

Rapport du 5 septembre 2016

Modélisation numérique de champs de sondes géothermiques profondes

Ecole hôtelière de Lausanne
Ville de Lausanne

Avec le soutien de



Auteurs

Dr Laurent Tacher, Terre⁺

Adresse

TerrePlus sàrl, Chemin de Closel 9, CH-2022 Bevaix

Tél. 079 200 85 51, info@terreplus.ch, www.terreplus.ch

Contenu

1	Introduction	4
2	Domaine d'étude et maillage	5
3	Calibration	8
3.1	Géométrie et paramètres de la sonde n°1	9
3.2	Température au repos.....	10
3.3	Circulation en boucle.....	10
3.4	Chauffage.....	11
4	Comparaison de types de sondes.....	14
4.1	Une sonde coaxiale de 800 m	15
4.2	Deux sondes double « U » de 500 m.....	17
4.3	Trois sondes double « U » de 300 m	19
4.4	Commentaires	21
5	Application au champ de l'EHL	23
5.1	Energie disponible dans le voisinage d'une sonde	23
5.2	Différence entre les sites EHL et Sirius	24
5.3	Sondes espacées de 22 m	25
5.4	Sondes espacées de 40 m	29
6	Coaxial isolé	37
6.1	Une sonde coaxiale de 800m	37
6.2	Application au champ de sondes	39
7	Scénario E.....	40
8	Conclusions.....	43
9	Références	45
10	Annexes	46
10.1	Annexe 1 : Modèle mathématique	47
10.2	Annexe 2 : Interface du module sonde de Feflow ®.....	49

1 Introduction

Cette étude a été mandatée conjointement par le Département Campus Development de l'Ecole hôtelière de Lausanne (EHL) et le Portail Energie des Services industriels de la Ville de Lausanne. La justification d'un mandat commun par ces deux institutions tient à ce qu'une partie des résultats est spécifique au site de l'EHL tandis qu'une autre partie a valeur plus générale, dont les enseignements sont transposables à d'autres sites, lausannois ou autres. C'est aussi pourquoi cette étude bénéficie du soutien de l'Office Fédéral de l'Energie (programme SuisseEnergie).

Le projet de l'EHL se caractérise par la profondeur prévue des sondes (800 m), configuration qui tend à préserver durablement la ressource thermique mais dans laquelle peu d'expérience est acquise à ce jour. Nous avons donc procédé par modélisation mathématique.

Les buts poursuivis sont :

- Evaluer la ressource thermique exploitable selon les paramètres physiques obtenus dans le premier forage sur le site de l'EHL en octobre 2015
- Evaluer le refroidissement de la roche au cours du temps selon divers scénarios d'exploitation
- Evaluer la possibilité d'exploitation saisonnière à des fins de rafraichissement et son effet sur la recharge thermique de la roche
- Tester différentes configurations de sondes (matériaux, diamètres) et aider à la décision de choix technologiques
- Evaluer l'évolution de performance du champ au cours du temps et donc sa durabilité
- Comparer les sondes en «double U» avec les sondes coaxiales dans des configurations optimisées (diamètre intérieur, débit, profondeur). Notamment des sondes «double U» de 300 et 500 m avec des sondes coaxiales de 800 m.

Le projet de l'EHL prévoit 22 forages profonds de 800 m tous équipés de sondes coaxiales. Leur emplacement est imposé puisque conditionné par la disponibilité de terrain (Fig. 2). Des variantes portant sur la distribution spatiale des sondes ne sont donc pas développées ici. Pour définir les conditions géologiques, hydrogéologiques, géothermiques et techniques, un premier forage (ci-après n° 1) a été réalisé, équipé et testé en octobre-novembre 2015. Notre étude se situe à ce stade du projet. Elle est rendue possible par les contacts avec Swiss Géo Testing Sàrl à Nax (paramètres hydrogéologiques du terrain sur le site de l'EHL), Geoazimut Sàrl à Fribourg (acquisition de données en forage), Augsburg SA (caractéristiques des sondes) et Weinmann Energies SA à Echallens (scénarios d'exploitation).

Pour des raisons de calendrier, le présent rapport est structuré comme suit :

- Fabrication du modèle spécifique au site de l'EHL et choix des paramètres physiques
- Calibration des paramètres par le test de réponse thermique (TRT) dans le sondage n°1
- Etude générique comparative des sondes 300, 500 et 800 m, en utilisant les paramètres du site de l'EHL
- Modélisation de scénarios d'exploitation énergétique sur le site de l'EHL

2 Domaine d'étude et maillage

Le forage réalisé en octobre 2015 ayant montré l'absence d'eau souterraine en quantité significative, le transport de chaleur dans le domaine se fait quasiment uniquement par diffusion. Le modèle ne considère donc pas la composante advective du transport¹. Cela a une influence sur la géométrie du modèle, qui ne doit donc pas coïncider avec des conditions aux limites hydrauliques simples. Il suffit ainsi de discrétiser un domaine parallélépipédique assez large pour que la proximité de ses bords ne fausse pas le résultat à l'intérieur du volume. En surface, il s'agit d'un carré de 600 m de côté au centre duquel se trouvent les forages prévus (Fig. 1). Au centre, le maillage est affiné afin de calculer avec précision les forts gradients thermiques liés aux sondes (Fig. 2).

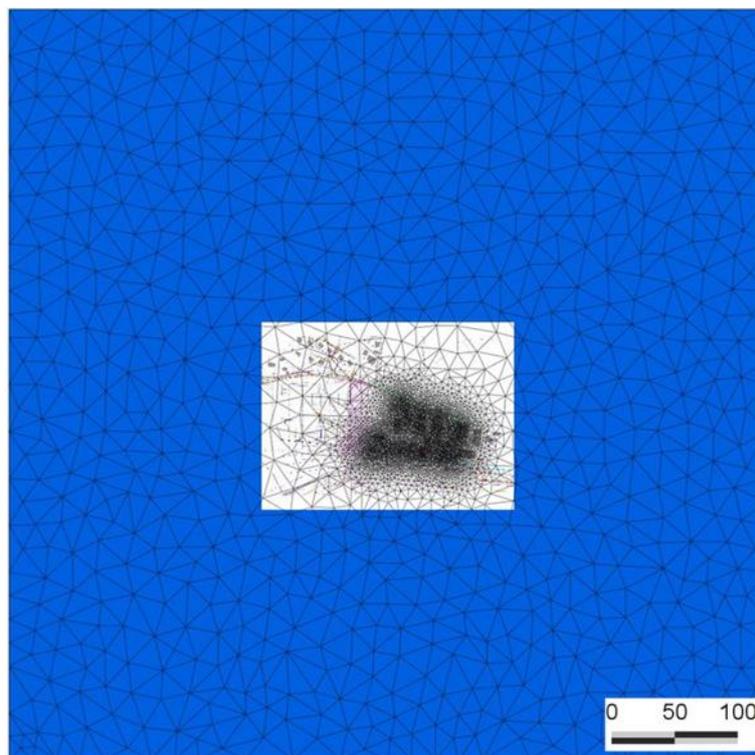


Figure 1 : Vue en plan du maillage à éléments finis. Dans la zone centrale (fond de carte blanc), l'affinage permet une meilleure précision en cas de forts gradients de température, notamment à proximité des sondes.

Verticalement, la profondeur du domaine est de 1000 m, ce qui permet d'éloigner de 200 m le fond du modèle de la base des sondes, dont la profondeur simulée maximum est de 800 m. Sur les 800 premiers mètres depuis la surface, l'épaisseur des couches d'éléments est de 20 m, sauf les quatre premières depuis le haut, épaisses de 5 m pour mieux approcher la zone d'hétérothermie saisonnière. Les 200 m du fond comportent cinq couches de 40 m d'épaisseur chacune (Fig. 3). Au total, 353'241 nœuds forment 688'080 éléments finis prismatiques linéaires répartis sur 48 couches. S'y ajouteront les éléments préfabriqués représentatifs des 22 sondes, en nombre différent selon les variantes.

¹ En fait présente sous une forme négligeable dans le modèle pour des raisons de logiciel

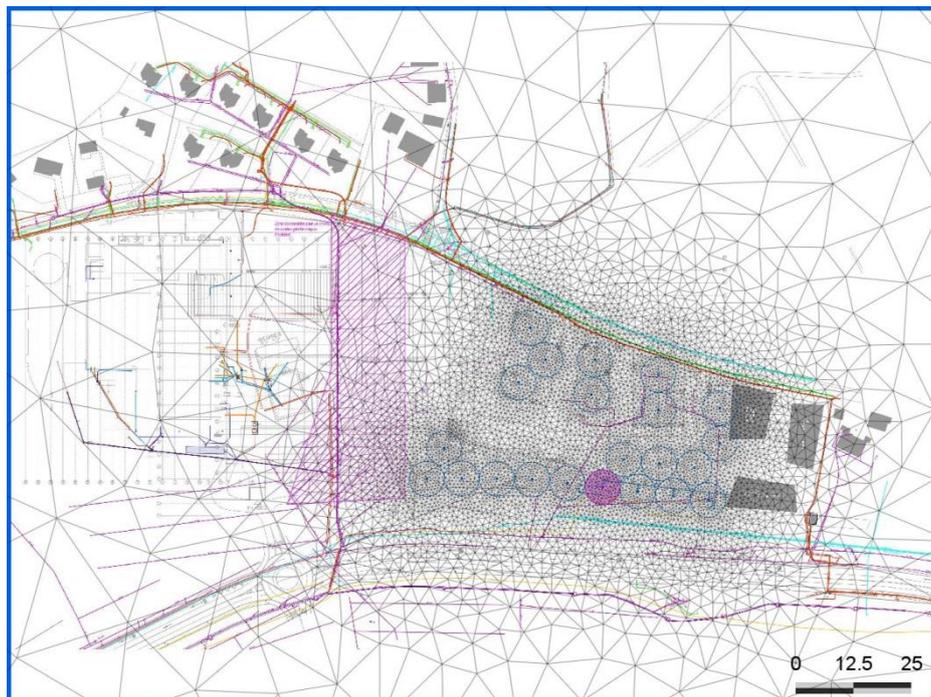


Figure 2 : Vue en plan de la zone centrale du maillage. A proximité de l'emplacement des sondes, les arêtes des triangles ont moins d'un mètre de longueur. S'y superposent les éléments spécifiques des 22 sondes, encore plus fins. Cercles bleus : rayon de 11 m autour de chaque sonde (Fond de carte : Weinmann énergies SA)

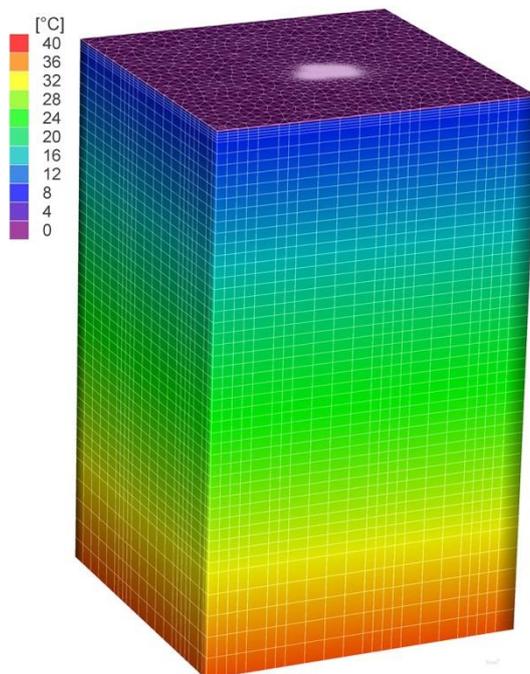


Figure 3 : Maillage 3-D montrant les 48 couches d'éléments prismatiques. En surface, la tache grise correspond à la zone fortement affinée latéralement. Cet affinage se poursuit en profondeur. Couleurs représentatives de la température en l'absence de sondes (1er janvier d'une année-type). Température à 800 m : 32 °C. Température à 1000 m : 37.5 °C

Puisque le maillage 3-D a vocation aussi bien à représenter le cas particulier du site de l'EHL que d'autres contextes, la distribution des sondes en surface épouse celle du projet EHL (22 sondes espacées d'au moins 22 m). Mais verticalement, il est plus parlant de fixer la surface à l'altitude $z = 0$ m s.m. et de ne pas tenir compte de la topographie du site. Cela est sans conséquence sur les calculs.

Données générales

Tous les modèles ont été calculés (modalités en Annexe 1) avec le logiciel de référence Feflow® v 6.0 (DHI – Wasy GmbH, Berlin). Pour les alimenter en conditions aux limites et paramètres, certaines valeurs ont été utilisées dans toutes les variantes, sauf indication contraire :

Capacité thermique de la roche. Dans les variantes à caractère général, la capacité thermique homogène adoptée vaut $C_r = 2.08 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$, obtenue d'après (Schärli and Rybach, 2001) pour les faciès gréseux et silteux de la molasse USM, soit $800 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ pour une densité de 2600 kg/m^3 . Dans les calculs, la capacité thermique du milieu vaut la pondération de celle de la roche, C_r , à raison de 85% et de celle de l'eau $C_e = 4.2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$, à raison de 15%. Cela revient à admettre une porosité de 15%.

Conductivité thermique de la roche. La valeur homogène $\lambda_r = 2.7 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ est utilisée. Elle résulte des mesures effectuées par TRT (rapport Swiss Géo Testing du 29 novembre 2015) et est compatible avec les valeurs de la littérature (Leu et al., 1999). Dans les calculs, cette valeur globale est obtenue en assignant $\lambda_g = 3.06 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ aux grains minéraux, également pondérée à raison de 15% par celle de l'eau ($\lambda_e = 0.65 \text{ W/m} \cdot \text{K}$).

Flux géothermique terrestre. La carte géothermique de la Suisse au 1/500'000 (Swisstopo) dans la région du Chalet-à-Gobet indique un flux de 90 mW/m^2 . Cette valeur n'a pas été retenue ici puisque nous bénéficions de la mesure de température dans le forage n° 1, soit 32°C à 800 m de profondeur. Pour la conductivité thermique adoptée et une température moyenne en surface de 10°C , on obtient un flux de 74 mW/m^2 , valeur utilisée ici.

Température en surface. Dans les calculs se déroulant sur le long terme, on considère que la température en surface se répète annuellement et qu'elle est obtenue chaque jour par interpolation entre les moyennes mensuelles (Tableau 1).

Mois	°C
Décembre	1.7
Novembre	5.6
Octobre	11.2
Septembre	11.3
Août	18.0
Juillet	20.4
Juin	16.2
Mai	11.8
Avril	8.1
Mars	4.5
Février	-2.1
Janvier	0.2

Tableau 1 : Températures mensuelles moyennes en surface utilisées dans toutes les chroniques temporelles. Station MétéoSuisse 6137 (Villars Tiercelin)

Avec ces paramètres, on obtient un profil standard de température au repos (Fig. 4).

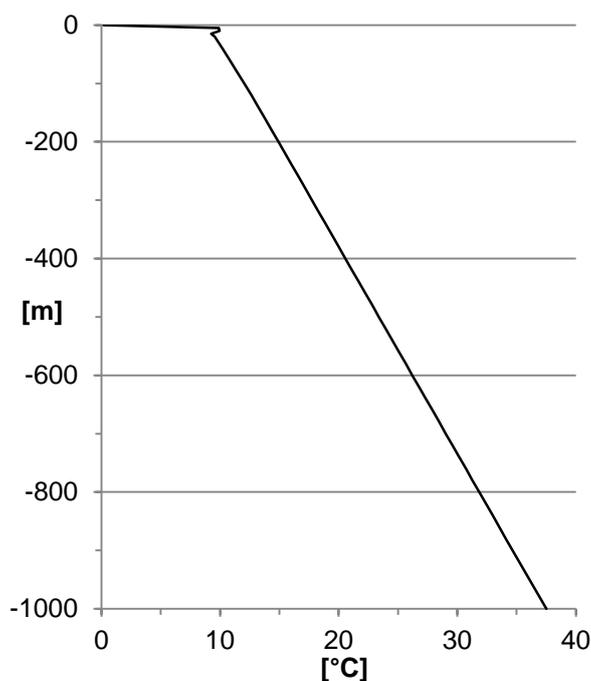


Figure 4 : Profil de température au repos au 1^{er} janvier d'une année-type, calculé avec les paramètres généraux choisis. On obtient environ 37.5°C à 1000 m de profondeur, 32°C à 800 m. En sub-surface, l'oscillation de la courbe indique la propagation et l'amortissement des fluctuations de température atmosphérique. En dessous de cette zone d'hétérothermie, soit environ dès 20 m, la température est stable au cours du temps.

3 Calibration

Dès la fin de sa foration, le forage n°1 a été tubé, équipé et rempli, ce qui a permis d'y mener des tests de réponse thermique en novembre 2015. Ces tests sont les suivants:

- Température au repos, sans circulation de caloporteur

- Circulation en boucle sans ajout ou prélèvement de chaleur
- Circulation en boucle avec chauffage du fluide

C'est sur ces tests qu'est basée la calibration du modèle. Leurs résultats consistent en des mesures de températures par fibre optique dans le tube de remontée (intérieur du coaxial) sur toute la hauteur de la sonde, soit 800 m.

3.1 Géométrie et paramètres de la sonde n°1

De 0 à 100 m, la sonde a été forée en \varnothing 220 mm, puis après télescopage en \varnothing 171 mm jusqu'au fond. Sur toute la hauteur, un tubage métallique plein de \varnothing 152 mm (6") a été posé, qui constitue la paroi extérieure de la sonde. A l'intérieur, un tube en matière synthétique de \varnothing 63 mm est installé, sans centreuse. Il s'agit donc d'une sonde de type coaxial (Fig. 5). Le fluide caloporteur est de l'eau du réseau. Elle descend par le tube extérieur et remonte dans le tube intérieur.

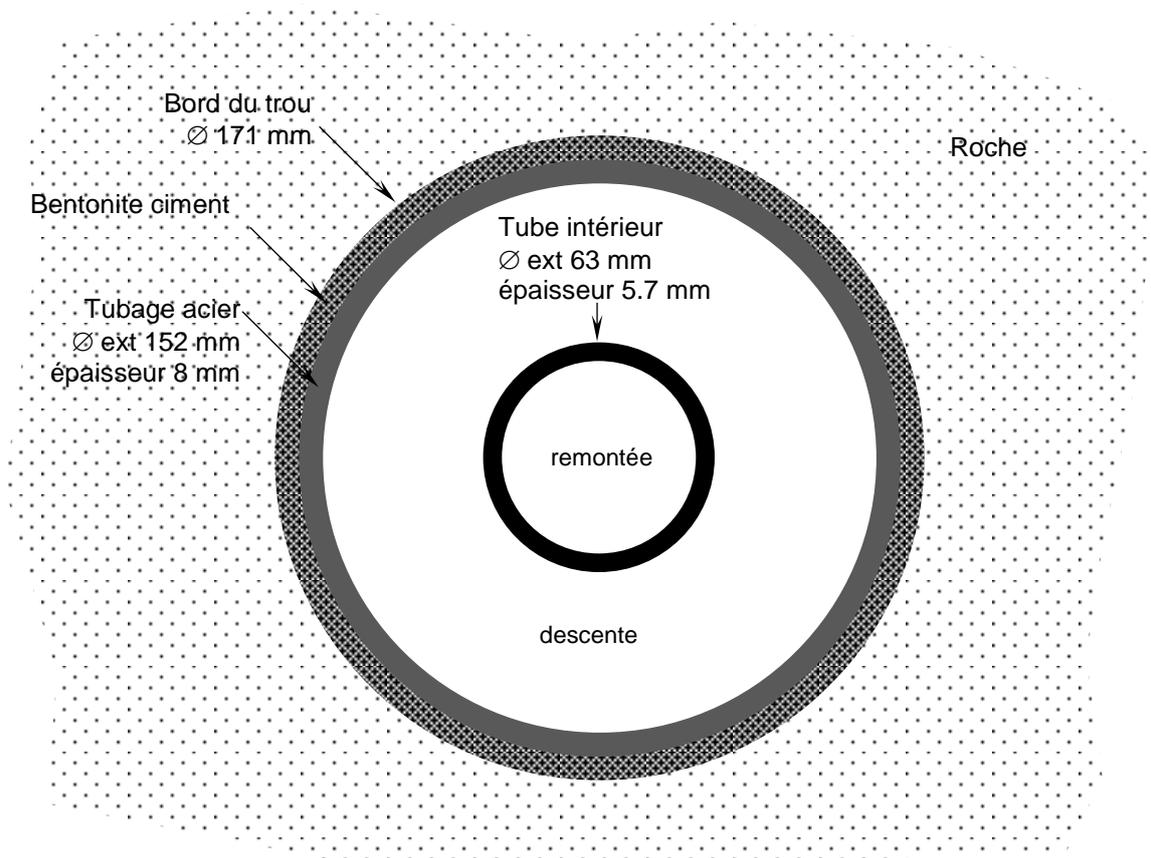


Figure 5 : Coupe horizontale de la sonde n°1, valide entre 100 m et 800 m de profondeur. Entre 0 m et 100 m, seul le diamètre du trou change, passant de 171 à 220 mm. Echelle : $\frac{1}{2}$.

Les dimensions et paramètres de la sonde (Tab. 2) sont utilisés par le logiciel, qui possède une fonctionnalité capable de prendre en compte le détail de ses caractéristiques techniques (Annexe 2). Le prélèvement thermique peut être spécifié par une chronique de débit, de différence de

température au sommet entre tube intérieur et extérieur ou directement de puissance. La viscosité dynamique du fluide figure parmi les paramètres requis afin que le logiciel calcule le nombre de Reynolds et ajuste ainsi le taux d'homogénéisation de la température.

Diamètre du trou	220 mm de 0 m à 100 m 171 mm de 100 m à 800 m
Diamètre extérieur du tubage métallique extérieur	152 mm
Epaisseur du tube extérieur	8 mm
Capacité thermique du tube extérieur	490 J/kg.K
Conductivité thermique du tube extérieur	47 W/m.K
Diamètre extérieur du tube intérieur	63 mm
Epaisseur du tube de remontée	5.7 mm
Capacité thermique du tube intérieur	1900 J/kg.K
Conductivité thermique du tube intérieur	0.45 W/m.K
Capacité thermique du ciment	800 J/kg.K
Conductivité thermique du ciment	1 W/m.K
Capacité thermique du caloporteur (eau)	4182 J/kg.K
Conductivité thermique du caloporteur	0.598 W/m.K
Viscosité dynamique du caloporteur	1002 Pa.s

Tableau 2 : Dimensions et paramètres de la sonde n°1 utilisés dans le modèle (données Augsburgers). Ceux concernant le caloporteur sont ceux de l'eau à 20°C (in de Marsily, 1981).

3.2 Température au repos

Les mesures effectuées par Geoazimut du 30 octobre au 4 novembre dans la sonde remplie mais au repos ont pour but de déterminer le gradient géothermique. Elles montrent une remarquable constance dans l'augmentation de température jusqu'à 32°C au fond du trou. Cela indique l'homogénéité de la conductivité thermique de la roche (cf § 2 pour la valeur). Nous n'utilisons pas cet essai comme un argument de la calibration du modèle puisque nous l'avons précisément utilisé pour contraindre le gradient géothermique.

3.3 Circulation en boucle

Du 6 au 11 novembre, la sonde a fonctionné en circuit fermé sans ajout ou prélèvement thermique. Le débit était entre 45 et 50 l/min. La température a rapidement varié dans les deux tubes durant les premières heures puis s'est stabilisée. Nous avons utilisé l'état après 1 jour pour comparer les valeurs mesurées et calculées (Fig. 6). Cette comparaison n'est possible que dans le tube intérieur de remontée, seul équipé d'une fibre optique pour la mesure de la température.

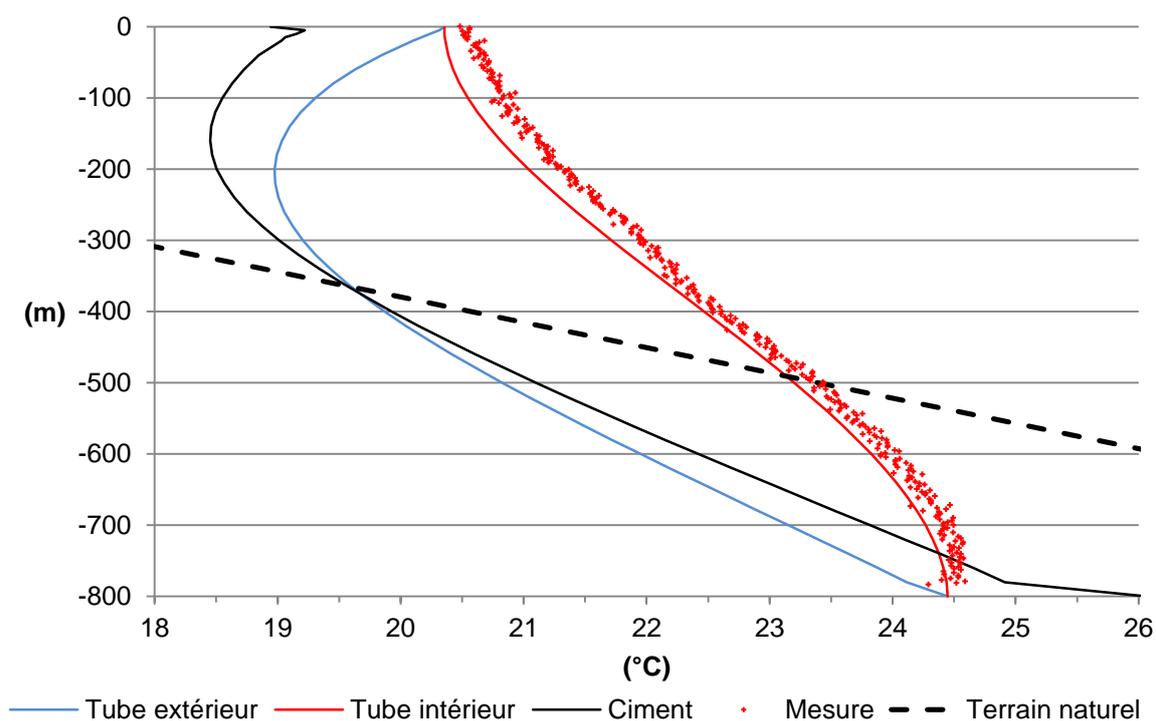


Figure 6 : Températures selon la profondeur, calculées et mesurées lors du test de circulation en boucle.

Avec les paramètres adoptés, le calcul reproduit quasi exactement les mesures, au $1/10^{\text{ème}}$ de °C près. On remarque la température de 24.5 °C au bas de la sonde, nettement inférieure à celle de la sonde au repos (32°C), ce qui indique que malgré le faible débit de circulation la température du caloporteur n'a pas le temps de s'équilibrer avec celle du terrain. Il est cependant possible qu'un débit plus élevé augmente la qualité d'échange thermique, par un comportement plus manifestement turbulent du caloporteur.

En surface, la circulation remonte de l'eau à environ 20.5°C, très différente de la température initiale d'environ 10°C. C'est en dessus de 200 m de profondeur que l'eau descendante se refroidit car elle est en surface beaucoup plus chaude que le terrain environnant. Passé cette profondeur, elle commence à se réchauffer au contact d'un terrain de plus en plus chaud. Par le jeu du contact avec la température du terrain et celui quoique faible avec le tube remontant, la courbe de température du tube intérieur acquiert une forme de « S » indiquant que c'est entre 100 m et 700 m de profondeur que le refroidissement se produit. Au fond, entre 700 m et 800 m, la différence de température entre les deux tubes étant faible, le gradient thermique entre eux est faible, occasionnant une verticalité de la courbe. En surface, le même phénomène se produit puisqu'on réinjecte l'eau remontante dans le tube extérieur sans lui avoir prélevé de température.

3.4 Chauffage

Dès le 11 novembre à 13h30, la sonde continue de fonctionner avec le même débit de 45 à 50 l/min, mais on chauffe l'eau descendante avec une source de 30 kW. Ce test étant mené dans la foulée du précédent, il utilise, dans le modèle, le résultat de ce dernier comme condition initiale. La source de 30 kW réchauffe l'eau comme suit :

Température initiale (à l'issue du test précédent le 11 novembre juste avant 13h30) : $T_0 = 20.3 \text{ °C}$

Débit : $Q = 45 \text{ l/min} = 2.7 \text{ m}^3/\text{h}$

Puissance ajoutée : $P = 30'000 \text{ W}$

Capacité thermique du caloporteur : $Ce = 4.2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$

Température ajoutée : $\Delta T = P \cdot 3600 / Q \cdot Ce = 9.6 \text{ °C}$

Température au sommet de la sonde du caloporteur réchauffé : $T = T_0 + \Delta T = 29.9 \text{ °C}$

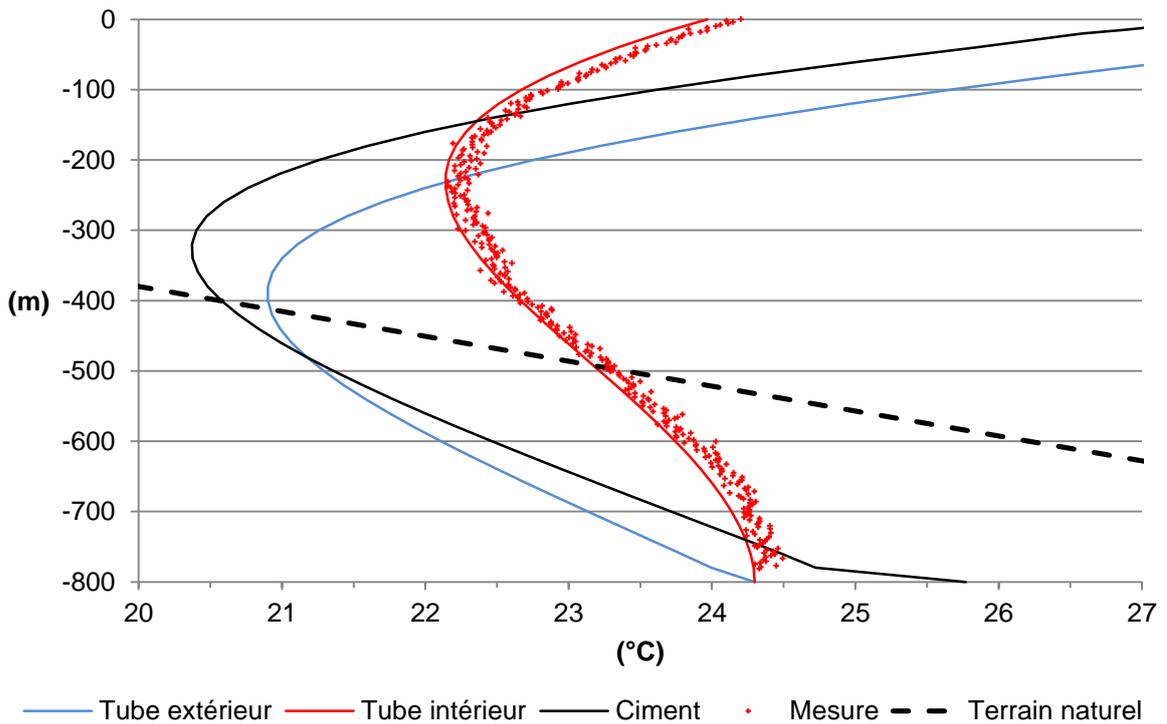


Figure 7 : Températures selon la profondeur, calculées et mesurées lors du test de chauffage.

Les mesures sont comparées au calcul après 5 heures de fonctionnement (Fig. 7). En surface, l'eau très chaude du tube extérieur réchauffe l'eau remontante, qui passe de 22.2 °C à 250 m à 24 °C en surface. En dessous de 400 m , le gradient de température entre les deux tubes diminue, de sorte que les courbes retrouvent un comportement classique de refroidissement en montant. Se créent ainsi un point froid à 250 m dans le tube remontant et à 400 m dans le tube descendant.

Le bon ajustement des valeurs mesurées et calculées confirme le choix des paramètres physiques. On peut donc donner crédit au modèle pour simuler l'évolution des températures au-delà de 5 heures de test. On observe qu'avec le temps l'effet de la chaleur injectée en surface se propage vers le bas (Fig. 8). Ainsi, le point froid dans le tube de remontée descend à 300 m après 1 jour et à 500 m après 2 jours, tout en s'estompant. La raison en est qu'au début du test, le gradient de température entre les deux tubes est maximum vers le sommet. C'est donc là qu'a lieu le maximum d'échange de température. Après quelques heures, ce gradient diminue entre 0 m et 200 m , permettant toujours plus d'échanges en profondeur. Après 2 jours, le tube intérieur ne

montre quasiment plus de refroidissement, environ $1/10^{\text{ème}}$ de °C entre 800 m et 500m. Le réchauffement se produit entre 400 m et la surface, toujours parce que c'est là que le tube extérieur est le plus chaud.

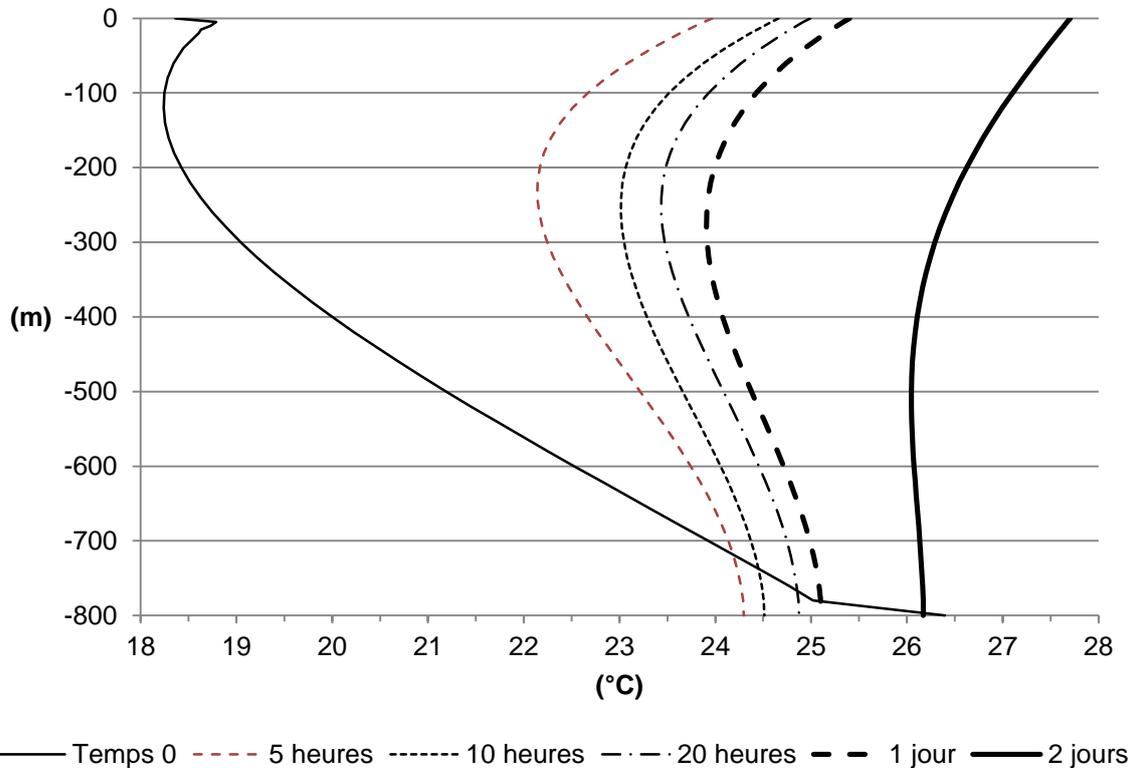


Fig. 8 : Températures calculées dans le tube de remontée selon la profondeur lors du test de chauffage, en fonction du temps. La situation après 5 heures est celle utilisée pour la calibration (Fig. 7).

De par leur brièveté, ces tests de réponse thermique sollicitent la roche à proximité de la sonde. C'est donc une conductivité et une capacité thermique locale qui en est déduite. Cependant, le profil de température au repos et la géologie observée suggèrent une grande homogénéité du terrain à l'échelle hectométrique, permettant d'indiquer que ces paramètres obtenus ponctuellement demeurent valides à l'échelle de tout le site, qui est celle qui compte sur le long terme.

Ainsi, la qualité de la reproduction des tests par le modèle permet de considérer qu'il admet une géométrie, des paramètres et des modalités de calcul appropriés. On peut donc utiliser ce modèle pour prévoir le comportement de la sonde(s) selon divers scénarios d'exploitation.

4 Comparaison de types de sondes

Afin d'alimenter les réflexions sur les aspects de gestion de la ressource thermique, il est procédé ici à un test comparatif de trois configurations de sondes exploitant la même quantité d'énergie au cours du temps :

- Une sonde coaxiale de 800 m (i.e. celle du sondage n°1 de l'EHL)
- Deux sondes en double U profondes de 500 m
- Trois sondes en double U profondes de 300 m

Leurs paramètres physiques sont ceux déterminés sur le site de l'EHL. Le scénario énergétique commun aux trois variantes (Tab. 3) est basé sur un de ceux en cours d'élaboration pour l'EHL. En janvier, février, novembre et décembre, la production thermique est limitée à 12 MWh, ce qui permet de traiter les trois configurations en évitant les résultats aberrants (e.g. refroidissement excessif du fluide caloporteur en dessous de 0°C).

	Energie mensuelle [MWh]
Janvier	12.00
Février	12.00
Mars	11.95
Avril	11.09
Mai	8.00
Juin	7.09
Juillet	2.32
Août	2.36
Septembre	7.77
Octobre	9.45
Novembre	12.00
Décembre	12.00

Tableau 3 : Energie thermique mensuelle prélevée dans le champ de sonde(s) pour les trois variantes

Selon la configuration, la puissance instantanée, la différence de température dans les PAC, le débit de circulation dans la sonde(s) et la durée quotidienne de fonctionnement pourront varier mais pour obtenir la même énergie mensuelle extraite. Sur le moyen terme, il est supposé que cette année-type se répète à l'identique.

Il s'agit de calculs très longs, devant être menés dans un temps imparti relativement court puisqu'ils ont vocation à aider aux choix technologiques concernant le site de l'EHL. Le protocole de calcul suivant a donc été choisi, qui tend à minimiser les temps de calcul tout en renseignant de manière efficace sur le court et le moyen terme.

- Fonctionnement de la sonde(s) pendant 10 jours dès sa mise en service (1^{er} janvier) selon la chronique d'exploitation quotidienne. Le champ de température initial est l'état naturel non perturbé (variable en surface, cf. Tab. 1 et 32 °C à 800 m de profondeur).

- Ensuite, fonctionnement pendant 20 ans en prélevant de manière continue l'énergie moyenne annuelle (108 MWh/an) sans tenir compte du détail mensuel et quotidien du prélèvement. Cela consiste à extraire en continu une puissance de $108000 / (365 \cdot 24) = 12.33$ kW. La température en surface est fixée constante à 10°C.
- En utilisant le résultat de la précédente étape comme condition initiale de température du terrain, fonctionnement supplémentaire pendant 10 jours selon la chronique quotidienne.

Le calcul de détail sur 10 jours avant et après la période de 20 ans est destiné à s'assurer que les jours sont assez similaires pour être représentatifs, ce qui s'avère vrai. En pratique, les résultats sont présentés au jour 5 avant et après la période d'exploitation moyenne de 20 ans. On peut comprendre ces résultats comme ceux du 5 janvier 2015 et du 5 janvier 2035.

Dans ces conditions, les résultats obtenus sont ceux des conditions les plus défavorables, celles des mois d'hiver (12 MWh mensuels). On remarque que dans ces conditions, les énergies extraites durant les autres mois n'interviennent que dans le calcul de la puissance moyenne utilisée sur la période de 20 ans.

En surface, la température n'est pas imposée dans un cercle de 2 m environ autour des têtes de sonde. Cette absence de condition aux limites revient à supposer que l'installation est isolée, ce qui évite une trop forte influence de la température atmosphérique, peu réaliste.

Dans les trois variantes, le fluide caloporteur est l'eau pure (cf. Tab. 2 pour ses propriétés) pour ne pas introduire de différence supplémentaire entre les types de sondes, alors que dans la réalité on aurait recours à un antigel pour celles de 300 m.

On considère aussi qu'il n'y a pas de transport advectif (i.e. on néglige le transport de chaleur par le déplacement de l'eau, ne reste que celui de la diffusion).

Entre les périodes quotidiennes de prélèvement thermique, la circulation d'eau est arrêtée dans la sonde. La plage de fonctionnement s'étend sur une seule période entre 00 h et la durée voulue : la sonde(s) fonctionne une seule fois par jour, à partir de minuit et pour une durée variable.

4.1 Une sonde coaxiale de 800 m

En plan, le modèle est un carré de 100 m de côté au centre duquel se trouve la sonde. Le maillage est très fortement affiné à cet endroit. Comme pour le maillage du site de l'EHL, la profondeur du domaine est de 1000 m, ce qui permet d'éloigner de 200 m le fond du modèle de la base de la sonde. Sur les 800 premiers mètres depuis la surface, l'épaisseur des couches d'éléments est de 20 m, sauf les quatre premières depuis le haut, épaisses de 5 m pour mieux approcher la zone d'hétérothermie saisonnière. Les 200 m du fond comportent cinq couches de 40 m d'épaisseur chacune (Fig. 9). Au total, 30'651 nœuds forment 57'000 éléments finis prismatiques linéaires répartis sur 48 couches. S'y ajoutent les éléments préfabriqués représentatifs de la sonde.

La puissance instantanée de la sonde est choisie à 35 kW avec un $\Delta T = 6^\circ\text{C}$ entre entrée et sortie. Cela implique un débit de 83.33 l/min ($5 \text{ m}^3/\text{h}$). En janvier, la durée quotidienne de fonctionnement pour fournir 12 MWh doit donc être de $12000 / (30 \cdot 35) = 11.43$ h/jour.

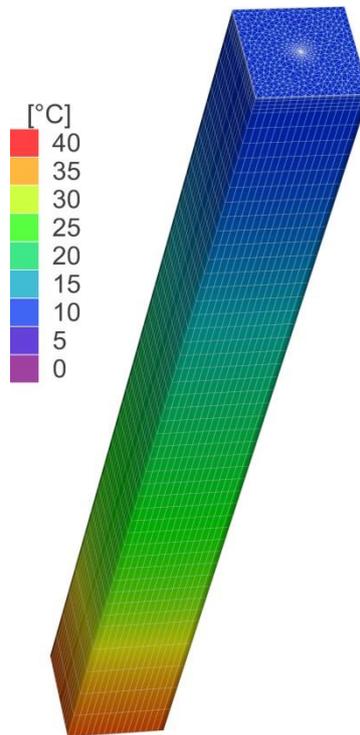


Figure 9 : Maillage du modèle de sonde de 800 m et champ de température initiale

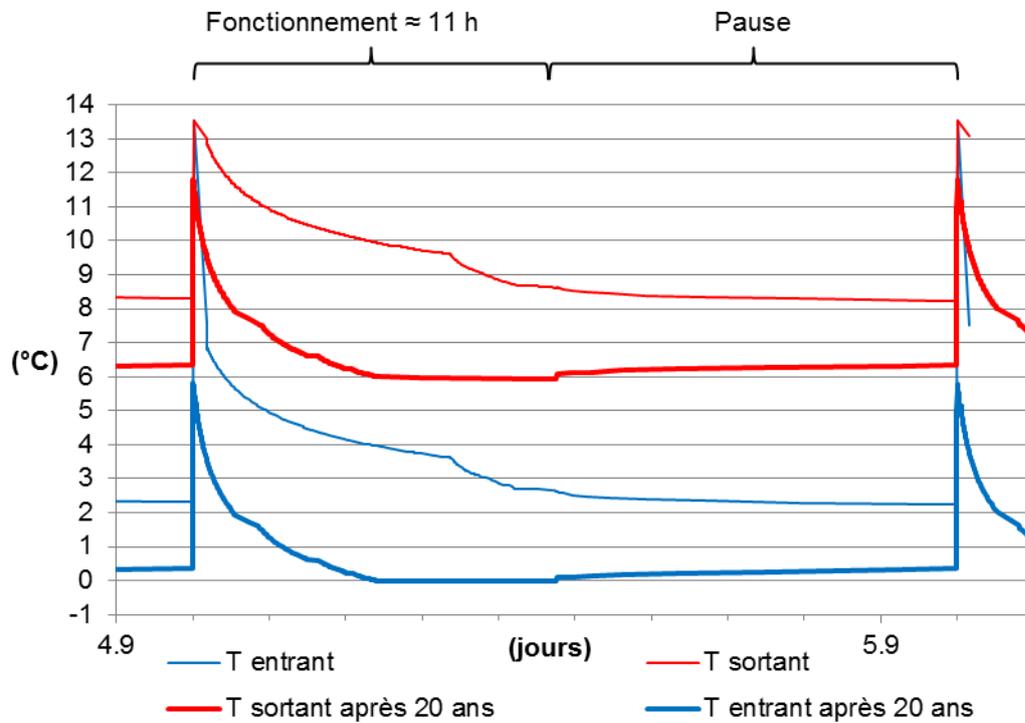


Figure 10 : Températures à l'entrée et à la sortie de la sonde coaxiale de 800 m après 5 jours, puis après 20 ans plus 5 jours. La petite pointe de température à 5.3 jours semble d'origine numérique.

En début de circulation (00h00), le fluide réchauffé durant l'interruption précédente arrive en surface et cause un bref pic de température qui décroît rapidement (Fig. 10). Au cours du fonctionnement quotidien, la température de sortie perd plus de 5°C, ce qui demeure vrai après 20 ans.

Durant la période d'arrêt, la température en surface tend à se réajuster par de faibles échanges avec le terrain et entre sondes. Ce réajustement est évidemment beaucoup plus efficace en profondeur en raison d'un gradient de température croissant entre sonde et terrain.

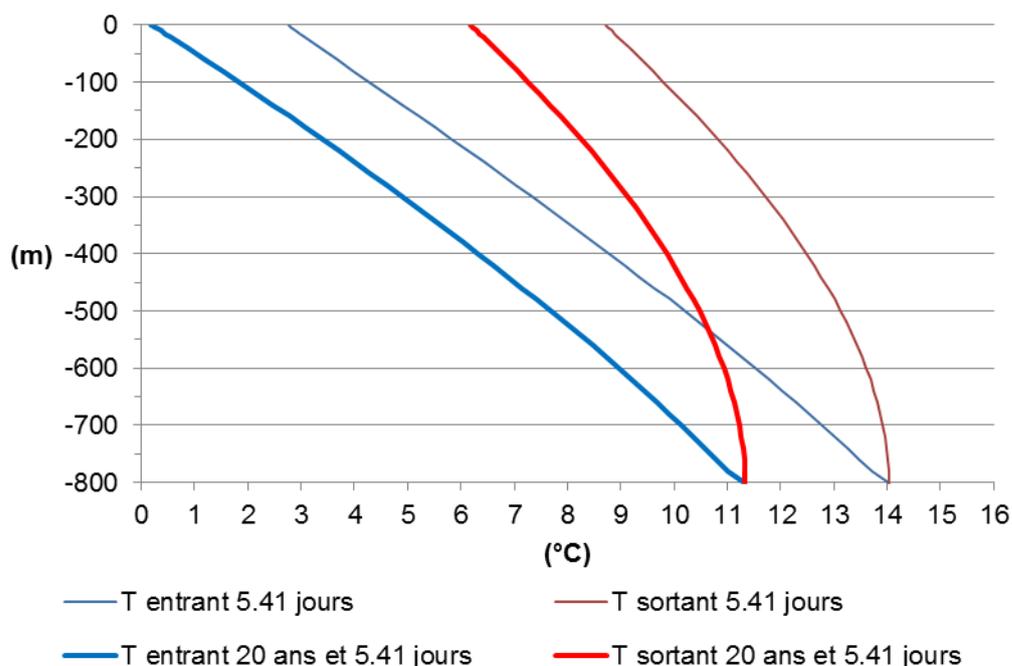


Figure 11 : Profils de température dans l'espace annulaire (bleu) et le tube central de remontée (rouge) juste avant l'arrêt du circuit dans la sonde coaxiale unique profonde de 800 m.

Avec le débit relativement modeste de 5 m³/h, le régime demeure turbulent et le fluide a le temps de prélever de l'énergie en descendant. En retour, le refroidissement dans le tube de remontée est important, de plus de 5°C (Fig. 11), ce qui se traduit par une courbe en forme de « V » très couché, d'autant plus couché vers le haut de la sonde parce que le gradient de température entre les deux tubes augmente.

Avec le temps, on pourrait supposer que la chaleur ainsi remontée de la profondeur vers la surface dans le tube central profite au milieu géologique. Ce réchauffement du terrain n'a pas lieu puisqu'après 20 ans le profil de température est quasiment identique au profil des premiers jours, seulement décalé globalement de 2.5°C. On relève seulement un très léger redressement de la courbe, la différence de température entre le fond et la surface ayant diminué de 0.1°C en 20 ans. Le refroidissement dans le tube de remontée ne sert donc qu'à réchauffer l'eau descendante.

Après 20 ans de fonctionnement l'eau réinjectée a une température très légèrement inférieure à 0°C en fin de période quotidienne de fonctionnement.

4.2 Deux sondes double « U » de 500 m

Comme dans le cas précédent, en plan, le modèle est un carré de 100 m de côté. Deux sondes en double U espacées de 25 m se trouvent en son centre. Le maillage est latéralement affiné en conséquence. Verticalement, il descend 200 m sous la base des sondes, soit à la profondeur de 700 m. Au total, 49'035 nœuds forment 92'344 éléments finis prismatiques linéaires répartis sur 34 couches. S'y ajoutent les éléments préfabriqués représentatifs des sondes.

Le diamètre des forages est de 200 mm et ne comporte pas de tubage, le diamètre extérieur des tubes est de 50 mm, leur diamètre intérieur de 40.9 mm.

La puissance instantanée des deux sondes est comme précédemment choisie à 35 kW (17.5 kW par sonde) mais avec un ΔT ramené à 5°C entre entrée et sortie. Cela implique un débit de 100 l/min (6 m³/h). En janvier, la durée quotidienne de fonctionnement pour fournir 12 MWh doit donc aussi être de $12000 / (30 \cdot 35) = 11.43$ h/jour. Puisqu'il y a deux sondes, le débit de chacune est divisé par 2, soit 3 m³/h.

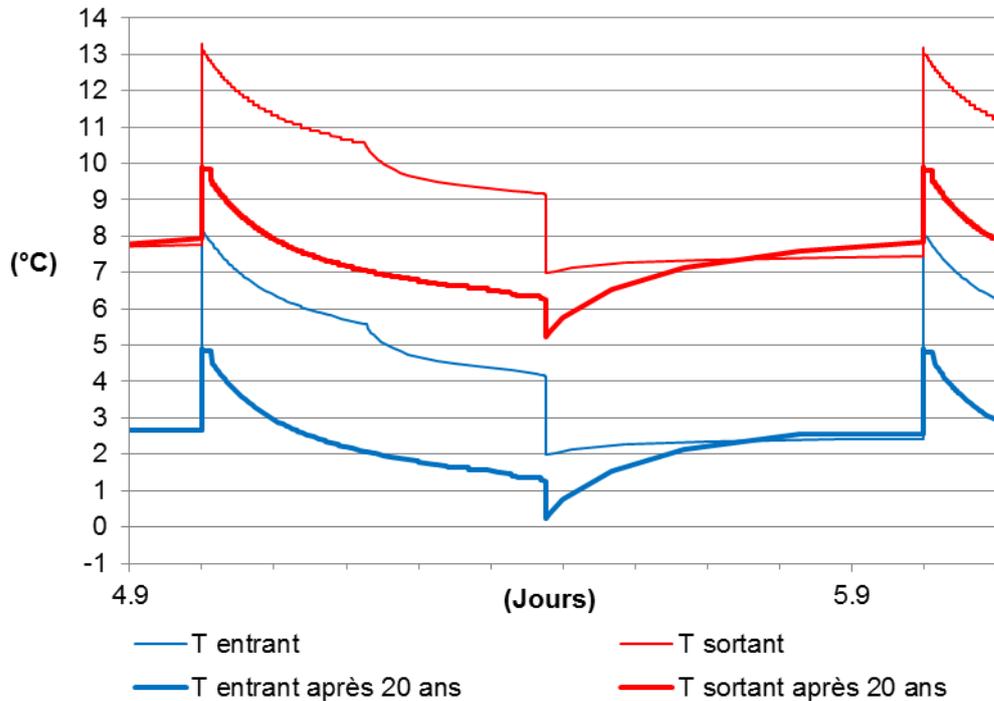


Figure 12 : Températures à l'entrée et à la sortie des sondes en double U de 500 m après 5 jours, puis après 20 ans plus 5 jours. A la fin de la période de fonctionnement, une brusque chute de température apparaît. Elle n'a pas de signification physique puisqu'elle est due au prélèvement de température alors que la pompe est en train de s'arrêter.

Globalement, les températures en surface (Fig. 12) ressemblent à celles obtenues avec la sonde coaxiale de 800 m. Après 20 ans, la température de réinjection est d'environ 1°C alors qu'elle était proche de 0°C dans le cas de la sonde coaxiale. Pour mémoire, le ΔT prélevé par la sonde de 800 m était aussi supérieur de 1°C, soit $\Delta T = 6^\circ\text{C}$.

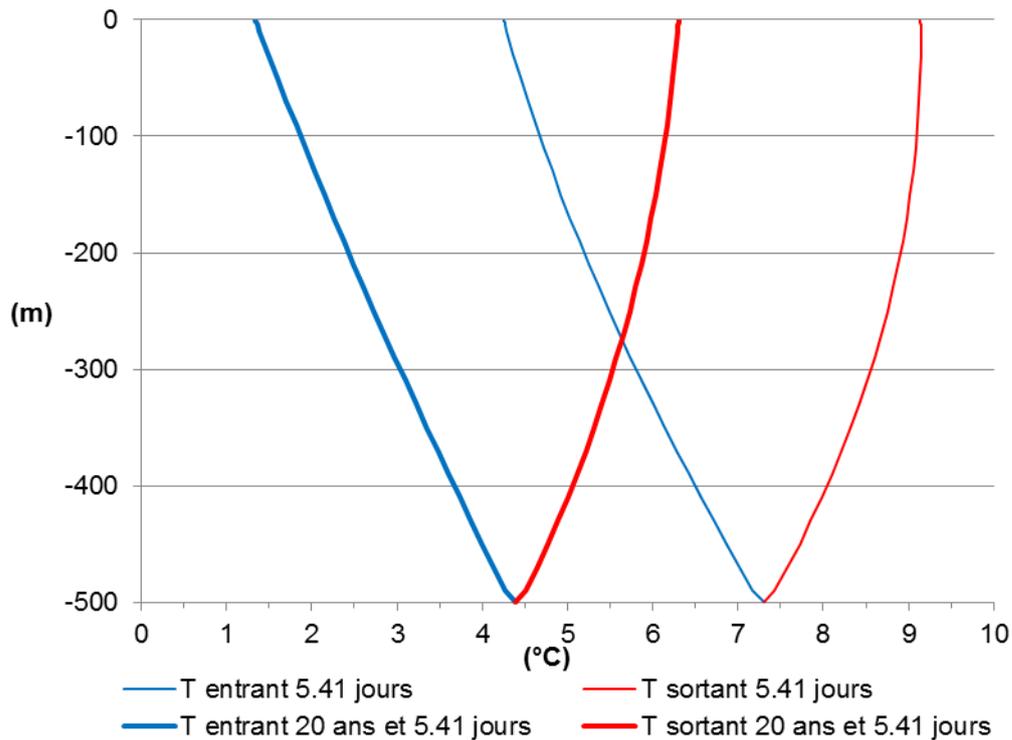


Figure 13 : Profils de température dans les tubes descendants (bleu) et remontant (rouge) dans les sondes en double U de 500 m juste avant l'arrêt du circuit.

En profondeur, le profil de température en fin de période de fonctionnement (Fig. 13) est très différent du cas de la sonde coaxiale. Le réchauffement du caloporteur se produit autant à la montée qu'à la descente, ce qui se traduit par un profil de température en « V » assez symétrique, normal pour ce type d'équipement.

On remarque aussi que les bras de la courbe en « V » sont assez rectilignes, se verticalisant légèrement vers la surface. Ceci souligne la faiblesse des échanges thermiques entre les quatre tubes du forage ; en approchant de la surface, les gradients thermiques entre tubes augmentent, ce qui cause une augmentation des interactions entre tubes et donc la verticalisation des profils.

Après 20 ans, le profil de température est globalement décalé de 3°C, sans modification significative de forme. A noter que la température au fond du forage est de 6°C inférieure à celle de la sonde coaxiale de 800 m, mais que la température de retour est de 1 °C supérieure.

4.3 Trois sondes double « U » de 300 m

Horizontalement, le modèle est aussi un carré de 100 m de côté. En son centre, trois sondages distants de 15 m sont disposés en forme de triangle. La discrétisation verticale est similaire à celle des autres cas, sauf que la profondeur est limitée à 500 m. Le diamètre du forage est de 152 mm et ne comporte pas de tubage, le diamètre extérieur des tubes est de 40 mm, leur diamètre intérieur de 32.7 mm. Les paramètres physiques du terrain et des matériaux demeurent identiques au cas de la sonde coaxiale.

La puissance de chaque sonde est limitée à 10 kW, soit 33W/ml et un $\Delta T = 4^\circ\text{C}$ est fixé entre entrée et sortie des tubes. Le débit de chacune doit ainsi être de 35.7 l/min. Pour fournir les 12 MWh de janvier, chaque sonde doit produire 4 MWh, ce qui avec une puissance de 10 kW nécessite 400 h de fonctionnement. La durée quotidienne de fonctionnement en janvier est donc de $400/(30 \cdot 24) = 0.55$ jour/jour, soit 13.3 h/jour.

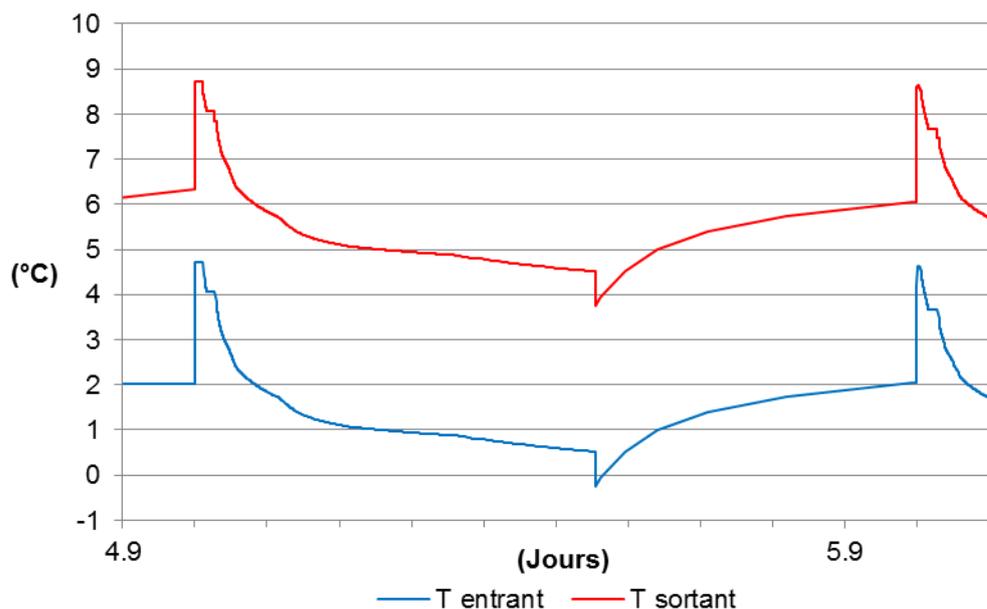


Figure 14 : Températures à l'entrée et à la sortie des sondes en double U de 300 m après 5 jours, puis après 20 ans plus 5 jours. A la fin de la période de fonctionnement, une brève chute de température apparaît. Comme dans le cas des sondes de 500 m, elle n'a pas de signification physique.

Le résultat du calcul indique que la température de réinjection est proche de 0°C quelques jours seulement après le démarrage de la sonde (Fig. 14), ce qui indique que cette configuration n'est pas réaliste dans la durée (rappel : fonctionnement sans antigél). Les calculs à long terme n'ont donc pas été réalisés.

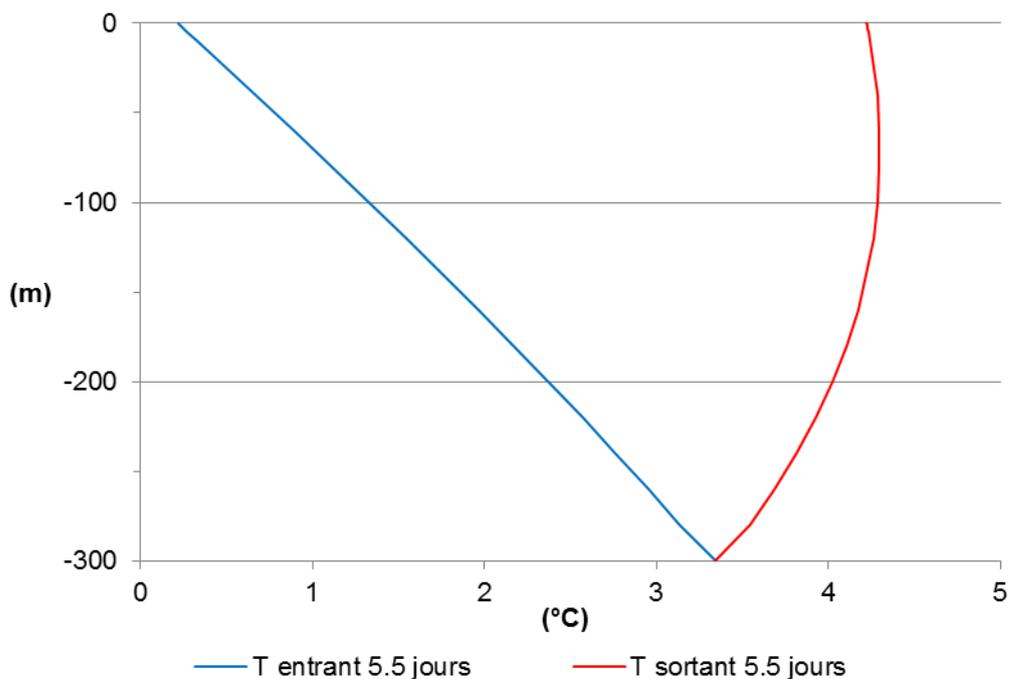


Figure 15 : Profils de température dans les tubes descendants (bleu) et remontant (rouge) dans les sondes en double U de 300 m juste avant l'arrêt du circuit.

En profondeur, il y a une forte dissymétrie entre tubes descendants et montants (Fig. 15). La plus grande partie de l'augmentation de température a lieu durant la descente, tandis que moins de 1°C est gagné lors de la remontée, avec même un léger refroidissement dans les 50 m sous la surface. C'est la manifestation du déséquilibre thermique de cette configuration : le relativement fort réchauffement dans le tube descendant est dû à la température de réinjection trop froide pour ce que peut produire le milieu géologique, malgré un ΔT de seulement 4°C.

Par rapport aux sondes de 500 m cette différence de comportement trouve son origine dans la différence de débit, de ΔT et de température au fond. Notamment, le caloporteur circule légèrement plus vite dans les sondes de 300 m (0.74 m/s) que dans celles de 500 m (0.63 m/s).

Au total, les sondes de 300 m ne peuvent pas produire durablement 4MWh par mois parce que le caloporteur doit circuler assez vite, que le ΔT nécessairement faible pour ces profondeurs implique un long fonctionnement quotidien et que la relativement faible température du fond est insuffisante.

4.4 Commentaires

Dans les trois configurations, l'énergie prélevée est la même. Il s'agit de grandes quantités d'énergie, de sorte que la recharge par le flux géothermique terrestre est négligeable. On peut donc considérer qu'à l'échelle des ouvrages, l'énergie est exploitée de manière minière, sans renouvellement.

A long terme, le refroidissement du milieu à quelques mètres de distance de la sonde(s) ne dépend donc ni du type de sonde, ni du scénario de circulation quotidien, ni du ΔT , ni du débit de circulation. Seule l'énergie moyenne prélevée et la profondeur de la sonde comptent.

Cependant, à court et moyen terme, le type de sonde et sa profondeur sont d'une grande importance en termes d'énergie de pointe. Par exemple, les configurations à 1 x 800 m ou 2 x 500 m donnent des résultats comparables pour le scénario d'exploitation choisi. Mais la puissance de pointe de la sonde de 800 m est évidemment bien supérieure.

Pour prélever 4MWh/mois, les modèles proposés indiquent que les configurations à 1 x 800 m ou 2 x 500 m suffisent, tandis que la version 3x300 m est simplement insuffisante.

Globalement, quelle que soit la configuration, la perte de température dans les sondes est d'environ 2.5°C en 20 ans.

Dans les configurations à 2 ou 3 sondes, nous avons utilisé la règle empirique selon laquelle l'espacement entre sondes doit être (au moins) 5% de leur profondeur. A long terme, les sondes abaissent mutuellement leur capacité de production, en ajoutant les refroidissements dus à chacune. Dans le cas de deux ou trois sondes (Fig. 17), cet effet se manifeste après quelques années. Il est facile d'extrapoler cet effet dans le cas d'une sonde entourée par plusieurs autres.

Cet effet latéral de propagation du refroidissement, quel que soit le nombre de sondes est important même s'il semble mineur en regard de la perturbation verticale occasionnée par les sondes (Fig. 16). C'est cependant l'effet latéral du refroidissement qui conditionne la ressource à long terme puisque les flux thermiques vers la sonde sont quasi horizontaux.

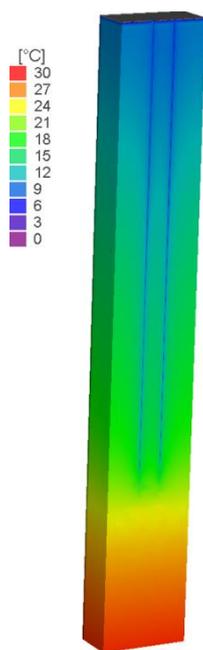


Figure 16 : Cas de 2 sondes en double U de 500 m de profondeur. Vue 3-D du champ de température après 20 ans et 10 jours. Découpage passant par les sondes. Profondeur totale du modèle : 700 m.

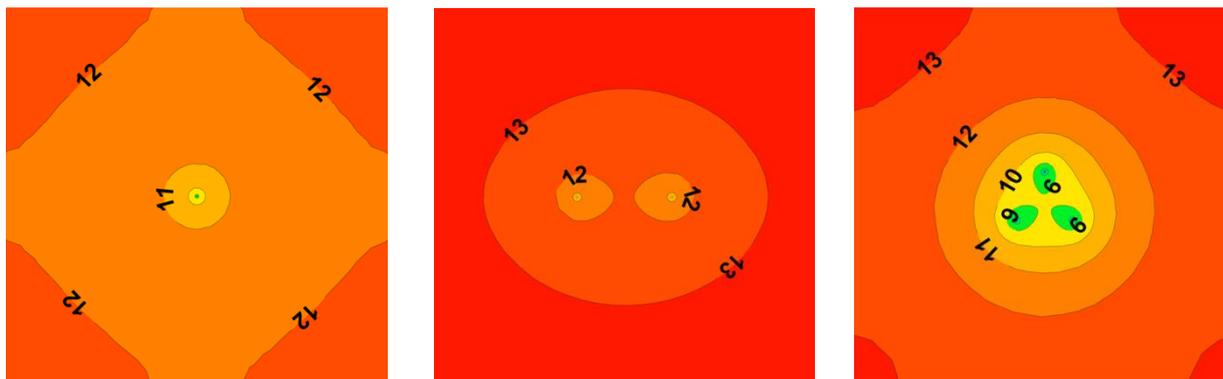


Figure 17 : Coupes horizontales à 200 m de profondeur dans le champ de température à moyen terme. Gauche : 1 sonde coaxiale de 800 m. Milieu : 2 sondes en double U de 500 m. Droite : 3 sondes en double U de 300 m. Situation après 20 ans d'exploitation (7 ans dans le cas des 3 sondes).

Les modèles proposés suggèrent que le scénario d'exploitation quotidien a une grande importance sur l'énergie disponible à court terme. L'énergie semble mieux se régénérer par de forts gradients thermiques, ce qui signifie en pratique que durant les mois d'hiver, il est peut-être bénéfique de répartir le fonctionnement sur plusieurs périodes quotidiennes à forte puissance (chocs thermiques).

Pour les paramètres considérés, les configurations 1x800 m et 2x500 m produisent assez rapidement des températures basses. La recharge thermique estivale serait évidemment un gage de leur durabilité.

5 Application au champ de l'EHL

Dans ce qui suit, la disposition en surface des sondes, et donc leur espacement, est considérée comme fixe. Vu la forte occupation du terrain par diverses installations et constructions, il y a peu de possibilités autres que le plan établi par Weinmann Energies, que nous utilisons ici (Fig. 18). Nous n'avons donc pas modélisé de variantes d'implantation en surface. Par contre, nous avons envisagé que seulement une partie de ces sondes soit exploitée et que leur profondeur diffère des 800 m prévus (sauf pour la sonde n°1, déjà forée).

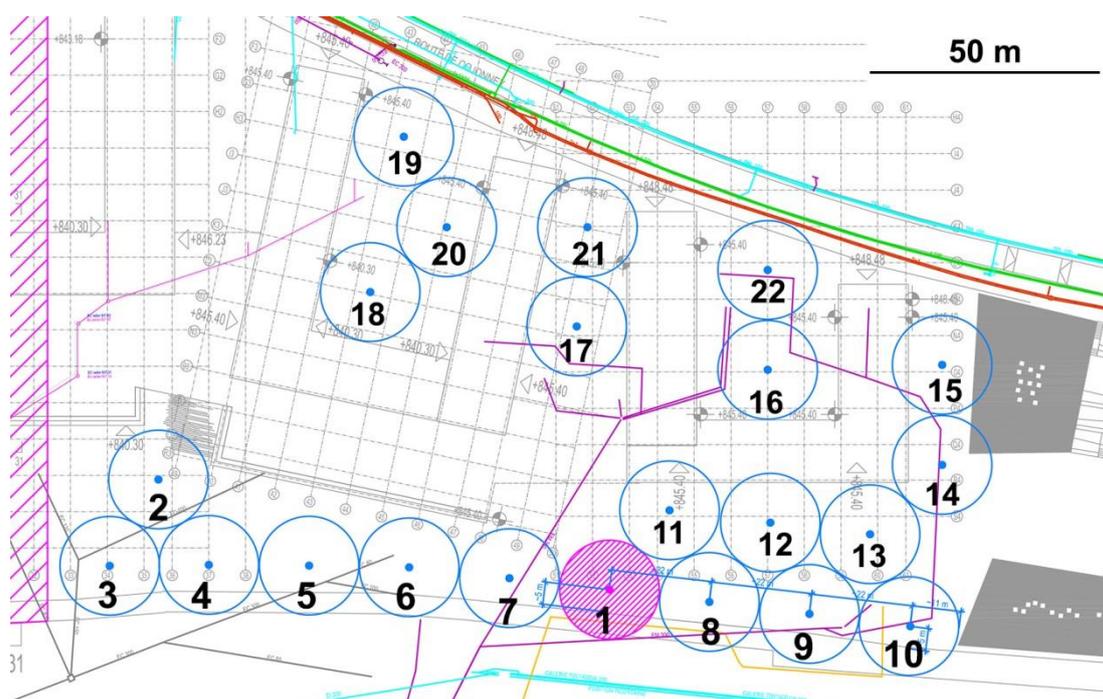


Figure 18 : Situation en surface des 22 sondes et leur numérotation dans le présent rapport. La sonde n° 1 est déjà forée et installée. Les cercles entourant chaque sonde ont un diamètre de 22 m. Document de fond : Weinmann Energies

Concernant l'espacement entre les sondes, il est fixé à 22 m, ce qui signifie que pour une profondeur de 800 m, la règle empirique généralement admise n'est pas respectée : espacement minimum = 5% de la profondeur, soit 40 m dans le cas présent. Un aspect important de nos modèles est donc d'examiner dans quelle mesure la relative proximité des sondes nuit à la pérennité du champ et si leur grande profondeur peut y pallier, autrement dit si on peut compenser l'espacement par la profondeur.

5.1 Energie disponible dans le voisinage d'une sonde

Afin d'illustrer l'ordre de grandeur de la ressource énergétique, il est proposé ici un calcul très simple dont le résultat ne doit pas être lu comme l'énergie effectivement extractible d'une sonde.

Chacune des 22 sondes du champ de l'EHL est distante de 22 m de sa voisine(s). Nous calculons la quantité d'énergie libérée par le refroidissement d'un cylindre de diamètre 22 m et de hauteur égale à la profondeur des sondes, soit 800 m. Les paramètres utilisés sont les suivants :

- Capacité thermique du milieu (cf. § 2) : $C = 0.85 \cdot C_r + 0.15 \cdot C_e = 2.4 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ (ou $\text{J/m}^3 \cdot \text{C}$)
- Volume du cylindre : $V = \pi \cdot 11 \cdot 11 \cdot 800 = 304106 \text{ m}^3$
- Température moyenne initiale : $T_0 = \text{moyenne arithmétique de la température en surface et de celle au fond} = (10 + 32) / 2 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$
- Température après refroidissement. On suppose qu'on refroidit entièrement le cylindre jusqu'à une température proche du gel : $T_f = 1^\circ\text{C}$. La température prélevée est $\Delta T = T_0 - T_f = 21 - 1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

L'énergie produite par le refroidissement du cylindre vaut ainsi : $V \cdot C \cdot \Delta T = 1.46 \text{ GJ} = 4054 \text{ MWh}$

D'après le scénario prévu (cf Tab. 3), chaque sonde produit 108 MWh/an. Le refroidissement du cylindre correspond donc à environ 38 ans d'une telle production (70 ans si le rayon du cylindre est de 15 m, 125 ans s'il est de 20 m). Cela ne signifie pas que de telles sondes puissent fournir 108 MWh/an pendant 38 ans puisqu'on ne sait pas refroidir de manière homogène un tel volume et qu'un gradient thermique demeure nécessaire en son sein pour amener la chaleur vers la sonde. Cette durée doit donc être considérée comme un grand maximum. Ce calcul ne tient pas compte d'un apport de chaleur depuis l'extérieur du cylindre, mais un tel apport est contrarié par la proximité des autres sondes. La recharge au fond du cylindre par le flux géothermique terrestre n'est pas non plus considérée car négligeable (74 mW/m^2 multiplié par la surface du fond = $74 \cdot \pi \cdot 11 \cdot 11 = 28000 \text{ mW} = 28 \text{ W}$, soit une durée de 16'500 ans pour réchauffer le cylindre après exploitation). Un balayage du cylindre par de l'eau souterraine, qui régènerait sa température de manière drastique, n'est pas non plus supposé ici.

5.2 Différence entre les sites EHL et Sirius

A Lausanne, le site Sirius (Swiss Engineering, novembre 2015) réalisé sous la direction des Services Industriels de la ville, exploite huit sondes profondes de 500 m. Nous examinons ici la possibilité de transcrire directement les enseignements du projet Sirius à celui de l'EHL. En effet, outre la différence de profondeur entre les sondes, les deux sites diffèrent par la nature de la roche (Fig. 24).

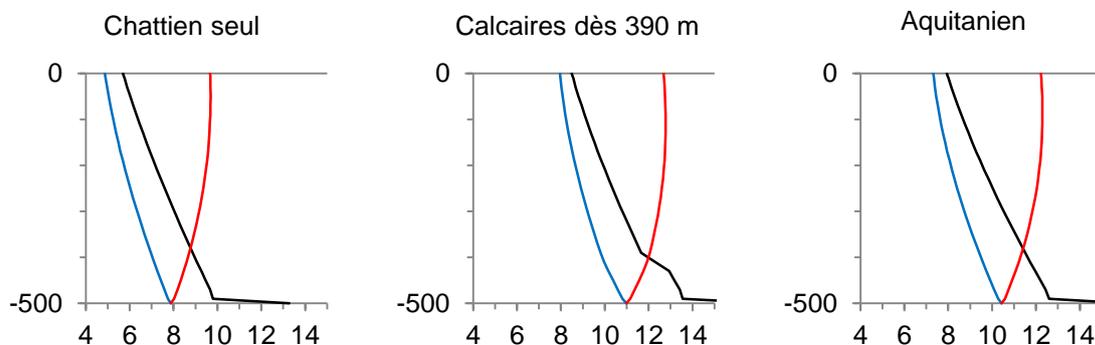


Figure 24 : Profils de température ($^\circ\text{C}$) dans les sondes au $10^{\text{ème}}$ jour de fonctionnement, quelques minutes avant l'interruption quotidienne, pour les trois configurations géologiques envisagées. En ordonnée, profondeur (m).

Trois cas ont été modélisés, qui ne diffèrent que par la conductivité thermique de la roche:

Cas 1 : roche homogène, peu conductive (e.g. molasse chattienne) : 1.7 W/m.K

Cas 2 : idem mais en dessous de 390 m de profondeur, roche plus conductive (e.g. calcaire) : 3 W/m.K

Cas 3 : roche homogène, moyennement conductive (e.g. molasse aquitanienne) : 2.7 W/m.K

Le cas 2 est plus représentatif du site Sirius et le cas 3 du site EHL. Le résultat après 10.4393 jours, juste avant l'interruption quotidienne de la circulation indique que la présence calcaire au fond (cas 2) produit des températures plus chaudes d'environ 3°C qu'en leur absence (cas 1). Cette configuration géologique est même légèrement plus favorable que celle d'un matériau homogène assez conducteur (cas 3).

L'explication de la meilleure performance du cas 2 est que le calcaire, plus conducteur, induit un plus faible gradient thermique entre la base du modèle (-700 m) et -390 m. Il fait donc plus chaud au fond des sondes. La configuration possédant un conducteur au fond et un relatif isolant au-dessus permet d'amener en surface l'eau la plus chaude.

Paramètres du prélèvement pour chaque sonde de 500 m

Durée de fonctionnement quotidienne : 0.47619 j/j

Prélèvement de température : $\Delta T = 5^\circ\text{C}$

Débit durant le fonctionnement : 3 m³/h

Puissance durant le fonctionnement : 17.5 kW

Energie prélevée : 200 kWh/j

5.3 Sondes espacées de 22 m

Le modèle fonctionne selon les paramètres décrits au §2. Les 22 sondes fonctionnent toujours simultanément et à mêmes puissances et débits. Le protocole de calcul est similaire à celui du §4, à savoir un fonctionnement transitoire en début d'exploitation, suivi d'une exploitation en régime permanent permettant de calculer rapidement l'évolution de la température moyenne autour des sondes, puis enfin de nouveaux calculs en régime transitoire avec chronique d'exploitation journalière.

Le détail des trois phases est le suivant :

- Fonctionnement des sondes pendant 10 jours dès leur mise en service simultanée (1^{er} janvier) selon la chronique d'exploitation quotidienne. Le champ de température initial est l'état naturel non perturbé (10°C en surface² et 32 °C à 800 m de profondeur). L'énergie

² Afin d'accélérer très fortement les calculs, la chronique de température annuelle en surface a été remplacée par une température constante de 10°C. Cette simplification n'a d'effet que sur les premiers 10 m de profondeur, dans la zone d'hétérothermie.

prélevée dans chaque sonde est représentative du mois de janvier, soit 12 MWh. Cela revient pour un ΔT de 6°C à faire fonctionner chaque sonde durant 0.476 jour/jour avec un débit de 120 m³/jour (5 m³/heure ou 83 l/min). En fonctionnement, la puissance instantanée est ainsi de 35 kW. Moyennée sur la journée en intégrant la période de repos, elle est de 16.7 kW.

- Ensuite, fonctionnement pendant 15 ans en prélevant de manière continue l'énergie moyenne annuelle (108 MWh/an dans chaque sonde, soit 9 MWh/mois) sans tenir compte du détail mensuel et quotidien du prélèvement. Cela consiste à extraire en continu une puissance de $108000 / (365 \cdot 24) = 12.33$ kW. Cette puissance est obtenue par un débit de 1.76 m³/h dans chaque sonde en prélevant 6°C dans chaque PAC. Au total, la puissance extraite du champ est $9 \times 22 = 198$ MWh/mois.
- En utilisant le résultat de la précédente étape comme condition initiale de température du terrain, fonctionnement supplémentaire pendant 10 jours selon la chronique quotidienne.

Le calcul de détail sur 10 jours avant et après la période de 15 ans est destiné à s'assurer que les jours sont assez similaires pour être représentatifs, ce qui s'avère vrai. En pratique, les résultats sont présentés au jour 7 avant et après la période d'exploitation moyenne de 15 ans. On peut comprendre ces résultats comme ceux du 7 janvier 2015 et du 7 janvier 2030.

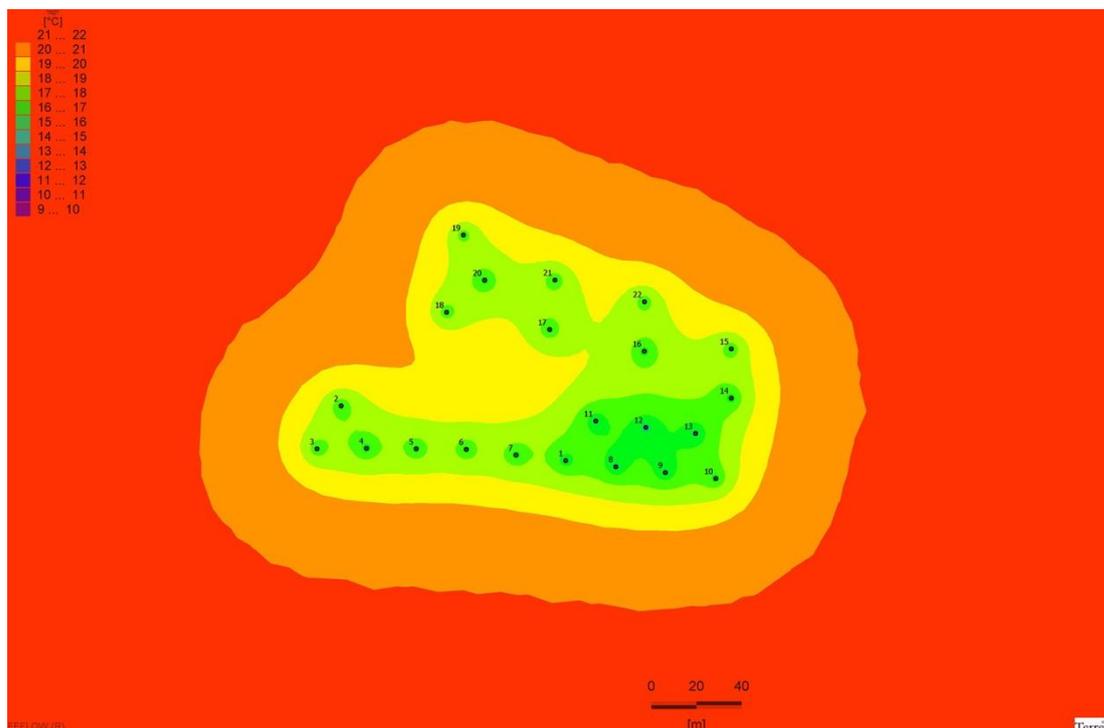


Figure 25 a : Température à 400 m de profondeur après 5 ans d'exploitation permanente moyenne.

On constate qu'en raison du relativement faible éloignement des sondes, les interférences thermiques entre-elles se manifestent après seulement quelques années (Fig. 25a, 25b, 25c). Après 10 ans d'exploitation, les sondes n° 11, 12 et 13 sont plus froides d'environ 3°C que les autres, à 400 m de profondeur. Après 15 ans, leur sur-refroidissement est supérieur à 4 °C.

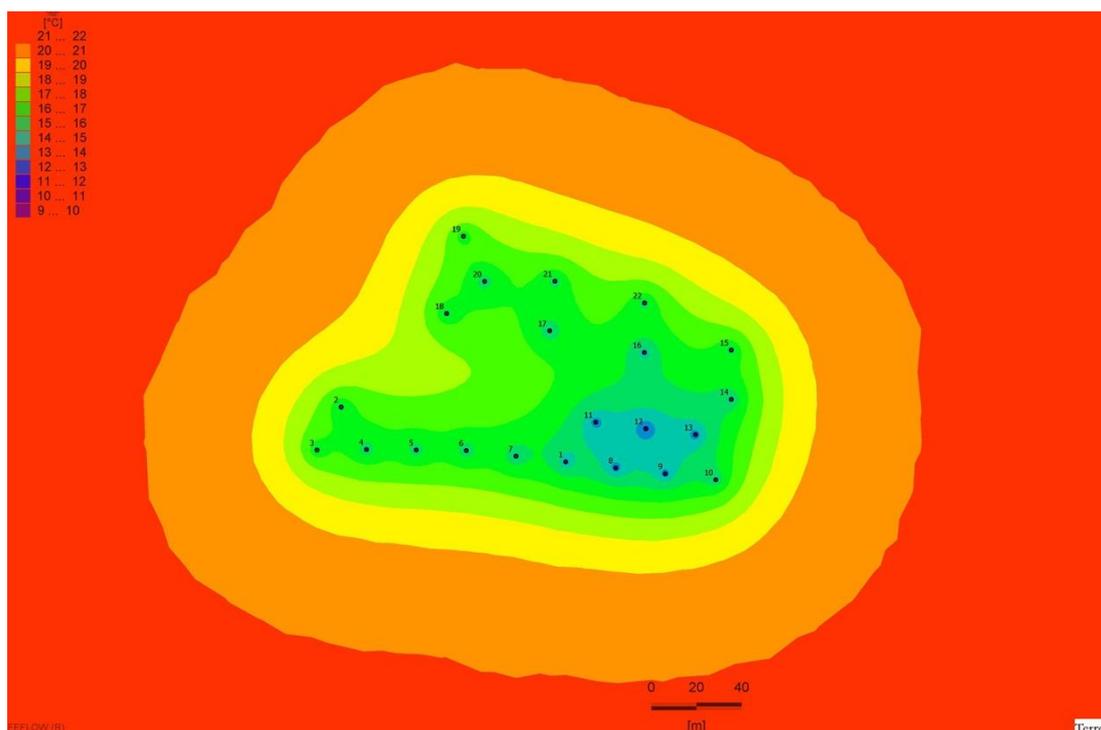


Figure 25 b : Température à 400 m de profondeur après 10 ans d'exploitation permanente moyenne.

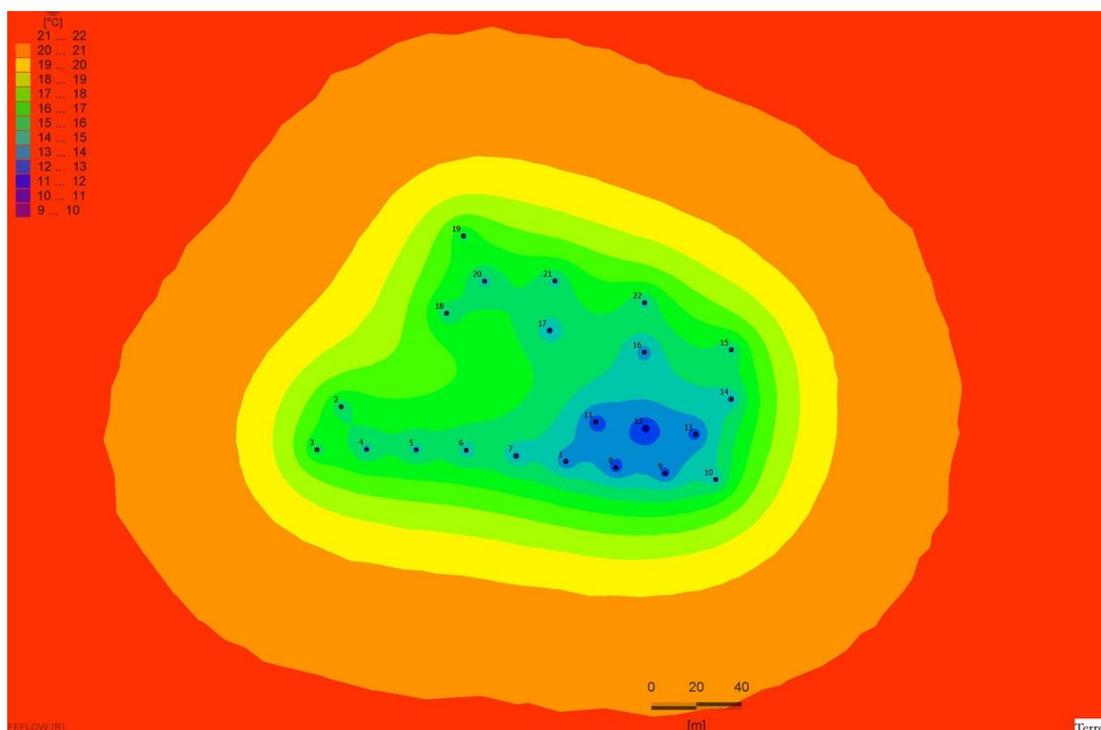


Figure 25 c : Température à 400 m de profondeur après 15 ans d'exploitation permanente moyenne.

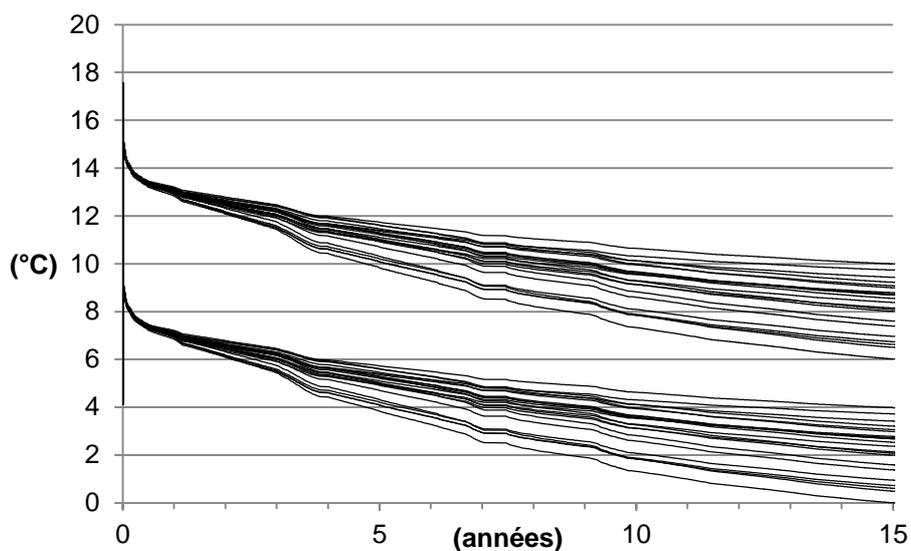


Figure 26 : Température à l'entrée et à la sortie des 22 sondes durant les 15 premières années d'exploitation à puissance continue équivalente de 12.33 kW par sonde.

Au terme de 15 années d'exploitation moyenne, les premières sondes commencent à geler (Fig. 26) ; il s'agit des ondes n° 11, 12 et 13. Le refroidissement des autres est aussi considérable, l'eau réinjectée ne dépassant pas 4°C.

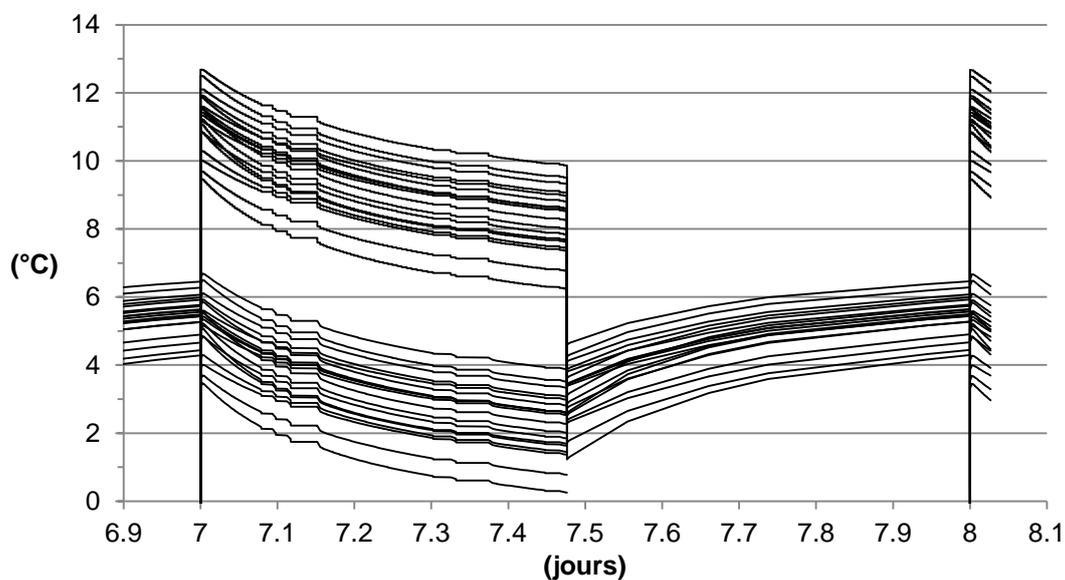


Figure 27 : Température à l'entrée et à la sortie des 22 sondes durant la 7^{ème} journée après 15 années d'exploitation en régime permanent

Au terme de 15 ans, d'exploitation moyenne, le fonctionnement avec chronique quotidienne représentative du mois de janvier est rétabli (Fig. 27). Il confirme le gel à la réinjection dans certaines sondes en fin de période quotidienne d'exploitation.

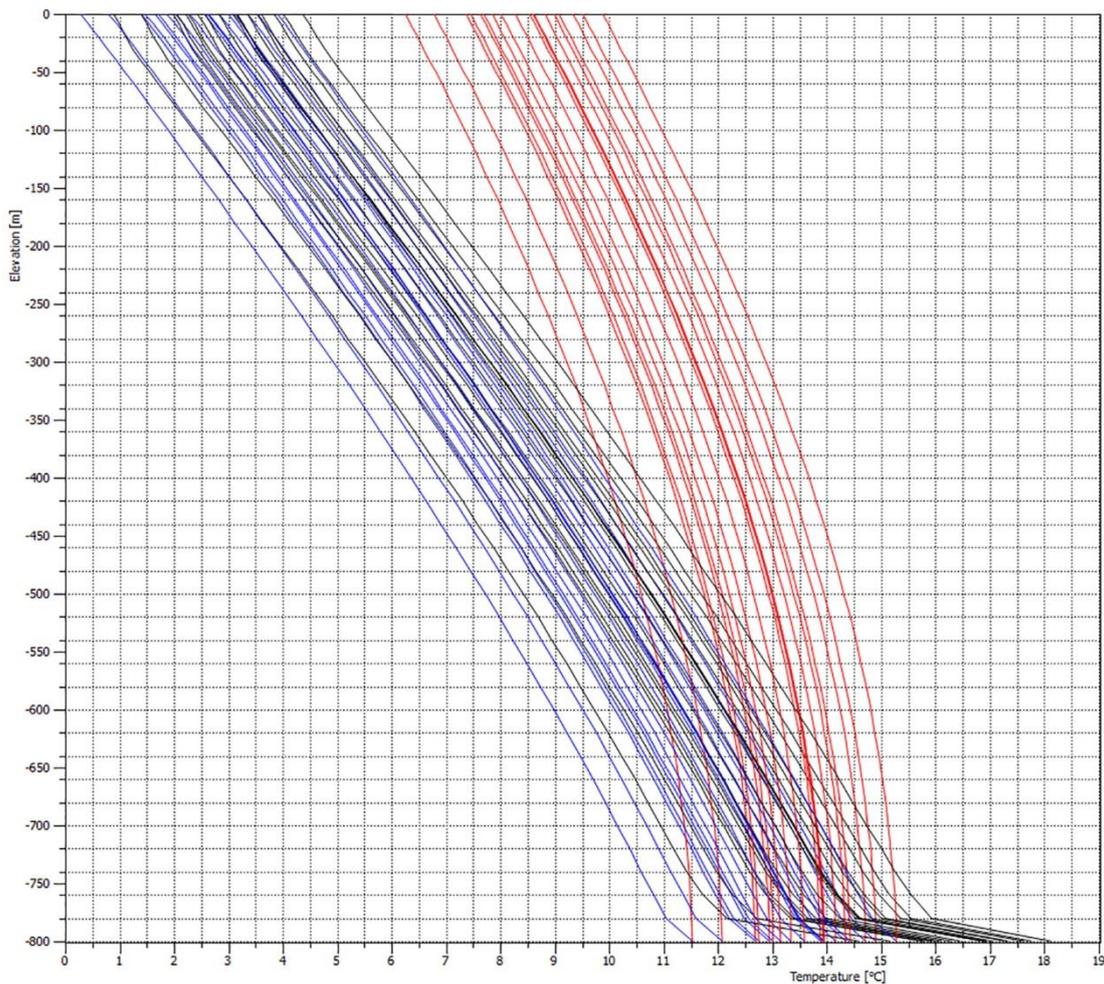


Figure 28 : Profil de température des 22 sondes après 15 ans de fonctionnement permanent et juste avant l'arrêt du 7^{ème} jour de fonctionnement transitoire qui suit (15 ans et 7.47615 jours)

Avec la profondeur, la température dans les sondes montre aussi une dispersion d'environ 3°C, due à l'effet de leurs voisines (Fig.28).

La configuration des sondes avec espacement de 22 m montre que globalement le champ peut fonctionner une quinzaine d'années selon le scénario énergétique prévu.

5.4 Sondes espacées de 40 m

La durée de fonctionnement souhaitée du champ est de 50 ans. Puisque la configuration du champ en sondes espacées de 22 m montre une dégradation de performance après 15 ans, deux solutions sont à envisager :

- Augmenter l'espacement entre sondes
- Modifier le scénario d'exploitation, notamment en envisageant la réinjection thermique estivale

La modification de l'espacement entre sondes permet de minimiser les interférences thermiques entre elles. Leur éloignement permet d'augmenter la réserve thermique dans le voisinage de chacune, à savoir de permettre leur fonctionnement à long terme. Les modèles décrits ci-dessous

indiquent qu'en effet le champ peut fonctionner une cinquantaine d'années en prélevant en continu 2377 MWh/an (108 MWh/an par sonde) si les sondes sont éloignées de 40 m. Cependant, le problème du pic hivernal de prélèvement n'est pas résolu par l'éloignement des sondes, qui améliore la performance moyenne seulement à long terme. A court terme, l'optimisation de l'exploitation en janvier et février pour éviter le gel de l'eau réinjectée dépend principalement du scénario thermique.

Weinmann Energies SA nous a donc fourni deux nouveaux plans d'implantation des sondes et quatre nouveaux scénarios énergétiques, afin de cerner une configuration définitive. Parmi les deux nouveaux plans d'implantation, celui proposant une distance de 30 m entre sondes a été écarté suite à un calcul sur 50 ans. Nous n'avons donc investigué que l'autre configuration, proposant un espacement de 40 m (Fig. 29).

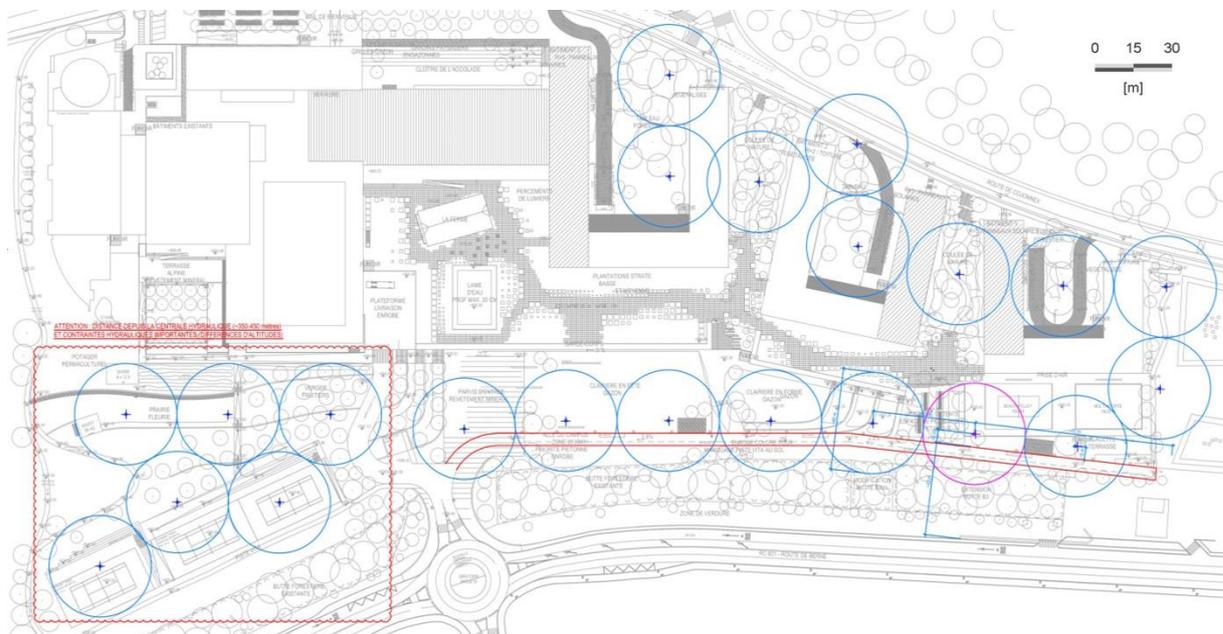


Figure 29 : Plan d'implantation des 22 sondes avec espacement minimum de 40 m. Cercles bleus: rayon de 20 m autour de chaque sonde (Document : Weinmann énergies SA)

Certains des quatre nouveaux scénarios d'exploitation incluent une injection de chaleur en été (Tab. 4). Ce sont les scénarios C et D, qui en contrepartie ponctionnent davantage de chaleur en hiver, mais au total sont plus modérés que le scénario utilisé précédemment (appelé Z). Le scénario B impose le plus fort prélèvement hivernal et ne recharge pas la roche en été.

[MW.h]	Scénario				
Energie prélevée	Z	A	B	C	D
Janvier	264	230	346	335	335
Février	264	198	297	282	282
Mars	263	159	239	213	213
Avril	244	147	221	193	193
Mai	176	108	161	126	-48
Juin	156	96	144	110	-59
Juillet	51	14	21	-20	-20
Août	52	14	21	-22	-22
Septembre	171	104	155	126	-43
Octobre	208	124	186	167	167
Novembre	264	192	288	278	278
Décembre	264	225	337	328	328
Total	2377	1611	2416	2116	1604
Moyenne mensuelle	198	134	201	176	134
Moyenne mensuelle par sonde	9	6	9	8	6
Moyenne annuelle par sonde	108	73	110	96	73

Tableau 4 : Scénarios énergétiques envisagés. Le scénario Z est celui qui a été utilisé auparavant. Le document original de Weinmann Energies distingue le prélèvement et la recharge en deux tableaux séparés, certains mois d'été fonctionnant dans les deux modes. Ici, la somme en est directement faite. Les valeurs négatives indiquent une recharge de la roche en chaleur.

La procédure de modélisation est la suivante :

- Fonctionnement pendant 50 ans en prélevant de manière continue l'énergie moyenne annuelle du scénario Z, puisque c'est le plus exigeant à long terme (108 MWh/an dans chaque sonde) sans tenir compte du détail mensuel et quotidien du prélèvement. Cela consiste à extraire en continu une puissance de $108000 / (365 \cdot 24) = 12.33$ kW. Cette puissance est obtenue par un débit de $1.76 \text{ m}^3/\text{h}$ dans chaque sonde en prélevant 6°C dans chaque PAC. Au total, la puissance extraite du champ est $9 \times 22 = 198$ MWh/mois.
- En utilisant le résultat de la précédente étape comme condition initiale de température du terrain, fonctionnement supplémentaire pendant 10 jours selon la chronique quotidienne. Cette opération a été menée après 30 et 50 ans de fonctionnement continu. L'énergie prélevée dans chaque sonde est représentative du mois de janvier, soit 12 MWh. Cela revient pour un ΔT de 6°C à faire fonctionner chaque sonde durant 0.476 jour/jour avec un débit de $120 \text{ m}^3/\text{jour}$ ($5 \text{ m}^3/\text{heure}$ ou $83 \text{ l}/\text{min}$). En fonctionnement, la puissance instantanée est ainsi de 35 kW. Moyennée sur la journée en intégrant la période de repos, elle est de 16.7 kW. La même opération a été menée avec le scénario B, à savoir $346/22 = 15.7$ MWh. Le même débit instantané et le même ΔT sont appliqués mais les sondes fonctionnent un peu plus longtemps quotidiennement (0.624 jour/jour).

Le premier point de la procédure renseigne sur le comportement à long terme des sondes, tandis que le second indique leur capacité à produire en pointe hivernale.

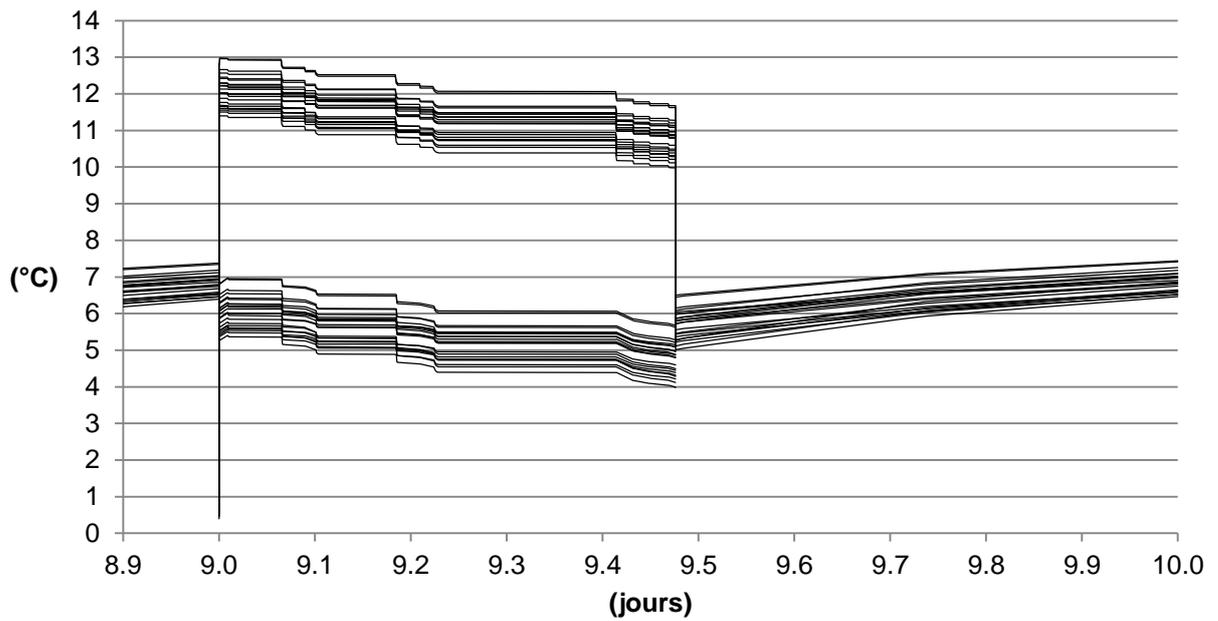


Figure 30 : Températures de sortie et d'injection après 30 ans de fonctionnement en continu du scénario Z et 10 jours de chronique d'exploitation quotidienne du scénario Z. Irrégularités d'origine numérique.

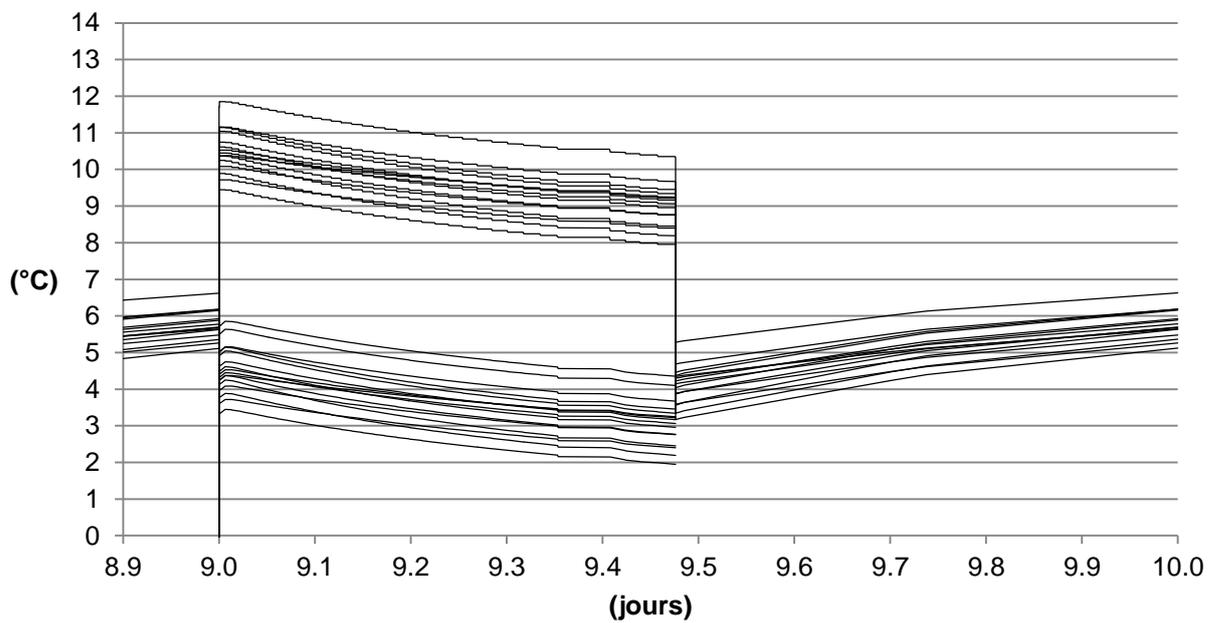


Figure 31 : Températures de sortie et d'injection après 50 ans de fonctionnement en continu du scénario Z et 10 jours de chronique d'exploitation quotidienne du scénario Z.

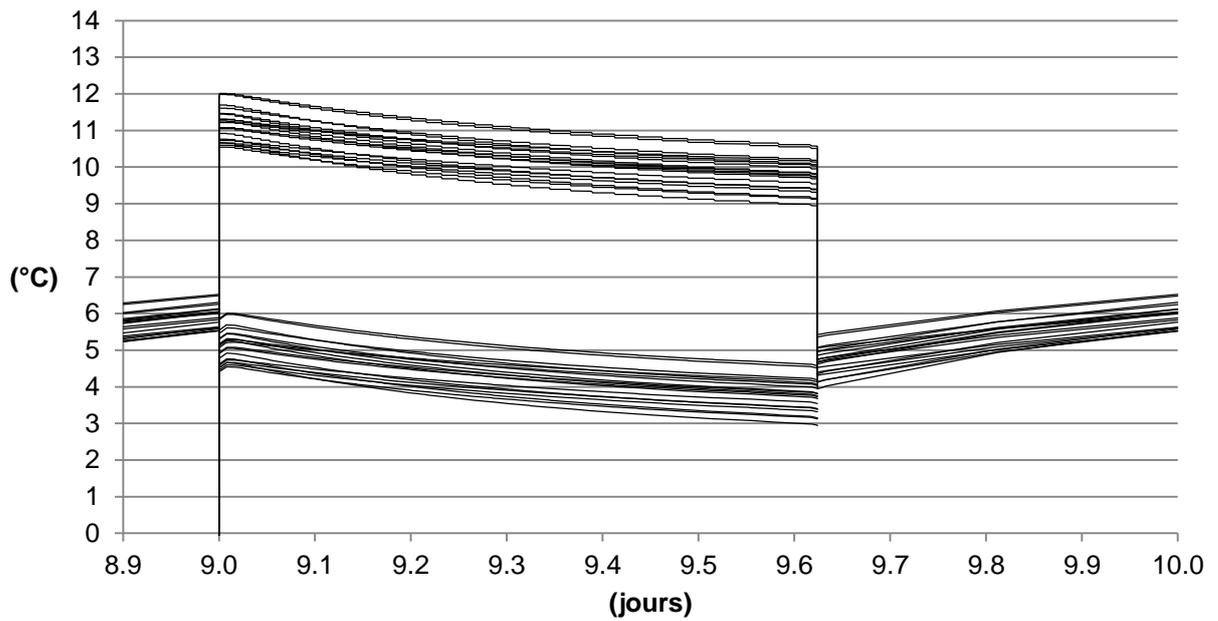


Figure 32 : Températures de sortie et d'injection après 30 ans de fonctionnement en continu du scénario Z et 10 jours de chronique d'exploitation quotidienne du scénario B.

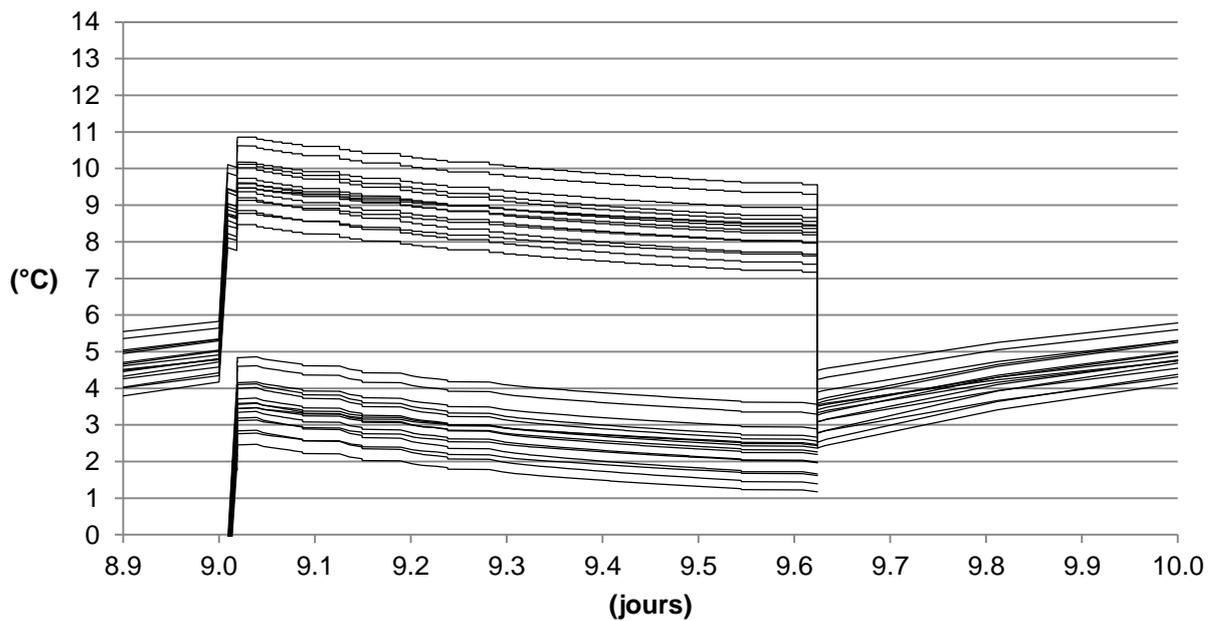


Figure 33 : Températures de sortie et d'injection après 50 ans de fonctionnement en continu du scénario Z et 10 jours de chronique d'exploitation quotidienne du scénario B.

De ces calculs, il ressort que l'espacement de 40 m entre sondes (pas moins) permet d'exploiter globalement l'énergie demandée par tous les scénarios envisagés sur une période de 50 ans. Cependant, l'irrégularité de la consommation implique un pic hivernal qui mène la température d'injection près de 0°C en approchant de la cinquantième année de fonctionnement, surtout pour le scénario B, qui est le plus exigeant en hiver (346 MWh en janvier, Fig. 33). Par rapport au

scénario Z (264 MWh en janvier, Fig. 31), la différence de température est d'environ 1°C à la fin de la durée quotidienne de fonctionnement, simplement parce que celle-ci est plus courte.

Pour évaluer la dérive annuelle de température, un modèle ayant fonctionné d'abord sur une durée de 30 ans en continu selon les mêmes modalités que précédemment (198 MWh/mois) est soumis pendant 10 ans au scénario D. Durant ces 10 ans, le fonctionnement continu varie chaque mois mais sans le détail quotidien. Le résultat (Fig. 34) représente donc la température mensuelle moyenne des sondes entre la 30^{ème} et la 40^{ème} année de fonctionnement.

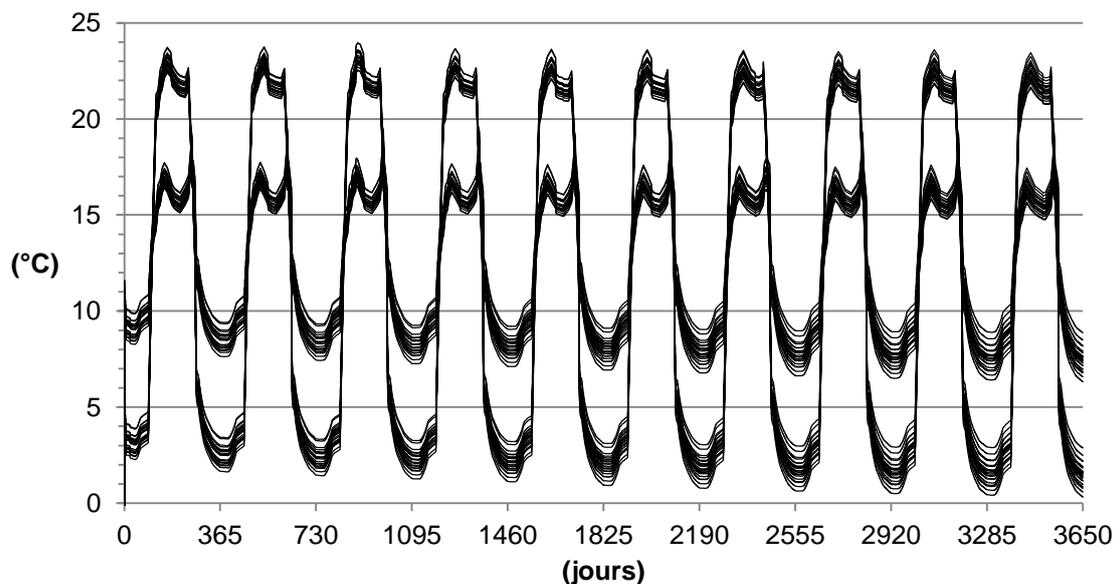


Figure 34 : Températures de sortie et d'injection des sondes entre la 30^{ème} et la 40^{ème} année de fonctionnement selon le scénario D.

Durant ces 10 ans, la température d'injection en janvier baisse de plus d'1°C pour quasiment atteindre le gel. On remarque qu'en été, l'effet de la recharge est manifeste mais très vite estompé par les forts prélèvements dès l'automne.

L'espacement de 40 m n'annule pas les interférences thermiques entre sondes mais les réduit sur la période considérée. Comme dans le cas d'un moindre espacement, les sondes entourées par d'autres sont les plus touchées (Fig. 35a-d) mais avec un surplus de refroidissement d'environ 2°C seulement.

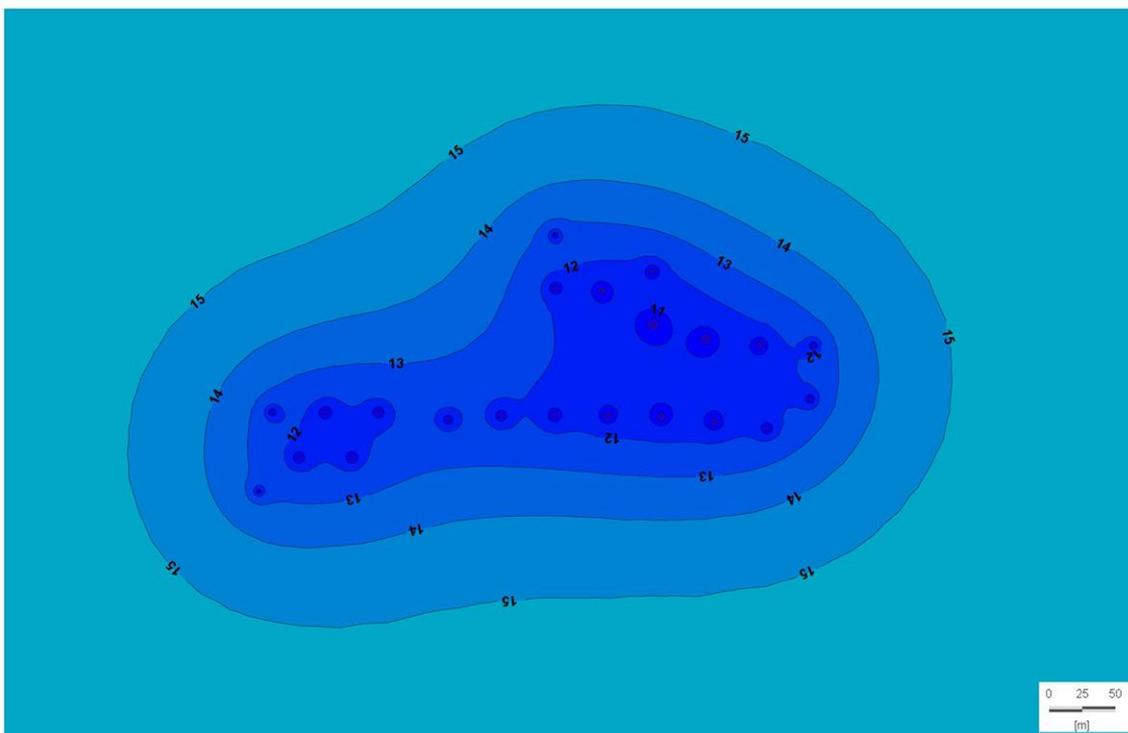


Figure 35a : Température à 200 m de profondeur au 1^{er} janvier de la 40^{ème} année d'exploitation

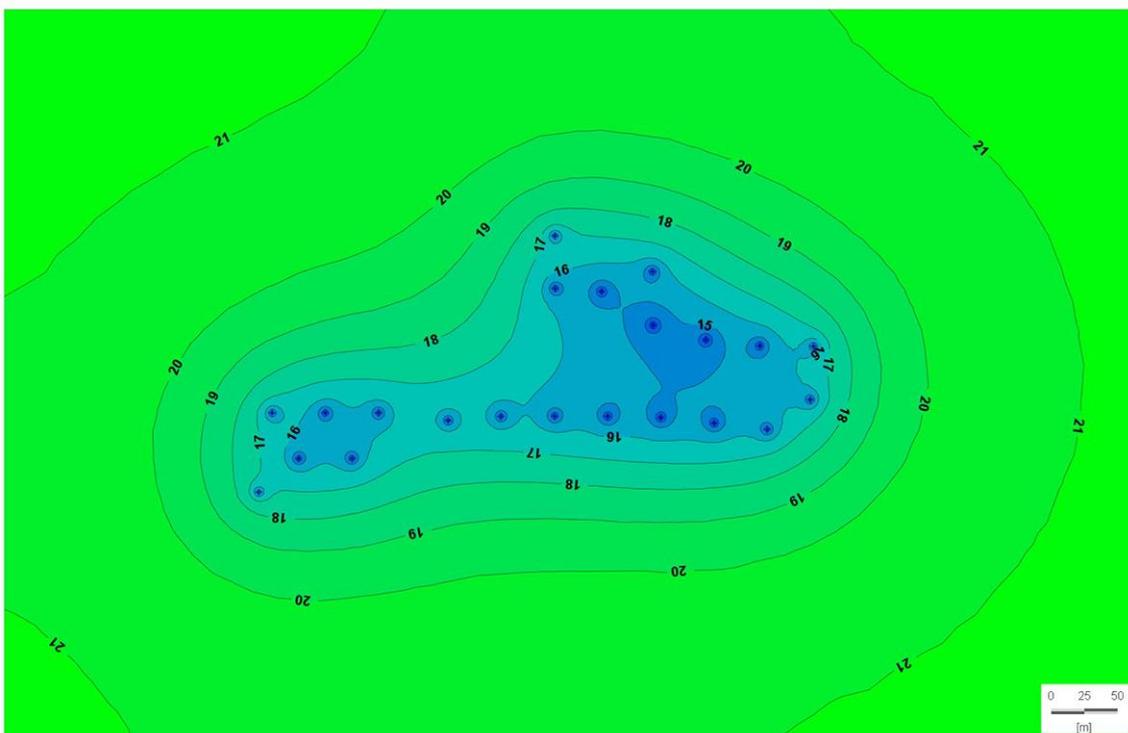


Figure 35b : Température à 400 m de profondeur au 1^{er} janvier de la 40^{ème} année d'exploitation

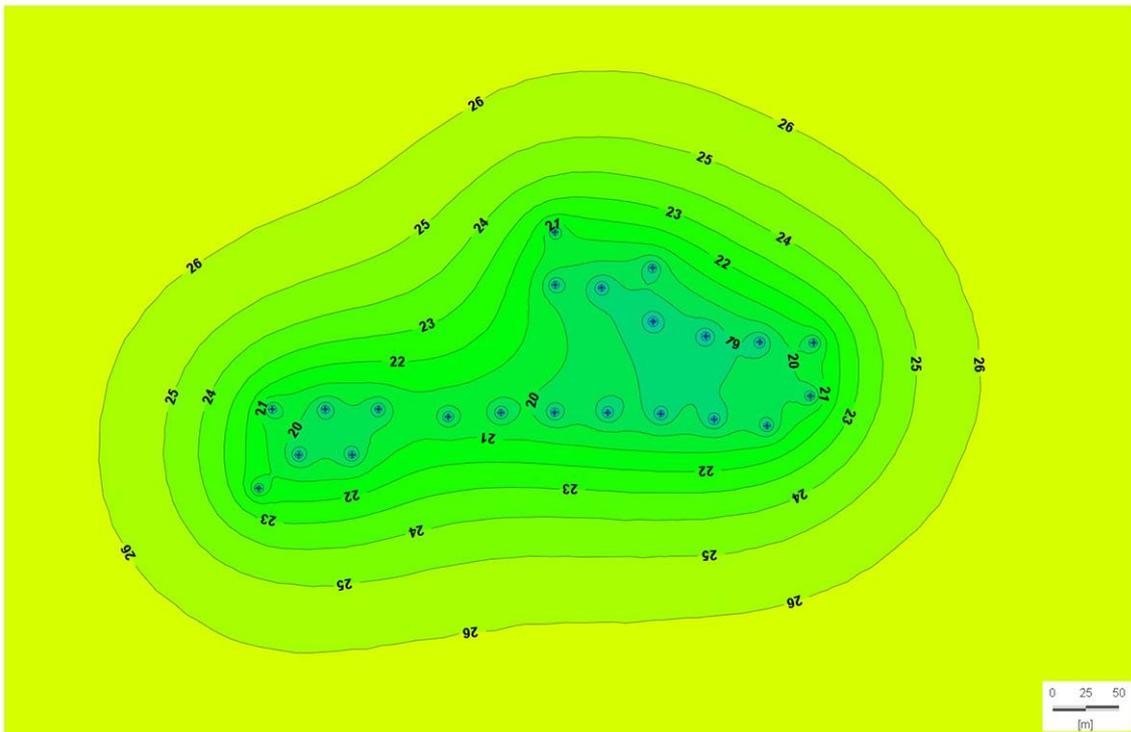


Figure 35c : Température à 600 m de profondeur au 1er janvier de la 40^{ème} année d'exploitation

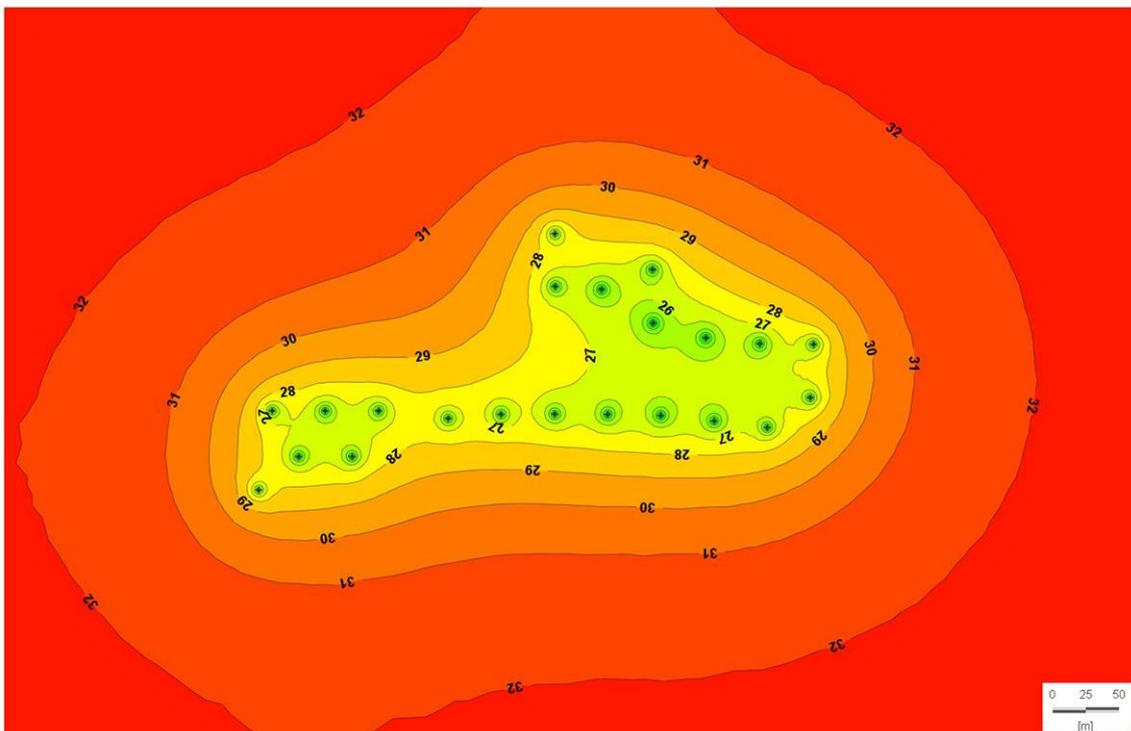


Figure 35d : Température à 800 m de profondeur au 1er janvier de la 40^{ème} année d'exploitation

6 Coaxial isolé

En vue d'améliorer la durabilité prévue du champ de sondes, une nouvelle série de calculs est menée en considérant un matériau du tube intérieur de remontée plus isolant. Sur instructions du maître d'ouvrage, nous avons donc modélisé le comportement d'une sonde dont tous les paramètres sont inchangés (Tab. 2) sauf :

- Le diamètre extérieur du tube intérieur est de 60 mm au lieu de 63 mm
- Son épaisseur est de 5 mm (au lieu de 5.7 mm), Son diamètre intérieur est donc de 50 mm.
- La conductivité thermique du matériau est de 0.17 W/m.K (au lieu de 0.45 W/m.K)

Le but de ce dimensionnement est surtout de réduire le risque de gel en surface au bout de quelques décennies, puisque les calculs précédents montrent que la température de réinjection est dans certaines variantes proches de 0°C.

Dans le principe, un tube de remontée mieux isolé réduit l'échange thermique avec le tube externe de descente. Par conséquent, l'eau arrive plus chaude en surface et est réinjectée aussi plus chaude (e.g. refroidie de 6 °C). Mais à l'inverse, on peut craindre que l'absence de réchauffement de l'eau de descente provoque, à proximité de la surface, un refroidissement accru du terrain. Les calculs qui suivent montrent que cet inconvénient ne se manifeste pas et que le gain de température en surface est d'environ 2°C. Il est cependant évident que la quantité totale de chaleur prélevée est indépendante du type de sonde.

6.1 Une sonde coaxiale de 800m

Pour illustrer l'effet de la meilleure isolation du tube intérieur de remontée, le cas de la sonde de 800 m du §4.1 est retraité en changeant uniquement les caractéristiques de ce tube, comme indiqué ci-dessus. Les calculs sont comme au §4.1 menés selon une chronique quotidienne pendant quelques jours, puis en exploitation continue équivalente durant 20 ans, et enfin de nouveau selon une chronique quotidienne. Les résultats (Fig. 36) montrent les phénomènes suivants à tous les temps de calcul :

- L'inclinaison de la forme en « V » des profils de température est moindre dans le cas tube intérieur mieux isolé. Cela est dû au fait que l'eau perd moins de chaleur en remontant et conserve une température plus constante. Cette relative verticalité se propage à la courbe de température du tube de descente puisque c'est une différence de température (6 °C) qui est imposée au sommet. Notamment à long terme, l'isolation du tube intérieur permet d'augmenter d'environ 2 °C la température d'eau réinjectée, ce qui éloigne le risque de gel en tête de sonde.
- La température en fond de sonde est inférieure d'environ 1 °C dans le cas du coaxial isolé. Cela est dû au moindre réchauffement par échange avec le tube intérieur lors de la descente de l'eau.

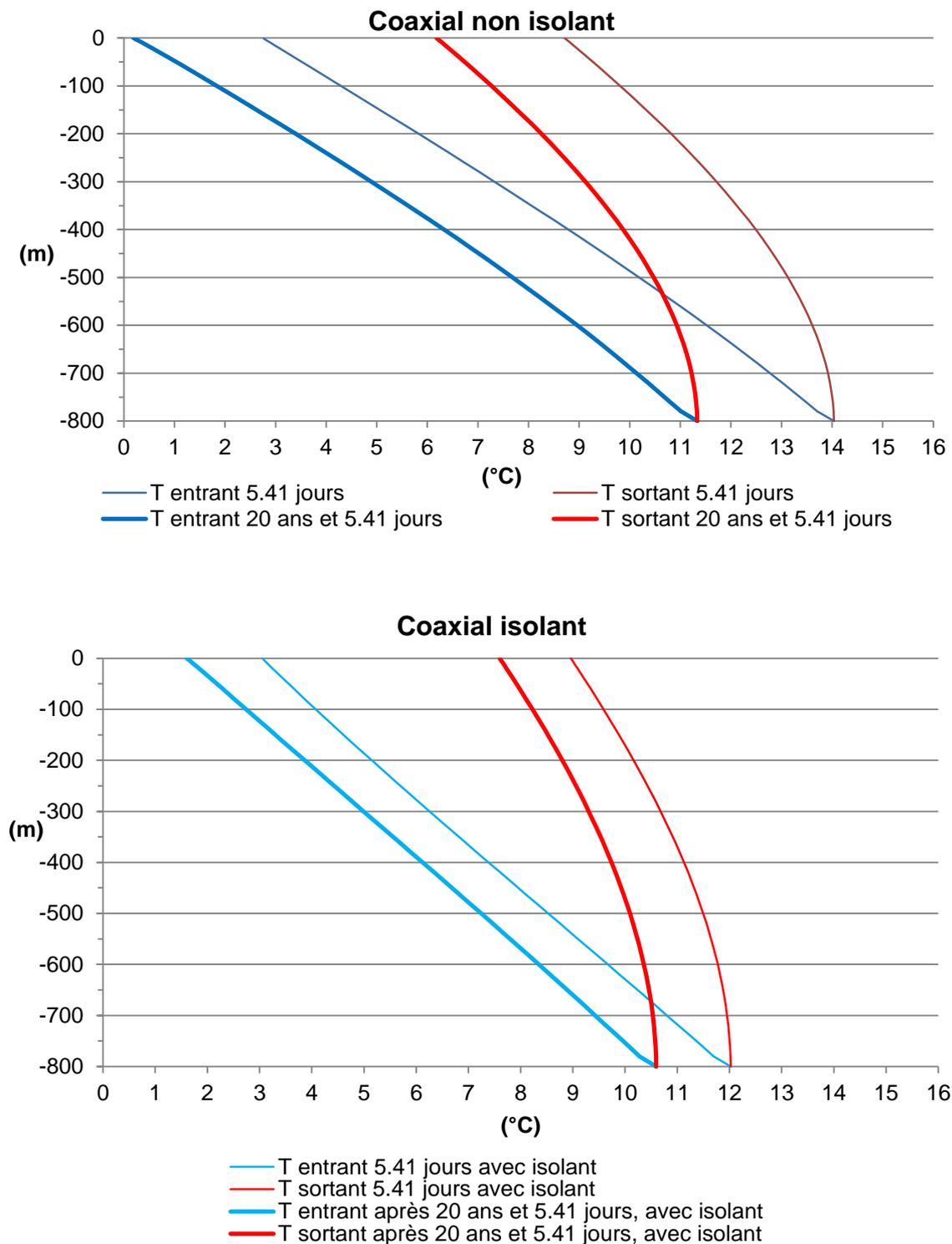


Figure 36 : Profils de températures calculés dans la sonde 800 m à divers temps, selon le type de tube de remontée central, tous autres paramètres étant identiques.

En surface, le gain d'environ 2°C est maintenu tout au long de la période d'exploitation quotidienne de 11h43/jour (Fig. 37).

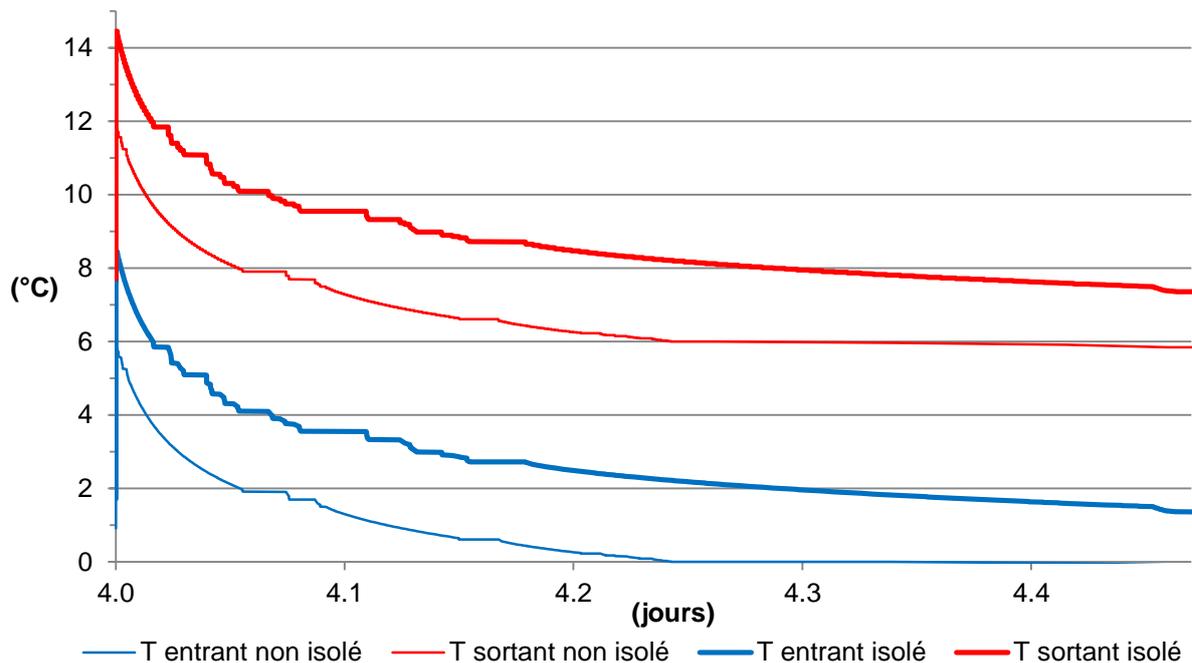


Figure 37 : Températures à l'entrée et à la sortie de la sonde coaxiale après 20 ans d'exploitation continue et 4 jours d'exploitation quotidienne, selon que le tube coaxial central de remontée est isolé ou pas. Seule la durée d'exploitation du 4^{ème} jour est montrée. Les irrégularités des courbes sont d'origine numérique.

6.2 Application au champ de sondes

Par extension, les sondes à coaxial isolé ont été supposées équiper tout le champ de sondes. Pour établir la comparaison avec les sondes précédemment envisagées, c'est le scénario Z (Tab. 4) avec un espacement entre sondes de 40 m qui a été envisagé. Pour se placer du côté de la sécurité, nous n'avons pas tenu compte de l'information donnée par l'EHL indiquant que la production énergétique des sondes pourrait être diminuée d'un tiers par adjonction d'autres sources de chaleur. Le scénario Z est donc très conservatif. Malgré cela, le bénéfice thermique en surface d'environ 2°C diminue sensiblement le risque de gel (Fig.37).

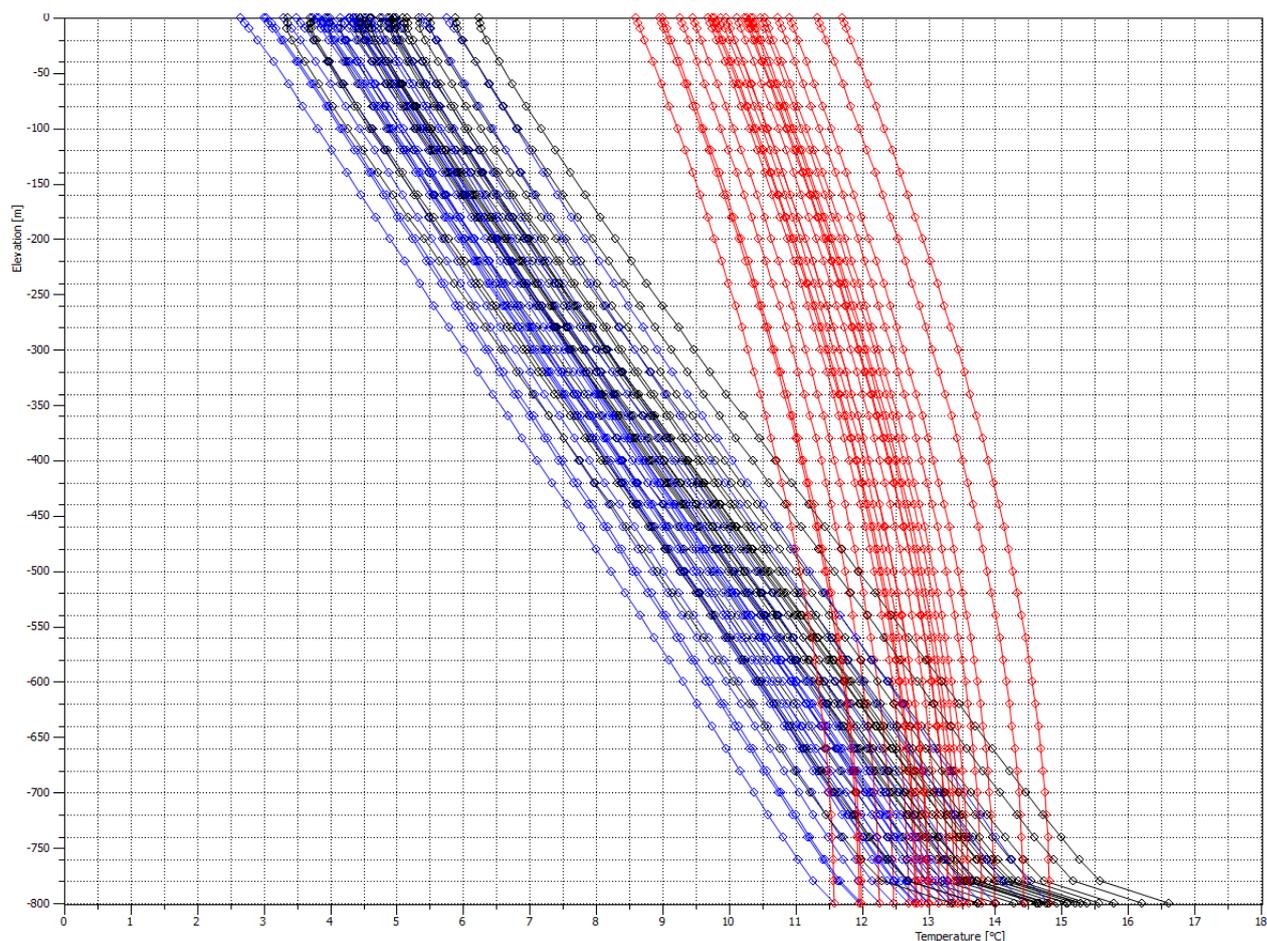


Figure 37 : Profil de température des 22 sondes après 50 ans de fonctionnement permanent et juste avant l'arrêt du 5ème jour de fonctionnement transitoire qui suit (50 ans et 5.41 jours).

7 Scénario E

Outre l'amélioration de performances produit par une meilleure isolation du tube de remontée, un nouveau scénario d'exploitation plus économique (Tab. 5), nous a été soumis. En combinant les avantages de l'isolation du tube de remontée et d'un moindre prélèvement énergétique, nous avons cherché à savoir s'il ne serait pas possible de réduire le nombre de sondes tout en préservant la durabilité de la ressource.

	Scénario E Energie mensuelle totale [MW.h]	Scénario E Energie mensuelle par sonde [MW.h]	Puissance par sonde (kW)
Janvier	202	9.18	12.34
Février	171	7.77	11.57
Mars	134	6.09	8.19
Avril	122	5.55	7.70
Mai	84	3.82	5.13
Juin	73	3.32	4.61
Juillet	12	0.55	0.73
Août	12	0.55	0.73
Septembre	80	3.64	5.05
Octobre	100	4.55	6.11
Novembre	165	7.50	10.42
Décembre	197	8.95	12.04
Total	1352	62	

Tableau 5 : Scénario d'exploitation E. La répartition par sonde suppose 22 sondes.

Protocole de simulation : les caractéristiques des sondes sont celles du § 6. Le calcul est d'abord mené sur 40 ans avec un prélèvement continu moyen de 6.85 kW par sonde. ΔT est fixé à 6 °C, le débit valant 23.48 m³/j. Au terme de cette période, la puissance varie mensuellement selon les données du Tableau 4. ΔT reste fixé à 6 °C, le débit variant de mois en mois pour correspondre à la puissance voulue. Une liberté a été prise par rapport au scénario E : durant les mois de juillet et août, les faibles puissances impliquent des débits si bas que le caloporteur a le temps de s'équilibrer avec la température du terrain même dans le tube de remontée. En conséquence, c'est paradoxalement durant ces mois que la température en tête de sonde est la plus basse. En pratique, cela est évité en faisant fonctionner les circuits à plus fort débit mais seulement une partie de la journée. Nos simulations étant menées à fonctionnement constant, nous avons augmenté le prélèvement estival pour éviter ces effets artificiels (minimum 15 m³/jour, soit 4.4 kW). Cela est sans conséquence sur les résultats. Les calculs sont ainsi menés sur 5 années. Les résultats présentés sont donc représentatifs de la 45^{ème} année de fonctionnement. Pour établir une comparaison, le modèle a d'abord considéré les 22 sondes initialement prévues (espacement 40 m), puis par tâtonnement, certaines sondes ont été retirées jusqu'à obtenir la configuration proposée, qui n'en compte plus que 16. Ce sont les 6 sondes situées à l'ouest qui ont été supprimées.

Le résultat est illustré par les champs de température à 600 m de profondeur au 1^{er} janvier de la 45^{ème} année d'exploitation (Fig. 38) et par les profils de température moyens à cette même date (Fig. 39).

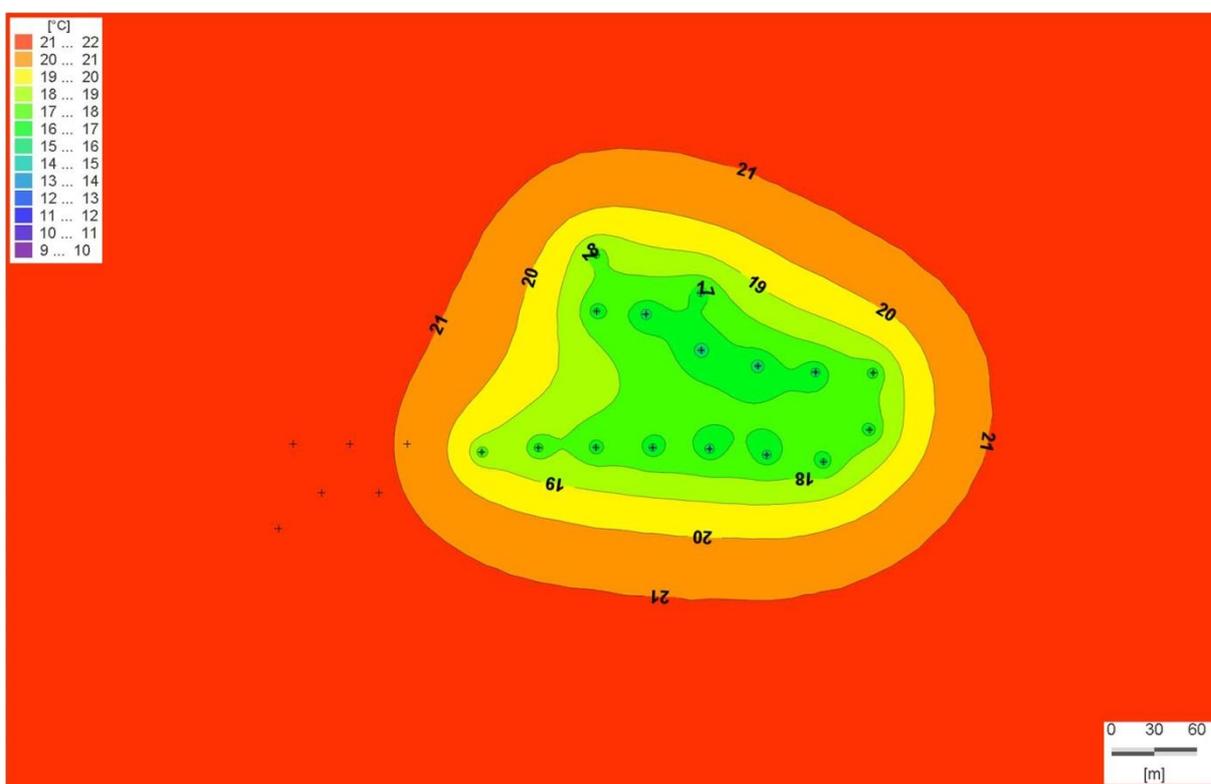


Figure 38 : Température à 600 m de profondeur le 1er janvier de la 45ème année d'exploitation selon le scénario E. Haut : champ de 22 sondes. Bas : champ de 16 sondes.

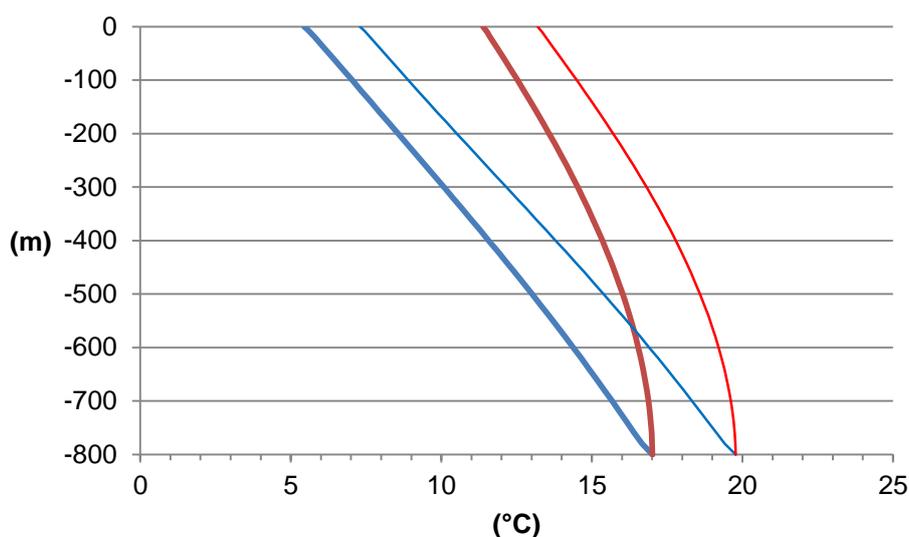


Figure 39 : Profils de température moyens le 1^{er} janvier de la 45^{ème} année d'exploitation selon le scénario E. Rouge : tube de remontée. Bleu : tube de descente. Trait épais : champ de 16 sondes. Trait fin : champ de 22 sondes.

Globalement, le fait de ramener à 16 le nombre de sondes occasionne un refroidissement d'environ 2 °C sur toute la profondeur.

8 Conclusions

- L'espacement de 40 m des sondes est nécessaire pour fournir l'énergie requise pendant 50 ans.
- Avec cet espacement, les scénarios les plus consommateurs en moyenne sur une année (Z et B) ne mènent pas au gel de l'eau réinjectée.
- Cependant, le pic hivernal du cycle annuel de consommation mène près du gel l'eau réinjectée durant les mois d'hiver. Durant cette période, pour un ΔT de 6°C et un débit de 5 m³/h, les PAC ne devraient pas fonctionner plus de la moitié de chaque journée, soit environ 300 MWh en janvier.
- Pour les scénarios dépassant 300 MWh prélevés en janvier, et compte tenu de l'incertitude sur les paramètres, il est probable que ΔT doive être abaissé dès la 40^{ème} année de fonctionnement environ.
- Si pour des raisons techniques l'espacement de 40 m entre sondes est trop contraignant ou pénalise la rentabilité du projet, il est peut-être possible de concevoir un plan à espacement mixte : en surface, les sondes pourraient être espacées variablement entre 30 et 40 m mais celle situées à la périphérie du site pourraient être très légèrement inclinées vers son extérieur (moins de 1°) pour atteindre en profondeur l'espacement de 40 m.
- La durée de vie du champ de sondes est surtout conditionnée par le risque de gel en surface. Or, l'utilisation d'un matériau plus isolant pour fabriquer le coaxial de remontée

permet d'augmenter la température en surface d'environ 2°C pour les paramètres envisagés.

- Il apparaît donc que l'emploi d'un matériau plus isolant pour le tube de remontée est un avantage significatif, qui peut être mis à profit soit pour augmenter la durée de vie des sondes soit pour en diminuer le nombre.
- En combinant les avantages d'un tube de remontée isolant et d'un scénario de consommation plus économe (scénario E), il est possible de ramener de 22 à 16 le nombre de sondes sans, en moyenne, entrer dans la zone de risque de gel en surface.
- Cependant, ces derniers calculs ont été menés en considérant un fonctionnement mensuel moyen continu. En pratique, les sondes fonctionneront seulement une partie de la journée, impliquant des refroidissements temporairement plus élevés que ceux calculés. C'est pourquoi il nous semble préférable de préserver dans le calcul une température d'au moins 5°C en surface.
- Pour cette raison aussi, une isolation complète des premiers mètres de sonde (tube extérieur) diminuerait le risque de gel hivernal.
- Le détail de la chronique quotidienne d'utilisation des sondes n'est pas abordé en détail dans cette étude. Il nous semble important de rechercher un optimum permettant d'éviter le gel ponctuel en surface tout en minimisant les durées quotidiennes de fonctionnement.
- Ces calculs ont été menés en considérant qu'il n'y a pas de circulation d'eau souterraine. Si une telle circulation existait, les sondes situées face à l'amont de ce flux en bénéficieraient tandis que celles situées en aval seraient pénalisées par la plume de froid propagée par les premières.

LE 5 SEPTEMBRE 2016



TERREPLUS SÀRL
DR LAURENT TACHER

9 Références

de Marsily G., 1981. Quantitative hydrogeology. Academic press. 440 p. ISBN 0-12-208916-2

FEFLOW Reference Manual, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, 2010, DHI – Wasy.

Leu et al.,1999 : Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich bis 500 m) Federal Office for Energy (OFEN)

Schärli and Rybach, 2001 : Determination of specific heat capacity on rock fragments. Geothermics 30 (2001) pp 93-110

Swiss Engineering, novembre 2015, pp 17-19

Swisstopo : Carte géothermique de la Suisse 1:500000 (Office fédéral de topographie swisstopo, SGPK) (<https://map.geo.admin.ch>)

10 **Annexes**

10.1 Annexe 1 : Modèle mathématique

L'équation de conservation de masse pour la phase fluide est

$$\frac{\partial(\phi\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho\mathbf{q} = 0 \quad (1)$$

où ϕ [-] est la porosité du milieu, ρ [kg/m³] est la densité du fluide et \mathbf{q} [m/s] est le vecteur flux. Ce dernier obéit à la loi de Darcy

$$\mathbf{q} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu}(\nabla p + \rho\mathbf{g}) \quad (2)$$

où \mathbf{k} [m²] est le tenseur de perméabilité du milieu, μ [kg.m⁻¹.s⁻¹] la viscosité dynamique du fluide, p [N/m²] la pression de pore et $\mathbf{g} = g\nabla z$ [m/s²] le vecteur accélération de la pesanteur. Dans le cas d'un transport couplé d'eau et de chaleur, la densité et la viscosité du fluide peuvent varier avec la température T selon les lois constitutives appropriées $\rho = \rho(T)$ and $\mu = \mu(T)$. Cette possibilité n'est pas utilisée ici vu les relativement faibles variations de température de l'eau (+/- 5°C).

Les équations (1) et (2) peuvent être développées pour obtenir une équation décrivant le flux hydraulique en termes de pression de pore. Cependant, afin d'utiliser les paramètres hydrogéologiques conventionnels tels que conductivité hydraulique et emmagasinement spécifique, une formulation équivalente, en termes de potentiel hydraulique, est adoptée. En introduisant une température arbitraire T_0 , à laquelle $\rho_0 = \rho(T_0)$ et $\mu_0 = \mu(T_0)$, la loi de Darcy dans l'équation (2) s'écrit

$$\mathbf{q} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu_0} \frac{\rho_0 g}{\mu} \left(\nabla \frac{p}{\rho_0 g} + \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z \right) = -\mathbf{K}_0 \frac{\mu_0}{\mu} \left(\nabla H_0 + \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} \nabla z \right) \quad (3)$$

où $\mathbf{K}_0 = \mathbf{k}\rho_0 g/\mu_0$ [m/s] est le tenseur de conductivité hydraulique à $T = T_0$, et $H_0 = p/\rho_0 g + z$ [m] est un potentiel hydraulique fictif aussi référencé à T_0 .

Une manipulation similaire est effectuée dans le but d'introduire H_0 et l'emmagasinement spécifique (compressibilité) du milieu S_0 [1/m] dans l'équation de conservation de la masse (1). On obtient finalement

$$S_0 \frac{\partial H_0}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left(\phi \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{q} \cdot \nabla T \right) \quad (4)$$

où S_0 inclue à la fois les compressibilités du fluide et du squelette rocheux.

Lorsque le transport de chaleur est dominé par advection et dispersion forcées (pas de convection naturelle), il est admissible d'utiliser l'approximation de Boussinesq, qui consiste à annuler le terme de droite de l'équation (4). Cela signifie qu'à l'exception du terme de poussée d'Archimède dans l'équation (3), la densité de l'eau ne dépend pas de la température. La dépendance de la viscosité à la température est aussi négligée, ce qui allège considérablement les calculs. L'approximation de Boussinesq est utilisée lorsque les gradients hydrauliques sont très forts, tels que dans les régions de montagne ou lorsque les gradients de température sont faibles. Dans le cadre de cette étude, les pompes à chaleur simulées prélevant un ΔT de quelques degrés, l'approximation de Boussinesq est utilisée.

L'équation de conservation pour le transport advectif-dispersif-diffusif d'énergie thermique est

$$\left[\phi(\rho c)_l + (1-\phi)(\rho c)_s \right] \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_l \mathbf{q} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\phi \Lambda_l + (1-\phi) \lambda_s \mathbf{I}) \nabla T \quad (5)$$

où $(\rho c)_l$ et $(\rho c)_s$ sont les capacités thermiques volumiques [$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$] des phases liquide and solide respectivement. Dans l'équation ci-dessus, $\lambda_s \mathbf{I}$ [$\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$] est le tenseur de conduction thermique du solide (supposé isotrope) et Λ_l [$\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$] est le tenseur de dispersion hydrodynamique thermique du fluide, défini par

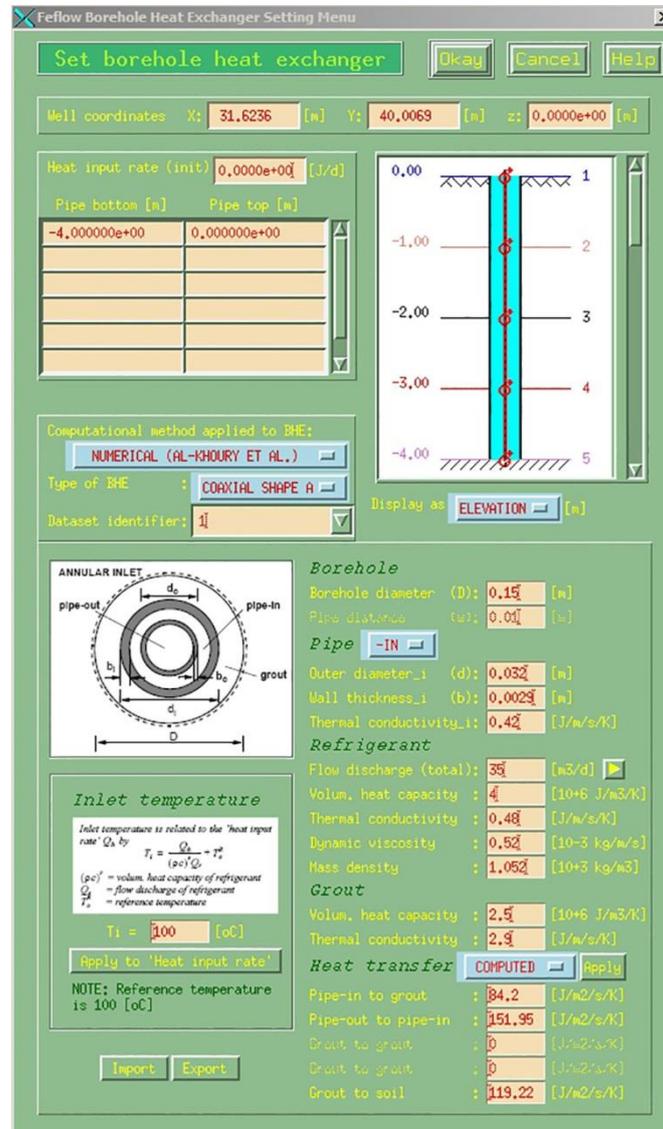
$$\Lambda_l = (\rho c)_l \left((\alpha_L - \alpha_T) \frac{\mathbf{v} \otimes \mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} + \alpha_T \|\mathbf{v}\| \mathbf{I} \right) + \lambda_l \mathbf{I} \quad (6)$$

où α_L et α_T [m] sont les coefficients de dispersivité longitudinale et transversale, λ_l la conductivité thermique du fluide, $\mathbf{v} = \mathbf{q}/\phi$ le vecteur vitesse de pore et \mathbf{I} la matrice identité.

Les équations (3), (5) et (6) sont résolues simultanément pour les conditions initiales ($H_0(x, y, z, 0)$, $T(x, y, z, 0)$) et aux limites spécifiées.

Ces principes sont implémentés dans le logiciel de simulation numérique des écoulements souterrains Feflow© v6.0 (Wasy AG, Berlin), avec lequel tous les modèles présentés ici ont été réalisés. Les équations de conservation sont résolues sur un domaine 3D d'éléments finis.

10.2 Annexe 2 : Interface du module sonde de Feflow ®



Interface de Feflow v6.0 pour les sondes coaxiales