre l'eau de chauffage circulant dans le condenseur et le fluide caloporteur du circuit des sondes géothermiques circulant dans l'évaporateur. Les températures de l'eau, respectivement du fluide caloporteur, sont définies comme étant la moyenne arithmétique des températures d'entrée et de sortie du condenseur, respectivement de l'évaporateur. Pour éviter une dispersion des valeurs trop importante, chaque point représente un COP moyen sur une période de mesure d'une semaine. La courbe interpolée du COP permet de recalculer correctement sur toute la période de mesure l'énergie thermique délivrée au condenseur à partir de l'énergie électrique mesurée.

A1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques

Les profils d'extraction de chaleur des 7 premières années de fonctionnement sont extrapolés avec des pulses moyens mensuels et une puissance de pointe à la fin de chaque mois, correspondant à la puissance d'extraction de pointe de l'installation. Les mesures en valeurs horaires sont disponibles du mois de juillet de la 8^e année jusqu'au mois d'août de la 11^e année.

<p>Année 1: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 309 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 280 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 301 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>

<p>Année 4: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 259 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Puissance thermique [kW]</p> <p>Année 4 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 5: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 282 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Puissance thermique [kW]</p> <p>Année 5 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 6: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 272 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Puissance thermique [kW]</p> <p>Année 6 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 7: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 312 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Puissance thermique [kW]</p> <p>Année 7 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 8: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 244 MWh/a Température mesurée air extérieur: 9.7 °C</p>	 <p>Puissance thermique [kW]</p> <p>Année 8 (janvier - décembre)</p>

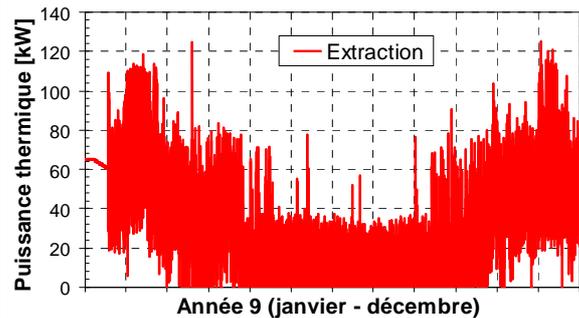
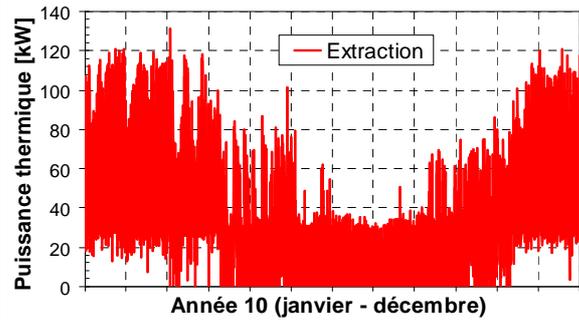
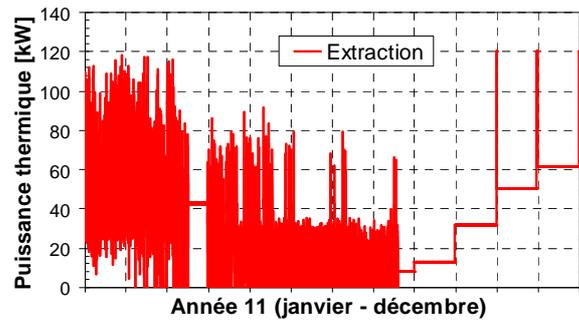
<p>Année 9: Puissance extraite de pointe mesurée : 125 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 266 MWh/a Température mesurée air extérieur: 10.5 °C</p>	
<p>Année 10: Puissance extraite de pointe mesurée : 131 kW Durée max. de la puissance de pointe : 2 h Energie extraite annuelle : 288 MWh/a Température mesurée air extérieur: 10.2 °C</p>	
<p>Année 11: Puissance extraite de pointe mesurée : 118 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 273 MWh/a Température mesurée air extérieur: 10.8 °C</p>	

Table A1.1 Profils horaires extrapolés et mesurés de la puissance thermique extraite des sondes géothermiques pour les 11 premières années de fonctionnement de l'installation 1.

A1.3. Géologie

La conductivité thermique moyenne du terrain est déterminée sur la base d'un profil géologique attendu des types de roche et des épaisseurs correspondantes. Il est d'ailleurs confirmé par le profil relevé d'une sonde géothermique dans le voisinage. Les valeurs de calcul recommandées de la norme SIA 384/6 sont choisies. Elles contiennent donc la marge de sécurité correspondante pour la détermination de la conductivité thermique du terrain.

La température initiale du terrain vers la surface, estimée par les procédures proposées dans la norme SIA 384/6, est diminuée par la marge de sécurité de 1 K pour un dimensionnement en chauffage.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain : 2.4 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain : 2.1 MJ/(m³K)
- température initiale du terrain vers la surface : 9.8 °C
- gradient de température géothermique : 30 K/km

A1.4. Sondes géothermiques

Le système utilise 15 sondes géothermiques de 230 m chacune, placées sur une ligne et espacées par 7 m. Le débit total nominal dans le circuit des sondes est d'environ 32 m³/h. Le débit par sonde, supérieure à 2.1 m³/h, permet d'avoir un régime d'écoulement turbulent dans les tubes des sondes (double-U avec un tube HDPE de diamètre externe de 40mm).

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement turbulent dans les sondes et un débit nominal de 30 m³/h dans le circuit des sondes.

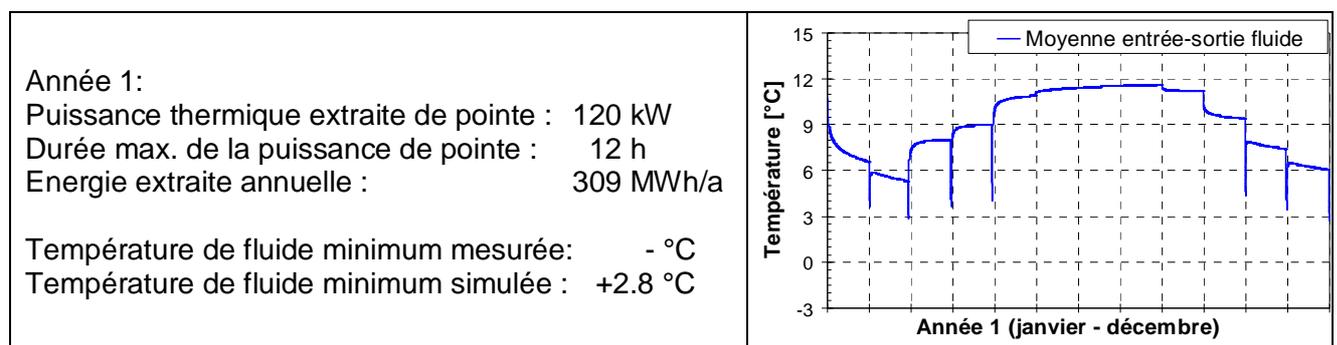
Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux sondes géothermiques sont :

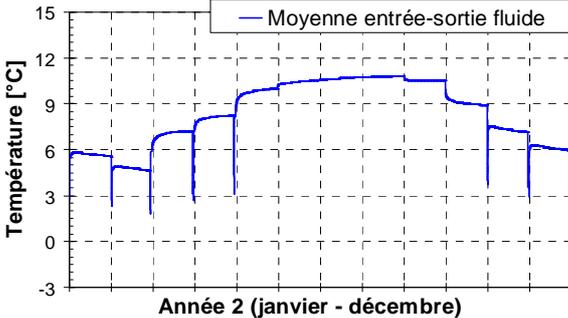
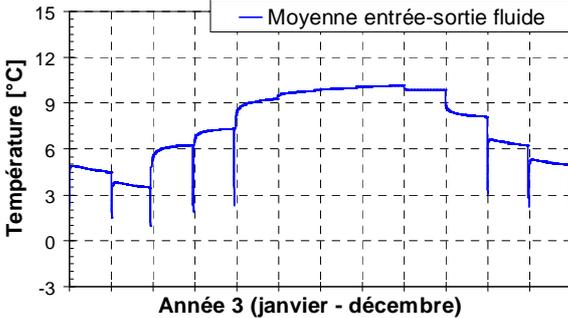
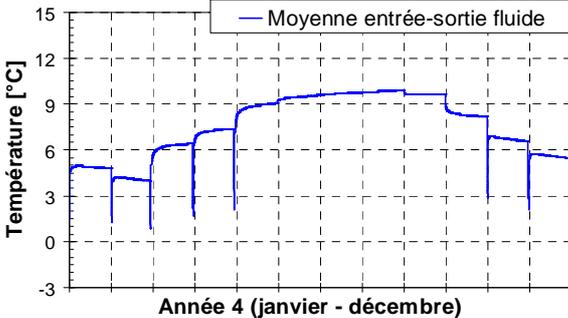
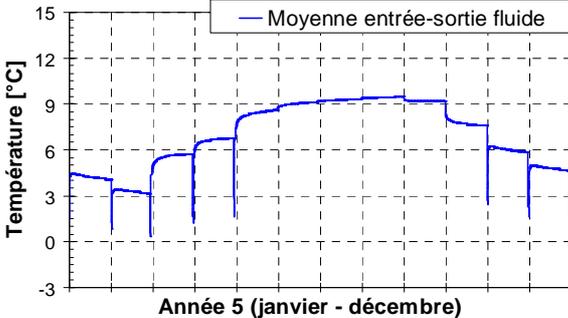
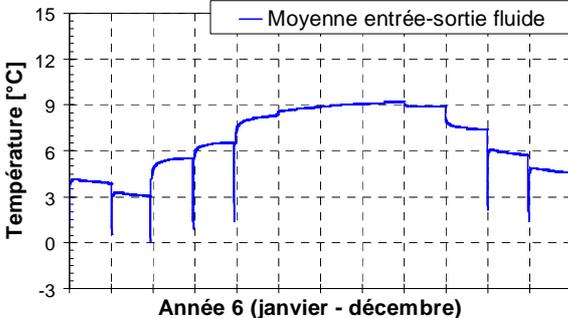
- nombre de sondes géothermiques :	15 (placée sur une ligne)
- profondeur des sondes géothermiques :	230 m
- espacement entre les sondes :	7 m
- diamètre d'une sonde (forage):	0.13 m
- type de sonde :	double-U
- résistance thermique de la sonde Rb :	0.07 K/(W/m) (régime turbulent)
- résistance thermique interne de la sonde Ra :	0.27 K/(W/m) (régime turbulent)

A2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 1

A2.1. Température minimum annuelle du fluide

La température minimum annuelle du fluide est calculée et comparée avec les mesures quand elle est disponible, c'est-à-dire à partir de la 9^e année de fonctionnement. Les résultats sont montrés dans la table A2.1. Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table A2.1.



<p>Année 2: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 280 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : +1.8 °C</p>	 <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 301 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : +0.9 °C</p>	 <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 4: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 259 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : +0.8 °C</p>	 <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 4 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 5: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 282 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : +0.3 °C</p>	 <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 5 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 6: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 272 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : 0.0 °C</p>	 <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 6 (janvier - décembre)</p>

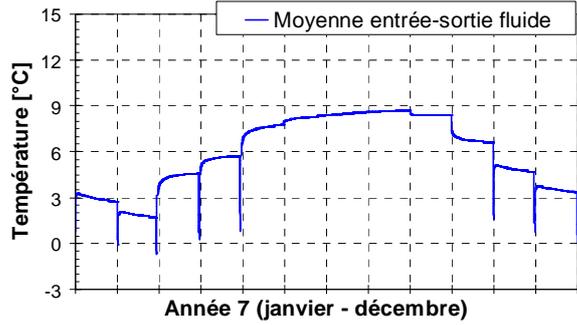
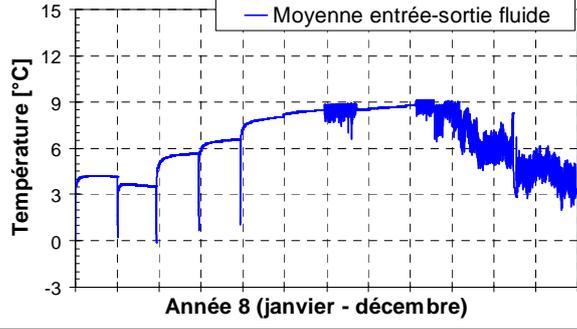
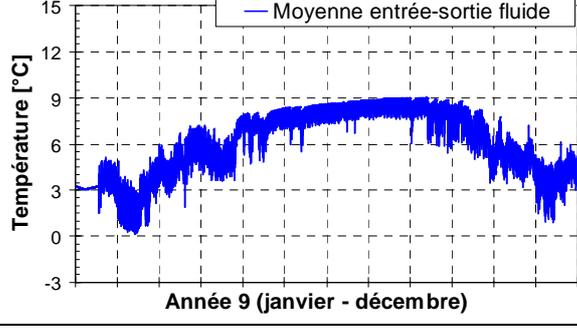
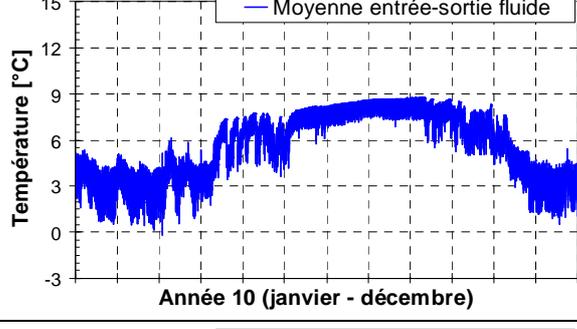
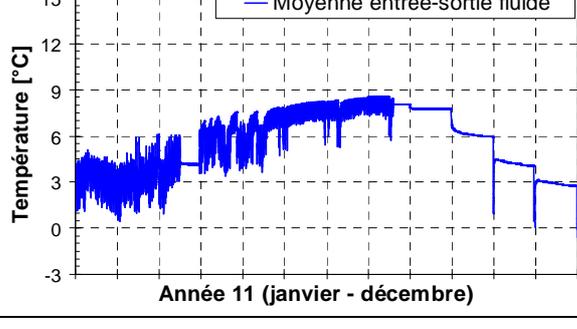
<p>Année 7: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 312 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -0.7 °C</p>	 <p>Année 7 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 8: Puissance thermique extraite de pointe : 120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 244 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -0.1 °C</p>	 <p>Année 8 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 9: Puissance extraite de pointe mesurée : 125 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 266 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +2.2 °C Température de fluide minimum simulée : +0.2 °C</p>	 <p>Année 9 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 10: Puissance extraite de pointe mesurée : 131 kW Durée max. de la puissance de pointe : 2 h Energie extraite annuelle : 288 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +2.6 °C Température de fluide minimum simulée : -0.2 °C</p>	 <p>Année 10 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 11: Puissance extraite de pointe mesurée : 118 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 273 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +2.9 °C Température de fluide minimum simulée : +0.4 °C</p>	 <p>Année 11 (janvier - décembre)</p>

Table A2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques pour les 11 premières années de fonctionnement de l'installation 1. Les valeurs minimums annuelles simulées sont également indiquées, avec la valeur mesurée correspondante quand elle est disponible.

A2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

La comparaison des valeurs extrêmes ne permet pas une comparaison fiable des simulations aux mesures. Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique A2.1 et en moyennes journalières dans le graphique A2.2. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières.

Toutefois la différence moyenne entre les calculs et les mesures est d'environ -2K dans les deux cas. Cela signifie que les simulations livrent des températures de fluide qui sont en moyenne 2 K plus basses que les valeurs mesurées.

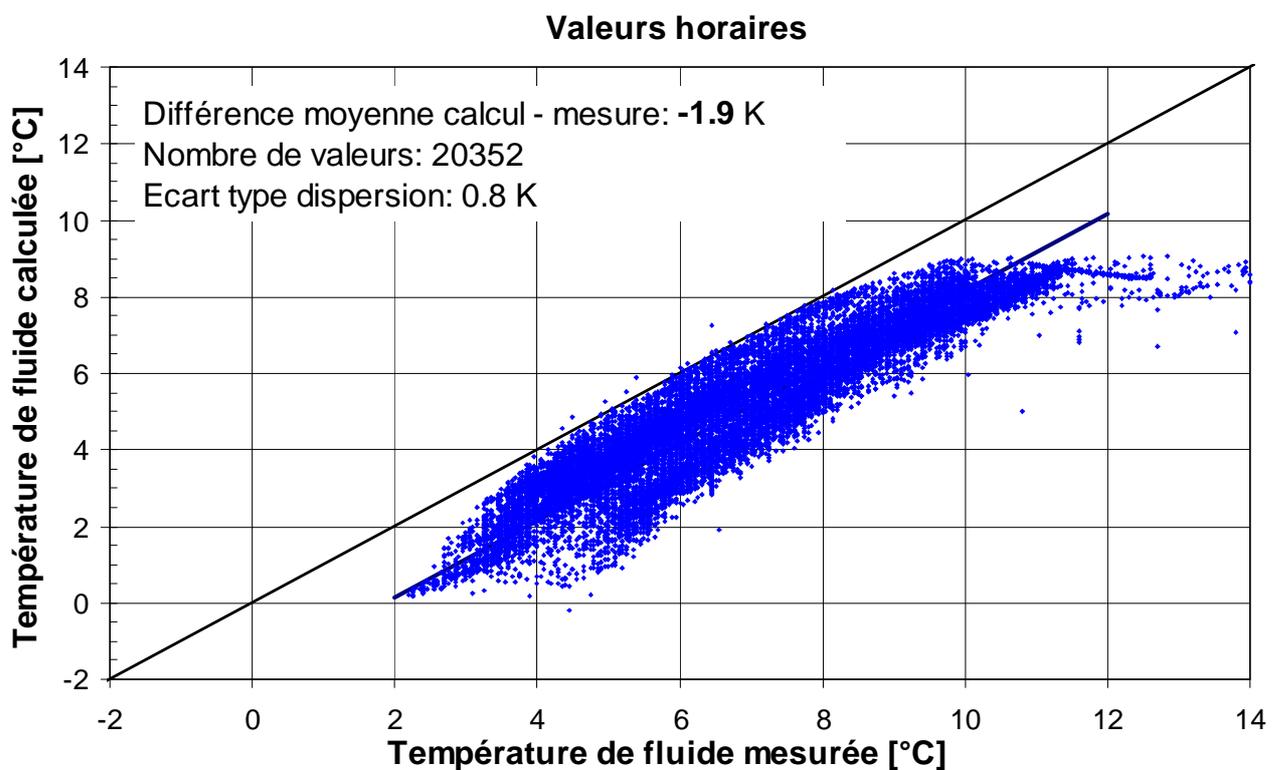


Figure A2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 1.

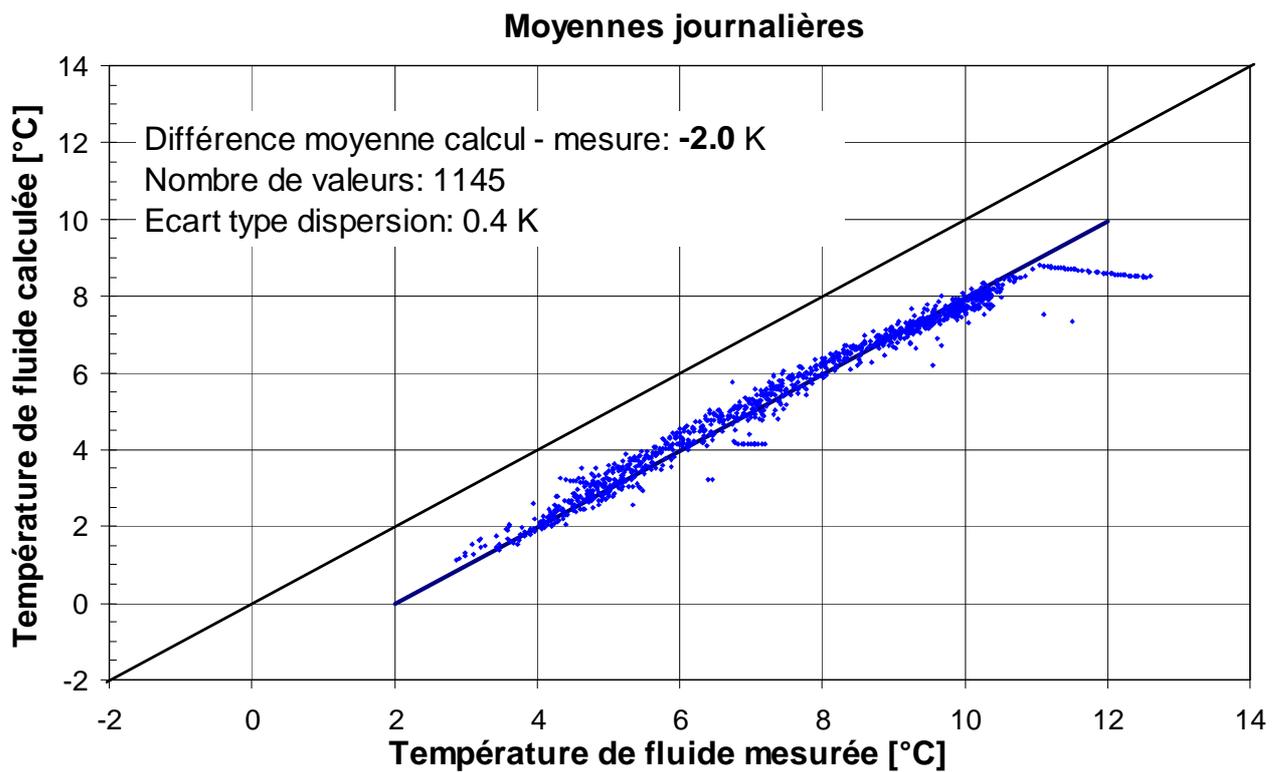


Figure A2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 1.

Les moyennes journalières qui s'écartent de la tendance sont vraisemblablement issus de mesures extrapolées dans le but de combler des périodes sans mesures. La ligne de points dans la partie supérieure droite du graphique A2.2 peut être identifiée dans le graphique A2.3. Elle correspond à la période juillet – août 2011, caractéristique d'une période sans mesures.

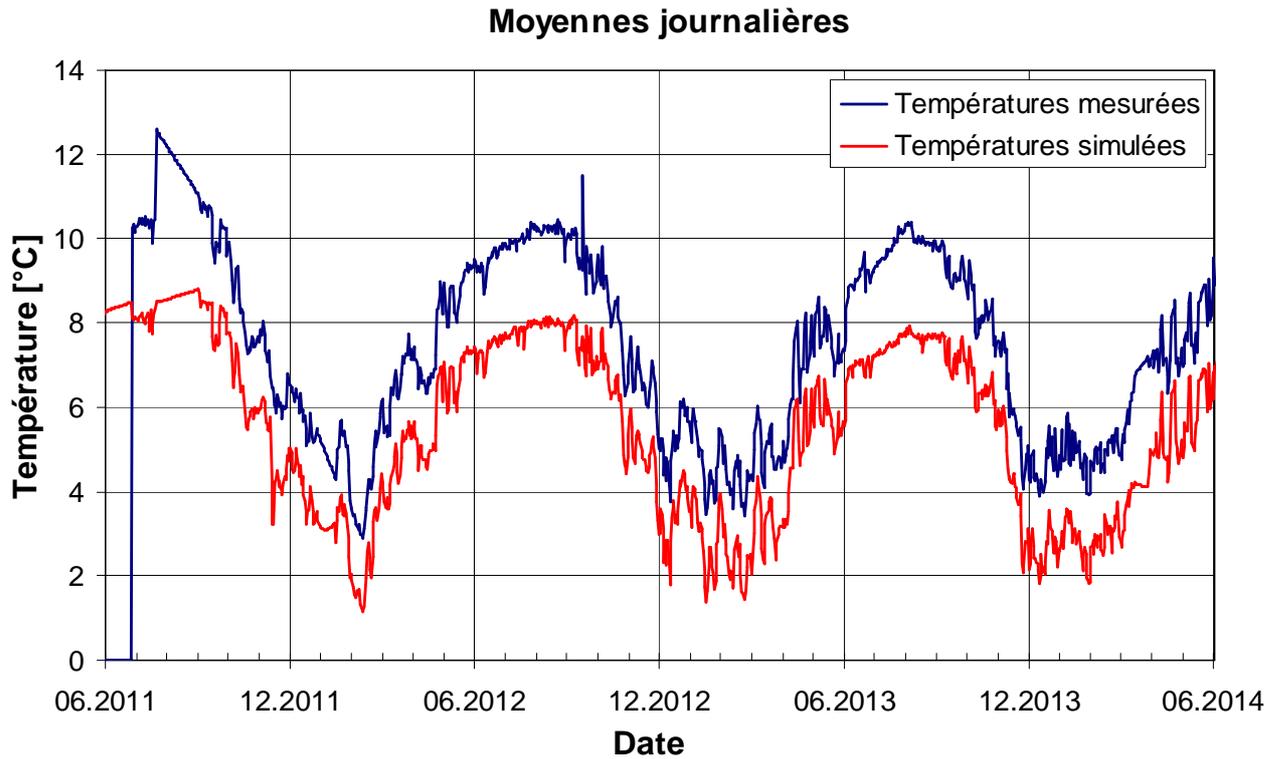


Figure A2.3 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 1.

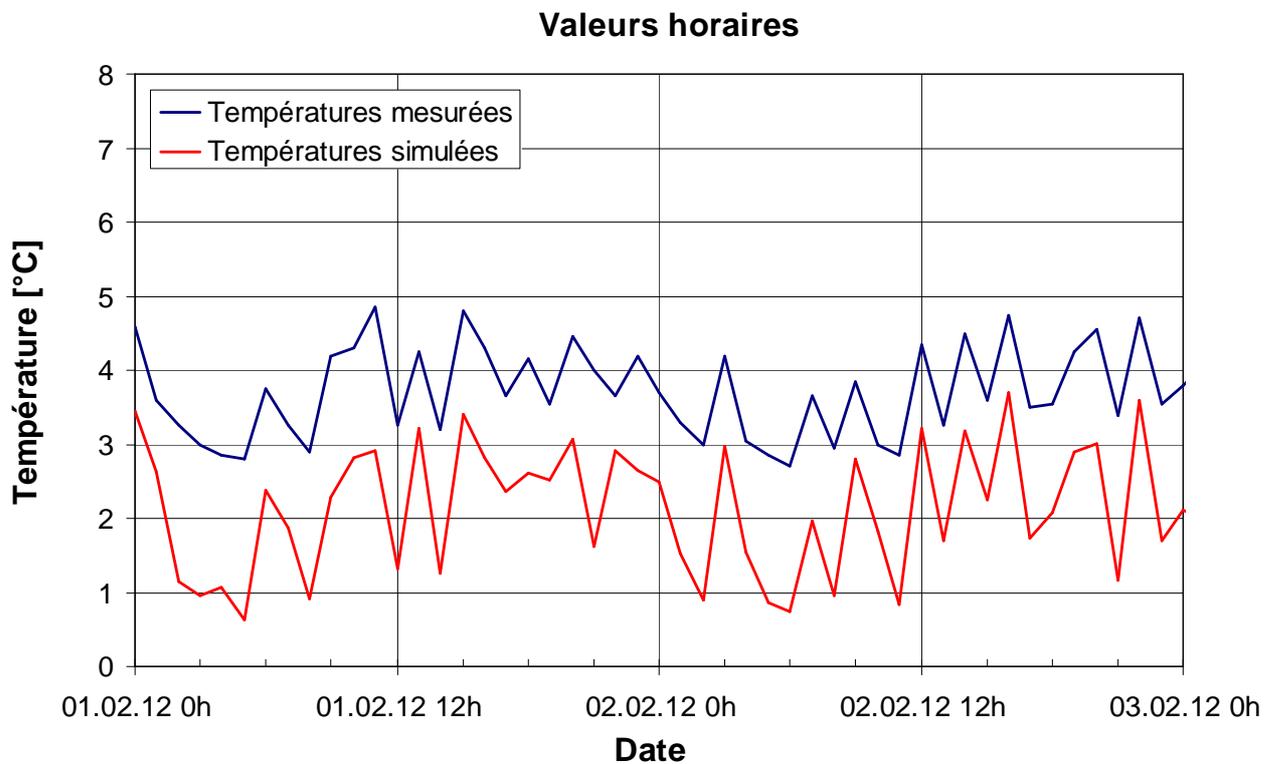


Figure A2.4 Evolution en valeurs horaires des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 1.

A2.3. Analyse de sensibilité

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des sondes (variante Turb), les variations suivantes sont évaluées afin de quantifier leurs effets cumulés :

- régime d'écoulement laminaire dans les sondes (variante Lam). Les résistances thermiques des sondes sont de respectivement 0.12 K/(W/m) pour Rb (résistance thermique d'une sonde) et 0.43 pour Ra (résistance thermique interne d'une sonde) ;
- la capacité thermique du fluide et de la sonde est prise en compte avec la variante nominale, qui elle est basée sur un régime d'écoulement turbulent dans les tubes en U des sondes. Cette variante est appelée Turb+C ;
- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte en plus de la capacité thermique des sondes (variante Turb+C+H) ;
- la marge de sécurité sur la température initiale du terrain est levée. Cela signifie qu'elle est 1K plus élevée. Cette variation, cumulée aux variations précédentes, correspond à la variante Turb+C+H+T ;
- la marge de sécurité sur la conductivité thermique du terrain est levée. Cela signifie qu'elle est 0.2 W/(mK) plus élevée. Cette variation, cumulée aux variations précédentes, correspond à la variante Turb+C+H+T+L.

Les résultats sont montrés dans la table A2.2.

<p>Variante Lam: Régime d'écoulement laminaire dans les sondes</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -2.6 K Ecart type dispersion : 0.4 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p>
<p>Variante nominale Turb: Régime d'écoulement turbulent dans les sondes</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -2.0 K Ecart type dispersion : 0.4 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p>

<p>Variante Turb+C: Capacité thermique des sondes ajoutée</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -1.8 K Ecart type dispersion : 0.4 K</p>	
<p>Variante Turb+C+H: Transferts thermiques des raccords horizontaux entre les sondes ajoutés</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -1.5 K Ecart type dispersion : 0.4 K</p>	
<p>Variante Turb+C+H+T: Effet de la température initiale du terrain sans marge de sécurité ajouté</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -0.6 K Ecart type dispersion : 0.4 K</p>	
<p>Variante Turb+C+H+T+L: Effet de la conductivité thermique du terrain sans marge de sécurité ajouté</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -0.3 K Ecart type dispersion : 0.4 K</p>	

Table A2.1 Influence des effets cumulés des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 1.

Sans les marges de sécurités les simulations reproduisent fidèlement les mesures effectuées sur l'installation 1.

La différence moyenne calcul-mesure est recalculée, pour la variante nominale Turb, en valeurs semestrielles pour distinguer entre la saison d'hiver (du 01 octobre au 01 avril) et la saison d'été (du 01 avril au 01 octobre). Les valeurs obtenues sont montrées dans la table A2.2.

Variante nominale Turb – installation 1			
Différence moyenne calcul-mesure	Moyenne annuelle	Moyenne hivernale	Moyenne estivale
Oct. 2011 – sept. 2012	-1.9 K	-1.8 K	-2.1 K
Oct. 2012 – sept. 2013	-1.9 K	-1.8 K	-2.1 K
Oct. 2013 – sept. 2014	-2.1 K	-2.0 K	-2.2 K

Table A2.2 Evolution de la différence moyenne calcul-mesure et distinction entre l'hiver et l'été pour l'installation 1, simulée avec la variante nominale Turb.

Les valeurs de la table A2.2 montrent une légère différence entre l'été et l'hiver. Quant à l'évolution de la différence moyenne calcul-mesure, il est difficile d'établir une tendance, en raison de la période relativement réduite de comparaison (3 ans).

A3. Simulation à long terme de l'installation 1

L'installation 1 est simulée sur une cinquantaine d'années pour calculer l'évolution à long terme de la température du fluide dans le circuit hydraulique des sondes. Elle est calculée pour deux cas de figure différents :

- 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 ;
- 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 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.

A3.1. Evolution à long terme avec les paramètres nominaux

Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques correspondent à la variante « nominale Turb » simulée dans la section A2.3 (Analyse de sensibilité). Les valeurs des paramètres sont énumérés dans les sections A1.3 (Géologie) et A1.4 (Sondes géothermiques).

Le profil d'extraction de chaleur type que les sondes doivent satisfaire est déterminé par la demande d'énergie de chaleur annuelle nominale et les caractéristiques nominales de la PAC.

A défaut d'information plus détaillées, la demande de chauffage annuelle nominale est évaluée comme la valeur moyenne des productions annuelles mesurées.

Les caractéristiques nominales de la PAC sont prises aux conditions **B0W35** aussi bien pour évaluer la puissance maximum d'extraction de chaleur que l'énergie annuelle extraite. Cette hypothèse est optimiste 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 qui devront substituer la pompe à chaleur actuelle. En effet les générations futures de pompe à chaleur auront certainement des caractéristiques thermiques meilleures que les PAC d'aujourd'hui.

Il reste encore à définir la durée de la puissance de pointe pour laquelle la température minimum du fluide dans le circuit des sondes est évaluée. Une valeur par défaut de 12 h est fixée.

Le profil d'extraction de chaleur type est donc caractérisé avec les paramètres suivants :

- demande d'énergie de chaleur annuelle nominale : 395 MWh/a
- puissance de chauffage nominale de la PAC (B0W35) : 160 kW
- coefficient de performance nominal de la PAC (B0W35) : 4.2 -
- durée maximum de la puissance de pointe : 12 h

Il est montré dans la figure A2.5 avec la distribution mensuelle type mesurée de l'installation 1.

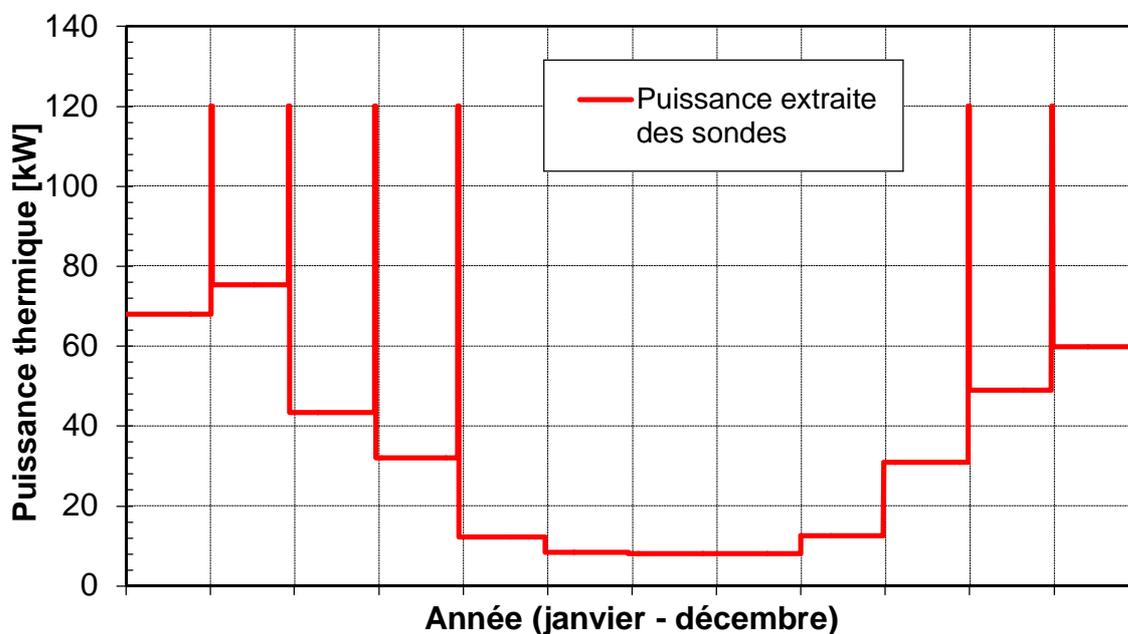


Figure A2.5 Profil d'extraction de chaleur type pour l'installation 1, déterminé avec les caractéristiques nominales des besoins de chaleur.

Le profil d'extraction de chaleur type a les caractéristiques suivantes :

- énergie thermique annuelle extraite des sondes : 301 MWh/a
- puissance thermique maximale extraite : 120 kW
- durée maximum de la puissance d'extraction de pointe : 12 h

L'énergie journalière extraite la plus grande de l'année résulte de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée, et du pulse d'extraction mensuel le plus élevé. Elle a lieu en février et correspond à 2'340 kWh/jour. Cette énergie est extraite avec l'équivalent d'une durée de fonctionnement de 20h de la PAC à puissance nominale. Ceci permet de définir le paramètre suivant pour caractériser la puissance de pointe des besoins thermiques à satisfaire.

- durée journalière de marche maximum à puissance nominale : 20 h/jour

L'évolution de la température du fluide sur 50 ans est montrée dans la figure A2.6. L'influence de la demande d'énergie annuelle sur la température à long terme est illustrée avec la courbe simulée pour 90% des besoins annuels nominaux. La puissance d'extraction maximum est, quant à elle, maintenue à sa valeur nominale.

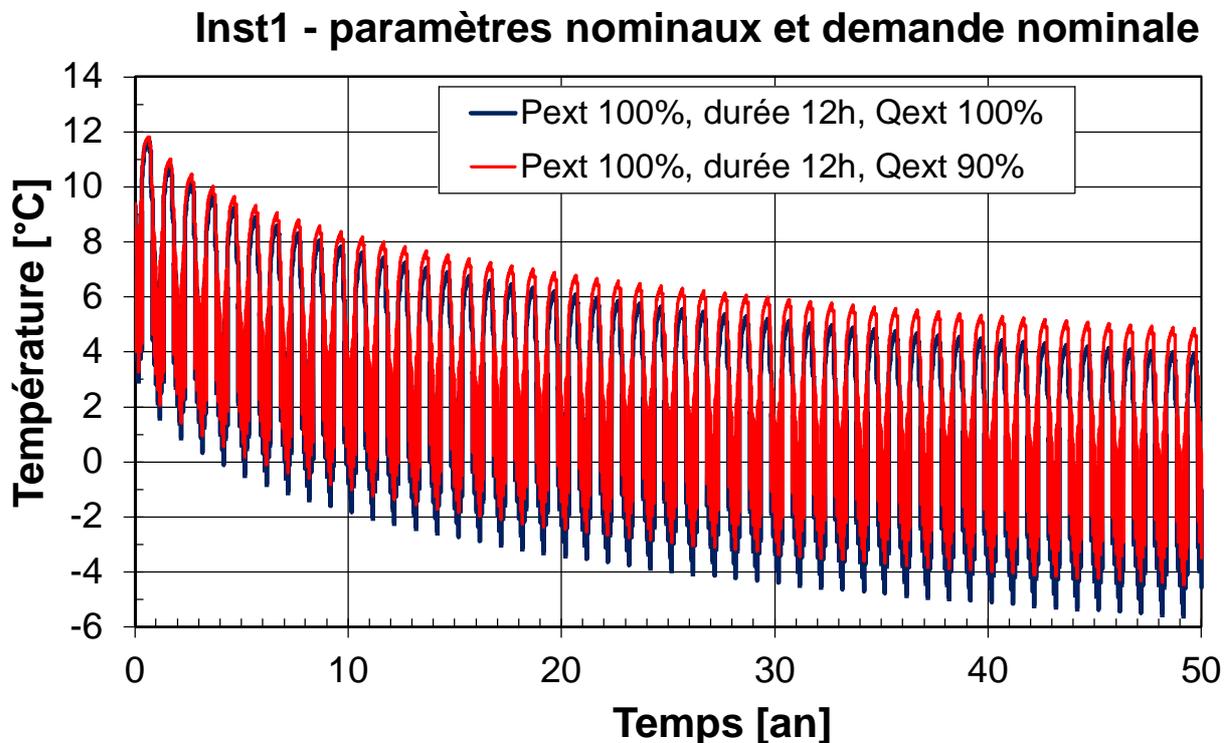


Figure A2.6 Evolution de la température du fluide de l'installation 1, simulée avec les paramètres nominaux de l'installation et les besoins nominaux de chaleur.

Après 50 ans d'exploitation, la **température minimum** du fluide est simulée à :

- 5.6°C** avec les paramètres nominaux et la demande de chaleur nominale ;
- 4.4°C** en réduisant uniquement l'énergie thermique annuelle de 10%.

A3.2. Evolution à long terme avec les paramètres calibrés

Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques doivent permettre de reproduire les mesures. Ils correspondent à la variante « Turb+C+H+T+L » simulée dans la section A2.3 (Analyse de sensibilité).

Le profil d'extraction de chaleur type que les sondes doivent satisfaire est déterminé sur la base des mesures de l'énergie annuelle extraite, de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée maximum. Les mesures indiquent que l'énergie journalière maximum extraite des sondes correspond à environ 16h de marche à la puissance d'extraction de pointe. En élaborant le profil d'extraction de chaleur comme dans le cas nominal, c'est-à-dire avec des pulses d'extraction moyens mensuels et un pulse d'extraction de pointe, de dernier doit avoir une durée de 5 heures.

Le profil d'extraction de chaleur type correspondant aux mesures a les caractéristiques suivantes :

- | | |
|--|-----------|
| - énergie thermique annuelle extraite des sondes : | 281 MWh/a |
| - puissance thermique maximale extraite : | 120 kW |
| - durée maximum de la puissance d'extraction de pointe : | 5 h |

L'évolution de la température du fluide sur 50 ans est montrée dans la figure A2.7.

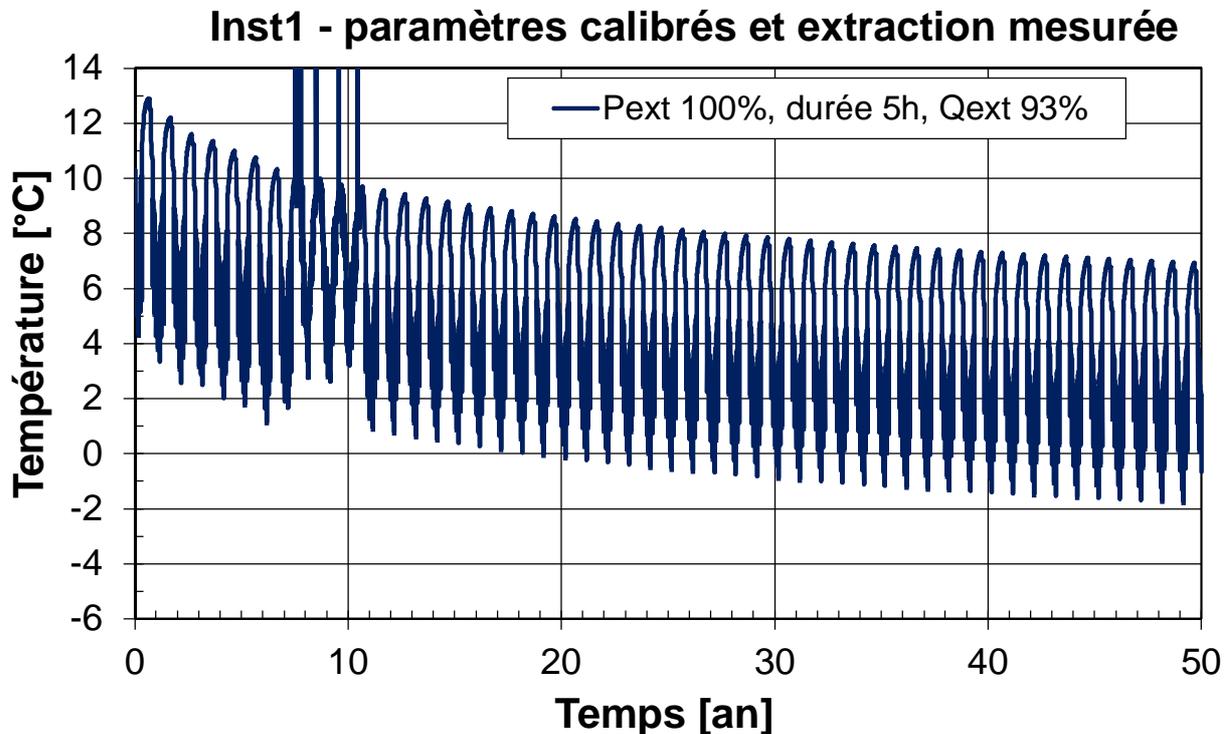


Figure A2.7 Evolution de la température du fluide de l'installation 1, simulée avec les paramètres calibrés de l'installation et l'extraction de chaleur annuelle mesurée.

Après 50 ans d'exploitation, la **température minimum** du fluide est simulée à :

-1.8°C avec les paramètres calibrés et la demande de chaleur mesurée.

Il faut remarquer que les transferts thermiques dans le terrain sont simulés en ne prenant compte que le phénomène de conduction de chaleur. Dans la réalité, des transferts de chaleur convectifs, aussi infimes soient-ils, auront tendance à limiter l'abaissement de température maximum à long terme.

A4. Analyse du profil de chaleur de l'installation 1

Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante calibrée (Turb+C+H+T+L) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

A4.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 1

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante à partir de la neuvième année de fonctionnement. Comme l'installation fonctionne seulement en extraction de chaleur, seules les températures minimums peuvent être comparées. Les valeurs minimums de 3 hivers consécutifs sont comparées.

<p>Année 9: Mois conduisant à température min. : février Puissance thermique extraite de pointe : 109 kW Durée max. de la puissance de pointe : 8 h Pulse moyen mensuel extrait : 67 kW Energie max. journalière extraite : 1944 kWh</p>	
<p>Année 10: Mois conduisant à température min. : février Puissance thermique extraite de pointe : 111 kW Durée max. de la puissance de pointe : 6 h Pulse moyen mensuel extrait : 62 kW Energie max. journalière extraite : 1782 kWh</p>	
<p>Année 11: Mois conduisant à température min. : février Puissance thermique extraite de pointe : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 6 h Pulse moyen mensuel extrait : 53 kW Energie max. journalière extraite : 1602 kWh</p>	

Table A1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 1. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

A4.2. Température de fluide minimum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

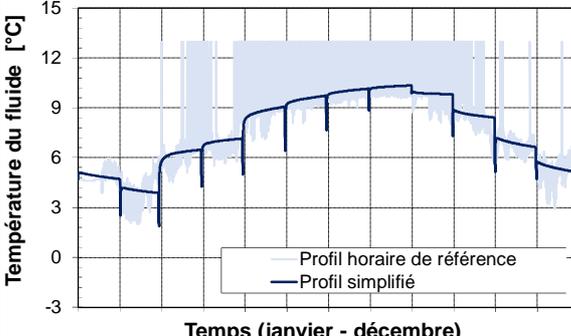
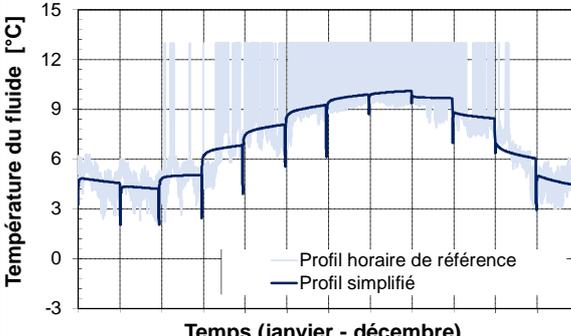
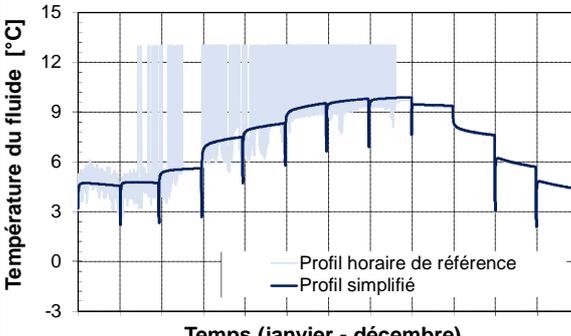
<p>Année 9: Mois conduisant à température min. : février Température min. avec profil simplifié : +1.9 °C Température minimum de référence : +2.0 °C Différence profil simplifié - réel : -0.1 K</p>	
<p>Année 10: Mois conduisant à température min. : février Température min. avec profil simplifié : +2.0 °C Température minimum de référence : +2.2 °C Différence profil simplifié - réel : -0.2 K</p>	
<p>Année 11: Mois conduisant à température min. : février Température min. avec profil simplifié : +2.3 °C Température minimum de référence : +2.4 °C Différence profil simplifié - réel : -0.1 K</p>	

Table A1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 1. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum annuelle. L'évolution de référence de la température, obtenue avec le profil de chaleur en valeurs horaires, est également indiquée.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une légère différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 1, la différence est conservatrice et n'est pas significative. La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié est respectivement 0.1, 0.2 et 0.1 K plus basse que la température minimum de référence pour les 3 années consécutives mesurées.

ANNEXE B: Installation 2

Table des matières

B1. Installation 2	2
B1.1. Mesures disponibles	2
B1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques.....	3
B1.3. Géologie	5
B1.4. Sondes géothermiques	5
B2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 2.....	6
B2.1. Température minimum annuelle du fluide	6
B2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide	8
B2.3. Analyse de sensibilité.....	11
B3. Simulation à long terme de l’installation 2	14
B3.1. Evolution à long terme avec les paramètres nominaux	14
B3.2. Evolution à long terme avec les paramètres calibrés.....	16
B4. Analyse du profil de chaleur de l’installation 2	18
B4.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 2.....	18
B4.2. Température de fluide minimum annuelle	20

B1. Installation 2

L'installation 2 fonctionne depuis environ 9 ans. Toutes les mesures sont disponibles en valeurs horaires dès la 4^e année de fonctionnement. Pour les années précédentes seul le bilan d'énergie annuel est connu.

B1.1. Mesures disponibles

Les mesures utilisées de l'installation 2 sont :

- températures d'entrée et de sortie de l'évaporateur de la PAC ;
- températures d'entrée et de sortie du condenseur de la PAC ;
- énergie électrique consommée par le compresseur de la PAC ;
- énergie thermique fournie au condenseur de la PAC ;
- température de l'air extérieur.

Il s'agit d'établir les évolutions de la puissance thermique extraite des sondes géothermiques et de la température du fluide caloporteur dans le circuit des sondes, défini comme étant la moyenne des températures aller et retour du fluide.

Les valeurs d'énergie sont enregistrées par un système de type M-Bus. Par conséquent les enregistrements ne sont pas toujours synchronisés avec le temps réel des mesures de comptage d'énergie. C'est le cas de l'énergie électrique dont l'évolution temporelle est particulièrement faussée et ne permet pas, avec une résolution temporelle de 1 heure, de suivre correctement le fonctionnement de la PAC. Les valeurs horaires de l'énergie extraite des sondes sont donc déterminées avec le comptage d'énergie mesuré au condenseur de la PAC et le COP. Ce dernier dépend des niveaux de température dans le condenseur et l'évaporateur. La relation de dépendance, établie avec les mesures, est montrée dans la figure B1.1.

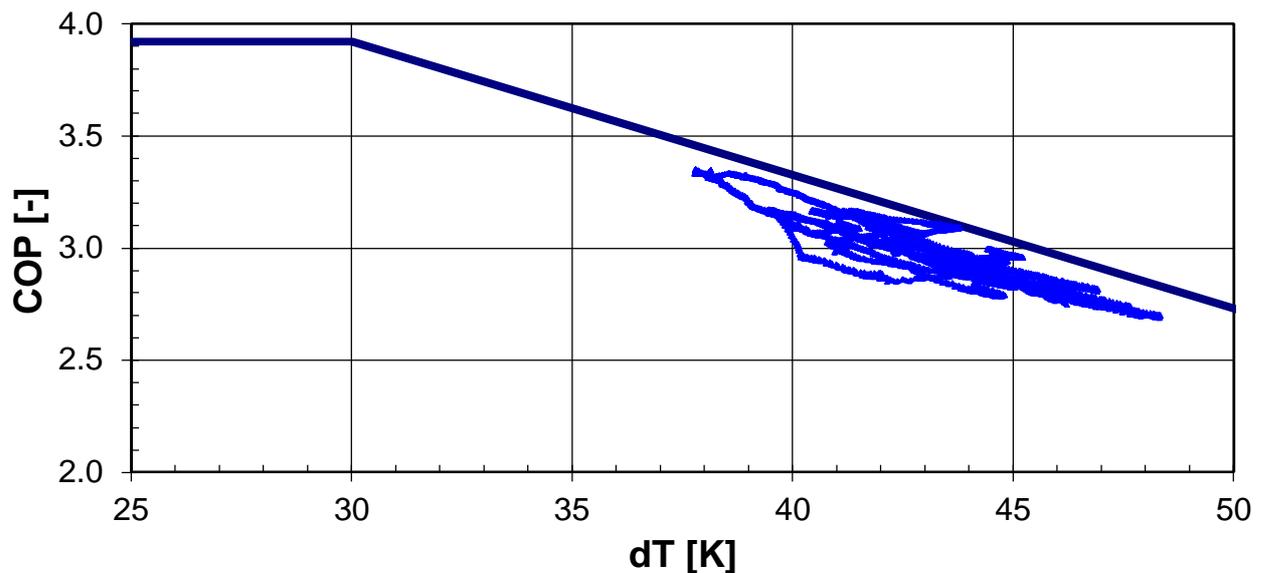
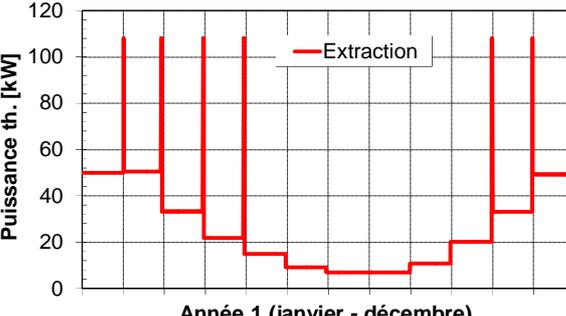
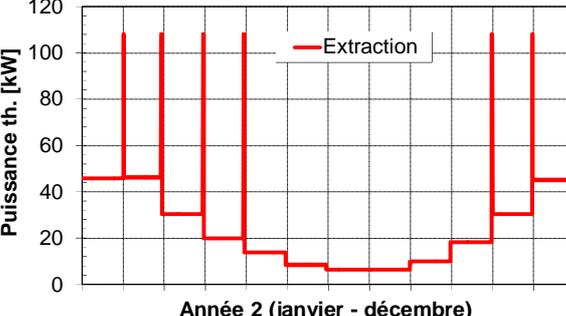
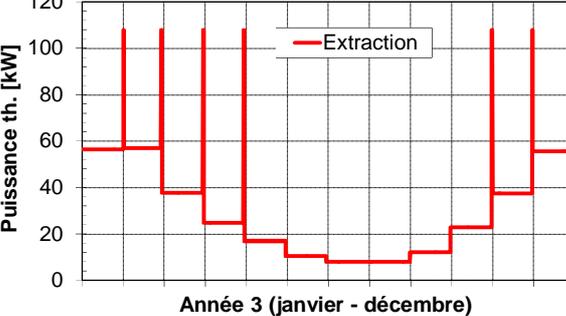


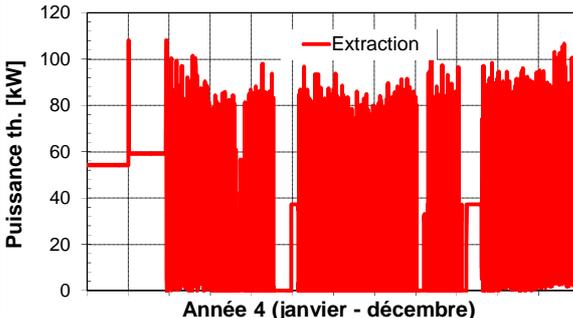
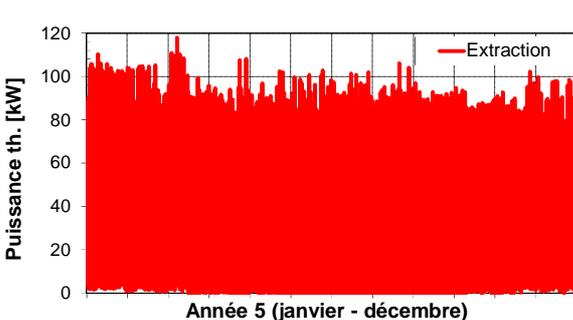
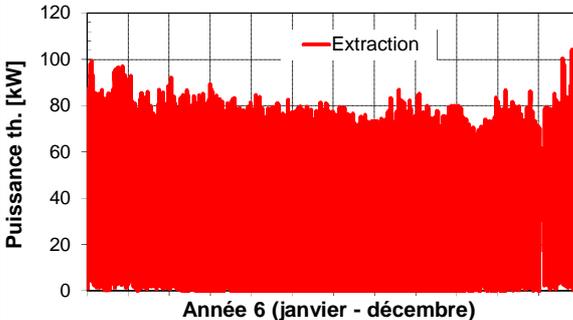
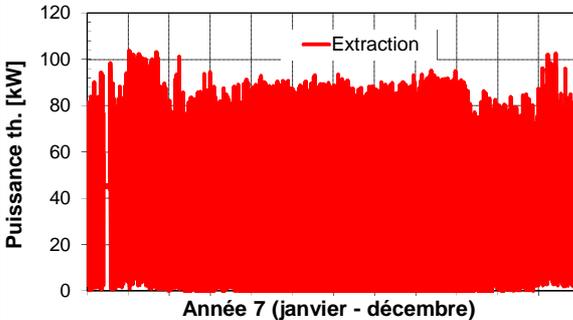
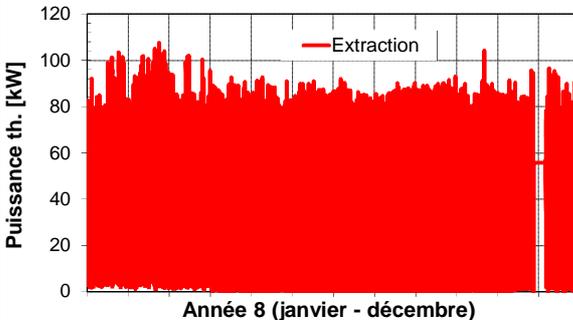
Figure B1.1 Dépendance du COP de la PAC en fonction de la différence de température dT entre l'eau dans le condenseur et le fluide caloporteur dans l'évaporateur. Les mesures sont montrées en moyennes semestrielles. La courbe interpolée permet de recalculer l'énergie électrique absorbée au compresseur à partir de l'énergie thermique mesurée au condenseur.

La différence de température dT est la différence de température entre l'eau de chauffage circulant dans le condenseur et le fluide caloporteur du circuit des sondes géothermiques circulant dans l'évaporateur. Les températures de l'eau, respectivement du fluide caloporteur, sont définies comme étant la moyenne arithmétique des températures d'entrée et de sortie du condenseur, respectivement de l'évaporateur. Pour éviter une dispersion des valeurs trop importante, chaque point représente un COP moyen sur une période de mesure de 6 mois. La courbe interpolée du COP permet de recalculer correctement sur toute la période de mesure l'énergie électrique absorbée au compresseur à partir de l'énergie thermique mesurée au condenseur.

B1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques

Les profils d'extraction de chaleur des 3 premières années de fonctionnement sont extrapolés avec des pulses moyens mensuels et une puissance de pointe à la fin de chaque mois, correspondant à la puissance d'extraction de pointe de l'installation. Les mesures en valeurs horaires sont disponibles du mois de mars de la 4^e année jusqu'au mois de novembre de la 9^e année.

<p>Année 1: Puissance thermique extraite de pointe : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 229 MWh/a Température air extérieur du lieu: 8.6 °C</p>	 <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2: Puissance thermique extraite de pointe : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 211 MWh/a Température air extérieur du lieu: 8.6 °C</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3: Puissance thermique extraite de pointe : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 258 MWh/a Température air extérieur du lieu: 8.6 °C</p>	 <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>

<p>Année 4: Puissance thermique extraite de pointe : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 244 MWh/a</p> <p>Température air extérieur du lieu: 9.9 °C</p>	 <p>Année 4 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 5: Puissance extraite de pointe mesurée : 118 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 266 MWh/a</p> <p>Température mesurée air extérieur: 8.4 °C</p>	 <p>Année 5 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 6: Puissance extraite de pointe mesurée : 104 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 207 MWh/a</p> <p>Température mesurée air extérieur: 10.1 °C</p>	 <p>Année 6 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 7: Puissance extraite de pointe mesurée : 104 kW Durée max. de la puissance de pointe : 3 h Energie extraite annuelle : 228 MWh/a</p> <p>Température mesurée air extérieur: 9.4 °C</p>	 <p>Année 7 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 8: Puissance extraite de pointe mesurée : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 242 MWh/a</p> <p>Température mesurée air extérieur: 8.9 °C</p>	 <p>Année 8 (janvier - décembre)</p>

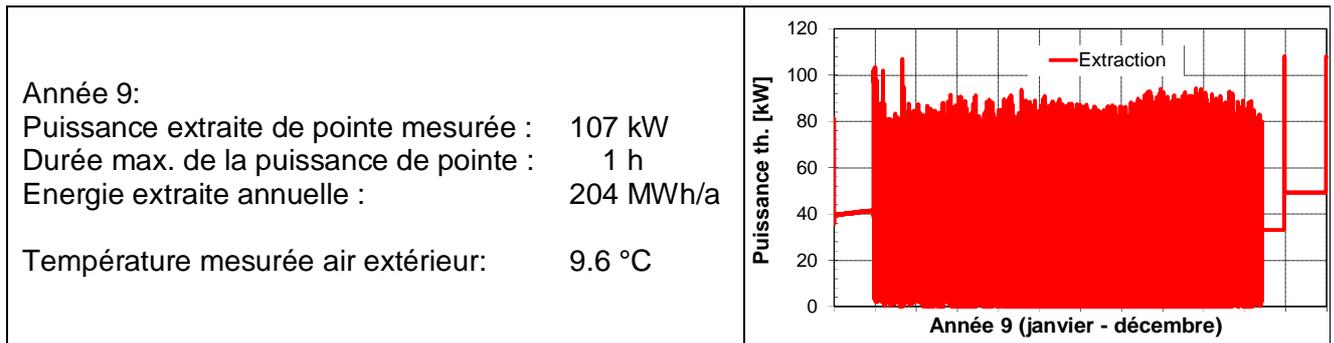


Table B1.1 Profils horaires extrapolés et mesurés de la puissance thermique extraite des sondes géothermiques pour les 9 premières années de fonctionnement de l'installation 2.

B1.3. Géologie

La conductivité thermique moyenne du terrain est déterminée sur la base d'un profil géologique attendu des types de roche et des épaisseurs correspondantes. Les valeurs de calcul recommandées de la norme SIA 384/6 sont choisies. Elles contiennent donc la marge de sécurité correspondante pour la détermination de la conductivité thermique du terrain.

La température initiale du terrain vers la surface, estimée par les procédures proposées dans la norme SIA 384/6, est diminuée par la marge de sécurité de 1 K pour un dimensionnement en chauffage.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain : 2.3 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain : 2.1 MJ/(m³K)
- température initiale du terrain vers la surface : 8.0 °C
- gradient de température géothermique : 30 K/km

B1.4. Sondes géothermiques

Le système utilise 11 sondes géothermiques de 250 m chacune, placées sur 3 lignes de respectivement 4, 4 et 3 sondes. L'espacement entre les lignes et les sondes est de 8 m. Le placement des sondes correspond à une configuration rectangulaire de 3 x 4 sondes à laquelle il manque une sonde dans un angle. Le débit total nominal dans le circuit des sondes est d'environ 22 m³/h. Le débit par sonde est de l'ordre de 2 m³/h. La concentration d'antigel, fixée à 30%, est trop élevée pour permettre un régime d'écoulement turbulent dans les tubes des sondes (double-U avec un tube HDPE de diamètre externe de 40mm).

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement laminaire dans les sondes et un débit nominal de 22 m³/h dans le circuit des sondes.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux sondes géothermiques sont :

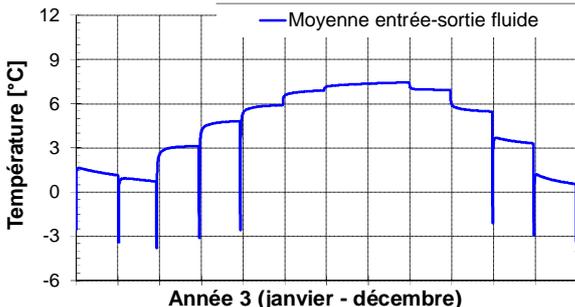
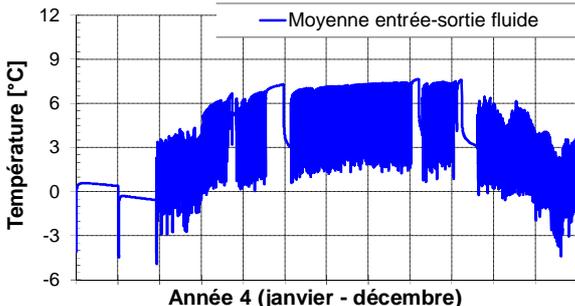
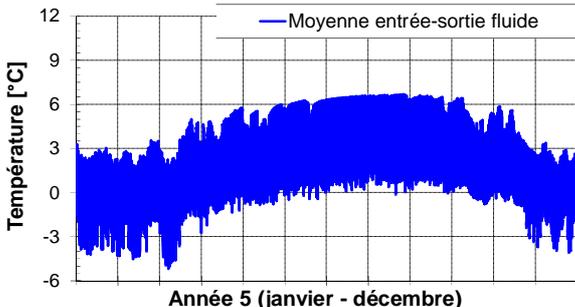
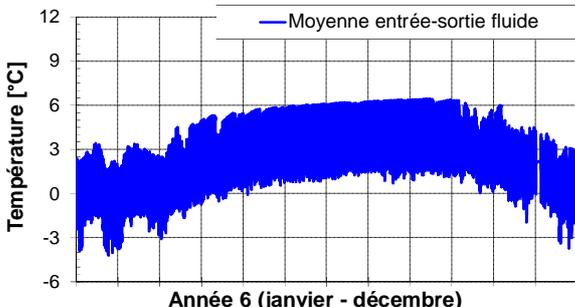
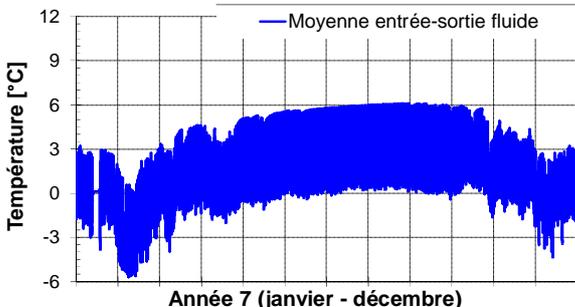
- nombre de sondes géothermiques :	11 (configuration compacte, 3x4 moins 1)
- profondeur des sondes géothermiques :	250 m
- espacement entre les sondes :	8 m
- diamètre d'une sonde (forage):	0.13 m
- type de sonde :	double-U
- résistance thermique de la sonde Rb :	0.12 K/(W/m) (régime laminaire)
- résistance thermique interne de la sonde Ra :	0.43 K/(W/m) (régime laminaire)

B2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 2

B2.1. Température minimum annuelle du fluide

La température minimum annuelle du fluide est calculée et comparée avec les mesures quand elle est disponible, c'est-à-dire à partir de la 5^e année de fonctionnement. Les résultats sont montrés dans la table B2.1. Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table B2.1.

<p>Année 1: Puissance thermique extraite de pointe : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 229 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -1.7 °C</p>	<p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Température [°C]</p> <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2: Puissance thermique extraite de pointe : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 211 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -2.5 °C</p>	<p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Température [°C]</p> <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

<p>Année 3: Puissance thermique extraite de pointe : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 258 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -4.1 °C</p>	 <p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Température [°C]</p> <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 4: Puissance thermique extraite de pointe : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 244 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -4.9 °C</p>	 <p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Température [°C]</p> <p>Année 4 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 5: Puissance extraite de pointe mesurée : 118 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 266 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: -2.5 °C Température de fluide minimum simulée : -5.2 °C</p>	 <p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Température [°C]</p> <p>Année 5 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 6: Puissance extraite de pointe mesurée : 104 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 207 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: -2.1 °C Température de fluide minimum simulée : -4.2 °C</p>	 <p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Température [°C]</p> <p>Année 6 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 7: Puissance extraite de pointe mesurée : 104 kW Durée max. de la puissance de pointe : 3 h Energie extraite annuelle : 228 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: -2.9 °C Température de fluide minimum simulée : -5.7 °C</p>	 <p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Température [°C]</p> <p>Année 7 (janvier - décembre)</p>

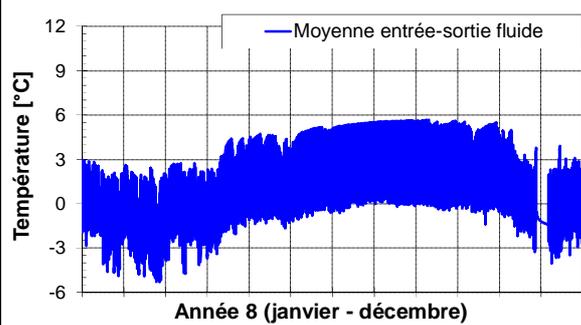
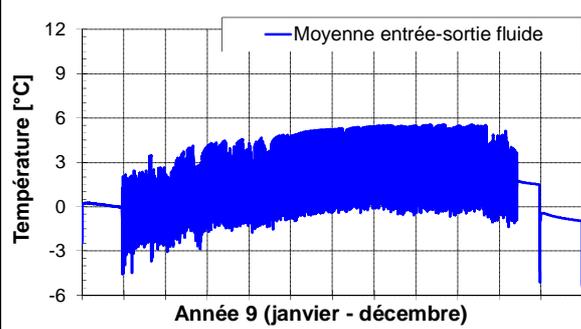
<p>Année 8: Puissance extraite de pointe mesurée : 108 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 242 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: -2.5 °C Température de fluide minimum simulée : -5.3 °C</p>	
<p>Année 9: Puissance extraite de pointe mesurée : 107 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 204 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: -2.0 °C Température de fluide minimum simulée : -4.6 °C</p>	

Table B2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques pour les 9 premières années de fonctionnement de l'installation 2. Les valeurs minimums annuelles simulées sont également indiquées, avec la valeur mesurée correspondante quand elle est disponible.

B2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique A2.1 et en moyennes journalières dans le graphique A2.2. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières.

L'écart moyen entre les valeurs simulées et mesurées est de -0.9 K pour les valeurs horaires et de -1.3 K pour les moyennes journalières. Un écart négatif signifie que les valeurs simulées sont inférieures aux valeurs mesurées.

La dispersion des points est particulièrement importante pour cette installation. Elle ne peut pas être uniquement attribuée au modèle de simulation. La qualité des mesures, en particulier l'évolution temporelle des mesures, entre également en ligne de compte. On peut toutefois observer que l'écart est de l'ordre de -2 K pour les températures les plus basses dans les deux cas.

L'évolution des températures mesurées et simulées est montrée en valeurs journalières dans le graphique A2.3 et en valeurs horaires dans le graphique A2.4.

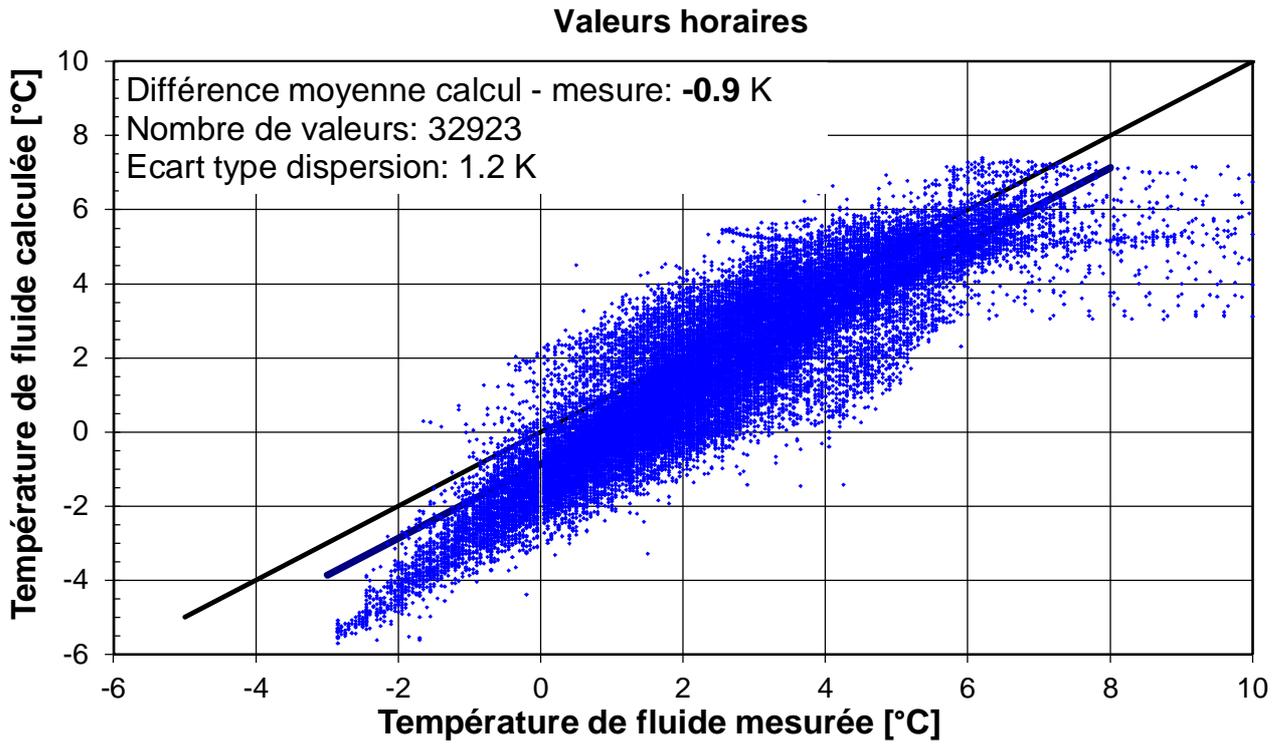


Figure B2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 2.

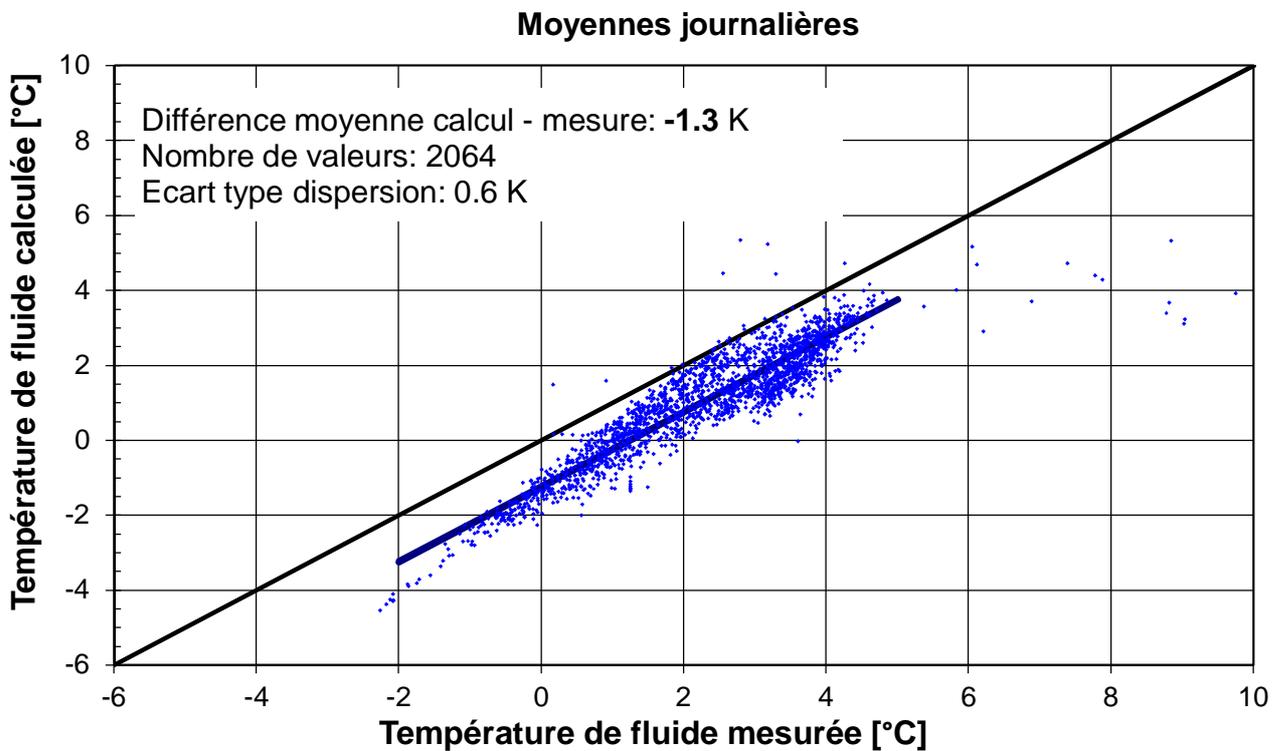


Figure B2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 2.

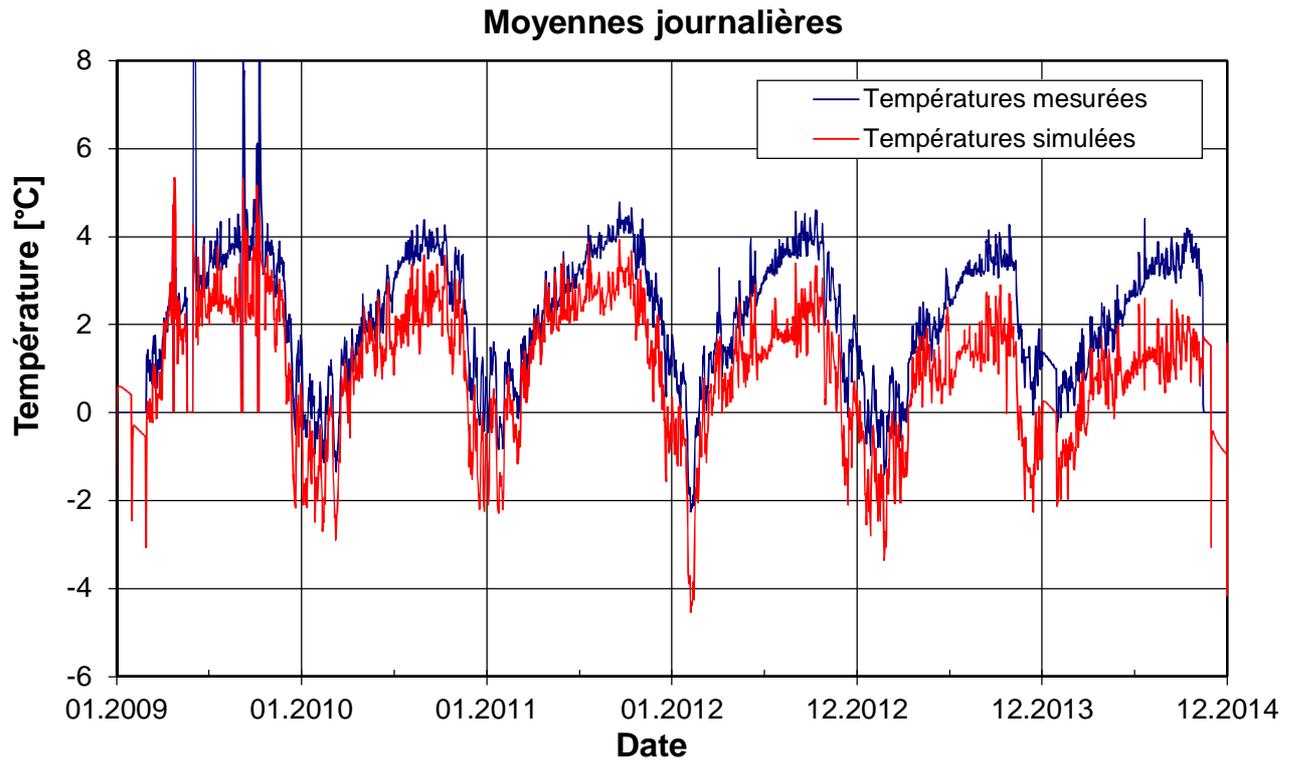


Figure B2.3 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 2.

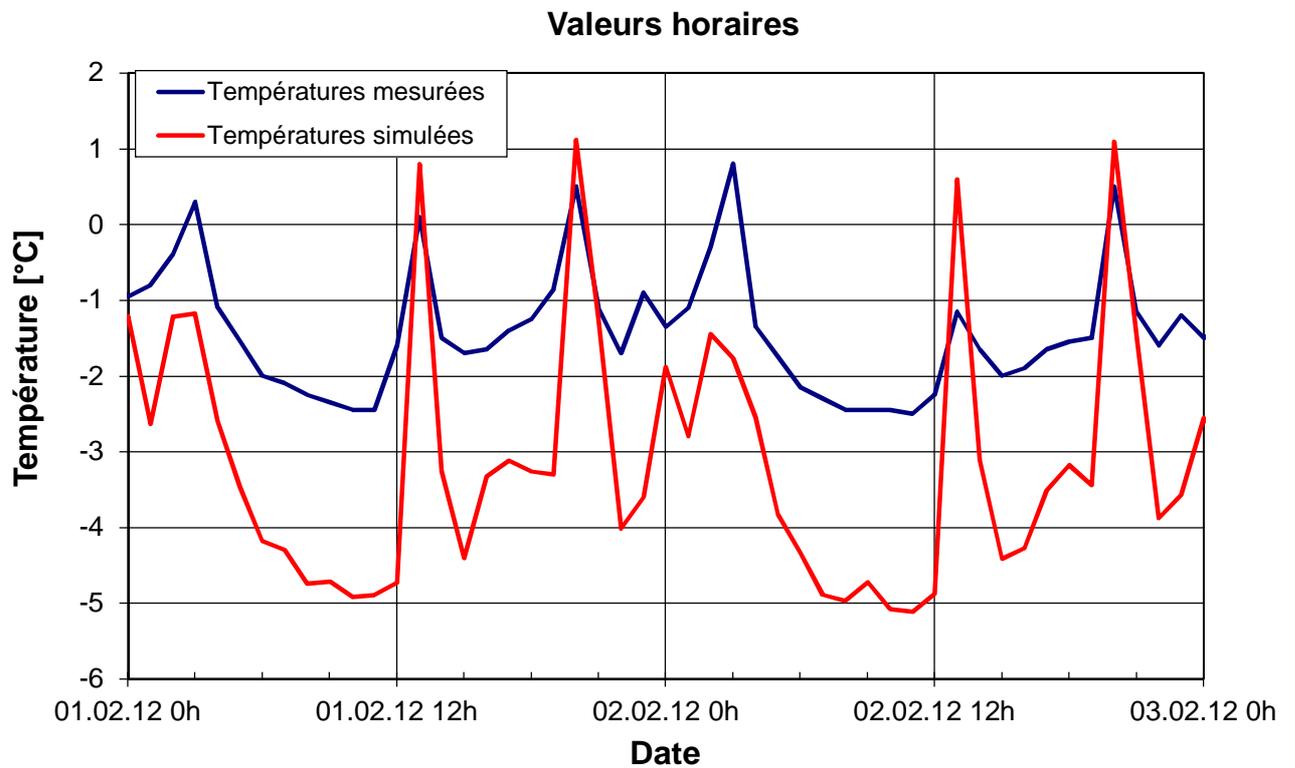


Figure B2.4 Evolution en valeurs horaires des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 2.

B2.3. Analyse de sensibilité

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des sondes (variante Lam), les variations suivantes sont évaluées afin de quantifier leurs effets cumulés :

- régime d'écoulement turbulent dans les sondes (variante Turb). Les résistances thermiques des sondes sont de respectivement 0.07 K/(W/m) pour Rb (résistance thermique d'une sonde) et 0.27 pour Ra (résistance thermique interne d'une sonde) ;
- la capacité thermique du fluide et de la sonde est prise en compte avec la variante nominale, qui elle est basée sur un régime d'écoulement laminaire dans les tubes en U des sondes. Cette variante est appelée Lam+C ;
- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte en plus de la capacité thermique des sondes (variante Lam+C+H) ;
- la marge de sécurité sur la température initiale du terrain est levée. Cela signifie qu'elle est 1K plus élevée. Cette variation, cumulée aux variations précédentes, correspond à la variante Lam+C+H+T ;
- la marge de sécurité sur la conductivité thermique du terrain est levée. Cela signifie qu'elle est 0.2 W/(mK) plus élevée. Cette variation, cumulée aux variations précédentes, correspond à la variante Lam+C+H+T+L.

Les résultats sont montrés dans la table B2.2.

<p>Variante Turb: Régime d'écoulement turbulent dans les sondes</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -0.4 K Ecart type dispersion : 0.6 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p>
<p>Variante nominale Lam: Régime d'écoulement laminaire dans les sondes</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -1.3 K Ecart type dispersion : 0.6 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p>

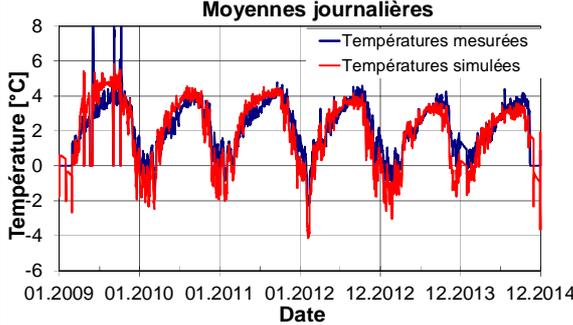
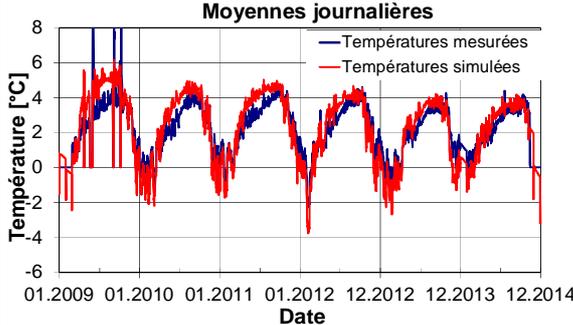
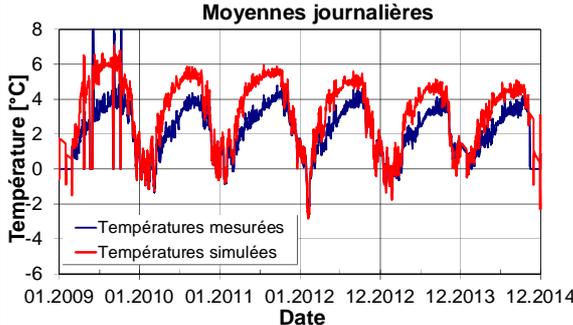
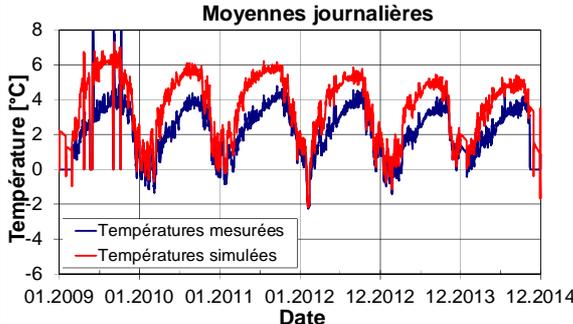
<p>Variante Lam+C: Capacité thermique des sondes ajoutée</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -0.3 K Ecart type dispersion : 0.8 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 
<p>Variante Lam+C+H: Transferts thermiques des raccords horizontaux entre les sondes ajoutés</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: +0.1 K Ecart type dispersion : 0.8 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 
<p>Variante Lam+C+H+T: Effet de la température initiale du terrain sans marge de sécurité ajouté</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: +1.0 K Ecart type dispersion : 0.8 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 
<p>Variante Lam+C+H+T+L: Effet de la conductivité thermique du terrain sans marge de sécurité ajouté</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: +1.4 K Ecart type dispersion : 0.8 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 

Table B2.1 Influence des effets cumulés des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 2.

La variante Lam+C+H+T+L montre que la détermination des paramètres de simulation était trop optimiste relativement à la réalité. Grâce aux marges de sécurité les températures simulées ne sont pas plus élevées que les températures mesurées (variante nominale Lam). On peut toutefois relever que les températures les plus basses simulées, en février 2012, sont toujours inférieures aux mesures. Elles sont au mieux égales aux valeurs mesurées avec la variante Lam+C+H+T+L.

La différence moyenne calcul-mesure est recalculée, pour la variante nominale Lam, en valeurs semestrielles pour distinguer entre la saison d'hiver (du 01 octobre au 01 avril) et la saison d'été (du 01 avril au 01 octobre). Les valeurs obtenues sont montrées dans la table B2.2.

Variante nominale Lam – installation 2			
Différence moyenne calcul-mesure	Moyenne annuelle	Moyenne hivernale	Moyenne estivale
Oct. 2009 – sept. 2010	-1.1 K	-1.2 K	-1.0 K
Oct. 2010 – sept. 2011	-0.9 K	-1.1 K	-0.7 K
Oct. 2011 – sept. 2012	-1.4 K	-1.3 K	-1.4 K
Oct. 2012 – sept. 2013	-1.4 K	-1.5 K	-1.4 K
Oct. 2013 – sept. 2014	-1.6 K	-1.6 K	-1.6 K

Table B2.2 Evolution de la différence moyenne calcul-mesure et distinction entre l'hiver et l'été pour l'installation 2, simulée avec la variante nominale Lam.

Les valeurs de la table B2.2 montrent une légère tendance à un accroissement de la différence moyenne entre les simulations et les mesures au cours des années. L'abaissement de température à long terme, amplifié avec une configuration compacte des sondes comme dans ce cas, devient plus important avec les courbes simulées qu'avec la courbe mesurée. Ceci est probablement une indication que le transport de chaleur dans le terrain n'est pas uniquement gouverné par la conduction de chaleur. Des mécanismes de transport par convection, aussi infimes soient-ils, semblent limiter l'abaissement de température à long terme dans le voisinage des sondes, même si à court terme, à l'échelle d'une saison, ils ne sont pas perceptibles.

B3. Simulation à long terme de l'installation 2

L'installation 2 est simulée sur une cinquantaine d'années pour calculer l'évolution à long terme de la température du fluide dans le circuit hydraulique des sondes. Elle est calculée pour deux cas de figure différents :

- 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 ;

- 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 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.

B3.1. Evolution à long terme avec les paramètres nominaux

Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques correspondent à la variante « nominale Lam » simulée dans la section B2.3 (Analyse de sensibilité). Les valeurs des paramètres sont énumérés dans les sections B1.3 (Géologie) et B1.4 (Sondes géothermiques).

Le profil d'extraction de chaleur type que les sondes doivent satisfaire est déterminé par la demande d'énergie de chaleur annuelle nominale et les caractéristiques nominales de la PAC.

A défaut d'information plus détaillées, la demande de chauffage annuelle nominale est évaluée comme la valeur moyenne des productions annuelles mesurées. Les caractéristiques nominales de la PAC sont prises aux conditions **B0W35** aussi bien pour évaluer la puissance maximum d'extraction de chaleur que l'énergie annuelle extraite. La durée de la puissance de pointe, pour laquelle la température minimum du fluide dans le circuit des sondes est évaluée, est fixée par défaut à 12 h.

Le profil d'extraction de chaleur type est donc caractérisé avec les paramètres suivants :

- demande d'énergie de chaleur annuelle nominale :	349 MWh/a
- puissance de chauffage nominale de la PAC (B0W35) :	144 kW
- coefficient de performance nominal de la PAC (B0W35) :	4.3 -
- durée maximum de la puissance de pointe :	12 h

Il est montré dans la figure B2.5 avec la distribution mensuelle type mesurée de l'installation 2.

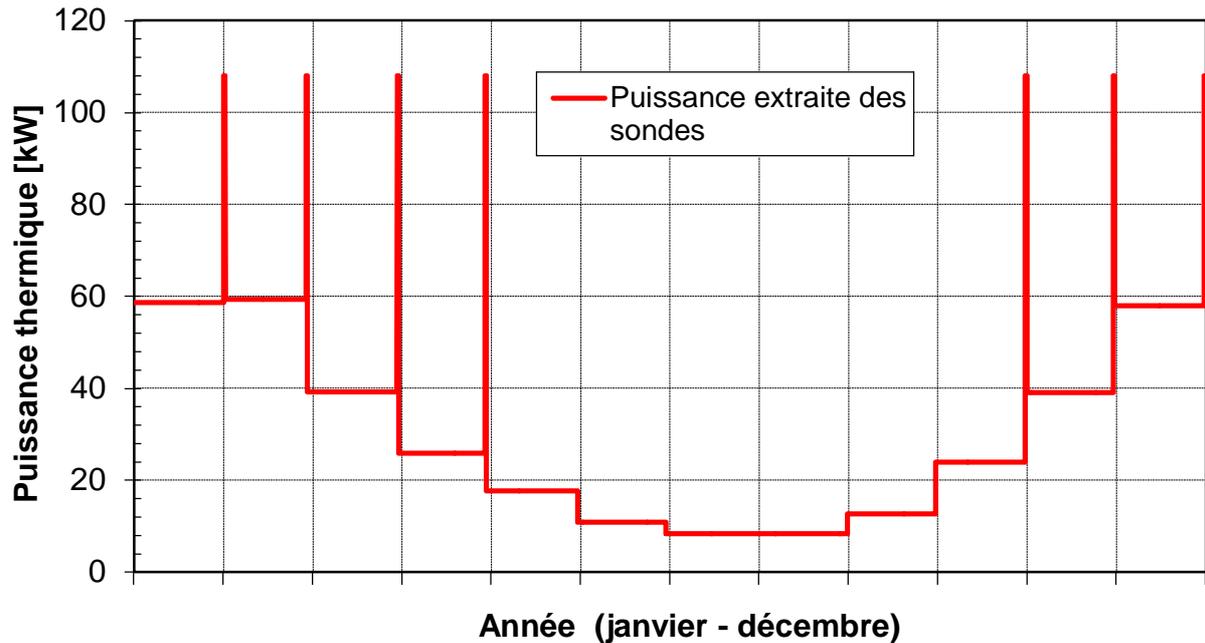


Figure B2.5 Profil d'extraction de chaleur type pour l'installation 2, déterminé avec les caractéristiques nominales des besoins de chaleur.

Le profil d'extraction de chaleur type a les caractéristiques suivantes :

- énergie thermique annuelle extraite des sondes : 268 MWh/a
- puissance thermique maximale extraite : 108 kW
- durée maximum de la puissance d'extraction de pointe : 12 h

L'énergie journalière extraite la plus grande de l'année résulte de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée, et du pulse d'extraction mensuel le plus élevé. Elle a lieu en février et correspond à 2'340 kWh/jour. Cette énergie est extraite avec l'équivalent d'une durée de fonctionnement de 19h de la PAC à puissance nominale. Ceci permet de définir le paramètre suivant pour caractériser la puissance de pointe des besoins thermiques à satisfaire.

- durée journalière de marche maximum à puissance nominale : 19 h/jour

L'évolution de la température du fluide sur 50 ans est montrée dans la figure B2.6. L'influence de la demande d'énergie annuelle sur la température à long terme est illustrée avec la courbe simulée pour 90% des besoins annuels nominaux. La puissance d'extraction maximum est, quant à elle, maintenue à sa valeur nominale.

Inst2 - paramètres nominaux et demande nominale

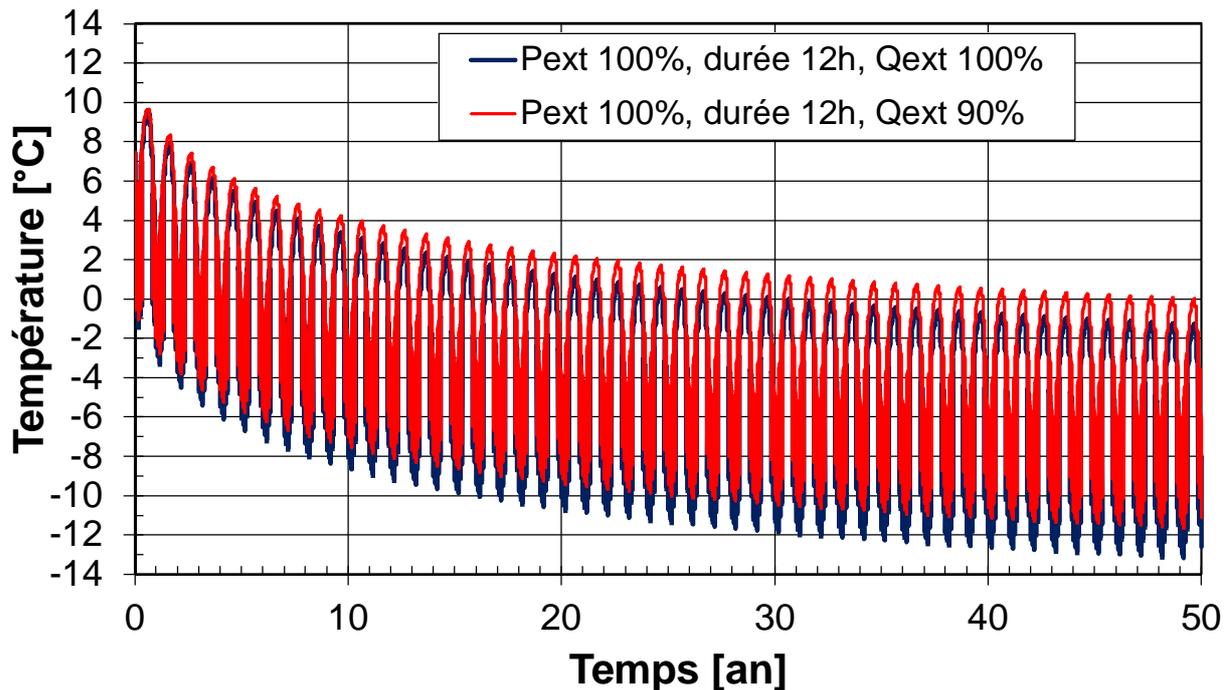


Figure B2.6 Evolution de la température du fluide de l'installation 2, simulée avec les paramètres nominaux de l'installation et les besoins nominaux de chaleur.

Après 50 ans d'exploitation, la **température minimum** du fluide est simulée à :

- 13.2°C avec les paramètres nominaux et la demande de chaleur nominale ;
- 11.6°C en réduisant uniquement l'énergie thermique annuelle de 10%.

B3.2. Evolution à long terme avec les paramètres calibrés

Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques doivent permettre de reproduire les mesures. Ils correspondent à la variante « Lam+C+H » simulée dans la section B2.3 (Analyse de sensibilité).

Le profil d'extraction de chaleur type que les sondes doivent satisfaire est déterminé sur la base des mesures de l'énergie annuelle extraite, de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée maximum. Les mesures indiquent que l'énergie journalière maximum extraite des sondes correspond à environ 15h de marche à la puissance d'extraction de pointe. En élaborant le profil d'extraction de chaleur comme dans le cas nominal, c'est-à-dire avec des pulses d'extraction moyens mensuels et un pulse d'extraction de pointe, ce dernier doit avoir une durée de 6 heures.

Le profil d'extraction de chaleur type correspondant aux mesures a les caractéristiques suivantes :

- énergie thermique annuelle extraite des sondes : 236 MWh/a
- puissance thermique maximale extraite : 108 kW
- durée maximum de la puissance d'extraction de pointe : 6 h

L'évolution de la température du fluide sur 50 ans est montrée dans la figure B2.7.

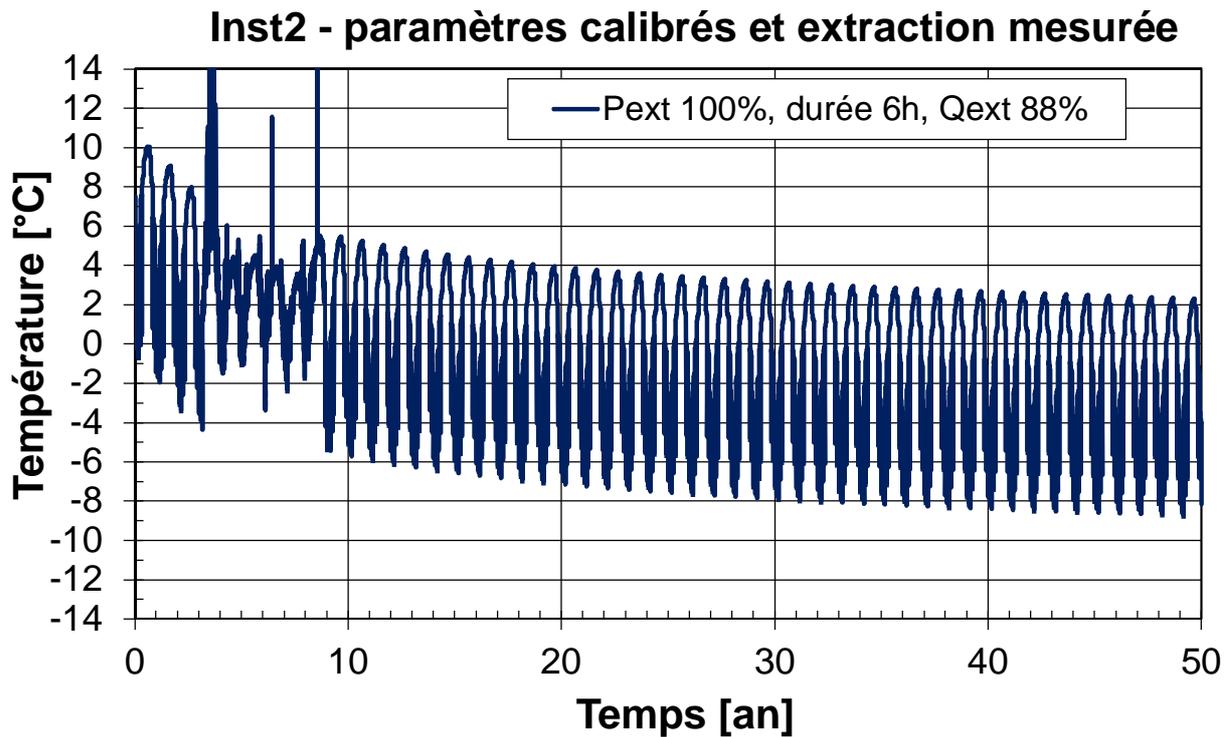


Figure B2.7 Evolution de la température du fluide de l'installation 2, simulée avec les paramètres calibrés de l'installation et l'extraction de chaleur annuelle mesurée.

Après 50 ans d'exploitation, la **température minimum** du fluide est simulée à :

-8.5°C avec les paramètres calibrés et la demande de chaleur mesurée.

Si l'effet des transports de chaleur par convection dans le terrain n'est pas significatif à long terme, l'exploitation de l'installation 2 ne pourra pas se poursuivre comme par le passé.

B4. Analyse du profil de chaleur de l'installation 2

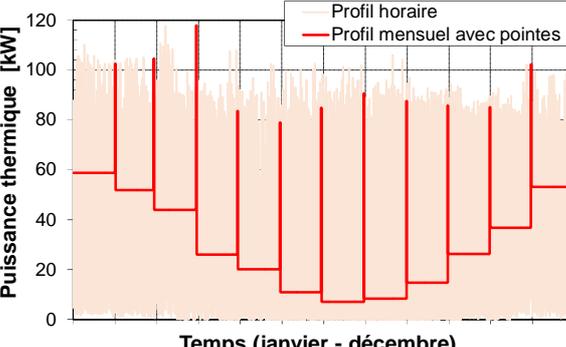
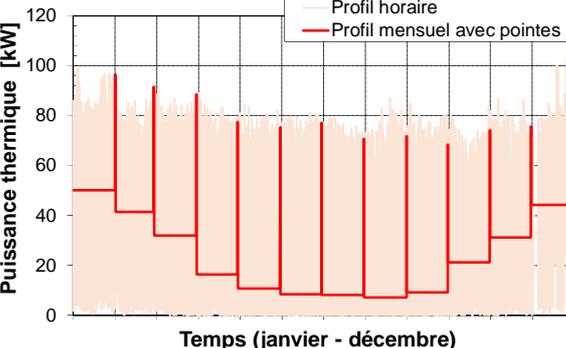
Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante calibrée (Lam+C+H) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

B4.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 2

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante à partir de la cinquième année de fonctionnement. Comme l'installation fonctionne seulement en extraction de chaleur, seules les températures minimums peuvent être comparées. Les valeurs minimums de 5 hivers consécutifs sont comparées.

<p>Année 5: Mois conduisant à température min. : mars Puissance thermique extraite de pointe : 118 kW Durée max. de la puissance de pointe : 9 h Pulse moyen mensuel extrait : 44 kW Energie max. journalière extraite : 1722 kWh</p>	
<p>Année 6: Mois conduisant à température min. : janvier Puissance thermique extraite de pointe : 96 kW Durée max. de la puissance de pointe : 8 h Pulse moyen mensuel extrait : 50 kW Energie max. journalière extraite : 1568 kWh</p>	

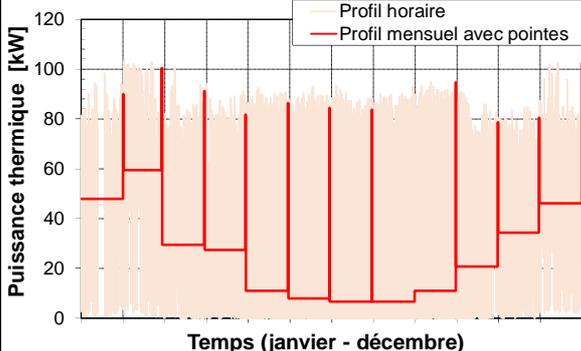
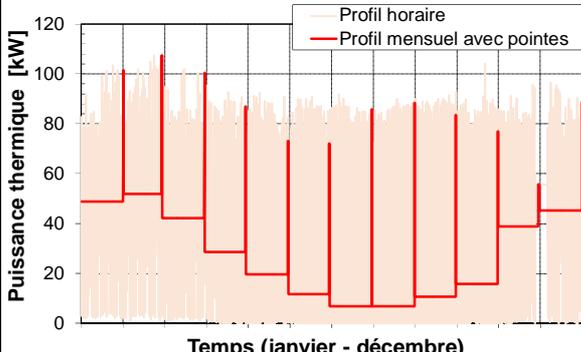
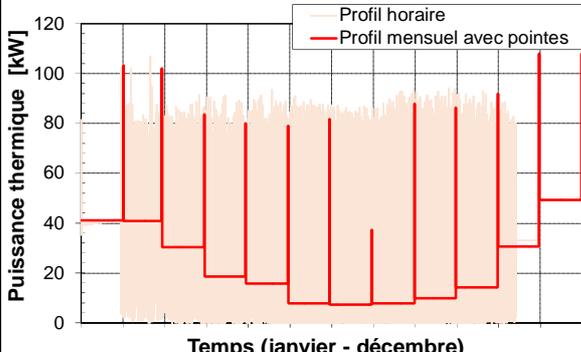
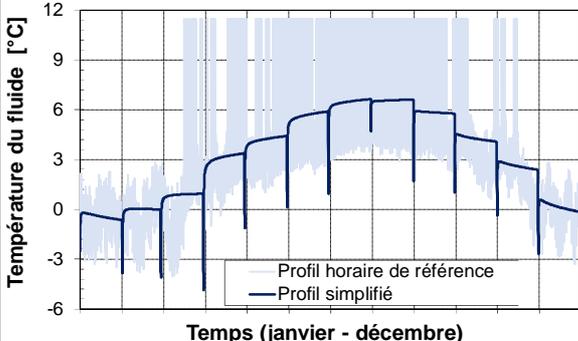
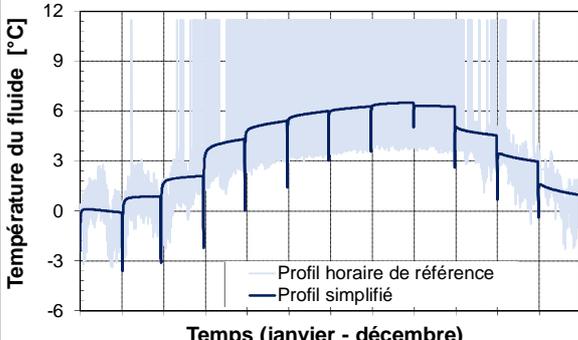
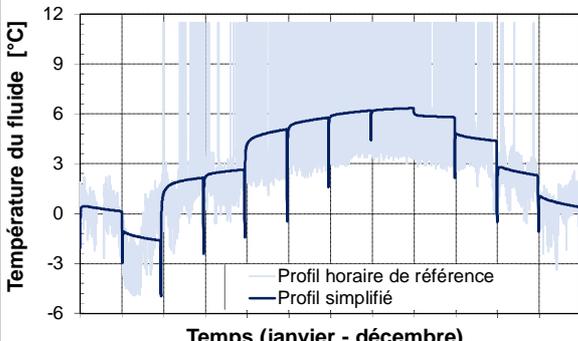
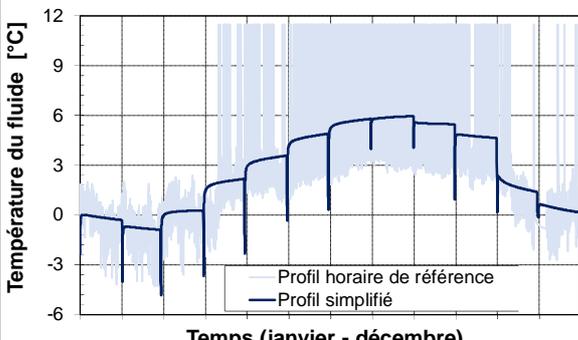
<p>Année 7:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 101 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 12 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 60 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 1932 kWh</p>	
<p>Année 8:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 108 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 6 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 52 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 1584 kWh</p>	
<p>Année 9:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 102 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 4 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 41 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 1228 kWh</p>	

Table B1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 2. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

B4.2. Température de fluide minimum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

<p>Année 5: Mois conduisant à température min. : mars Température min. avec profil simplifié : -4.8 °C Température minimum de référence : -4.0 °C Différence profil simplifié - réel : -0.8 K</p>	 <p>Temps (janvier - décembre)</p>
<p>Année 6: Mois conduisant à température min. : janvier Température min. avec profil simplifié : -3.6 °C Température minimum de référence : -3.4 °C Différence profil simplifié - réel : -0.2 K</p>	 <p>Temps (janvier - décembre)</p>
<p>Année 7: Mois conduisant à température min. : février Température min. avec profil simplifié : -5.0 °C Température minimum de référence : -4.9 °C Différence profil simplifié - réel : -0.1 K</p>	 <p>Temps (janvier - décembre)</p>
<p>Année 8: Mois conduisant à température min. : février Température min. avec profil simplifié : -4.8 °C Température minimum de référence : -4.3 °C Différence profil simplifié - réel : -0.5 K</p>	 <p>Temps (janvier - décembre)</p>

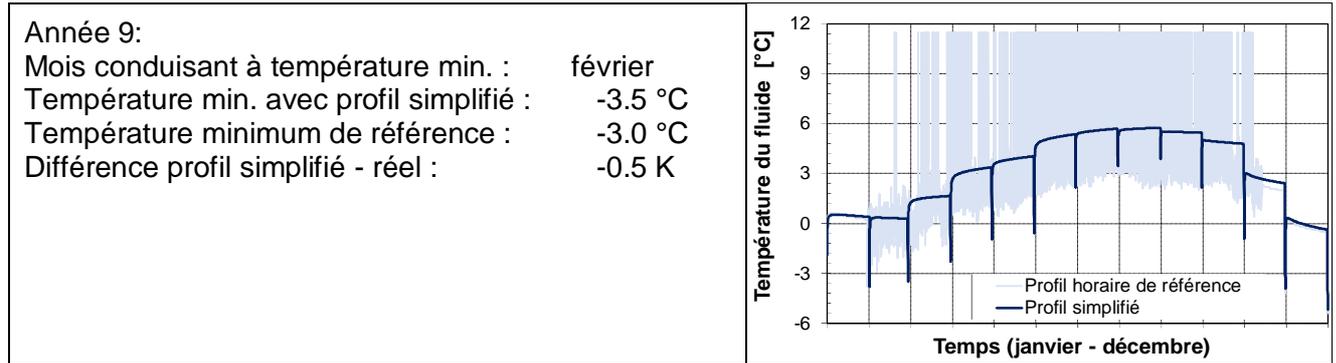


Table B1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 2. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum annuelle.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une petite différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 2, la différence est conservatrice et reste inférieure à 1K. La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié est respectivement 0.8, 0.2, 0.1, 0.5 et 0.5 K plus basse que la température minimum de référence pour les 5 années consécutives mesurées.

ANNEXE C: Installation 3

Table des matières

C1. Installation 3	2
C1.1. Mesures disponibles	2
C1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques.....	3
C1.3. Géologie	5
C1.4. Sondes géothermiques	6
C2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 3.....	6
C2.1. Température minimum annuelle du fluide	6
C2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide	9
C2.3. Analyse de sensibilité.....	11
C3. Simulation à long terme de l’installation 3	14
C3.1. Evolution à long terme avec les paramètres nominaux	14
C3.2. Evolution à long terme avec les paramètres calibrés.....	16
C4. Analyse du profil de chaleur de l’installation 3	18
C4.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 3.....	18
C4.2. Température de fluide minimum annuelle	19

C1. Installation 3

L'installation 3 fonctionne depuis environ 10 ans. Toutes les mesures sont disponibles en valeurs horaires dès la 7^e année de fonctionnement. Pour les années précédentes seul le bilan d'énergie annuel est connu.

C1.1. Mesures disponibles

Les mesures utilisées de l'installation 3 sont :

- températures d'entrée et de sortie de l'évaporateur de la PAC ;
- températures d'entrée et de sortie du condenseur de la PAC ;
- énergie électrique consommée par le compresseur de la PAC ;
- énergie thermique fournie au condenseur de la PAC ;
- température de l'air extérieur.

Il s'agit d'établir les évolutions de la puissance thermique extraite des sondes géothermiques et de la température du fluide caloporteur dans le circuit des sondes, défini comme étant la moyenne des températures aller et retour du fluide.

Les valeurs d'énergie sont enregistrées par un système de type M-Bus. Par conséquent les enregistrements ne sont pas toujours synchronisés avec le temps réel des mesures de comptage d'énergie. C'est également le cas des mesures de l'installation 3. Les mesures de l'énergie électrique sont particulièrement faussées et ne permettent pas, avec une résolution temporelle de 1 heure, de suivre correctement le fonctionnement de la PAC. Les valeurs horaires de l'énergie extraite des sondes sont donc déterminées avec le comptage d'énergie mesuré au condenseur de la PAC et le COP. Ce dernier dépend des niveaux de température dans le condenseur et l'évaporateur. La relation de dépendance, établie avec les mesures, est montrée dans la figure C1.1.

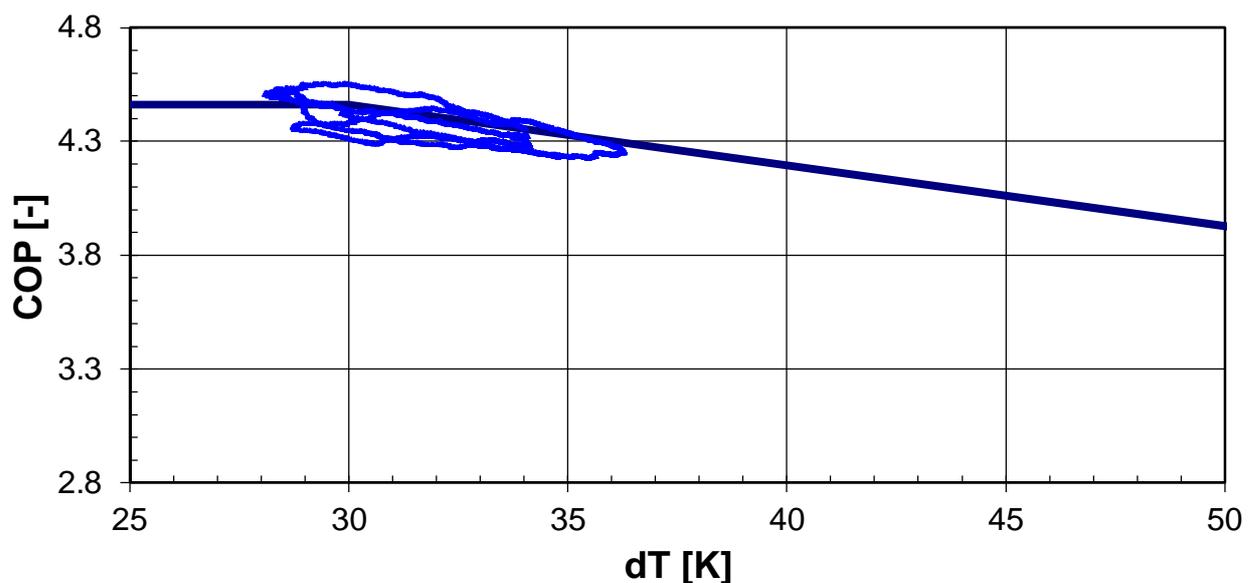
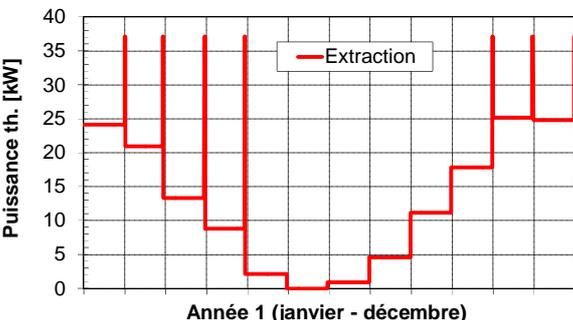
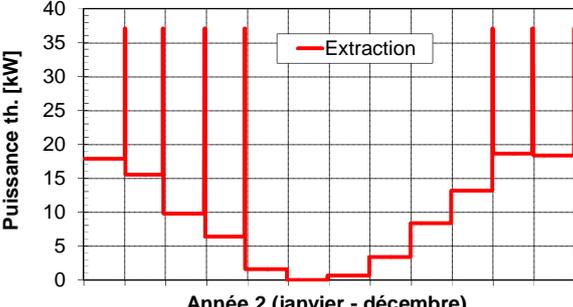
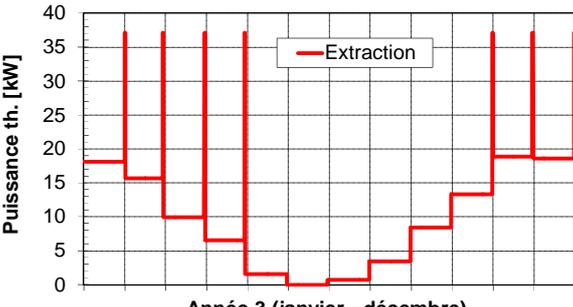


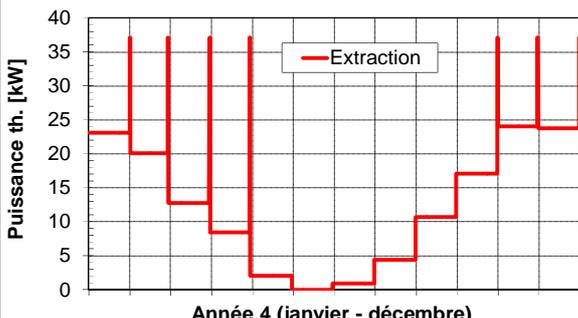
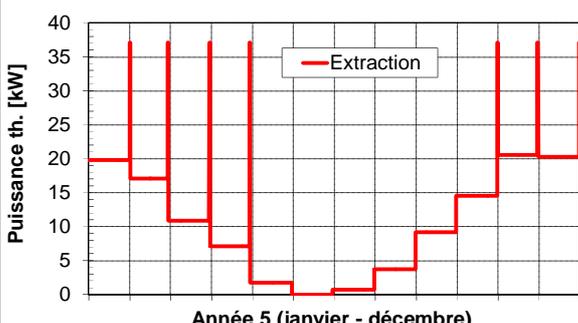
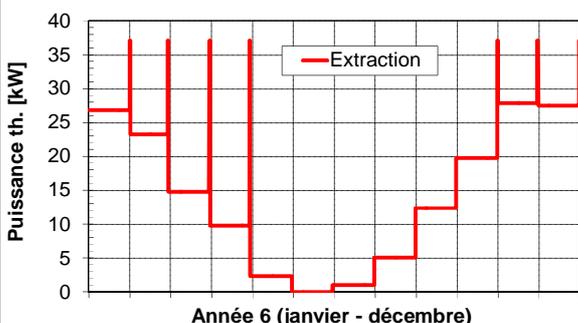
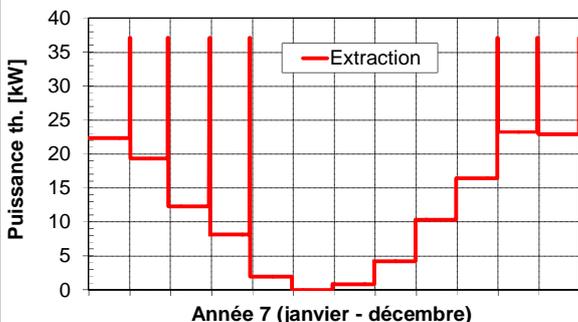
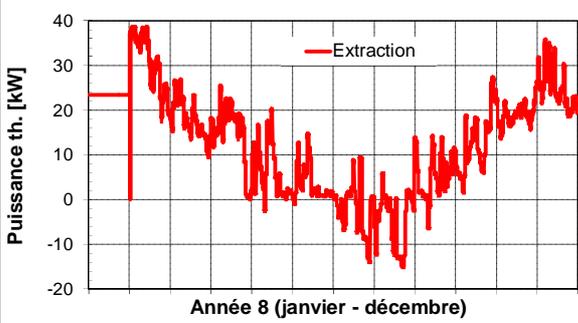
Figure C1.1 Dépendance du COP de la PAC en fonction de la différence de température dT entre l'eau dans le condenseur et le fluide caloporteur dans l'évaporateur (mesures de l'installation 3). Les mesures sont montrées en moyennes semestrielles. La courbe interpolée permet de recalculer l'énergie électrique absorbée au compresseur à partir de l'énergie thermique mesurée au condenseur.

La différence de température dT est la différence de température entre l'eau de chauffage circulant dans le condenseur et le fluide caloporteur du circuit des sondes géothermiques circulant dans l'évaporateur. Les températures de l'eau, respectivement du fluide caloporteur, sont définies comme étant la moyenne arithmétique des températures d'entrée et de sortie du condenseur, respectivement de l'évaporateur. Pour éviter une dispersion des valeurs trop importante, chaque point représente un COP moyen sur une période de mesure de 6 mois. La courbe interpolée du COP permet de recalculer correctement sur toute la période de mesure l'énergie électrique absorbée au compresseur à partir de l'énergie thermique mesurée au condenseur.

C1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques

Les profils d'extraction de chaleur des 7 premières années de fonctionnement sont extrapolés avec des pulses moyens mensuels et une puissance de pointe à la fin de chaque mois, correspondant à la puissance d'extraction de pointe de l'installation. Les mesures en valeurs horaires sont disponibles du mois de février de la 8^e année jusqu'au mois de février de la 11^e année. Une régénération partielle par geocooling est visible. Toutefois, comme elle reste modeste, les profils annuels des 7 premières années sont extrapolés sans ré-injection de chaleur. L'énergie annuelle extraite est l'énergie nette extraite, c'est-à-dire déduction faite de la part de geocooling.

<p>Année 1: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 113 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.6 °C</p>	 <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 85 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.6 °C</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 86 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.6 °C</p>	 <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>

<p>Année 4: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 109 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.6 °C</p>	 <p>Année 4 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 5: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 93 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.6 °C</p>	 <p>Année 5 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 6: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 126 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.6 °C</p>	 <p>Année 6 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 7: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 105 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.6 °C</p>	 <p>Année 7 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 8: Puissance extraite de pointe mesurée : 39 kW Durée max. de la puissance de pointe : 14 h Energie extraite annuelle : 113 MWh/a Température mesurée air extérieur: 10.2 °C</p>	 <p>Année 8 (janvier - décembre)</p>

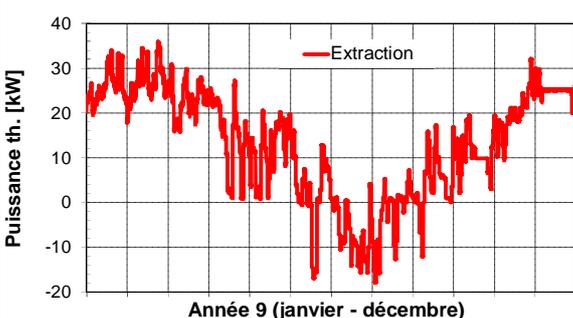
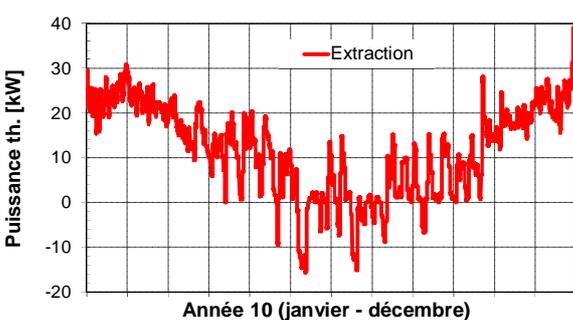
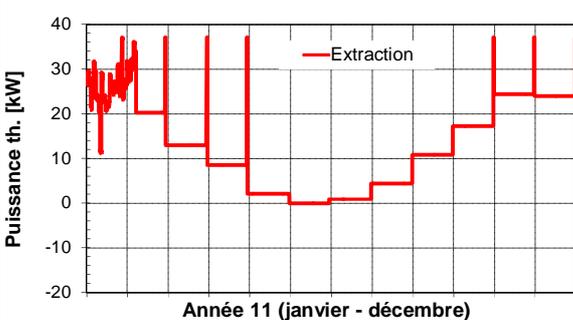
<p>Année 9: Puissance extraite de pointe mesurée : 36 kW Durée max. de la puissance de pointe : 8 h Energie extraite annuelle : 115 MWh/a Température mesurée air extérieur: 9.8 °C</p>	 <p>Année 9 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 10: Puissance extraite de pointe mesurée : 39 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 103 MWh/a Température mesurée air extérieur: 11.2 °C</p>	 <p>Année 10 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 11: Puissance extraite de pointe mesurée : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 113 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Année 11 (janvier - décembre)</p>

Table C1.1 Profils horaires extrapolés et mesurés de la puissance thermique extraite des sondes géothermiques pour les 11 premières années de fonctionnement de l'installation 3.

C1.3. Géologie

La conductivité thermique moyenne du terrain est déterminée sur la base d'un profil géologique attendu des types de roche et des épaisseurs correspondantes. Les valeurs de calcul recommandées de la norme SIA 384/6 sont choisies. Elles contiennent donc la marge de sécurité correspondante pour la détermination de la conductivité thermique du terrain.

La température initiale du terrain vers la surface, estimée par les procédures proposées dans la norme SIA 384/6, est diminuée par la marge de sécurité de 1 K pour un dimensionnement en chauffage.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain : 2.0 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain : 2.1 MJ/(m³K)
- température initiale du terrain vers la surface : 9.0 °C
- gradient de température géothermique : 30 K/km

C1.4. Sondes géothermiques

Le système utilise 6 sondes géothermiques de 200 m chacune, placées sur 1 ligne. L'espacement entre les sondes n'est pas connu et il est supposé être de 8 m. Le débit total nominal dans le circuit des sondes est d'environ 10 m³/h. Le débit par sonde est de l'ordre de 1.7 m³/h. La concentration d'antigel, supposée être proche de 30%, est trop élevée pour permettre un régime d'écoulement turbulent dans les tubes des sondes (double-U avec un tube HDPE de diamètre externe de 40mm).

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement laminaire dans les sondes et un débit nominal de 10 m³/h dans le circuit des sondes.

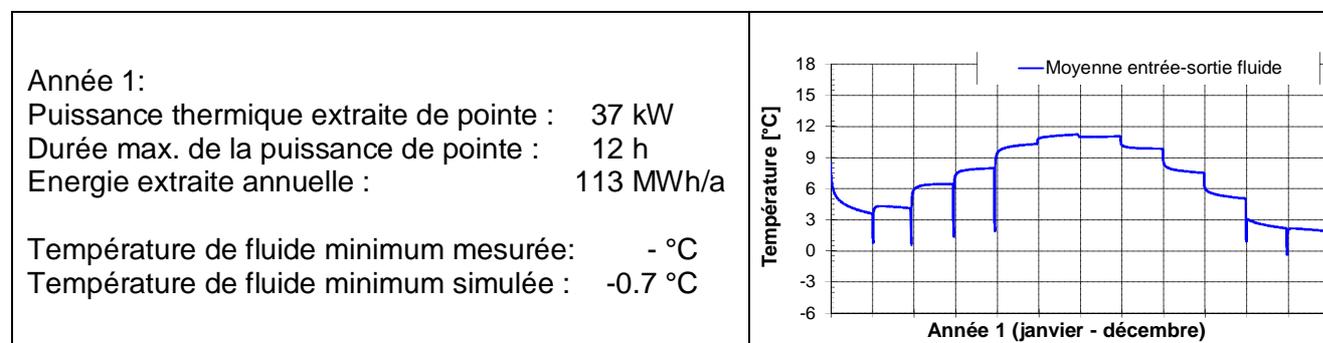
Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux sondes géothermiques sont :

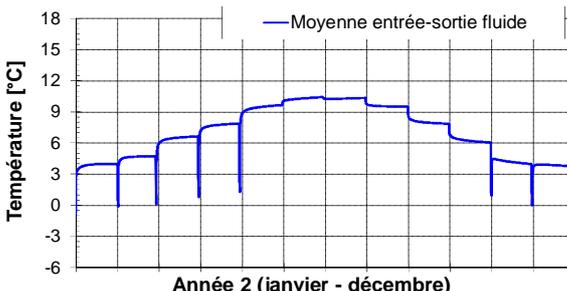
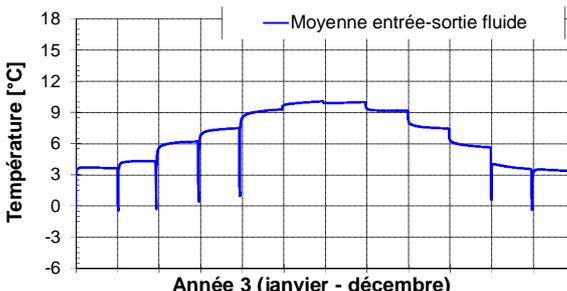
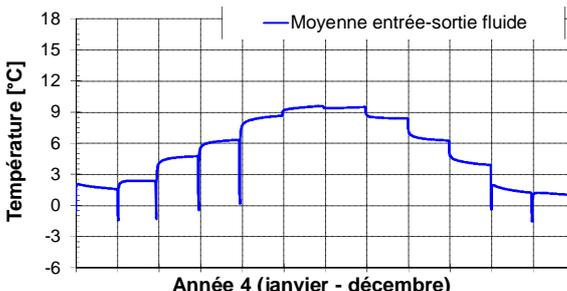
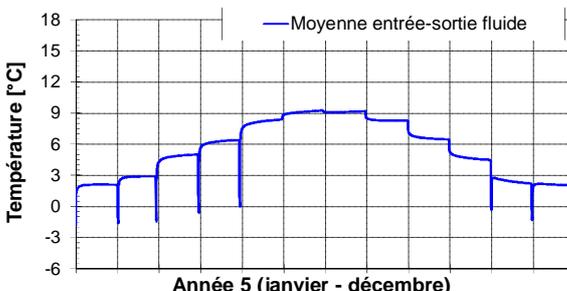
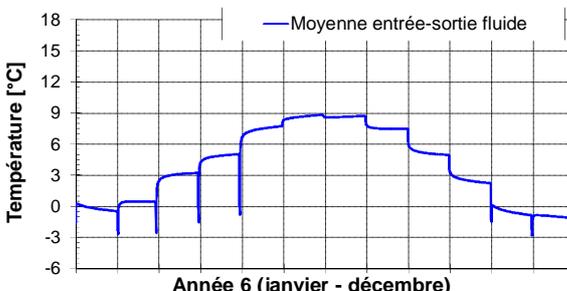
- nombre de sondes géothermiques :	6 (placées sur une ligne)
- profondeur des sondes géothermiques :	200 m
- espacement entre les sondes :	8 m (hypothèse)
- diamètre d'une sonde (forage):	0.13 m
- type de sonde :	double-U
- résistance thermique de la sonde Rb :	0.12 K/(W/m) (régime laminaire)
- résistance thermique interne de la sonde Ra :	0.43 K/(W/m) (régime laminaire)

C2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 3

C2.1. Température minimum annuelle du fluide

La température minimum annuelle du fluide est calculée et comparée avec les mesures quand elle est disponible, c'est-à-dire à partir de la 8^e année de fonctionnement. Les résultats sont montrés dans la table C2.1. Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table C2.1.



<p>Année 2: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 85 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -0.7 °C</p>	 <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 86 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -0.6 °C</p>	 <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 4: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 109 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -1.8 °C</p>	 <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 4 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 5: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 93 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -1.9 °C</p>	 <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 5 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 6: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 126 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -3.1 °C</p>	 <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 6 (janvier - décembre)</p>

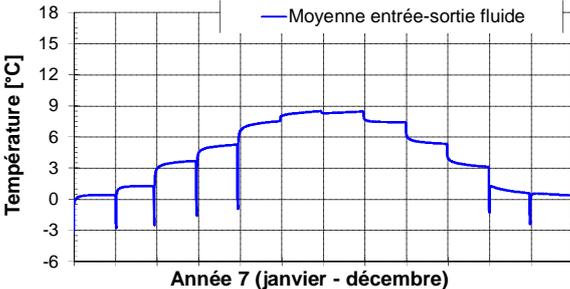
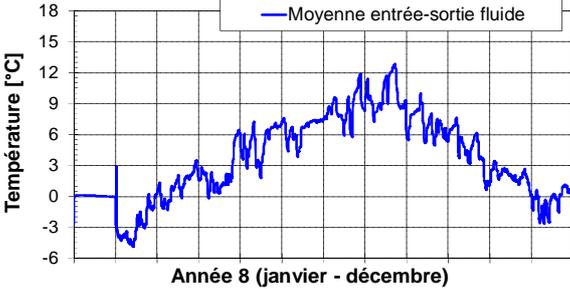
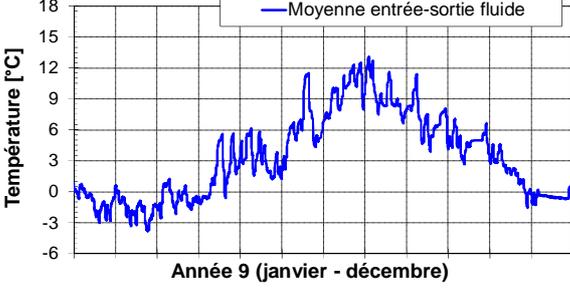
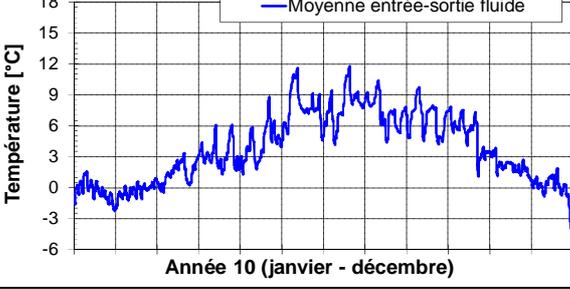
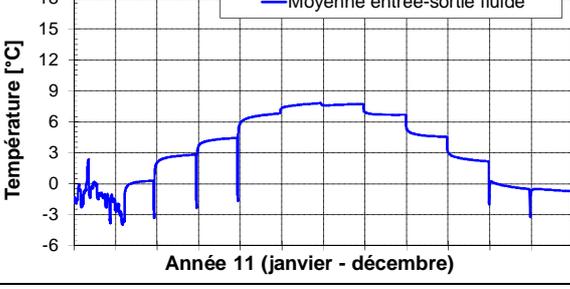
<p>Année 7: Puissance thermique extraite de pointe : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 105 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : -3.2 °C</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>Année 7 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 8: Puissance extraite de pointe mesurée : 39 kW Durée max. de la puissance de pointe : 14 h Energie extraite annuelle : 113 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: -0.5 °C Température de fluide minimum simulée : -4.9 °C</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>Année 8 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 9: Puissance extraite de pointe mesurée : 36 kW Durée max. de la puissance de pointe : 8 h Energie extraite annuelle : 115 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: -0.5 °C Température de fluide minimum simulée : -3.9 °C</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>Année 9 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 10: Puissance extraite de pointe mesurée : 39 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 103 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +0.1 °C Température de fluide minimum simulée : -4.0 °C</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>Année 10 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 11: Puissance extraite de pointe mesurée : 37 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 113 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: -0.3 °C Température de fluide minimum simulée : -4.0 °C</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>Année 11 (janvier - décembre)</p>

Table C2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques pour les 11 premières années de fonctionnement de l'installation 3. Les valeurs minimums annuelles simulées sont également indiquées, avec la valeur mesurée correspondante quand elle est disponible.

C2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique C2.1 et en moyennes journalières dans le graphique C2.2. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières.

L'écart moyen entre les valeurs simulées et mesurées est de -3.8 K aussi bien pour les valeurs horaires que pour les moyennes journalières. Un écart négatif signifie que les valeurs simulées sont inférieures aux valeurs mesurées.

La dispersion des points est particulièrement importante pour cette installation. Elle ne peut pas être uniquement attribuée au modèle de simulation. La qualité des mesures, en particulier l'évolution temporelle des mesures, entre également en ligne de compte. On peut toutefois observer que l'écart est de l'ordre de -4 K pour les températures les plus basses dans les deux cas.

L'évolution des températures mesurées et simulées est montrée en valeurs journalières dans le graphique C2.3 et en valeurs horaires dans le graphique C2.4. Dans le graphe C2.3, la différence de température entre les mesures et les simulations est beaucoup plus grande en été qu'en hiver. Ceci résulte du fonctionnement en geocooling de l'installation, avec un débit beaucoup plus faible en geocooling qu'en extraction de chaleur. Dans les simulations le débit n'a pas été différencié entre les deux modes de fonctionnement. Ceci permet de mettre en évidence les périodes quand l'installation fonctionne en geocooling.

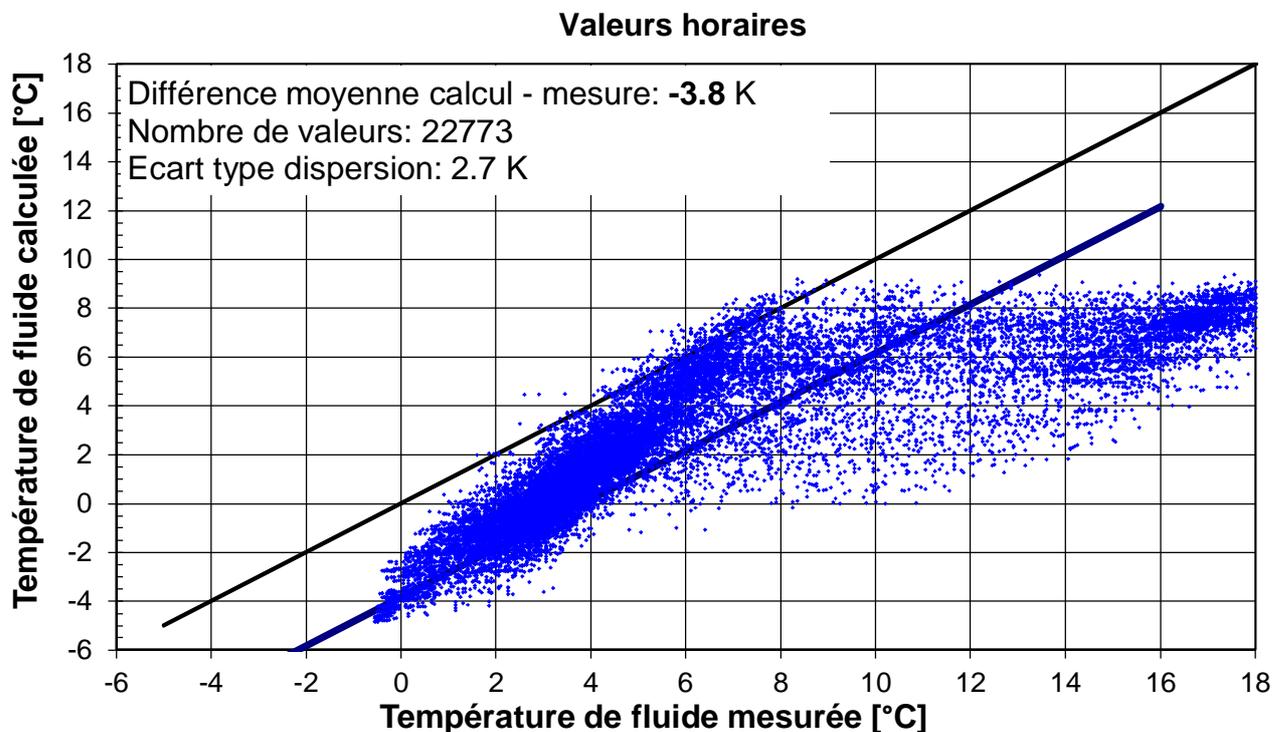


Figure C2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 3.

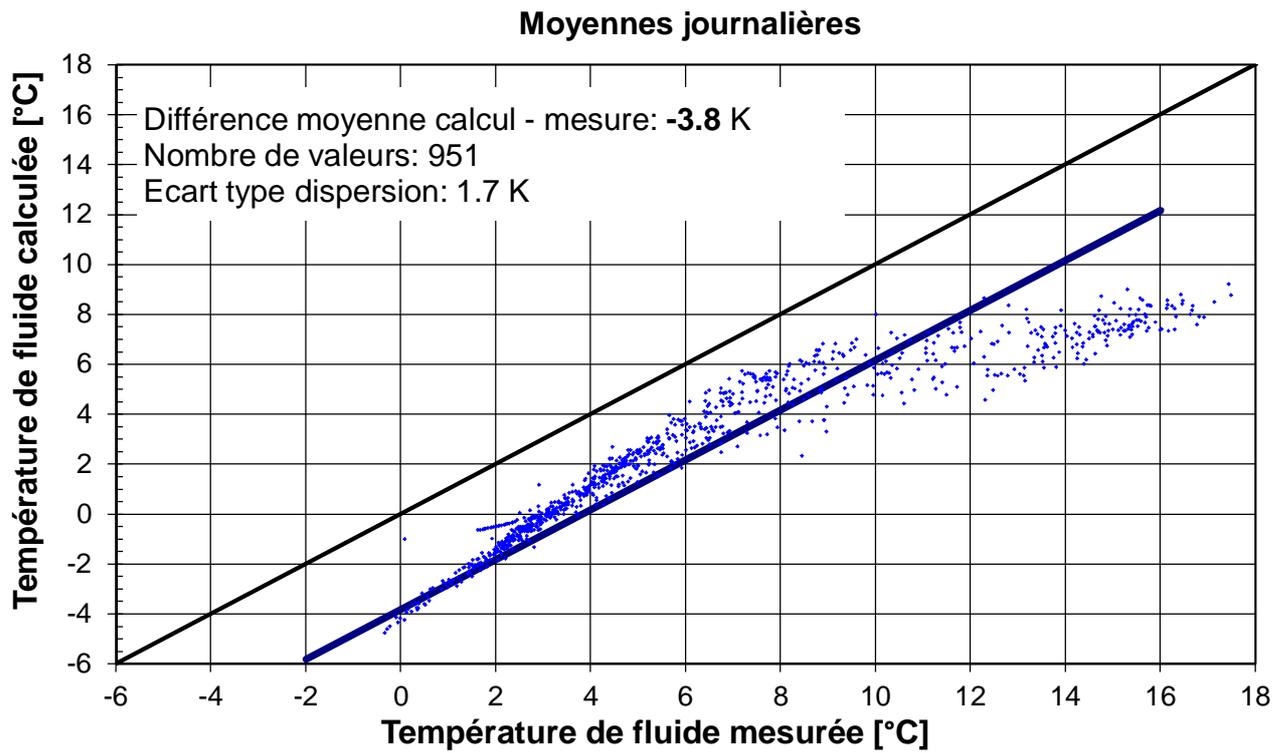


Figure C2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 3.

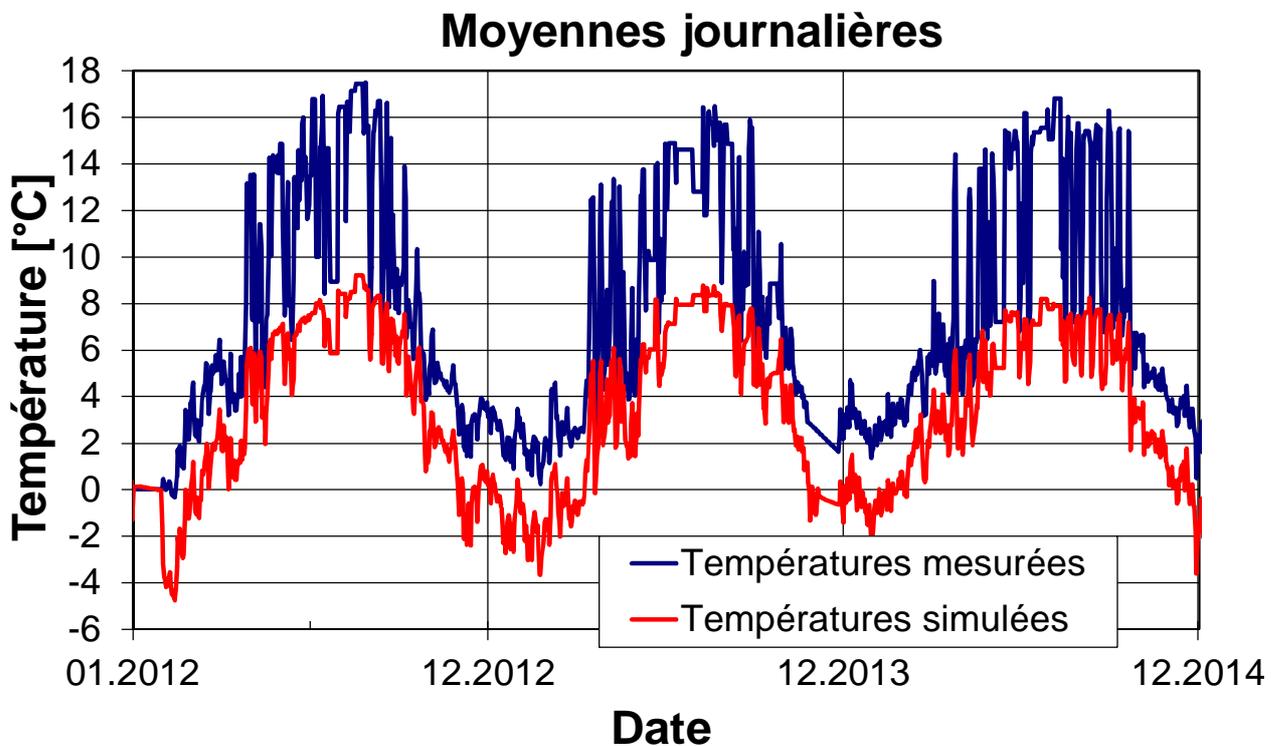


Figure C2.3 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 3.

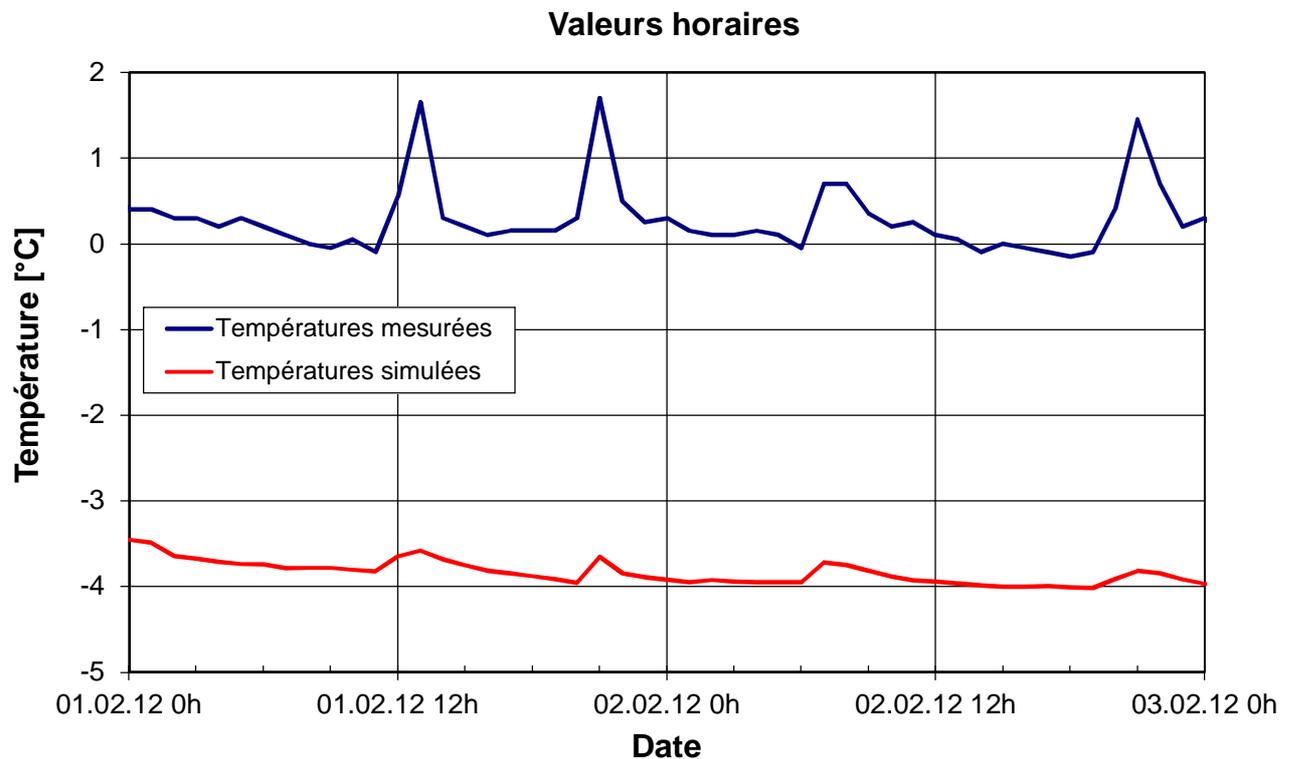


Figure C2.4 Evolution en valeurs horaires des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 3.

C2.3. Analyse de sensibilité

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des sondes (variante Lam), les variations suivantes sont évaluées afin de quantifier leurs effets cumulés :

- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte de même que la capacité thermique des sondes (variante Lam+C+H) ;
- les marges de sécurité sur la température initiale et la conductivité thermique du terrain sont levées. Cela signifie qu'elles sont de respectivement 1K et 0.2 W/(mK) plus élevées. Ces variations, cumulées aux variations précédentes, correspondent à la variante Lam+C+H+T+L ;
- la conductivité thermique du terrain est ajustée pour que les simulations puissent reproduire au mieux les mesures en extraction de chaleur. La marge de sécurité sur la température initiale et la simulation des transferts thermiques des raccords horizontaux et de la capacité thermique des sondes sont maintenus. Relativement à la variante nominale (variante Lam), la conductivité thermique du terrain est augmentée de 2.0 à 2.8 W/(mK). Cette variante est la variante Lam+C+H+T+L+cal ;

Les résultats sont montrés dans la table C2.2.

<p>Variante nominale Lam: Régime d'écoulement laminaire dans les sondes</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -3.8 K Ecart type dispersion : 1.7 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p>
<p>Variante Lam+C+H: Capacité thermique des sondes et transferts thermiques des raccords horizontaux entre les sondes ajoutés</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -3.3 K Ecart type dispersion : 1.7 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p>
<p>Variante Lam+C+H+T+L: Effets de la température initiale et de la conductivité thermique du terrain sans marge de sécurité ajoutés</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -1.9 K Ecart type dispersion : 1.8 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p>
<p>Variante Lam+C+H+T+L+cal: Conductivité thermique du terrain ajustée pour reproduire les mesures en extraction de chaleur</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -0.7 K Ecart type dispersion : 2.0 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p>

Table C2.1 Influence des effets cumulés des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 3.

La variante Lam+C+H+T+L montre que la détermination des paramètres de simulation était trop pessimiste relativement à la réalité. Même si en geocooling les températures mesurées sont jusqu'à 6K plus élevée, les températures simulées restent environ 2K plus basses pendant les périodes d'extraction de chaleur les plus intenses.

Il faut toutefois prendre les résultats avec précaution. L'espacement entre les sondes n'est, à ce jour, pas connu et un espacement typique de 8m entre les sondes a été supposé. Un espacement plus grand pourrait rapprocher les valeurs simulées des valeurs mesurées. D'autre part une venue d'eau à 75 m de profondeur a été observée lors de la perforation des sondes. Elle pourrait également expliquer pourquoi la différence entre les mesures et les simulations est aussi importante pour cette installation.

Afin d'avoir un paramétrage du modèle de simulation qui permette de reproduire les mesures en extraction de chaleur, la conductivité thermique du terrain est augmentée de 2.0 W/(mK) (variante Lam) à 2.8 W/(mk) (variante Lam+c+H+T+L+cal). Cette variante est utilisée dans la section suivante pour évaluer l'abaissement de température à long terme avec le modèle de simulation calibré sur les mesures.

C3. Simulation à long terme de l'installation 3

L'installation 3 est simulée sur une cinquantaine d'années pour calculer l'évolution à long terme de la température du fluide dans le circuit hydraulique des sondes. Elle est calculée pour deux cas de figure différents :

- 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 ;

- 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 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.

C3.1. Evolution à long terme avec les paramètres nominaux

Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques correspondent à la variante « nominale Lam » simulée dans la section C2.3 (Analyse de sensibilité). Les valeurs des paramètres sont énumérés dans les sections C1.3 (Géologie) et C1.4 (Sondes géothermiques).

Le profil d'extraction de chaleur type que les sondes doivent satisfaire est déterminé par la demande d'énergie de chaleur annuelle nominale et les caractéristiques nominales de la PAC.

A défaut d'information plus détaillées, la demande de chauffage annuelle nominale est évaluée comme la valeur moyenne des productions annuelles mesurées. Les caractéristiques nominales de la PAC sont extrapolées aux conditions **B0W35** aussi bien pour évaluer la puissance maximum d'extraction de chaleur que l'énergie annuelle extraite. La durée de la puissance de pointe, pour laquelle la température minimum du fluide dans le circuit des sondes est évaluée, est fixée par défaut à 12 h.

Le profil d'extraction de chaleur type est donc caractérisé avec les paramètres suivants :

- demande d'énergie thermique annuelle nominale :	139 MWh/a
- puissance de chauffage nominale de la PAC (B0W35) :	62 kW
- coefficient de performance nominal de la PAC (B0W35) :	4.4 -
- durée maximum de la puissance de pointe :	12 h

Il est montré dans la figure C2.6 avec la distribution mensuelle type mesurée de l'installation 3. La recharge thermique du terrain par geocooling, relativement modeste, n'est pas prise en compte dans le profil annuel nominal.

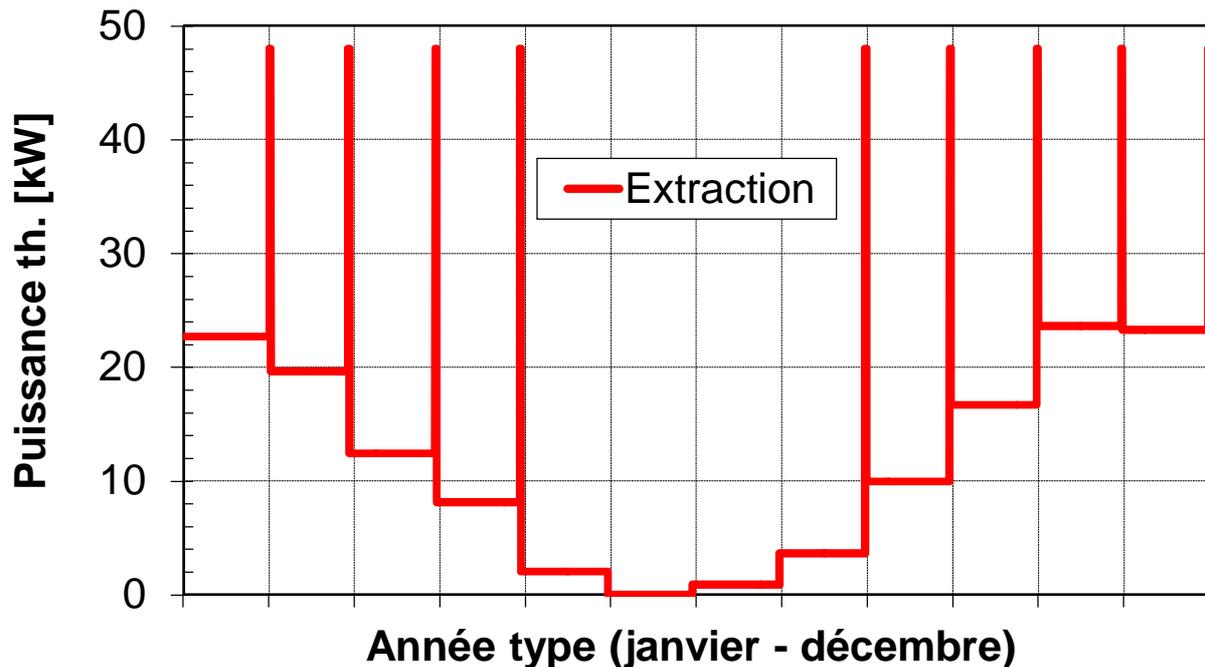


Figure C2.6 Profil d'extraction de chaleur type pour l'installation 3, déterminé avec les caractéristiques nominales des besoins de chaleur.

Le profil d'extraction de chaleur type a les caractéristiques suivantes :

- énergie thermique annuelle extraite des sondes : 107 MWh/a
- puissance thermique maximale extraite : 48 kW
- durée maximum de la puissance d'extraction de pointe : 12 h

L'énergie journalière extraite la plus grande résulte de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée, et du pulse d'extraction mensuel correspondant. Elle est calculée à environ 860 kWh/jour. Cette énergie est extraite avec l'équivalent d'une durée de fonctionnement de 18h de la PAC à puissance nominale. Ceci permet de définir le paramètre suivant pour caractériser la puissance de pointe des besoins thermiques à satisfaire.

- durée journalière de marche maximum à puissance nominale : 18 h/jour

L'évolution de la température du fluide sur 50 ans est montrée dans la figure C2.7. L'influence de la demande d'énergie annuelle sur la température à long terme est illustrée avec la courbe simulée pour 90% des besoins annuels nominaux. La puissance d'extraction maximum est, quant à elle, maintenue à sa valeur nominale.

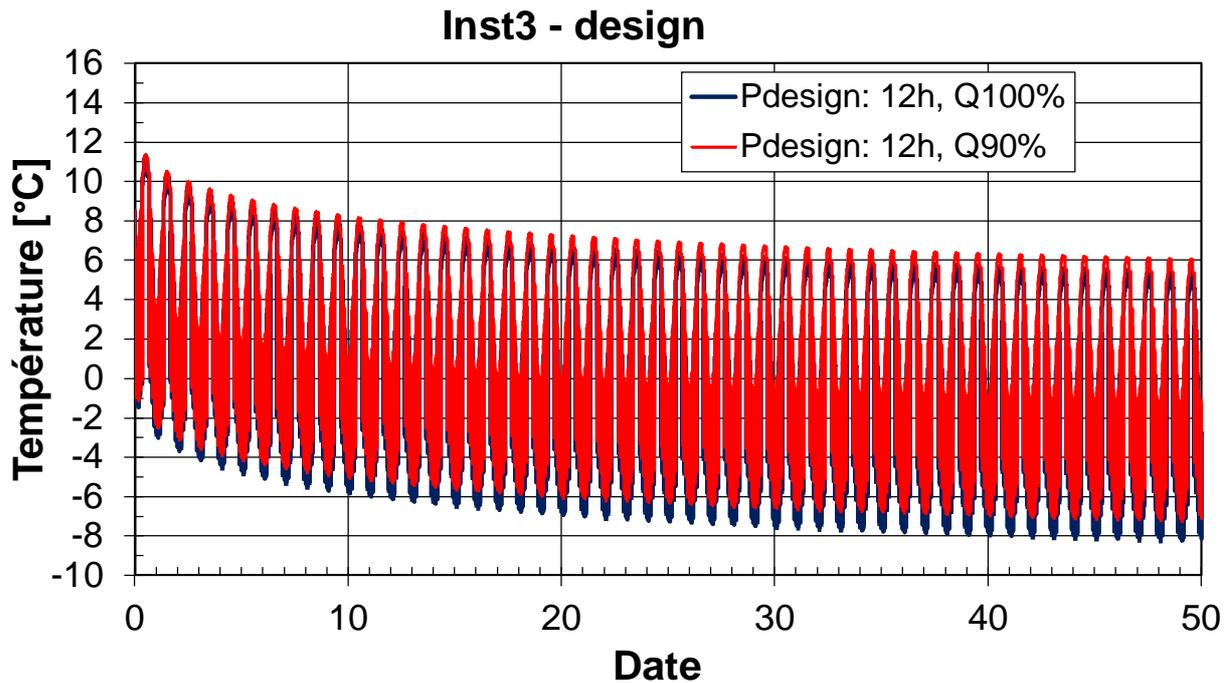


Figure C2.7 Evolution de la température du fluide de l'installation 3, simulée avec les paramètres nominaux de l'installation et les besoins nominaux de chaleur.

Après 50 ans d'exploitation, la **température minimum** du fluide est simulée à :

- 8.2°C avec les paramètres nominaux et la demande de chaleur nominale ;
- 7.2°C en réduisant uniquement l'énergie thermique annuelle de 10%.

C3.2. Evolution à long terme avec les paramètres calibrés

Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques doivent permettre de reproduire les mesures. Ils correspondent à la variante « Lam+C+H+T+L+cal » simulée dans la section C2.3 (Analyse de sensibilité).

Le profil d'extraction de chaleur type que les sondes doivent satisfaire est déterminé sur la base des mesures de l'énergie annuelle extraite, de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée maximum. Les mesures indiquent que l'énergie journalière maximum extraite des sondes correspond à environ 23h de marche à la puissance d'extraction de pointe. En élaborant le profil d'extraction de chaleur comme dans le cas nominal, c'est-à-dire avec des pulses d'extraction moyens mensuels et un pulse d'extraction de pointe, de dernier doit avoir une durée de 22 heures.

La recharge thermique du terrain est également incluse dans le profil annuel type calqué sur les mesures. Ces dernières indiquent que l'énergie journalière maximum injectée dans les sondes correspond à environ 12h de marche à la puissance maximum de 16 kW. En élaborant le profil d'injection de chaleur pendant les mois d'été sans chauffage, c'est-à-dire avec des pulses d'injection moyens mensuels et un pulse d'injection de pointe, la durée de ce dernier est déterminée à 5 heures.

Les caractéristiques qui définissent le profil d'extraction et d'injection type sont indiquées ci-dessous :

- énergie thermique annuelle extraite des sondes :	102 MWh/a
- puissance thermique maximale extraite :	38 kW
- durée maximum de la puissance d'extraction de pointe :	22 h
- énergie thermique annuelle injectée dans les sondes :	9 MWh/a
- puissance thermique maximale injectée :	16 kW
- durée maximum de la puissance d'injection de pointe :	5 h

L'évolution de la température du fluide sur 50 ans est montrée dans la figure C2.8.

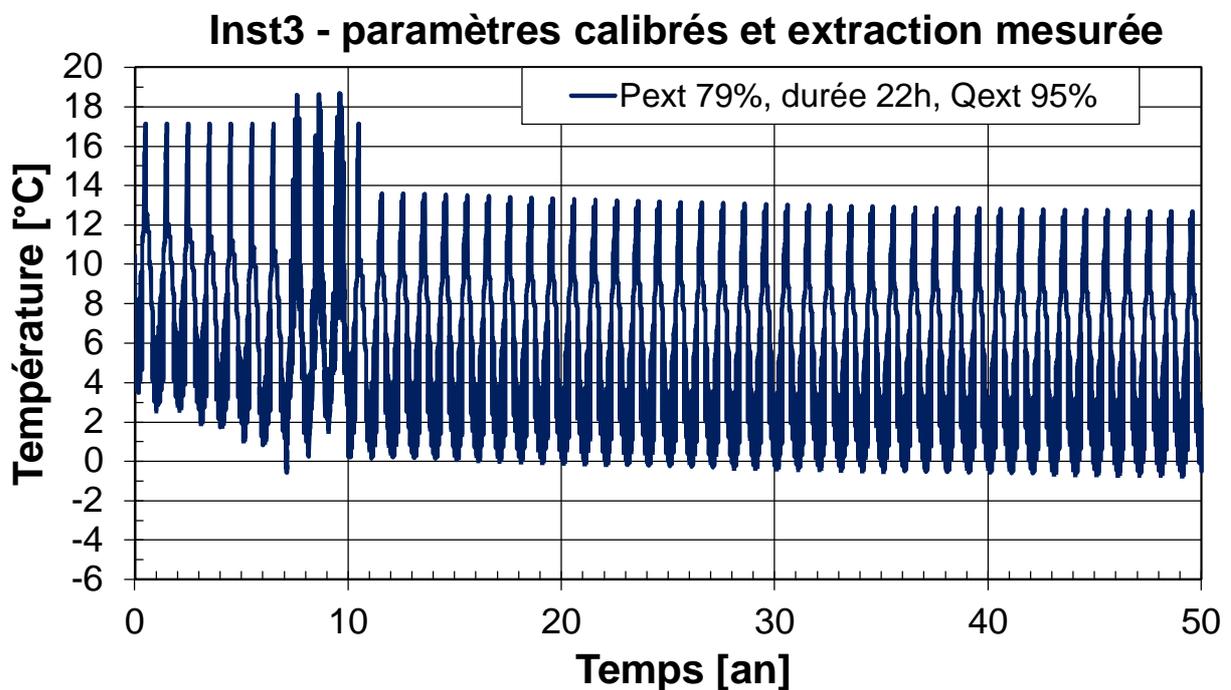


Figure C2.7 Evolution de la température du fluide de l'installation 3, simulée avec les paramètres calibrés de l'installation et les quantités de chaleur annuelles mesurées transférées dans les sondes.

Après 50 ans d'exploitation, la **température minimum** du fluide est simulée à :

-0.7°C avec les paramètres calibrés et les énergies transférées mesurées.

C4. Analyse du profil de chaleur de l'installation 3

Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante calibrée (Lam+C+H+T+L+cal) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

C4.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 3

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante à partir de la neuvième année de fonctionnement. Les températures extrêmes sont obtenues pour 2 hivers et deux étés consécutifs.

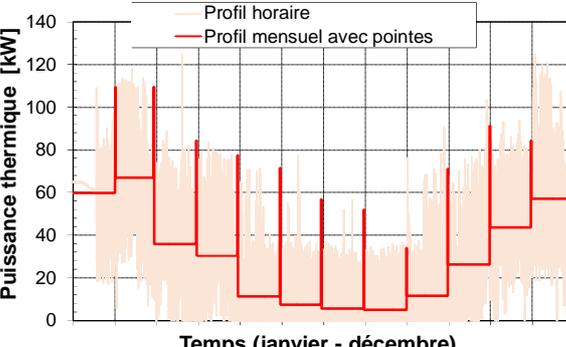
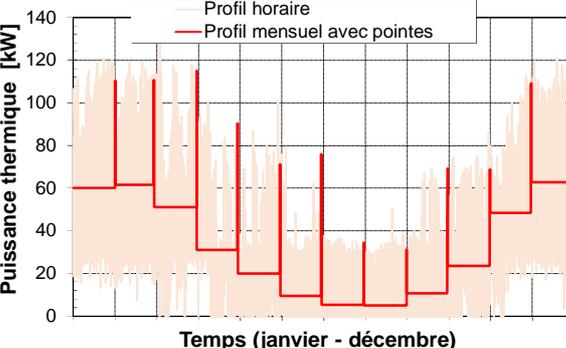
<p>Année 9:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 36 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 22 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 28 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 848 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : août</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -18 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 24 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -2.4 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -432 kWh</p>	
<p>Année 10:</p> <p>Mois conduisant à température min. : janvier</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 31 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 23 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 24 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 737 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : juin</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -16 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 24 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -0.8 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -384 kWh</p>	

Table C1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 3. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

C4.2. Température de fluide minimum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

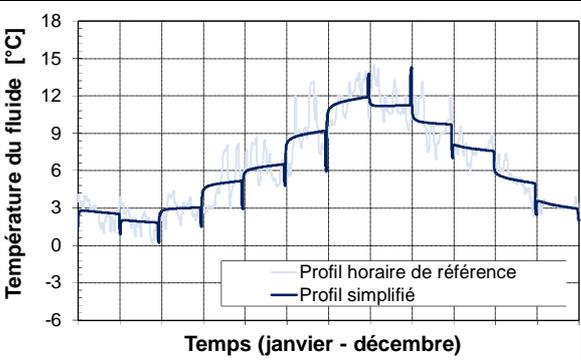
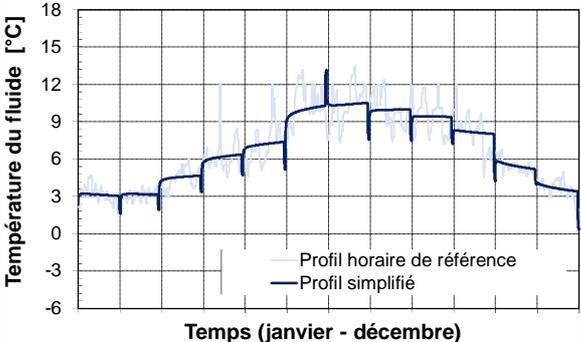
<p>Année 9:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Température min. avec profil simplifié : +0.2 °C</p> <p>Température minimum de référence : +0.2 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : 0.0 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : août</p> <p>Température max. avec profil simplifié : +14.3 °C</p> <p>Température maximum de référence : +14.5 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : -0.2 K</p>	
<p>Année 10:</p> <p>Mois conduisant à température min. : janvier</p> <p>Température min. avec profil simplifié : +1.6 °C</p> <p>Température minimum de référence : +1.5 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : +0.1 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : juin</p> <p>Température max. avec profil simplifié : +13.2 °C</p> <p>Température maximum de référence : +13.2 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : 0.0 K</p>	

Table C1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 3. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. L'évolution de référence de la température, obtenue avec le profil de chaleur en valeurs horaires, est également indiquée.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une petite différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 3, la différence n'est pas nécessairement conservatrice mais elle n'est pas significative. La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié est respectivement 0.0 et 0.1 K plus haute que la température minimum de référence pour les 2 années consécutives mesurées. En refroidissement, la température maximum annuelle est respectivement 0.2 et 0.0 K plus basse que la température maximum de référence.

ANNEXE D: Installation 4

Table des matières

D1. Installation 4	2
D1.1. Mesures disponibles	2
D1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques.....	3
D1.3. Géologie	3
D1.4. Sondes géothermiques	4
D2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 4.....	4
D2.1. Température minimum annuelle du fluide	4
D2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide	5
D2.3. Analyse de sensibilité.....	8
D3. Simulation à long terme de l’installation 4	11
D3.1. Evolution à long terme avec les paramètres nominaux	11
D3.2. Evolution à long terme avec les paramètres calibrés.....	13
D4. Analyse du profil de chaleur de l’installation 4	15
D4.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 4.....	15
D4.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle	16

D1. Installation 4

L'installation 4 fonctionne depuis environ 14 ans. Toutefois les mesures ne concernent que les 28 premiers mois de fonctionnement. Cette installation a malgré tout été retenue pour la bonne qualité des mesures et leur continuité dans le temps. Les valeurs, mesurées chaque 5 minutes, sont élaborées en valeurs horaires. Pas de relevés n'ont été faits pour les années qui suivent la campagne de mesure.

D1.1. Mesures disponibles

Les mesures utilisées de l'installation 4 sont :

- températures d'entrée et de sortie de l'évaporateur de la PAC ;
- énergie thermique extraite à l'évaporateur de la PAC ;
- température de l'air extérieur.

Ces mesures ont été réalisées spécifiquement pour monitorer les performances thermiques de l'installation. Un datalogger dédié pour cette tâche a été posé. Les mesures sont suffisamment bonnes pour établir directement les évolutions de la puissance thermique extraite des sondes géothermiques et de la température du fluide caloporteur dans le circuit des sondes, défini comme étant la moyenne des températures aller et retour du fluide.

Les mesures suivantes ont également été utilisées pour attester de la qualité des mesures :

- températures d'entrée et de sortie du condenseur de la PAC ;
- énergie électrique consommée par le compresseur de la PAC ;
- énergie thermique fournie au condenseur de la PAC ;

La dépendance du COP en fonction de la différence des niveaux de température dans le condenseur et l'évaporateur est montrée dans la figure D1.1 avec des moyennes sur 10 heures seulement.

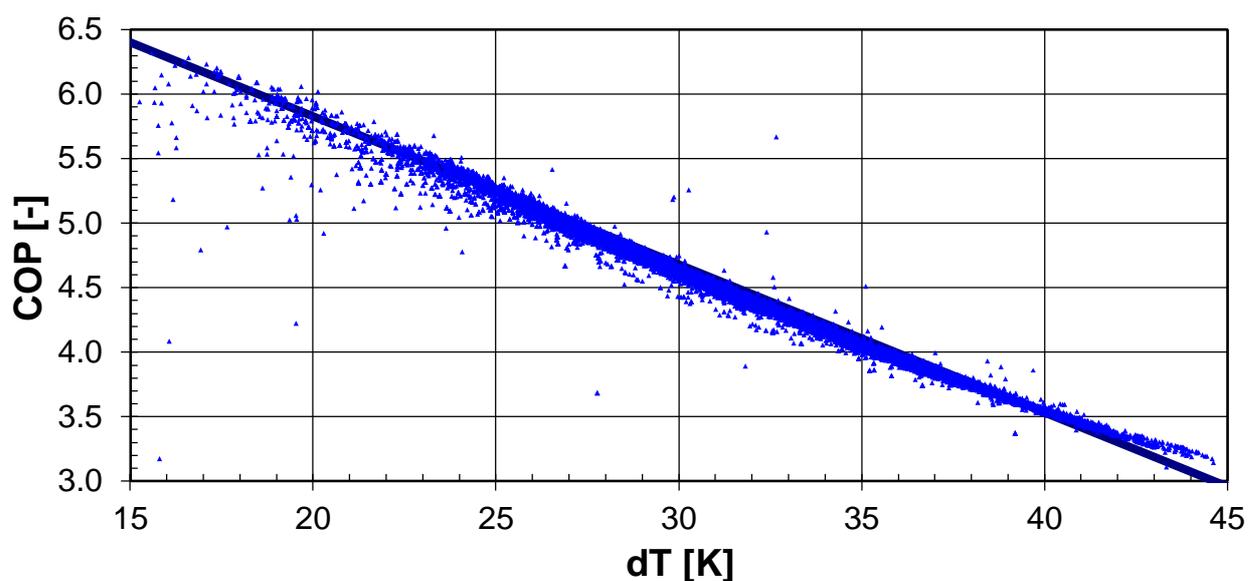


Figure D1.1 Dépendance du COP de la PAC en fonction de la différence de température dT entre l'eau dans le condenseur et le fluide caloporteur dans l'évaporateur. Les mesures sont montrées en moyennes sur 10h.

Les énergies électrique absorbée au compresseur et thermique délivrée au condenseur permettent de recalculer l'énergie extraite à l'évaporateur. Cette dernière ne diffère que de 0.9% de l'énergie mesurée à l'évaporateur.

D1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques

Les profils d'extraction de chaleur des 3 premières années de fonctionnement sont montrés dans la table suivante.

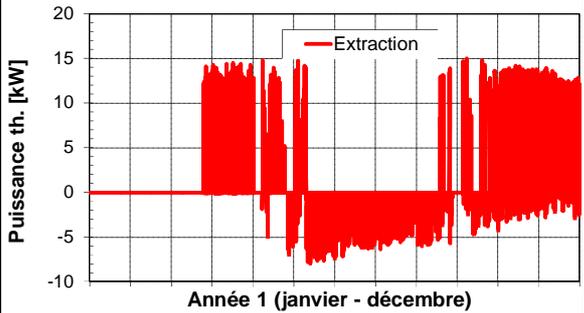
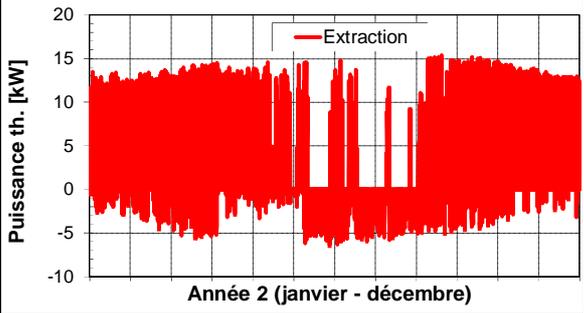
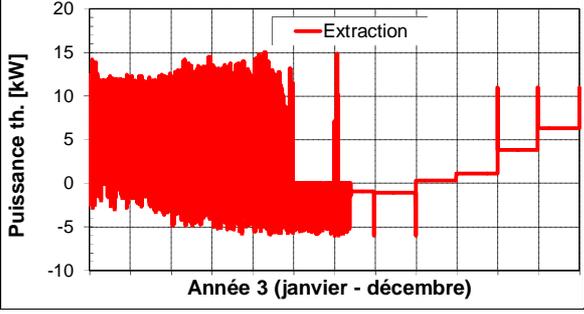
<p>Année 1: Puissance thermique extraite de pointe : 13.9 kW¹⁾ Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 12.3 MWh/a Energie injectée annuelle : 3.4 MWh/a</p> <p>Température air extérieur du lieu: 12.3 °C ¹⁾ en décembre</p>	 <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2: Puissance thermique extraite de pointe : 13.7 kW¹⁾ Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 24.3 MWh/a Energie injectée annuelle : 3.8 MWh/a</p> <p>Température air extérieur du lieu: 13.0 °C ¹⁾ en février</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3: Puissance thermique extraite de pointe : 12.5 kW¹⁾ Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 22.6 MWh/a Energie injectée annuelle : 4.5 MWh/a</p> <p>Température air extérieur du lieu: 12.8 °C ¹⁾ en février</p>	 <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>

Table D1.1 Profils horaires mesurés et extrapolés de la puissance thermique extraite des sondes géothermiques pour les 3 premières années de fonctionnement de l'installation 4.

D1.3. Géologie

La conductivité thermique moyenne du terrain est déterminée sur la base du type de roche rencontré durant la perforation. Les valeurs de calcul recommandées de la norme SIA 384/6 sont choisies. Elles contiennent donc la marge de sécurité correspondante pour la détermination de la conductivité thermique du terrain.

La température initiale du terrain vers la surface, estimée par les procédures proposées dans la norme SIA 384/6, est diminuée par la marge de sécurité de 1 K pour un dimensionnement en chauffage.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain :	2.6 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain :	2.0 MJ/(m ³ K)
- température initiale du terrain vers la surface :	11.7 °C
- gradient de température géothermique :	20 K/km

D1.4. Sondes géothermiques

Le système utilise 3 sondes géothermiques de 80 m chacune, placées en ligne avec un espacement de 8.2 m. Le débit total nominal dans le circuit des sondes est d'environ 3.6 m³/h. Le débit par sonde est de l'ordre de 1.2 m³/h. La concentration d'antigel, fixée à 30%, est trop élevée pour permettre un régime d'écoulement turbulent dans les tubes des sondes (double-U avec un tube HDPE de diamètre externe de 32mm).

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement laminaire dans les sondes et un débit nominal de 3.6 m³/h dans le circuit des sondes.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux sondes géothermiques sont :

- nombre de sondes géothermiques :	3 (en ligne)
- profondeur des sondes géothermiques :	80 m
- espacement entre les sondes :	8.2 m
- diamètre d'une sonde (forage):	0.117 m
- type de sonde :	double-U
- résistance thermique de la sonde R _b :	0.12 K/(W/m) (régime laminaire)
- résistance thermique interne de la sonde R _a :	0.43 K/(W/m) (régime laminaire)

D2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 4

D2.1. Température minimum annuelle du fluide

La température minimum annuelle du fluide est calculée et comparée avec les mesures de la campagne de mesure. Les résultats sont montrés dans la table D2.1. Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table D2.1.

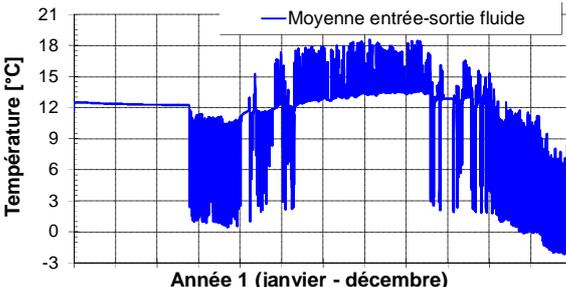
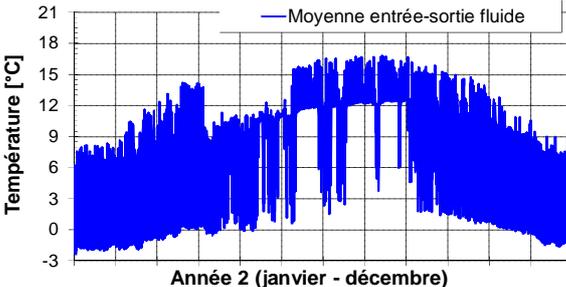
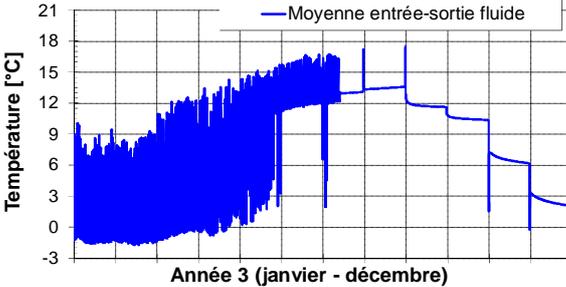
<p>Année 1:</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 13.9 kW¹⁾</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 1 h</p> <p>Energie extraite annuelle : 12.3 MWh/a</p> <p>Energie injectée annuelle : 3.4 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +3.5 °C</p> <p>Température de fluide minimum simulée : -2.2 °C</p> <p>¹⁾ en décembre</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2:</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 13.7 kW¹⁾</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 1 h</p> <p>Energie extraite annuelle : 24.3 MWh/a</p> <p>Energie injectée annuelle : 3.8 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +3.4 °C</p> <p>Température de fluide minimum simulée : -2.3 °C</p> <p>¹⁾ en février</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3:</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 12.5 kW¹⁾</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 1 h</p> <p>Energie extraite annuelle : 22.6 MWh/a</p> <p>Energie injectée annuelle : 4.5 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +3.7 °C¹⁾</p> <p>Température de fluide minimum simulée : -1.7 °C¹⁾</p> <p>¹⁾ en février</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>

Table D2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques pour les 3 premières années de fonctionnement de l'installation 4. Les valeurs minimums annuelles simulées et mesurées sont indiquées.

D2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique D2.1 et en moyennes journalières dans le graphique D2.3. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières. Ceci s'explique en grande partie par les effets capacitifs. Ces derniers, pris en compte dans la variante calibrée présentée de la section « analyse de sensibilité », permettent de mieux reproduire les mesures (cf. figure D2.2 et D2.4).

L'écart moyen entre les valeurs simulées et mesurées est de -3.4 K pour les valeurs horaires et de -4.0 K pour les moyennes journalières. Un écart négatif signifie que les valeurs simulées sont inférieures aux valeurs mesurées. Pendant les périodes les plus froides, l'écart mesure – simulation est comparable pour les valeurs horaires et journalières et atteint environ 5.5 K. Les conditions réelles de ce projet sont très favorables et se traduisent par une conductivité thermique et une température initiale du terrain sensiblement plus élevées que les valeurs nominales.

L'évolution des températures mesurées et simulées est montrée en valeurs journalières dans le graphique D2.5.

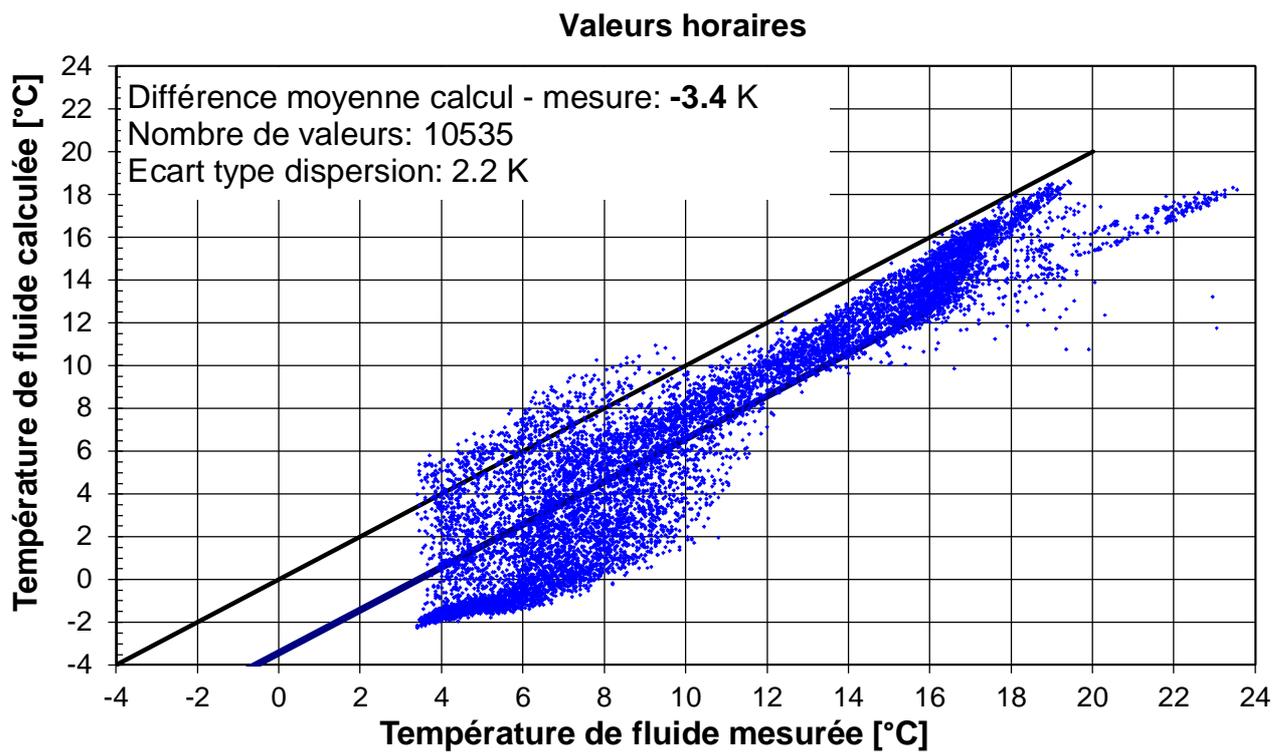


Figure D2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 4 pour la variante nominale.

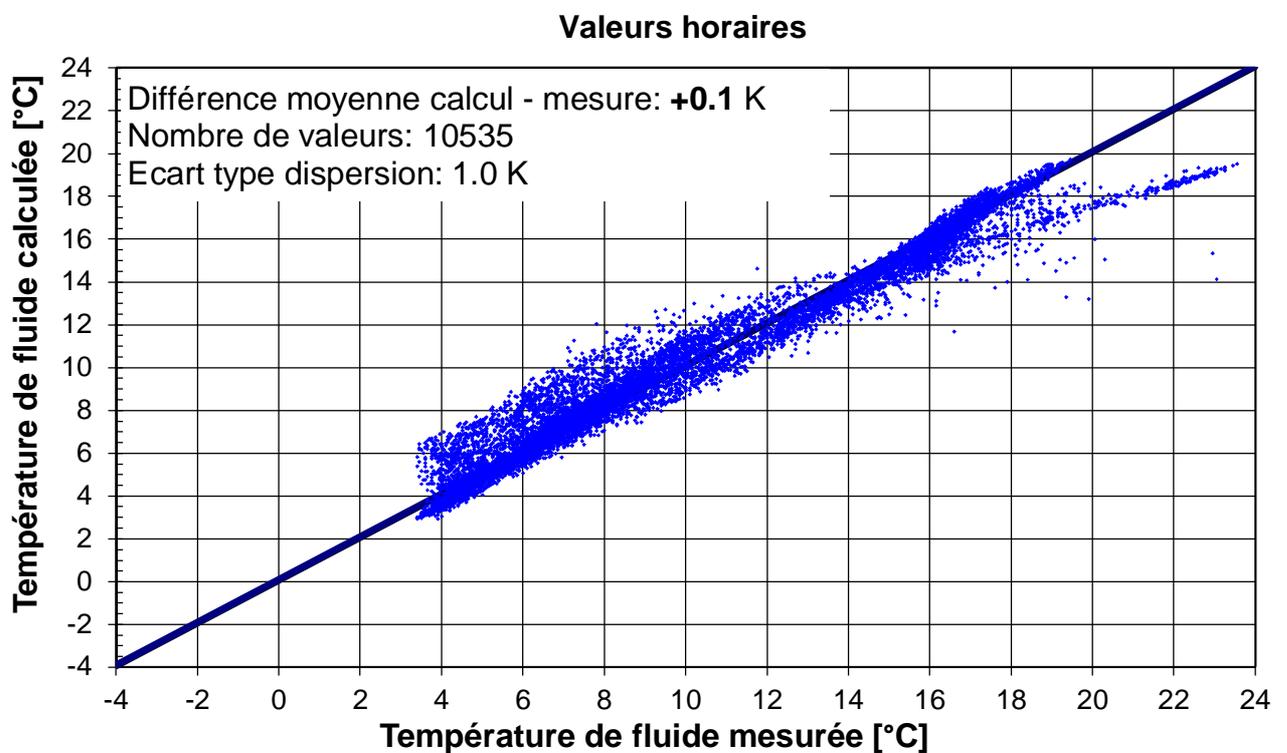


Figure D2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes horaires de l'installation 4, mais avec la variante calibrée. Cette dernière prend en compte les effets capacitifs du circuit des sondes géothermiques.

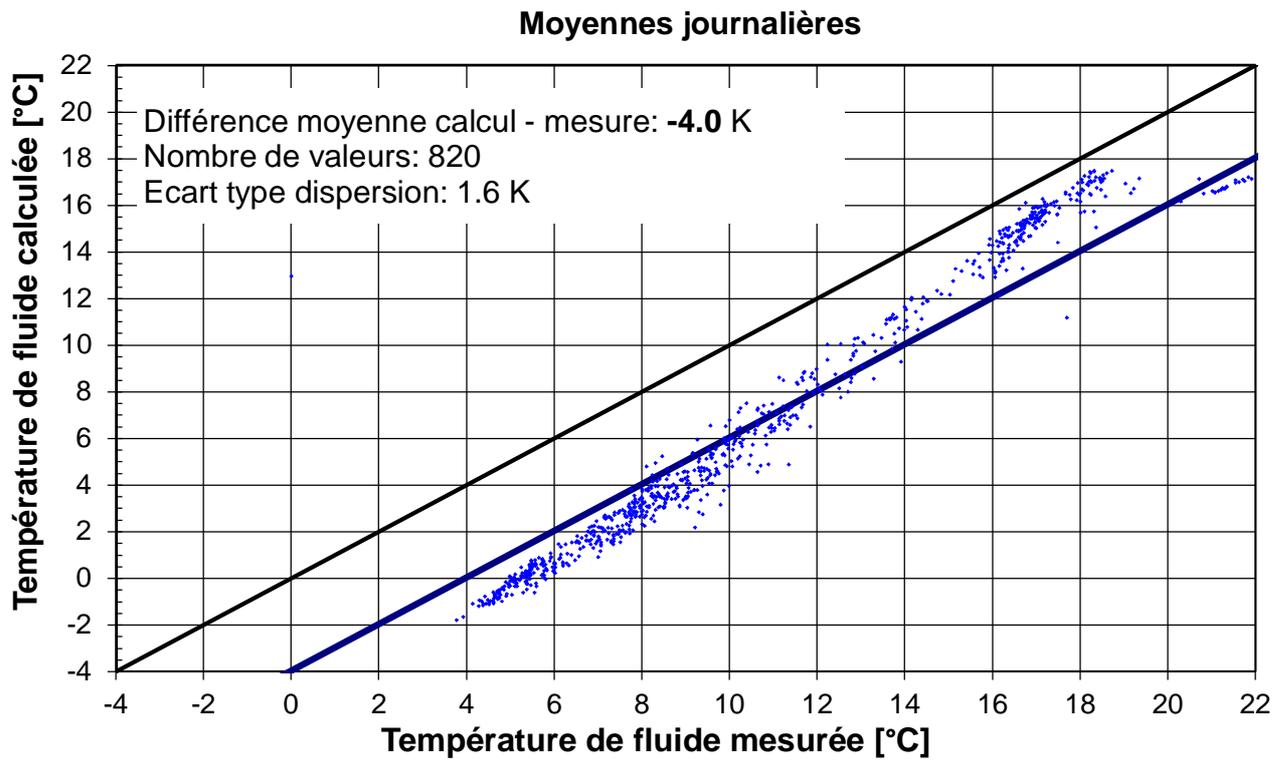


Figure D2.3 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 4 pour la variante nominale.

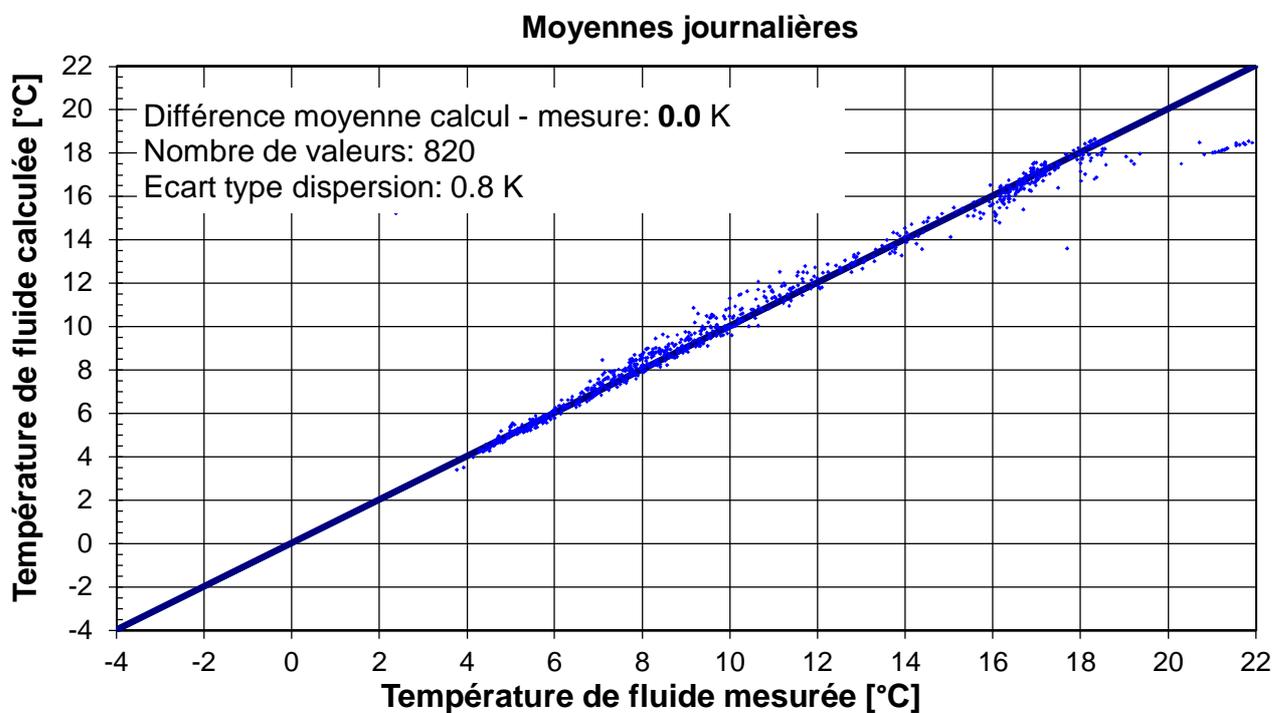


Figure D2.4 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 4 pour la variante calibrée. Cette dernière prend en compte les effets capacitifs du circuit des sondes géothermiques.

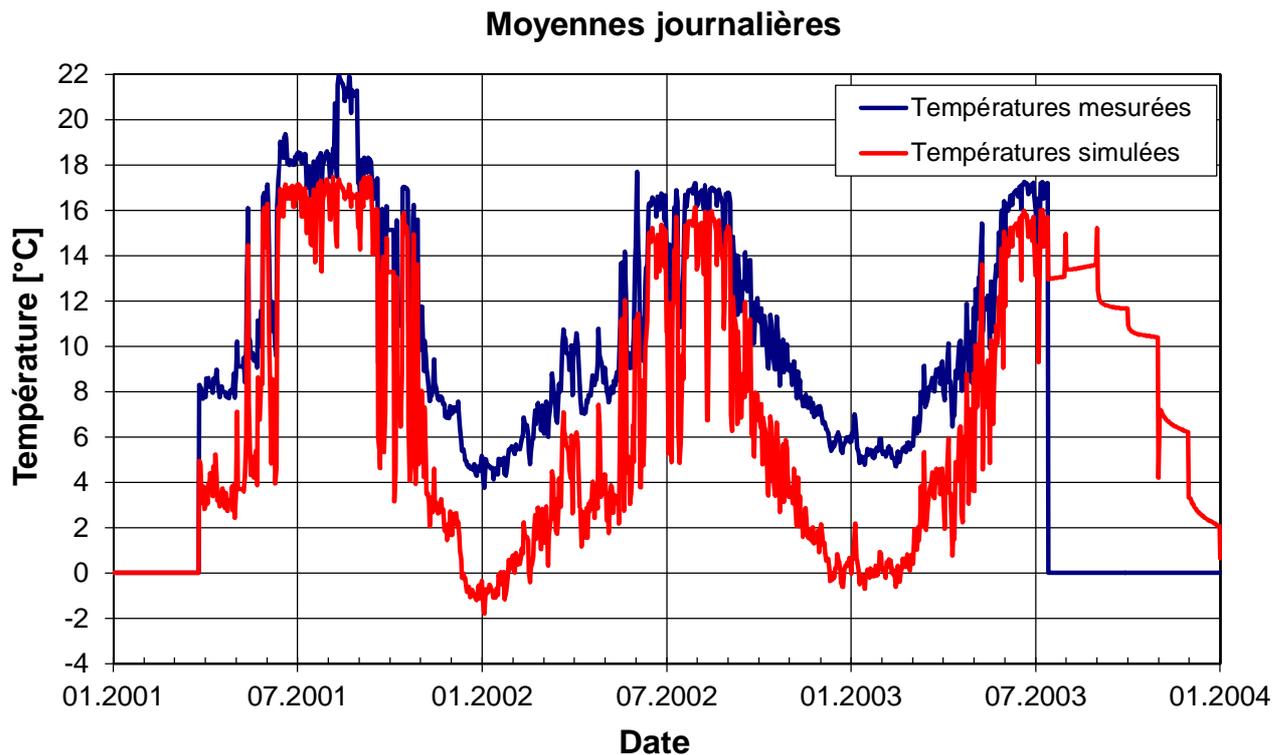


Figure D2.5 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 4 (variante nominale).

D2.3. Analyse de sensibilité

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des sondes (variante Lam), les variations suivantes sont évaluées afin de quantifier leurs effets cumulés :

- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte en plus de la capacité thermique des sondes (variante Lam+C+H) ;
- les marges de sécurité sur la température initiale et la conductivité thermique du terrain sont levées. Cela signifie qu'elles sont de respectivement 1K et 0.4 W/(mK) plus élevées. Cette variation, cumulée aux variations précédentes, correspond à la variante Lam+C+H+T+L ;
- la température initiale et la conductivité thermique du terrain sont calibrés sur les mesures, en se basant sur l'étude détaillée de cette installation (Pahud et al., 20XX). Cela signifie qu'elles sont de respectivement 14.0°C et de 4 W/(mK) au lieu de 11.7°C et 2.6 W/(mK), comme estimé par les valeurs nominales. Cette variation, cumulée aux variations précédentes, correspond à la variante Lam+C+H+T+L+cal.

Les résultats sont montrés dans la table D2.2.

<p>Variante nominale Lam: Régime d'écoulement laminaire dans les sondes</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -4.0 K Ecart type dispersion : 1.6 K</p>	
<p>Variante Lam+C+H: Transferts thermiques des raccords horizontaux entre les sondes ajoutés</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -2.5 K Ecart type dispersion : 0.9 K</p>	
<p>Variante Lam+C+H+T+L: Effets de la température initiale et de la conductivité thermique du terrain sans marge de sécurité ajoutés</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -1.5 K Ecart type dispersion : 0.7 K</p>	
<p>Variante Lam+C+H+T+L+cal: Température initiale et conductivité thermique du terrain calibrées sur les mesures</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: +0.0 K Ecart type dispersion : 0.8 K</p>	

Table D2.1 Influence des effets cumulés des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 4.

La variante Lam+C+H+T+L montre que la détermination des paramètres de simulation était encore trop pessimiste relativement à la réalité. Les marges de sécurité ont rendu l'écart mesure – simulation encore plus important (variante nominale Lam).

La différence moyenne calcul-mesure est recalculée, pour la variante nominale Lam, en valeurs semestrielles pour distinguer entre la saison d'hiver (du 01 octobre au 01 avril) et la saison d'été (du 01 avril au 01 octobre). Les valeurs obtenues sont montrées dans la table D2.2.

Variante nominale Lam – installation 4			
Différence moyenne calcul-mesure	Moyenne annuelle	Moyenne hivernale	Moyenne estivale
Oct. 2001 – sept. 2002	-4.1 K	-4.8 K	-3.4 K
Oct. 2002 – sept. 2003	-4.4 K	-5.2 K	-2.9 K

Table D2.2 Evolution de la différence moyenne calcul-mesure et distinction entre l'hiver et l'été pour l'installation 4, simulée avec la variante nominale Lam.

Toutefois la différence entre les écarts de température en hiver et en été, observée avec la variante nominale, disparaît avec la variante calibrée. Elle est un signe que les paramètres nominaux sont sensiblement différents des paramètres calibrés. En conséquence le modèle de simulation n'est pas bien paramétré et il ne permet pas de correctement reproduire le comportement thermique réel de l'installation.

D3. Simulation à long terme de l'installation 4

L'installation 4 est simulée sur une cinquantaine d'années pour calculer l'évolution à long terme de la température du fluide dans le circuit hydraulique des sondes. Elle est calculée pour deux cas de figure différents :

- 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 ;

- 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 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.

D3.1. Evolution à long terme avec les paramètres nominaux

Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques correspondent à la variante « nominale Lam » simulée dans la section D2.3 (Analyse de sensibilité). Les valeurs des paramètres sont énumérés dans les sections D1.3 (Géologie) et D1.4 (Sondes géothermiques).

Le profil d'extraction de chaleur type que les sondes doivent satisfaire est déterminé par la demande d'énergie de chaleur annuelle nominale et les caractéristiques nominales de la PAC.

A défaut d'information plus détaillées, la demande de chauffage annuelle nominale est évaluée comme la valeur moyenne des productions annuelles mesurées. Les caractéristiques nominales de la PAC sont prises aux conditions **B0W35** aussi bien pour évaluer la puissance maximum d'extraction de chaleur que l'énergie annuelle extraite. La durée de la puissance de pointe, pour laquelle la température minimum du fluide dans le circuit des sondes est évaluée, est fixée par défaut à 12 h.

Le profil d'extraction de chaleur type est donc caractérisé avec les paramètres suivants :

- demande d'énergie thermique annuelle nominale :	30 MWh/a
- puissance de chauffage nominale de la PAC (B0W35) :	14 kW
- coefficient de performance nominal de la PAC (B0W35) :	4.6 -
- durée maximum de la puissance de pointe :	12 h

Il est montré dans la figure D2.6 avec la distribution mensuelle type mesurée de l'installation 4. La recharge thermique du terrain par geocooling, relativement modeste, n'est pas prise en compte dans le profil annuel nominal.

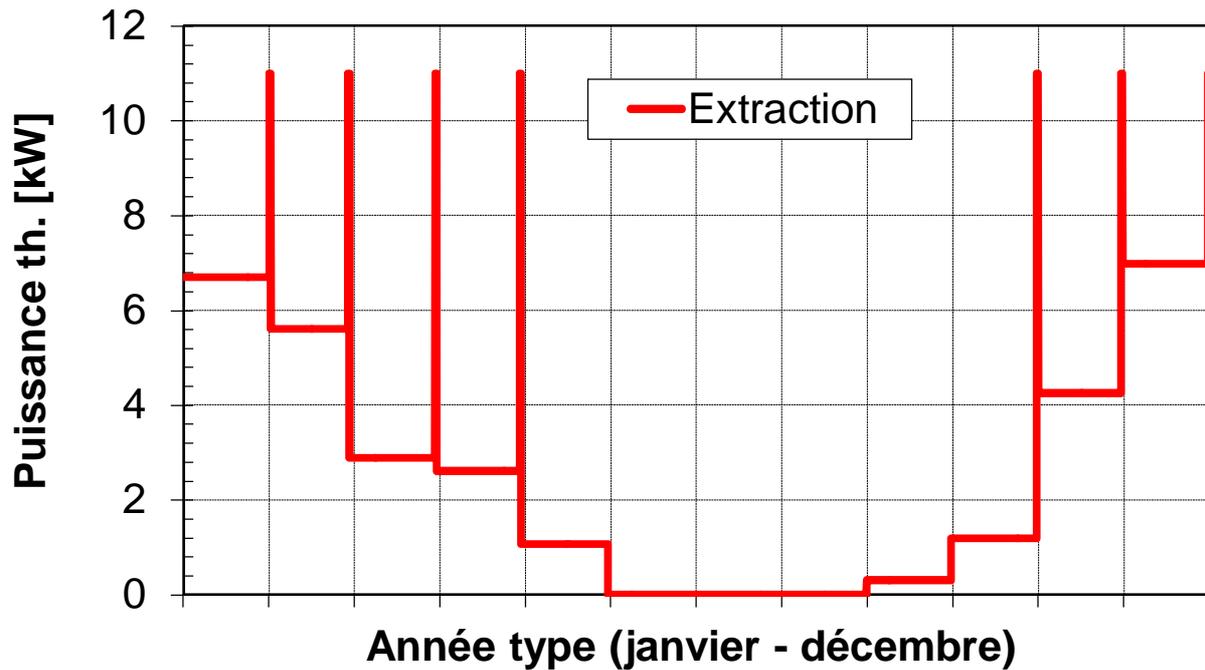


Figure D2.6 Profil d'extraction de chaleur type pour l'installation 4, déterminé avec les caractéristiques nominales des besoins de chaleur.

Le profil d'extraction de chaleur type a les caractéristiques suivantes :

- énergie thermique annuelle extraite des sondes : 23.5 MWh/a
- puissance thermique maximale extraite : 11 kW
- durée maximum de la puissance d'extraction de pointe : 12 h

L'énergie journalière extraite la plus grande en février résulte de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée, et du pulse d'extraction mensuel correspondant. Elle vaut 200 kWh/jour pour le mois de février. Cette énergie est extraite avec l'équivalent d'une durée de fonctionnement de 18h de la PAC à puissance nominale. Ceci permet de définir le paramètre suivant pour caractériser la puissance de pointe des besoins thermiques à satisfaire.

- durée journalière de marche maximum à puissance nominale : 18 h/jour

L'évolution de la température du fluide sur 50 ans est montrée dans la figure D2.7. L'influence de la demande d'énergie annuelle sur la température à long terme est illustrée avec la courbe simulée pour 90% des besoins annuels nominaux. La puissance d'extraction maximum est, quant à elle, maintenue à sa valeur nominale.

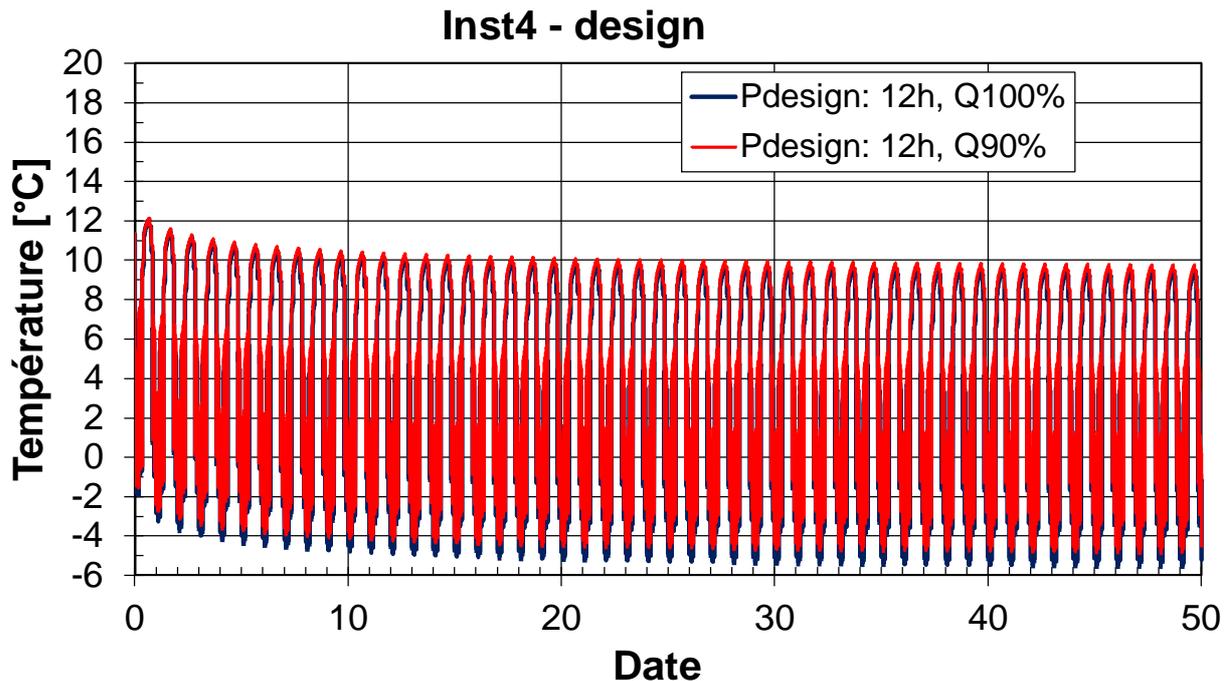


Figure D2.7 Evolution de la température du fluide de l'installation 4, simulée avec les paramètres nominaux de l'installation et les besoins nominaux de chaleur.

Après 50 ans d'exploitation, la **température minimum** du fluide est simulée à :

- 5.5°C avec les paramètres nominaux et la demande de chaleur nominale ;
- 4.8°C en réduisant uniquement l'énergie thermique annuelle de 10%.

D3.2. Evolution à long terme avec les paramètres calibrés

Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques doivent permettre de reproduire les mesures. Ils correspondent à la variante « Lam+C+H+T+L+cal » simulée dans la section D2.3 (Analyse de sensibilité).

Le profil d'extraction de chaleur type que les sondes doivent satisfaire est déterminé sur la base des mesures de l'énergie annuelle extraite, de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée maximum. Les mesures indiquent que l'énergie journalière maximum extraite des sondes correspond à environ 13h de marche à la puissance d'extraction de pointe. En élaborant le profil d'extraction de chaleur comme dans le cas nominal, c'est-à-dire avec des pulses d'extraction moyens mensuels et un pulse d'extraction de pointe, de dernier doit avoir une durée de 5 heures.

La recharge thermique du terrain est également incluse dans le profil annuel type calqué sur les mesures. Ces dernières indiquent que l'énergie journalière maximum injectée dans les sondes correspond à environ 9h de marche à la puissance maximum de 6 kW. En élaborant le profil d'injection de chaleur pendant les trois mois d'été sans chauffage et donc sans extraction de chaleur, c'est-à-dire avec des pulses d'injection moyens mensuels et un pulse d'injection de pointe, la durée de ce dernier est déterminée à 6 heures.

Les caractéristiques qui définissent le profil d'extraction et d'injection type sont indiquées ci-dessous :

- énergie thermique annuelle extraite des sondes :	22.7 MWh/a
- puissance thermique maximale extraite :	13 kW
- durée maximum de la puissance d'extraction de pointe :	5 h
- énergie thermique annuelle injectée dans les sondes :	3.9 MWh/a
- puissance thermique maximale injectée :	6 kW
- durée maximum de la puissance d'injection de pointe :	6 h

L'évolution de la température du fluide sur 50 ans est montrée dans la figure D2.8.

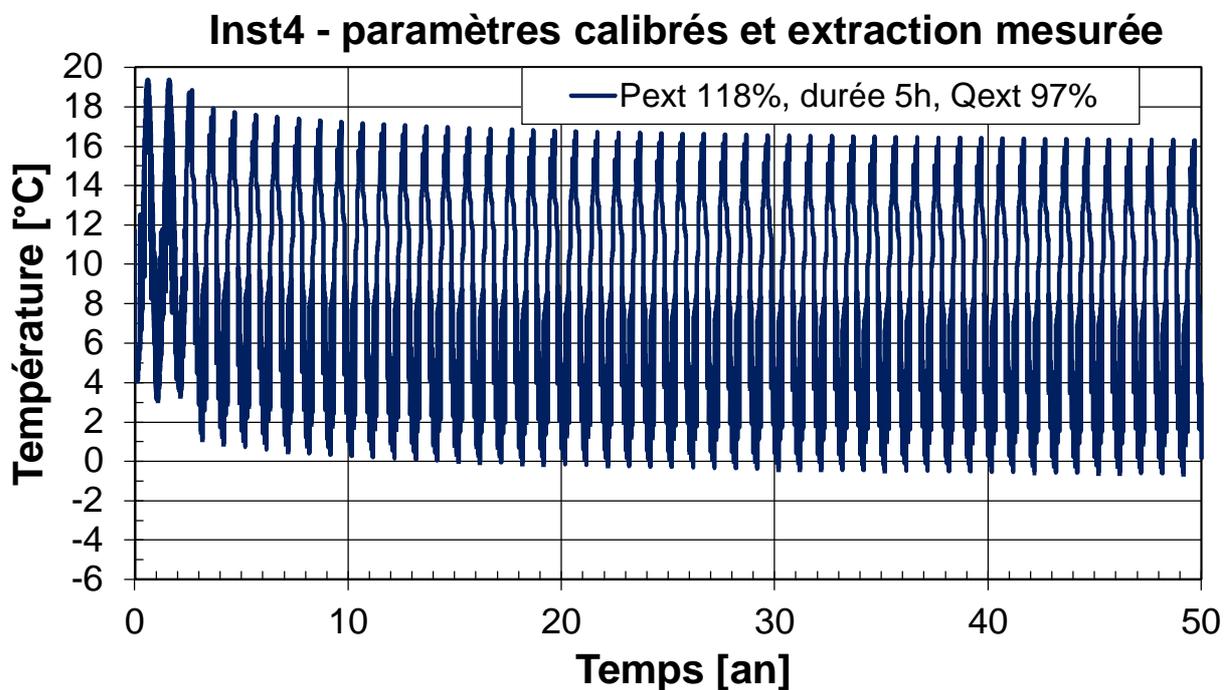


Figure D2.7 Evolution de la température du fluide de l'installation 4, simulée avec les paramètres calibrés de l'installation et les quantités de chaleur annuelles mesurées transférées dans les sondes.

Après 50 ans d'exploitation, la **température minimum** du fluide est simulée à :

-0.5°C avec les paramètres calibrés et les énergies transférées mesurées.

D4. Analyse du profil de chaleur de l'installation 4

Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante calibrée (Lam+C+H+T+L) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

D4.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 4

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante à partir de la deuxième année de fonctionnement. Les températures extrêmes sont obtenues pour 2 hivers consécutifs et 1 été.

<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 12.1 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 8 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 4.6 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 170 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : août</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -5.5 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 4 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -0.7 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -36 kWh</p>	
<p>Année 3:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 11.5 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 5 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 5.6 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 164 kWh</p>	

Table D1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 4. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

D4.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

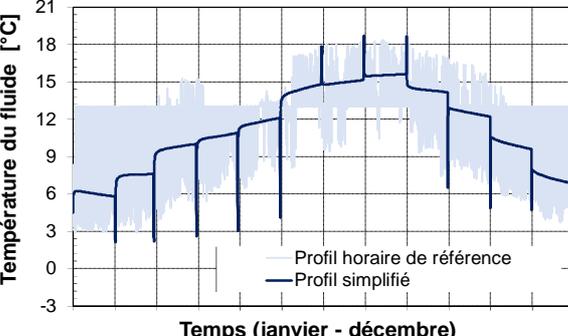
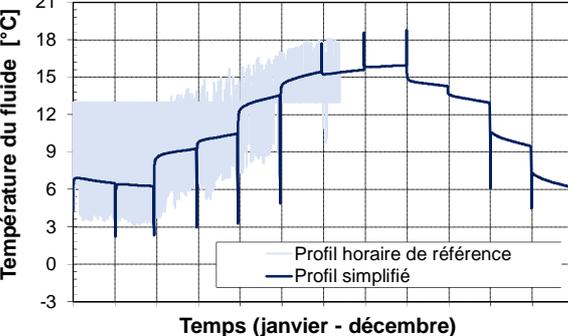
<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Température min. avec profil simplifié : +2.2 °C</p> <p>Température minimum de référence : +2.9 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : -0.7 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : août</p> <p>Température max. avec profil simplifié : +18.4 °C</p> <p>Température maximum de référence : +18.7 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : +0.3 K</p>	 <p>Température du fluide [°C]</p> <p>Temps (janvier - décembre)</p> <p>— Profil horaire de référence</p> <p>— Profil simplifié</p>
<p>Année 3:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Température min. avec profil simplifié : +2.3 °C</p> <p>Température minimum de référence : +3.1 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : -0.8 K</p>	 <p>Température du fluide [°C]</p> <p>Temps (janvier - décembre)</p> <p>— Profil horaire de référence</p> <p>— Profil simplifié</p>

Table D1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 4. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. L'évolution de référence de la température, obtenue avec le profil de chaleur en valeurs horaires, est également indiquée.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 4, la différence est conservatrice et reste inférieure à 1K. La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié est 0.7 à 0.8 K plus basse et la température maximum annuelle est 0.3 K plus haute.

ANNEXE E: Installation 5

Table des matières

E1. Installation 5	2
E1.1. Mesures disponibles	2
E1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques.....	3
E1.3. Géologie	4
E1.4. Sondes géothermiques	5
E2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 5.....	5
E2.1. Température minimum annuelle du fluide	5
E2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide	7
E2.3. Analyse de sensibilité.....	9
E3. Simulation à long terme de l’installation 5	11
E3.1. Evolution à long terme avec les paramètres nominaux	11
E3.2. Evolution à long terme avec les paramètres calibrés.....	13
E4. Analyse du profil de chaleur de l’installation 5	15
E4.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 5.....	15
E4.2. Température de fluide minimum annuelle	16

E1. Installation 5

L'installation 5 fonctionne depuis environ 5 ans. Toutes les mesures sont disponibles en valeurs horaires à partir de la 2^e année de fonctionnement. Pour les années précédentes seul le bilan d'énergie annuel est connu.

E1.1. Mesures disponibles

Les mesures utilisées de l'installation 5 sont :

- températures d'entrée et de sortie de l'évaporateur de la PAC ;
- températures d'entrée et de sortie du condenseur de la PAC ;
- énergie électrique consommée par le compresseur de la PAC ;
- énergie thermique fournie au condenseur de la PAC.

La température de l'air extérieur n'est pas connue et un profil horaire typique du lieu est pris à la place. Les évolutions de la puissance thermique extraite des sondes géothermiques et de la température du fluide caloporteur dans le circuit des sondes, défini comme étant la moyenne des températures aller et retour du fluide, sont établis.

Les valeurs d'énergie sont enregistrées par un système de type M-Bus. Par conséquent les enregistrements ne sont pas toujours synchronisés avec le temps réel des mesures de comptage d'énergie. C'est également le cas des mesures de l'installation 5. Les mesures de l'énergie électrique sont particulièrement faussées et ne permettent pas, avec une résolution temporelle de 1 heure, de suivre correctement le fonctionnement de la PAC. Les valeurs horaires de l'énergie extraite des sondes sont donc déterminées avec le comptage d'énergie mesuré au condenseur de la PAC et le COP. Ce dernier dépend des niveaux de température dans le condenseur et l'évaporateur. La relation de dépendance, établie avec les mesures, est montrée dans la figure E1.1.

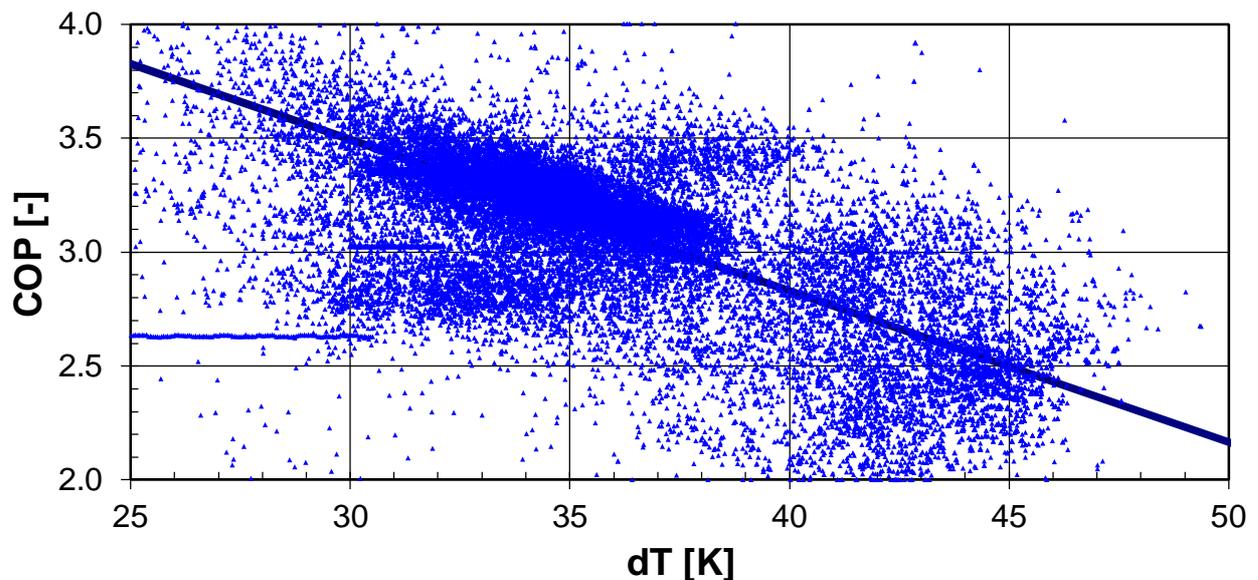
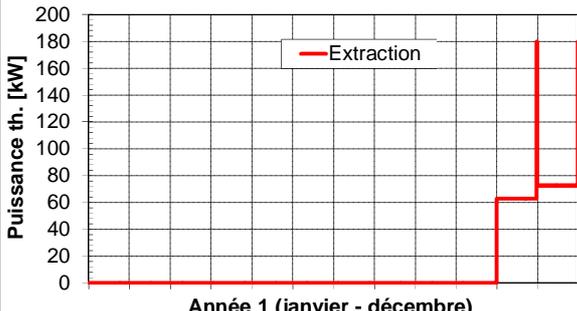
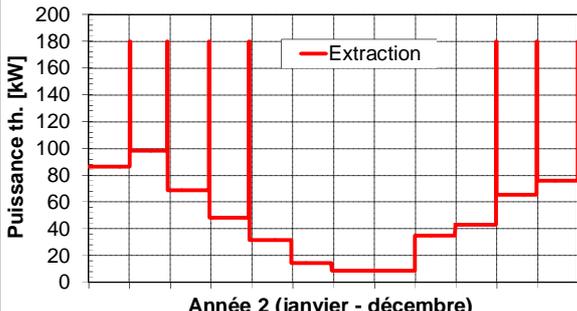
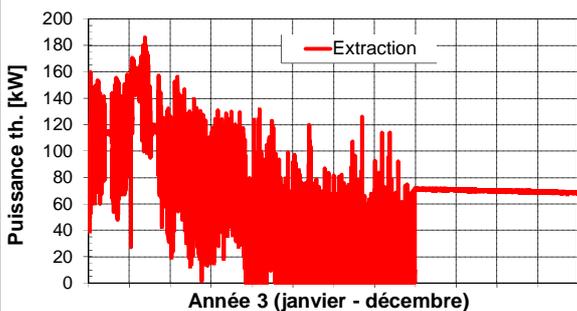


Figure E1.1 Dépendance du COP de la PAC en fonction de la différence de température dT entre l'eau dans le condenseur et le fluide caloporteur dans l'évaporateur (mesures de l'installation 5). Les mesures sont montrées en moyennes sur 10h. La courbe interpolée permet de recalculer l'énergie électrique absorbée au compresseur à partir de l'énergie thermique mesurée au condenseur.

La différence de température dT est la différence de température entre l'eau de chauffage circulant dans le condenseur et le fluide caloporteur du circuit des sondes géothermiques circulant dans l'évaporateur. Les températures de l'eau, respectivement du fluide caloporteur, sont définies comme étant la moyenne arithmétique des températures d'entrée et de sortie du condenseur, respectivement de l'évaporateur. Chaque point représente un COP moyen sur une période de mesure de 10 h. La courbe interpolée du COP permet de recalculer correctement sur toute la période de mesure l'énergie électrique absorbée au compresseur à partir de l'énergie thermique mesurée au condenseur.

E1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques

Les profils d'extraction de chaleur des 2 premières années de fonctionnement sont extrapolés avec des pulses moyens mensuels et une puissance de pointe à la fin de chaque mois, correspondant à la puissance d'extraction de pointe de l'installation. Les mesures en valeurs horaires sont disponibles du mois de janvier de la 2^e année jusqu'au mois d'avril de la 6^e année. Pas de recharge thermique par geocooling n'est pratiquée.

<p>Année 1: Puissance thermique extraite de pointe : 180 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 102 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2: Puissance thermique extraite de pointe : 180 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 434 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3: Puissance extraite de pointe mesurée : 186 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 512 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	 <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>

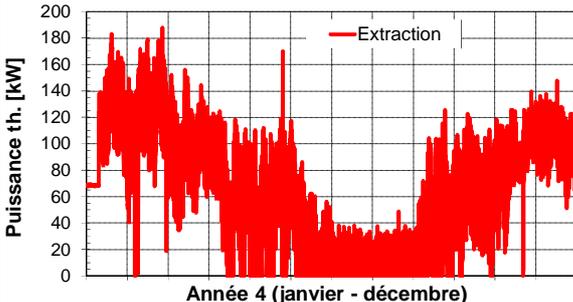
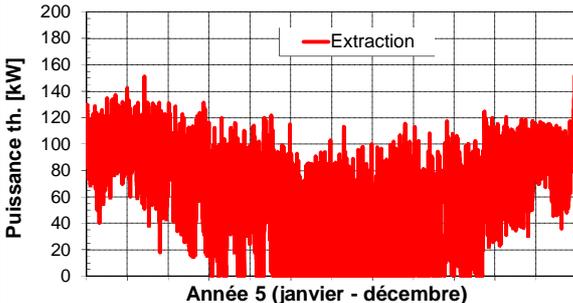
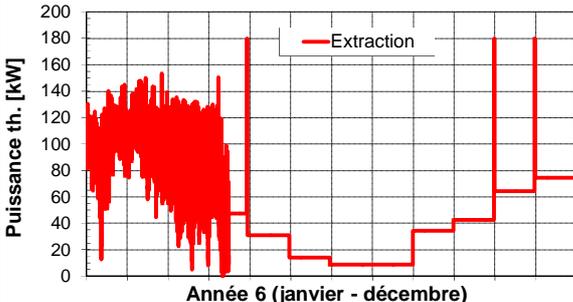
<p>Année 4: Puissance extraite de pointe mesurée : 188 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 510 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	
<p>Année 5: Puissance extraite de pointe mesurée : 151 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 426 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	
<p>Année 6: Puissance extraite de pointe mesurée : 154 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 451 MWh/a Température air extérieur du lieu: 9.7 °C</p>	

Table E1.1 Profils horaires extrapolés et mesurés de la puissance thermique extraite des sondes géothermiques pour les 6 premières années de fonctionnement de l'installation 5.

E1.3. Géologie

La conductivité thermique moyenne du terrain est déterminée sur la base d'un profil géologique attendu des types de roche et des épaisseurs correspondantes. Les valeurs de calcul recommandées de la norme SIA 384/6 sont choisies. Elles contiennent donc la marge de sécurité correspondante pour la détermination de la conductivité thermique du terrain.

La température initiale du terrain vers la surface, estimée par les procédures proposées dans la norme SIA 384/6, est diminuée par la marge de sécurité de 1 K pour un dimensionnement en chauffage.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain : 2.3 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain : 2.1 MJ/(m³K)
- température initiale du terrain vers la surface : 9.9 °C
- gradient de température géothermique : 30 K/km

E1.4. Sondes géothermiques

Le système utilise 20 sondes géothermiques de 250 m chacune, placées sous le bâtiment. La disposition des sondes n'est pas parfaitement régulière. Elle est équivalente à un placement des sondes sur deux lignes avec un espacement d'environ 10m entre les sondes et les lignes. Le débit total nominal dans le circuit des sondes est d'environ 50 m³/h. Le débit par sonde est de l'ordre de 2.5 m³/h. La concentration d'antigel, inférieure à 30%, permet d'avoir un régime d'écoulement turbulent dans les tubes des sondes (double-U avec un tube HDPE de diamètre externe de 40mm).

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement turbulent dans les sondes et un débit nominal de 50 m³/h dans le circuit des sondes.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux sondes géothermiques sont :

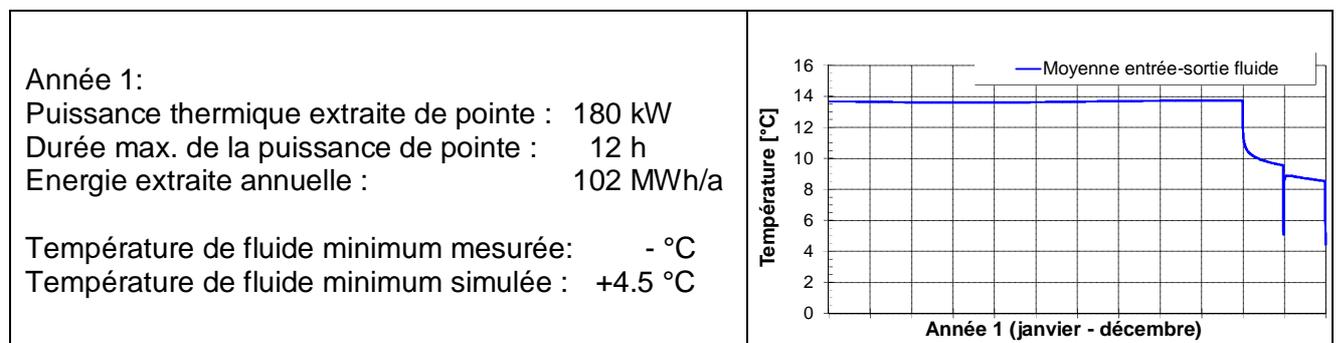
- nombre de sondes géothermiques :	20 (placement équivalent à deux lignes ¹⁾)
- profondeur des sondes géothermiques :	250 m
- espacement entre les sondes :	10 m en moyenne ¹⁾
- diamètre d'une sonde (forage):	0.135 m
- type de sonde :	double-U
- résistance thermique de la sonde Rb :	0.069 K/(W/m) (régime turbulent)
- résistance thermique interne de la sonde Ra :	0.276 K/(W/m) (régime turbulent)

¹⁾ dans les simulations, le placement exact des sondes est pris en compte.

E2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 5

E2.1. Température minimum annuelle du fluide

La température minimum annuelle du fluide est calculée et comparée avec les mesures quand elle est disponible, c'est-à-dire à partir de la 3^e année de fonctionnement. Les résultats sont montrés dans la table E2.1. Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table E2.1.



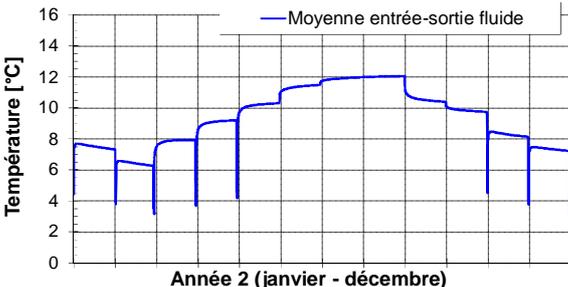
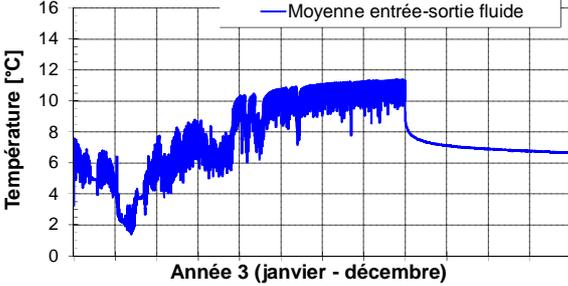
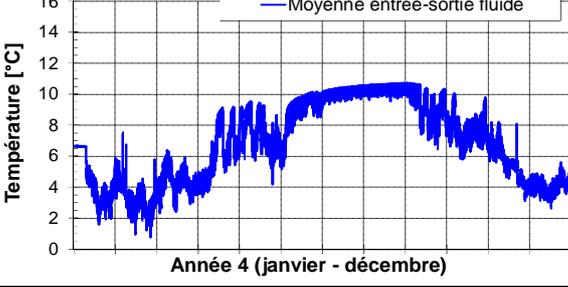
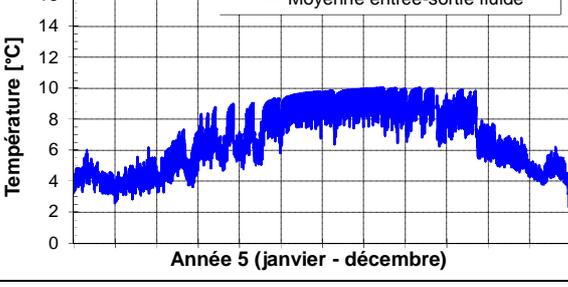
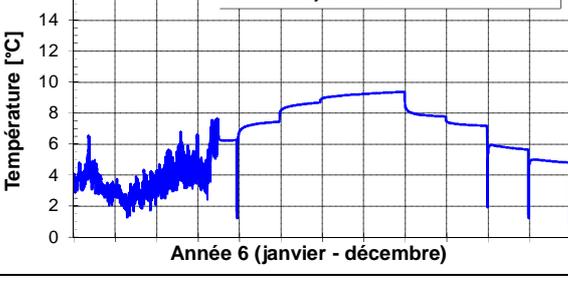
<p>Année 2: Puissance thermique extraite de pointe : 180 kW Durée max. de la puissance de pointe : 12 h Energie extraite annuelle : 434 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : +3.2 °C</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3: Puissance thermique extraite de pointe : 186 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 512 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +6.3 °C Température de fluide minimum simulée : +1.4 °C</p>	 <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 4: Puissance thermique extraite de pointe : 188 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 510 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +5.5 °C Température de fluide minimum simulée : +0.8 °C</p>	 <p>Année 4 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 5: Puissance extraite de pointe mesurée : 151 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 426 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +5.9 °C Température de fluide minimum simulée : +2.3 °C</p>	 <p>Année 5 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 6: Puissance extraite de pointe mesurée : 154 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 451 MWh/a</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +5.1 °C Température de fluide minimum simulée : +1.3 °C</p>	 <p>Année 6 (janvier - décembre)</p>

Table E2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques pour les 6 premières années de fonctionnement de l'installation 5. Les valeurs minimums annuelles simulées sont également indiquées, avec la valeur mesurée correspondante quand elle est disponible.

E2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique E2.1 et en moyennes journalières dans le graphique E2.2. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières.

L'écart moyen entre les valeurs simulées et mesurées est de -3.2 K pour les valeurs horaires et -3.1 K pour les moyennes journalières. Un écart négatif signifie que les valeurs simulées sont inférieures aux valeurs mesurées.

L'évolution des températures mesurées et simulées est montrée en valeurs journalières dans le graphique E2.3 et en valeurs horaires dans le graphique E2.4.

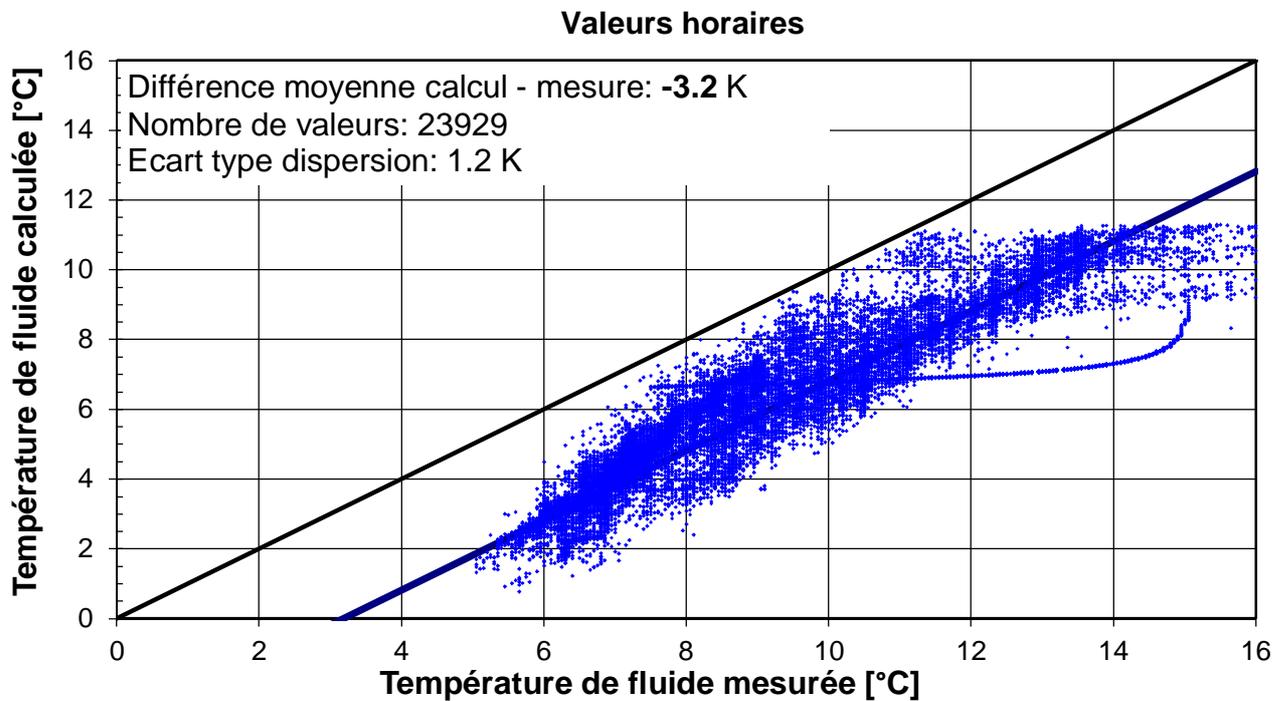


Figure E2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 5.

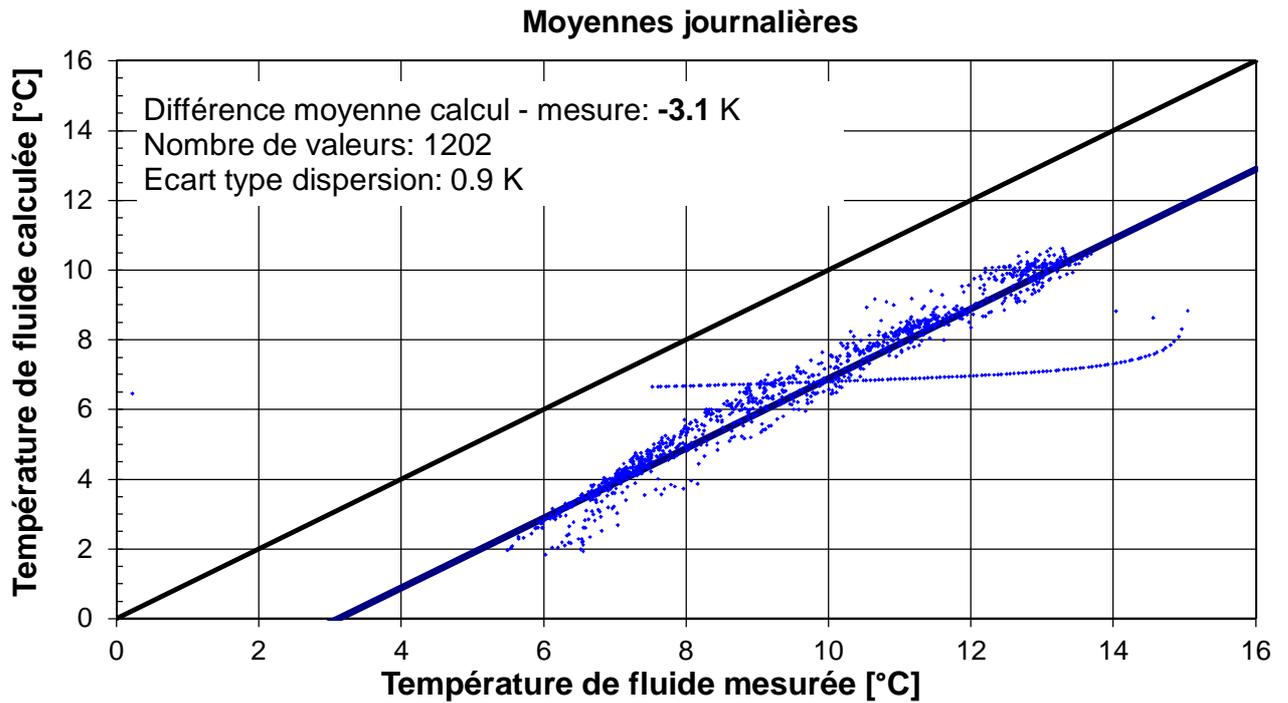


Figure E2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 5.

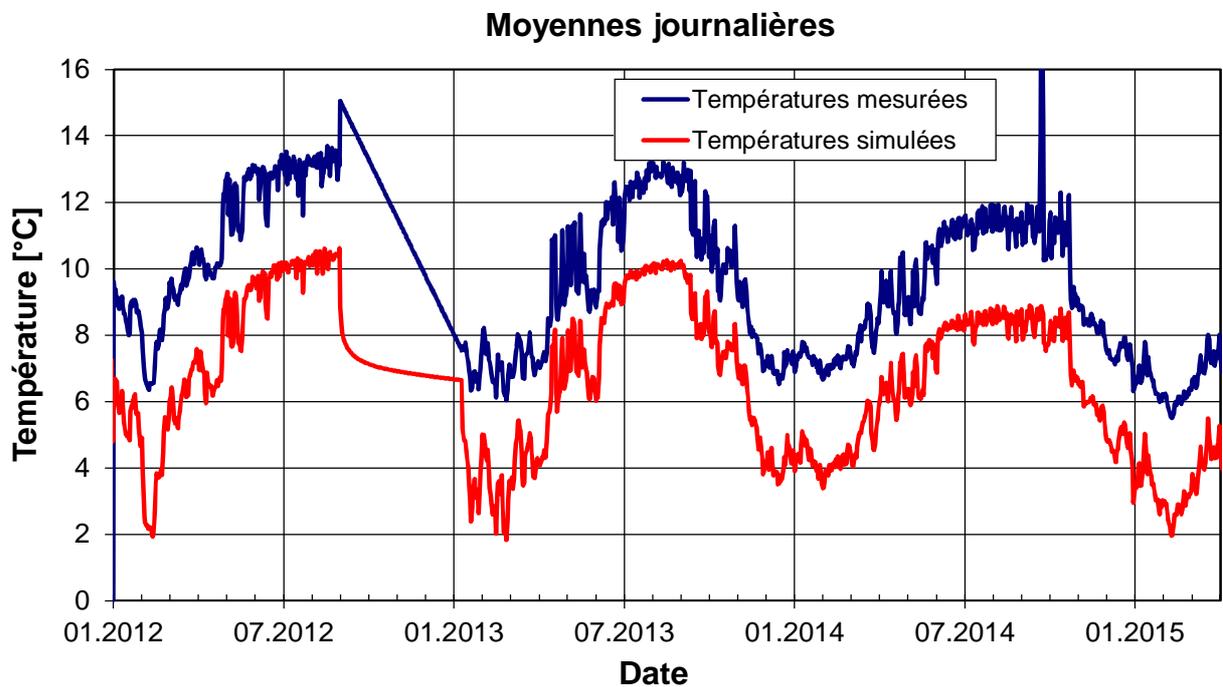


Figure E2.3 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 5.

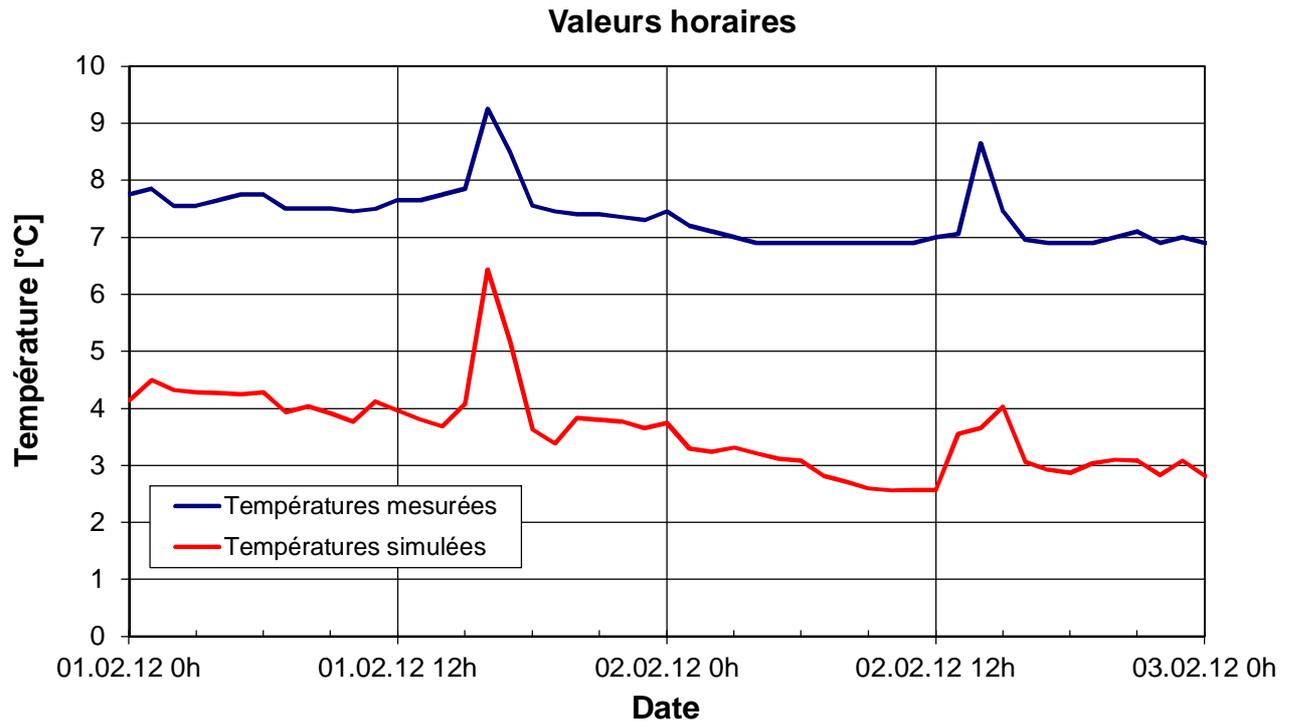


Figure E2.4 Evolution en valeurs horaires des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 5.

E2.3. Analyse de sensibilité

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des sondes (variante Turb), les variations suivantes sont évaluées afin de quantifier leurs effets cumulés :

- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte de même que la capacité thermique des sondes (variante Turb+C+H) ;
- les marges de sécurité sur la température initiale et la conductivité thermique du terrain sont levées. Cela signifie qu'elles sont de respectivement 1K et 0.2 W/(mK) plus élevées. Ces variations, cumulées aux variations précédentes, correspondent à la variante Turb+C+H+T+L ;
- la conductivité thermique du terrain est ajustée pour que les simulations puissent reproduire au mieux les mesures en extraction de chaleur. La marge de sécurité sur la température initiale et la simulation des transferts thermiques des raccords horizontaux et de la capacité thermique des sondes sont maintenus. Relativement à la variante nominale (variante Turb), la conductivité thermique du terrain est augmentée de 2.3 à 3.2 W/(mK). Cette variante est la variante Turb+C+H+T+L+cal ;

Les résultats sont montrés dans la table E2.2.

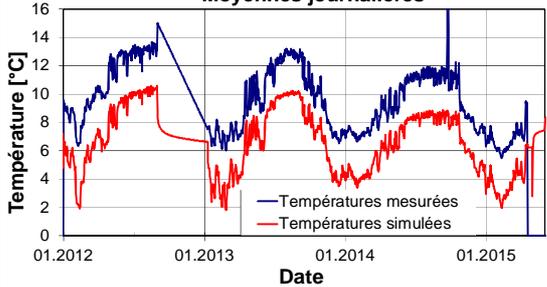
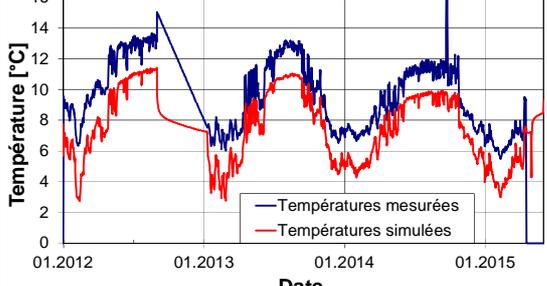
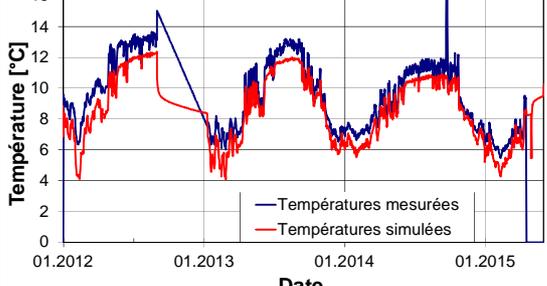
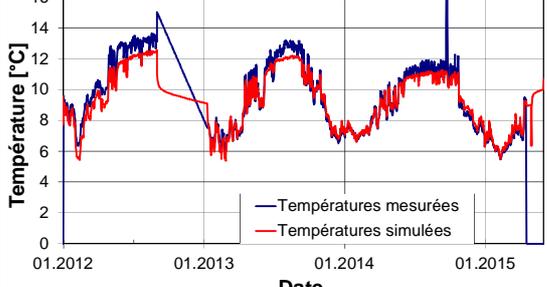
<p>Variante nominale Turb: Régime d'écoulement turbulent dans les sondes</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -3.1 K Ecart type dispersion : 0.9 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 
<p>Variante Turb+C+H: Capacité thermique des sondes et transferts thermiques des raccords horizontaux entre les sondes ajoutés</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -2.2 K Ecart type dispersion : 1.0 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 
<p>Variante Turb+C+H+T+L: Effets de la température initiale et de la conductivité thermique du terrain sans marge de sécurité ajoutés</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -1.1 K Ecart type dispersion : 0.9 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 
<p>Variante Turb+C+H+T+L+cal: Conductivité thermique du terrain ajustée pour reproduire les mesures en extraction de chaleur</p> <p>Différence moyenne calcul-mesure: -0.4 K Ecart type dispersion : 1.0 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 

Table E2.1 Influence des effets cumulés des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 5.

La variante Turb+C+H+T+L montre que la détermination des paramètres de simulation était trop pessimiste relativement à la réalité. Afin d'avoir un paramétrage du modèle de simulation qui permette de reproduire les mesures en extraction de chaleur, la conductivité thermique du terrain est augmentée de 2.5 W/(mK) (variante Turb+C+H+T+L) à 3.2 W/(mK) (variante Turb+C+H+T+L+cal). Cette variante est utilisée dans la section suivante pour évaluer l'abaissement de température à long terme avec le modèle de simulation calibré sur les mesures.

E3. Simulation à long terme de l'installation 5

L'installation 5 est simulée sur une cinquantaine d'années pour calculer l'évolution à long terme de la température du fluide dans le circuit hydraulique des sondes. Elle est calculée pour deux cas de figure différents :

- 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 ;

- 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 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.

E3.1. Evolution à long terme avec les paramètres nominaux

Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques correspondent à la variante « nominale Turb » simulée dans la section E2.3 (Analyse de sensibilité). Les valeurs des paramètres sont énumérés dans les sections E1.3 (Géologie) et E1.4 (Sondes géothermiques).

Le profil d'extraction de chaleur type que les sondes doivent satisfaire est déterminé par la demande d'énergie de chaleur annuelle nominale et les caractéristiques nominales de la PAC.

La demande d'énergie thermique de chauffage nominale est connue par la valeur fixée dans le contrat d'« energy contracting ». Cette valeur est légèrement inférieure aux valeurs mesurées (voir section suivante pour la valeur moyenne annuelle mesurée). Les caractéristiques nominales de la PAC sont extrapolées aux conditions **B0W35** aussi bien pour évaluer la puissance maximum d'extraction de chaleur que l'énergie annuelle extraite. La durée de la puissance de pointe, pour laquelle la température minimum du fluide dans le circuit des sondes est évaluée, est fixée par défaut à 12 h.

Le profil d'extraction de chaleur type est donc caractérisé avec les paramètres suivants :

- demande d'énergie thermique annuelle nominale :	427 MWh/a
- puissance de chauffage nominale de la PAC (B0W35) :	230 kW
- coefficient de performance nominal de la PAC (B0W35) :	4.6 -
- durée maximum de la puissance de pointe :	12 h

Il est montré dans la figure E2.6 avec la distribution mensuelle type mesurée de l'installation 5. Pas de recharge thermique du terrain n'est prévue.

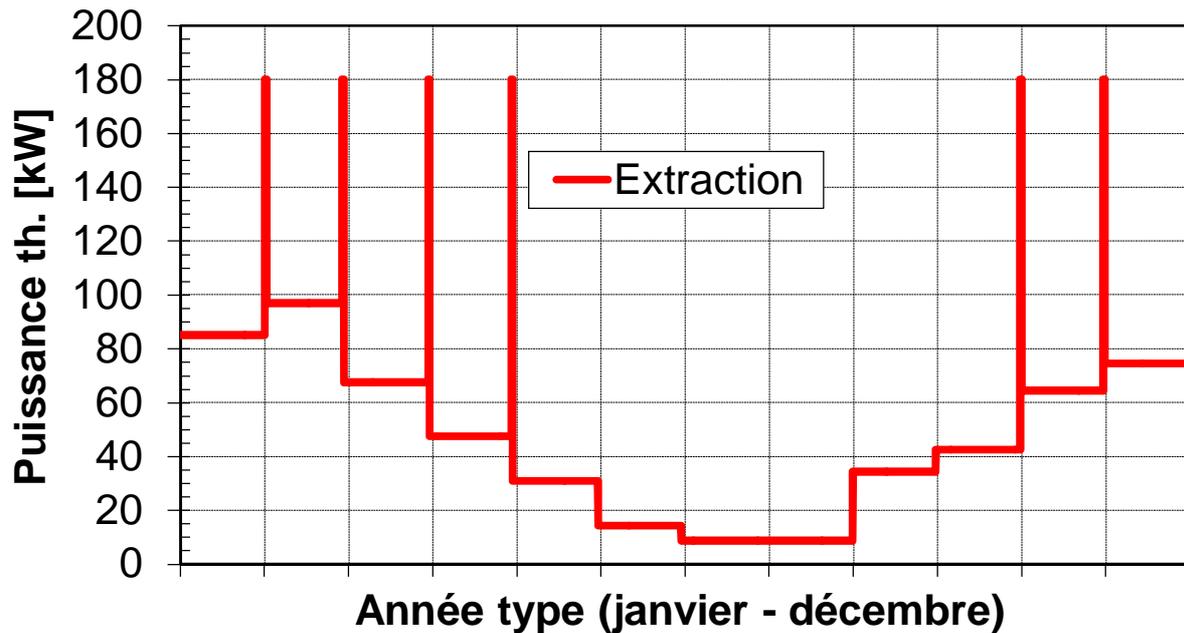


Figure E2.6 Profil d'extraction de chaleur type pour l'installation 5, déterminé avec les caractéristiques nominales des besoins de chaleur.

Le profil d'extraction de chaleur type a les caractéristiques suivantes :

- énergie thermique annuelle extraite des sondes : 427 MWh/a
- puissance thermique maximale extraite : 180 kW
- durée maximum de la puissance d'extraction de pointe : 12 h

L'énergie journalière extraite la plus grande résulte de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée, et du pulse d'extraction mensuel correspondant. Elle est calculée à environ 3'300 kWh/jour. Cette énergie est extraite avec l'équivalent d'une durée de fonctionnement de 18h de la PAC à puissance nominale. Ceci permet de définir le paramètre suivant pour caractériser la puissance de pointe des besoins thermiques à satisfaire.

- durée journalière de marche maximum à puissance nominale : 18 h/jour

L'évolution de la température du fluide sur 50 ans est montrée dans la figure E2.7. L'influence de la demande d'énergie annuelle sur la température à long terme est illustrée avec la courbe simulée pour 90% des besoins annuels nominaux. La puissance d'extraction maximum est, quant à elle, maintenue à sa valeur nominale.

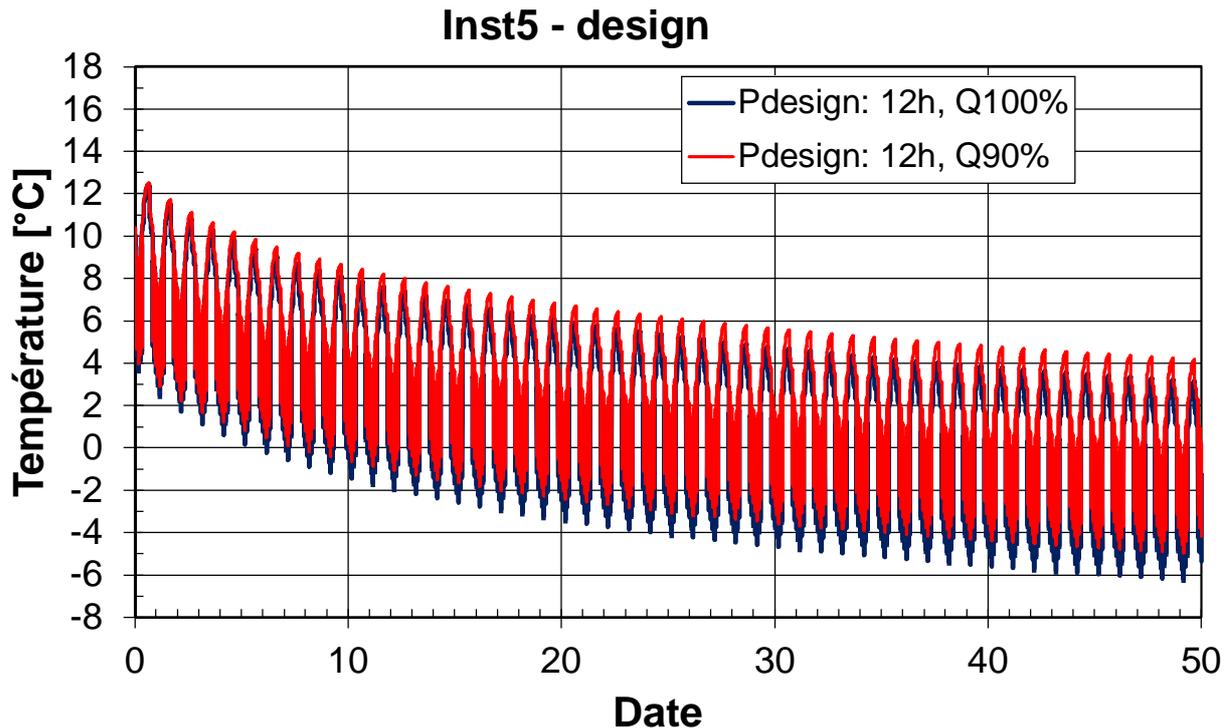


Figure E2.7 Evolution de la température du fluide de l'installation 5, simulée avec les paramètres nominaux de l'installation et les besoins nominaux de chaleur.

Après 50 ans d'exploitation, la **température minimum** du fluide est simulée à :

- 6.2°C avec les paramètres nominaux et la demande de chaleur nominale ;
- 4.9°C en réduisant uniquement l'énergie thermique annuelle de 10%.

E3.2. Evolution à long terme avec les paramètres calibrés

Les paramètres utilisés pour la simulation du terrain et des sondes géothermiques doivent permettre de reproduire les mesures. Ils correspondent à la variante « Turb+C+H+T+L+cal » simulée dans la section E2.3 (Analyse de sensibilité).

Le profil d'extraction de chaleur type que les sondes doivent satisfaire est déterminé sur la base des mesures de l'énergie annuelle extraite, de la puissance d'extraction de pointe et de sa durée maximum. Les mesures indiquent que l'énergie journalière maximum extraite des sondes correspond à environ 18h de marche à la puissance d'extraction de pointe. En élaborant le profil d'extraction de chaleur comme dans le cas nominal, c'est-à-dire avec des pulses d'extraction moyens mensuels et un pulse d'extraction de pointe, ce dernier doit avoir une durée de 10 heures.

Les caractéristiques qui définissent le profil d'extraction et d'injection type sont indiquées ci-dessous :

- | | |
|--|-----------|
| - énergie thermique annuelle extraite des sondes : | 473 MWh/a |
| - puissance thermique maximale extraite : | 180 kW |
| - durée maximum de la puissance d'extraction de pointe : | 10 h |

L'énergie annuelle extraite mesurée des sondes est environ 10% plus grande que la valeur nominale, et ceci malgré le fait que le COP annuel mesuré (3.1 – 3.2) est sensiblement plus bas que celui fixé pour la détermination du profil nominal (COP de 4.6).

L'évolution de la température du fluide sur 50 ans est montrée dans la figure E2.8.

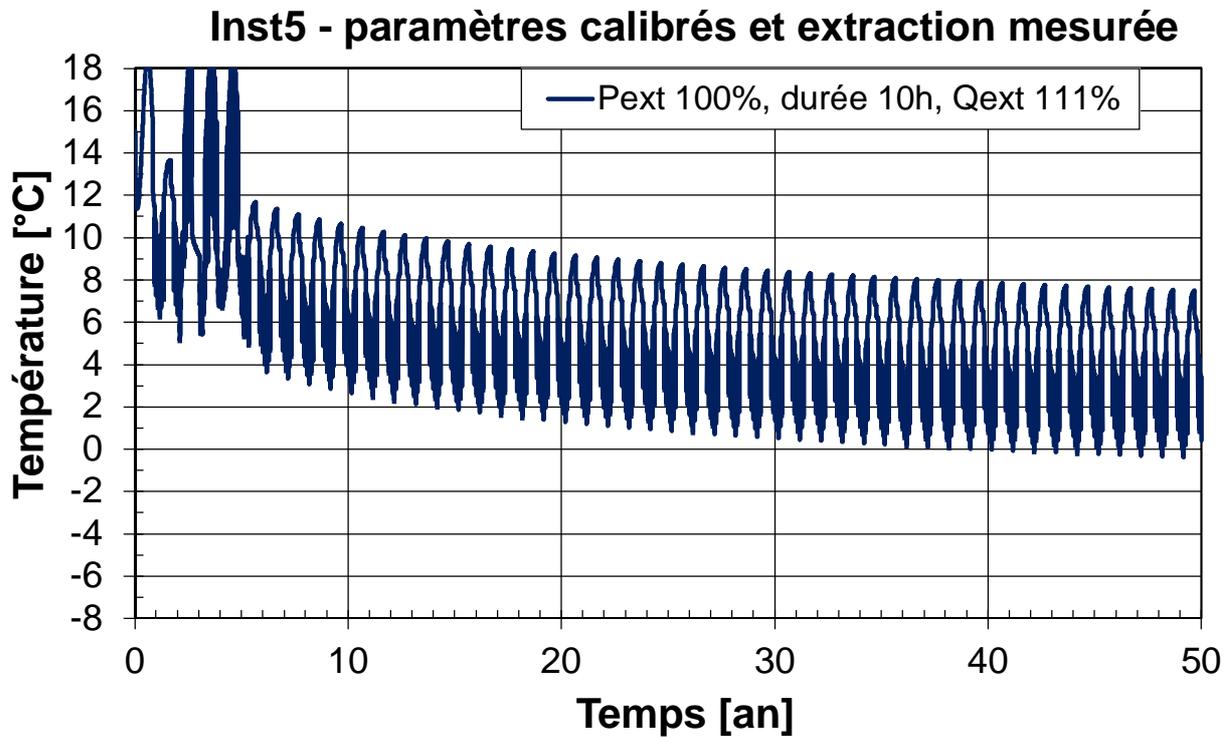


Figure E2.7 Evolution de la température du fluide de l'installation 5, simulée avec les paramètres calibrés de l'installation et les quantités de chaleur annuelles mesurées transférées dans les sondes.

Après 50 ans d'exploitation, la **température minimum** du fluide est simulée à :

-0.4°C avec les paramètres calibrés et les énergies transférées mesurées.

E4. Analyse du profil de chaleur de l'installation 5

Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante calibrée (Turb+C+H+T+L+cal) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

E4.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 5

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante à partir de la quatrième année de fonctionnement. Comme l'installation fonctionne seulement en extraction de chaleur, seules les températures minimums peuvent être comparées. Les valeurs minimums de 3 hivers consécutifs sont comparées.

<p>Année 4: Mois conduisant à température min. : février Puissance thermique extraite de pointe : 178 kW Durée max. de la puissance de pointe : 11 h Pulse moyen mensuel extrait : 116 kW Energie max. journalière extraite : 3466 kWh</p>	
<p>Année 5: Mois conduisant à température min. : janvier Puissance thermique extraite de pointe : 142 kW Durée max. de la puissance de pointe : 8 h Pulse moyen mensuel extrait : 92 kW Energie max. journalière extraite : 2608 kWh</p>	

<p>Année 6: Mois conduisant à température min. : février Puissance thermique extraite de pointe : 138 kW Durée max. de la puissance de pointe : 14 h Pulse moyen mensuel extrait : 106 kW Energie max. journalière extraite : 2992 kWh</p>	
---	--

Table E1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 5. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

E4.2. Température de fluide minimum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

<p>Année 4: Mois conduisant à température min. : février Température min. avec profil simplifié : +5.2 °C Température minimum de référence : +5.1 °C Différence profil simplifié - réel : +0.1 K</p>	
<p>Année 5: Mois conduisant à température min. : janvier Température min. avec profil simplifié : +5.8 °C Température minimum de référence : +6.1 °C Différence profil simplifié - réel : -0.3 K</p>	

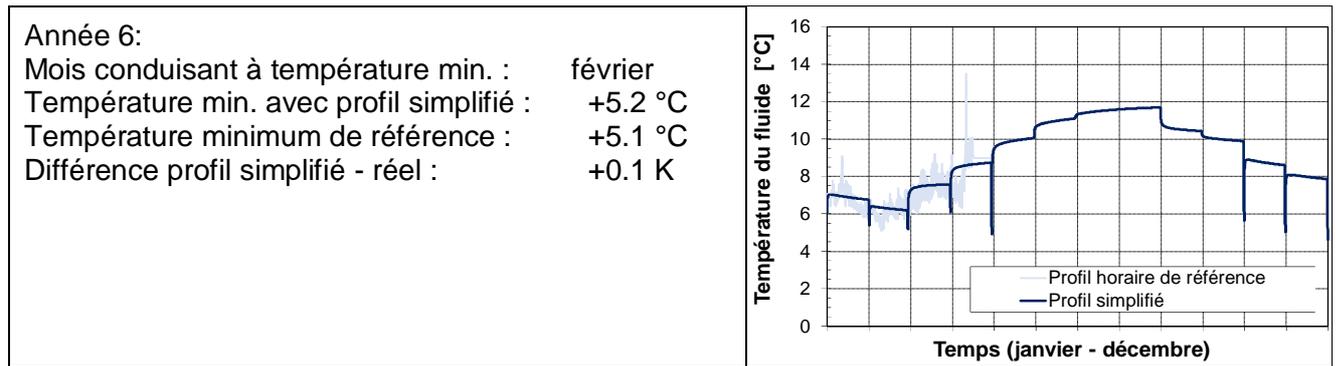


Table E1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 5. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum annuelle. L'évolution de référence de la température, obtenue avec le profil de chaleur en valeurs horaires, est également indiquée.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une petite différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 5, la différence n'est pas nécessairement conservatrice mais elle n'est pas significative. La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié diffère de respectivement +0.1, -0.3 et +0.1 K de la température minimum de référence pour les 3 années consécutives mesurées. Une différence positive signifie que la simulation a sous-estimé l'abaissement de température. La sous-estimation reste, avec le profil de chaleur simplifié, négligeable.

ANNEXE F: Installation 6

Table des matières

F1. Installation 6	2
F1.1. Mesures disponibles	2
F1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques.....	2
F1.3. Géologie	3
F1.4. Sondes géothermiques	3
F2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 6.....	4
F2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide	4
F2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide	5
F2.3. Analyse de sensibilité.....	7
F3. Analyse du profil de chaleur de l’installation 6	9
F3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 6.....	9
F3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle	10

F1. Installation 6

L'installation 6 fonctionne depuis plus de 2 ans. Toutes les mesures sont disponibles en valeurs horaires depuis la mise en service de l'installation.

F1.1. Mesures disponibles

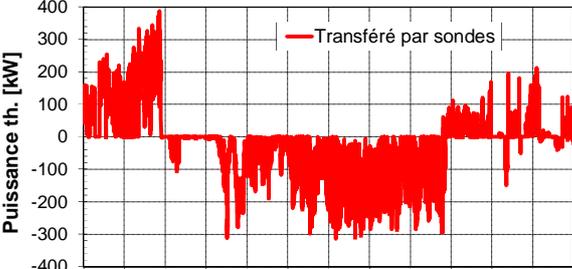
Les mesures disponibles de l'installation 6 sont :

- températures d'entrée et de sortie du champ de sondes géothermiques ;
- puissance thermique transférée par les sondes (+ extraction, - injection) ;
- température de l'air extérieur.

L'évolution de la puissance thermique transférée (extraite ou injectée) dans les sondes géothermiques, ainsi que celle de la température du fluide caloporteur dans le circuit des sondes, définie par la moyenne des températures aller et retour du fluide, résultent directement des mesures.

F1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques

Les profils d'extraction et d'injection de chaleur sont montrés dans la table F1.1 pour la durée de fonctionnement de l'installation.

<p>Année 1</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 390 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 225 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -310 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -362 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : -137 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 10.7 °C</p>	 <p>Puissance th. [kW]</p> <p>— Transféré par sondes</p> <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 240 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 184 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -330 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -135 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : +49 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 12.3 °C</p>	 <p>Puissance th. [kW]</p> <p>— Transféré par sondes</p> <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

<p>Année 3</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 190 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 43 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -120 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -38 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : +5 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 10.6 °C</p>	
--	--

Table F1.1 Profils horaires mesurés de la puissance thermique extraite (+) et injectée (-) dans les sondes géothermiques pour les 2.5 premières années de fonctionnement de l'installation 6.

F1.3. Géologie

Les paramètres du terrain ont été obtenus avec un test de réponse étendu (e-TRT), effectué sur une sonde test posée dans le volume de terrain occupé par le champ de sondes. Il permet également la détermination du gradient de température géothermique. Comme les simulations sont effectuées aussi bien pour des périodes d'extraction que d'injection de chaleur, pas de marge de sécurité n'est prise sur la température initiale du terrain. D'autre part, s'agissant d'un test de réponse étendu réalisé avec la meilleure précision possible, pas de marge de sécurité n'est appliquée sur la valeur de conductivité thermique du terrain.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain : 3.1 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain : 2.1 MJ/(m³K)
- température initiale du terrain vers la surface : 10.3 °C
- gradient de température géothermique : 32 K/km

F1.4. Sondes géothermiques

Le système utilise un champ de 54 sondes géothermiques de 200 m chacune placées sous un bâtiment. La disposition des sondes est relativement bien régulière. Elle correspond à une disposition compacte des sondes avec un espacement de 5m entre elles. Le débit total nominal dans le circuit des sondes est d'environ 100 m³/h. Toutes les sondes sont couplées en parallèle et donc le débit par sonde est de l'ordre de 2 m³/h. Comme de l'eau pure est utilisée dans le circuit hydraulique des sondes, le régime d'écoulement dans les tubes des sondes est turbulent (double-U avec un tube HDPE de diamètre externe de 40mm).

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement turbulent dans les sondes et un débit nominal de 90 m³/h dans le circuit des sondes.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux sondes géothermiques sont :

- nombre de sondes géothermiques :	54
- profondeur des sondes géothermiques :	200 m
- espacement entre les sondes :	5 m ¹⁾
- diamètre d'une sonde (forage):	0.135 m
- type de sonde :	double-U
- résistance thermique de la sonde Rb ²⁾ :	0.088 K/(W/m) (régime turbulent)
- résistance thermique interne de la sonde Ra :	0.275 K/(W/m) (régime turbulent)

¹⁾ dans les simulations, le placement exact des sondes est pris en compte ;

²⁾ la résistance thermique de la sonde résulte du test de réponse.

F2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 6

F2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide

Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table F2.1.

<p>Année 1 Puissance thermique extraite de pointe : 390 kW Puissance thermique injectée de pointe : -310 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : +4.5 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +19.1 °C Température de fluide maximum simulée : +20.5 °C</p>	<p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2 Puissance thermique extraite de pointe : 240 kW Puissance thermique injectée de pointe : -330 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +9.7 °C Température de fluide minimum simulée : +8.8 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +18.3 °C Température de fluide maximum simulée : +18.6 °C</p>	<p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3 Puissance thermique extraite de pointe : 190 kW Puissance thermique injectée de pointe : -120 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +11.2 °C Température de fluide minimum simulée : +10.5 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +15.2 °C Température de fluide maximum simulée : +16.0 °C</p>	<p>Année 3 (janvier - décembre)</p>

Table F2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques pour les 2.5 premières années de fonctionnement de l'installation 6. Les valeurs minimums et maximums annuelles simulées sont également indiquées, avec la valeur mesurée correspondante quand elle est disponible.

Le modèle de simulation permet de recalculer les températures extrêmes mesurées avec une marge de sécurité de l'ordre de 1 K, aussi bien en extraction de chaleur qu'en injection de chaleur.

F2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique F2.1 et en moyennes journalières dans le graphique F2.2. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières.

L'écart moyen entre les valeurs simulées et mesurées est de -0.3 K pour les valeurs horaires et -0.4 K pour les moyennes journalières. Pour les puissances de pointes transférées, on remarque que l'écart de température est conservatif, ce qui confirme le résultat de la section précédente. En revanche on observe une inadéquation lorsque les puissances transférées sont faibles (voir également figure F2.4). Dans ces situations la précision des mesures est plus difficile à garantir, ce qui peut également expliquer l'incohérence avec les simulations.

L'évolution des températures mesurées et simulées est montrée en valeurs journalières dans le graphique F2.3. On remarque également des périodes avec des différences importantes entre les mesures et les simulations, qui sont justement caractérisées par de faibles énergies journalières transférées.

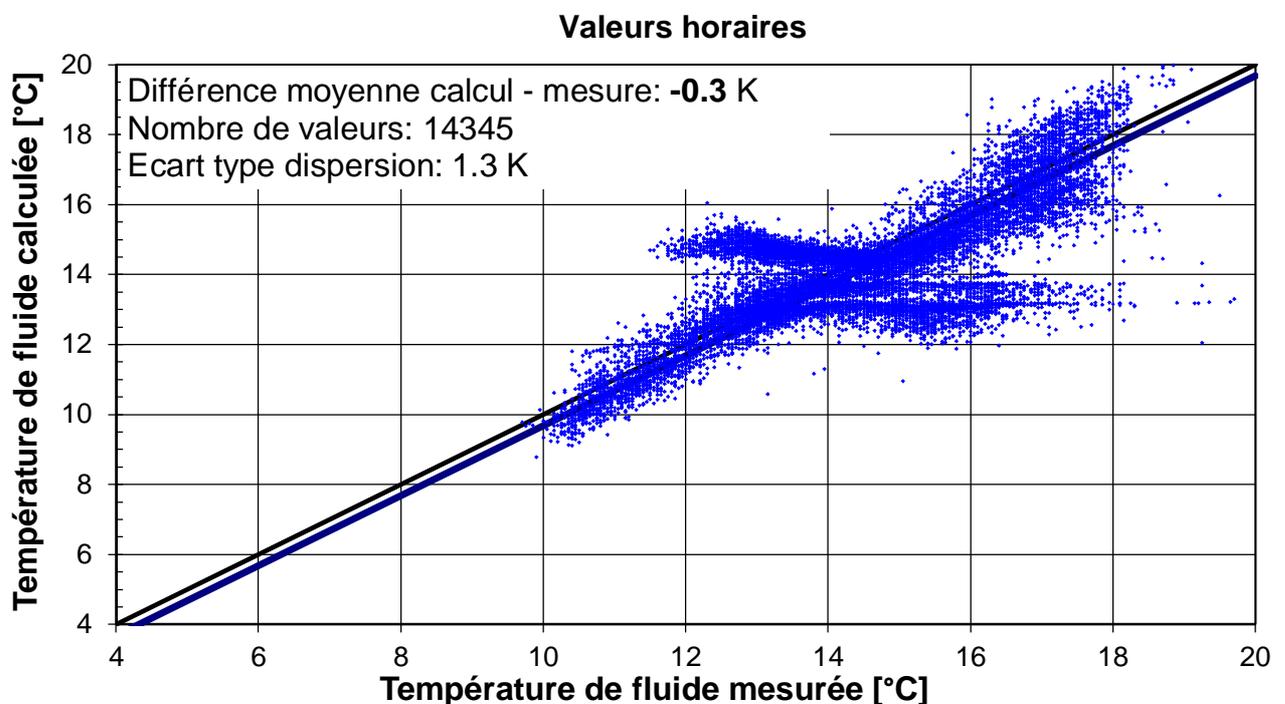


Figure F2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 6.

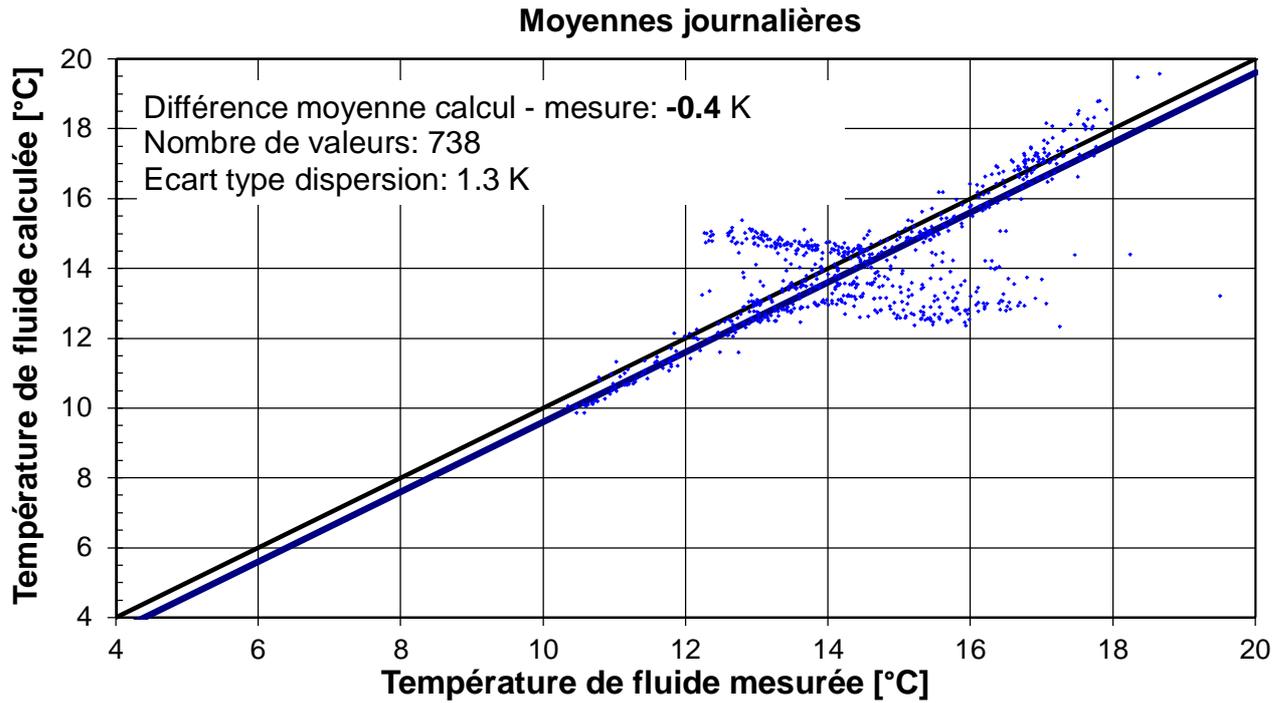


Figure F2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 6.

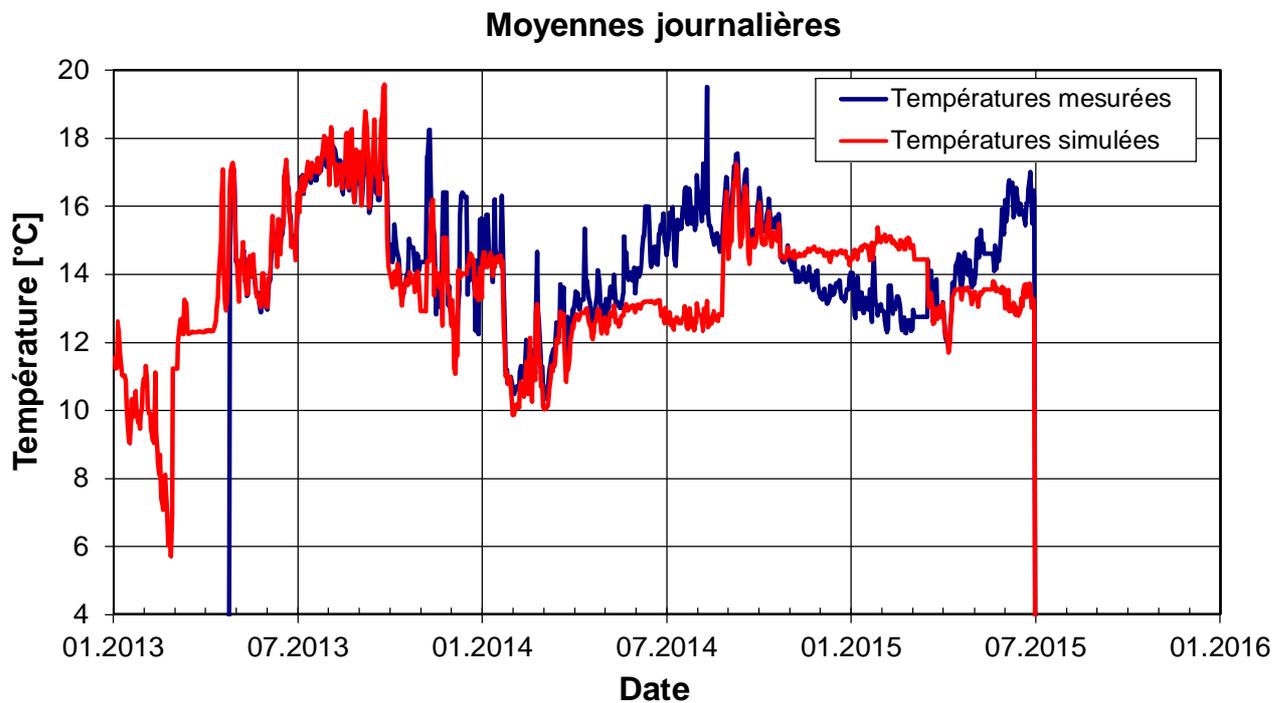


Figure F2.3 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 6.

Dans la figure F2.4, l'écart de température journalier est évalué en injection et en extraction de chaleur en éliminant tous les jours avec un transfert de chaleur inférieur à 1 MWh. On obtient un

écart journalier de -0.4K en extraction de chaleur et de $+0.2\text{K}$ en injection. Ces deux valeurs indiquent que les calculs sont proches des mesures. D'autre part, leur signe (négatif en extraction et positif en injection), signifie que les simulations présentent une marge de sécurité relativement aux mesures.

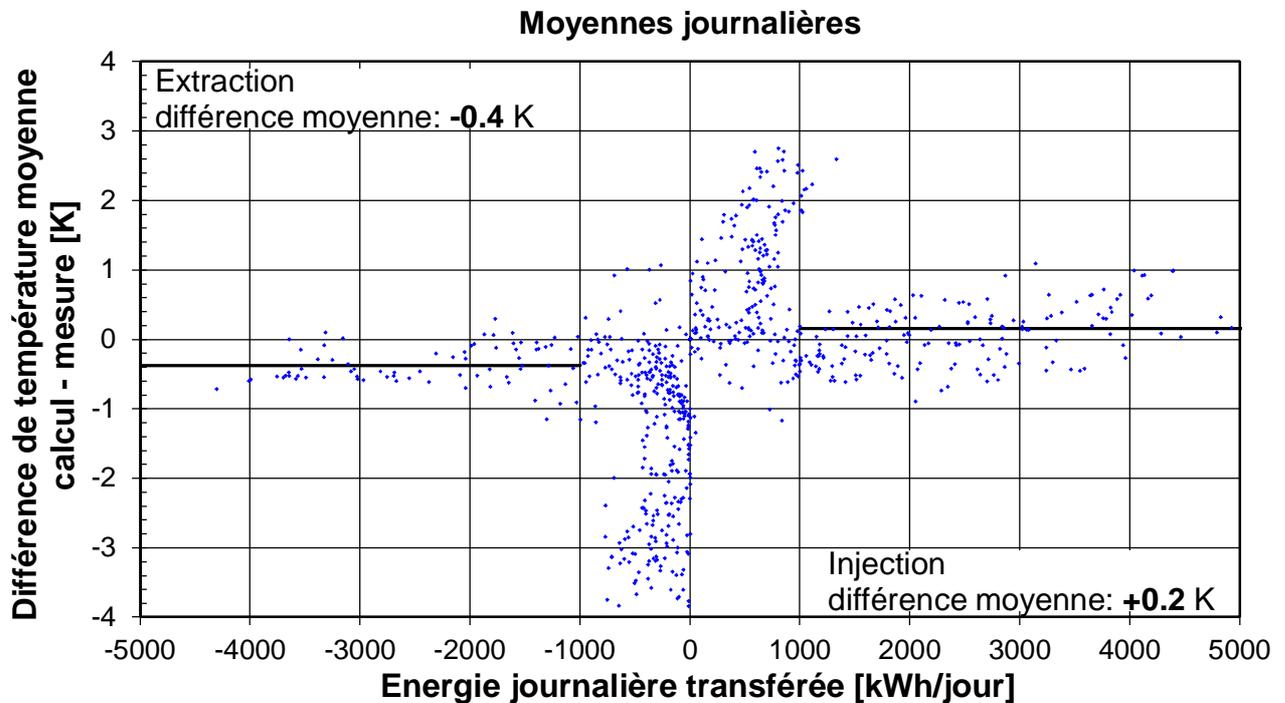


Figure F2.4 Ecart de température journalier en fonction de l'énergie journalière transférée pour l'installation 6.

F2.3. Analyse de sensibilité

Le champ de sondes simulé est en fait une partie d'un champ de sondes plus grand. Toutefois son utilisation est indépendante du reste du champ, ce qui a permis de l'analyser comme s'il était unique. La simulation de tout le champ, qui revient à simuler deux champs de sondes utilisés de façon indépendante mais voisins, montre que l'influence mutuelle reste négligeable durant les premiers 2.5 ans de marche du système (influence inférieure à 0.1K).

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des sondes (variante Turb), la variation suivante est évaluée :

- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte de même que la capacité thermique des sondes (variante Turb+C+H) ;

La différence moyenne journalière calcul-mesure est évaluée en ne prenant que les jours avec un transfert d'énergie supérieur à 1 MWh. Les résultats sont montrés dans la table F2.2.

<p>Variante nominale Turb: Régime d'écoulement turbulent dans les sondes</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 0.4 K Différence moyenne en injection : +0.2 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p>
<p>Variante Turb+C+H: Capacité thermique des sondes et transferts thermiques des raccords horizontaux entre les sondes ajoutés</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 0.2 K Différence moyenne en injection : +0.1 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p>

Table F2.1 Influence des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 6.

La prise en compte des effets capacitifs des sondes et des transferts thermiques des raccords horizontaux permet de légèrement diminuer l'écart de température entre les simulations et les mesures. Les écarts restent conservatifs et sont du même ordre de grandeur que l'influence mutuelle des deux groupes de sondes formant le champ complet.

La simulation à long terme du champ de sondes n'est pas faite, car il a été conçu pour fonctionner comme un stockage de chaleur. Son opération est justement effectuée pour éviter des dérives de température à long terme.

F3. Analyse du profil de chaleur de l'installation 6

Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante la plus proche des mesures (Turb+C+H) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

F3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 6

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante dès la première année de fonctionnement. Les températures extrêmes annuelles sont obtenues pour la durée de fonctionnement du système.

<p>Année 1:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 304 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 22 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 157 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 7002 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -291 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 15 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -83 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -5112 kWh</p>	
<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : mars</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 234 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 12 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 59 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 3516 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -244 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 13 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -74 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -3986 kWh</p>	

<p>Année 3:</p> <p>Mois conduisant à température min. : avril</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 193 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 9 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 21 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 2052 kWh</p>	
---	--

Table F1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 6. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

F3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

<p>Année 1:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Température min. avec profil simplifié : +6.0 °C</p> <p>Température minimum de référence : +5.4 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : +0.6 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre</p> <p>Température max. avec profil simplifié : +20.4 °C</p> <p>Température maximum de référence : +20.2 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : +0.3 K</p>	
<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : mars</p> <p>Température min. avec profil simplifié : +8.9 °C</p> <p>Température minimum de référence : +9.4 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : -0.5 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre</p> <p>Température max. avec profil simplifié : +18.6 °C</p> <p>Température maximum de référence : +18.0 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : +0.6 K</p>	

Année 3:
 Mois conduisant à température min. : avril
 Température min. avec profil simplifié : +10.7 °C
 Température minimum de référence : +11.1 °C
 Différence profil simplifié - réel : -0.4 K

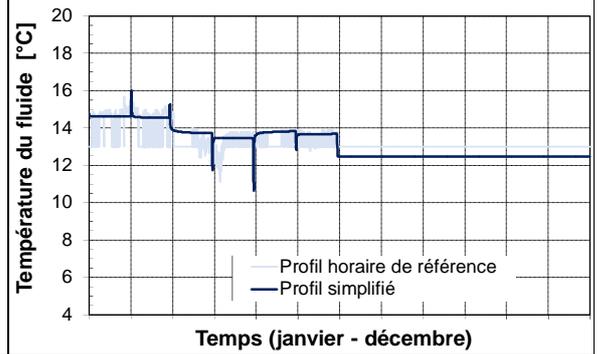


Table F1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 6. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. L'évolution de référence de la température, obtenue avec le profil de chaleur en valeurs horaires, est également indiquée.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une petite différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 6, la différence n'est pas nécessairement conservatrice mais elle n'est pas significative.

La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié diffère de respectivement +0.6, -0.5 et -0.4 K de la température minimum de référence pour les 3 années consécutives mesurées. Une différence positive signifie que la simulation sous-estime l'abaissement de température. La sous-estimation reste, avec le profil de chaleur simplifié, négligeable.

La température maximum annuelle simulée avec le profil simplifié diffère de respectivement +0.3, +0.6 K de la température maximum de référence pour les 2 premières années mesurées. Une différence positive signifie que la simulation est conservatrice et ne sous-estime pas l'élévation de température.

ANNEXE G: Installation 7

Table des matières

G1. Installation 7	2
G1.1. Mesures disponibles	2
G1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques.....	2
G1.3. Géologie	3
G1.4. Sondes géothermiques	3
G2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 7.....	4
G2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide	4
G2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide	5
G2.3. Analyse de sensibilité.....	8
G3. Analyse du profil de chaleur de l’installation 7	9
G3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 7.....	9
G3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle	10

G1. Installation 7

L'installation 7 fonctionne depuis plus de 2 ans. Toutes les mesures sont disponibles en valeurs horaires depuis la mise en service de l'installation.

G1.1. Mesures disponibles

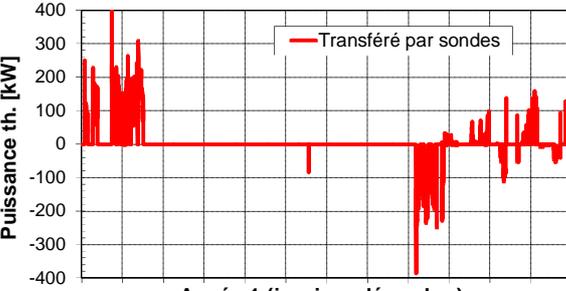
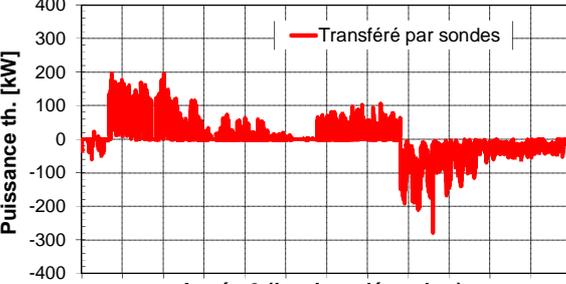
Les mesures disponibles de l'installation 7 sont :

- températures d'entrée et de sortie du champ de sondes géothermiques ;
- puissance thermique transférée par les sondes (+ extraction, - injection) ;
- température de l'air extérieur.

L'évolution de la puissance thermique transférée (extraite ou injectée) dans les sondes géothermiques, ainsi que celle de la température du fluide caloporteur dans le circuit des sondes, définie par la moyenne des températures aller et retour du fluide, résultent directement des mesures.

G1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques

Les profils d'extraction et d'injection de chaleur sont montrés dans la table G1.1 pour la durée de fonctionnement de l'installation.

<p>Année 1</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 440 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 96 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -390 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -46 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : +50 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 10.7 °C</p>	 <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 200 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 134 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -280 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -116 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : +17 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 12.3 °C</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

<p>Année 3</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 150 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 38 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -100 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -35 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : +3 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+))</p> <p>Température air extérieur du lieu : 10.6 °C</p>	
--	--

Table G1.1 Profils horaires mesurés de la puissance thermique extraite (+) et injectée (-) dans les sondes géothermiques pour les 2.5 premières années de fonctionnement de l'installation 7.

G1.3. Géologie

Les paramètres du terrain ont été obtenus avec un test de réponse étendu (e-TRT), effectué sur une sonde test posée dans le volume de terrain occupé par le champ de sondes. Il permet également la détermination du gradient de température géothermique. Comme les simulations sont effectuées aussi bien pour des périodes d'extraction que d'injection de chaleur, pas de marge de sécurité n'est prise sur la température initiale du terrain. D'autre part, s'agissant d'un test de réponse étendu réalisé avec la meilleure précision possible, pas de marge de sécurité n'est appliquée sur la valeur de conductivité thermique du terrain.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain : 3.1 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain : 2.1 MJ/(m³K)
- température initiale du terrain vers la surface : 10.3 °C
- gradient de température géothermique : 32 K/km

G1.4. Sondes géothermiques

Le système utilise un champ de 46 sondes géothermiques de 200 m chacune placées sous un bâtiment. La disposition des sondes est relativement bien régulière. Elle correspond à une disposition compacte des sondes avec un espacement de 5m entre elles. Le débit total nominal dans le circuit des sondes est d'environ 90 m³/h. Toutes les sondes sont couplées en parallèle et donc le débit par sonde est de l'ordre de 2 m³/h. Comme de l'eau pure est utilisée dans le circuit hydraulique des sondes, le régime d'écoulement dans les tubes des sondes est turbulent (double-U avec un tube HDPE de diamètre externe de 40mm).

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement turbulent dans les sondes et un débit nominal de 90 m³/h dans le circuit des sondes.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux sondes géothermiques sont :

- nombre de sondes géothermiques :	46
- profondeur des sondes géothermiques :	200 m
- espacement entre les sondes :	5 m ¹⁾
- diamètre d'une sonde (forage):	0.135 m
- type de sonde :	double-U
- résistance thermique de la sonde Rb ²⁾ :	0.088 K/(W/m) (régime turbulent)
- résistance thermique interne de la sonde Ra :	0.275 K/(W/m) (régime turbulent)

¹⁾ dans les simulations, le placement exact des sondes est pris en compte ;

²⁾ la résistance thermique de la sonde résulte du test de réponse.

G2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 7

G2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide

Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table G2.1.

<p>Année 1 Puissance thermique extraite de pointe : 440 kW Puissance thermique injectée de pointe : -390 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: - °C Température de fluide minimum simulée : +6.8 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +19.8 °C Température de fluide maximum simulée : +18.6 °C</p>	<p>Température [°C]</p> <p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2 Puissance thermique extraite de pointe : 200 kW Puissance thermique injectée de pointe : -280 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +10.1 °C Température de fluide minimum simulée : +9.0 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +18.3 °C Température de fluide maximum simulée : +18.0 °C</p>	<p>Température [°C]</p> <p>— Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

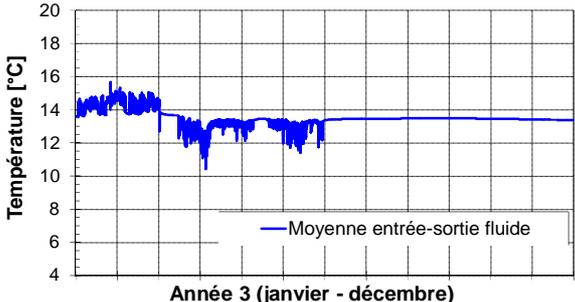
<p>Année 3 Puissance thermique extraite de pointe : 150 kW Puissance thermique injectée de pointe : -100 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +11.2 °C Température de fluide minimum simulée : +10.4 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +14.6 °C Température de fluide maximum simulée : +15.7 °C</p>	
--	--

Table G2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques pour les 2.5 premières années de fonctionnement de l'installation 7. Les valeurs minimums et maximums annuelles simulées sont également indiquées, avec la valeur mesurée correspondante quand elle est disponible.

Le modèle de simulation permet de recalculer les températures extrêmes mesurées avec une marge de sécurité de l'ordre de 1 K en extraction de chaleur. En injection de chaleur, la différence de température est de l'ordre de 1 K, qui peut être dans un sens comme dans l'autre.

G2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique G2.1 et en moyennes journalières dans le graphique G2.2. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières.

L'écart moyen entre les valeurs simulées et mesurées est de -0.8 K pour les valeurs horaires et -1.0 K pour les moyennes journalières. Pour les puissances de pointes transférées, on remarque que l'écart de température est de l'ordre de 1K. Il est conservatif pour l'extraction de chaleur mais pas, dans ce cas, pour l'injection de chaleur. On observe également une inadéquation lorsque les puissances transférées sont faibles (voir également figure G2.4). Dans ces situations la précision des mesures est plus difficile à garantir, ce qui peut également expliquer l'incohérence avec les simulations.

L'évolution des températures mesurées et simulées est montrée en valeurs journalières dans le graphique G2.3. On remarque également des périodes avec des différences importantes entre les mesures et les simulations, qui sont justement caractérisées par de faibles énergies journalières transférées.

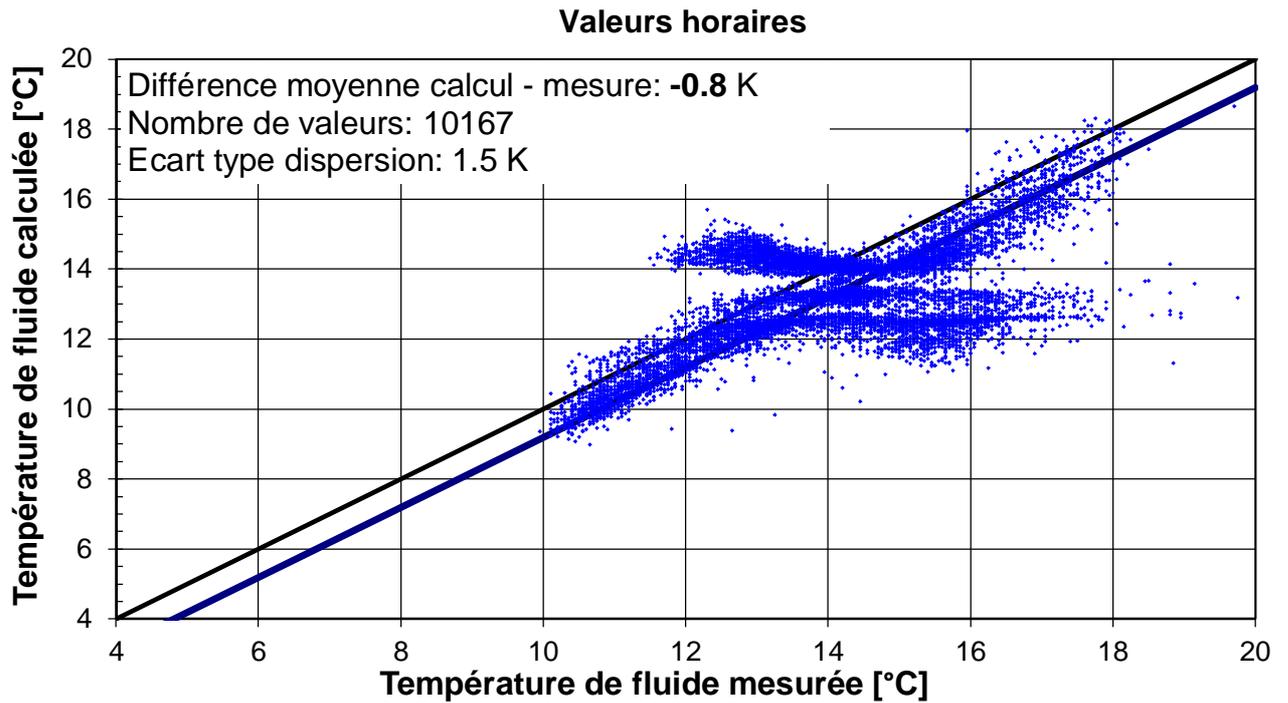


Figure G2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 7.

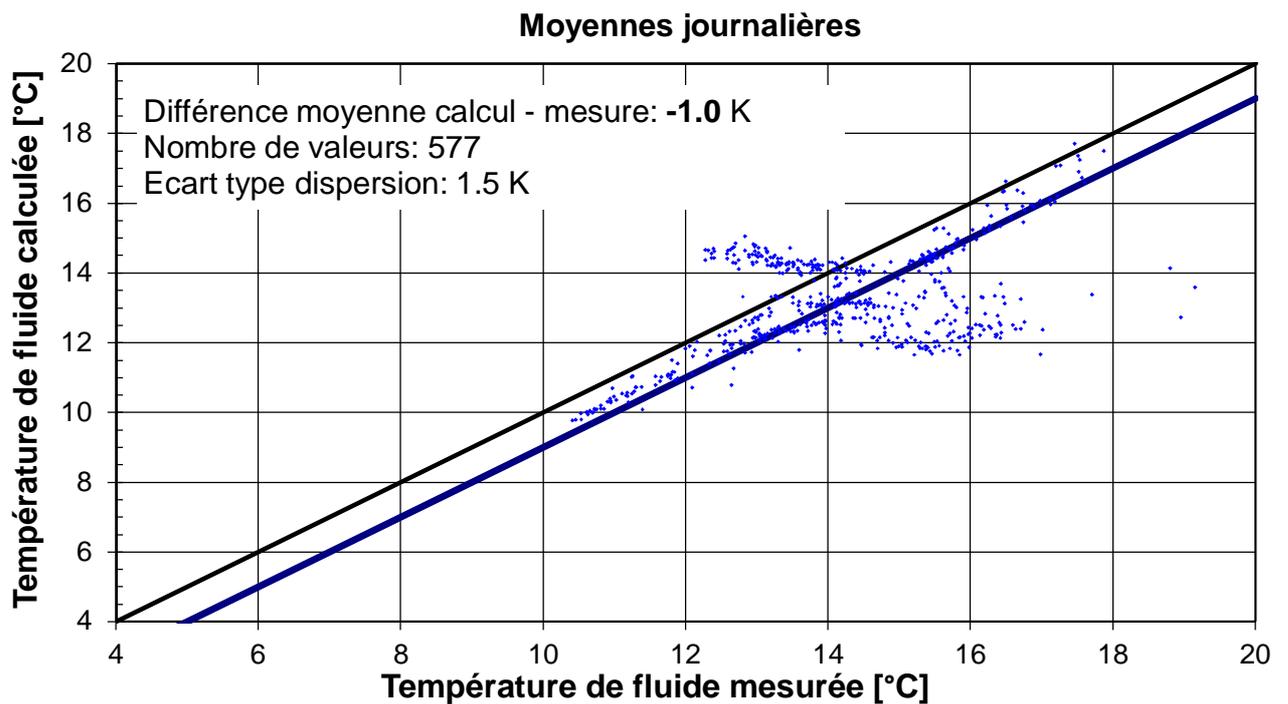


Figure G2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 7.

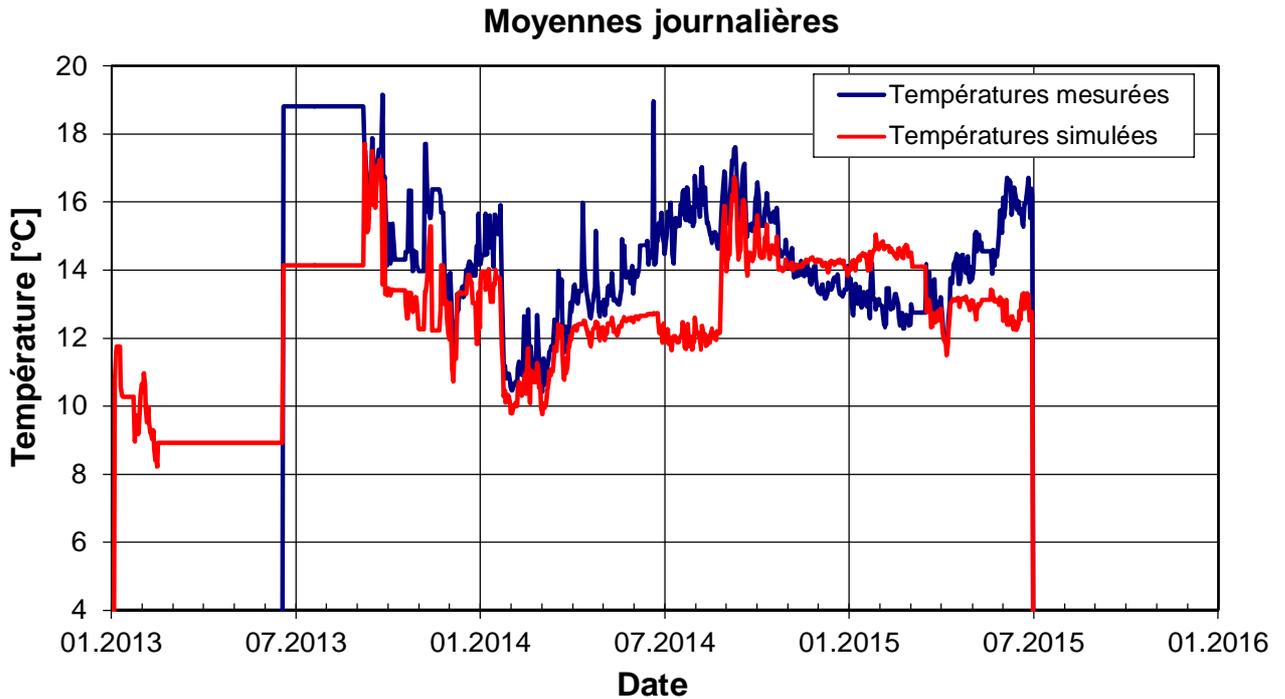


Figure G2.3 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 7.

Dans la figure G2.4, l'écart de température journalier est évalué en injection et en extraction de chaleur en éliminant tous les jours avec un transfert de chaleur inférieur à 1 MWh. On obtient un écart journalier de -0.6K en extraction de chaleur et de -0.6K en injection. Il est conservatif pour l'extraction de chaleur mais pas pour l'injection de chaleur.

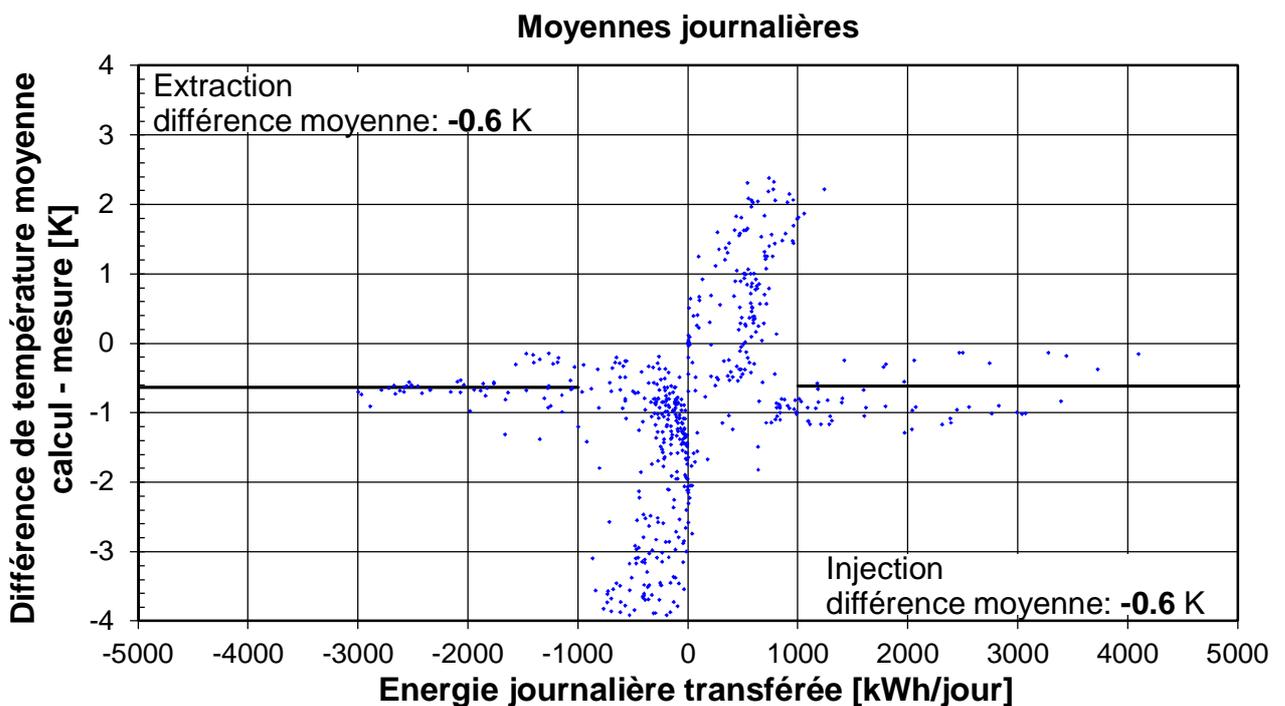


Figure G2.4 Ecart de température journalier en fonction de l'énergie journalière transférée pour l'installation 7.

G2.3. Analyse de sensibilité

Le champ de sondes simulé est en fait une partie d'un champ de sondes plus grand. Toutefois son utilisation est indépendante du reste du champ, ce qui a permis de l'analyser comme s'il était unique. La simulation de tout le champ, qui revient à simuler deux champs de sondes utilisés de façon indépendante mais voisins, montre que l'influence mutuelle reste négligeable durant les premiers 2.5 ans de marche du système (influence inférieure à 0.1K).

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des sondes (variante Turb), la variation suivante est évaluée :

- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte de même que la capacité thermique des sondes (variante Turb+C+H) ;

La différence moyenne journalière calcul-mesure est évaluée en ne prenant que les jours avec un transfert d'énergie supérieur à 1 MWh. Les résultats sont montrés dans la table G2.2.

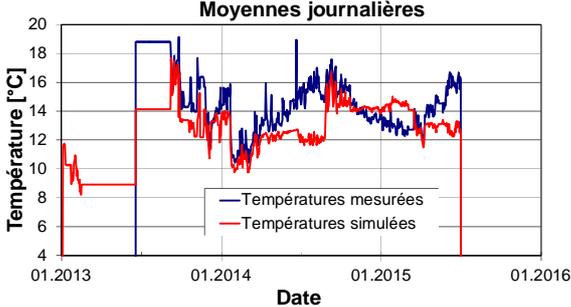
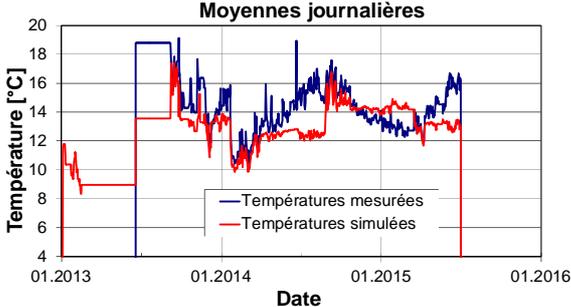
<p>Variante nominale Turb: Régime d'écoulement turbulent dans les sondes</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 0.6 K Différence moyenne en injection : - 0.6 K </p>	
<p>Variante Turb+C+H: Capacité thermique des sondes et transferts thermiques des raccords horizontaux entre les sondes ajoutés</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 0.5 K Différence moyenne en injection : - 0.6 K </p>	

Table G2.1 Influence des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 7.

La prise en compte des effets capacitifs des sondes et des transferts thermiques des raccords horizontaux permet de très légèrement diminuer l'écart de température entre les simulations et les mesures.

Comme le champ de sondes a été conçu pour fonctionner comme un stockage de chaleur, la simulation à long terme du champ de sondes n'est pas faite.

G3. Analyse du profil de chaleur de l'installation 7

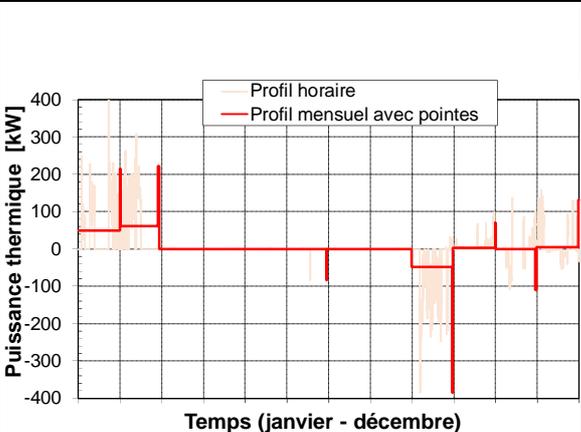
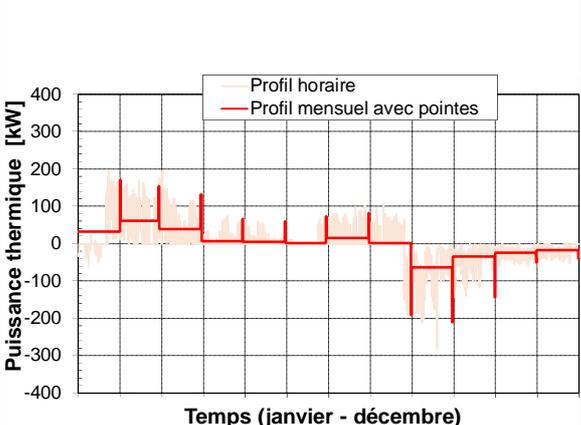
Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante la plus proche des mesures (Turb+C+H) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

G3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 7

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante dès la première année de fonctionnement. Les températures extrêmes sont obtenues pour les deux dernières années de fonctionnement du système.

<p>Année 1:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 222 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 17 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 61 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 4201 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -385 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 12 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -48 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -5196 kWh</p>	
<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 154 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 12 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 62 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 2592 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -210 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 13 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -63 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -3423 kWh</p>	

<p>Année 3: Mois conduisant à température min. : avril Puissance thermique extraite de pointe : 154 kW Durée max. de la puissance de pointe : 8 h Pulse moyen mensuel extrait : 17 kW Energie max. journalière extraite : 1504 kWh</p>	
---	--

Table G1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 7. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

G3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

<p>Année 1: Mois conduisant à température min. : février Température min. avec profil simplifié : +7.9 °C Température minimum de référence : +7.8 °C Différence profil simplifié - réel : +0.1 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre Température max. avec profil simplifié : +21.4 °C Température maximum de référence : +18.1 °C Différence profil simplifié - réel : +3.3 K</p>	
<p>Année 2: Mois conduisant à température min. : février Température min. avec profil simplifié : +9.3 °C Température minimum de référence : +9.5 °C Différence profil simplifié - réel : -0.2 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre Température max. avec profil simplifié : +18.1 °C Température maximum de référence : +18.5 °C Différence profil simplifié - réel : +0.6 K</p>	

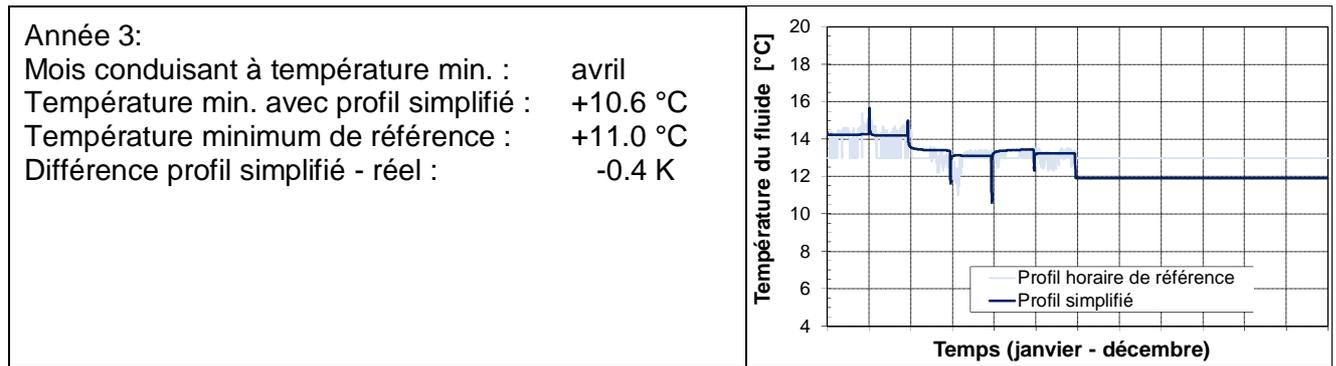


Table G1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 7. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. L'évolution de référence de la température, obtenue avec le profil de chaleur en valeurs horaires, est également indiquée.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une petite différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 7, la différence n'est pas significative à l'exception de la première année pour la température maximum. La raison de ce point singulier est probablement à chercher dans les mesures : en effet, durant le mois de septembre, la puissance d'injection mesurée passe subitement de 0 à 440 kW, pour se stabiliser ensuite vers 200 kW. Avant ce « saut » la mesure de l'énergie transférée par les sondes indiquait une valeur nulle pendant plusieurs mois.

La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié diffère de respectivement +0.1, -0.2 et -0.4 K de la température minimum de référence pour les 3 années consécutives mesurées. Une différence positive signifie que la simulation sous-estime l'abaissement de température. La sous-estimation reste, avec le profil de chaleur simplifié, négligeable.

La température maximum annuelle simulée avec le profil simplifié, sans tenir compte du point singulier, diffère de +0.6 K de la température maximum de référence pour la 2^e année mesurée. Une différence positive signifie que la simulation est conservative et ne sous-estime pas l'élévation de température.

ANNEXE H: Installation 8

Table des matières

H1. Installation 8	2
H1.1. Mesures disponibles	2
H1.2. Energie et puissance transférées par les pieux énergétiques.....	2
H1.3. Géologie	3
H1.4. Pieux énergétiques	3
H2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 8.....	4
H2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide	4
H2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide	5
H2.3. Analyse de sensibilité.....	7
H3. Analyse du profil de chaleur de l’installation 8	9
H3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 8.....	9
H3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle	10

H1. Installation 8

L'installation 8 fonctionne depuis plus de 10 ans. Toutefois les mesures détaillées ne sont disponibles que les deux premières années de fonctionnement de l'installation. Cette installation est particulière puisqu'il s'agit de pieux énergétiques.

H1.1. Mesures disponibles

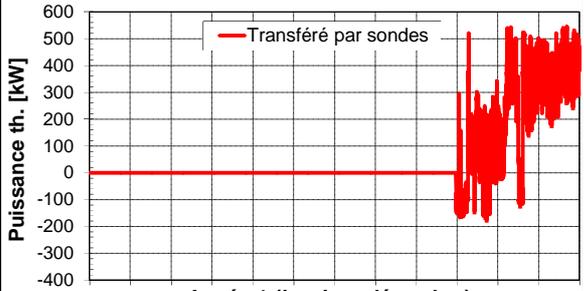
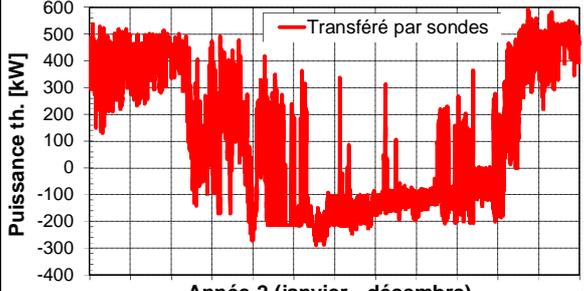
Les mesures disponibles de l'installation 8 sont :

- températures d'entrée et de sortie du champ des pieux énergétiques ;
- puissance thermique transférée par les pieux (+ extraction, - injection) ;
- température de l'air extérieur.

L'évolution de la puissance thermique transférée (extraite ou injectée) dans les pieux énergétiques, ainsi que celle de la température du fluide caloporteur dans le circuit des pieux, définie par la moyenne des températures aller et retour du fluide, résultent directement des mesures.

H1.2. Energie et puissance transférées par les pieux énergétiques

Les profils d'extraction et d'injection de chaleur sont montrés dans la table H1.1 pour la durée de fonctionnement de l'installation.

<p>Année 1</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 545 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 540 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -176 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -40 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : 500 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 12.0 °C</p>	 <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 591 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 1507 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -288 kW Durée max. de la puissance de pointe : 2 h Energie injectée annuelle : -589 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : 918 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 11.9 °C</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

Année 3		
Puissance thermique extraite de pointe :	525 kW	
Durée max. de la puissance de pointe :	3 h	
Energie extraite annuelle :	924 MWh/a	
Puissance thermique injectée de pointe :	-247 kW	
Durée max. de la puissance de pointe :	2 h	
Energie injectée annuelle :	-531 MWh/a	
Energie nette transférée par sondes : (énergie stockée (-), déstockée (+))	393 MWh/a	
Température air extérieur du lieu :	10.0 °C	

Table H1.1 Profils horaires mesurés de la puissance thermique extraite (+) et injectée (-) dans les pieux énergétiques pour les 2 premières années de fonctionnement de l'installation 8.

H1.3. Géologie

Les paramètres du terrain ont été obtenus avec deux tests de réponse géothermique, effectués sur deux sondes tests posées dans le volume de terrain occupé par le champ des pieux. Une marge de sécurité de 0.5°C est prise sur la température initiale du terrain. De même une marge de sécurité de 0.2 W/(mK), correspondant à la précision du test de réponse, est appliquée sur la valeur de conductivité thermique du terrain.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain : 1.8 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain : 2.2 MJ/(m³K)
- température initiale du terrain vers la surface : 10.0 °C

Comme il s'agit de pieux énergétiques, pas de gradient de température géothermique n'est pris en compte.

H1.4. Pieux énergétiques

Le système utilise un champ de 306 pieux énergétiques de 27 m chacun. La disposition des pieux activés thermiquement est relativement bien régulière. Les pieux sont couplés entre eux par séries de 3. Le débit total nominal dans le circuit des pieux est d'environ 100 m³/h. Comme de l'eau glycolée est utilisée dans le circuit hydraulique des pieux, le régime d'écoulement dans les tubes des pieux est laminaire.

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement laminaire dans les pieux. Le débit, bien qu'il puisse varier en injection de chaleur, est maintenu constant à sa valeur nominale.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux pieux énergétiques sont :

- nombre de pieux énergétiques :	306
- profondeur de pieux énergétiques :	27 m
- espacement moyen entre les pieux :	9 m ¹⁾
- diamètre moyen des pieux :	1.36 m
- type de sonde :	quadruple-U
- résistance thermique moyenne d'un pieu R _b :	0.06 K/(W/m) (régime turbulent)
- résistance thermique interne d'un pieu R _a :	0.104 K/(W/m) (régime turbulent)

¹⁾ dans les simulations, le placement exact des pieux est pris en compte.

H2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 8

H2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide

Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table H2.1.

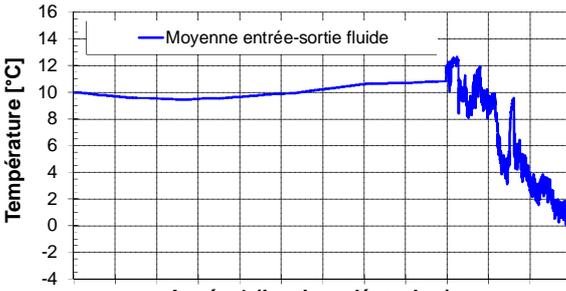
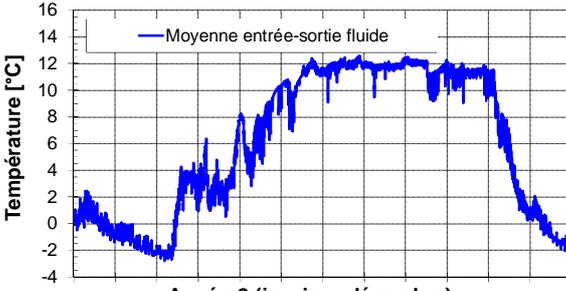
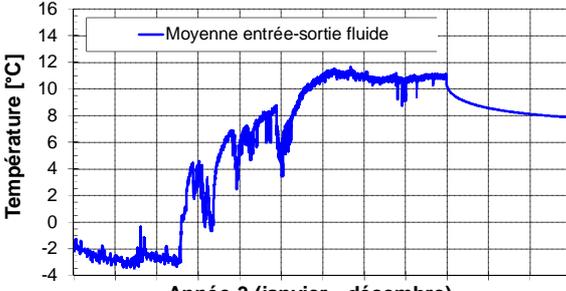
<p>Année 1 Puissance thermique extraite de pointe : 545 kW Puissance thermique injectée de pointe : -176 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +5.7 °C Température de fluide minimum simulée : -0.2 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +15.8 °C Température de fluide maximum simulée : +12.7 °C</p>	 <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2 Puissance thermique extraite de pointe : 591 kW Puissance thermique injectée de pointe : -288 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +4.1 °C Température de fluide minimum simulée : -2.8 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +15.8 °C Température de fluide maximum simulée : +12.6 °C</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 3 Puissance thermique extraite de pointe : 525 kW Puissance thermique injectée de pointe : -247 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +4.3 °C Température de fluide minimum simulée : -3.4 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +15.9 °C Température de fluide maximum simulée : +11.7 °C</p>	 <p>Année 3 (janvier - décembre)</p>

Table H2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des pieux énergétiques pour les 2 premières années de fonctionnement de l'installation 8. Les valeurs minimums et maximums annuelles simulées sont également indiquées, avec la valeur mesurée correspondante quand elle est disponible.

Le modèle de simulation recalcule les températures extrêmes mesurées avec une marge de sécurité extrêmement importante, de l'ordre de 6 à 7 K en extraction de chaleur et de 3 K en injection de chaleur, et ceci malgré un test de réponse thermique. Comme illustré dans la section H2.3, ce sont les transferts de chaleur à l'interface bâtiment – pieux de fondation, avec tous les tubes des raccords horizontaux du circuit hydraulique, qui ont une grande importance.

H2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique H2.1 et en moyennes journalières dans le graphique H2.2. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières.

L'écart moyen entre les valeurs simulées et mesurées est de -5.3 K pour les valeurs horaires et -5.2 K pour les moyennes journalières. Pour les puissances de pointes transférées, on remarque que l'écart de température est de l'ordre de 6 à 8 K en extraction de chaleur et reste 3 à 4 K trop bas en injection de chaleur. Il est conservatif pour l'extraction de chaleur et le décalage global des températures vers le bas fait que ces dernières sous-estiment l'élévation de température en injection de chaleur.

L'évolution des températures mesurées et simulées est montrée en valeurs journalières dans le graphique H2.3.

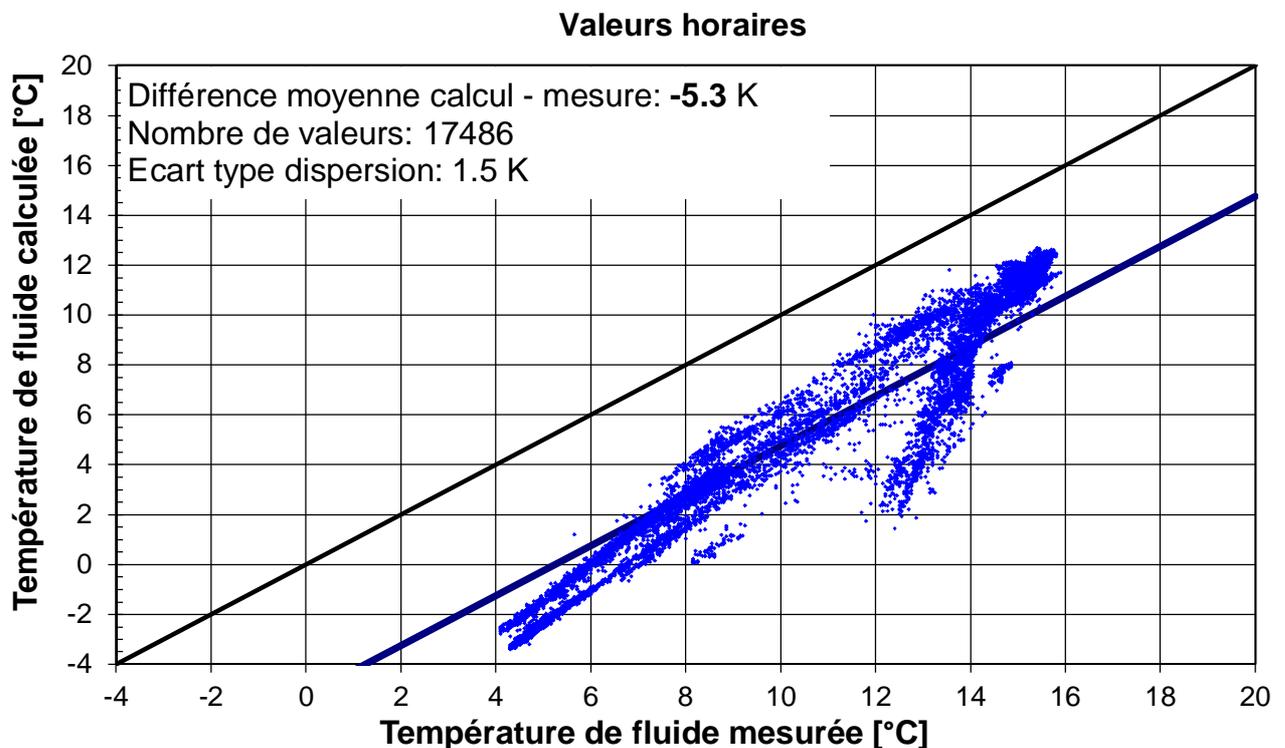


Figure H2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 8.

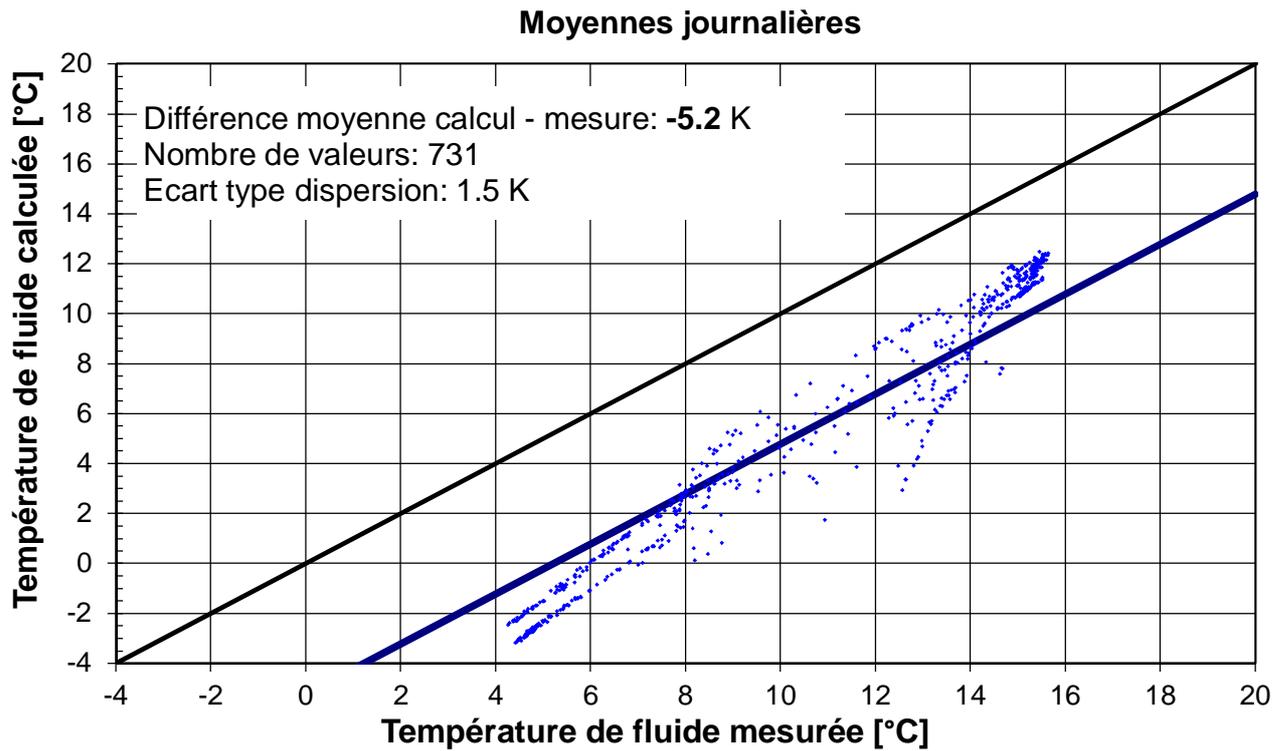


Figure H2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 8.

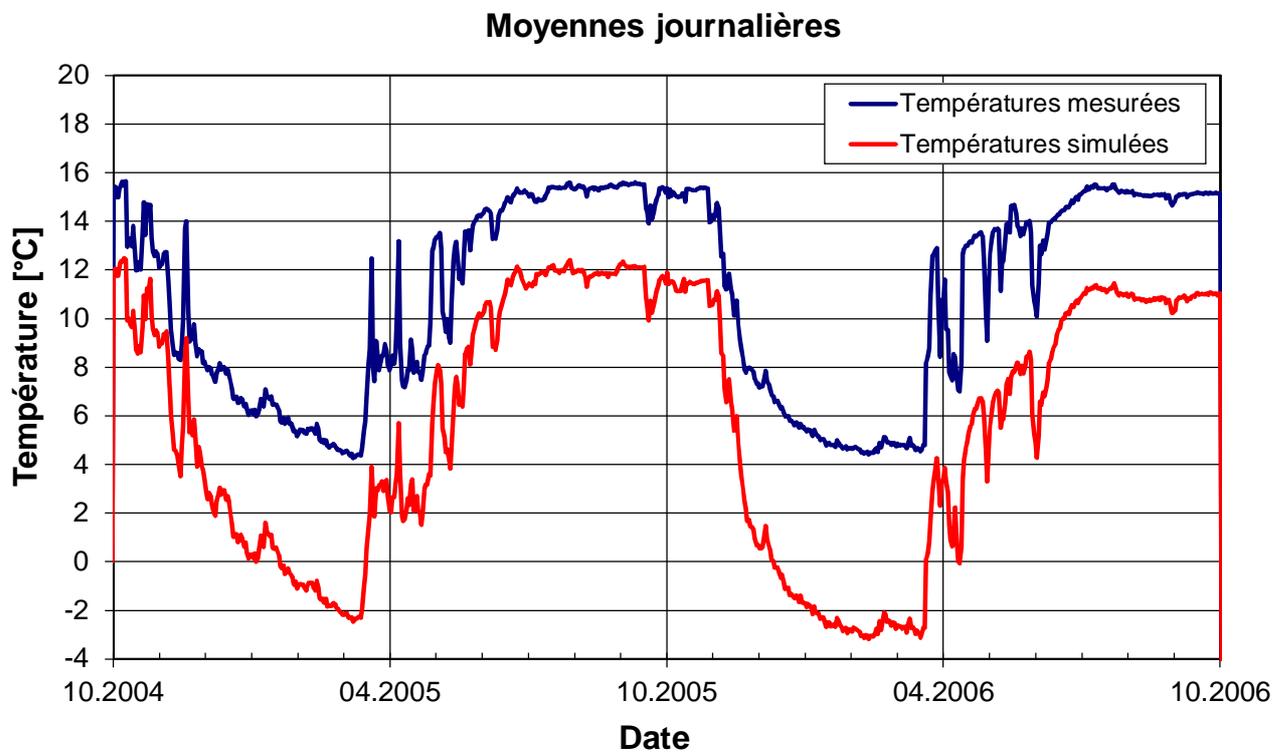


Figure H2.3 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 8.

Dans la figure H2.4, l'écart de température journalier est évalué en différenciant l'injection de l'extraction de chaleur. On obtient un écart journalier de -6.0K en extraction de chaleur et de -4.4K en injection. Ces valeurs sont les deux négatives, ce qui indique que les calculs sont décalés relativement aux mesures. Les simulations conduisent à un abaissement de température bien plus important que dans la réalité (voir analyse de sensibilité dans la section suivante).

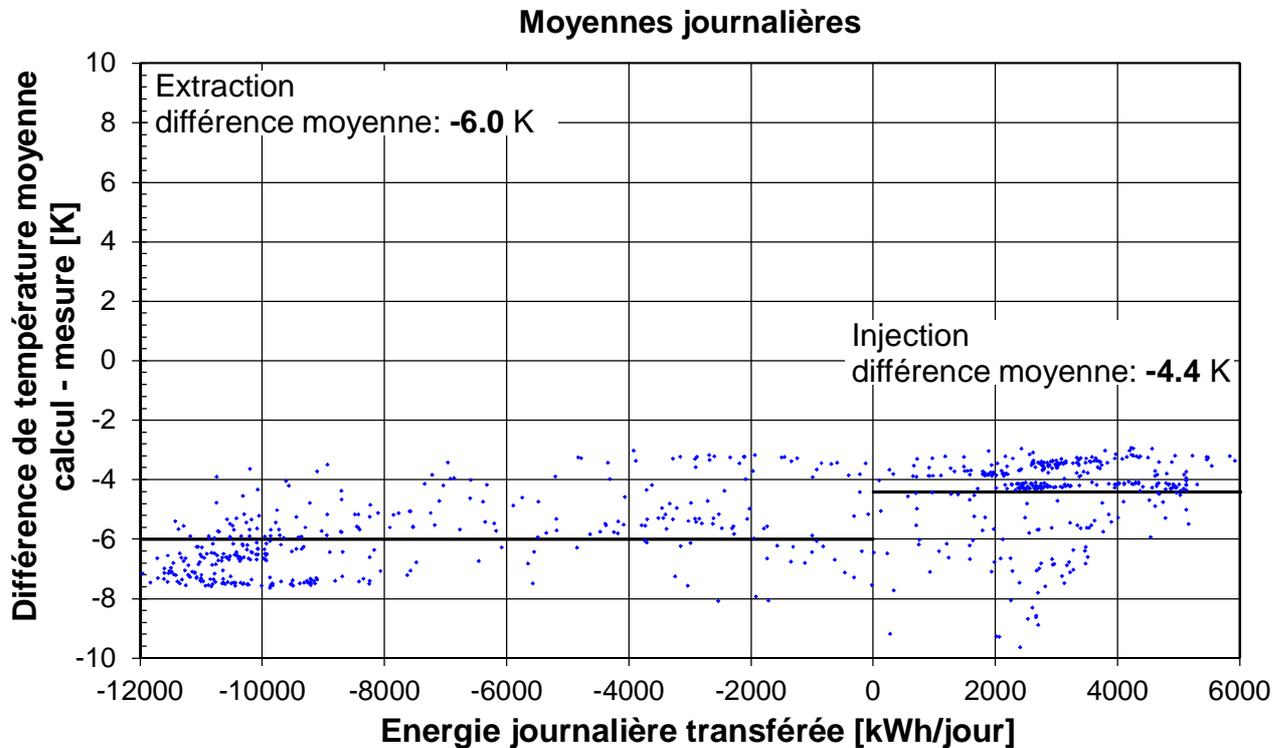


Figure H2.4 Ecart de température journalier en fonction de l'énergie journalière transférée pour l'installation 8.

H2.3. Analyse de sensibilité

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des pieux (variante Lam), les variations suivantes sont évaluées :

- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte de même que la capacité thermique des pieux (variante Lam+C+H) ;
- les marges de sécurité sur la température initiale du terrain et la conductivité thermique du terrain sont levées. Cela signifie qu'elles sont de respectivement 0.5 K et 0.2 W/(mK) plus élevées. Ces variations, cumulées aux variations précédentes, correspondent à la variante Lam+C+H+T+L.

La différence moyenne journalière calcul-mesure est évaluée en distinguant l'extraction de l'injection de chaleur. Les résultats sont montrés dans la table H2.2.

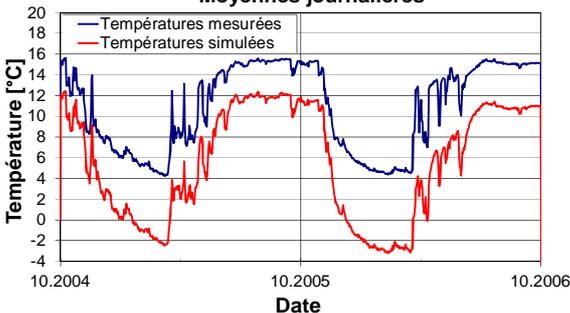
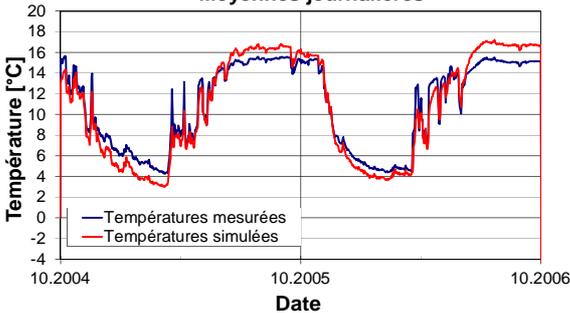
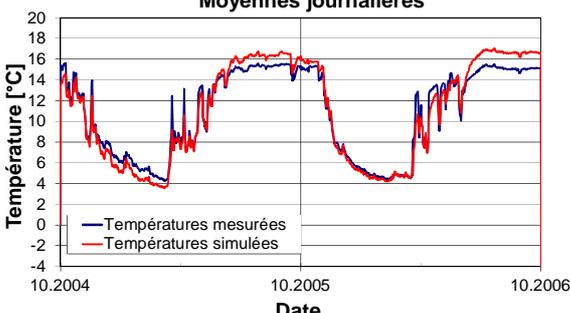
<p>Variante nominale Lam: Régime d'écoulement laminaire dans les sondes</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 6.0 K Différence moyenne en injection : - 4.4 K </p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 
<p>Variante Lam+C+H: Capacité thermique des pieux et transferts thermiques des raccords horizontaux entre les pieux ajoutés</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 0.8 K Différence moyenne en injection : +0.6 K </p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 
<p>Variante Lam+C+H+T+L: Effets de la température initiale et de la conductivité thermique du terrain sans marge de sécurité ajoutés</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 0.4 K Différence moyenne en injection : +0.6 K </p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 

Table H2.1 Influence des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 8.

La prise en compte des effets capacitifs des pieux et des transferts thermiques des raccords horizontaux en surface permet de corriger la grande différence entre les mesures et les simulations.

La température de l'espace situé en contact avec les pieux énergétiques a une grande influence sur le bilan thermique des pieux et donc de la stabilisation des températures à long terme. Dans le cas de l'installation 8, une partie de cette espace doit être rafraîchi en raison de gains internes importants. C'est une prestation indirecte que l'installation permet de satisfaire en omettant la pose d'une couche d'isolation sous la dalle de fondation. Dans les simulations, cela se traduit par une température de l'espace en surface plus élevée. Une valeur plus précise de cette dernière et des transferts thermiques à travers la dalle de fondation pourrait être obtenue avec une comparaison simulation – mesures sur une plus longue période. Toutefois cette problématique ne fait pas l'objet de cette étude et la simulation à long terme des pieux n'est pas faite.

H3. Analyse du profil de chaleur de l'installation 8

Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante la plus proche des mesures (Lam+C+H+T+L) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

H3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 8

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante dès la première année de fonctionnement. Les températures extrêmes sont obtenues pour les deux années de fonctionnement du système.

<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 502 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 11 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 423 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 11018 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : juillet</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -214 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 14 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -159 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -4562 kWh</p>	
<p>Année 3:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 489 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 14 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 408 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 10935 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : juillet</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -247 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 16 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -170 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -5301 kWh</p>	

Table H1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 8. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

H3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Température min. avec profil simplifié : +3.4 °C</p> <p>Température minimum de référence : +3.4 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : 0.0 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : juillet</p> <p>Température max. avec profil simplifié : +17.0 °C</p> <p>Température maximum de référence : +17.0 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : 0.0 K</p>	
<p>Année 3:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Température min. avec profil simplifié : +3.9 °C</p> <p>Température minimum de référence : +4.4 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : -0.1 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : juillet</p> <p>Température max. avec profil simplifié : +17.8 °C</p> <p>Température maximum de référence : +17.3 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : +0.5 K</p>	

Table H1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 8. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. L'évolution de référence de la température, obtenue avec le profil de chaleur en valeurs horaires, est également indiquée.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une très petite différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 8, la différence reste bien inférieure à 1 K.

La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié diffère de respectivement 0.0 et -0.1 K de la température minimum de référence pour les 2 années consécutives mesurées. Une différence négative signifie que la simulation est conservatrice et ne sous-estime pas l'abaissement de température.

La température maximum annuelle simulée avec le profil simplifié diffère de respectivement 0.0 et +0.5 K de la température maximum de référence pour les deux premières années mesurées. Une différence positive signifie que la simulation est conservatrice et ne sous-estime pas l'élévation de température.

ANNEXE I: Installation 9

Table des matières

I1. Installation 9	2
I1.1. Mesures disponibles	2
I1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques.....	2
I1.3. Géologie	3
I1.4. Sondes géothermiques	3
I2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 9	4
I2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide.....	4
I2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide.....	5
I2.3. Analyse de sensibilité	8
I3. Analyse du profil de chaleur de l’installation 9	10
I3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 9	10
I3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle	11

I1. Installation 9

L'installation 9 fonctionne depuis plus de 2 ans. Toutes les mesures sont disponibles en valeurs horaires depuis la mise en service de l'installation.

I1.1. Mesures disponibles

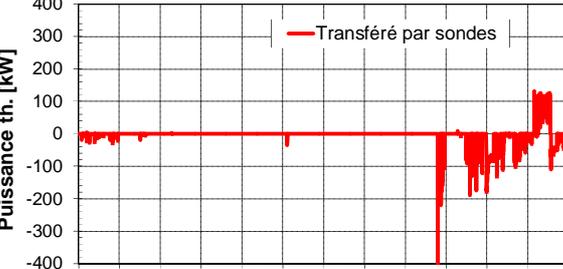
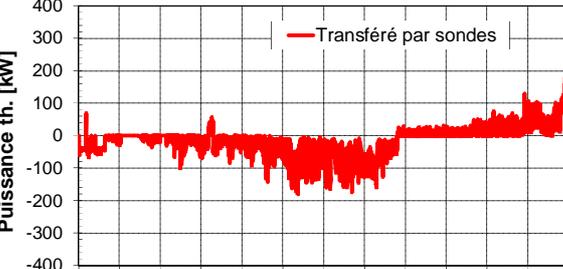
Les mesures disponibles de l'installation 9 sont :

- températures d'entrée et de sortie du champ de sondes géothermiques ;
- débit de fluide total traversant le circuit hydraulique des sondes ;
- puissance thermique transférée par les sondes (+ extraction, - injection) ;
- température de l'air extérieur.

L'évolution de la puissance thermique transférée (extraite ou injectée) dans les sondes géothermiques, ainsi que celle de la température du fluide caloporteur dans le circuit des sondes, définie par la moyenne des températures aller et retour du fluide, résultent directement des mesures.

I1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques

Les profils d'extraction et d'injection de chaleur sont montrés dans la table I1.1 pour la durée de fonctionnement de l'installation.

<p>Année 1</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 130 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 21 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -480 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -43 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : -22 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 10.7 °C</p>	 <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 180 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 71 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -180 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -200 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : -129 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 12.3 °C</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

Année 3		
Puissance thermique extraite de pointe :	160 kW	
Durée max. de la puissance de pointe :	1 h	
Energie extraite annuelle :	86 MWh/a	
Puissance thermique injectée de pointe :	-190 kW	
Durée max. de la puissance de pointe :	1 h	
Energie injectée annuelle :	-122 MWh/a	
Energie nette transférée par sondes : (énergie stockée (-), déstockée (+))	-36 MWh/a	
Température air extérieur du lieu :	10.6 °C	

Table 11.1 Profils horaires mesurés de la puissance thermique extraite (+) et injectée (-) dans les sondes géothermiques pour les 2.5 premières années de fonctionnement de l'installation 9.

11.3. Géologie

Les paramètres du terrain ont été obtenus avec un test de réponse étendu (e-TRT), effectué sur une sonde test posée dans le volume de terrain occupé par le champ de sondes. Il permet également la détermination du gradient de température géothermique. Comme les simulations sont effectuées aussi bien pour des périodes d'extraction que d'injection de chaleur, pas de marge de sécurité n'est prise sur la température initiale du terrain. D'autre part, s'agissant d'un test de réponse étendu réalisé avec la meilleure précision possible, pas de marge de sécurité n'est appliquée sur la valeur de conductivité thermique du terrain.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain : 3.0 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain : 2.1 MJ/(m³K)
- température initiale du terrain vers la surface : 9.6 °C
- gradient de température géothermique : 32 K/km

11.4. Sondes géothermiques

Le système utilise un champ de 32 sondes géothermiques de 200 m chacune placées sous un bâtiment. La disposition des sondes est relativement bien régulière. Elle correspond à une disposition compacte des sondes avec un espacement de 5m entre elles. Toutes les sondes sont couplées en parallèle et le débit total nominal dans le circuit des sondes est d'environ 80 m³/h. Comme de l'eau pure est utilisée dans le circuit hydraulique des sondes, le régime d'écoulement dans les tubes des sondes est turbulent (double-U avec un tube HDPE de diamètre externe de 40mm).

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement turbulent dans les sondes. Le débit, mesuré, montre qu'il est cependant variable. Il est donné comme une variable d'entrée aux simulations.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux sondes géothermiques sont :

- nombre de sondes géothermiques :	32
- profondeur des sondes géothermiques :	200 m
- espacement entre les sondes :	5 m ¹⁾
- diamètre d'une sonde (forage):	0.135 m
- type de sonde :	double-U
- résistance thermique de la sonde Rb ²⁾ :	0.100 K/(W/m) (régime turbulent)
- résistance thermique interne de la sonde Ra :	0.275 K/(W/m) (régime turbulent)

¹⁾ dans les simulations, le placement exact des sondes est pris en compte ;

²⁾ la résistance thermique de la sonde résulte du test de réponse.

I2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 9

I2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide

Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table I2.1.

<p>Année 1 Puissance thermique extraite de pointe : 130 kW Puissance thermique injectée de pointe : -480 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +10.1 °C Température de fluide minimum simulée : +8.2 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +18.2 °C Température de fluide maximum simulée : +22.9 °C</p>	<p>Température [°C]</p> <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2 Puissance thermique extraite de pointe : 180 kW Puissance thermique injectée de pointe : -180 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +9.3 °C Température de fluide minimum simulée : +7.1 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +18.8 °C Température de fluide maximum simulée : +20.3 °C</p>	<p>Température [°C]</p> <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

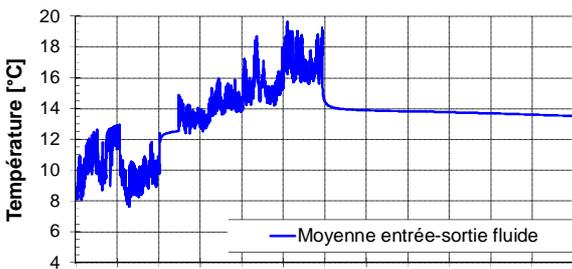
<p>Année 3</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 160 kW Puissance thermique injectée de pointe : -190 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +9.6 °C Température de fluide minimum simulée : +7.7 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +18.4 °C Température de fluide maximum simulée : +19.7 °C</p>	
---	--

Table I2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques pour les 2.5 premières années de fonctionnement de l'installation 9. Les valeurs minimums et maximums annuelles simulées sont également indiquées, avec la valeur mesurée correspondante quand elle est disponible.

Le modèle de simulation permet de recalculer les températures extrêmes mesurées avec une marge de sécurité de l'ordre de 2 K en extraction de chaleur et de 1 à 4 K en injection de chaleur.

I2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique I2.1 et en moyennes journalières dans le graphique I2.2. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières.

L'écart moyen entre les valeurs simulées et mesurées est de -0.2 K pour les valeurs horaires et -0.1 K pour les moyennes journalières. Pour les puissances de pointes transférées, on remarque que l'écart de température est de l'ordre de 1 à 2K. Il est conservatif aussi bien pour l'extraction de chaleur que l'injection de chaleur. On observe une inadéquation entre les mesures et les simulations seulement quand les puissances transférées sont très faibles (voir également figure I2.4).

L'évolution des températures mesurées et simulées est montrée en valeurs journalières dans le graphique I2.3. On remarque que les périodes caractérisées par des différences importantes entre les mesures et les simulations sont limités aux jours pour lesquels l'énergie journalière transférée est très faible.

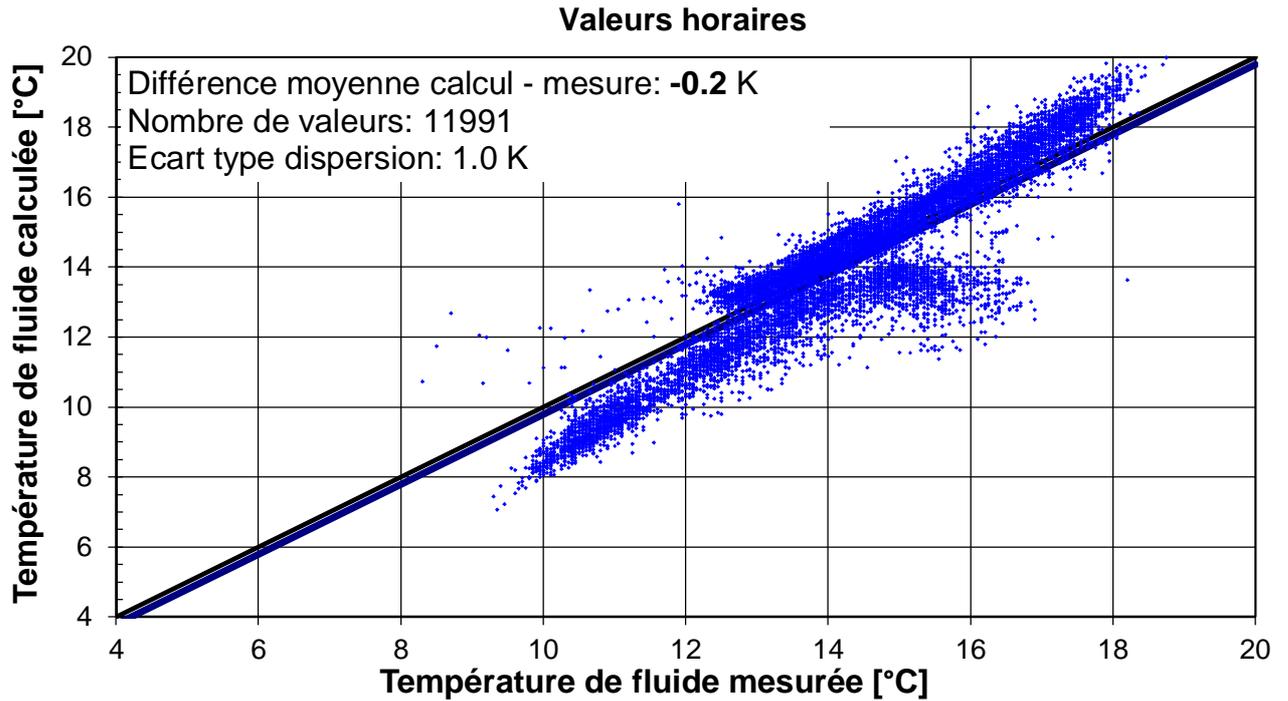


Figure I2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 9.

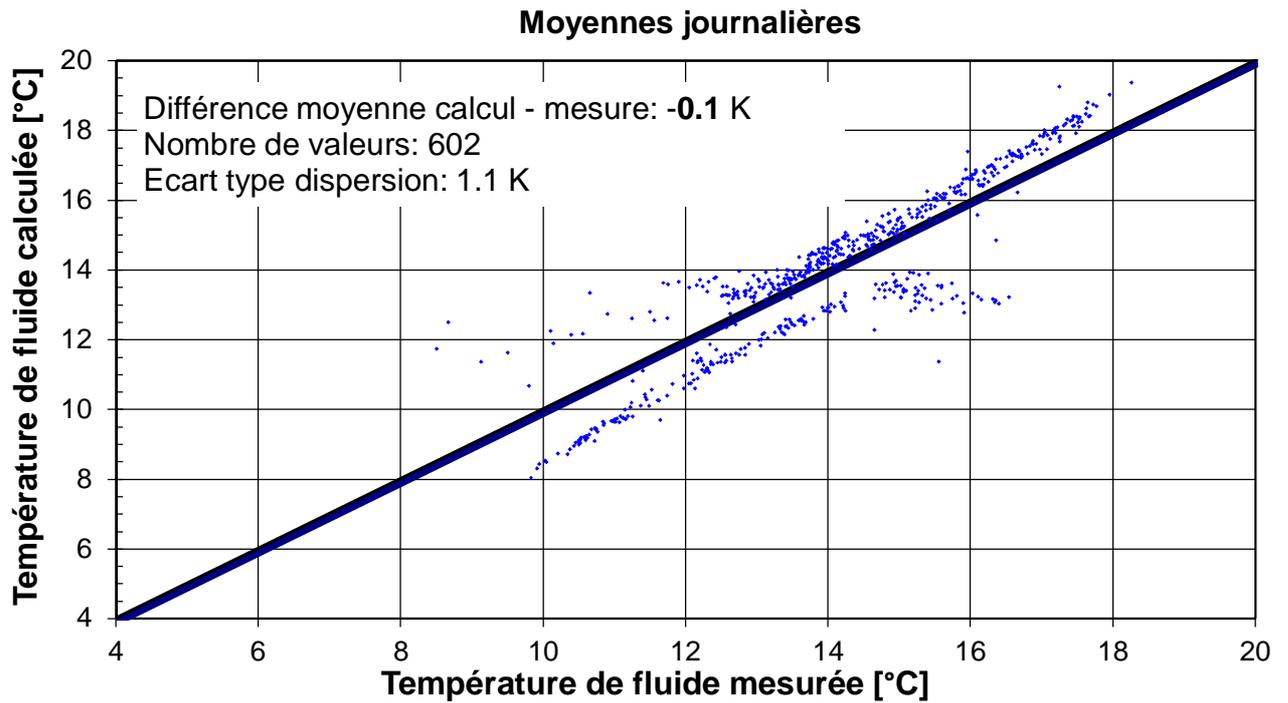


Figure I2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 9.

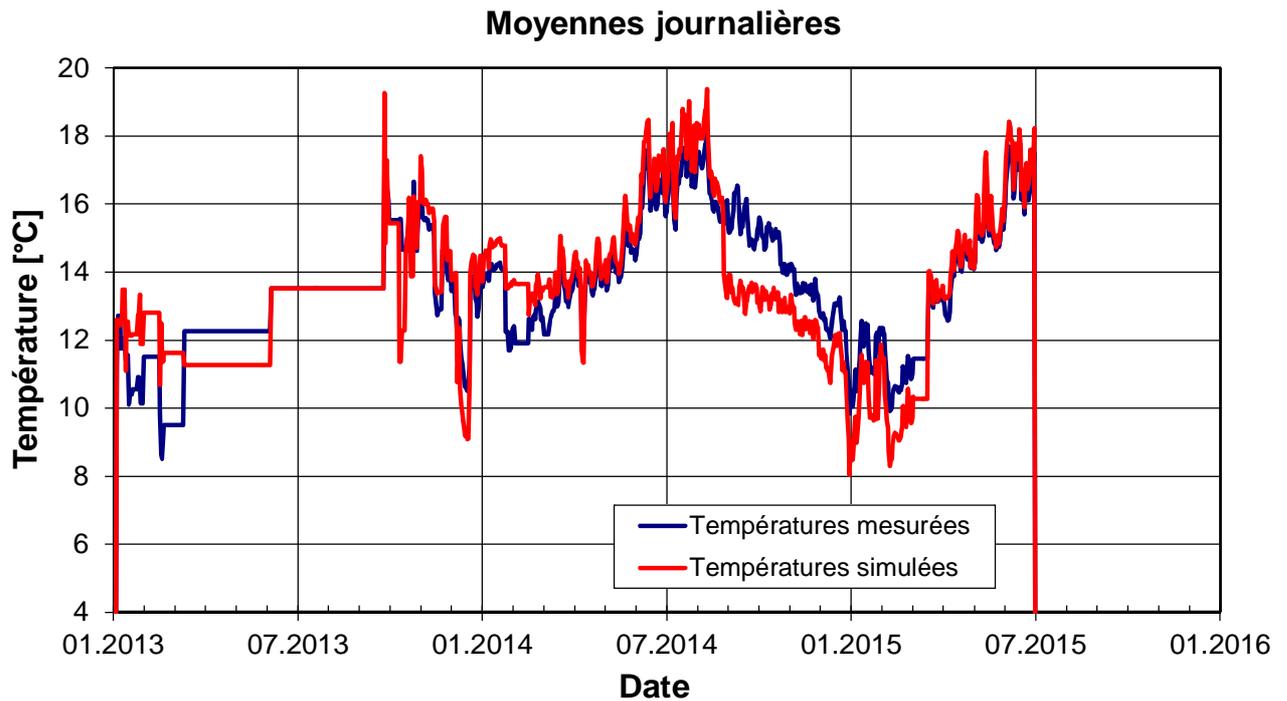


Figure I2.3 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 9.

Dans la figure I2.4, l'écart de température journalier est évalué en injection et en extraction de chaleur en éliminant tous les jours avec un transfert de chaleur inférieur à 1 MWh. On obtient un écart journalier de -1.3K en extraction de chaleur et de +0.6K en injection. Ces deux valeurs indiquent que les calculs sont relativement proches des mesures. D'autre part, leur signe (négatif en extraction et positif en injection), signifie que les simulations présentent une marge de sécurité relativement aux mesures.

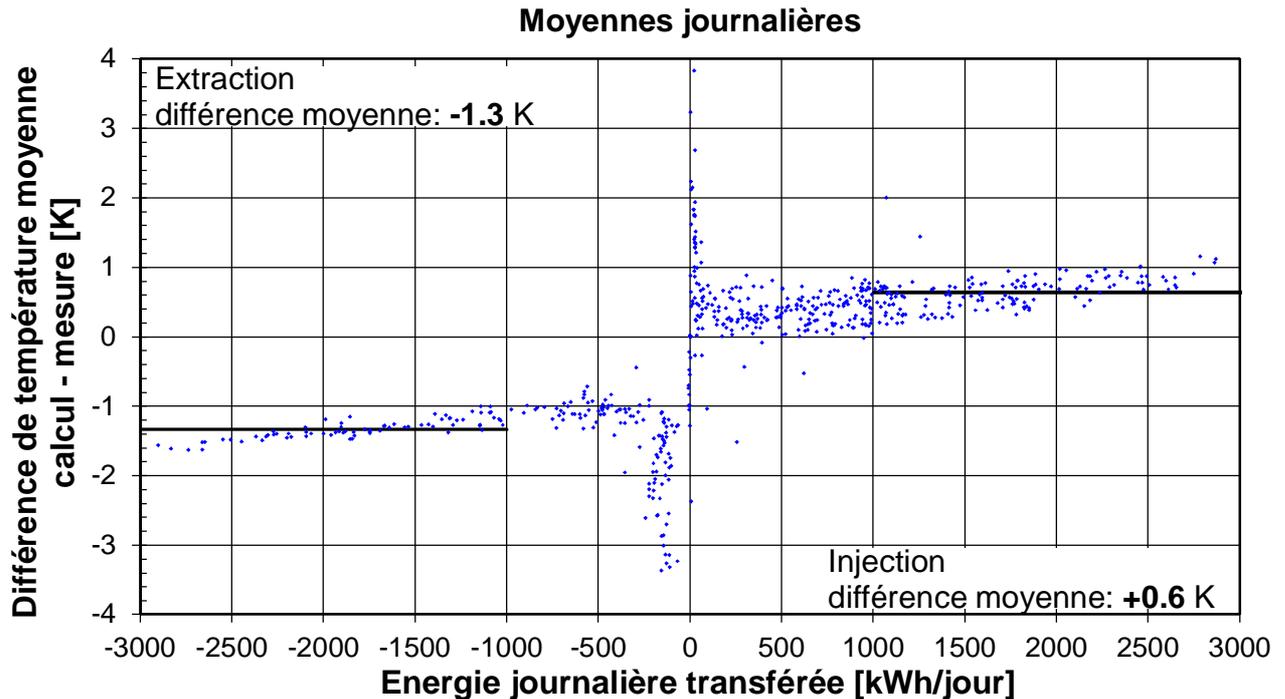


Figure I2.4 Ecart de température journalier en fonction de l'énergie journalière transférée pour l'installation 9.

I2.3. Analyse de sensibilité

Le champ de sondes simulé est en fait une partie d'un champ de sondes plus grand. Toutefois son utilisation est indépendante du reste du champ, ce qui a permis de l'analyser comme s'il était unique. La simulation de tout le champ, qui revient à simuler trois champs de sondes utilisés de façon indépendante mais voisins, montre que l'influence mutuelle reste négligeable durant les premiers 2.5 ans de marche du système (influence de l'ordre de 0.1K).

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des sondes (variante Turb), la variation suivante est évaluée :

- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte de même que la capacité thermique des sondes (variante Turb+C+H) ;

La différence moyenne journalière calcul-mesure est évaluée en ne prenant que les jours avec un transfert d'énergie supérieur à 1 MWh. Les résultats sont montrés dans la table I2.2.

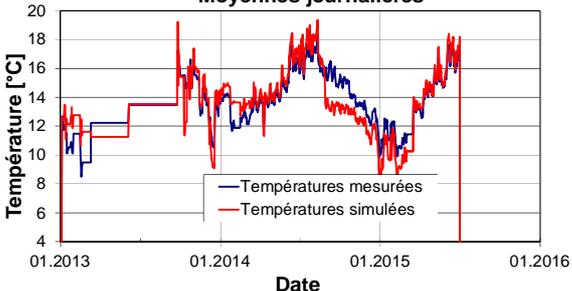
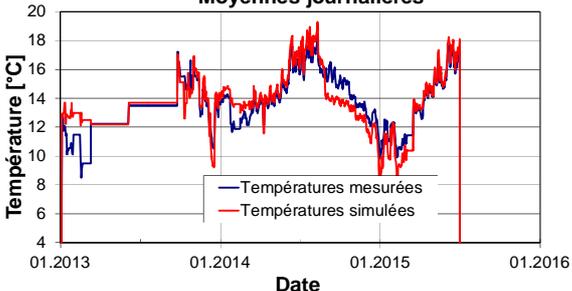
<p>Variante nominale Turb: Régime d'écoulement turbulent dans les sondes</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 1.3 K Différence moyenne en injection : +0.6 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 
<p>Variante Turb+C+H: Capacité thermique des sondes et transferts thermiques des raccords horizontaux entre les sondes ajoutés</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 1.2 K Différence moyenne en injection : +0.6 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 

Table I2.1 Influence des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 9.

La prise en compte des effets capacitifs des sondes et des transferts thermiques des raccords horizontaux permet de très légèrement diminuer l'écart de température entre les simulations et les mesures.

Comme le champ de sondes a été conçu pour fonctionner comme un stockage de chaleur, la simulation à long terme du champ de sondes n'est pas faite.

I3. Analyse du profil de chaleur de l'installation 9

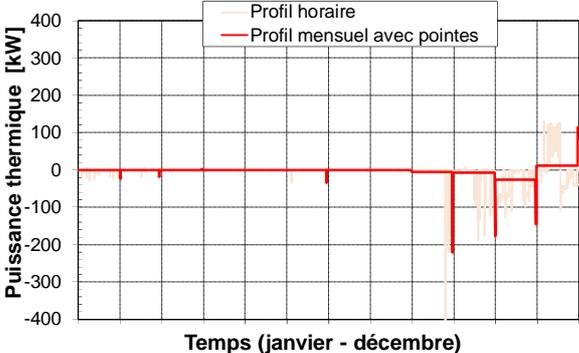
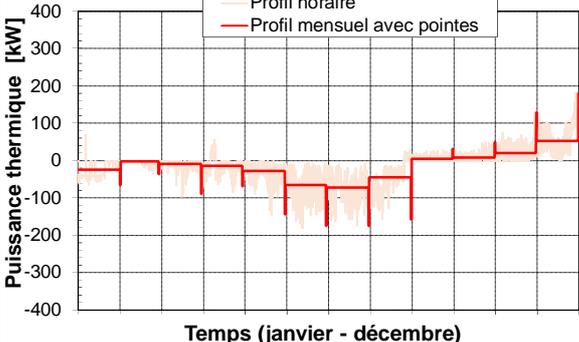
Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante la plus proche des mesures (Turb+C+H) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

I3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 9

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante dès la première année de fonctionnement. Les températures extrêmes sont obtenues pour les deux dernières années de fonctionnement du système.

<p>Année 1:</p> <p>Mois conduisant à température min. : décembre</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 114 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 20 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 12 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 2328 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : octobre</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -177 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 6 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -7 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -1188 kWh</p>	
<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : décembre</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 182 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 16 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 53 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 3336 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : août</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -157 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 16 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -45 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -2872 kWh</p>	

<p>Année 3:</p> <p>Mois conduisant à température min. : février</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 137 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 17 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 69 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 2812 kWh</p>	
--	--

Table I1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 9. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

I3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

<p>Année 1:</p> <p>Mois conduisant à température min. : décembre</p> <p>Température min. avec profil simplifié : +9.3 °C</p> <p>Température minimum de référence : +8.7 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : +0.6 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : octobre</p> <p>Température max. avec profil simplifié : +17.8 °C</p> <p>Température maximum de référence : +17.4 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : +0.4 K</p>	
<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : décembre</p> <p>Température min. avec profil simplifié : +7.3 °C</p> <p>Température minimum de référence : +7.5 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : -0.2 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : août</p> <p>Température max. avec profil simplifié : +20.0 °C</p> <p>Température maximum de référence : +20.0 °C</p> <p>Différence profil simplifié - réel : 0.0 K</p>	

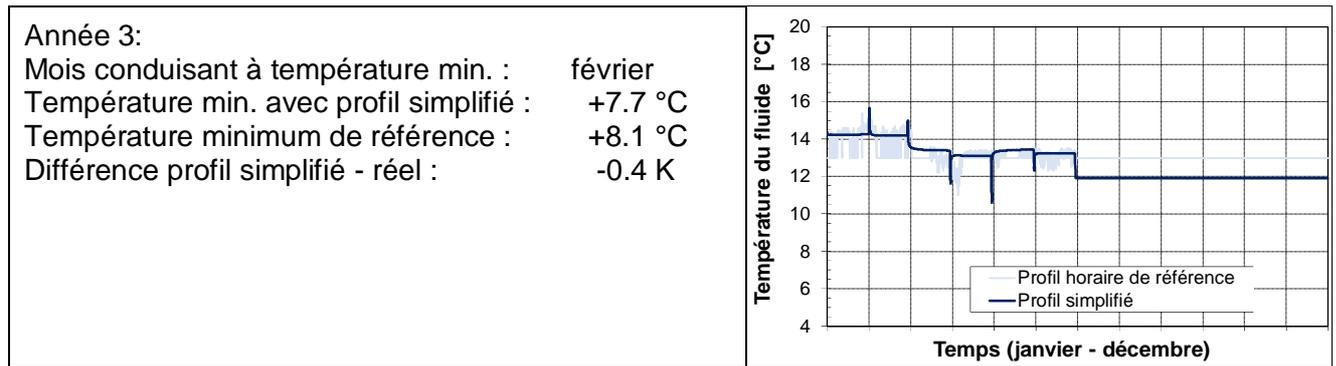


Table I1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 9. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. L'évolution de référence de la température, obtenue avec le profil de chaleur en valeurs horaires, est également indiquée.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une petite différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 9, la différence n'est pas significative à l'exception de la première année pour la température maximum. La raison de ce point singulier est probablement à chercher dans les mesures : en effet, durant le mois de septembre, la puissance d'injection mesurée passe subitement de 0 à 480 kW, pour se stabiliser ensuite vers 200 kW. Avant ce « saut » la mesure de l'énergie transférée par les sondes indiquait une valeur nulle pendant plusieurs mois. Ainsi c'est le mois d'octobre et pas d'août qui est sélectionné pour comparer les températures maximum de la première année.

La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié diffère de respectivement +0.6, -0.2 et -0.4 K de la température minimum de référence pour les 3 années consécutives mesurées. Une différence positive signifie que la simulation sous-estime l'abaissement de température. La sous-estimation reste, avec le profil de chaleur simplifié, contenue.

La température maximum annuelle simulée avec le profil simplifié, sans tenir compte du point singulier, diffère de respectivement +0.4 et 0.0 K de la température maximum de référence pour les deux premières années mesurées. Une différence positive signifie que la simulation est conservative et ne sous-estime pas l'élévation de température.

ANNEXE J: Installation 10

Table des matières

J1. Installation 10	2
J1.1. Mesures disponibles	2
J1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques.....	2
J1.3. Géologie	3
J1.4. Sondes géothermiques	3
J2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 10.....	4
J2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide.....	4
J2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide.....	5
J2.3. Analyse de sensibilité	8
J3. Analyse du profil de chaleur de l’installation 10	10
J3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 10	10
J3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle	11

J1. Installation 10

L'installation 10 fonctionne depuis plus de 2 ans. Toutes les mesures sont disponibles en valeurs horaires depuis la mise en service de l'installation.

J1.1. Mesures disponibles

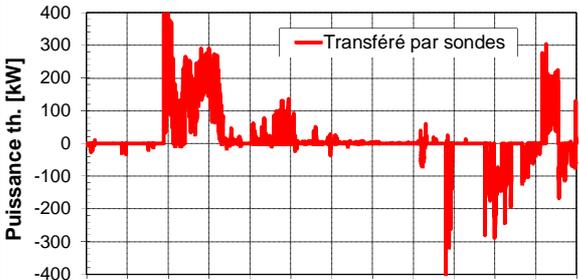
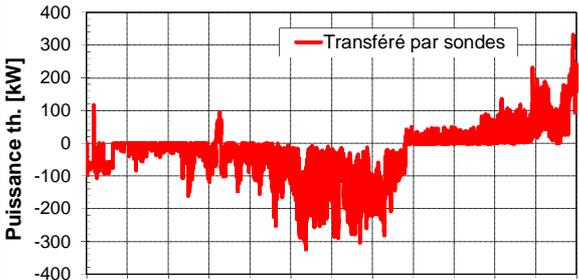
Les mesures disponibles de l'installation 10 sont :

- températures d'entrée et de sortie du champ de sondes géothermiques ;
- débit de fluide total traversant le circuit hydraulique des sondes ;
- puissance thermique transférée par les sondes (+ extraction, - injection) ;
- température de l'air extérieur.

L'évolution de la puissance thermique transférée (extraite ou injectée) dans les sondes géothermiques, ainsi que celle de la température du fluide caloporteur dans le circuit des sondes, définie par la moyenne des températures aller et retour du fluide, résultent directement des mesures.

J1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques

Les profils d'extraction et d'injection de chaleur sont montrés dans la table I1.1 pour la durée de fonctionnement de l'installation.

<p>Année 1</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 580 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 213 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -520 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -62 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : 151 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 10.7 °C</p>	 <p>Puissance th. [kW]</p> <p>— Transféré par sondes</p> <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 330 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 127 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -320 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -343 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : -216 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 12.3 °C</p>	 <p>Puissance th. [kW]</p> <p>— Transféré par sondes</p> <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

Année 3		
Puissance thermique extraite de pointe :	280 kW	
Durée max. de la puissance de pointe :	1 h	
Energie extraite annuelle :	153 MWh/a	
Puissance thermique injectée de pointe :	-330 kW	
Durée max. de la puissance de pointe :	1 h	
Energie injectée annuelle :	-209 MWh/a	
Energie nette transférée par sondes : (énergie stockée (-), déstockée (+))	-56 MWh/a	
Température air extérieur du lieu :	10.6 °C	

Table I1.1 Profils horaires mesurés de la puissance thermique extraite (+) et injectée (-) dans les sondes géothermiques pour les 2.5 premières années de fonctionnement de l'installation 10.

J1.3. Géologie

Les paramètres du terrain ont été obtenus avec un test de réponse étendu (e-TRT), effectué sur une sonde test posée dans le volume de terrain occupé par le champ de sondes. Il permet également la détermination du gradient de température géothermique. Comme les simulations sont effectuées aussi bien pour des périodes d'extraction que d'injection de chaleur, pas de marge de sécurité n'est prise sur la température initiale du terrain. D'autre part, s'agissant d'un test de réponse étendu réalisé avec la meilleure précision possible, pas de marge de sécurité n'est appliquée sur la valeur de conductivité thermique du terrain.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain : 3.0 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain : 2.1 MJ/(m³K)
- température initiale du terrain vers la surface : 9.6 °C
- gradient de température géothermique : 32 K/km

J1.4. Sondes géothermiques

Le système utilise un champ de 62 sondes géothermiques de 200 m chacune placées sous un bâtiment. La disposition des sondes est relativement bien régulière. Elle correspond à une disposition compacte des sondes avec un espacement de 5m entre elles. Toutes les sondes sont couplées en parallèle et le débit total nominal dans le circuit des sondes est d'environ 130 m³/h. Comme de l'eau pure est utilisée dans le circuit hydraulique des sondes, le régime d'écoulement dans les tubes des sondes est turbulent (double-U avec un tube HDPE de diamètre externe de 40mm).

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement turbulent dans les sondes. Le débit, mesuré, montre qu'il est cependant variable. Il est donné comme une variable d'entrée aux simulations.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux sondes géothermiques sont :

- nombre de sondes géothermiques : 62
- profondeur des sondes géothermiques : 200 m
- espacement entre les sondes : 5 m¹⁾
- diamètre d'une sonde (forage): 0.135 m
- type de sonde : double-U
- résistance thermique de la sonde Rb²⁾ : 0.100 K/(W/m) (régime turbulent)
- résistance thermique interne de la sonde Ra : 0.275 K/(W/m) (régime turbulent)

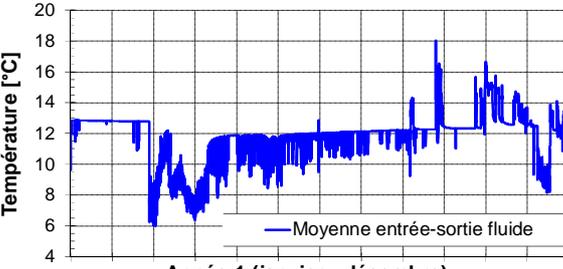
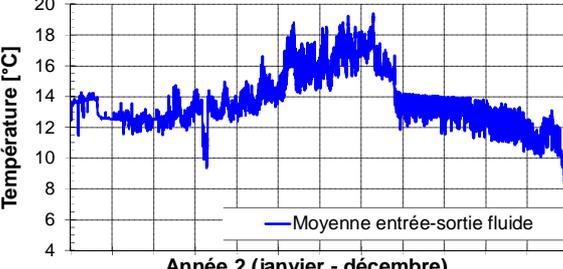
¹⁾ dans les simulations, le placement exact des sondes est pris en compte ;

²⁾ la résistance thermique de la sonde résulte du test de réponse.

J2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 10

J2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide

Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table I2.1.

<p>Année 1 Puissance thermique extraite de pointe : 580 kW Puissance thermique injectée de pointe : -520 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +7.9 °C Température de fluide minimum simulée : +6.0 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +17.7 °C Température de fluide maximum simulée : +18.1 °C</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2 Puissance thermique extraite de pointe : 330 kW Puissance thermique injectée de pointe : -320 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +9.4 °C Température de fluide minimum simulée : +7.2 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +18.7 °C Température de fluide maximum simulée : +19.4 °C</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

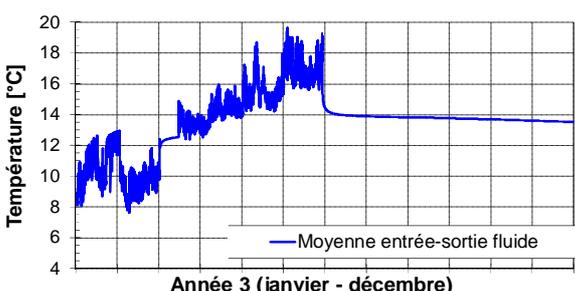
<p>Année 3</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 280 kW Puissance thermique injectée de pointe : -330 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +9.7 °C Température de fluide minimum simulée : +7.8 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +18.2 °C Température de fluide maximum simulée : +18.9 °C</p>	
---	--

Table I2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques pour les 2.5 premières années de fonctionnement de l'installation 10. Les valeurs minimums et maximums annuelles simulées sont également indiquées, avec la valeur mesurée correspondante quand elle est disponible.

Le modèle de simulation permet de recalculer les températures extrêmes mesurées avec une marge de sécurité inférieure à 2 K en extraction de chaleur et à 1 K en injection de chaleur.

J2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique I2.1 et en moyennes journalières dans le graphique I2.2. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières.

L'écart moyen entre les valeurs simulées et mesurées est de -0.9 K pour les valeurs horaires et -1.2 K pour les moyennes journalières. Pour les puissances de pointes transférées, on remarque que l'écart de température est de l'ordre de 2K en extraction de chaleur et inférieur à 1 K en injection de chaleur. Il est conservatif aussi bien pour l'extraction de chaleur que l'injection de chaleur. On observe une inadéquation entre les mesures et les simulations seulement quand les puissances transférées sont très faibles (voir également figure I2.4).

L'évolution des températures mesurées et simulées est montrée en valeurs journalières dans le graphique I2.3. On remarque également des périodes avec des différences importantes entre les mesures et les simulations, qui sont justement caractérisées par de très faibles énergies journalières transférées.

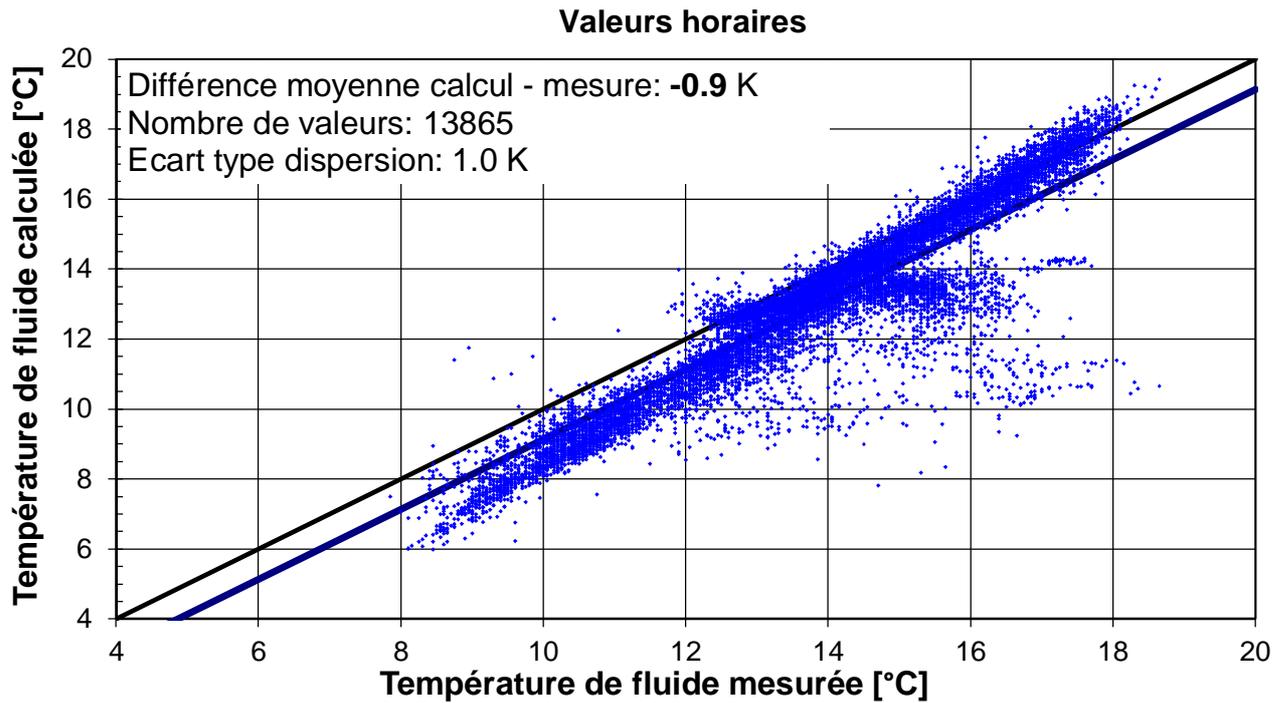


Figure I2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 10.

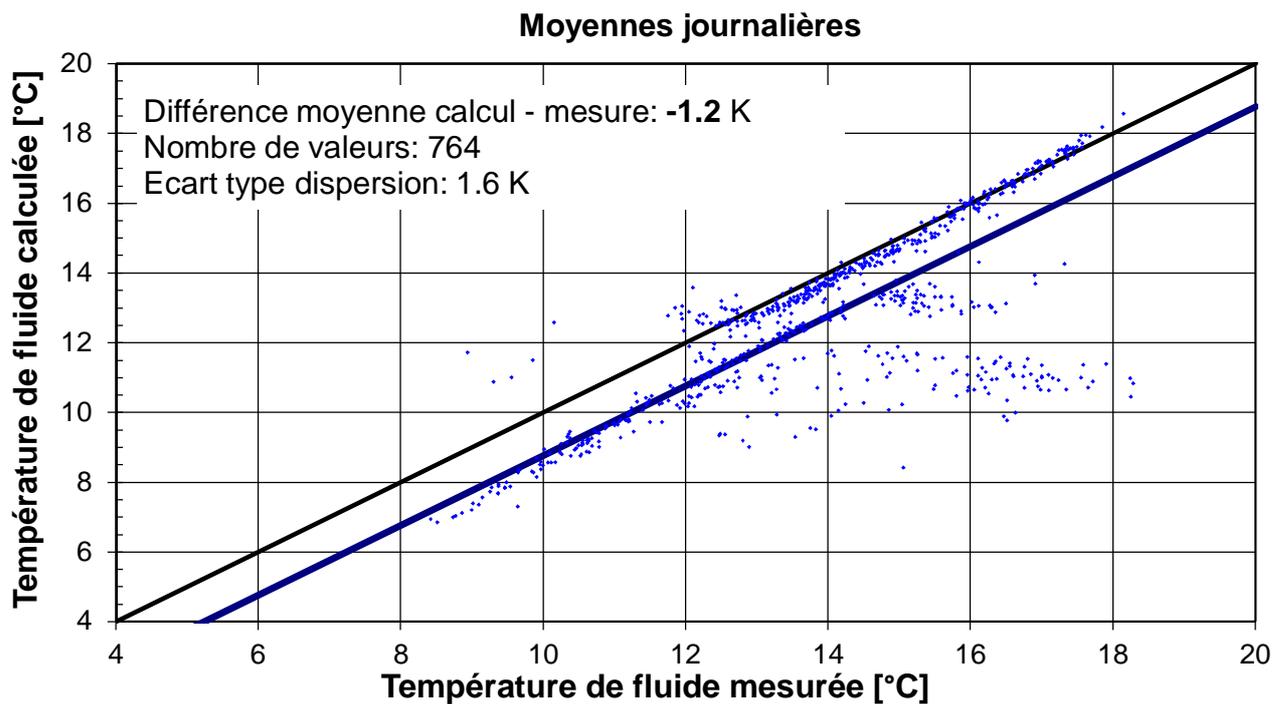


Figure I2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 10.

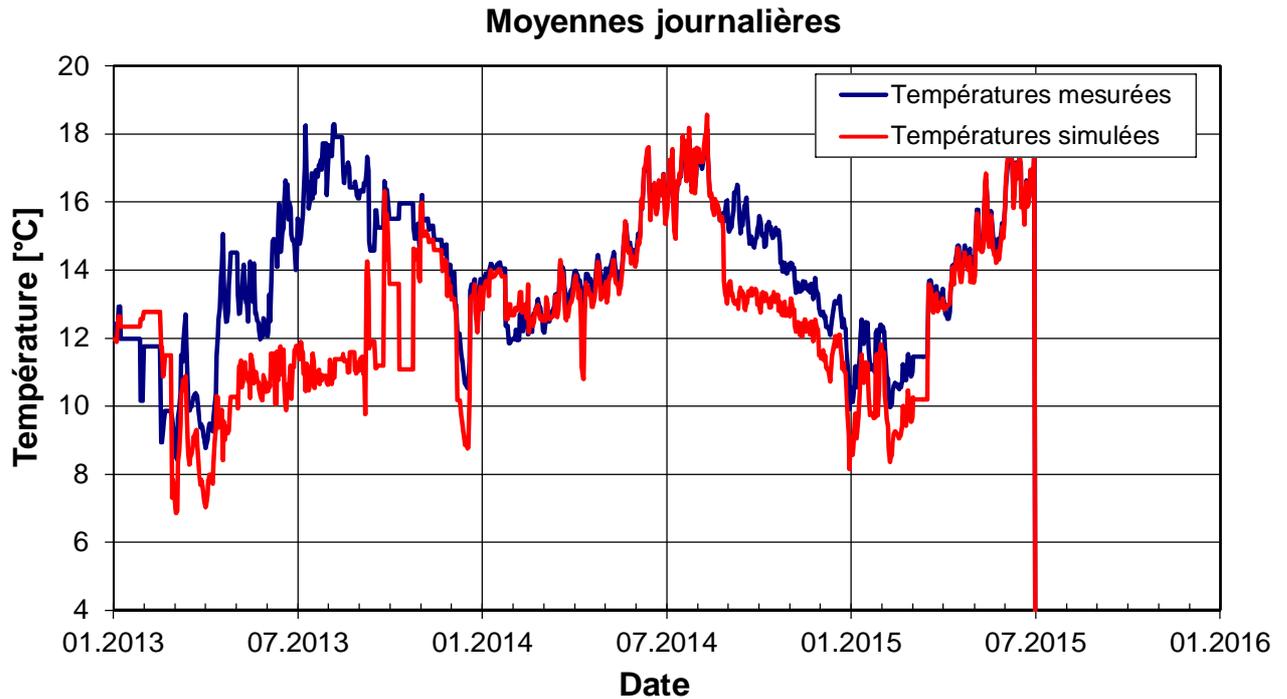


Figure I2.3 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 10.

Dans la figure I2.4, l'écart de température journalier est évalué en injection et en extraction de chaleur en éliminant tous les jours avec un transfert de chaleur inférieur à 1 MWh. On obtient un écart journalier de -1.4K en extraction de chaleur et de -0.2K en injection. Ces deux valeurs indiquent que les calculs sont relativement proches des mesures. Le signe négatif en extraction de chaleur signifie que les simulations présentent une marge de sécurité relativement aux mesures. En revanche, le signe négatif en injection de chaleur indique le contraire. Toutefois la différence avec les mesures est très faible (-0.2 K en moyenne).

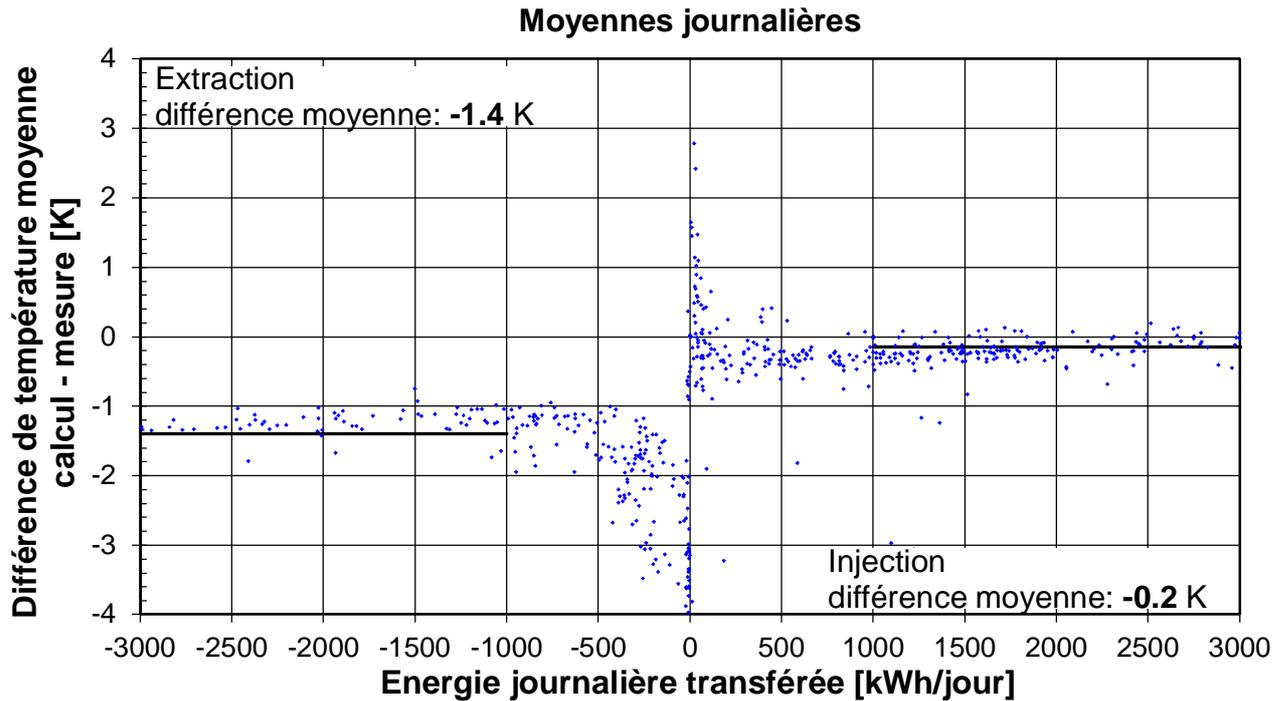


Figure I2.4 Ecart de température journalier en fonction de l'énergie journalière transférée pour l'installation 10.

J2.3. Analyse de sensibilité

Le champ de sondes simulé est en fait une partie d'un champ de sondes plus grand. Toutefois son utilisation est indépendante du reste du champ, ce qui a permis de l'analyser comme s'il était unique. La simulation de tout le champ, qui revient à simuler trois champs de sondes utilisés de façon indépendante mais voisins, montre que l'influence mutuelle, insignifiante la première année de fonctionnement, devient plus importante par la suite. Elle est de l'ordre de 0.2 à 0.3 K après 2 ans. Elle fait passer l'écart de température moyen de -1.4 K à -1.1 K en extraction de chaleur et de -0.2 K à 0.0 K en injection de chaleur. L'influence mutuelle permet de rapprocher les simulations des mesures. Toutefois, par simplification et par cohérence avec les autres installations, l'analyse de sensibilité est réalisée sans l'influence des champs voisins.

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des sondes (variante Turb), la variation suivante est évaluée :

- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte de même que la capacité thermique des sondes (variante Turb+C+H) ;

La différence moyenne journalière calcul-mesure est évaluée en ne prenant que les jours avec un transfert d'énergie supérieur à 1 MWh. Les résultats sont montrés dans la table I2.2.

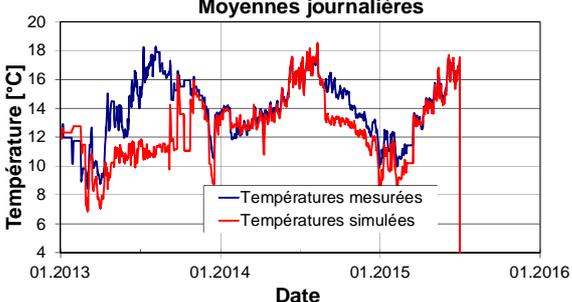
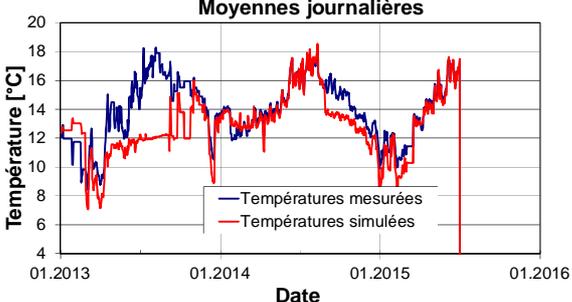
<p>Variante nominale Turb: Régime d'écoulement turbulent dans les sondes</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 1.4 K Différence moyenne en injection : - 0.2 K</p>	
<p>Variante Turb+C+H: Capacité thermique des sondes et transferts thermiques des raccords horizontaux entre les sondes ajoutés</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 1.2 K Différence moyenne en injection : - 0.1 K</p>	

Table I2.1 Influence des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 10.

La prise en compte des effets capacitifs des sondes et des transferts thermiques des raccords horizontaux permet de très légèrement diminuer l'écart de température entre les simulations et les mesures.

Comme le champ de sondes a été conçu pour fonctionner comme un stockage de chaleur, la simulation à long terme du champ de sondes n'est pas faite.

J3. Analyse du profil de chaleur de l'installation 10

Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante la plus proche des mesures (Turb+C+H) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

J3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 10

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante dès la première année de fonctionnement. Les températures extrêmes sont obtenues pour les deux dernières années de fonctionnement du système.

<p>Année 1:</p> <p>Mois conduisant à température min. : mars</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 405 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 11 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 148 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 6379 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -315 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 7 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -10 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -2375 kWh</p>	
<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : décembre</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 333 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 16 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 94 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 6080 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : juillet</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -304 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 12 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -126 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -5160 kWh</p>	

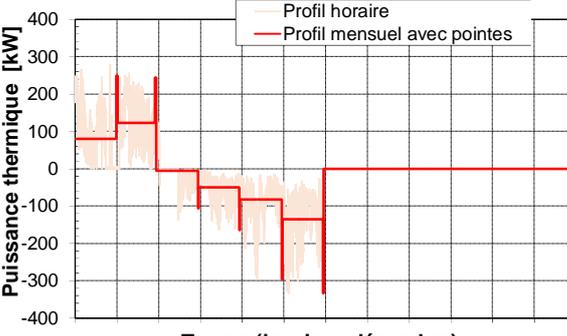
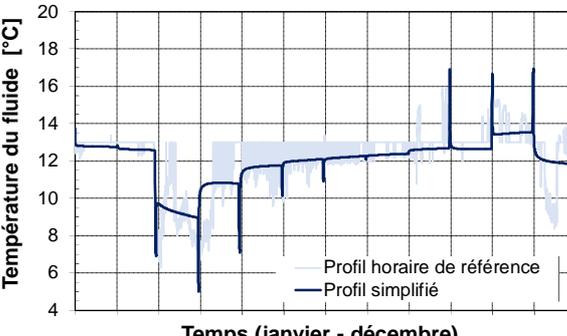
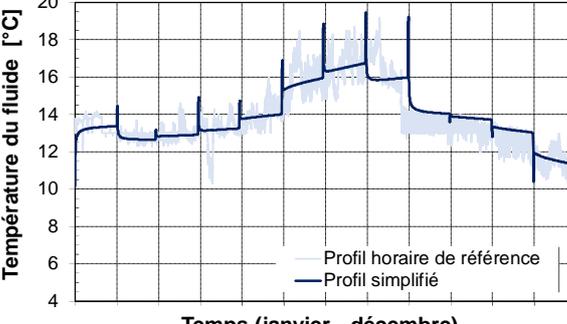
<p>Année 3: Mois conduisant à température min. : février Puissance thermique extraite de pointe : 244 kW Durée max. de la puissance de pointe : 18 h Pulse moyen mensuel extrait : 124 kW Energie max. journalière extraite : 5136 kWh</p>	
---	--

Table I1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 10. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

J3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

<p>Année 1: Mois conduisant à température min. : mars Température min. avec profil simplifié : +5.0 °C Température minimum de référence : +6.3 °C Différence profil simplifié - réel : -1.3 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre Température max. avec profil simplifié : +16.9 °C Température maximum de référence : +15.9 °C Différence profil simplifié - réel : +1.0 K</p>	
<p>Année 2: Mois conduisant à température min. : décembre Température min. avec profil simplifié : +7.4 °C Température minimum de référence : +7.6 °C Différence profil simplifié - réel : -0.2 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : juillet Température max. avec profil simplifié : +19.5 °C Température maximum de référence : +18.7 °C Différence profil simplifié - réel : +0.8 K</p>	

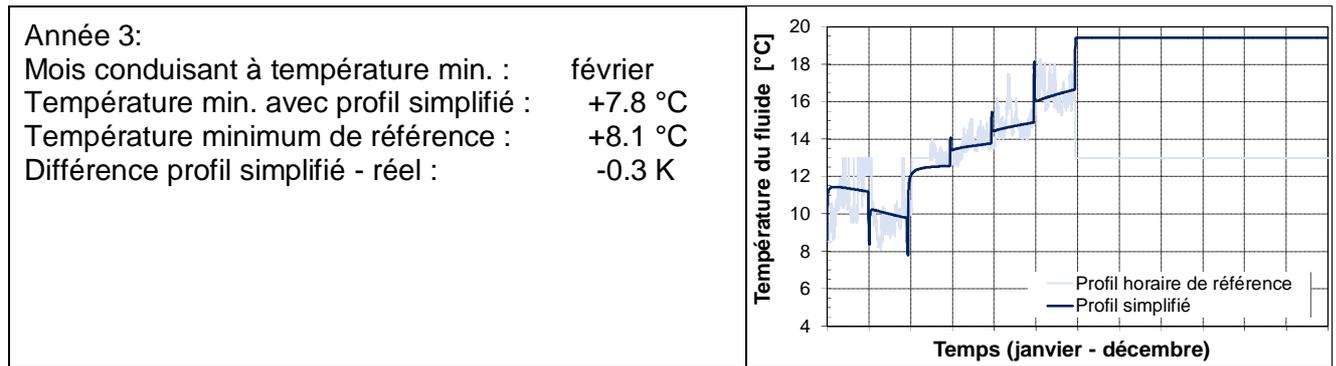


Table I1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 10. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. L'évolution de référence de la température, obtenue avec le profil de chaleur en valeurs horaires, est également indiquée.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une petite différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 10, la différence reste inférieure à 1 K à l'exception de la première année pour la température minimum.

La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié diffère de respectivement +1.3, -0.2 et -0.3 K de la température minimum de référence pour les 3 années consécutives mesurées. Une différence positive signifie que la simulation sous-estime l'abaissement de température. La sous-estimation reste, avec le profil de chaleur simplifié, raisonnable.

La température maximum annuelle simulée avec le profil simplifié, sans tenir compte de la première année, diffère respectivement de +1.0 et +0.8 K de la température maximum de référence pour les deux premières années mesurées. Une différence positive signifie que la simulation est conservative et ne sous-estime pas l'élévation de température.

ANNEXE K: Installation 11

Table des matières

K1. Installation 11	2
K1.1. Mesures disponibles	2
K1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques.....	2
K1.3. Géologie	3
K1.4. Sondes géothermiques	3
K2. Comparaison mesures – calculs de l’installation 11.....	4
K2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide	4
K2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide	5
K2.3. Analyse de sensibilité.....	8
K3. Analyse du profil de chaleur de l’installation 11	10
K3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l’installation 11.....	10
K3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle	11

K1. Installation 11

L'installation 11 fonctionne depuis plus de 2 ans. Toutes les mesures sont disponibles en valeurs horaires depuis la mise en service de l'installation.

K1.1. Mesures disponibles

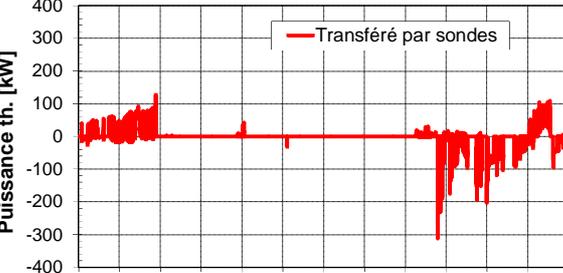
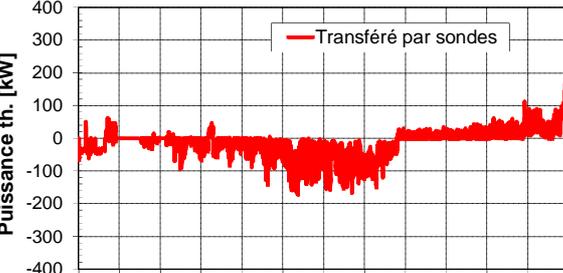
Les mesures disponibles de l'installation 11 sont :

- températures d'entrée et de sortie du champ de sondes géothermiques ;
- débit de fluide total traversant le circuit hydraulique des sondes ;
- puissance thermique transférée par les sondes (+ extraction, - injection) ;
- température de l'air extérieur.

L'évolution de la puissance thermique transférée (extraite ou injectée) dans les sondes géothermiques, ainsi que celle de la température du fluide caloporteur dans le circuit des sondes, définie par la moyenne des températures aller et retour du fluide, résultent directement des mesures.

K1.2. Energie et puissance extraites des sondes géothermiques

Les profils d'extraction et d'injection de chaleur sont montrés dans la table K1.1 pour la durée de fonctionnement de l'installation.

<p>Année 1</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 130 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 49 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -310 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -41 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : 8 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 10.7 °C</p>	 <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 170 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie extraite annuelle : 66 MWh/a</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -170 kW Durée max. de la puissance de pointe : 1 h Energie injectée annuelle : -181 MWh/a</p> <p>Energie nette transférée par sondes : -115 MWh/a (énergie stockée (-), déstockée (+)) Température air extérieur du lieu : 12.3 °C</p>	 <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

Année 3		
Puissance thermique extraite de pointe :	140 kW	
Durée max. de la puissance de pointe :	1 h	
Energie extraite annuelle :	72 MWh/a	
Puissance thermique injectée de pointe :	-180 kW	
Durée max. de la puissance de pointe :	1 h	
Energie injectée annuelle :	-109 MWh/a	
Energie nette transférée par sondes : (énergie stockée (-), déstockée (+))	-37 MWh/a	
Température air extérieur du lieu :	10.6 °C	

Table K1.1 Profils horaires mesurés de la puissance thermique extraite (+) et injectée (-) dans les sondes géothermiques pour les 2.5 premières années de fonctionnement de l'installation 11.

K1.3. Géologie

Les paramètres du terrain ont été obtenus avec un test de réponse étendu (e-TRT), effectué sur une sonde test posée dans le volume de terrain occupé par le champ de sondes. Il permet également la détermination du gradient de température géothermique. Comme les simulations sont effectuées aussi bien pour des périodes d'extraction que d'injection de chaleur, pas de marge de sécurité n'est prise sur la température initiale du terrain. D'autre part, s'agissant d'un test de réponse étendu réalisé avec la meilleure précision possible, pas de marge de sécurité n'est appliquée sur la valeur de conductivité thermique du terrain.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs à la géologie sont :

- conductivité thermique moyenne du terrain : 3.0 W/(mK)
- capacité thermique spécifique du terrain : 2.1 MJ/(m³K)
- température initiale du terrain vers la surface : 9.6 °C
- gradient de température géothermique : 32 K/km

K1.4. Sondes géothermiques

Le système utilise un champ de 32 sondes géothermiques de 200 m chacune placées sous un bâtiment. La disposition des sondes est relativement bien régulière. Elle correspond à une disposition compacte des sondes avec un espacement de 5m entre elles. Toutes les sondes sont couplées en parallèle et le débit total nominal dans le circuit des sondes est d'environ 80 m³/h. Comme de l'eau pure est utilisée dans le circuit hydraulique des sondes, le régime d'écoulement dans les tubes des sondes est turbulent (double-U avec un tube HDPE de diamètre externe de 40mm).

Les calculs sont donc effectués en supposant un régime d'écoulement turbulent dans les sondes. Le débit, mesuré, montre qu'il est cependant variable. Il est donné comme une variable d'entrée aux simulations.

Les valeurs de calcul des paramètres relatifs aux sondes géothermiques sont :

- nombre de sondes géothermiques : 32
- profondeur des sondes géothermiques : 200 m
- espacement entre les sondes : 5 m¹⁾
- diamètre d'une sonde (forage): 0.135 m
- type de sonde : double-U
- résistance thermique de la sonde Rb²⁾ : 0.100 K/(W/m) (régime turbulent)
- résistance thermique interne de la sonde Ra : 0.275 K/(W/m) (régime turbulent)

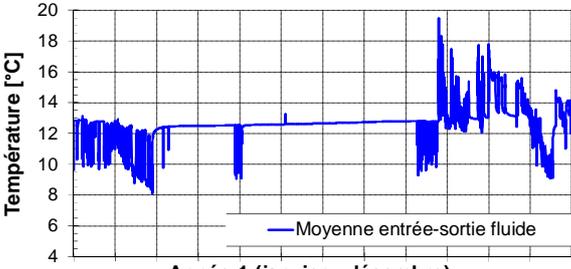
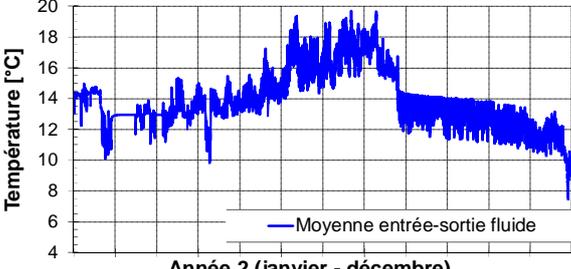
¹⁾ dans les simulations, le placement exact des sondes est pris en compte ;

²⁾ la résistance thermique de la sonde résulte du test de réponse.

K2. Comparaison mesures – calculs de l'installation 11

K2.1. Températures minimums et maximums annuelles du fluide

Les simulations, exécutées avec un pas de temps horaire, ont produit les profils de température montrés dans la table K2.1.

<p>Année 1 Puissance thermique extraite de pointe : 130 kW Puissance thermique injectée de pointe : -310 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +7.0 °C Température de fluide minimum simulée : +8.1 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +18.2 °C Température de fluide maximum simulée : +19.5 °C</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 1 (janvier - décembre)</p>
<p>Année 2 Puissance thermique extraite de pointe : 170 kW Puissance thermique injectée de pointe : -170 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +9.4 °C Température de fluide minimum simulée : +7.5 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +18.9 °C Température de fluide maximum simulée : +19.7 °C</p>	 <p>Température [°C]</p> <p>Moyenne entrée-sortie fluide</p> <p>Année 2 (janvier - décembre)</p>

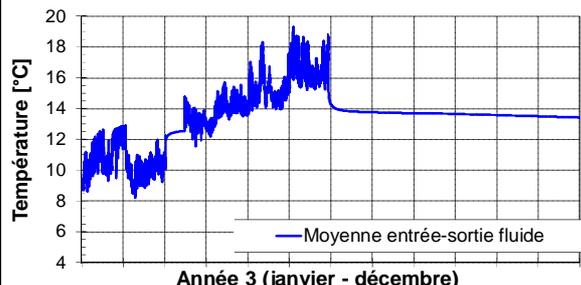
<p>Année 3</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 140 kW Puissance thermique injectée de pointe : -180 kW</p> <p>Température de fluide minimum mesurée: +9.7 °C Température de fluide minimum simulée : +8.3 °C</p> <p>Température de fluide maximum mesurée: +18.4 °C Température de fluide maximum simulée : +19.3 °C</p>	
---	--

Table K2.1 Profils horaires simulés de la température du fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques pour les 2.5 premières années de fonctionnement de l'installation 11. Les valeurs minimums et maximums annuelles simulées sont également indiquées, avec la valeur mesurée correspondante quand elle est disponible.

A l'exception de la première année pour l'extraction de chaleur, le modèle de simulation permet de recalculer les températures extrêmes mesurées avec une marge de sécurité de l'ordre de 2 K en extraction de chaleur et de 1 K en injection de chaleur.

K2.2. Comparaison calcul – mesure des températures de fluide

Les températures mesurées et simulées sont comparées en valeurs horaires dans le graphique K2.1 et en moyennes journalières dans le graphique K2.2. Toutes les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs simulées. Comme attendu, la dispersion des valeurs horaires est plus importante que celle des valeurs journalières.

L'écart moyen entre les valeurs simulées et mesurées est de -0.5 K pour les valeurs horaires et -0.6 K pour les moyennes journalières. Pour les puissances de pointes transférées, on remarque que l'écart de température est de l'ordre de 1 à 2K en extraction de chaleur et inférieur à moins de 1 K en injection de chaleur. Mis à part quelques points qui correspondent au premier hiver de fonctionnement du système, il est conservatif aussi bien pour l'extraction de chaleur que l'injection de chaleur. On observe une inadéquation entre les mesures et les simulations seulement quand les puissances transférées sont très faibles (voir également figure K2.4).

L'évolution des températures mesurées et simulées est montrée en valeurs journalières dans le graphique K2.3. On remarque également des périodes avec des différences importantes entre les mesures et les simulations, qui sont justement caractérisées par de faibles énergies journalières transférées.

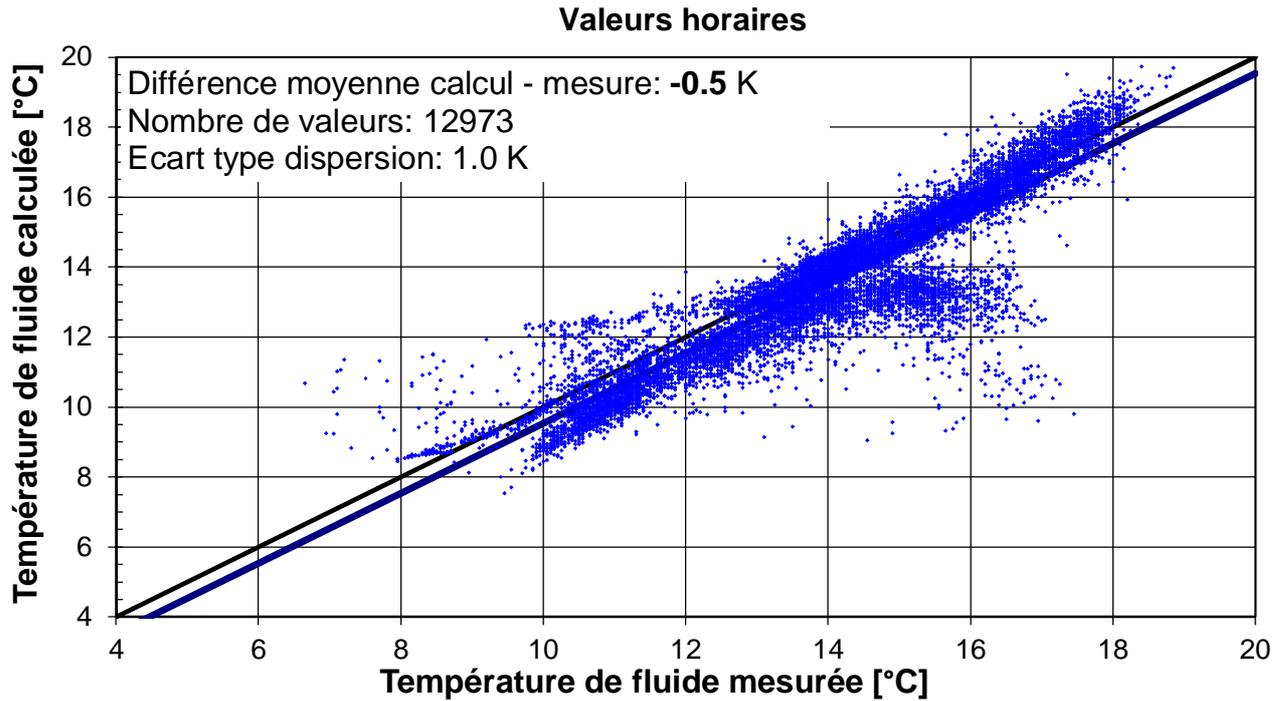


Figure K2.1 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en valeurs horaires de l'installation 11.

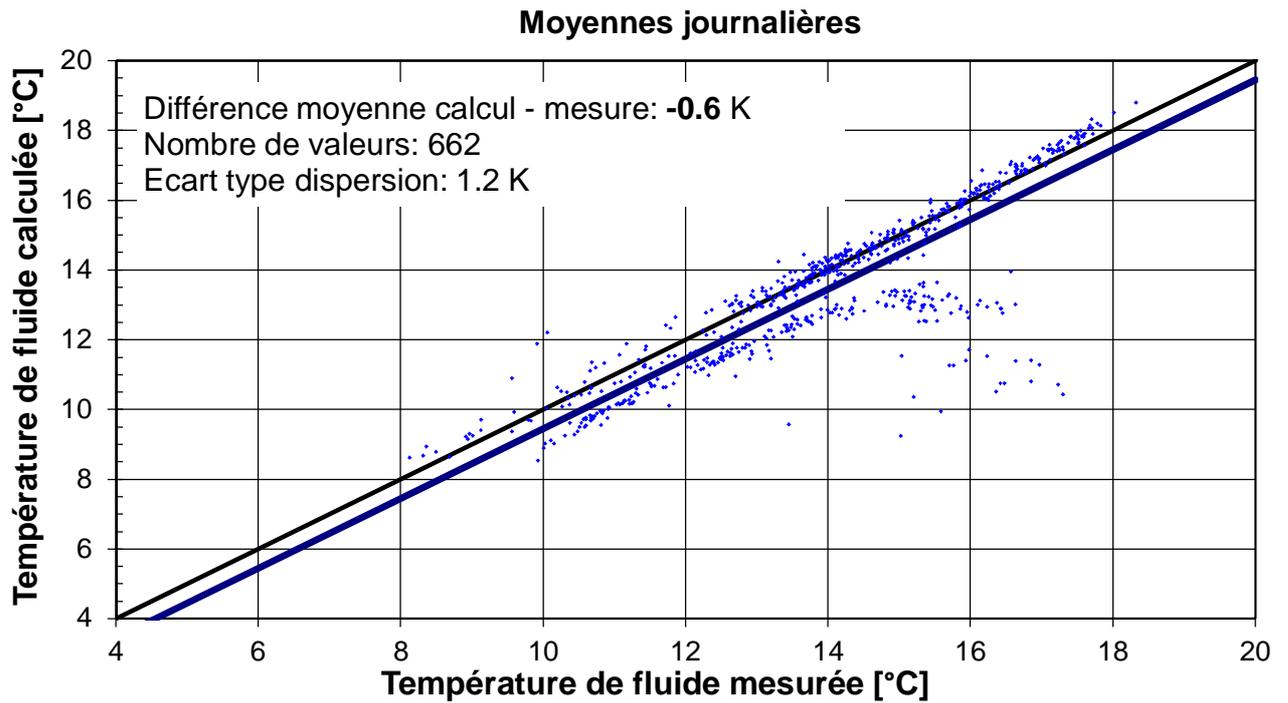


Figure K2.2 Comparaison des températures de fluide calculées et mesurées en moyennes journalières de l'installation 11.

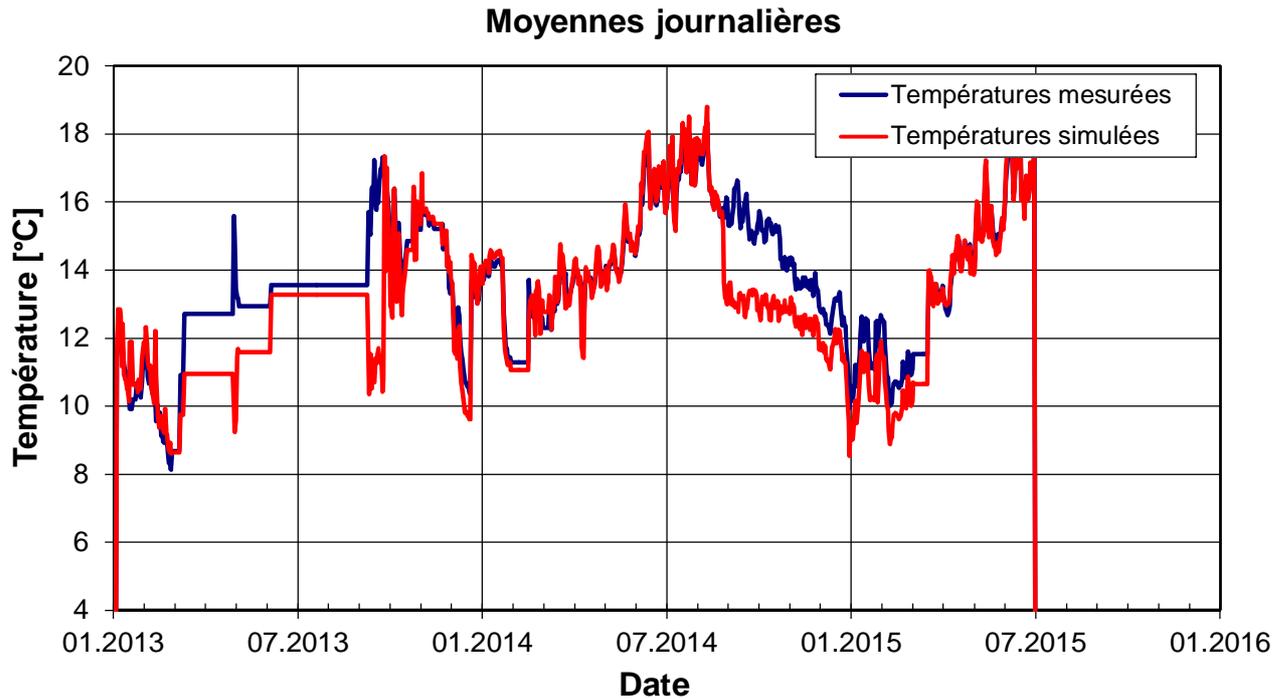


Figure K2.3 Evolution en moyennes journalières des températures de fluide mesurées et simulées dans le circuit des sondes de l'installation 11.

Dans la figure K2.4, l'écart de température journalier est évalué en injection et en extraction de chaleur en éliminant tous les jours avec un transfert de chaleur inférieur à 1 MWh. En extraction de chaleur, les mesures du premier hiver sont éliminées. On obtient un écart journalier de -1.0 K en extraction de chaleur et de +0.2 K en injection. Ces deux valeurs indiquent que les calculs sont proches des mesures. D'autre part, leur signe (négatif en extraction et positif en injection), signifie que les simulations présentent une marge de sécurité relativement aux mesures.

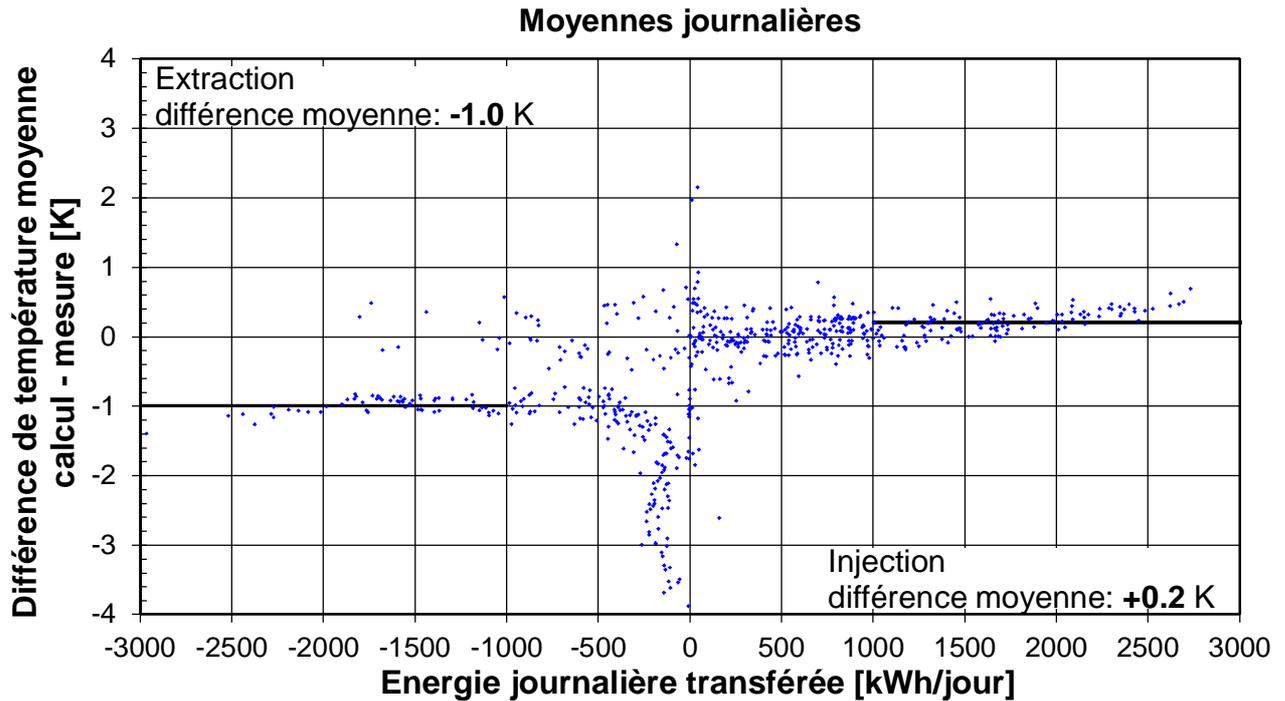


Figure K2.4 Ecart de température journalier en fonction de l'énergie journalière transférée pour l'installation 11.

K2.3. Analyse de sensibilité

Le champ de sondes simulé est en fait une partie d'un champ de sondes plus grand. Toutefois son utilisation est indépendante du reste du champ, ce qui a permis de l'analyser comme s'il était unique. La simulation de tout le champ, qui revient à simuler trois champs de sondes utilisés de façon indépendante mais voisins, montre que l'influence mutuelle n'influence pas de plus de 0.1 K l'écart de température moyen entre les mesures et les simulations. L'influence permet toutefois de rapprocher les simulations des mesures. Comme pour les autres installations, l'analyse de sensibilité est réalisée sans l'influence des champs voisins.

Relativement aux paramètres nominaux utilisés pour simuler l'évolution de la température du fluide dans le circuit des sondes (variante Turb), la variation suivante est évaluée :

- les transferts thermiques des raccords horizontaux sont pris en compte de même que la capacité thermique des sondes (variante Turb+C+H) ;

La différence moyenne journalière calcul-mesure est évaluée en ne prenant que les jours avec un transfert d'énergie supérieur à 1 MWh. Les résultats sont montrés dans la table K2.2.

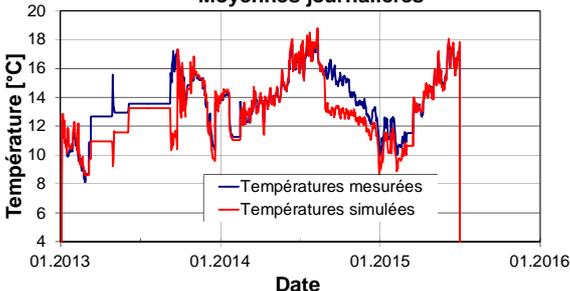
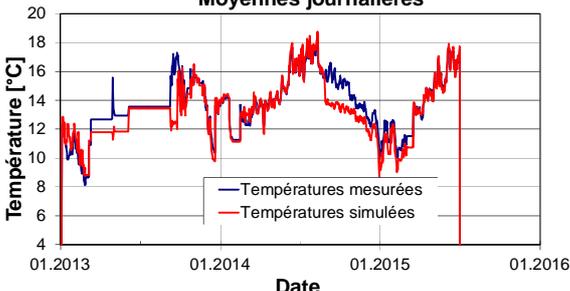
<p>Variante nominale Turb: Régime d'écoulement turbulent dans les sondes</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 1.0 K Différence moyenne en injection : +0.2 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 
<p>Variante Turb+C+H: Capacité thermique des sondes et transferts thermiques des raccords horizontaux entre les sondes ajoutés</p> <p>Différence moyenne en extraction : - 0.8 K Différence moyenne en injection : +0.2 K</p>	<p style="text-align: center;">Moyennes journalières</p> 

Table K2.1 Influence des variations examinées sur la différence de température moyenne entre les calculs et les mesures pour l'installation 11.

La prise en compte des effets capacitifs des sondes et des transferts thermiques des raccords horizontaux permet de très légèrement diminuer l'écart de température entre les simulations et les mesures.

Comme le champ de sondes a été conçu pour fonctionner comme un stockage de chaleur, la simulation à long terme du champ de sondes n'est pas faite.

K3. Analyse du profil de chaleur de l'installation 11

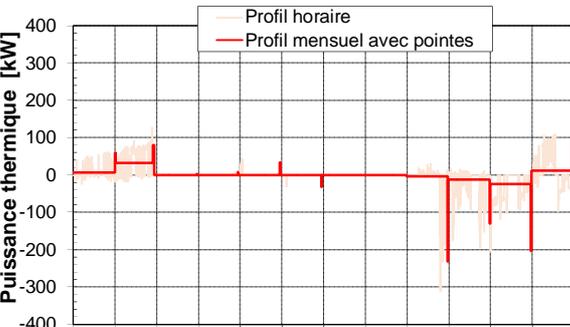
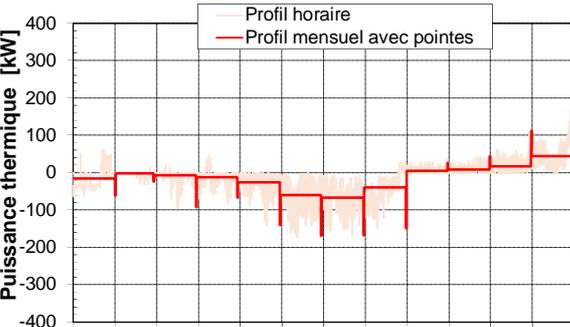
Dans cette section, l'influence d'un profil de chaleur simplifié sur la température minimum et maximum du fluide caloporteur est évaluée. La simulation de l'installation avec la variante la plus proche des mesures (Turb+C+H) et le profil de chaleur mesuré en valeurs horaires permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide qui résulte de l'exploitation réelle de l'installation.

La simulation de la variante calibrée avec le profil de chaleur simplifié permet d'obtenir un autre profil de température. La comparaison des températures minimum et maximum des deux profils permet d'apprécier comment les températures extrêmes du fluide caloporteur sont reproduites avec le profil de chaleur simplifié.

K3.1. Profils de chaleur simplifiés pour l'installation 11

Le profil de chaleur simplifié est construit comme le profil type de la section précédente : un pulse de puissance mensuel moyen sur lequel est superposé un pulse de puissance de pointe de durée limitée à la fin de chaque mois (cf. section 4.5 du rapport final).

Les profils d'extraction de chaleur pour la comparaison sont montrés dans la table suivante dès la première année de fonctionnement. Les températures extrêmes sont obtenues pour les deux dernières années de fonctionnement du système.

<p>Année 1:</p> <p>Mois conduisant à température min. : janvier</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 60 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 13 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 7 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 857 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -232 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 5 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -3 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -1217 kWh</p>	 <p>Le graphique pour l'année 1 montre la puissance thermique [kW] sur l'axe vertical (de -400 à 400) et le temps (janvier - décembre) sur l'axe horizontal. Deux séries sont représentées : 'Profil horaire' (orange) et 'Profil mensuel avec pointes' (rouge). Le profil horaire est une ligne continue montrant des fluctuations quotidiennes. Le profil mensuel avec pointes est une ligne en escalier qui suit le profil horaire mais avec des sauts brusques à la fin de chaque mois, atteignant des pics de 60 kW et des creux de -232 kW.</p>
<p>Année 2:</p> <p>Mois conduisant à température min. : décembre</p> <p>Puissance thermique extraite de pointe : 167 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 15 h</p> <p>Pulse moyen mensuel extrait : 45 kW</p> <p>Energie max. journalière extraite : 2910 kWh</p> <p>Mois conduisant à température max. : juillet</p> <p>Puissance thermique injectée de pointe : -167 kW</p> <p>Durée max. de la puissance de pointe : 11 h</p> <p>Pulse moyen mensuel injecté : -67 kW</p> <p>Energie max. journalière injectée : -2708 kWh</p>	 <p>Le graphique pour l'année 2 montre la puissance thermique [kW] sur l'axe vertical (de -400 à 400) et le temps (janvier - décembre) sur l'axe horizontal. Deux séries sont représentées : 'Profil horaire' (orange) et 'Profil mensuel avec pointes' (rouge). Le profil horaire est une ligne continue montrant des fluctuations quotidiennes. Le profil mensuel avec pointes est une ligne en escalier qui suit le profil horaire mais avec des sauts brusques à la fin de chaque mois, atteignant des pics de 167 kW et des creux de -167 kW.</p>

<p>Année 3: Mois conduisant à température min. : février Puissance thermique extraite de pointe : 119 kW Durée max. de la puissance de pointe : 17 h Pulse moyen mensuel extrait : 58 kW Energie max. journalière extraite : 2429 kWh</p>	
--	--

Table K1.1 Profil de chaleur simplifié de l'installation 11. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. Le profil de chaleur en valeurs horaires, utilisé pour simuler le profil de température de référence, est également indiqué.

K3.2. Températures de fluide minimum et maximum annuelle

Les évolutions de la température du fluide résultant du profil de chaleur simplifié et du profil en valeurs horaires sont montrées dans la table suivante.

<p>Année 1: Mois conduisant à température min. : janvier Température min. avec profil simplifié : +10.8 °C Température minimum de référence : +10.1 °C Différence profil simplifié - réel : +0.7 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : septembre Température max. avec profil simplifié : +18.7 °C Température maximum de référence : +17.1 °C Différence profil simplifié - réel : +1.6 K</p>	
<p>Année 2: Mois conduisant à température min. : décembre Température min. avec profil simplifié : +7.8 °C Température minimum de référence : +8.0 °C Différence profil simplifié - réel : -0.2 K</p> <p>Mois conduisant à température max. : juillet Température max. avec profil simplifié : +19.9 °C Température maximum de référence : +19.1 °C Différence profil simplifié - réel : +0.8 K</p>	

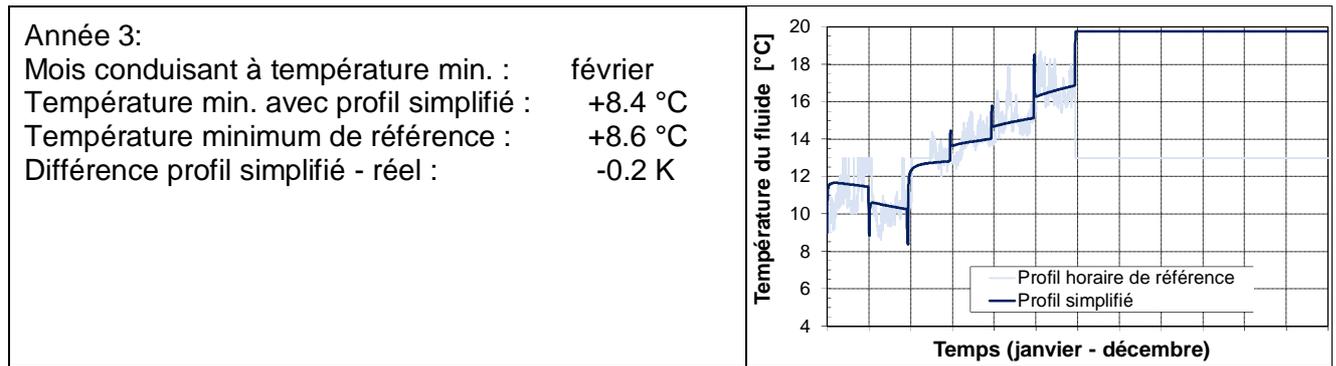


Table K1.1 Evolution de la température du fluide simulée avec le profil de chaleur simplifié de l'installation 11. Les caractéristiques indiquées des pulses correspondent au mois qui conduit à la température minimum ou maximum annuelle. L'évolution de référence de la température, obtenue avec le profil de chaleur en valeurs horaires, est également indiquée.

L'approximation d'un profil de chaleur en valeurs horaires avec un profil simplifié (cf. section 4.5 du rapport final) conduit à une petite différence sur les températures extrêmes annuelles simulées. Dans le cas de l'installation 11, la différence reste inférieure à 1 K à l'exception de la première année pour la température maximum. Il s'agit du mois de septembre qui présente aussi bien de l'extraction de chaleur que de l'injection. Pour des mois avec alternance d'injection et d'extraction de chaleur, le profil de chaleur simplifié n'est pas assez détaillé.

La température minimum annuelle simulée avec le profil simplifié diffère de respectivement +0.7, -0.2 et -0.2 K de la température minimum de référence pour les 3 années consécutives mesurées. Une différence positive signifie que la simulation sous-estime l'abaissement de température. La sous-estimation reste, avec le profil de chaleur simplifié, contenue.

La température maximum annuelle simulée avec le profil simplifié, sans tenir compte de la première année, diffère de +0.8 K de la température maximum de référence pour la 2^e année mesurée. Une différence positive signifie que la simulation est conservatrice et ne sous-estime pas l'élévation de température.