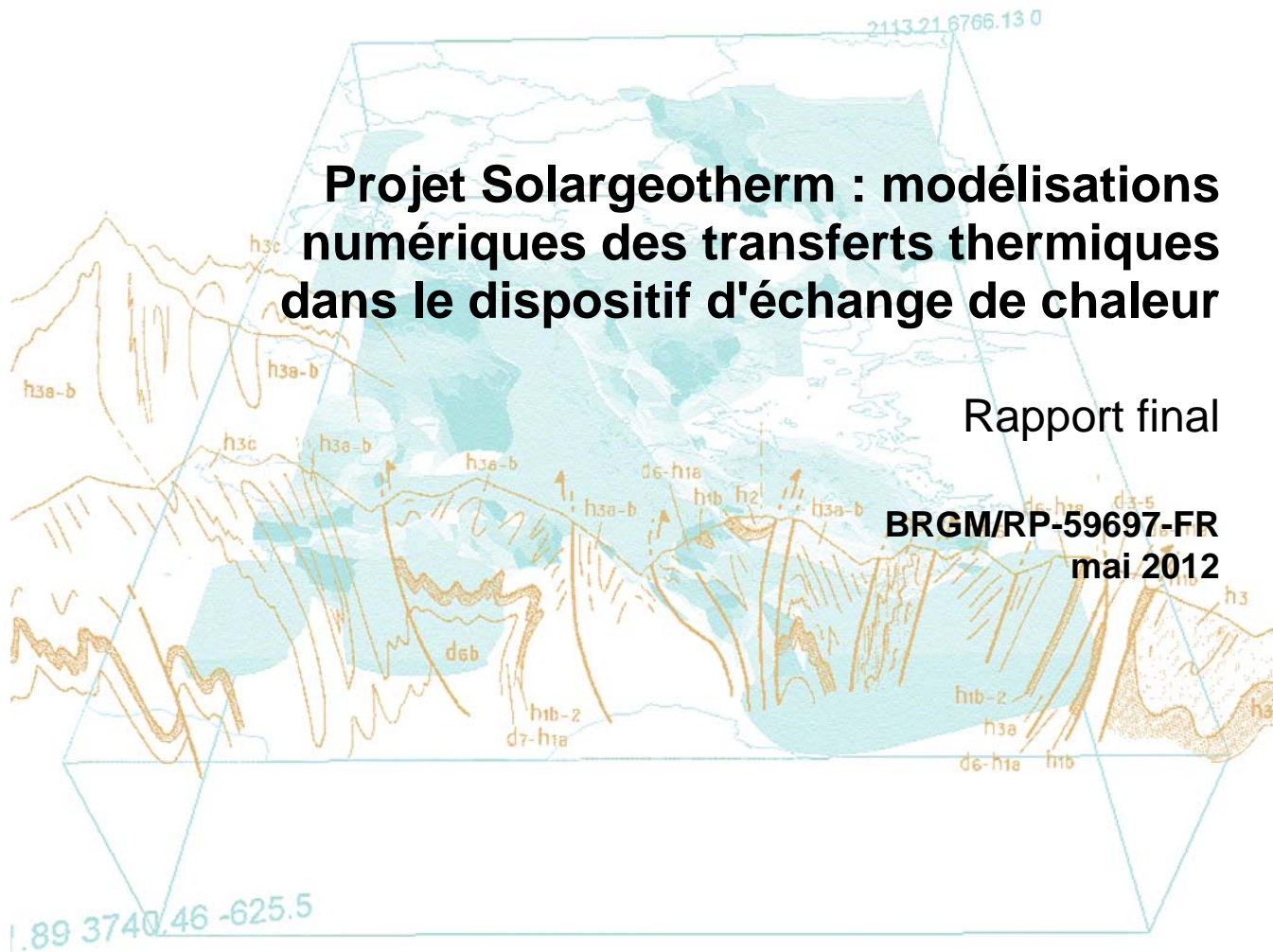


document public



# Projet Solargeotherm : modélisations numériques des transferts thermiques dans le dispositif d'échange de chaleur

Rapport final

BRGM/RP-59697-FR  
mai 2012

Agence Nationale de la Recherche  
**ANR**





document public

# **Projet Solargeotherm : modélisations numériques des transferts thermiques dans le dispositif d'échange de chaleur**

Rapport final

**BRGM/RP-59697-FR  
mai 2012**

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche  
Solargeotherm cofinancé par l' ANR - Programme Stock-E 2008

**D. Nguyen, S. Lanini**

Vérifié par : X. Rachez

Approuvé par : M. Audibert

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000

**Mots clés** : modélisation, stockage, énergie thermique, massif rocheux, géothermie, sonde géothermique, Comsol, Marthe

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Nguyen D., Lanini S.** (2012) – Projet Solargeotherm : modélisations numériques des transferts thermiques dans le dispositif souterrain d'échange de chaleur – BRGM/RP-59697-FR, 91 p., 63 ill., 5 ann., dont ann. 5 sur DVD

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Le projet de recherche Solargeotherm vise à évaluer la possibilité de stocker et de déstocker dans un massif rocheux, par l'intermédiaire de sondes géothermiques, l'énergie produite par une installation solaire. Le projet de recherche s'appuie à la fois sur la mise en œuvre d'un dispositif expérimental et sur l'exploitation de modèles de transferts thermiques. Dans ce cadre, un travail de modélisation du comportement thermique du massif et des échanges sonde-massif a été entrepris. Ce rapport présente le travail de modélisation réalisé par le BRGM ciblé d'une part sur la sonde géothermique double-U et les transferts conductifs aux interfaces sonde – coulis de bentonite – massif rocheux, et d'autre part sur l'évolution du champ de températures dans la formation schisteuse au cours de cycles annuels successifs d'injection de chaleur.

Deux outils de simulation numérique ont été mis en œuvre : Comsol Multiphysics (simulation numérique par éléments finis) & Marthe (simulation numérique par volumes finis). L'association des deux modélisations Comsol et Marthe vise à obtenir une bonne représentation numérique, à différentes échelles géométriques et de durée de temps, du principe de stockage-déstockage de chaleur dans un massif rocheux en sous-sol.

La modélisation 3D d'une sonde géothermique réalisée à l'aide du logiciel Comsol a été calibrée et validée grâce aux résultats expérimentaux acquis à l'occasion d'un essai de choc thermique distribué effectué en juillet 2009. Lors de la simulation de ce test expérimental, une précision remarquable a pu être atteinte sur les évolutions spatio-temporelles de la température au regard des phénomènes modélisés à caractère particulièrement transitoire. Seule la partie superficielle du dispositif, entre 0 et 10 m de profondeur, n'a pu être correctement modélisée. L'évaluation de la quantité d'énergie stockée dans les différents volumes du dispositif modélisé (tube, coulis de colmatage, roche, eau statique) montre que pendant la période d'injection, l'énergie est principalement stockée dans le coulis de colmatage.

Parallèlement, les transferts thermiques transitoires dans un massif schisteux de 400 m<sup>2</sup> et 200 mètres d'épaisseur présentant un niveau hydrostatique constant ont été modélisés à l'aide du logiciel Marthe. Les données recueillies sur le site expérimental de Montauriol ont permis de calibrer ce modèle, avec une précision satisfaisante en dehors des quinze premiers mètres de profondeur trop influencés par la condition limite appliquée sur la partie supérieure du domaine. A cette restriction près, le modèle aux volumes finis a permis de simuler l'injection de chaleur dans un dispositif simplifié mais proche de celui du site de Montauriol. Dans un premier temps, la totalité de la puissance est injectée dans une sonde unique. Le système a atteint un régime stationnaire en une année, avec une augmentation de température de 3 à 4°C dans un rayon de 1,5 m autour de la sonde, pour un rayon d'influence de l'ordre de 4,5 m. Aucun gradient vertical n'a été observé. Dans un second temps, la même puissance est répartie sur les trois sondes du dispositif modélisé. Les niveaux de température atteints au bout d'un an sont inférieurs d'environ 1°C par rapport au cas précédent. Le rayon d'influence du dispositif est quant à lui de l'ordre de 5 m.

Un calcul particulier a par ailleurs été conduit afin de déterminer la géométrie d'un géostockage thermique diffusif constitué par un champ de sondes géothermiques verticales pour que le dispositif puisse minimiser les pertes thermiques par diffusion dans le massif rocheux encaissant. Dans l'hypothèse où l'on peut isoler thermiquement la surface supérieure du géostockage, ce qui est généralement possible puisqu'il s'agit de la surface supérieure du dispositif en contact avec l'atmosphère, le volume qui minimise les pertes thermiques par diffusion dans le massif encaissant hors aquifère est un cylindre dont la hauteur est égale au rayon.

On évalue le temps caractéristique de stockage d'une sonde unique du dispositif expérimental par rapport au géostockage optimal. Le temps caractéristique de la sonde unique de 180 m de profondeur est de 13% du temps caractéristique d'un géostockage optimal. En d'autres termes, la sonde unique du dispositif expérimental Solargeotherm perdra (diffusera) huit fois plus rapidement la chaleur stockée qu'un dispositif à géométrie optimale. Un géostockage de chaleur intersaisonnier n'est pas praticable pour des dispositifs comportant une ou quelques sondes géothermiques. L'allongement de ces dispositifs est trop défavorable et la dissipation de chaleur dans le massif encaissant trop rapide par rapport à la chaleur contenue pour pouvoir compter sur une chaleur stockée pendant des périodes de plusieurs mois. Lorsque cependant le dispositif de géostockage s'approche d'une géométrie optimale, les pertes thermiques par diffusion dans le massif encaissant diminuent très rapidement et des délais de stockage thermique plurimensuels apparaissent envisageables.

Le projet Solargeotherm s'inscrit dans le programme de recherche Stock-E (Stockage innovant de l'énergie) de l'Agence nationale de la recherche ANR. Les quatre partenaires du projet sont le BRGM (SGR/LRO - Montpellier), le laboratoire ELIAUS (Université de Perpignan UPVD), Dominguez-Energie SARL (Argelès-sur-Mer), et le laboratoire PROMES (UPR CNRS 8521 - Perpignan). Les partenaires du projet Solargeotherm bénéficient d'une aide financière de l'ANR variant de 30% à 75% de leur part de dépenses dans le projet. Le coût total du projet Solargeotherm est de 1 M€ HT. Le projet est labellisé par le pôle de compétitivité DERBI.



## Sommaire

<b>1. Contexte des modélisations numériques.....</b>	<b>11</b>
1.1. Description du dispositif expérimental.....	11
1.2. Motivation des travaux de modélisation .....	12
1.3. Références antérieures.....	13
1.4. Fiche d'identité du projet Solargeotherm.....	14
<b>2. Modélisation numérique Comsol.....</b>	<b>15</b>
2.1. Objectif de la modélisation Comsol.....	15
2.2. Choc thermique expérimental .....	15
2.3. Modèle physique de la sonde géothermique.....	18
2.4. Propriétés thermophysiques des matériaux .....	22
2.5. Conditions aux limites du problème thermique.....	23
2.6. Modèle géométrique et maillage .....	24
2.7. Déroulement méthodologique .....	26
2.8. Outil de modélisation .....	26
2.9. Points d'exploitation des calculs de température du modèle .....	27
<b>3. Résultats interprétés de la simulation Comsol.....</b>	<b>29</b>
3.1. Evaluation globale des résultats de la simulation.....	29
3.2. Température de sortie du fluide caloporteur.....	30
3.3. Influence du matériau polyéthylène des tubes .....	30
3.4. Influence de la boucle passive de la sonde double-U.....	31
3.5. Influence de la conductivité thermique de la roche encaissante.....	31
3.6. Influence de la mousse de polyuréthane.....	32
3.7. Bilan d'énergie global du choc thermique.....	33
<b>4. Modélisation numérique Marthe .....</b>	<b>35</b>
4.1. Outil de la modélisation numérique .....	35
4.2. Géométrie et discrétisation spatiale du modèle.....	35
4.3. Conditions aux limites .....	37
4.4. Condition thermique initiale.....	37

4.5.	Propriétés thermo-physiques du système .....	37
4.6.	Discrétisation temporelle .....	38
4.7.	Données d'entrée du modèle .....	38
4.8.	Calage du modèle Marthe .....	40
<b>5.</b>	<b>Résultats interprétés de la simulation Marthe .....</b>	<b>43</b>
5.1.	Simulation de l'injection de chaleur sur une sonde unique .....	43
5.2.	Simulation de l'injection de chaleur sur les trois sondes .....	46
5.3.	Synthèse des résultats des simulations Marthe.....	49
5.4.	Limites de la modélisation Marthe .....	49
<b>6.</b>	<b>Géométrie d'un champ de sondes pour un géostockage thermique diffusif .....</b>	<b>51</b>
6.1.	Volume optimal d'un géostockage diffusif .....	51
6.2.	Performances d'un géostockage diffusif optimal .....	53
6.3.	Faisabilité du stockage de chaleur intersaisonnier .....	57
<b>7.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>59</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>61</b>

## **Liste des illustrations**

Illustration 1 – Vue d'ensemble du dispositif des sondes géothermiques .....	11
Illustration 2 – Vue en plan de l'implantation des sondes géothermiques.....	12
Illustration 3 – Fiche d'identité du projet de recherche ANR Solargeotherm .....	14
Illustration 4 – Conditions expérimentales du choc thermique de juil.-09.....	16
Illustration 5 – Evolution des températures lors du choc thermique .....	17
Illustration 6 – Ajustement analytique de la partie de la relaxation .....	18
Illustration 7 – Rapport de la surface d'échange et le volume fluide .....	20
Illustration 8 – Température initiale dans le massif rocheux .....	21
Illustration 9 – Propriétés physiques des matériaux mis en œuvre .....	22
Illustration 10 – Conductivité thermique de la roche en fonction de la profondeur .....	23
Illustration 11 – Coupe verticale schématique d'un forage d'injection de chaleur .....	25
Illustration 12 – Etat de la tête d'un forage d'injection de chaleur .....	25



Illustration 13 – Discrétisation en éléments finis (coupe du forage) .....	26
Illustration 14 – Dimensions du maillage du modèle .....	26
Illustration 15 – Points d'exploitation A & B des températures calculées .....	27
Illustration 16 – Températures entre points d'exploitation A & B pour différentes positions dans le forage .....	28
Illustration 17 – Température du fluide à la sortie du forage.....	30
Illustration 18 – Simulation sans prise en compte du polyéthylène des tubes vs. données expérimentales .....	31
Illustration 19 – Evolution des températures au cours du temps pour trois conditions de conductivité thermique du massif .....	32
Illustration 20 – Evolution de l'énergie stockée en fonction du temps.....	33
Illustration 21 – Répartition de l'énergie stockée (transférée) dans les différents matériaux .....	33
Illustration 22 – Evolution de l'énergie stockée et injectée en fonction du temps.....	34
Illustration 23 – Maillage du modèle Marthe – vue de dessus .....	36
Illustration 24 – Maillage du modèle Marthe – vue en coupe verticale.....	36
Illustration 25 – Variation journalière de la puissance injectée (31 juil.-10).....	39
Illustration 26 – Puissance thermique mensuelle injectée dans le massif rocheux .....	40
Illustration 27 – Températures expérimentales et simulées à la sonde géothermique C - mai 2010 à mai 2011 .....	41
Illustration 28 – Température du massif rocheux à différentes profondeurs lors de la simulation longue durée avec injection dans une sonde unique (point d'observation n°2) .....	44
Illustration 29 – Variation de température dans le massif après un an d'injection de chaleur dans une sonde unique .....	45
Illustration 30 – Température du massif rocheux à différentes profondeurs lors de la simulation longue durée avec injection dans les 3 sondes (point d'observation n°2).....	47
Illustration 31 – Variation de température dans le massif après un an d'injection de chaleur dans les 3 sondes .....	48
Illustration 32 – Schéma d'un volume de géostockage thermique .....	51
Illustration 33 – Flux de chaleur dissipé par un volume de stockage cylindrique .....	52
Illustration 34 – Schéma du milieu semi-infini plan avec température de surface imposée .....	54
Illustration 35 – Temps caractéristique d'un géostockage thermique diffusif .....	56
Illustration 36 – Déperdition thermique expérimentale suite à l'arrêt de l'injection de chaleur dans la sonde géothermique .....	57

Illustration 37 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux 3 W/m.K.....	67
Illustration 38 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux 3,13 W/m.K.....	67
Illustration 39 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux 3,26 W/m.K.....	68
Illustration 40 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux 3,39 W/m.K.....	68
Illustration 41 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux 3,52 W/m.K.....	69
Illustration 42 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux variable fonction de la profondeur (t : 0 à 20000 s) .....	69
Illustration 43 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux variable en fonction de la profondeur (t : 0 à 4000 s) .....	70
Illustration 44 – Simulation Comsol : distribution spatiale des températures à t = 960 s .....	71
Illustration 45 – Simulation Comsol : distribution spatiale des températures à t = 3000 s .....	71
Illustration 46 – Simulation Comsol : distribution spatiale des températures à t = 6000 s .....	72
Illustration 47 – Simulation Comsol : distribution spatiale des températures à t = 12000 s .....	72
Illustration 48 – Températures moyennes sur 2 ou 4 mesures disponibles pour la sonde géothermique B .....	75
Illustration 49 – Correspondance entre la coordonnée curviligne le long de la fibre optique et la profondeur .....	76
Illustration 50 – Distributions de température imposées comme condition initiale lors des simulations Marthe.....	76
Illustration 51 – Température au sol fournie par le capteur C4 en sortie du champ solaire .....	77
Illustration 52 – Température de l'air utilisée pour définir la condition limite (station de Caixas).....	77
Illustration 53 – Irradiation globale mensuelle à Perpignan .....	78
Illustration 54 – Conductivité thermique expérimentale et calée du massif rocheux ....	78
Illustration 55 – Evolution de la température du massif rocheux à différentes profondeurs lors de la simulation longue durée avec injection dans une sonde unique (points d'observation n°1 et 3).....	82
Illustration 56 – Variation de température dans le massif après six mois d'injection dans une sonde unique .....	83

Illustration 57 – Variation de température dans le massif après six ans d'injection dans une sonde unique.....	84
Illustration 58 – Variation de température dans le massif après douze ans d'injection dans une sonde unique .....	85
Illustration 59 – Evolution de la température du massif rocheux à différentes profondeurs lors de la simulation longue durée avec injection dans les 3 sondes (points d'observation n° 1 & 3) .....	87
Illustration 60 – Variation de température dans le massif après six mois d'injection de chaleur dans les trois sondes.....	88
Illustration 61 – Variation de température dans le massif après six ans d'injection de chaleur dans les trois sondes.....	89
Illustration 62 – Variation de température dans le massif après douze ans d'injection de chaleur dans les trois sondes .....	90
Illustration 63 – Contenu du cédérom joint en annexe du rapport d'étude.....	91

### **Liste des annexes**

<b>Annexe 1</b> Fiche de synthèse du projet Solargeotherm .....	63
<b>Annexe 2</b> Résultats des simulations Comsol .....	65
<b>Annexe 3</b> Données d'entrée du modèle numérique Marthe.....	73
<b>Annexe 4</b> Résultats des simulations Marthe.....	79
<b>Annexe 5</b> Données numériques.....	91



# 1. Contexte des modélisations numériques

Le projet Solargeotherm cofinancé par l'ANR vise à évaluer la possibilité de stocker et de déstocker dans un massif rocheux, par l'intermédiaire de sondes géothermiques, l'énergie produite par une installation solaire. Le projet de recherche s'appuie à la fois sur la mise en œuvre d'un dispositif expérimental et sur l'exploitation de modèles de transferts thermiques.

## 1.1. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le site expérimental du projet Solargeotherm<sup>1</sup> a été implanté sur une formation géologique homogène (schistes du Paléozoïque), en dehors de tout aquifère ou de circulation d'eau dans des fractures. Le site d'étude, localisé à Montauriol (Pyrénées-Orientales) est équipé de trois sondes géothermiques verticales double-U de 160 à 180 mètres de profondeur réalisées à proximité l'une de l'autre (Illustration 1 & Illustration 2), de 42 m<sup>2</sup> de capteurs solaires thermiques et d'un aérotherme faisant fonction de dispositif de dissipation thermique. Une fibre optique destinée aux mesures de température par équipement Sensornet Oryx-DTS (Distributed Temperature Sensing) instrumente les sondes géothermiques sur toute leur longueur, et permet une mesure de température tous les mètres le long de ces sondes, avec un pas de temps paramétrable. Une étude géologique détaillée du massif rocheux a été menée par diagrapies des forages et géophysique de surface (Rap. BRGM/RP-57281-FR). Les paramètres thermophysiques du sous-sol ont été étudiés par analyses de prélèvements d'échantillons de forage, tests de réponse thermique (TRT), et par la réalisation d'un choc thermique distribué sur un des trois forages principaux d'injection de chaleur (Rap. BRGM/RP-59271-FR).

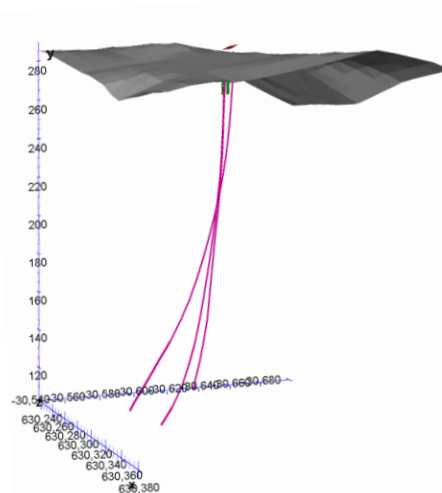


Illustration 1 – Vue d'ensemble du dispositif des sondes géothermiques

<sup>1</sup> Fiche de synthèse du projet de recherche Solargeotherm en Annexe 1.

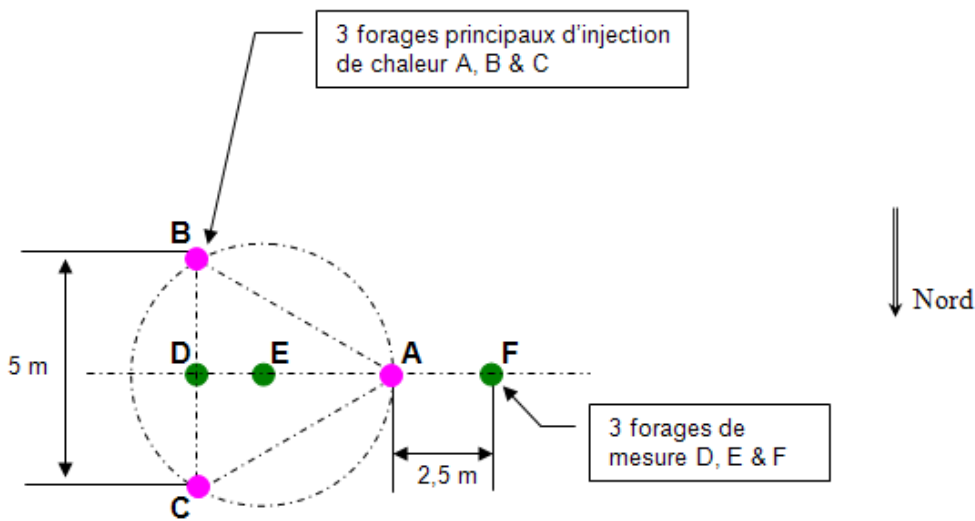


Illustration 2 – Vue en plan de l'implantation des sondes géothermiques

## 1.2. MOTIVATION DES TRAVAUX DE MODELISATION

Une des tâches principales du projet Solargeotherm est dédiée à la modélisation du comportement thermique du massif et des échanges sonde-massif. On a souhaité réaliser une modélisation numérique détaillée du dispositif expérimental sous-sol du projet afin de compléter l'étude du comportement d'un massif rocheux au stockage & déstockage de chaleur. Cette modélisation numérique permettra une liberté dans la simulation ultérieure de plans d'expérience associés au dispositif expérimental Solargeotherm. Elle rend également possible l'investigation de conditions d'injection de chaleur qui ne seraient pas assurées par le dispositif expérimental mis en place (températures & puissance d'injection élevées, cinétiques particulières pour le stockage & le soutirage de chaleur, etc.).

Deux outils de simulation numérique ont été mis en œuvre : Comsol Multiphysics (simulation numérique par éléments finis) & Marthe (simulation numérique par volumes finis). L'association des deux modélisations Comsol et Marthe vise à obtenir une bonne représentation numérique, à différentes échelles géométriques et de durée de temps, du principe de stockage-déstockage de chaleur dans un massif rocheux en sous-sol.

### 1.2.1. Modélisation Comsol

Comsol est utilisé pour modéliser de façon détaillée la sonde B, en prenant en compte la géométrie du forage et des différents composants de la sonde géothermique, les paramètres thermophysiques des différents matériaux en relation avec l'ouvrage (massif rocheux, coulis de colmatage du forage, polyéthylène des tubes double-U de la sonde, fluide caloporteur, etc.) et leurs interactions thermiques. La modélisation Comsol d'une sonde géothermique du dispositif du site expérimental Solargeotherm a comme objectif premier de disposer d'un modèle numérique 3D à même de fournir,

avec une résolution métrique, la distribution spatio-temporelle de la température en fonction des paramètres thermo-physiques stratifiés (i.e. variant avec la profondeur) simulés des terrains traversés.

Le modèle numérique 3D permet également une simulation vraisemblable de plans d'expérience de stockage ou soutirage de chaleur dans un massif rocheux. Il permet ainsi une bonne compréhension des phénomènes de transfert de chaleur en sous-sol. Il autorise notamment l'exploration de conditions limites d'utilisation d'un échangeur de chaleur en sous-sol en matière de température de fonctionnement ou de puissance.

### **1.2.2. Modélisation Marthe**

Marthe prend en compte un dispositif expérimental complet mais simplifié de telle sorte que les sondes géothermiques verticales soient toutes les trois de 200 m, avec comme objectif d'investiguer des durées pluriannuelles de fonctionnement du dispositif sous-sol global.

## **1.3. REFERENCES ANTERIEURES**

PROMES, partenaire du projet, a proposé une modélisation analytique monodimensionnelle transitoire des transferts conductifs de chaleur dans le massif rocheux (De-laleux et al., 2012). Elle suppose que le milieu poreux est homogène, et que l'échangeur thermique vertical peut être considéré comme une source de chaleur auquel correspond un coefficient de transfert thermique global représentant le système eau circulante (dans la sonde géothermique) – tube en PEHD – coulis de cimentation du forage (bentonite) - massif rocheux. Ce modèle, calibré à partir des données expérimentales, a ensuite été étendu en 2D multicouches. Développé sous Comsol, il a pour vocation à être couplé avec les simulateurs de charge (modèle de fonctionnement énergétique des panneaux solaires thermiques) et de décharge (modèle de comportement énergétique d'une habitation individuelle) également mis en place dans le cadre du projet Solargeotherm d'optimiser le rythme de stockage/déstockage de l'énergie en fonction de différents paramètres globaux (demande énergétique, propriétés thermiques macroscopiques du massif rocheux, climat, etc.). En revanche, elle est trop globale pour permettre d'étudier dans le détail les performances des échangeurs thermiques enterrés en prenant en compte de façon plus réaliste à la fois la complexité du sous-sol (hétérogénéité des propriétés physiques et thermiques, présence d'écoulements souterrains, d'une zone non saturée, etc.) et la complexité des transferts thermiques convectifs dans la sonde géothermique et conductifs aux interfaces fluide caloporteur – sonde et sonde – milieu encaissant. Les modélisations du présent travail visent à poursuivre & compléter l'approche PROMES par des travaux mettant en œuvre des approches déterministes et une résolution numérique des équations décrivant le système du géostockage thermique diffusif.

#### 1.4. FICHE D'IDENTITE DU PROJET SOLARGEOTHERM

Le projet Solargeotherm s'inscrit dans le programme de recherche Stock-E (Stockage innovant de l'énergie) de l'Agence nationale de la recherche ANR (Illustration 3). Les quatre partenaires du projet sont le BRGM (SGR/LRO - Montpellier), le laboratoire ELIAUS (Université de Perpignan UPVD), Dominguez-Energie SARL (Argelès-sur-Mer), et le laboratoire PROMES (UPR CNRS 8521 - Perpignan).

Les partenaires du projet Solargeotherm bénéficient d'une aide financière de l'ANR variant de 30% à 75% de leur part de dépenses dans le projet. Le coût total du projet Solargeotherm est de 1 M€ HT. Le projet est labellisé par le pôle de compétitivité DERBI.

Programme ANR	Stock-E - Stockage innovant de l'énergie (2008)
Axe thématique	2. Stockage de l'énergie thermique - Sous-thème : 2.1. Chaleur sensible
Catégorie R&D	Recherche industrielle
N° de dossier	ANR-08-STOCK-E-08-01
Acronyme	Solargeotherm
Titre	Stockage et déstockage supervisés dans un massif rocheux de l'énergie thermique produite par une installation solaire
Mots-clés	stockage ; énergie thermique ; énergie solaire ; massif rocheux ; réservoir géologique ; roche sèche ; géothermie ; sonde géothermique ; plans d'expérience ; modélisation

*Illustration 3 – Fiche d'identité du projet de recherche ANR Solargeotherm*



## 2. Modélisation numérique Comsol

Comsol Multiphysics (ver. 4.1) est utilisé pour modéliser de façon détaillée la sonde B, en prenant en compte la géométrie du forage et des différents composants de la sonde géothermique, les paramètres thermophysiques des différents matériaux en relation avec l'ouvrage (massif rocheux, coulis de colmatage du forage, polyéthylène des tubes double-U de la sonde, fluide caloporteur, etc.) et leurs interactions thermiques. Le modèle numérique Comsol est contraint par les résultats expérimentaux du choc thermique réalisé en juil.-09 sur la sonde B.

### 2.1. OBJECTIF DE LA MODELISATION COMSOL

La modélisation Comsol<sup>2</sup> d'une sonde géothermique du dispositif du site expérimental Solargeotherm a comme objectif de disposer d'un modèle numérique 3D à même de fournir, avec une résolution métrique, la distribution spatio-temporelle de la température en fonction des paramètres thermo-physiques stratifiés (i.e. variant avec la profondeur) simulés des terrains traversés. Le modèle numérique Comsol 3D permet également une simulation vraisemblable de plans d'expérience de stockage ou soutirage de chaleur dans un massif rocheux. Il permet ainsi une bonne compréhension des phénomènes de transfert de chaleur en sous-sol. Il autorise notamment l'exploration de conditions limites d'utilisation d'un échangeur de chaleur en sous-sol en matière de température de fonctionnement ou de puissance. On ne modélise pas le dispositif expérimental complet (i.e. les trois forages d'injection A, B & C - Illustration 2), mais seulement la sonde B pour laquelle sont disponibles les données expérimentales du choc thermique qui y a été conduit. Ces données expérimentales permettent de contraindre le modèle numérique Comsol<sup>3</sup>.

### 2.2. CHOC THERMIQUE EXPERIMENTAL

Le modèle numérique développé est validé par les résultats expérimentaux acquis à l'occasion d'un essai de choc thermique effectué en juillet 2009. Cet essai a permis de produire les données expérimentales utilisées à contraindre le modèle numérique.

#### 2.2.1. Principe du choc thermique

Un volume d'eau chaude est injecté sur une période courte dans un des tubes de la sonde géothermique double-U du forage B afin de simuler la génération d'un Dirac<sup>4</sup> de puissance. A l'intérieur de la sonde en U, la chaleur se propage essentiellement par convection liée au débit d'eau chaude imposé à l'une des extrémités. Des phénomènes de dispersion et de pont thermique entre les deux branches du U sont également pos-

---

<sup>2</sup> Comsol Multiphysics est un progiciel d'analyse et de simulation par éléments finis de phénomènes multiphysiques mettant en œuvre notamment des systèmes couplés d'équations aux dérivées partielles. Dans le cas de l'étude, Comsol a été utilisé associé au module Heat Transfert.

<sup>3</sup> Construction du modèle Comsol par Iris Technologies (rapport d'étude n° 11\_04\_122).

<sup>4</sup> Signal théorique de durée nulle et d'amplitude infinie.

sibles. En revanche, la chaleur se propage de la sonde géothermique au massif rocheux environnant par conduction.

On suppose qu'il y a équilibre thermique entre la sonde et le terrain environnant, grâce notamment au coulis ThermoCem de cimentation dans le forage destiné à colmater le forage et assurer un bon contact sonde-milieu avec une résistance thermique minimale. La température mesurée à la surface extérieure de la sonde en U par la fibre optique est donc proche de celle du massif rocheux.

La température est mesurée en continu dans tous les forages du dispositif expérimental pendant une durée de 6 jours, afin de suivre la montée en température, puis le refroidissement (relaxation) dans le massif rocheux.

### 2.2.2. Conditions expérimentales

Les paramètres expérimentaux choc thermique (volume d'eau injecté dans la sonde en U, durée et température d'injection) ont été choisis de façon à ce que la puissance thermique injectée lors du choc thermique soit comparable à celle d'un test de réponse thermique (TRT) standard (injection à puissance constante et sur des durées de 10 à 15 jours) habituellement mis en œuvre pour des opérations géothermiques sur sondes géothermiques verticales. L'illustration 4 fournit les conditions expérimentales du choc thermique réalisé en juil.-09.

Paramètres expérimentaux	
Ouvrage	Sonde géothermique B : injection dans une seule boucle de la sonde double-U de 180 m de profondeur, la deuxième boucle remplie d'eau non-circulante.
Durée & date de l'injection	49 minutes, le 09/07/2009, de 11h12 à 12h01.
Volume d'eau injectée	1000 litres exactement, à débit constant dans un tube en U. A l'issue de l'injection de durée 49 minutes, arrêt de la circulation dans le tube en U.
Température de l'eau injectée	70°C
Nombre de points d'acquisition de la température le long de la fibre optique	Au total 3690 points pour l'ensemble des forages et des longueurs de liaison, dont 360 points de mesure dans la sonde géothermique correspondant à un aller / retour de la fibre dans le forage B de 180 m.
Acquisition des mesures de température dans le forage	Toutes les deux minutes pendant 24 h, puis toutes les 30 minutes (soit un total de 1013 acquisitions).
Acquisition des mesures de température extérieure	Toutes les deux minutes pendant la durée de l'injection.
Durée du suivi des températures dans le forage	Environ 6 jours (144 heures 54 minutes).
Température de l'eau mesurée (manuellement) en sortie de sonde	32 à 34°C

Illustration 4 – Conditions expérimentales du choc thermique de juil.-09

### 2.2.3. Résultats expérimentaux

Plus de trois millions de données de température ont été recueillies à l'occasion du choc thermique tout le long du dispositif des sondes géothermiques. L'illustration 5 fournit par exemple l'évolution des températures le long de la sonde pour la branche descendante de la sonde B à plusieurs profondeurs dans le sous-sol.

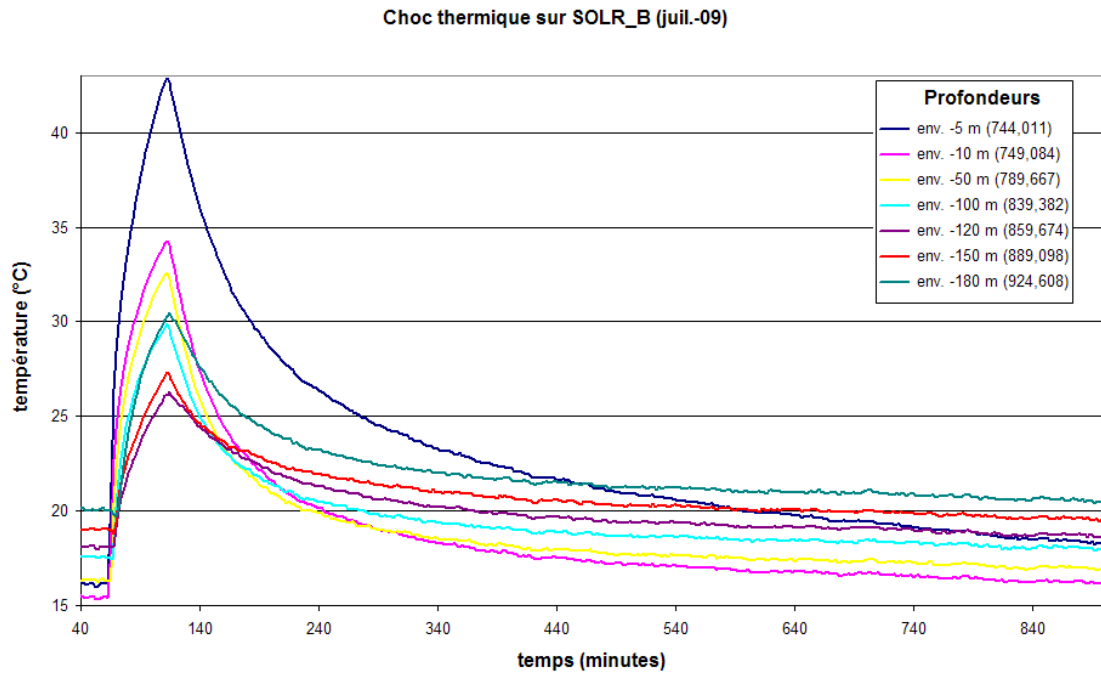


Illustration 5 – Evolution des températures lors du choc thermique

### 2.2.4. Interprétation analytique

#### a) Phase de refroidissement (relaxation)

Un modèle analytique a été établi pour interpréter les résultats expérimentaux pour la seule partie expérimentale de la relaxation (refroidissement). Le modèle analytique y est celui d'une source de chaleur linéique instantanée « 1D – multicouches ». L'exploitation des courbes d'évolution de la température permet d'estimer les propriétés thermiques du massif rocheux (conductivité thermique et capacité calorifique) et leurs variations en fonction de la profondeur. Le profil de conductivité thermique du massif rocheux en fonction de la profondeur a été déterminé avec une résolution décimétrique sur la base du meilleur ajustement sur la partie de la relaxation entre le modèle analytique et les données expérimentales (Illustration 6). Ce profil des propriétés thermophysiques a pu être corrélé avec les observations géophysiques fournies par la diaggraphie du forage (résistivité électrique et imagerie-paroi notamment).

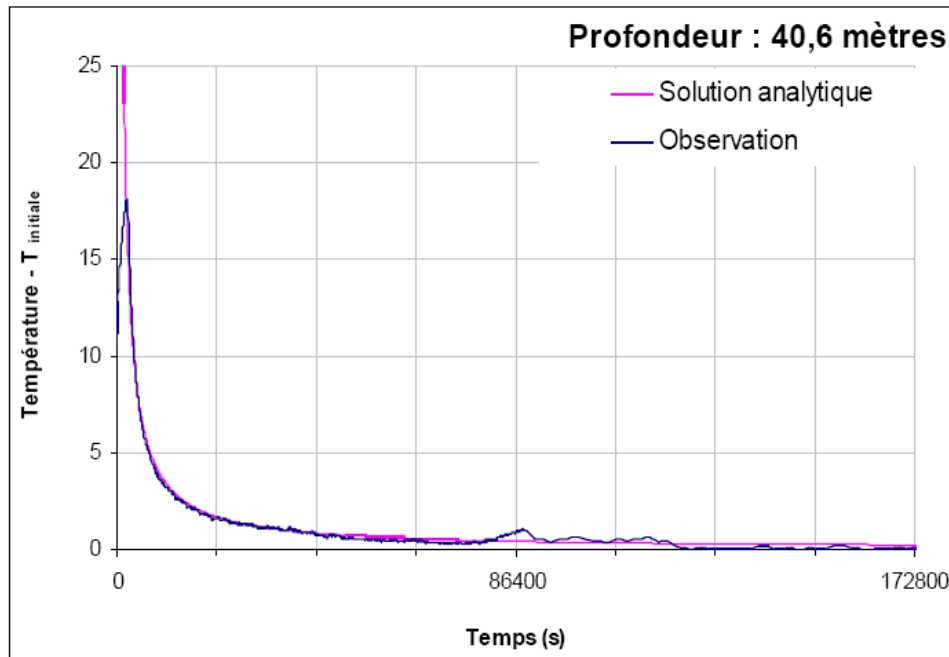


Illustration 6 – Ajustement analytique de la partie de la relaxation

### b) Phase de montée en température (arrivée du choc)

La montée en température correspondant à l'arrivée du choc thermique est complexe, du fait de son caractère transitoire et des interactions thermiques dynamiques entre la branche descendante et la branche montante du tube en U de la sonde. Cette partie de la montée en température n'a pas été approchée analytiquement. La complexité de l'interprétation analytique de l'arrivée du choc thermique (la montée en température) constitue une des motivations principales des travaux de modélisation Comsol.

## 2.3. MODELE PHYSIQUE DE LA SONDE GEOTHERMIQUE

La modélisation numérique porte sur un échangeur géothermique double-U subvertical de 180 mètres de profondeur dans un massif rocheux. L'ensemble à modéliser est constitué des éléments suivants : sonde géothermique, tube de polyéthylène, coulis de scellement, mousse de polyuréthane d'isolation superficielle, fluide caloporteur (eau) et massif rocheux encaissant.

### 2.3.1. Hypothèses simplificatrices du modèle physico-mathématique

#### a) Modèle « coque » du tube

Du fait du rapport d'aspect important entre la longueur du tube modélisé (179 m) et du diamètre de celui-ci (40 mm), il est nécessaire de faire certaines hypothèses permettant de simplifier le calcul numérique sans dégrader la solution. On couple un modèle 2D (modèle coque - § 2.3.2) permettant de calculer la température du fluide à la périphérie du tube de polyéthylène en fonction de la profondeur avec un modèle 3D qui calculera la température dans le tube de polyéthylène, le coulis de scellement et le massif rocheux encaissant.

### **b) Écoulement homogène dans le tube**

Egalement, la distribution de température du fluide dans la section du tube est considérée homogène dans la section. Dans ces conditions, il n'est pas nécessaire de faire le calcul de l'écoulement dans le tube, les seules informations requises seront le débit et le mode d'écoulement laminaire ou turbulent.

### **c) Domaine de température**

Le domaine de température de la modélisation est situé entre +5°C à +90°C. On considère qu'il n'y a aucun écoulement fluide dans le massif rocheux. Ces deux hypothèses sont conformes aux conditions expérimentales.

### **2.3.2. Calcul de la température du fluide caloporteur**

Le calcul de la distribution de température du fluide caloporteur se fait alors non pas en volume mais en surface (ou coque), sur le rayon interne du tube de polyéthylène de la sonde. L'équation aux dérivées partielles qui régit le calcul de la distribution de température est définie sur cette coque surfacique par l'équation [1] suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial T_f}{\partial t} + \nabla_t \cdot (-k \nabla_t T_f) + \nabla_t \cdot (\rho C_p T_f u) = Q \quad [1]$$

$T_f$  : température du fluide (K)

$u$  : vitesse du fluide (m/s)

$C_p$  : capacité calorifique à pression constante (J/(kg.K))

$\rho$  : masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)

$Q$  : source de chaleur (W/m<sup>3</sup>)

$\nabla_t$  : gradient tangentiel à la coque

### **2.3.3. Calcul de la quantité de chaleur**

Le terme source de chaleur provient de l'échange thermique entre le tube et le fluide. Il s'écrit en fonction de la surface d'échange et le volume fluide (Illustration 7) par la relation [2] suivante :

$$Q = \frac{2\pi r d l}{\pi r^2 d l} h (T - T_f) = \frac{2}{r} h (T - T_f) \quad [2]$$

$T$  : température du tube de polyéthylène

$h$  : coefficient d'échange (W/(m<sup>2</sup>.K))

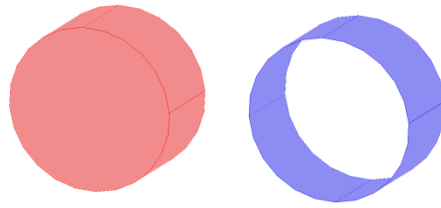


Illustration 7 – Rapport de la surface d'échange et le volume fluide

### 2.3.4. Calcul du transfert de chaleur entre le fluide et les solides

Le transfert de chaleur entre le fluide et le solide est alors défini par un coefficient d'échange ( $h$ ) trouvé à partir de la corrélation de Dittus-Boetler. La corrélation de Dittus-Boetler spécifie la valeur du coefficient d'échange en fonction des caractéristiques géométriques du tube, des propriétés physiques du fluide et du mode d'écoulement.

Soit les relations suivantes en fonction du mode d'écoulement laminaire ou turbulent :

#### a) Régime laminaire

$$h = Nusselt \frac{k}{2r} = 4,36 \frac{k}{2r}$$

$k$  = conductivité thermique du fluide en  $W/(m \cdot K)$   
 $r$  = rayon intérieur du tube

#### b) Régime turbulent

$$h = Nusselt \frac{k}{2r} = 0,023 Reynolds^{4/5} Prandtl^{1/3} \frac{k}{2r}$$

$$Reynolds = \rho U_{moy} \frac{2r}{\mu}$$

$$Prandtl = \frac{C_p \mu}{k}$$

$U_{moy}$  : vitesse moyenne du fluide

$\mu$  : viscosité du fluide ( $\mu_{eau} = 7,98 \cdot 10^{-4} \text{ Pa.s}$ )

$C_p$  : capacité calorifique à pression constante ( $J/(kg \cdot K)$ )

$\rho$  : masse volumique ( $kg/m^3$ )

### 2.3.5. Calcul de température des solides

La température du tube de polyéthylène, de la mousse de polyuréthane, du coulis de colmatage, de la roche est calculée à partir de l'équation de transfert de chaleur en géométrie tridimensionnelle. Soit la relation [3] suivante dans les volumes :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad [3]$$

Cette équation est couplée à l'équation donnant la température du fluide par l'intermédiaire de la condition aux limites sur la coque du tube en polyéthylène par la relation [4] fournissant le flux entrant :

$$\phi = h(T_{ext} - T) = h(T_f - T) \quad [4]$$

T : température du tube de polyéthylène

T<sub>f</sub> : température du fluide

h : coefficient d'échange (W/(m<sup>2</sup>.K))

Les équations [1] et [3] forment un système d'équations à résoudre. Ces équations sont couplées par les conditions aux limites (équations [2] et [4] et les températures T et T<sub>f</sub> sont les inconnues du problème.

La vitesse du fluide (u) est connue, elle est déduite à partir de la connaissance du débit. Pour déterminer la vitesse du fluide en tous points de la coque (équation 1), on utilise une équation permettant de calculer le vecteur unitaire tangent en tous les points de la coque qui sera multiplié par la vitesse moyenne déduite du débit d'entrée.

### 2.3.6. Conditions de température initiale

Pour résoudre un problème thermique transitoire il est nécessaire de connaître la température initiale dans tout le domaine d'étude. Cette température du massif rocheux est une donnée d'entrée du modèle. Elle est fournie par le dispositif de mesure de température du dispositif expérimental (Illustration 8).

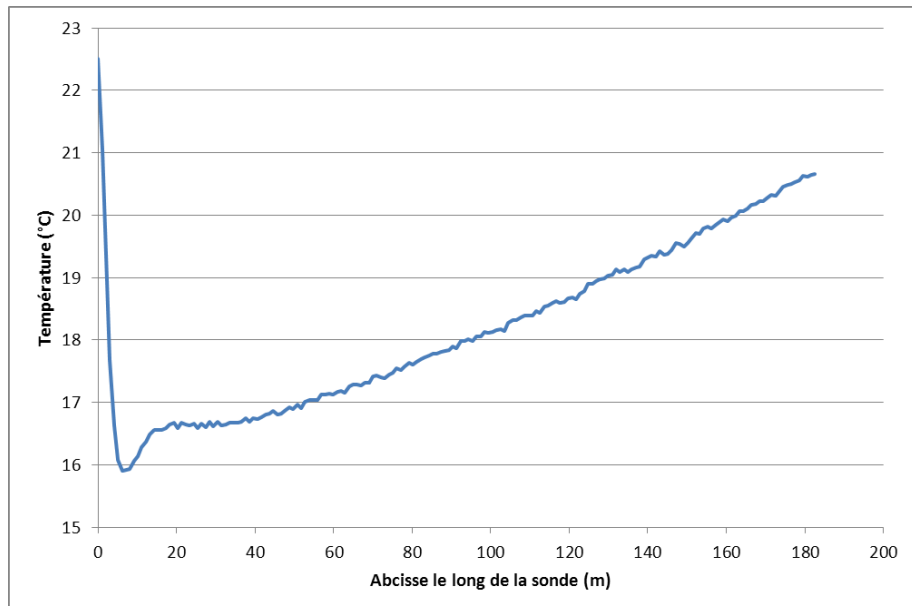


Illustration 8 – Température initiale dans le massif rocheux

## 2.4. PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DES MATERIAUX

Les propriétés physiques apparaissant dans les équations [1] et [3] sont des données d'entrée du modèle développé. Les valeurs retenues sont indiquées dans l'illustration 9. Le modèle analytique établi pour interpréter les résultats expérimentaux pour la seule partie expérimentale de la relaxation (§ 2.2.4). L'exploitation des courbes d'évolution de la température a permis d'estimer les propriétés thermiques du massif rocheux (conductivité thermique et capacité calorifique) et leurs variations en fonction de la profondeur. Sur la base du meilleur ajustement sur la partie de la relaxation entre le modèle analytique et les données expérimentales, le profil de conductivité thermique du massif rocheux en fonction de la profondeur a été déterminé avec une résolution décimétrique (Illustration 10).

Propriété physique	Roche encaissante	ThermoCem (produit de scellement dans le forage)	Mousse de polyuréthane (isolant tranche superficielle)	Polyéthylène PE-RT (matériau des tubes de la sonde géothermique)	Eau (fluide caloporteur)
Conductivité thermique $k$ (W/m.K)	Variable entre 3,0 & 3,7 en fonction de la profondeur (Illustration 10)	2,0	0,028	0,41	0,61
Capacité thermique volumique $\rho C_p$ (J/m <sup>3</sup> .K)	2,50.E+06	3,900.E+06	0,058.E+06	1,302.E+06	4,160.E+06
Capacité thermique massique $C_p$ (J/kg.K)	750	2670	1450	1400	4178
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	3330 <sup>5</sup>	1460	40	930	995,7

Illustration 9 – Propriétés physiques des matériaux mis en œuvre

<sup>5</sup> Valeur surestimée par les calculs de modélisation. Plutôt 2600 à 2900 kg/ m<sup>3</sup> pour la masse volumique du schiste.



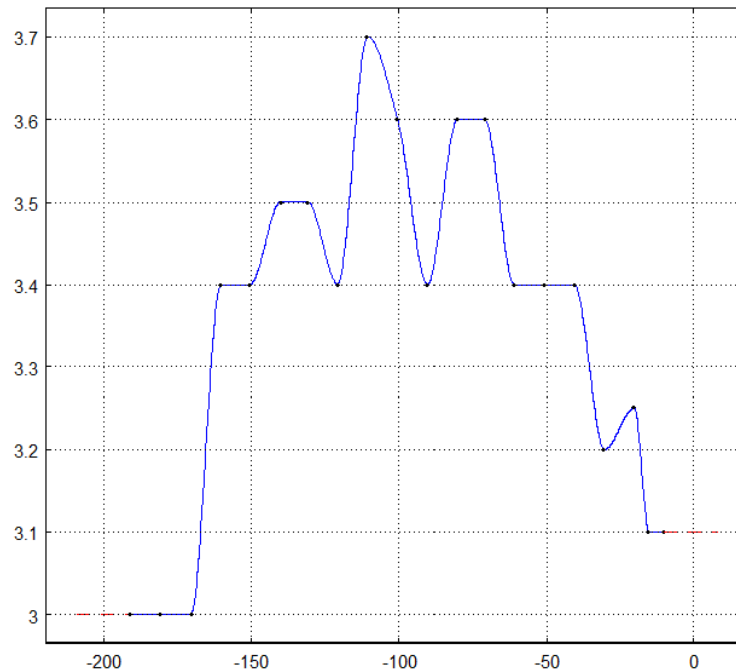


Illustration 10 – Conductivité thermique de la roche en fonction de la profondeur

## 2.5. CONDITIONS AUX LIMITES DU PROBLEME THERMIQUE

Les conditions aux limites concernent les parois de la roche et la surface de la sonde géothermique. Les parois extérieures du massif rocheux modélisé sont suffisamment éloignées de la sonde géothermique pour que l'on puisse considérer qu'il n'y a pas d'échange thermique sur les frontières. L'encombrement en surface du massif rocheux modélisé est de 4 m x 4 m centré sur le forage, et le modèle s'étend 4 mètres sous le pied de la sonde, à environ donc 184 m de profondeur dans le massif rocheux encaissant.

A la surface de la sonde géothermique on tient compte d'un échange thermique convectif avec l'air, avec une température ambiante de 20°C et un coefficient d'échange de 10W/(m².K).

Le couplage entre le fluide et le solide est fait par l'intermédiaire d'une condition aux limites de type convectif. Dans les conditions expérimentales du choc thermique (Illustration 4 : 1000 litres d'eau injectés en 49 minutes), dans un tube de section de diamètre extérieur 40 mm et d'épaisseur 3,7 mm, le nombre de Reynolds est égal à la valeur de 17660. L'écoulement dans le tube de la sonde durant l'injection du choc thermique est donc turbulent<sup>6</sup>. Dans ces conditions, la formule calculant en régime turbulent le coefficient d'échange par la corrélation de Dittus-Boetler fournit un coefficient d'échange h égal à 1893 W/(m².K).

<sup>6</sup> Nombre de Reynolds > 10000.

A l'issue des 49 minutes de l'injection la circulation du fluide caloporteur est stoppée. On passe donc pour le coefficient d'échange de la valeur calculée par la corrélation de Dittus-Boetler à une valeur de coefficient d'échange de type convection naturelle (valeur de 1 à 10 W/(m<sup>2</sup>.K)).

## 2.6. MODELE GEOMETRIQUE ET MAILLAGE

### 2.6.1. Modèle géométrique

On construit le modèle géométrique de l'échangeur géothermique du forage B dont on connaît la trajectographie dans le sous-sol<sup>7</sup>. L'échangeur est constitué d'une sonde en double-U<sup>8</sup>, du tube polyéthylène, du coulis de colmatage et d'un volume du massif rocheux encaissant la sonde géothermique. Le volume de roche modélisé a une extension en surface de 4 m x 4 m centrée sur la sonde, et se prolonge d'environ 4 mètres sous le pied de la sonde (profondeur 184 m) . Le volume de roche considéré par le modèle est ainsi suffisamment important pour que les conditions aux limites n'influent pas sur la distribution de température dans la sonde.

L'illustration 11 fournit la coupe verticale schématique d'un forage d'injection de chaleur. Une gaine de mousse de polyuréthane injectée permet d'isoler thermiquement la sonde géothermique du massif rocheux encaissant dans les premiers cinq mètres en surface. La sonde est noyée dans un coulis de colmatage (ThermoCem) sur toute son extension dans le forage. Le tubage en PVC ainsi qu'un tube de service ne sont pas modélisés (Illustration 12).

---

<sup>7</sup> Trajectographie des forages acquise par diagraphie géophysique réalisée par ailleurs (Rap. BRGM/RP-57281-FR).

<sup>8</sup> Un seul tube en U de la sonde double-U (boucle active) est utilisé lors du choc thermique pour l'injection du volume d'eau utilisé. Le deuxième tube en U (boucle passive) est rempli d'eau non-circulante.

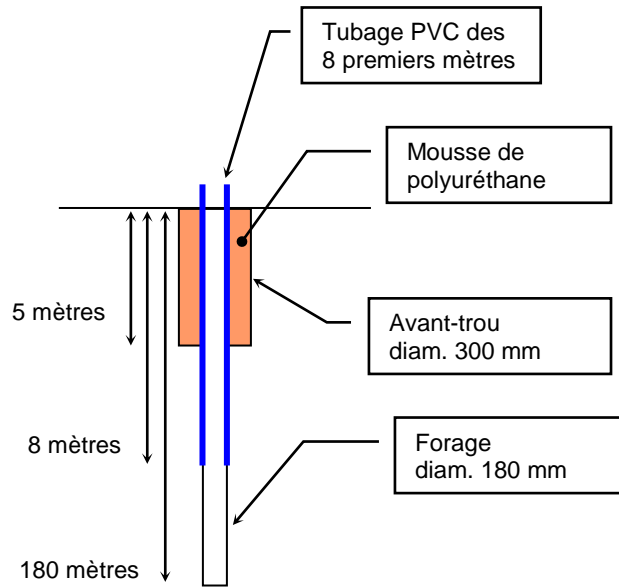


Illustration 11 – Coupe verticale schématique d'un forage d'injection de chaleur



Illustration 12 – Etat de la tête d'un forage d'injection de chaleur

### 2.6.2. Maillage du modèle géométrique

La méthode des éléments finis utilisée par Comsol Multiphysics nécessite de discrétiser la géométrie du modèle en éléments volumiques tétraédriques ou prismatiques (Illustration 13). Ce maillage est réalisé à l'aide d'un mailleur automatique de type Delaunay pour la construction des tétraèdres et par extrusion pour les prismes. Les éléments prismatiques permettent de limiter le nombre de nœuds par rapport aux élé-

ments tétraédriques (Illustration 14). Le pas vertical du modèle géométrique, de l'ordre d'un mètre.

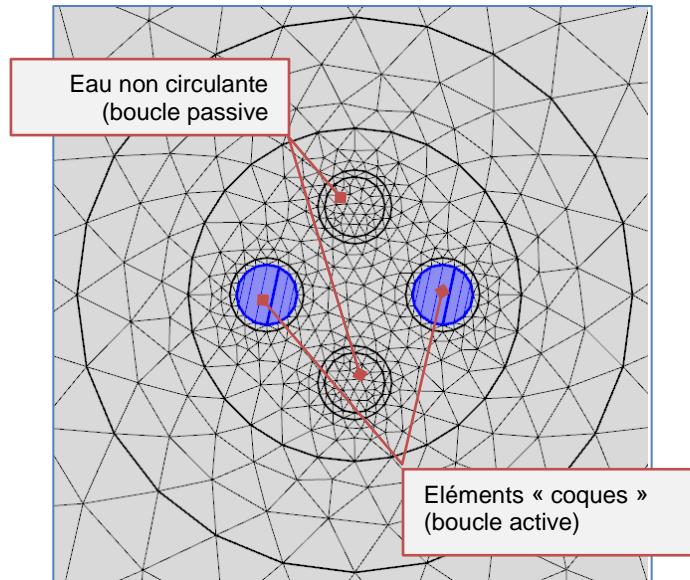


Illustration 13 – Discretisation en éléments finis (coupe du forage)

	Nombre d'éléments
Eléments prismatiques	149 424
Eléments tétraédriques	68 561
Total	217 985

Illustration 14 – Dimensions du maillage du modèle

## 2.7. DEROULEMENT METHODOLOGIQUE

Une première géométrie simplifiée de la sonde verticale a été étudiée. Dans un deuxième temps, la sonde géothermique réelle B, dont on connaît la trajectographie curviligne dans le massif rocheux, a été finalement modélisée en tant que sonde rectiligne entre la tête et le pied de la sonde réelle. L'approximation de la trajectographie curviligne de la sonde par une trajectographie rectiligne avec les mêmes extrémités reste tout à fait acceptable dans les conditions de précision de la modélisation.

## 2.8. OUTIL DE MODELISATION

L'exécution de la stratégie de résolution exposée est réalisée dans Comsol Multiphysics (ver. 4.1) associé au module Heat Transfert. Le module Heat Transfert permet le calcul de la distribution de température du fluide caloporteur sur la coque surfacique du tube de polyéthylène de la sonde (§ 2.3.2). Le calcul du modèle est décomposé en deux étapes : un calcul stationnaire, qui permet de calculer le vecteur

vitesse sur la coque, puis un calcul transitoire qui permet de calculer les températures du fluide, de la roche encaissante, du coulis de colmatage et du tube de polyéthylène. Les paramètres et le détail des procédures de la modélisation numérique sont fournis dans le détail par le rapport d'étude de Iris Technologies.

## 2.9. POINTS D'EXPLOITATION DES CALCULS DE TEMPERATURE DU MODELE

### 2.9.1. Séries calculées TA & TB

Les températures expérimentales  $T_{exp}$  sont mises en regard des deux séries calculées par le modèle TA & TB : TA est la moyenne des deux températures calculées au contact du tube de la sonde ; TB est la moyenne des températures calculées de deux points écartés de 1 cm du tube de la sonde (Illustration 15). La fibre optique n'est pas en effet continûment plaquée contre le tube de la sonde tout le long du forage et dans une même position relative vis-à-vis de l'axe du forage. Les deux séries simulées TA & TB tente de prendre en compte ce « flottement » de la fibre optique autour du tube de la sonde, et sont destinées à encadrer  $T_{exp}$ .

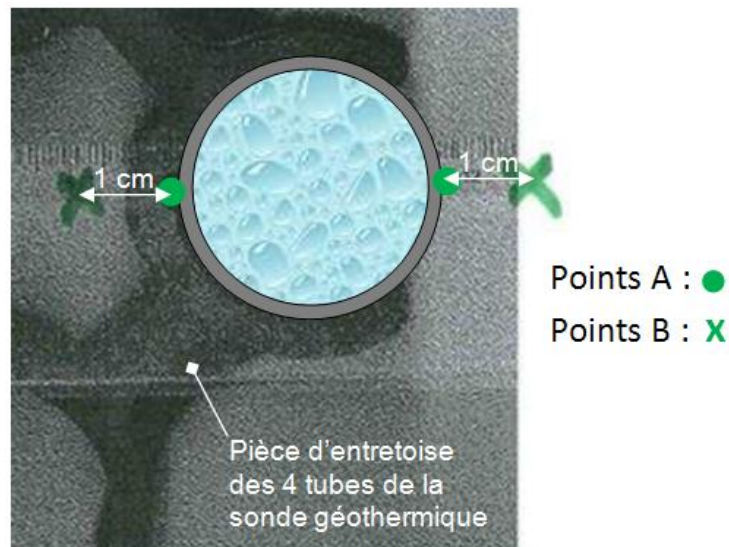


Illustration 15 – Points d'exploitation A & B des températures calculées

On observe effectivement que les températures calculées pour les points situés au contact du tube de polyéthylène (points A) sont bien supérieures à celles des points situés à 1 cm de cette paroi (points B), sur la branche aller comme sur la branche retour du tube en U (Illustration 15).

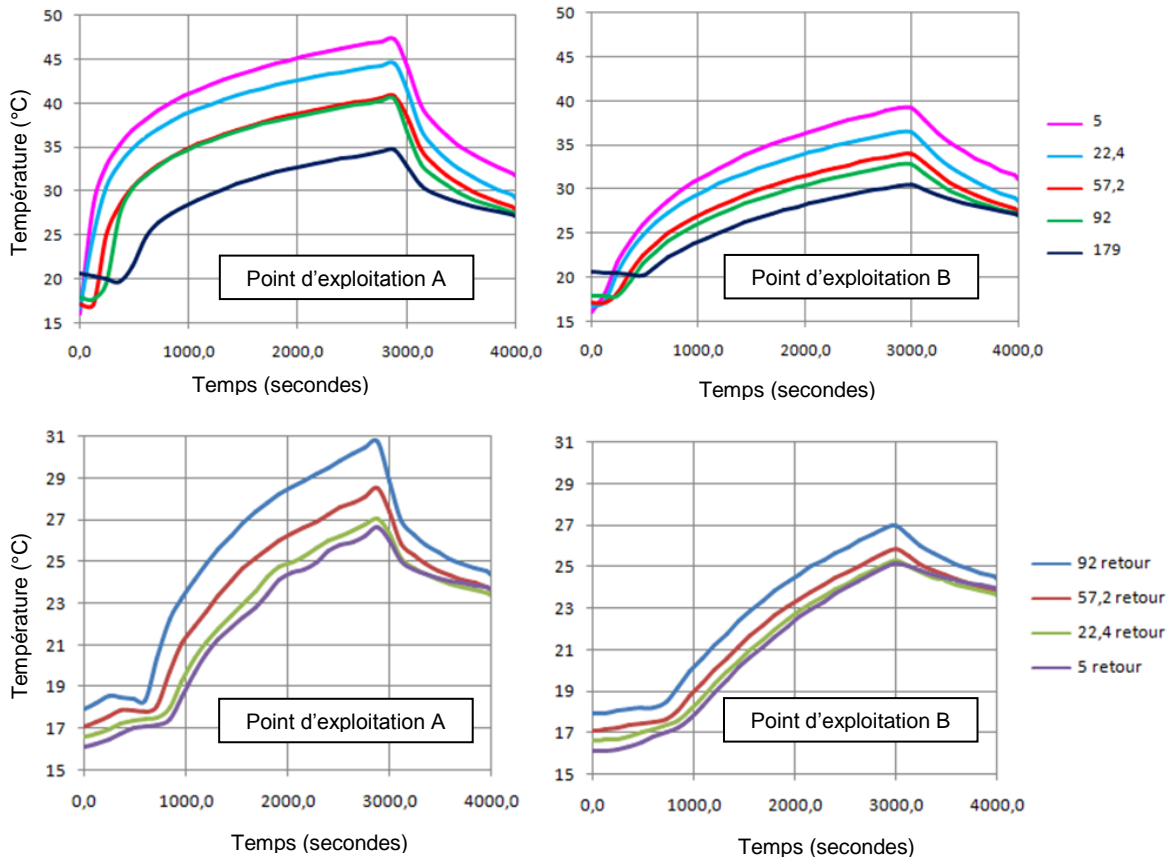


Illustration 16 – Températures entre points d'exploitation A & B pour différentes positions dans le forage

### 2.9.2. Moyenne métrique des séries calculées

Du fait du principe même de la mesure physique réalisée par l'équipement ORYX-DTS, les températures expérimentales  $T_{exp}$  sont des températures moyennes sur une longueur de 1 mètre le long de la sonde. Les séries calculées TA et TB ont donc également été calculées comme des moyennes sur une longueur métrique afin de pouvoir les comparer avec  $T_{exp}$  dans des conditions équivalentes. On note cependant que les moyennes métriques des séries calculées restent très proches des valeurs calculées ponctuellement, sauf en situation d'interface, en l'occurrence à 5 m de profondeur où se situe le niveau de l'interface de l'isolant thermique superficiel de la mousse de polyuréthane (Illustration 11).

### 3. Résultats interprétés de la simulation Comsol

On compare les résultats de la simulation du choc thermique avec ceux expérimentaux obtenus par le dispositif de mesure DTS sur la fibre optique lors de l'essai de terrain réalisé en juil.-09 sur la sonde B (§ 2.2). Une interprétation globale des résultats de la simulation est fournie. Des observations plus particulières portent sur (i) la température de sortie du fluide caloporteur, (ii) l'influence du matériau polyéthylène des tubes, (iii) l'influence de la boucle passive de la sonde double-U, (iv) l'influence de la conductivité thermique de la roche encaissante, (v) l'influence de la mousse de polyuréthane isolant superficiel, (vi) le bilan d'énergie global du choc thermique. Lors de la simulation du test de choc thermique, une précision remarquable a pu être atteinte sur les évolutions spatio-temporelles de la température au regard des phénomènes modélisés à caractère particulièrement transitoire. Seule la partie superficielle du dispositif, entre 0 et 10 m de profondeur, n'a pu être correctement modélisée. L'évaluation de la quantité d'énergie stockée dans les différents volumes du dispositif modélisé (tube, coulis de colmatage, roche, eau statique) montre que pendant la période d'injection, l'énergie est principalement stockée dans le coulis de colmatage.

#### 3.1. EVALUATION GLOBALE DES RESULTATS DE LA SIMULATION

Le modèle tridimensionnel développé pour le dispositif Solargeotherm apparaît très satisfaisant en comparaison avec les mesures expérimentales effectuées.

Les Illustration 37 à Illustration 43 montrent la simulation par le modèle numérique des évolutions de température du choc thermique pour plusieurs valeurs de conductivité thermique du massif rocheux encaissant, cela au regard des données expérimentales recueillies lors de l'essai de terrain (juil.-09). Les évolutions spatio-temporelles pour différentes profondeurs sont tout à fait comparables avec les mesures expérimentales, que ce soit sur le tube aller (partie descendante) comme sur le tube retour (partie remontée). La température de sortie du fluide est elle aussi proche des mesures expérimentales effectuées. Le modèle développé, faisant appel d'une part à la corrélation de Dittus-Boetler et d'autre part à la technique numérique des éléments coques montre son efficacité pour ce type de dispositif.

Seule la partie superficielle du dispositif, entre 0 et 10 m de profondeur, n'a pu être correctement modélisée. Les calculs de la simulation s'écartent des résultats expérimentaux pour cette tranche des terrains dans la partie du refroidissement, le modèle « dissipant trop » par rapport à ce qui est observé. Le dispositif expérimental présente dans la tranche concernée plusieurs interfaces : massif rocheux/atmosphère à 0 m ; mousse de polyuréthane isolant superficiel présence/absence à 5 m ; tubage PVC (non-modélisé) présence/absence à 8 m (Illustration 11). Il est probable que le pas vertical du modèle géométrique, de l'ordre d'un mètre, n'est pas suffisamment précis pour cette tranche superficielle, et peut expliquer cette différence entre les résultats simulés et les données expérimentales.

D'une façon générale, au regard du modèle numérique, c'est-à-dire d'une part de la discrétisation spatiale et d'autre part de la discrétisation temporelle nécessaire, il est tout à fait remarquable d'atteindre un tel niveau de précision sur les évolutions spatio-temporelles pour des phénomènes à caractère particulièrement transitoire comme l'est le principe du choc thermique simulé<sup>9</sup>.

### 3.2. TEMPERATURE DE SORTIE DU FLUIDE CALOPORTEUR

On vérifie que les températures de sortie du fluide caloporteur en fin de choc thermique, comprises expérimentalement entre 32°C et 34°C, sont correctement approchées par le modèle numérique, qui indique des températures de l'ordre de 34°C à 35°C dans les mêmes conditions.

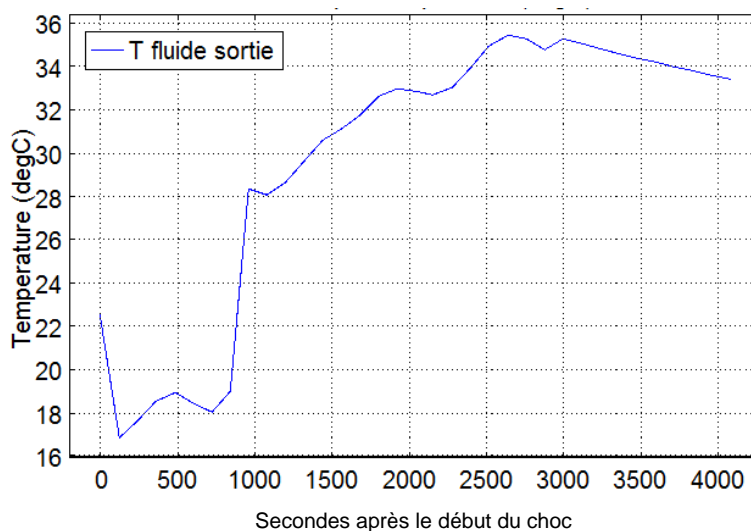


Illustration 17 – Température du fluide à la sortie du forage

### 3.3. INFLUENCE DU MATERIAU POLYETHYLENE DES TUBES

La prise en compte du matériau des tubes de la sonde (polyéthylène PE-RT d'épaisseur 3,7 mm) apparaît essentielle pour une bonne approximation par le modèle numérique de l'évolution des températures expérimentales (Illustration 18). Le polyéthylène n'est pas un bon conducteur de chaleur et sa présence influe fortement sur les transferts de température vers la roche encaissante.

<sup>9</sup> Rapport d'étude Iris Technologies



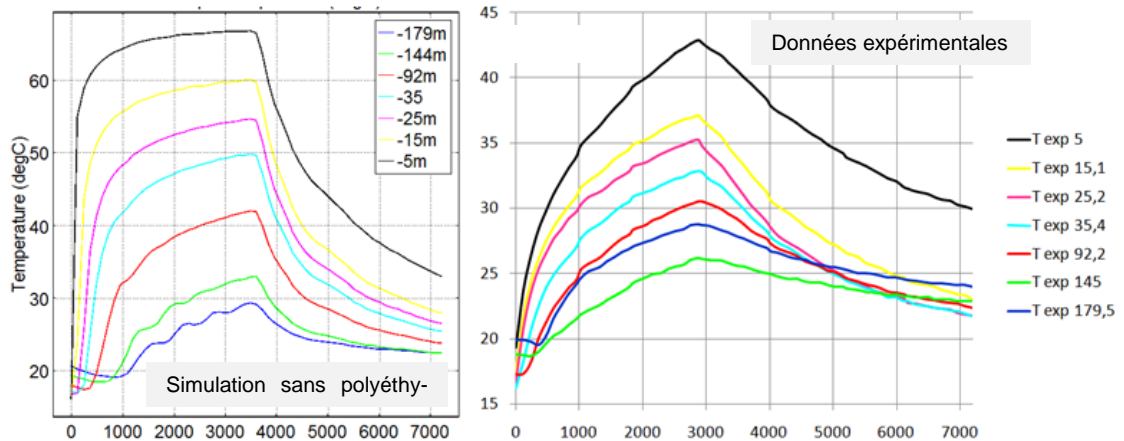


Illustration 18 – Simulation sans prise en compte du polyéthylène des tubes vs. données expérimentales

### 3.4. INFLUENCE DE LA BOUCLE PASSIVE DE LA SONDE DOUBLE-U

Il apparaît dans les calculs que la boucle passive remplie d'eau non circulante a une influence négligeable dans l'évolution des températures du modèle. Cette boucle passive remplie d'eau non-circulante a été modélisée afin de disposer d'un modèle de sonde double-U complet disponible.

### 3.5. INFLUENCE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DE LA ROCHE ENCAISSANTE

Outre la valeur de conductivité thermique variable en fonction de la profondeur et fournie par l'interprétation analytique de la phase de relaxation du choc thermique (§ 2.2.4 et Illustration 10), on a également étudié la réponse du modèle à plusieurs valeurs de conductivité thermique de la roche encaissante constantes pour l'épaisseur du massif rocheux encaissant et égales à 3,00 - 3,13 - 3,26 - 3,39 et 3,52 W/(m.K)<sup>10</sup>.

L'illustration 19 fournit les réponses du modèle pour deux positions sur le tube aller<sup>11</sup> de la sonde (à 5 m et 57,2 m de profondeur) et trois conditions de conductivité thermique du massif : 3 W/m.K, 3,52 W/m.K et conductivité thermique variable fonction de la profondeur fournie par l'interprétation analytique de la phase de relaxation.

Il ressort que, dans la partie de la simulation montrant la plus forte évolution de température et ainsi la plus immédiatement interprétable (de 0 à 5000 s environ), on ne note pas de différences appréciables entre les évolutions de température dans les trois conditions de conductivité thermique figurées. Cette observation, a priori surprenante, trouve cependant son explication dans l'évolution dans le temps de la répartition de l'énergie stockée (transférée) dans les différents matériaux (§ 3.7.1.).

<sup>10</sup> Ces valeurs de conductivité thermique simulées encadrent la donnée expérimentale 3,26 W/(m.K) fournie par un test de réponse thermique in-situ (TRT) réalisé pour le dispositif expérimental par Swiss Geo Testing (Etude Swiss Geo Testing n° 09.05-3).

<sup>11</sup> Tube descendant de boucle en U.

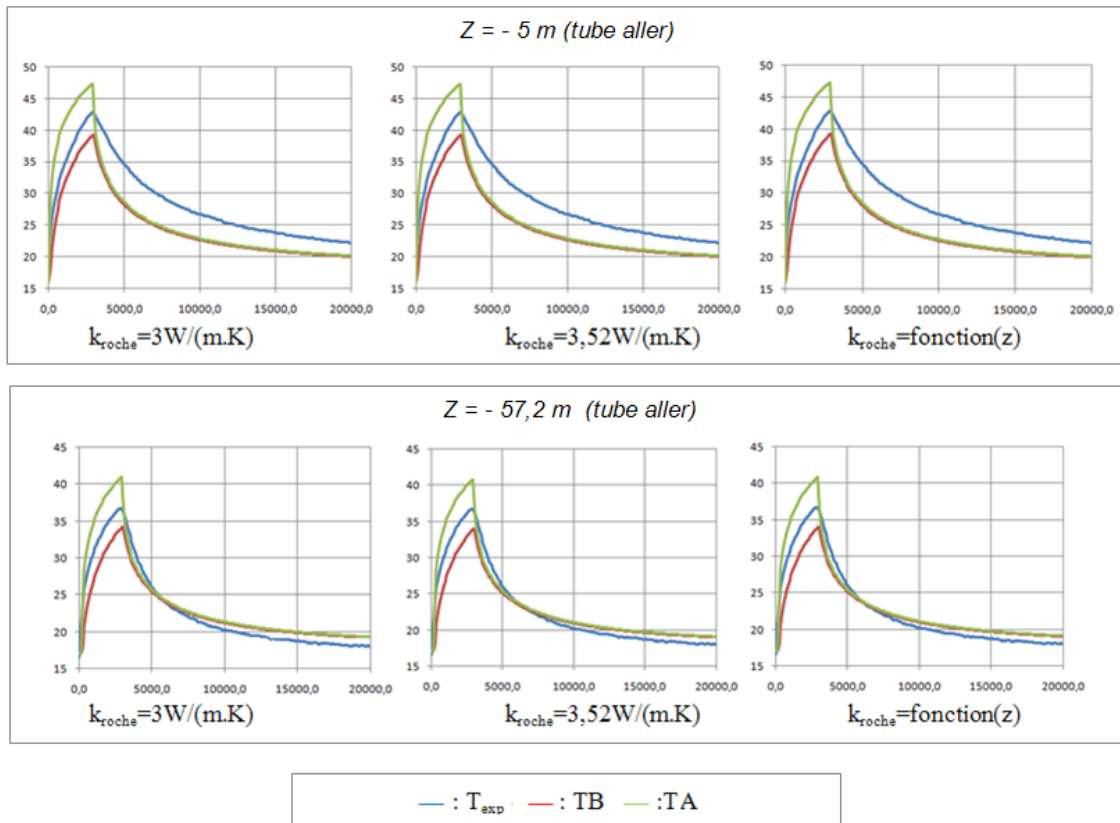


Illustration 19 – Evolution des températures au cours du temps pour trois conditions de conductivité thermique du massif

### 3.6. INFLUENCE DE LA MOUSSE DE POLYURETHANE

La partie superficielle du dispositif, entre 0 et 10 m de profondeur, n'a pu être correctement modélisée. Les calculs de la simulation s'écartent des résultats expérimentaux pour cette tranche des terrains dans la partie du refroidissement, le modèle « dissipant trop » par rapport à ce qui est observé (Illustration 37 à Illustration 43).

On a tenté de réduire la dissipation thermique du modèle en étudiant l'influence de l'isolation thermique par la mousse de polyuréthane dans cette partie superficielle du dispositif. Plusieurs simulations ont été réalisées dans la plage des valeurs extrêmes de conductivité thermique de la mousse de polyuréthane (0,023 à 0,028 W/(m.K)). Il n'a pas été possible de réduire suffisamment la dissipation thermique du modèle dans cette partie superficielle pour reproduire l'essai de terrain.

Le dispositif expérimental présente dans la tranche 0-10 m plusieurs interfaces : massif rocheux/atmosphère à 0 m ; mousse de polyuréthane isolant superficiel présence/absence à 5 m ; tubage PVC (non-modélisé) présence/absence à 8 m (Illustration 11). Il est probable que le pas vertical du modèle géométrique, de l'ordre d'un mètre, n'est pas suffisamment précis pour cette tranche superficielle, et explique cette différence entre les résultats simulés et les données expérimentales.

### 3.7. BILAN D'ENERGIE GLOBAL DU CHOC THERMIQUE

#### 3.7.1. Distribution de l'énergie stockée

L'intégrale volumique de l'expression  $W = \iiint_{\Omega} \rho C_p (T - T_{init}) d\Omega$  permet d'évaluer la quantité d'énergie stockée dans les différents volumes de la géométrie (tube, coulis de colmatage, roche, eau statique). On peut aussi évaluer l'énergie perdue à la surface de la sonde géothermique en intégrant sur la surface l'expression suivante :  $W = \iint_{\Gamma} h(T - T_{amb}) t d\Gamma$ .

L'illustration 20 montre l'évolution temporelle de l'énergie dans les différents volumes en fonction du temps ainsi que l'énergie totale stockée (courbe rouge). L'énergie stockée est de  $1,6 \cdot 10^8$  joule.

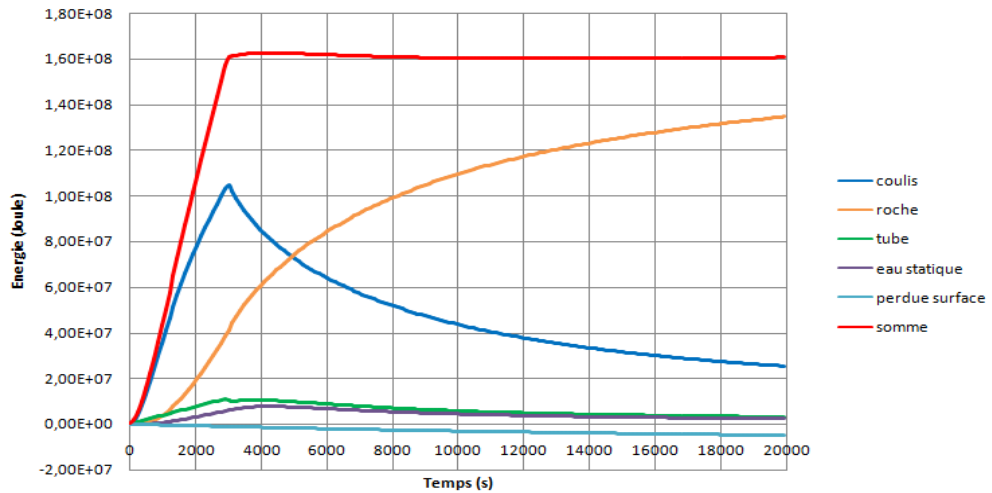


Illustration 20 – Evolution de l'énergie stockée en fonction du temps

L'illustration 21 montre la répartition de l'énergie stockée (transférée) dans les différents matériaux à 3000 s & 20000 s après le début du choc. On constate que pendant la période de l'injection (3000 s = 50 min), l'énergie est principalement stockée dans le coulis de colmatage (Illustration 21). Cette situation explique que la conductivité thermique du massif rocheux encaissant influe peu sur les évolutions de la température lors de la première partie de la simulation du choc thermique.

Energie stockée	t = 3000 s	t = 20000 s
Coulis de colmatage	64%	15%
Roche	25%	79%
Tube	6%	2%
Eau statique	4%	1%
Perte en surface	1%	3%
Total	100%	100%

Illustration 21 – Répartition de l'énergie stockée (transférée) dans les différents matériaux

### 3.7.2. Bilan de l'énergie injectée & stockée

Il est possible par intégration surfacique sur les éléments coques (rayon intérieur du tube) de l'expression  $W = \iint_{\Gamma} h_{tube}(T_f - T)td\Gamma$  de calculer l'énergie injectée pendant la période d'injection du fluide et de la comparer, à titre de vérification du modèle, avec le résultat du calcul de l'énergie stockée. Le bilan d'énergie apparaît satisfaisant (Illustration 22).

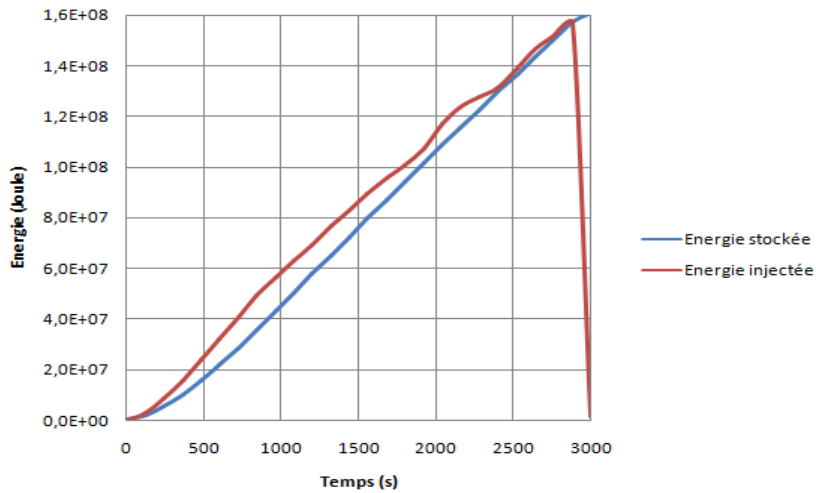


Illustration 22 – Evolution de l'énergie stockée et injectée en fonction du temps

## 4. Modélisation numérique Marthe

Il s'agit de modéliser sur des périodes pluriannuelles les transferts thermiques transitoires dans un massif schisteux de 400 m<sup>2</sup> et 200 mètres d'épaisseur présentant un niveau hydrostatique constant. Dans un premier temps, ce massif est soumis aux seules conditions limites thermiques naturelles, à savoir un flux géothermique moyen ascendant, et une variation de la température du sol liée au climat extérieur (irradiation solaire et nocturne, température de l'air, pluviométrie). Les propriétés physiques du milieu, ainsi que les propriétés du modèle numérique (raffinement du maillage, choix du pas de temps de calcul) sont déterminées par un processus itératif d'essais-erreurs, de façon à ce que la distribution verticale des températures dans le massif présente une évolution temporelle la plus proche possible de celle observée sur le site expérimental du projet. Dans un second temps, l'injection de chaleur via le fluide circulant dans les sondes géothermiques verticales est également prise en compte dans le modèle en imposant une puissance variable au cours du temps le long d'une ou trois verticales, cela dans le but de simuler une injection de chaleur sur une sonde unique ou sur les trois sondes du dispositif.

### 4.1. OUTIL DE LA MODELISATION NUMERIQUE

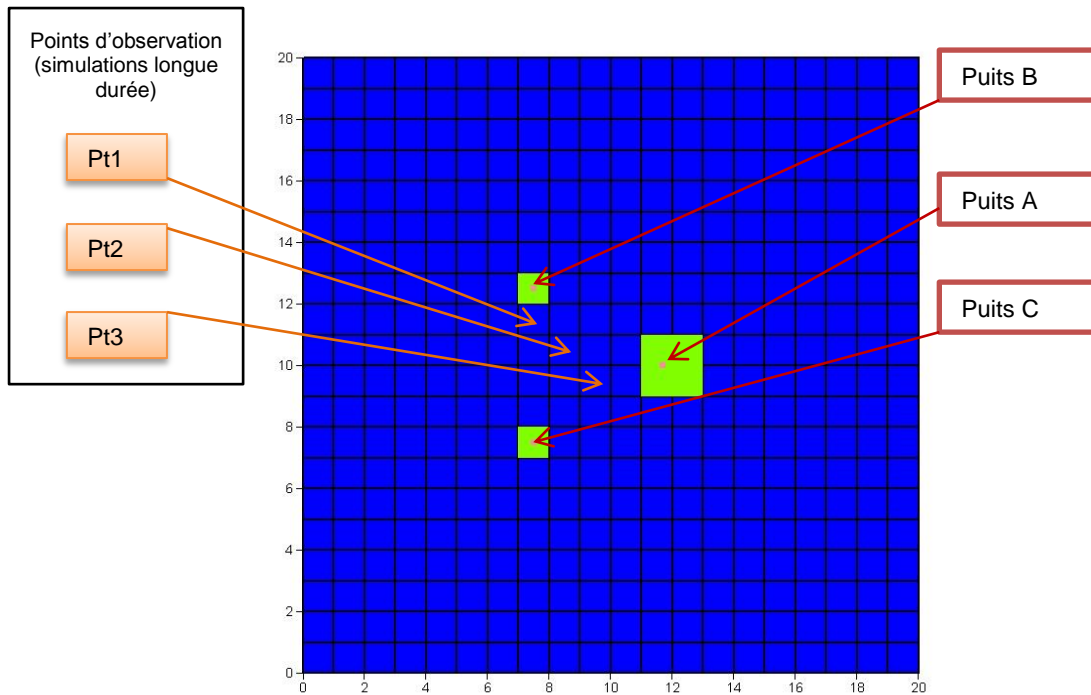
Le modèle numérique a été construit à l'aide du préprocesseur WinMarthe 4.3a<sup>12</sup>. Il s'agit d'un milieu poreux de forme parallélépipédique. Le milieu est supposé saturé en eau, avec un niveau hydrostatique constant (les écoulements souterrains sont supposés négligeables). L'équation de la chaleur en 3D et régime transitoire est ensuite résolue sur tout le domaine maillé par le code aux volumes finis MARTHE (version 7.1).

### 4.2. GEOMETRIE ET DISCRETISATION SPATIALE DU MODELE

La surface du carré de 20 m × 20 m est discrétisée avec des mailles carrées de 1m\*1m, et un maillage gigogne (raffiné) autour des sondes géothermiques (mailles de 10 cm × 10 cm). Verticalement, le milieu de 220 mètres d'épaisseur est découpé en 21 couches de 10 ou 20 mètres d'épaisseur. Une 22<sup>ème</sup> couche fictive de 1 m d'épaisseur est ajoutée au-dessus du massif pour figurer le sol et imposer la condition limite de température (voir Illustration 23 & Illustration 24).

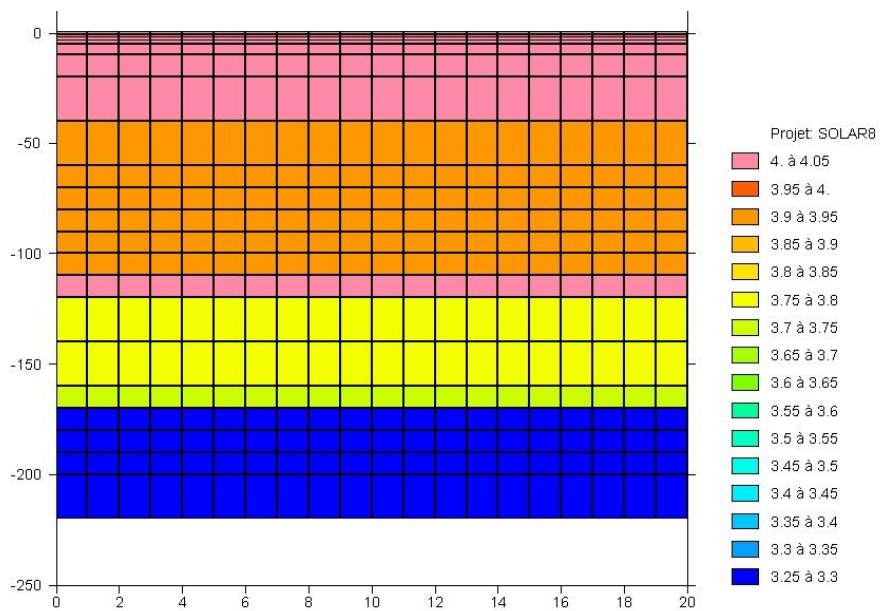
---

<sup>12</sup> D. Thiéry, 2010



Coordonnées en m – Codage couleur : bleu : maillage principal (mailles 1 m x 1 m) ; vert : maillages gogones (mailles de 10 m x 10 m) ; rose : mailles représentant les sondes géothermiques

Illustration 23 – Maillage du modèle Marthe – vue de dessus



Coordonnées en m - Amplification de 0,07 sur l'axe des z  
Echelle de couleur selon la valeur de la conductivité thermique de la roche

Illustration 24 – Maillage du modèle Marthe – vue en coupe verticale

### 4.3. CONDITIONS AUX LIMITES

#### 4.3.1. Condition aux limites hydrodynamiques

Toutes les conditions aux limites du domaine sont des conditions de flux nul. Sur le site de Montauriol, le niveau hydrostatique avait été mesuré lors des forages à -30 m de profondeur. Mais il est apparu au cours du travail de modélisation que la transition entre la zone noyée (sous le niveau hydrostatique) et la zone non saturée (de 0 à 30 mètres de profondeur) engendrait des difficultés numériques pour la résolution de l'équation de la chaleur. On a donc choisi de ne pas conserver ce niveau hydrostatique et d'imposer la saturation complète du milieu.

#### 4.3.2. Condition aux limites thermique

La condition limite sur la surface supérieure du massif rocheux est une condition de Dirichlet (température imposée). Une couche de sol de 1 m d'épaisseur a été ajoutée dans le modèle au-dessus du massif rocheux pour permettre d'imposer cette condition limite. Dans l'idéal, la température imposée doit correspondre à celle qui est mesurée sur le site au niveau du sol. A défaut, la température de l'air fournie par la station de Météo France la plus proche (Caixas en l'occurrence) à un pas de temps horaire est utilisée. La couche inférieure du milieu (entre -200 m et -220 m de profondeur), est soumise à une condition de Neumann (flux imposé) pour rendre compte du flux géothermique. Avec un gradient thermique moyen de 3°C pour 100 m et une conductivité thermique du massif à cette profondeur de 3 W/m.K, le flux géothermique imposé est de 0,081 W/m<sup>2</sup>. La température sur les faces latérales du massif rocheux est imposée (maintenue à la valeur initiale). La condition de flux nul<sup>13</sup> initialement envisagée a été abandonnée car, bien que permettant d'obtenir les mêmes résultats que la condition de Dirichlet sur la phase de calage, elle engendrait des résultats aberrants pour les scénarios.

### 4.4. CONDITION THERMIQUE INITIALE

La température est supposée initialement uniforme dans chaque couche. La distribution verticale des températures est fournie par les données expérimentales.

### 4.5. PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES DU SYSTEME

Les propriétés thermo-physiques équivalentes ( $\lambda^*$  et  $(\rho C)^*$ ) d'un massif rocheux saturé en eau dépendent de celles de la roche qui constitue ce massif rocheux (schiste) et de celles de l'eau saturant le massif.

$$\lambda^* = \varepsilon \cdot \lambda_e + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_r$$

$$(\rho C_p)^* = \varepsilon \cdot (\rho C_p)_e + (1 - \varepsilon) \cdot (\rho C_p)_r$$

Porosité du milieu poreux :  $\varepsilon = 0,1$

<sup>13</sup> Classiquement utilisée lorsque le domaine modélisé est « suffisamment grand » par rapport à la zone d'injection pour que l'on puisse considérer que le milieu est infini.

Conductivité thermique de l'eau :  $\lambda_e = 0,598 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Capacité calorifique volumique de l'eau :  $(\rho C_p)_e = 4,18 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$

L'exploitation du test de choc thermique distribué (Lanini et Nguyen, 2011) a permis de déterminer la distribution verticale de la conductivité thermique du massif rocheux saturé (Illustration 10). Ces valeurs ont été utilisées par défaut dans le modèle, puis ajustées pour optimiser le calage. La distribution retenue de la conductivité thermique pour le modèle est représentée sur l'illustration 24. La capacité calorifique volumique équivalente du massif rocheux est supposée constante sur tout le domaine est égale à  $1.6.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ .

#### **4.6. DISCRETISATION TEMPORELLE**

Les tests préliminaires de calage ayant montré qu'un pas de temps de 12 h (correspondant à l'alternance jour/nuit) n'était pas suffisant pour rendre compte des variations de températures dans les premières couches du sous-sol particulièrement sensibles aux variations de la température extérieures. Le pas de temps de la résolution pour le modèle Marthe a été finalement fixé à 2 heures. Les données d'entrée du modèle dépendantes du temps (température extérieure et puissance injectée) sont donc fournies avec ce même pas de temps. Ce pas de temps de 2 heures a été conservé pour les simulations longue durée.

#### **4.7. DONNEES D'ENTREE DU MODELE**

Les données expérimentales sont utilisées d'une part pour forcer le modèle (conditions aux limites & condition initiale), et d'autre part calibrer les paramètres thermophysiques et valider le modèle par comparaison avec les résultats numériques. Il est donc important de connaître la précision de ces données avant de les exploiter en modélisation. Ces données d'entrée du modèle Marthe sont détaillées dans l'Annexe 3.

##### **4.7.1. Température dans le massif rocheux le long des sondes géothermiques**

Les températures sont mesurées tout le long des sondes géothermiques grâce à une fibre optique reliée à un DTS. Le dispositif fournit une valeur moyenne de température tous les mètres. Le traitement appliqué aux données brutes pour obtenir les séries chronologiques associées à chaque profondeur est détaillé (Annexe 3 - Illustration 48 & Illustration 50).

##### **4.7.2. Température extérieure**

La température au niveau du sol a été mesurée par un capteur numérique situé en sortie des panneaux solaires, à quelques centimètres du sol. L'examen des données montre cependant des valeurs aberrantes (Annexe 3 - Illustration 51), laissant supposer que le capteur a pu être déplacé et repositionné sous les panneaux solaires. A défaut de température au sol, ce sont des données de température de l'air qui ont été utilisées en entrée du modèle. Pour cela, les données horaires moyennes (période 1961-1990 - moyenne sur 2 heures) fournies par la station Météo France de Caixas ont été utilisées et adaptées au pas de temps du modèle (Annexe 3 - Illustration 52).



#### 4.7.3. Puissance thermique injectée dans le massif rocheux

La chronique de puissance injectée dans le massif rocheux imposée dans les simulations longue durée a été construite à partir des données expérimentales recueillies à Montauriol dans les conditions suivantes :

- Le calcul de la puissance injectée est réalisée avec un pas de temps de 1 minute sur une journée type de plein été (Illustration 25) :  $P = (\rho C_p)_e \cdot Q \cdot (T_{in} - T_{out})$ , avec  $T_{in}$  et  $T_{out}$  les températures mesurées respectivement en entrée de la sonde géothermique (i.e. en sortie du champ solaire) et en sortie (i.e. en entrée du champ solaire) ;
- On suppose que la répartition au cours de la journée de la puissance captée par les panneaux (et donc injectée en sous-sol) est constante sur l'année. En revanche, son amplitude varie mensuellement en fonction de l'irradiation globale IGP (Annexe 3 - Illustration 53). Ainsi, la puissance calculée pour le mois de juillet est multipliée par un coefficient normé égal à l'IGP du mois rapporté à l'IGP de juillet pour obtenir la puissance thermique mensuelle injectée dans le massif rocheux encaissant (Illustration 26).
- Les données obtenues sont moyennées sur des périodes de deux heures et les puissances injectées inférieures à 5 kW sont négligées.
- Débit de circulation dans le circuit hydraulique :  $Q = 5.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ; capacité calorifique volumique de l'eau :  $(\rho C_p)_e = 4.18 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$

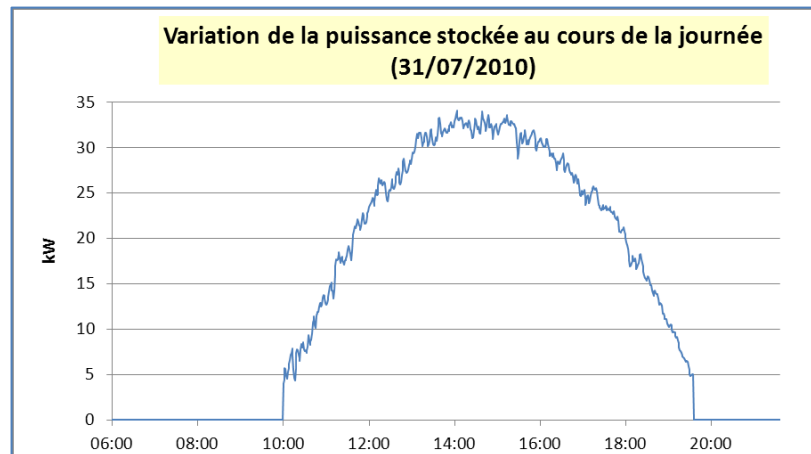


Illustration 25 – Variation journalière de la puissance injectée (31 juil.-10)

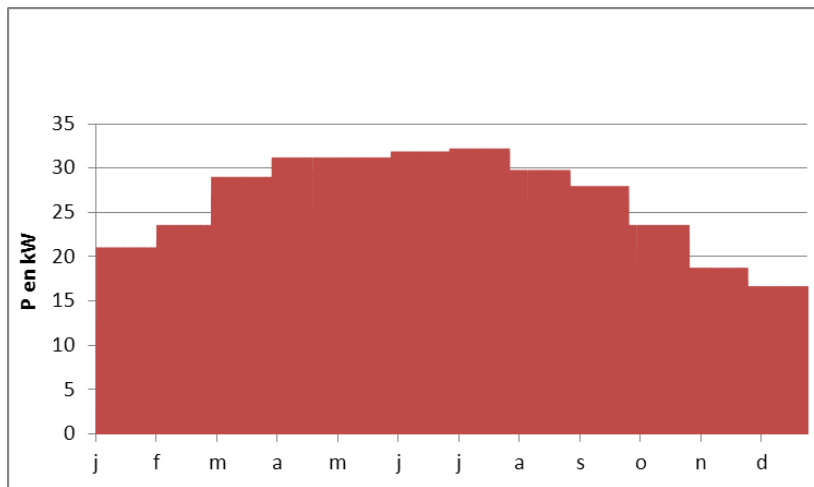


Illustration 26 – Puissance thermique mensuelle injectée dans le massif rocheux

#### 4.8. CALAGE DU MODELE MARTHE

La phase de calage a consisté à simuler le fonctionnement du dispositif de stockage en condition naturelle, sans injection, pendant une période de 3 à 12 mois. A chaque simulation, les résultats numériques et expérimentaux sont comparés à plusieurs dates et heures du jour et de la nuit.

Le calage du modèle a permis d'adapter le traitement des données expérimentales pour un usage en entrée du modèle et de déterminer les valeurs optimales du pas de temps et du maillage (nombre de couches pour représenter les 15 premiers mètres). Il a également rendu possible l'ajustement de la condition limite imposée en surface. Enfin, la distribution des propriétés thermiques du massif rocheux a pu être ajustée de façon à ce que les résultats numériques s'approchent au mieux des températures observées.

La température de l'air (station Caixas), corrigée par un coefficient multiplicatif de 1,5 pour s'approcher de la température au sol, a été retenue comme condition limite. Cette dernière correction permet d'améliorer le calage de la température simulée dans les 15 premiers mètres de profondeur, sans influencer sur les couches plus profondes.

Initialement fixée aux valeurs déterminées lors de l'interprétation du test de choc thermique distribué, la conductivité thermique a été légèrement modifiée dans les couches supérieures (0 à 10 m) pour rendre compte au mieux des variations de températures observées (voir Illustration 54 en Annexe). La capacité calorifique équivalente du massif rocheux saturé en eau (pour une porosité de 10%) est fixée uniformément à  $1,0 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ . Une valeur proche de celle de l'air ( $1,2 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ) imposée dans les couches supérieures permet de reproduire un peu mieux les observations mais contribue à l'obtention de résultats aberrants en simulation longue durée, et a donc été écartée.

Les distributions verticales de températures simulées à différentes dates dans les conditions de calage optimal sont reportées sur l'illustration 27 et comparées aux observations à la sonde géothermique C (non influencée). La condition initiale imposée correspond aux mesures du 01/05/2011 à minuit à la sonde géothermique C. On constate que le modèle ne reproduit pas correctement les températures dans les 15 premiers mètres du sous-sol. Au-delà de cette profondeur, l'écart maximal entre les températures simulées et observées reste inférieur à 0,6°C pendant les 6 premiers mois, atteint 1,8°C en plein hiver et diminue ensuite.

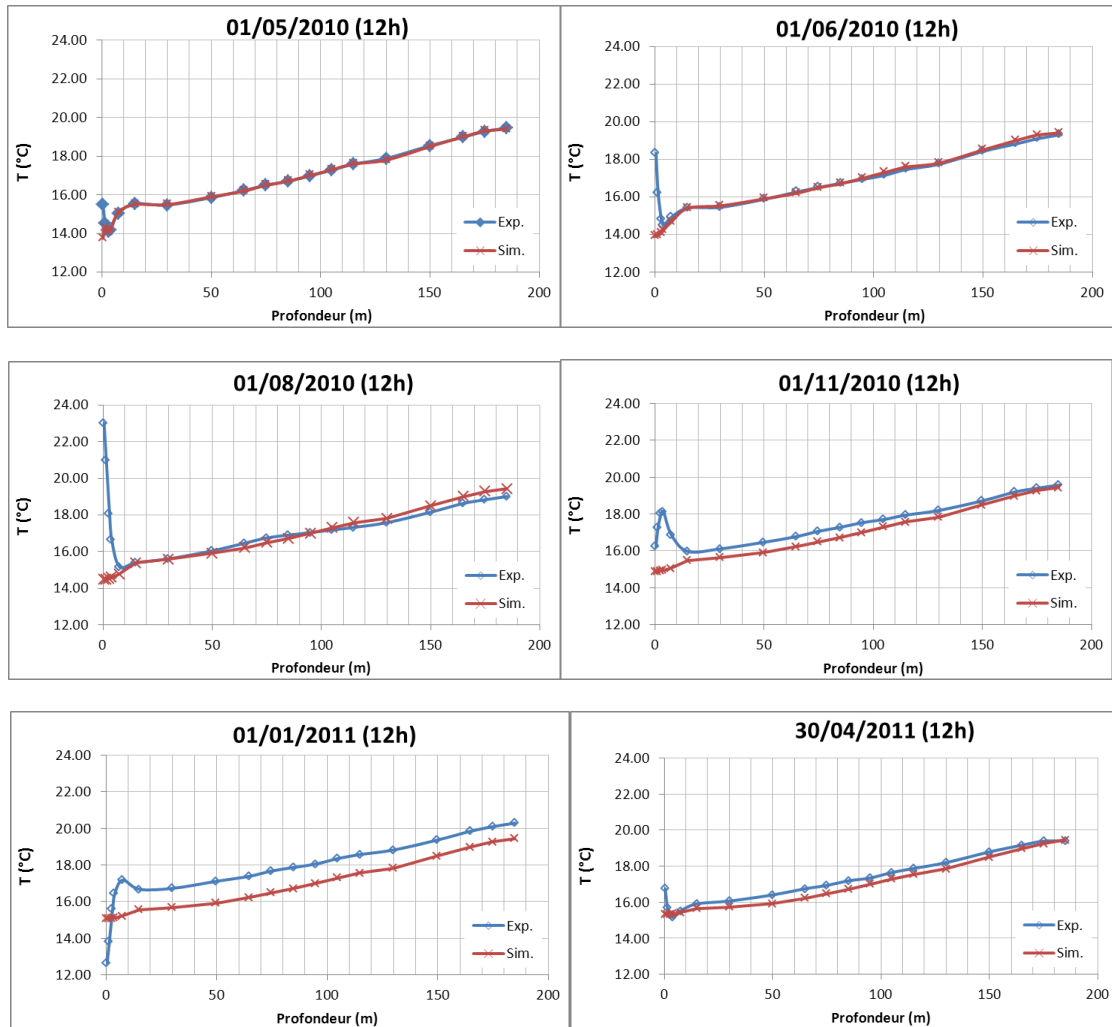


Illustration 27 – Températures expérimentales et simulées à la sonde géothermique C - mai 2010 à mai 2011



## 5. Résultats interprétés de la simulation Marthe

Le modèle aux volumes finis qui a été construit et calé est soumis à une injection cyclique annuelle pendant 12 ans de façon à simuler l'évolution de la température du massif rocheux encaissant le dispositif expérimental (et donc l'énergie stockée) sur une période longue. Les résultats des simulations des températures dans le massif rocheux après des périodes d'injection de chaleur de 6 mois, 6 ans et 12 ans sont déterminés. La puissance injectée est une fonction du temps construite à partir des données du bilan thermique du champ solaire de Montauriol. Dans un premier temps, la totalité de la puissance est injectée dans une sonde unique (sonde B). Le système atteint un régime stationnaire au bout d'un an. Une augmentation de température de 3 à 4°C dans un rayon de 1,5 m autour de la sonde est observée, pour un rayon d'influence de l'ordre de 4,5 m. Aucun gradient vertical n'a été observé. Dans un second temps, la même puissance est répartie sur les trois sondes du dispositif modélisé. Le régime stationnaire est également atteint en une année, mais les niveaux de température sont inférieurs d'environ 1°C par rapport au cas précédent. Le rayon d'influence du dispositif est en revanche plus important (de l'ordre de 5 m).

### 5.1. SIMULATION DE L'INJECTION DE CHALEUR SUR UNE SONDE UNIQUE

L'injection de chaleur sur une sonde unique du dispositif (sonde géothermique B) pour des périodes pluriannuelles a été simulée. La puissance linéique injectée est supposée constante le long de la sonde géothermique. Pour éviter les effets de bords, l'injection n'a lieu que de -20 m à -180 m (couches 8 à 19).

L'évolution de la température à différentes profondeurs au point d'observation n°1 (voir sa position sur l'illustration 23) est reportée sur l'illustration 28. Les résultats très similaires obtenus aux points d'observation 1 et 3 sont présentés en Annexe 4 (Illustration 55). On constate que les températures augmentent au cours de la première année d'injection puis se stabilisent très rapidement, aux fluctuations saisonnières près.

Les variations de température par rapport à l'état initial au bout d'un an d'injection de chaleur sont présentées sur l'illustration 29, selon une coupe verticale passant par la sonde géothermique, et une vue en plan à -130 m de profondeur (couche 16). On constate une augmentation de température de 3°C à 4°C dans un rayon de 1,5 m autour de la sonde. Le rayon d'influence au-delà duquel l'augmentation de température est inférieure à 1°C est de l'ordre de 4,5 m. La répartition verticale des températures est relativement homogène, avec au pied de la sonde géothermique une légère augmentation liée au flux géothermique.

Les résultats des simulations des températures dans le massif rocheux après des périodes d'injection de chaleur de 6 mois, 6 ans et 12 ans sur une sonde unique sont présentés en Annexe 4 (Illustration 55 à Illustration 58).

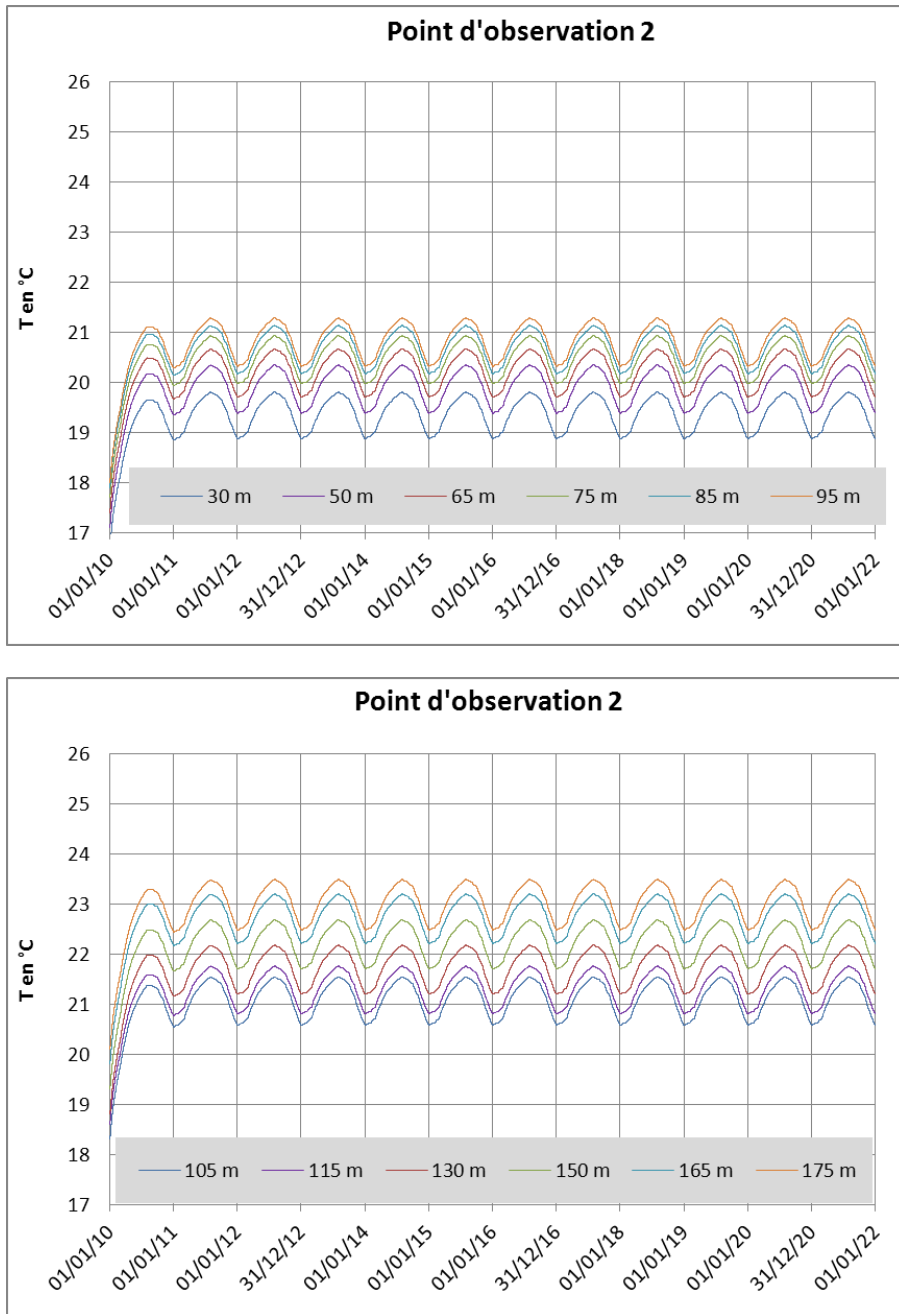


Illustration 28 – Température du massif rocheux à différentes profondeurs lors de la simulation longue durée avec injection dans une sonde unique (point d'observation n°2)

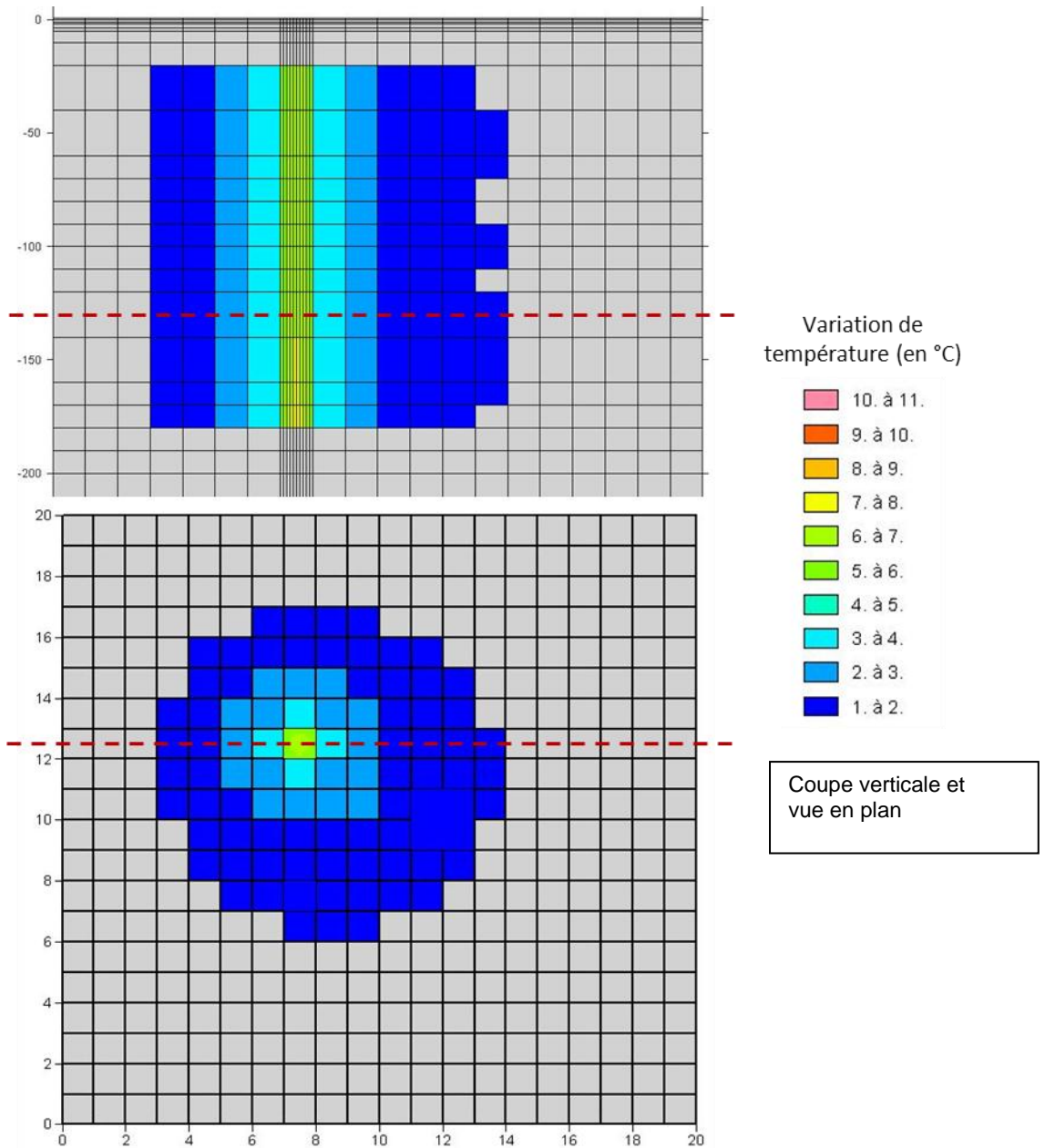


Illustration 29 – Variation de température dans le massif après un an d'injection de chaleur dans une sonde unique

## **5.2. SIMULATION DE L'INJECTION DE CHALEUR SUR LES TROIS SONDES**

L'injection de chaleur simultanément dans les trois sondes du dispositif expérimental pour des périodes pluriannuelles a été simulée. La puissance totale injectée est identique à celle injectée auparavant sur une sonde unique (§ 5). L'injection suit également la même évolution temporelle et spatiale (selon la profondeur) que le cas de la sonde unique.

L'évolution de la température à différentes profondeurs au point d'observation n°1 est reportée sur l'illustration 28. Les résultats très similaires obtenus aux points d'observation 1 et 3 sont présentés en Annexe 4 (Illustration 59). On observe le même comportement que dans le cas d'injection dans une sonde unique : les températures augmentent au cours de la première année d'injection puis se stabilisent très rapidement, aux fluctuations saisonnières près. Les niveaux atteints sont toutefois inférieurs d'environ 1°C à ceux obtenus dans le cas précédent.

Les variations de température au bout d'un an par rapport à l'état initial sont présentées sur l'illustration 31, selon une coupe verticale passant par la sonde géothermique, et une vue en plan à -130 m de profondeur (couche 16). On constate une augmentation de température de 2°C à 3°C dans un rayon de 0,5 m autour de chaque sonde. Le rayon d'influence du champ de sondes (à partir du point central) au-delà duquel l'augmentation de température est inférieure à 1°C est de l'ordre de 5 m. La répartition verticale des températures est relativement homogène, avec en pied de sonde géothermique une légère augmentation liée au flux géothermique.

Les résultats des simulations Marthe des températures dans le massif rocheux après des périodes d'injection de chaleur de 6 mois, 6 ans et 12 ans sur les trois sondes sont présentés en Annexe 4 (Illustration 59 à Illustration 62).



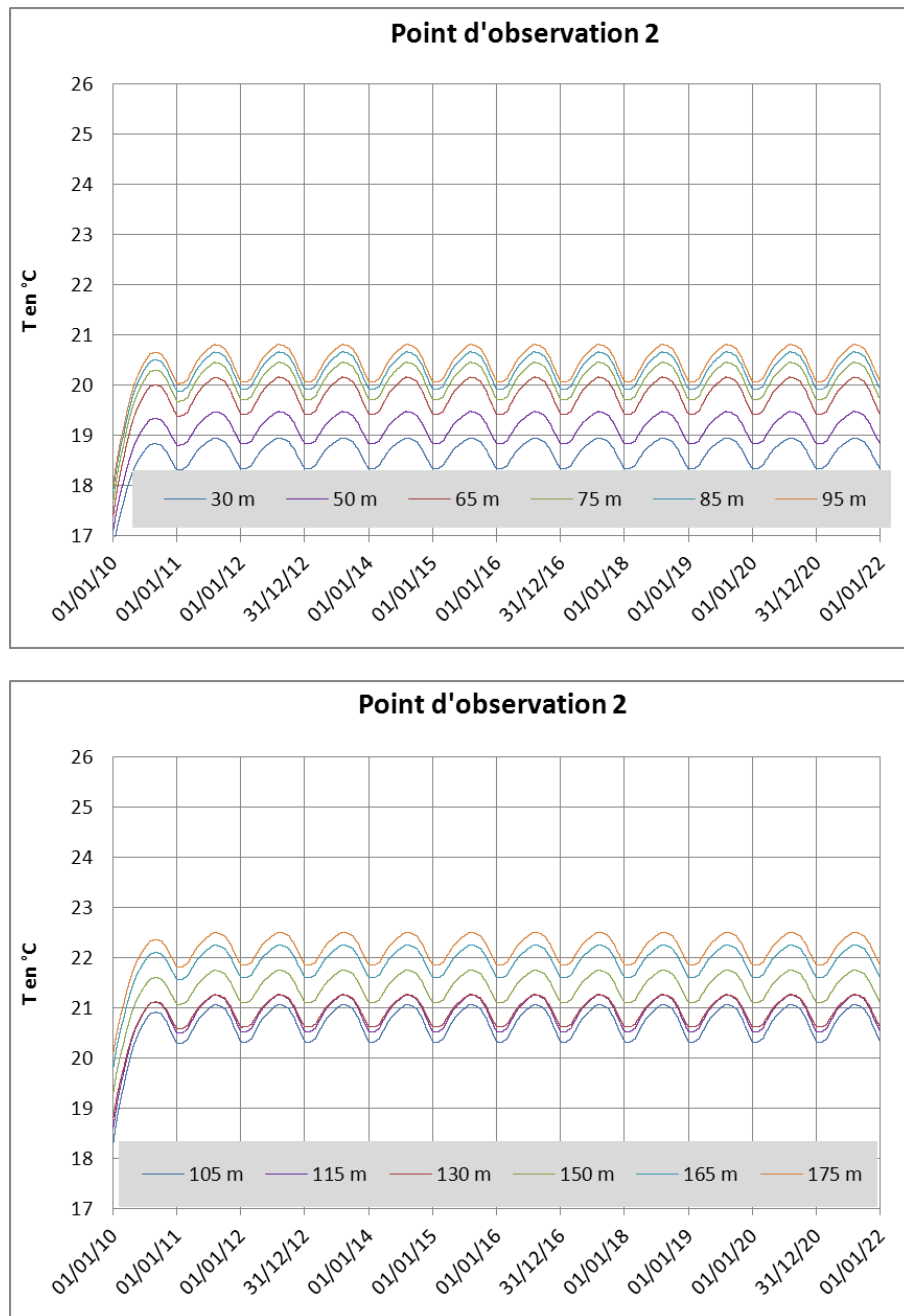


Illustration 30 – Température du massif rocheux à différentes profondeurs lors de la simulation longue durée avec injection dans les 3 sondes (point d'observation n°2)

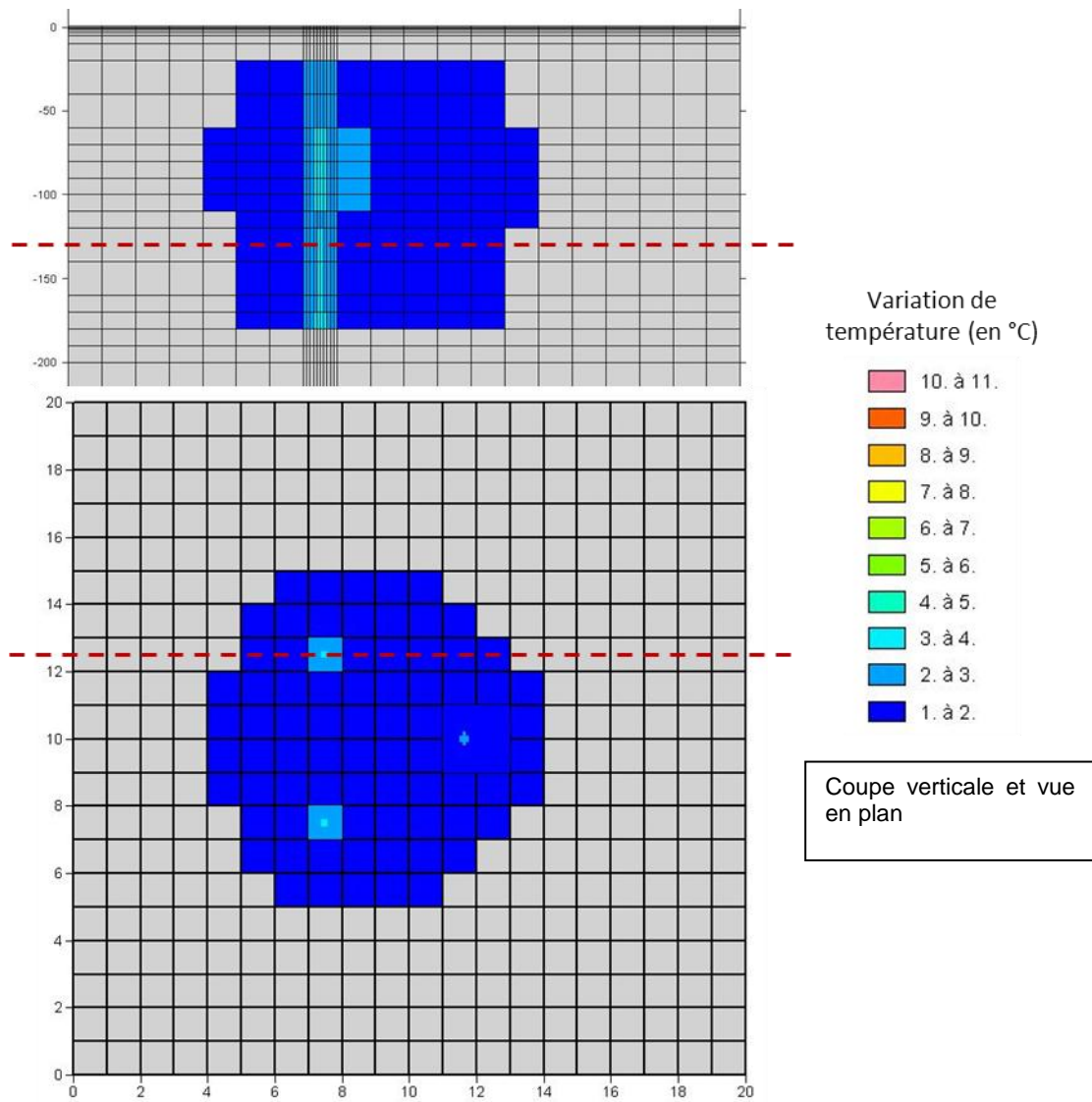


Illustration 31 – Variation de température dans le massif après un an d'injection de chaleur dans les 3 sondes

### **5.3. SYNTHÈSE DES RESULTATS DES SIMULATIONS MARTHE**

Les températures calculées à proximité des limites du domaine, et particulièrement de sa limite supérieure, ne sont pas interprétées car trop influencées par le choix des conditions limites prises en compte dans la modélisation. A cette restriction près, le modèle aux volumes finis qui a été construit et calé a permis de simuler l'injection de chaleur dans un dispositif simplifié mais proche de celui du site de Montauriol. La puissance injectée est une fonction du temps construite à partir des données du bilan thermique du champ solaire de Montauriol.

Dans un premier temps, la totalité de la puissance est injectée dans une sonde unique (sonde B). Le système atteint un régime stationnaire au bout d'un an. Une augmentation de température de 3 à 4°C dans un rayon de 1,5 m autour de la sonde est observée, pour un rayon d'influence de l'ordre de 4,5 m. Aucun gradient vertical n'a été observé.

Dans un second temps, la même puissance est répartie sur les trois sondes du dispositif modélisé. Le régime stationnaire est également atteint en une année, mais les niveaux de température sont inférieurs d'environ 1°C par rapport au cas précédent. Le rayon d'influence du dispositif est en revanche plus important (de l'ordre de 5 m).

### **5.4. LIMITES DE LA MODELISATION MARTHE**

La principale difficulté rencontrée au cours du travail de modélisation Marthe est la simulation de l'évolution des températures dans les quinze premiers mètres de profondeur. La condition limite thermique retenue sur la partie supérieure du domaine modélisé est de type Dirichlet (température imposée). Mais pour être réalistes, les valeurs imposées doivent correspondre aux températures mesurées au sol, car elles intègrent les phénomènes de conduction et convection de l'air ainsi que le rayonnement. Or ces données ne sont pas disponibles (et le sont rarement). A défaut, la condition limite a été « construite » à partir des chroniques de températures de l'air. D'autre part, la transition de température entre la zone saturée (sous le niveau hydrostatique) et la zone dénoyée (de 0 à 30 mètres de profondeur), ainsi que le calcul du champ de températures dans la zone dénoyée sont délicats à réaliser avec la version actuelle du code Marthe. La solution de contournement adoptée a consisté à considérer un milieu saturé sans écoulement.

Les difficultés notées lors de la modélisation de la tranche superficielle des terrains ne sont pas spécifiques au cas étudié et ont déjà été signalées lors de travaux antérieurs (Witte and Van Gelder, 2005 par exemple). Elles vont d'ailleurs faire l'objet d'un travail de post-doctorat au sein du département Géothermie du BRGM. Il s'agira de modéliser les effets de surface de façon à prédire le comportement hydrique-thermique du sol près de la surface (jusqu'à 1 m environ). Cela permettra de préciser dans quelles conditions les modèles d'échangeurs géothermiques devront prendre en compte ou non de manière couplée les échanges hydriques et thermiques dans le sol et, le cas échéant, de proposer des conditions aux limites à la surface du sol adaptées en fonction de la profondeur d'enfouissement des échangeurs.



## 6. Géométrie d'un champ de sondes pour un géostockage thermique diffusif

Dans le présent chapitre on détermine la géométrie d'un géostockage thermique diffusif constitué par un champ de sondes géothermiques verticales pour que le géostockage puisse minimiser les pertes thermiques par diffusion dans un massif rocheux encaissant. Dans l'hypothèse où l'on peut isoler thermiquement la surface supérieure du géostockage, ce qui est généralement possible puisqu'il s'agit de la surface supérieure du dispositif en contact avec l'atmosphère, le volume qui minimise les pertes thermiques par diffusion dans le massif encaissant hors aquifère est un cylindre dont la hauteur est égale au rayon. On évalue ensuite le temps caractéristique de stockage d'une sonde unique du dispositif expérimental par rapport au géostockage optimal. Le temps caractéristique de la sonde unique de 180 m de profondeur est de 13% du temps caractéristique d'un géostockage optimal. En d'autres termes, la sonde unique du dispositif expérimental Solargeotherm perdra (diffusera) huit fois plus rapidement la chaleur stockée qu'un dispositif à géométrie optimale.

### 6.1. VOLUME OPTIMAL D'UN GEOSTOCKAGE DIFFUSIF

Dans le cas d'un stockage de chaleur par sondes géothermiques verticales (SGV) implantées dans un massif rocheux hors aquifère (géostockage thermique diffusif), les pertes thermiques du géostockage sont essentiellement conductives<sup>14</sup> et liées au flux de chaleur du dispositif vers le milieu environnant (air extérieur et massif rocheux encaissant le géostockage). En première approche, un champ de SGV délimite un volume de stockage thermique global de forme cylindrique (Illustration 32).

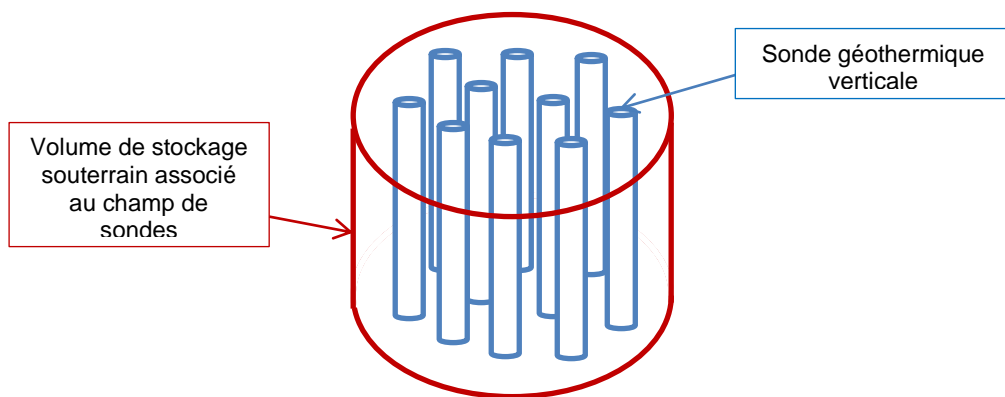


Illustration 32 – Schéma d'un volume de géostockage thermique

Par définition, le flux de chaleur  $\phi$  du volume de stockage vers le milieu environnant (pertes thermiques) est proportionnel au gradient thermique entre les deux milieux, à la

<sup>14</sup> Il n'y a pas de flux thermique convectif puisque le géostockage thermique est réalisé hors aquifère.

surface d'échange extérieure du dispositif de stockage et à la conductivité thermique du massif rocheux (Illustration 33). Il s'agit donc de déterminer la géométrie du cylindre qui pour un volume contenu  $V_0$  donné minimise cette surface d'échange extérieure. Les calculs de ce volume cylindrique optimal sont développés en suivant.

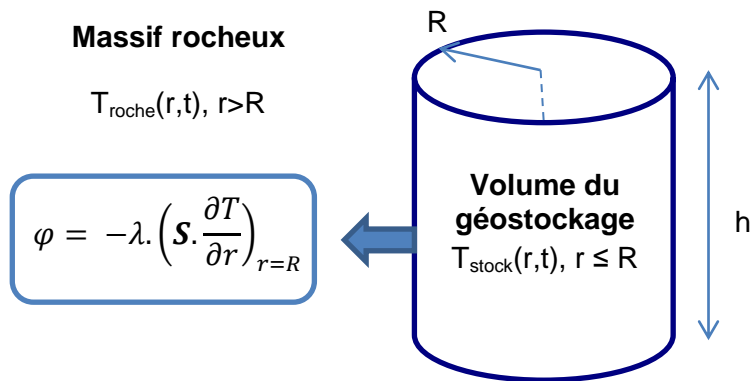


Illustration 33 – Flux de chaleur dissipé par un volume de stockage cylindrique

### 6.1.1. Cas 1 : aucune isolation thermique

Pour un volume contenu  $V_0$  donné, il s'agit de déterminer le rayon  $R$  tel que la surface extérieure  $S$  du cylindre soit minimale ( $dS/dR = 0$ ) :

$$V_0 = \pi \times R^2 \times h \quad [1]$$

$$S = 2 \times (\pi \times R^2) + (2 \pi \times R \times h)$$

$$S = 2 \times (\pi \times R^2) + 2 \pi \times R \times (V_0 / (\pi \times R^2))$$

$$S = 2 \pi \times R^2 + 2 V_0 / R$$

$$dS/dR = 0 \Rightarrow 4 \pi \times R - 2 V_0 / R^2 = 0$$

$$V_0 = 2 \pi \times R^3 \quad [2]$$

De [1] & [2] il vient :  $h = 2 R = D$ . Le cylindre qui minimise sa surface extérieure est celui dont la hauteur est égale au diamètre.

### 6.1.2. Cas 2 : face supérieure isolé thermiquement

Dans les projets opérationnels de géostockage de chaleur, le champ de SGV est généralement isolé thermiquement sur sa surface supérieure afin de limiter les pertes de chaleur vers l'atmosphère<sup>15</sup>. Dans l'hypothèse où l'on peut isoler thermiquement la surface supérieure du géostockage de chaleur, ce qui est généralement possible puisqu'il s'agit de la surface supérieure du géostockage en contact avec l'atmosphère, alors il s'agit de minimiser  $S'$  :

$$S' = (\pi \times R^2) + (2 \pi \times R \times h)$$

Les mêmes calculs que précédemment conduisent à :  $h = R = D/2$ . Le cylindre qui minimise la somme de sa surface extérieure verticale et d'une de ses surfaces extérieures horizontales a une hauteur est égale à son rayon.

## 6.2. PERFORMANCES D'UN GEOSTOCKAGE DIFFUSIF OPTIMAL

Pour pouvoir comparer les performances énergétiques de deux dispositifs cylindriques de géostockage de même volume mais de dimensions différentes, on exprime pour un stockage dont la face supérieure est isolée thermiquement la surface d'échange en fonction uniquement de  $V_0$  et du coefficient de forme du cylindre  $E = D / h$ .

$$\tilde{S} = (\pi \cdot D^2 / 4) + (\pi \cdot h \cdot D) = (\pi \cdot D^2 / 4) + (\pi \cdot D^2 / E)$$

$$\tilde{S} = \pi \cdot D^2 \cdot \left( \frac{1}{4} + \frac{1}{E} \right)$$

$$V_0 = \pi \cdot h \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{D^3}{4E} \Rightarrow D^2 = \left( 4E \cdot \frac{V_0}{\pi} \right)^{2/3}$$

$$\Rightarrow \tilde{S} = \pi \cdot \left( \frac{1}{4} + \frac{1}{E} \right) \cdot \left( 4E \cdot \frac{V_0}{\pi} \right)^{2/3} \quad [3]$$

### 6.2.1. Comparaison des temps caractéristiques de stockage

On considère deux champs de SGV A & B isolés thermiquement sur leur face supérieure, tous deux de volumes de stockage cylindrique  $V_0$  identiques mais de coefficient de forme ( $E_a$  &  $E_b$ ) et de surface d'échange ( $S_a$  &  $S_b$ ) distincts. On cherche à évaluer et comparer le temps nécessaire ( $\tau$ ) à chacun des dispositifs pour dissiper une quantité de chaleur stockée  $Q$ , soit :

$$Q = \int_0^{\tau_A} \varphi_A \cdot dt = \int_0^{\tau_B} \varphi_B \cdot dt$$

<sup>15</sup> L'installation du champ de SGV de Neckarsulm (Allemagne), en service depuis 2001 et qui représente un volume de stockage de 63000 m<sup>3</sup>, est par exemple isolée dans sa partie supérieure par une couche de sable, un isolant à haute densité, une membrane étanche, de l'argile et d'autres matériaux d'aménagement (Nussbicker et al., 2003).

Il faut donc établir l'expression analytique du flux de chaleur entre la sonde et le massif rocheux, par dérivation du champ thermique.

### 6.2.2. Solution complète de la diffusion thermique autour d'un cylindre

Carslaw & Jaeger (1959) proposent une solution analytique complète pour décrire l'évolution de la température en fonction du temps et de l'espace dans un milieu parcouru par un cylindre parfaitement conducteur qui délivre à partir de  $t > 0$  une puissance  $q$  par unité de longueur. L'équation de cette solution analytique<sup>16</sup> fait intervenir des fonctions de Bessel, et cette équation apparaît complexe à dériver pour calculer le flux d'échange à la limite sonde / milieu.

### 6.2.3. Solution approchée de la diffusion thermique autour d'un cylindre

Un solution analytique approchée de la diffusion thermique consiste à considérer en première approximation que le massif rocheux est un milieu semi-infini homogène unidirectionnel, initialement à une température uniforme  $T_i$ , limité par une surface à température imposée  $T_0$  (la surface extérieure du volume du géostockage thermique).

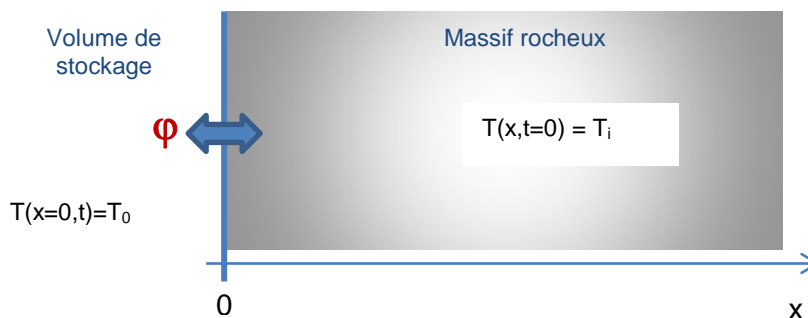


Illustration 34 – Schéma du milieu semi-infini plan avec température de surface imposée

La température dans le massif rocheux qui vérifie l'équation de conduction de la chaleur et les conditions limites et initiales décrites ci-dessus est la suivante :

$$T(x, t) - T_0 = (T_i - T_0) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \quad [4]$$

avec  $a = \frac{\lambda^*}{(\rho c)^*}$  la diffusivité thermique équivalente du massif rocheux.

Le flux échangé entre le volume de stockage et le massif rocheux est donc :

$$\varphi_{x=0} = -\lambda^* \cdot S \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0}$$

<sup>16</sup> Carslaw & Jaeger (1959) - §13.7 - équation [7].



$$\Rightarrow \varphi_{x=0} = (T_i - T_0) \cdot S \cdot \sqrt{\frac{\lambda^* \cdot (\rho C)^*}{\pi \cdot t}} \quad [5]$$

On a donc :

$$\begin{aligned} \int_0^{\tau_A} \varphi_A \cdot dt &= \int_0^{\tau_B} \varphi_B \cdot dt \\ \Leftrightarrow \int_0^{\tau_A} S_A \cdot \sqrt{\frac{\lambda^* \cdot (\rho C)^*}{\pi \cdot t}} \cdot dt &= \int_0^{\tau_B} S_B \cdot \sqrt{\frac{\lambda^* \cdot (\rho C)^*}{\pi \cdot t}} \cdot dt \\ \Leftrightarrow 2 \cdot S_A \cdot \sqrt{\tau_A} &= 2 \cdot S_B \cdot \sqrt{\tau_B} \\ \Leftrightarrow \left(\frac{\tau_A}{\tau_B}\right) &= \left(\frac{S_B}{S_A}\right)^2 \end{aligned} \quad [6]$$

D'après la formule [3], le rapport des surfaces d'échanges peut s'écrire en fonction des facteurs de forme :

$$\widetilde{S}_B / \widetilde{S}_A = (E_B / E_A)^{\frac{2}{3}} \cdot (0,25 + 1/E_B) / (0,25 + 1/E_A) \quad [7]$$

De [6] et [7], il vient le ratio entre les temps caractéristiques de stockage pour deux géostockage A & B de volumes de stockage cylindrique  $V_0$  identiques, mais de coefficient de forme ( $E_a$  &  $E_b$ ) et de surface d'échange ( $S_a$  &  $S_b$ ) distincts.

$$\left(\frac{\tau_A}{\tau_B}\right) = \left[ (E_B / E_A)^{\frac{2}{3}} \cdot (0,25 + 1/E_B) / (0,25 + 1/E_A) \right]^2 \quad [8]$$

#### 6.2.4. Comparaison d'une sonde géothermique unique avec le géostockage optimal

On définit les caractéristiques hauteur & diamètre d'un géostockage cylindrique B optimal dont la face supérieure isolée thermiquement (§ 6.1.2) qui serait équivalent en chaleur contenue (en volume) avec une sonde géothermique unique du dispositif expérimental du projet constituant le dispositif A.

- Dispositif A d'une sonde géothermique unique du dispositif expérimental de Montauriol :  $h = 180$  m (profondeur de la sonde géothermique) &  $D = 5$  m<sup>17</sup>, soit  $E_a = 5/180 = 2,7 \cdot 10^{-2}$ .

<sup>17</sup> L'estimation du diamètre du volume cylindrique du géostockage représenté par une sonde unique est basé sur les points suivantes : (i) la modélisation préliminaire ayant permis de définir le dispositif expérimental des trois forages d'injection de chaleur écartés de 5 m l'un de l'autre (§ 1.1) ; (ii) le fait d'observation que dans les champs de SGV mettant en œuvre le stockage de chaleur l'interdistances entre sondes est généralement de l'ordre de 5 m ; (iii) La modélisation Marthe a mis en évidence un rayon d'influence de l'ordre de 5 m autour de chaque sonde géothermique du dispositif expérimental.

- Géostockage optimal B :  $h = R = D/2$ , soit  $E_b = 2$

**a) Caractéristiques géométriques du géostockage optimal**

Le géostockage B optimal, thermiquement isolé sur sa face supérieure, de même volume de stockage qu'une sonde unique de 180 m de profondeur de l'installation de Montauriol a une profondeur  $h$  de 10,4 m pour un diamètre  $D$  de 20,8 m <sup>18</sup>.

**b) Temps caractéristique du géostockage thermique d'une sonde unique de 180 m**

On évalue le temps caractéristique de stockage d'une sonde unique du dispositif expérimental par rapport au géostockage optimal. L'illustration 35 fournit l'évolution de ce temps caractéristique établi par l'équation [8] avec  $E_b = 2$ . Le temps caractéristique de la sonde unique de 180 m de profondeur est de 13% du temps caractéristique d'un géostockage optimal. En d'autres termes, la sonde unique du dispositif expérimental Solargeotherm perdra (diffusera) huit fois plus rapidement la chaleur stockée qu'un dispositif à géométrie optimale.

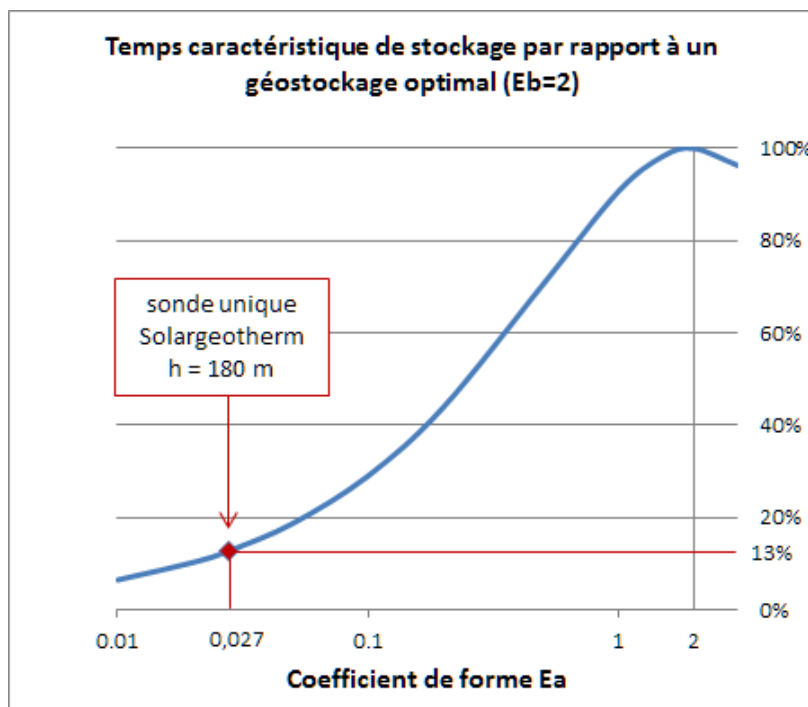


Illustration 35 – Temps caractéristique d'un géostockage thermique diffusif

**c) Simulation de la perte thermique d'un géostockage optimal**

L'illustration 36 montre la déperdition du stock de chaleur à l'occasion d'un arrêt le 17 août 2010 des opérations d'injection de chaleur sur la sonde B faisant suite à un incident de fonctionnement de l'installation.

<sup>18</sup>  $V_0 = 180 \times \pi \times (5 \wedge 2) / 4 = h \times \pi \times ((2h)\wedge 2) / 4$ , soit  $h = 10,4 \text{ m}$  &  $D = 2h = 20,8 \text{ m}$ .

Les températures dans la sonde B ont retrouvé le niveau de base de la sonde de contrôle dans un délai d'environ 17 jours (du 17/08/10 au 03/09/10). Suivant les développements précédents, pour une quantité de chaleur stockée identique, la même déperdition totale aurait ainsi eu lieu en 130 jours dans le cas d'un dispositif de géostockage à géométrie optimale.

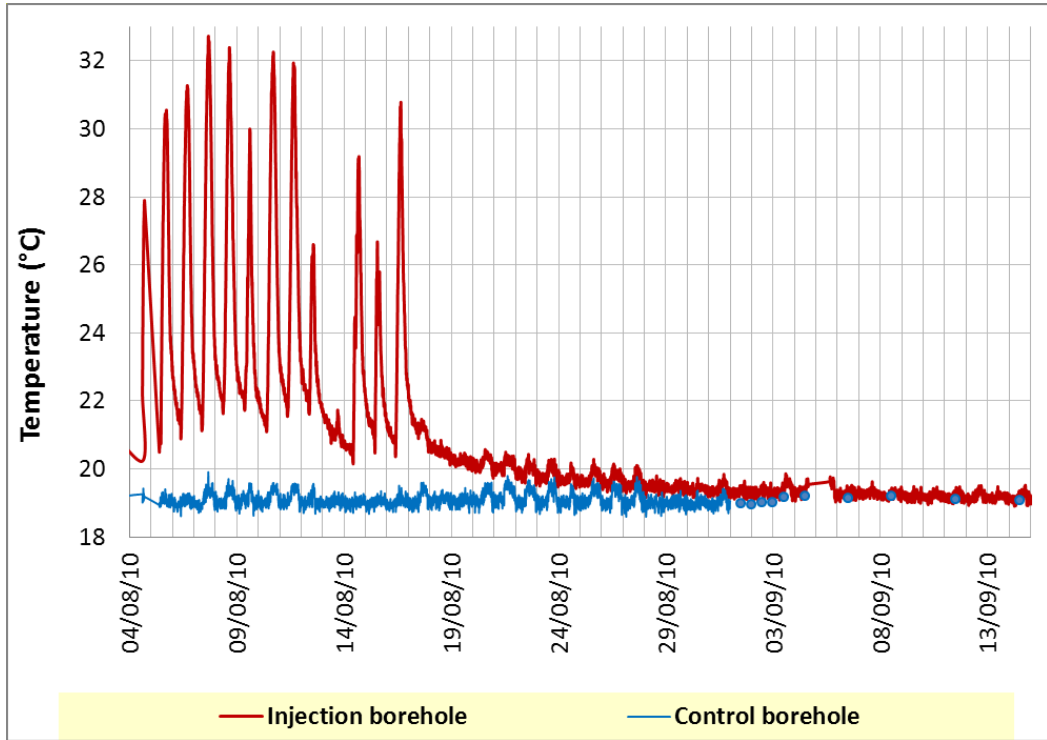


Illustration 36 – Déperdition thermique expérimentale suite à l'arrêt de l'injection de chaleur dans la sonde géothermique

### 6.3. FAISABILITE DU STOCKAGE DE CHALEUR INTERSAISONNIER

Un géostockage de chaleur intersaisonnier n'est pas praticable pour des dispositifs comportant une ou quelques sondes géothermiques. L'allongement de ces dispositifs est trop défavorable et la dissipation de chaleur dans le massif encaissant trop rapide par rapport à la chaleur contenue pour pouvoir compter sur une chaleur stockée pendant des périodes de plusieurs mois.

Lorsque cependant le dispositif de géostockage s'approche d'une géométrie optimale, les pertes thermiques par diffusion dans le massif encaissant diminuent très rapidement et des délais de stockage thermique plurimensuels apparaissent envisageables.



## 7. Conclusion

Une des tâches principales du projet Solargeotherm est dédiée à la modélisation du comportement thermique du massif et des échanges sonde-massif. On a souhaité réaliser une modélisation numérique détaillée du dispositif expérimental sous-sol du projet afin de compléter l'étude du comportement d'un massif rocheux au stockage & déstockage de chaleur. Deux outils de simulation numérique ont été mis en œuvre : Comsol Multiphysics (simulation numérique par éléments finis) & Marthe (simulation numérique par volumes finis). L'association des deux modélisations Comsol et Marthe a permis d'obtenir une bonne représentation numérique, à différentes échelles géométriques et de durée de temps, du principe de stockage-déstockage de chaleur dans un massif rocheux en sous-sol. Les modélisations du présent travail ont poursuivi & complété, par des travaux mettant en œuvre des approches déterministes et une résolution numérique des équations décrivant le système du géostockage thermique diffusif, une première modélisation analytique monodimensionnelle transitoire des transferts conductifs de chaleur dans le massif rocheux réalisée par un autre partenaire du projet.

Lors de la simulation du test de choc thermique par Comsol, une précision remarquable a pu être atteinte sur les évolutions spatio-temporelles de la température au regard des phénomènes modélisés à caractère particulièrement transitoire. Seule la partie superficielle du dispositif, entre 0 et 10 m de profondeur, n'a pu être correctement modélisée. Les calculs de la simulation s'écartent des résultats expérimentaux pour cette tranche des terrains dans la partie du refroidissement, le modèle « dissipant trop » par rapport à ce qui est observé.

Le dispositif expérimental présente dans la tranche concernée plusieurs interfaces : massif rocheux/atmosphère à 0 m ; mousse de polyuréthane isolant superficiel présence/absence à 5 m ; tubage PVC (non-modélisé) présence/absence à 8 m. Il est probable que le pas vertical du modèle géométrique, de l'ordre d'un mètre, n'est pas suffisamment précis pour cette tranche superficielle, et peut expliquer cette différence entre les résultats simulés et les données expérimentales.

La principale difficulté rencontrée au cours du travail de modélisation Marthe est également la simulation de l'évolution des températures dans les quinze premiers mètres de profondeur. La condition limite thermique retenue sur la partie supérieure du domaine modélisé est de type Dirichlet (température imposée). Mais pour être réalistes, les valeurs imposées doivent correspondre aux températures mesurées au sol, car elles intègrent les phénomènes de conduction et convection de l'air ainsi que le rayonnement. Or ces données ne sont pas disponibles (et le sont rarement). A défaut, la condition limite a été « construite » à partir des chroniques de températures de l'air.

D'autre part, la transition de température entre la zone saturée (sous le niveau hydrostatique) et la zone dénoyée (de 0 à 30 mètres de profondeur), ainsi que le calcul du champ de températures dans la zone dénoyée sont délicats à réaliser avec la version actuelle du code Marthe. La solution de contournement adoptée a consisté à considérer un milieu saturé sans écoulement.

Les difficultés notées lors de la modélisation de la tranche superficielle des terrains ne sont pas spécifiques au cas étudié. Elles vont d'ailleurs faire l'objet d'un travail de post-doctorat au sein du département Géothermie du BRGM. Il s'agira de modéliser les effets de surface de façon à prédire le comportement hydrique-thermique du sol près de la surface (jusqu'à 1 m environ). Cela permettra de préciser dans quelles conditions les modèles d'échangeurs géothermiques devront prendre en compte ou non de manière couplée les échanges hydriques et thermiques dans le sol et, le cas échéant, de proposer des conditions aux limites à la surface du sol adaptées en fonction de la profondeur d'enfouissement des échangeurs.

On détermine la géométrie d'un géostockage thermique diffusif constitué par un champ de sondes géothermiques verticales pour que le géostockage puisse minimiser les pertes thermiques par diffusion dans un massif rocheux encaissant. Dans l'hypothèse où l'on peut isoler thermiquement la surface supérieure du géostockage, ce qui est généralement possible puisqu'il s'agit de la surface supérieure du dispositif en contact avec l'atmosphère, le volume qui minimise les pertes thermiques par diffusion dans le massif encaissant hors aquifère est un cylindre dont la hauteur est égale au rayon. On évalue le temps caractéristique de stockage d'une sonde unique du dispositif expérimental par rapport au géostockage optimal. Le temps caractéristique de la sonde unique de 180 m de profondeur est de 13% du temps caractéristique d'un géostockage optimal. En d'autres termes, la sonde unique du dispositif expérimental Solargeotherm perdra (diffusera) huit fois plus rapidement la chaleur stockée qu'un dispositif à géométrie optimale. Un géostockage de chaleur intersaisonnier n'est pas praticable pour des dispositifs comportant une ou quelques sondes géothermiques. L'allongement de ces dispositifs est trop défavorable et la dissipation de chaleur dans le massif encaissant trop rapide par rapport à la chaleur contenue pour pouvoir compter sur une chaleur stockée pendant des périodes de plusieurs mois. Lorsque cependant le dispositif de géostockage s'approche d'une géométrie optimale, les pertes thermiques par diffusion dans le massif encaissant diminuent très rapidement et des délais de stockage thermique plurimensuels apparaissent envisageables.

En matière de calculs numériques, les modélisations réalisées dans le cadre du présent travail avec les deux outils logiciels Comsol & Marthe permettent une liberté dans la simulation ultérieure de plans d'expérience associés au dispositif expérimental Solargeotherm. Elles rendent également possible la modélisation d'un champ de sondes optimal pour géostockage thermique diffusif et la simulation de scénarios pour ce dispositif optimal. Des investigations sur les conditions de stockage ou de déstockage de chaleur qui ne seraient pas assurées par le dispositif expérimental de Montauriol (températures & puissance d'injection élevées, cinétiques particulières pour le stockage & le soutirage de chaleur, etc.) pourraient être également menées basées sur les modèles numériques établis. Enfin, d'un point de vue méthodologique, des développements visant à coupler le modèle massif rocheux & le modèle de sonde géothermique pour rendre compte de façon plus réaliste des variations verticales de la puissance injectée pourraient être envisagés.

## Bibliographie

**Abgrall.M., Ausseur.J.Y., Baudoin.A., Bernard.D., Jean.P., Moreau.C.F., Morfaux.P., Padet.J., Sauty.J.P.** (1985) – Etude de faisabilité d'un projet de stockage par conduction thermique dans la craie non-saturée. Rap. BRGM 85 SGN 612 CHA. 55 p.

**Carslaw H.S., Jaeger J.C.** (1959) – Conduction of Heat in Solids. Oxford Science Publications. 509 p.

**Dedulle.JM.** (2011) – Modélisation Comsol 3D du dispositif Solargeotherm. Rapport d'étude Iris Technologies n° 11\_04\_122

**Delaleux F., Py X., Olives R.** (2012) – Solargeotherm 2008-2011, Rapport final, Janvier 2012, Laboratoire PROMES équipe SHPE.

**Lanini.S., Nguyen.D.** (2011) – Mise en œuvre et interprétation d'un test de choc thermique distribué. Rap. BRGM/RP-59271-FR. 63 p., 16 ill., 3 tab., 2 ann.

**Nguyen.D., Marchal.JP.** (2010) – Projet Solargeotherm : identification et contexte géologique du site expérimental – Rap. BRGM/RP-57281-FR, 35 p., 12 ill., 4 ann.

**Nussbicker.J., Mangold.D., Heidemann.W. and Mueller-Steinhagen.H.** (2003) – Solar assisted district heating system with duct heat store in Neckarsulm-Amorbach (Germany), Proceedings of ISES Solar World Congress 2003, Goeteborg (Schweden), 14.-19.06.2003.

**Witte.H.J.L., Van Gelder.A.J.** (2005) – Three years monitoring of a borehole thermal energy store of a UK office building. In Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption - Fundamentals, Case Studies and Design, Izmir, Turkey, 6-17 June 2005

**Projet Solargeotherm** : <http://elias.univ-perp.fr/~solargeotherm/>





## **Annexe 1**

### **Fiche de synthèse du projet Solargeotherm**



## Projet SOLARGEOTHERM

<http://eliaus.univ-perp.fr/~solargeotherm/>

### Fiche de synthèse du projet

L'utilisation de capteurs solaires thermiques aboutit à une production de chaleur fortement intermittente et décalée dans le temps par rapport aux besoins. La possibilité de stocker et de déstocker de façon optimale cette énergie dans un massif rocheux est étudiée et modélisée. Le projet s'attache à évaluer les capacités d'un massif rocheux pour le stockage et le déstockage de l'énergie thermique produite par une installation solaire, via un transfert de chaleur vers le sous-sol par sondes géothermiques. Le projet maîtrise complètement, par régulation, les paramètres de stockage et déstockage, en dehors de toute interférence d'utilisation parasite. Cette liberté de paramétrage permet de préparer dans les meilleures conditions la modélisation du comportement thermique du massif rocheux et des échanges sonde-massif. L'optimisation des échanges thermiques et l'équilibre dans le temps de ces échanges sont étudiés en paramétrant notamment les intervalles de stockage-déstockage non nécessairement inter-saisonniers.

Le projet envisage un site d'étude implanté sur une formation géologique homogène, en dehors de tout aquifère ou de circulation d'eau dans des fractures. Le site d'étude est équipé de trois sondages géothermiques de 200 mètres de profondeur réalisés à proximité l'un de l'autre, de 40 m<sup>2</sup> de capteurs solaires thermiques et d'aérothermes faisant fonction de dispositif de dissipation thermique. Une fibre optique destinée aux mesures de température instrumente les sondages. Une étude géologique de la fracturation du massif rocheux est menée par sondage, diagraphie et géophysique de surface. Les paramètres thermo-physiques du massif rocheux font l'objet d'une acquisition sur des échantillons prélevés de roche, et par la méthode du test de réponse thermique in-situ. Le comportement thermique du massif, celui du transfert thermique sonde-massif ainsi que celui du stockage et du déstockage de chaleur sont modélisés, et le calage des modèles réalisé sur la base des données recueillies par le dispositif expérimental dans le cadre de plans d'expérience établis.

La durée totale du projet est de 36 mois. Le projet planifie la tâche de suivi du stockage et déstockage thermique sur deux cycles annuels complets. Le dispositif expérimental du projet est implanté dans les Pyrénées-Orientales, sur la commune de Montauriol (N 42°34'28.67" – E 2°42'20.76"), dans le contexte géologique des schistes cambriens du massif des Aspres. Le livrable final du projet Solargeotherm est un guide de conception et de bonnes pratiques des installations géothermiques utilisant la ressource du stockage dans un massif rocheux de l'énergie thermique produite par une installation solaire, avec l'objectif de restituer cette énergie pour satisfaire les besoins de chauffage l'hiver. Le projet n'aura aucun impact environnemental sur les aquifères, le stockage thermique étant réalisé hors aquifère. La ressource en eau n'est pas exposée. Le transfert de chaleur du sous-sol par sonde géothermique est un dispositif technique éprouvé, sans risque de colmatage, corrosion du dispositif ou contamination environnementale.

Le projet est directement impliqué dans la démarche de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur résidentiel. Cette implication apparaît dans la volonté d'utiliser une énergie thermique largement disponible et gratuite, mais déphasée par rapport aux besoins de chauffage, de la stocker notamment de façon inter-saisonnière, et de la restituer lorsque les besoins de chauffage de bâtiments se font sentir. Toutes les zones de socle (40% du territoire métropolitain environ) sont concernées par cette utilisation possible d'un massif rocheux comme réservoir de chaleur basse température. On peut également penser aux régions arides, où les aquifères se situent à plusieurs centaines de mètres de profondeur, avec des possibilités de stockage géologique à moyenne profondeur de calories, comme de frigidaires d'ailleurs.

Le coût total du projet est de 1 M€ HT. Le projet s'inscrit dans le programme de recherche Stock-E (Stockage innovant de l'énergie) de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Les partenaires du projet bénéficient d'une aide financière de l'ANR variant de 30% à 75% de leur part de dépenses dans le projet.

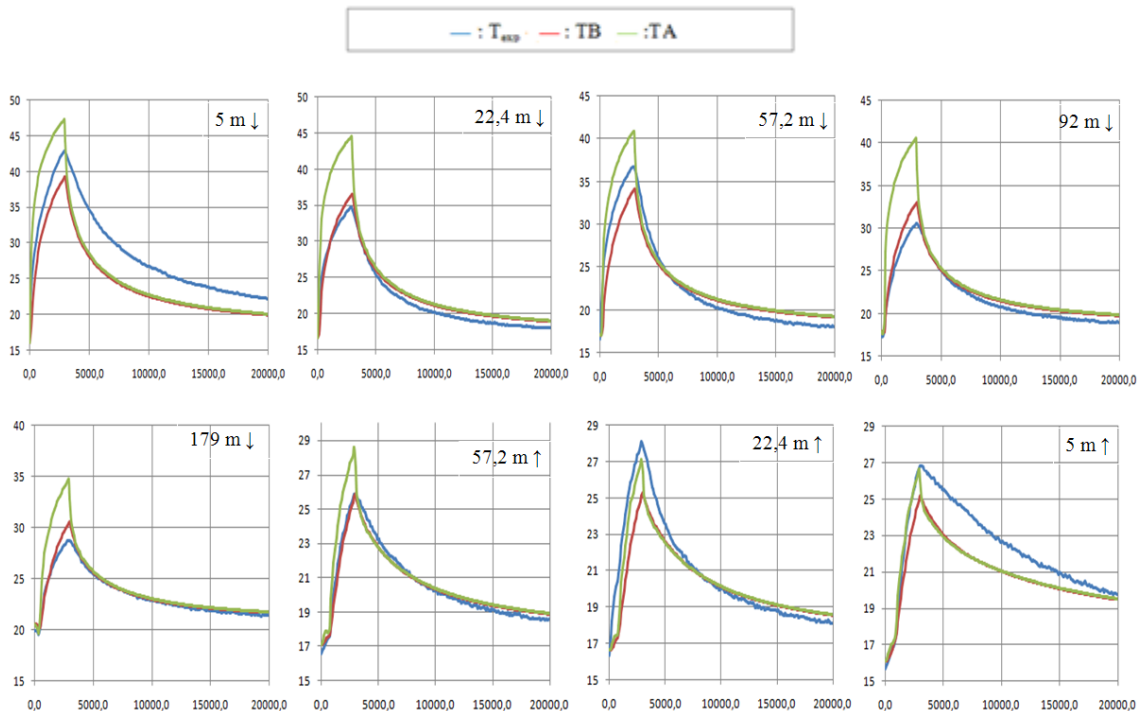
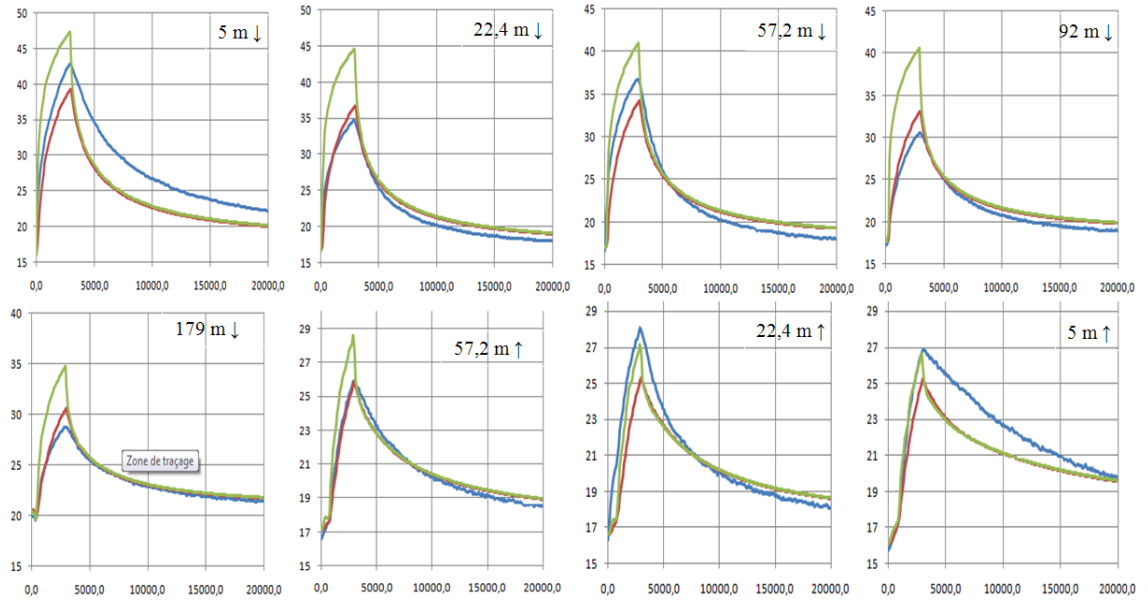
Les quatre partenaires du projet sont le BRGM (SGR/LRO - Montpellier), le laboratoire ELIAUS (Université de Perpignan UPVD), Dominguez-Energie SARL (Argelès-sur-Mer), et le laboratoire PROMES (UPR CNRS 8521 - Perpignan).



## **Annexe 2**

### **Résultats des simulations Comsol**





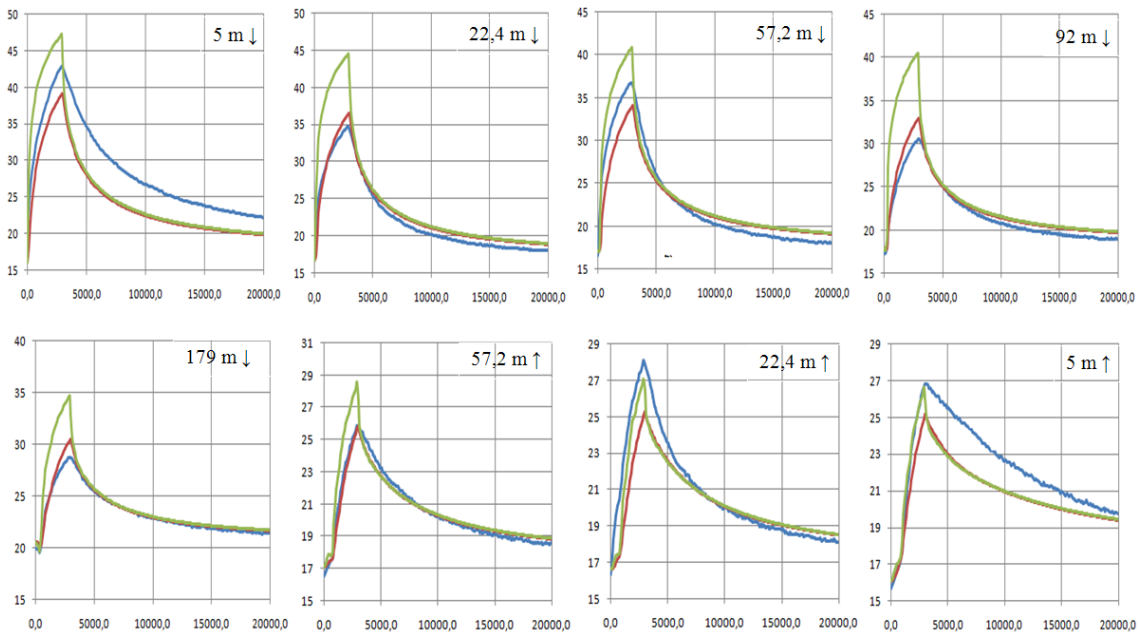


Illustration 39 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux 3,26 W/m.K

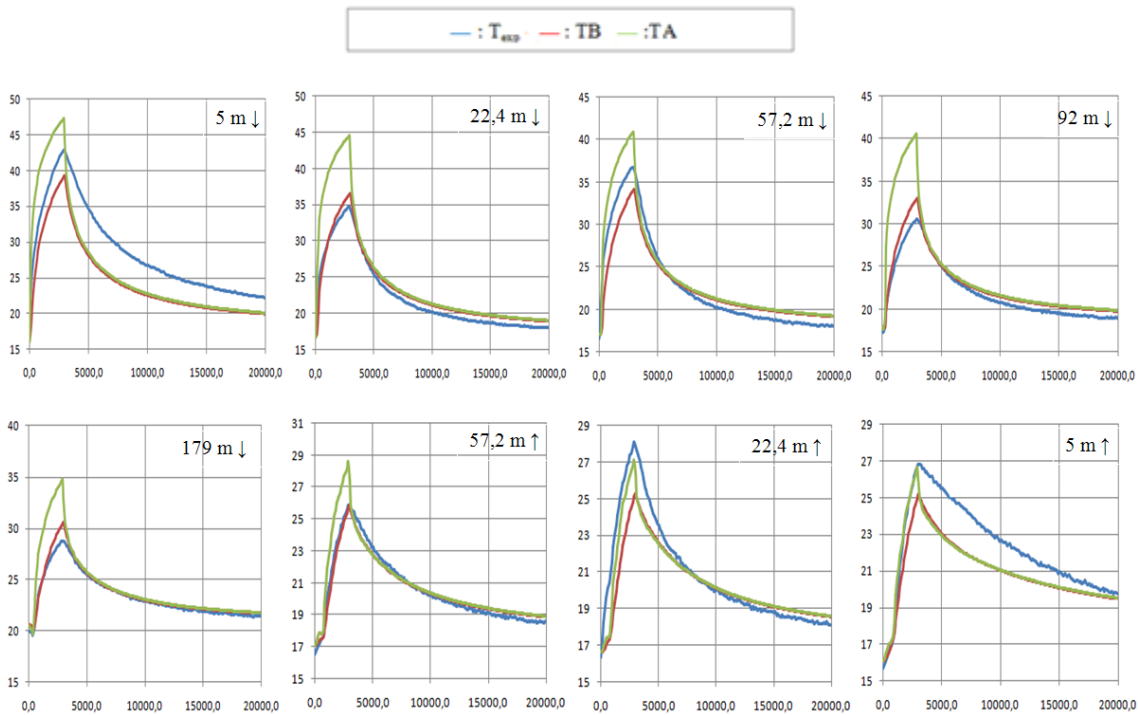


Illustration 40 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux 3,39 W/m.K



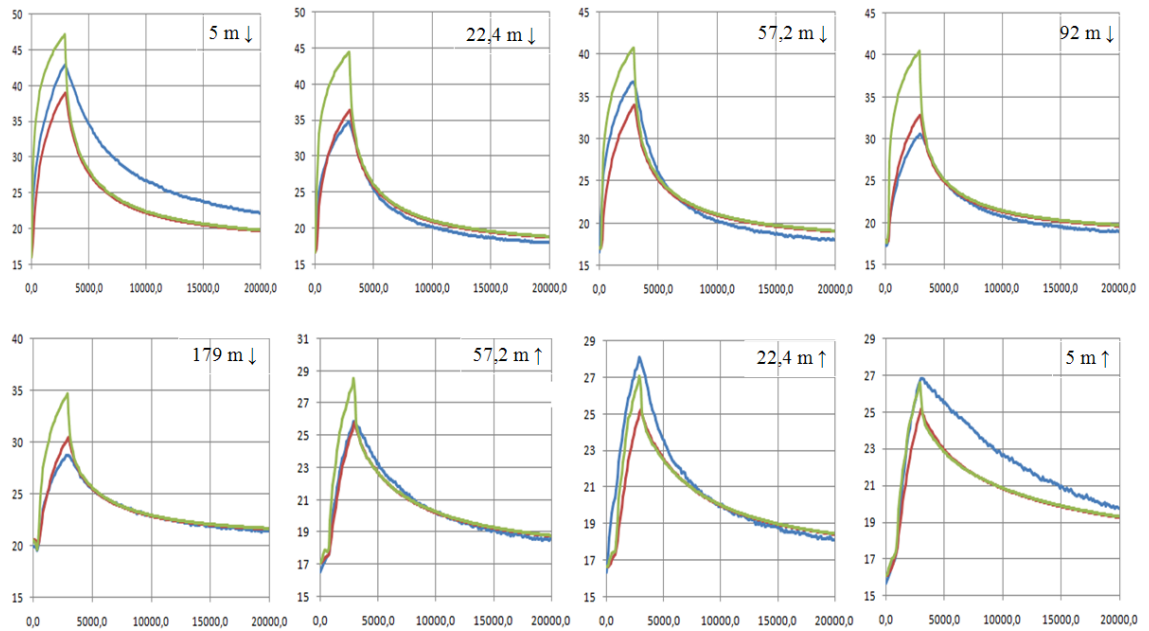


Illustration 41 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux 3,52 W/m.K

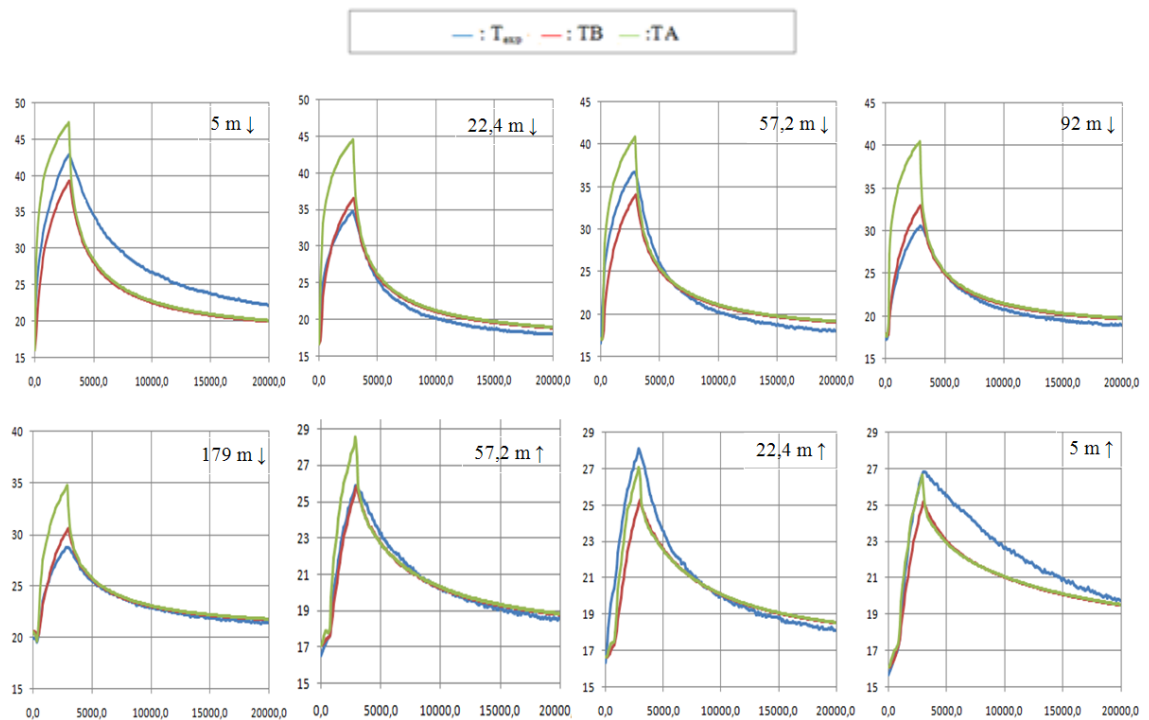


Illustration 42 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux variable fonction de la profondeur (t : 0 à 20000 s)

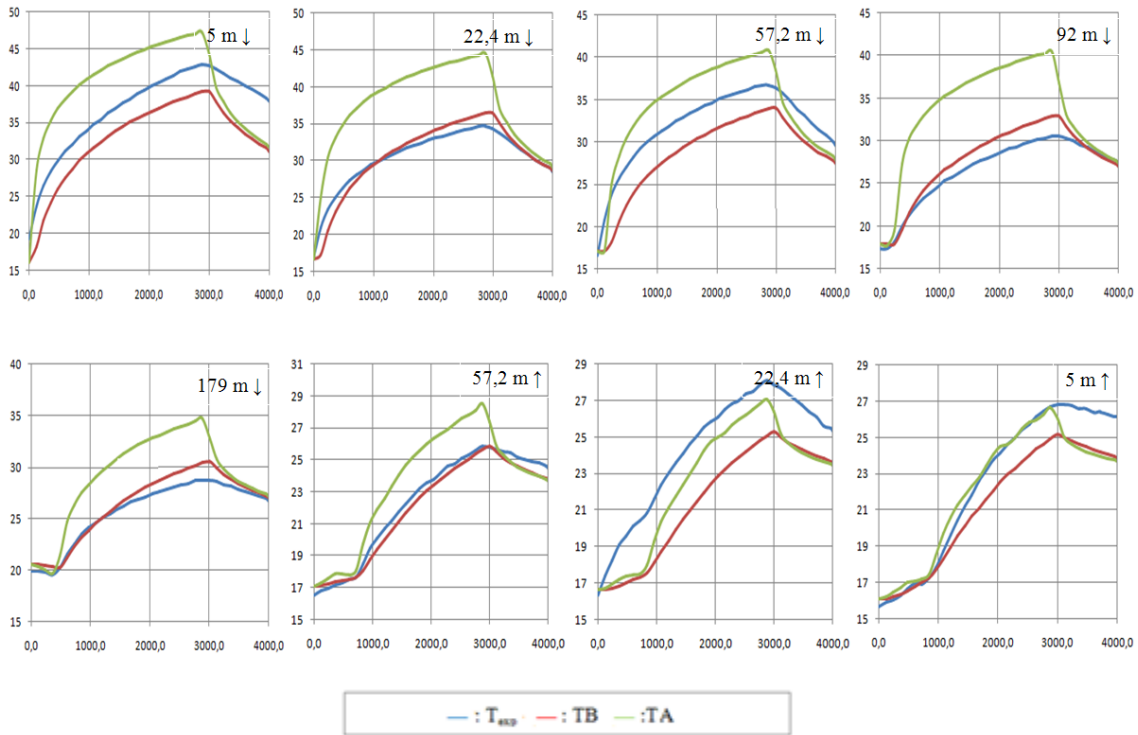


Illustration 43 – Températures de long de la sonde – Conductivité du massif rocheux variable en fonction de la profondeur (t : 0 à 4000 s)

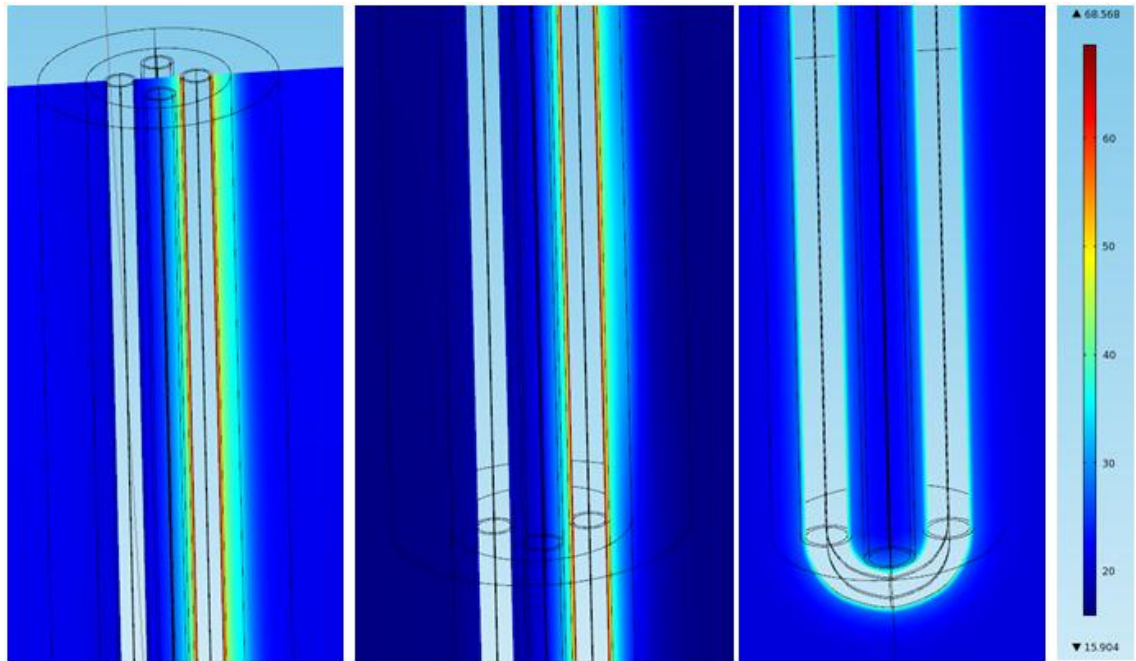


Illustration 44 – Simulation Comsol : distribution spatiale des températures à  $t = 960$  s

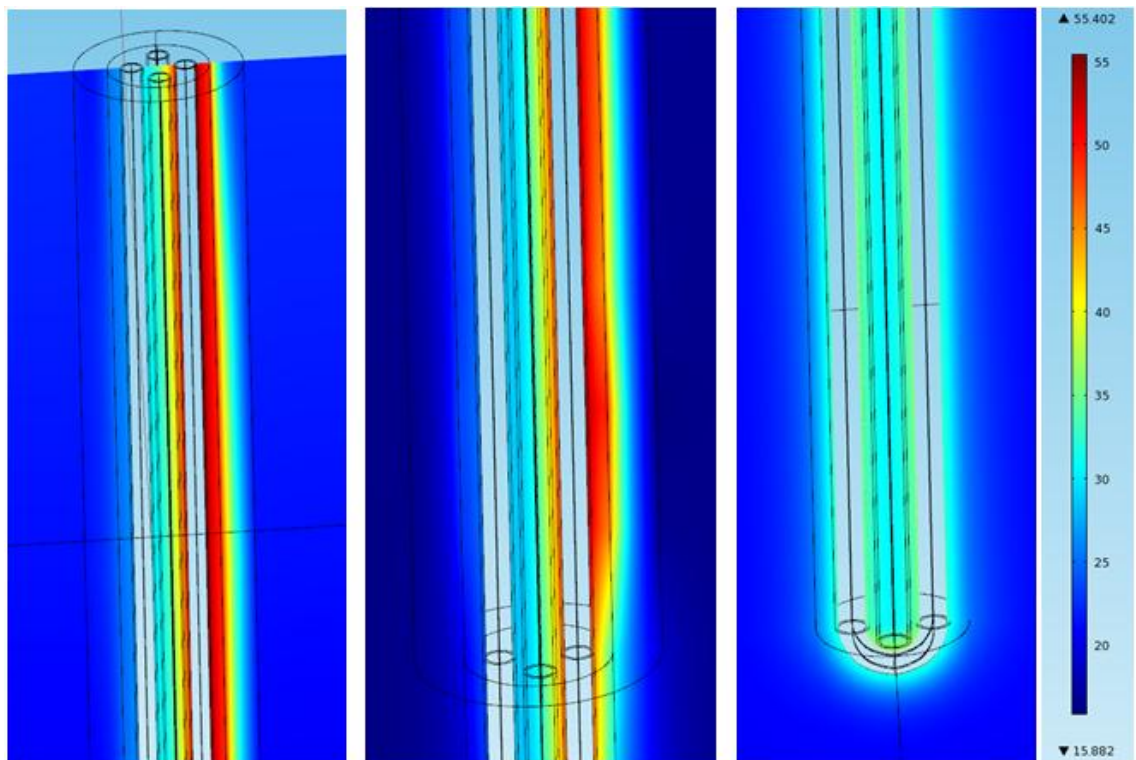


Illustration 45 – Simulation Comsol : distribution spatiale des températures à  $t = 3000$  s

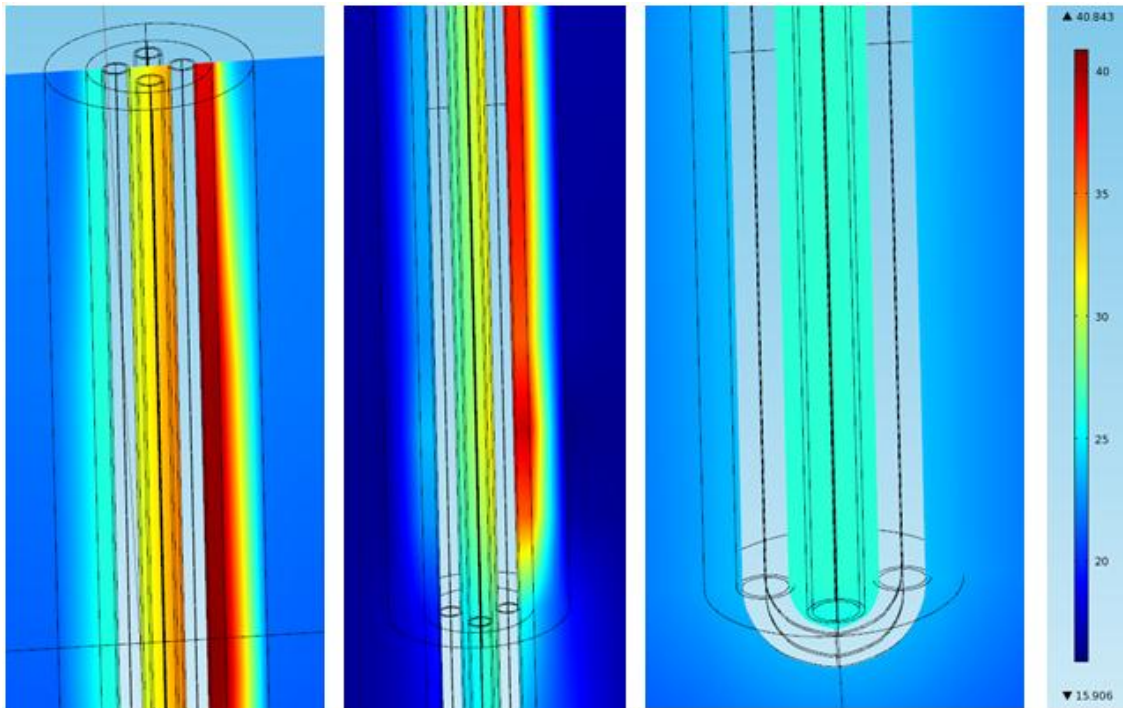


Illustration 46 – Simulation Comsol : distribution spatiale des températures à  $t = 6000$  s

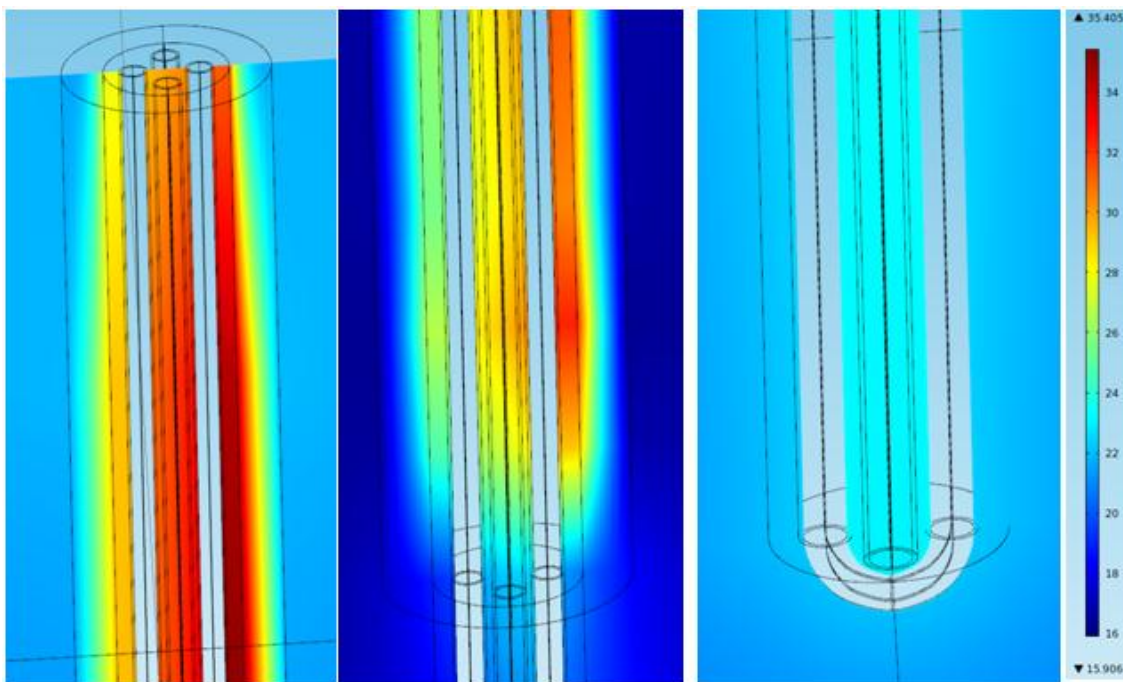


Illustration 47 – Simulation Comsol : distribution spatiale des températures à  $t = 12000$  s

## **Annexe 3**

### **Données d'entrée du modèle numérique Marthe**



## A. TEMPERATURE DANS LE MASSIF ROCHEUX

La fibre optique est solidaire des sondes géothermiques, la mesure effectuée n'est donc pas rigoureusement celle du massif rocheux mais celle de l'interface sonde-massif. Dans chaque sonde géothermique, un seul des deux U de la sonde est instrumenté, mais la fibre fait deux allers-retours (circuits de mesure jumeaux). On dispose donc de 4 mesures distinctes de température pour chaque position. Cependant, la concordance entre la coordonnée curviligne le long de la fibre optique et la profondeur dans chaque sonde géothermique n'est pas connue précisément. Si l'on a pu repérer précisément le point d'entrée dans la sonde géothermique par exploitation des mesures réalisées lors des différents tests de réponse thermique, les positions de la fibre correspondant en fond de sonde géothermique et plus encore à la sortie sont estimées avec une forte incertitude (de l'ordre de 6 mètres). Ainsi, il a été constaté que la moyenne des mesures censées correspondre à une même position dans la sonde géothermique pouvait varier jusqu'à 5°C (cas extrême à proximité de la surface) selon qu'elle était calculée à partir des 4 mesures disponibles ou seulement des deux mesures fournies par la fibre descendante. Voir deux exemples de calculs pour la sonde B dans l'illustration 48.

Profondeur moyenne (m)	01/03/2011 - 11h58			31/03/2011 - 12h00		
	Moyenne 4 mesures	Moyenne 2 mesures	Delta	Moyenne 4 mesures	Moyenne 2 mesures	Delta
<b>0,5</b>	13,97	14,81	0,84	17,57	14,68	-2,89
<b>1,5</b>	14,20	14,90	0,70	17,42	13,49	-3,93
<b>2,75</b>	15,45	15,09	-0,36	18,75	13,75	<b>-4,99</b>
<b>4,25</b>	15,33	15,23	-0,10	15,71	14,05	-1,65
<b>7,5</b>	15,55	15,77	0,22	14,68	15,20	0,53
<b>15</b>	16,20	16,23	0,03	15,97	16,05	0,07
<b>30</b>	16,63	16,56	-0,06	16,29	16,23	-0,06
<b>50</b>	16,94	16,90	-0,04	16,55	16,53	-0,02
<b>65</b>	17,19	17,14	-0,04	16,82	16,80	-0,02
<b>75</b>	17,37	17,36	-0,01	16,99	16,96	-0,02
<b>85</b>	17,56	17,54	-0,02	17,21	17,21	0,00
<b>95</b>	17,79	17,78	0,00	17,42	17,43	0,01
<b>105</b>	18,02	18,04	0,02	17,66	<b>17,66</b>	0,00
<b>115</b>	18,28	18,31	0,03	17,93	17,96	0,03
<b>130</b>	18,64	18,66	0,02	18,35	18,37	0,02
<b>150</b>	19,16	19,19	0,03	18,89	18,91	0,03
<b>165</b>	19,47	19,53	0,06	19,24	19,27	0,03
<b>175</b>	19,68	19,75	0,08	19,48	19,57	0,09
<b>185</b>	19,80	19,84	0,04	19,66	19,68	0,02

Illustration 48 – Températures moyennes sur 2 ou 4 mesures disponibles pour la sonde géothermique B

Face à ce constat, le prétraitement appliqué aux données expérimentales pour fournir des températures de référence pour caler le modèle numérique est le suivant : (i) la correspondance entre la coordonnée curviligne le long de la fibre optique et la profon-

deur dans le forage est déterminée (Illustration 49), et (ii) pour une couche comprise entre les profondeurs  $z_1$  et  $z_2$ , on moyenne les mesures de température correspondant à des positions de la fibre entre  $z_1$  et  $z_2$  pour les deux circuits de mesure jumeaux de la fibre optique (Illustration 49). A titre d'exemple, les données traitées pour les deux dates utilisées dans les simulations comme valeurs initiales sont reportées dans l'illustration 50.

Sonde	1 <sup>ère</sup> descente		2 <sup>ème</sup> descente	
	Coordonnée curviligne	Profondeur	Coordonnée Curviligne	Profondeur
A	27,707 m	0	382,815	0
	195,115 m	167,4 m	551,238	166,393
B	739,952 m	0	1129,557	0
	924,608 m	184,656 m	1314,213	184,656
C	1525,249 m	0	1918,911	0
	1707,876 m	182,627 m	2101,538	182,627

Illustration 49 – Correspondance entre la coordonnée curviligne le long de la fibre optique et la profondeur

Prise de moyenne des température sur les deux descentes			
		30/04/2010 - 23h53	31/01/2011 - 23h53
Profondeur couche	Profondeur moyenne (m)	Puits C	Puits B
0-1	<b>0.5</b>	15.1	9.5
1-2	<b>1.5</b>	14.4	11.5
2-4	<b>3</b>	14.0	13.9
3-5	<b>4</b>	14.2	15.0
5-10	<b>7.5</b>	15.1	16.7
10-20	<b>15</b>	15.5	17.0
20-40	<b>30</b>	15.5	17.1
40-60	<b>50</b>	15.9	17.3
60-70	<b>65</b>	16.2	17.5
70-80	<b>75</b>	16.5	17.7
80-90	<b>85</b>	16.7	17.9
90-100	<b>95</b>	17.0	18.0
100-110	<b>105</b>	17.3	18.2
110-120	<b>115</b>	17.6	18.5
120-140	<b>130</b>	17.8	18.9
140-160	<b>150</b>	18.5	19.3
160-170	<b>165</b>	19.0	19.7
170-180	<b>175</b>	19.3	19.9
180-190	<b>185</b>	19.4	20.0

Illustration 50 – Distributions de température imposées comme condition initiale lors des simulations Marthe



## B. TEMPERATURE EXTERIEURE

Les températures extérieures considérées dans le modèle numérique Marthe sont les données expérimentales de température relevée par le capteur C4 de l'instrumentation du champ solaire de l'installation Solargeotherm de Montauriol (Illustration 51). Ce capteur est supposé mesurer la température extérieure au sol.

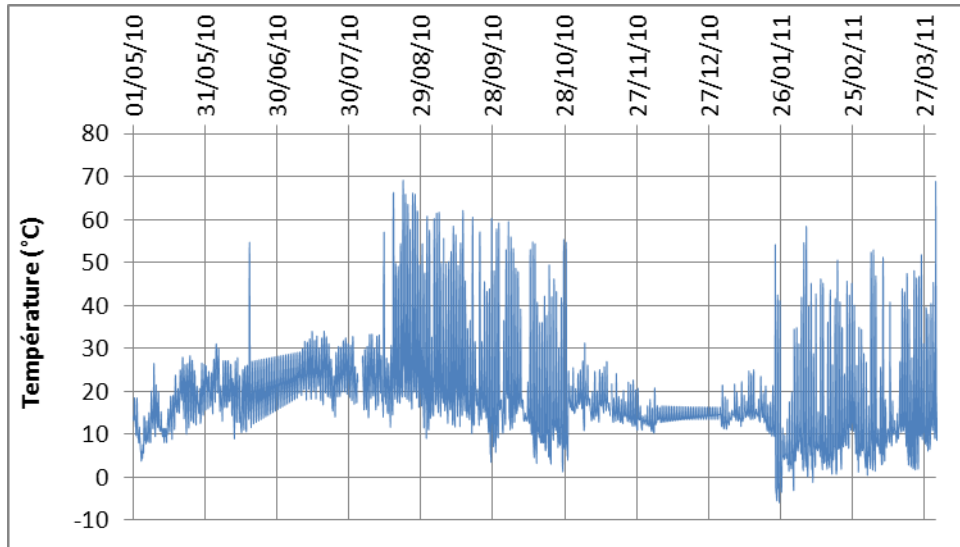


Illustration 51 – Température au sol fournie par le capteur C4 en sortie du champ solaire

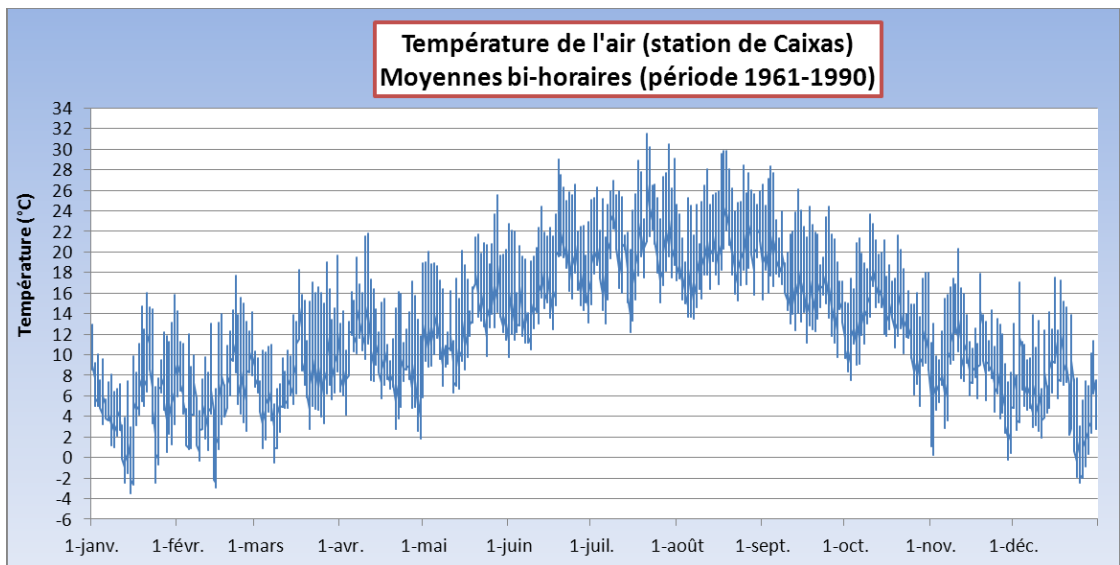


Illustration 52 – Température de l'air utilisée pour définir la condition limite (station de Caixas)

### C. IRRADIATION GLOBALE

Les données d'irradiation globale (IGP) considérées dans le modèle numérique Marthe sont issues du logiciel CalSol (source : INES - estimation de l'énergie solaire disponible pour une application énergétique - <http://ines.solaire.free.fr>) pour la localisation de Perpignan, orientation sud, inclinaison de 45°, albédo de 0,2 (Illustration 53).

	IGP en kWh/m <sup>2</sup> /jour
Janvier	3,73
Février	4,18
Mars	5,14
Avril	5,53
Mai	5,53
Juin	5,65
Juillet	5,71
Août	5,28
Septembre	4,96
Octobre	4,18
Novembre	3,32
Décembre	2,95

Illustration 53 – Irradiation globale mensuelle à Perpignan

### D. CONDUCTIVITE THERMIQUE DU MASSIF ROCHEUX ENCAISSANT

La conductivité thermique du massif rocheux considérée dans le modèle numérique Marthe (Illustration 54) est issue du traitement des résultats du test de choc thermique distribué réalisé dans le cadre du projet (Rapport BRGM/RP-59271-FR).

Conductivité thermique du massif rocheux saturé en eau (ε=10%) - W.m-1.K-1			
Couches	Profondeur	TCTD	Calage
1 à 6	0-10	3.10	3.66
7	10-20	3.10	3.66
8	20-40	3.23	3.66
9	40-60	3.40	3.60
10	60-70	3.40	3.60
11	70-80	3.60	3.60
12	80-90	3.60	3.60
13	90-100	3.40	3.60
14	100-110	3.60	3.60
15	110-120	3.70	3.70
16	120-140	3.45	3.45
17	140-160	3.45	3.45
18	160-170	3.40	3.40
19	170-180	3.00	3.00
20	180-190	3.00	3.00
21	190-200	3.00	3.00
22	200-220	3.00	3.00

Illustration 54 – Conductivité thermique expérimentale et calée du massif rocheux

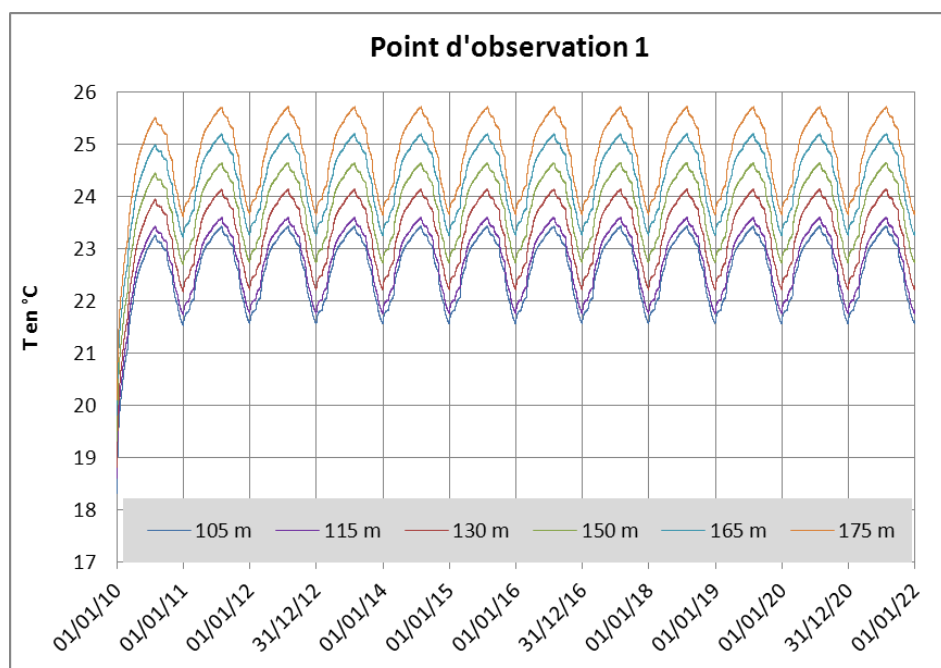
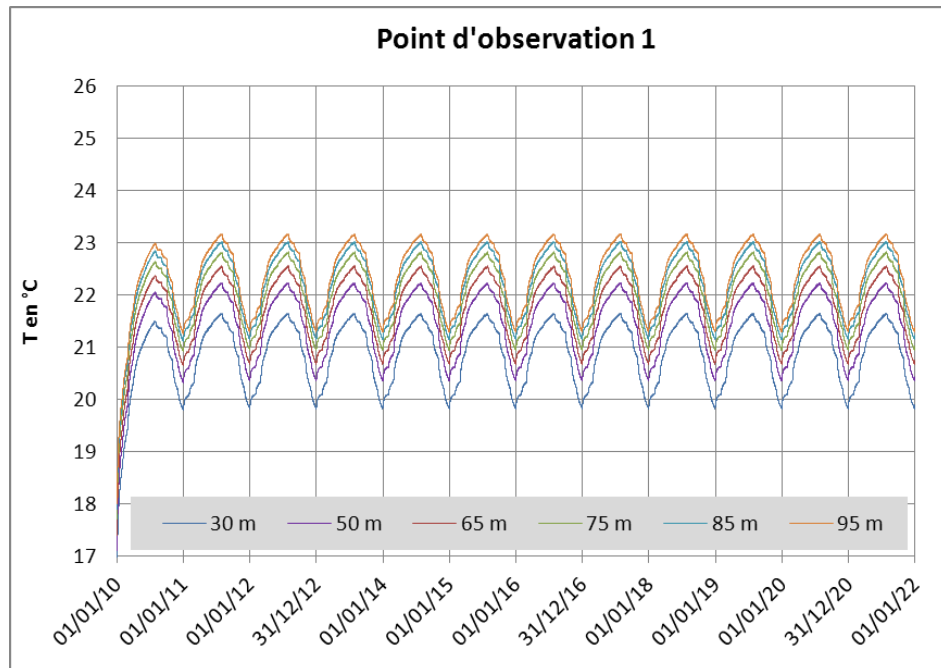
## **Annexe 4**

### **Résultats des simulations Marthe**



## A. INJECTION DE CHALEUR DANS UNE SONDE UNIQUE

- **Evolution de la température calculée au niveau des points d'observation**



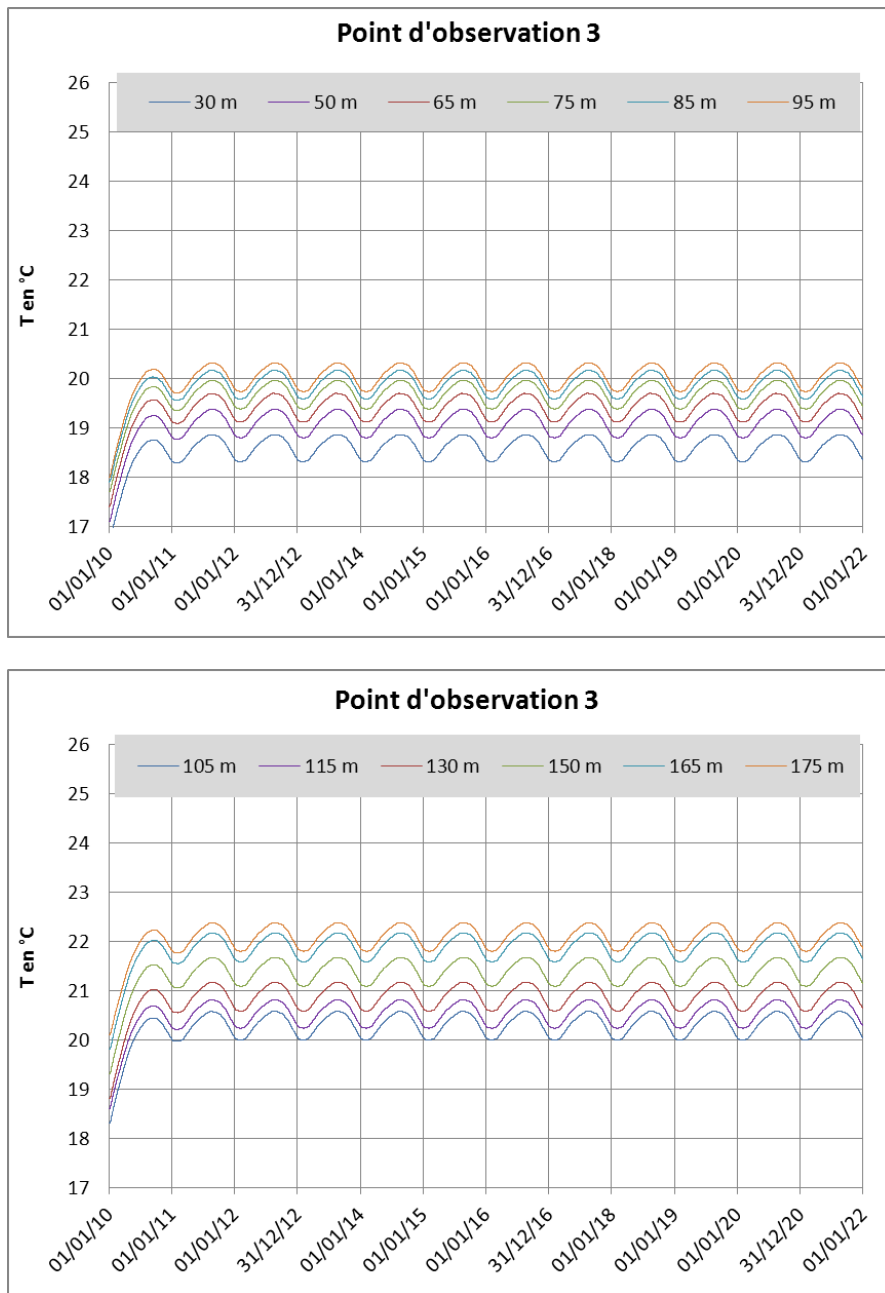


Illustration 55 – Evolution de la température du massif rocheux à différentes profondeurs lors de la simulation longue durée avec injection dans une sonde unique (points d'observation n°1 et 3)

- **Champs des variations de température par rapport à l'état initial**

Coupes verticales passant par la sonde géothermique, et vues en plan à -130 m de profondeur (couche 16)

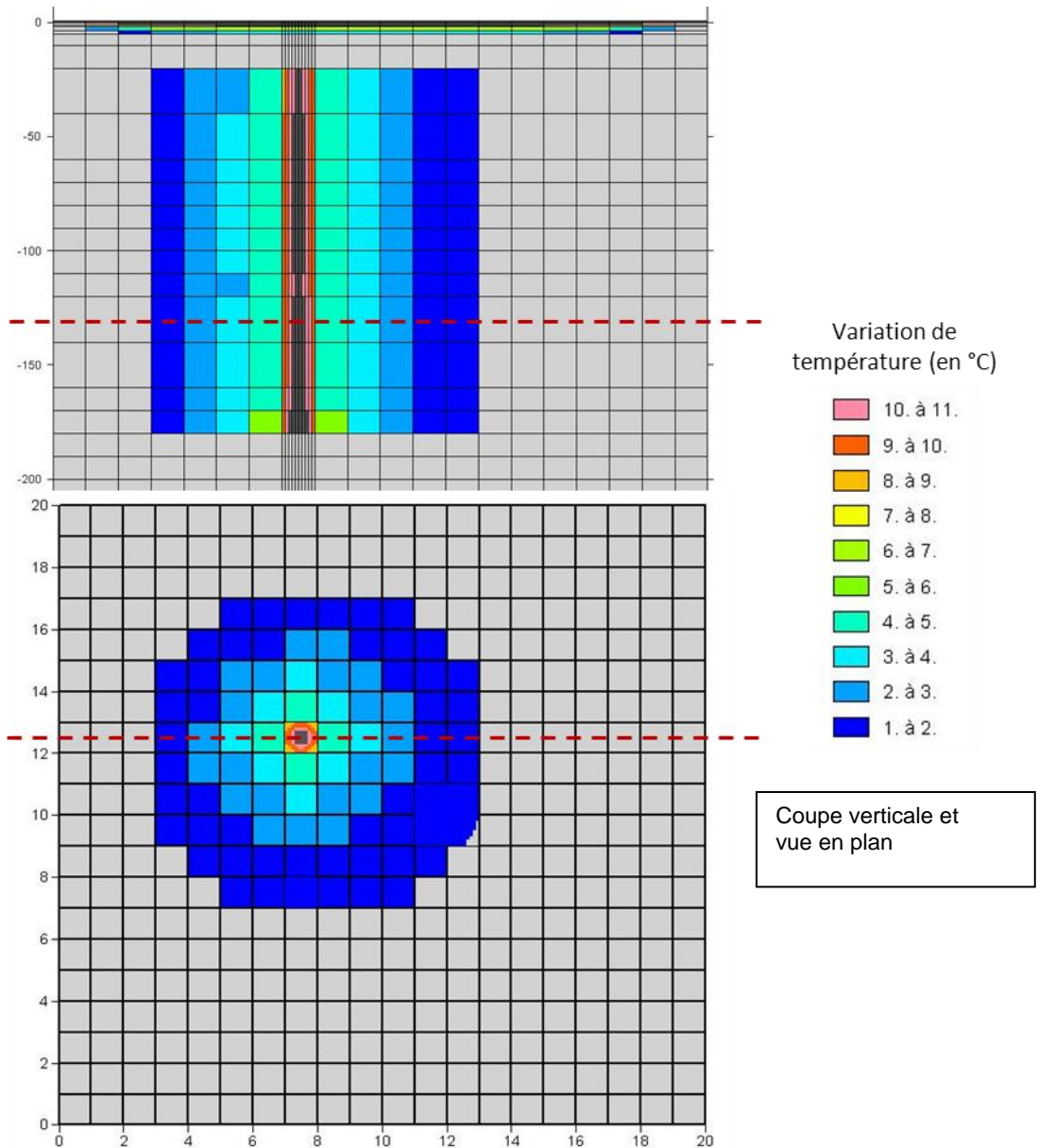


Illustration 56 – Variation de température dans le massif après six mois d'injection dans une sonde unique

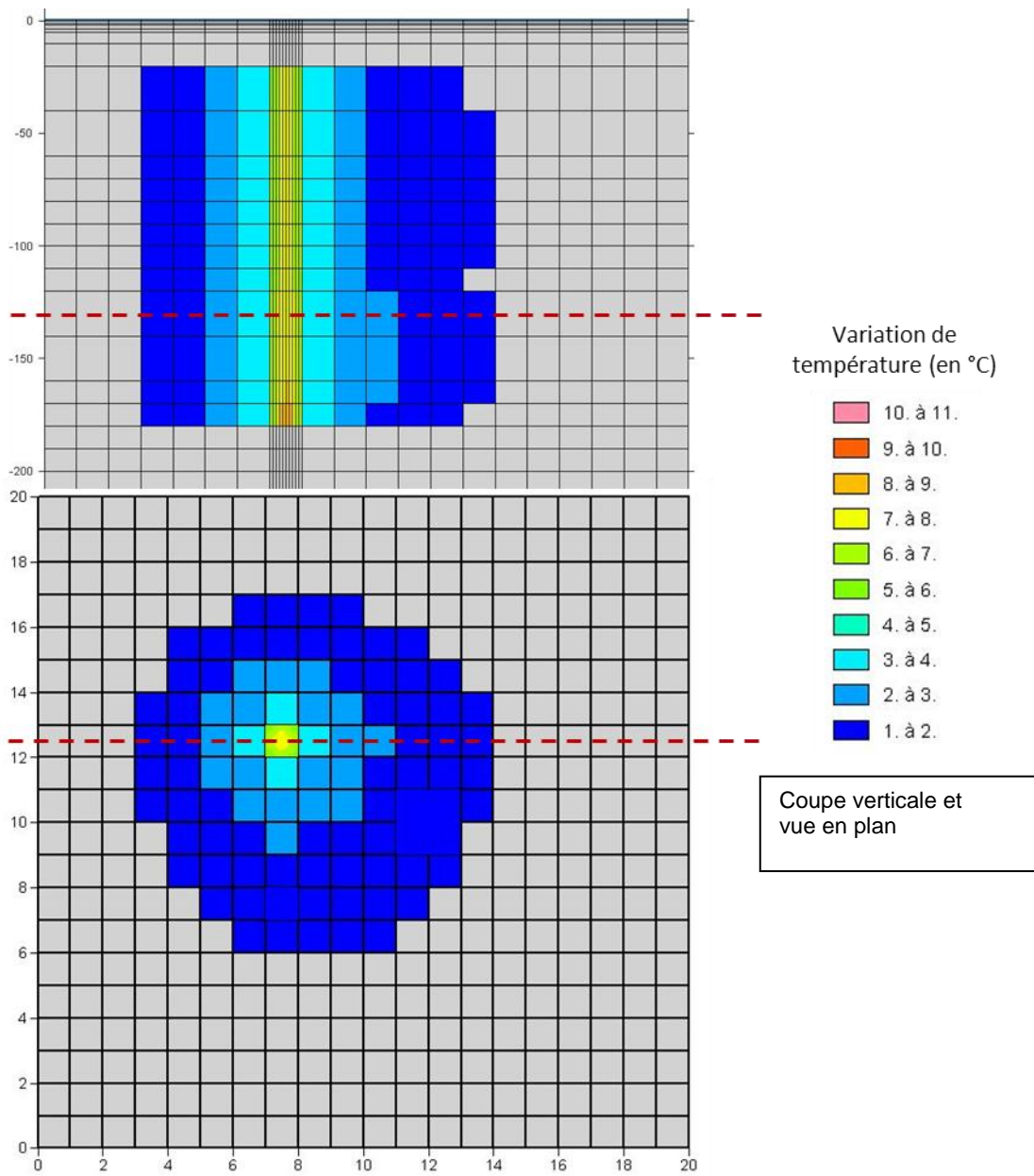


Illustration 57 – Variation de température dans le massif après six ans d'injection dans une sonde unique



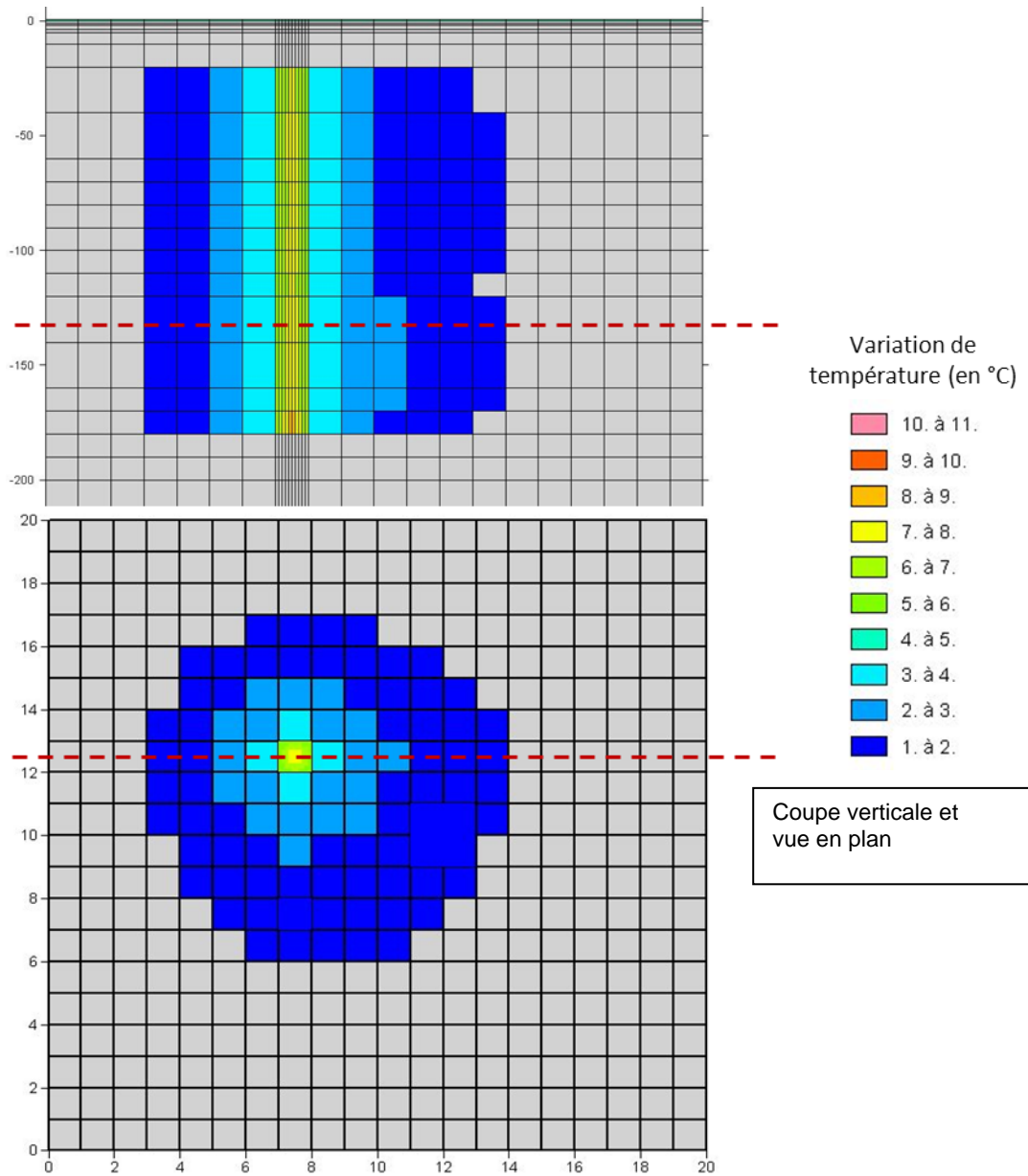
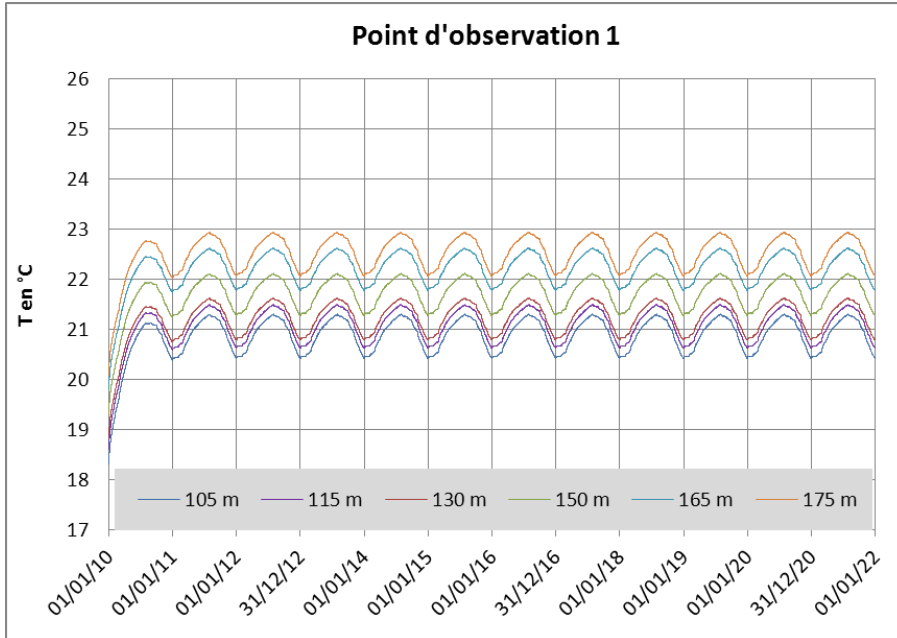
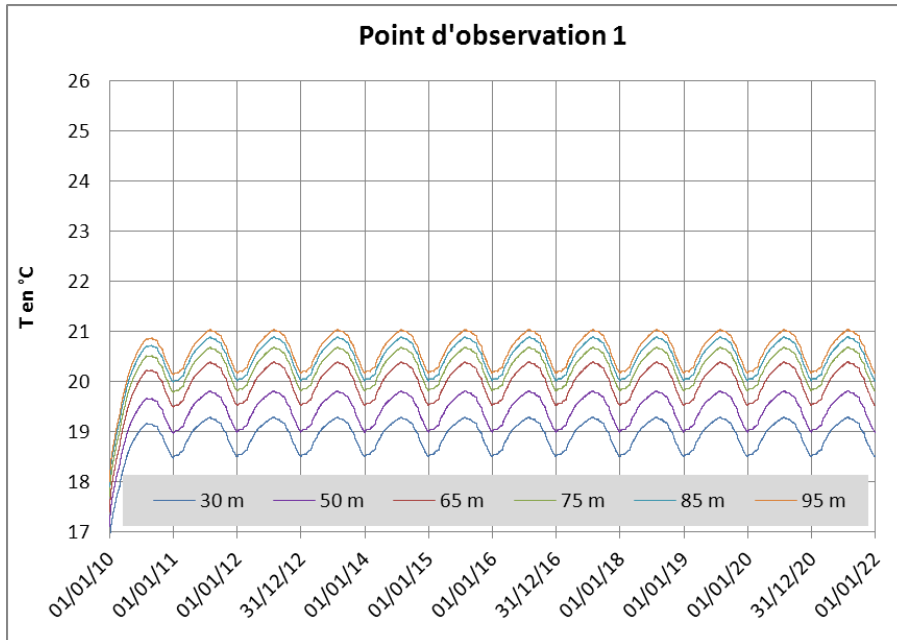


Illustration 58 – Variation de température dans le massif après douze ans d'injection dans une sonde unique

## B. INJECTION DE CHALEUR DANS LES TROIS SONDES

- Evolution de la température calculée au niveau des sondes et des points d'observation



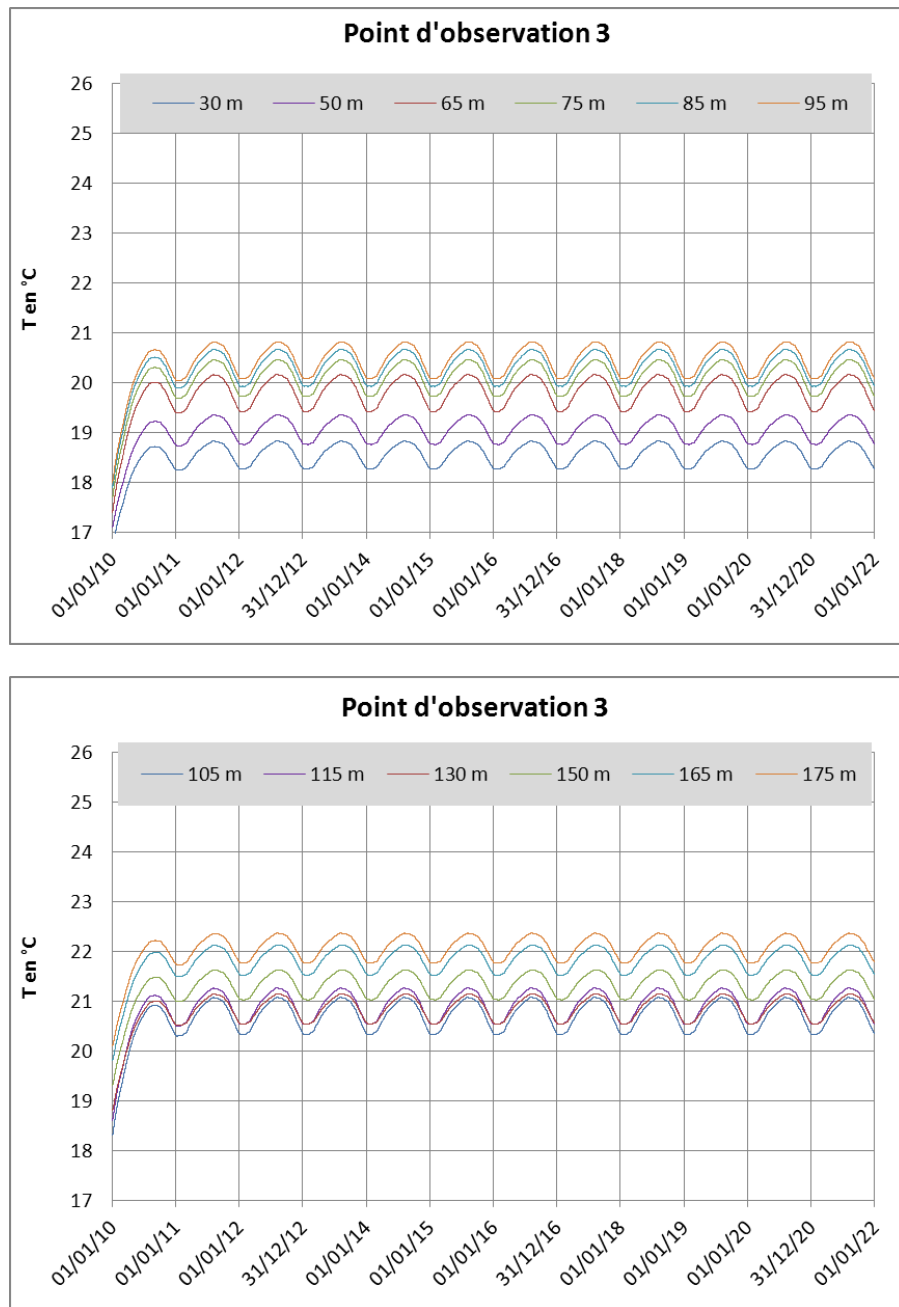


Illustration 59 – Evolution de la température du massif rocheux à différentes profondeurs lors de la simulation longue durée avec injection dans les 3 sondes (points d'observation n° 1 & 3)

• **Champs des variations de température par rapport à l'état initial**

Coupes verticales passant par la sonde géothermique, et vues en plan à -130 m de profondeur (couche 16).

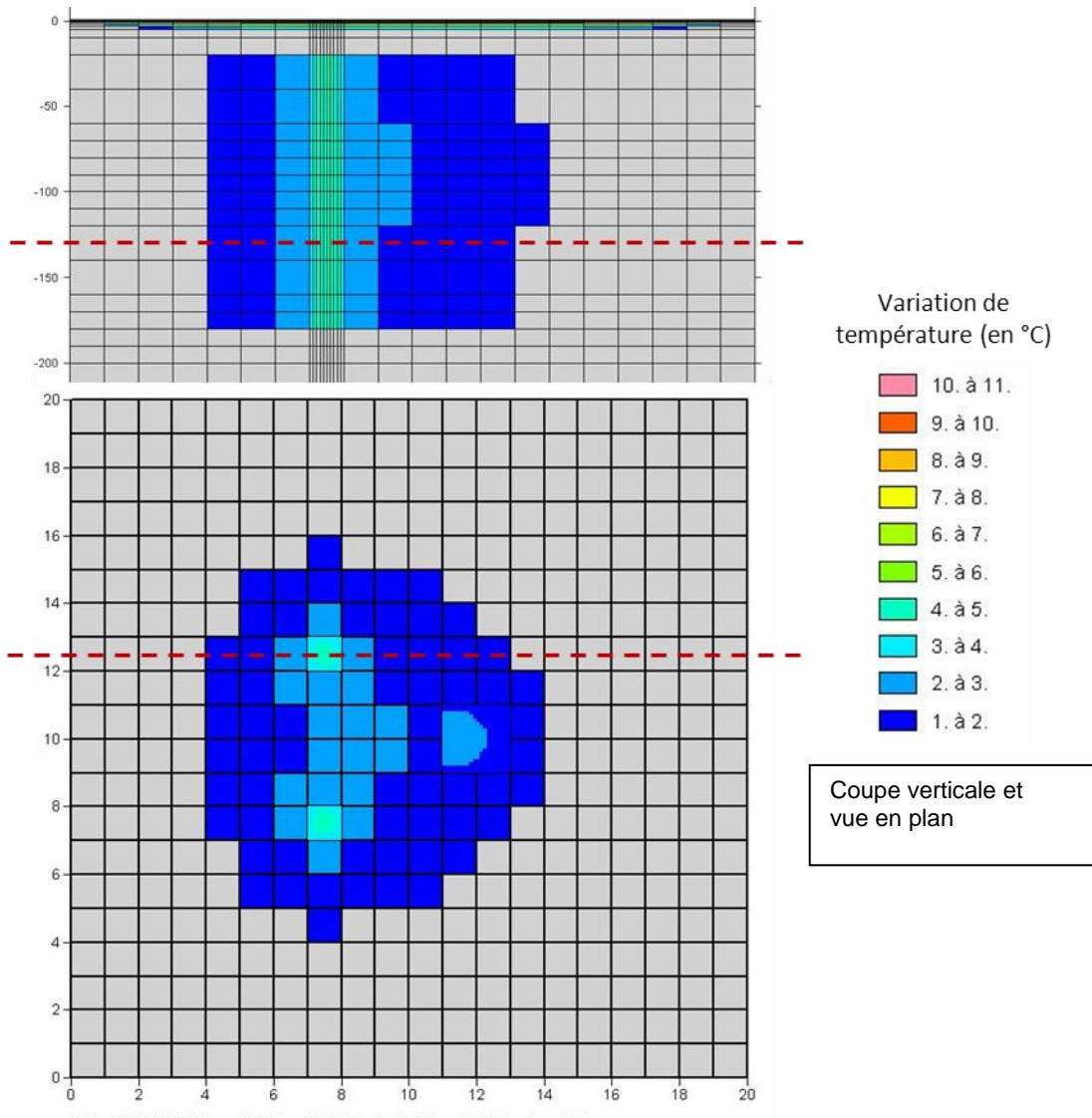


Illustration 60 – Variation de température dans le massif après six mois d'injection de chaleur dans les trois sondes

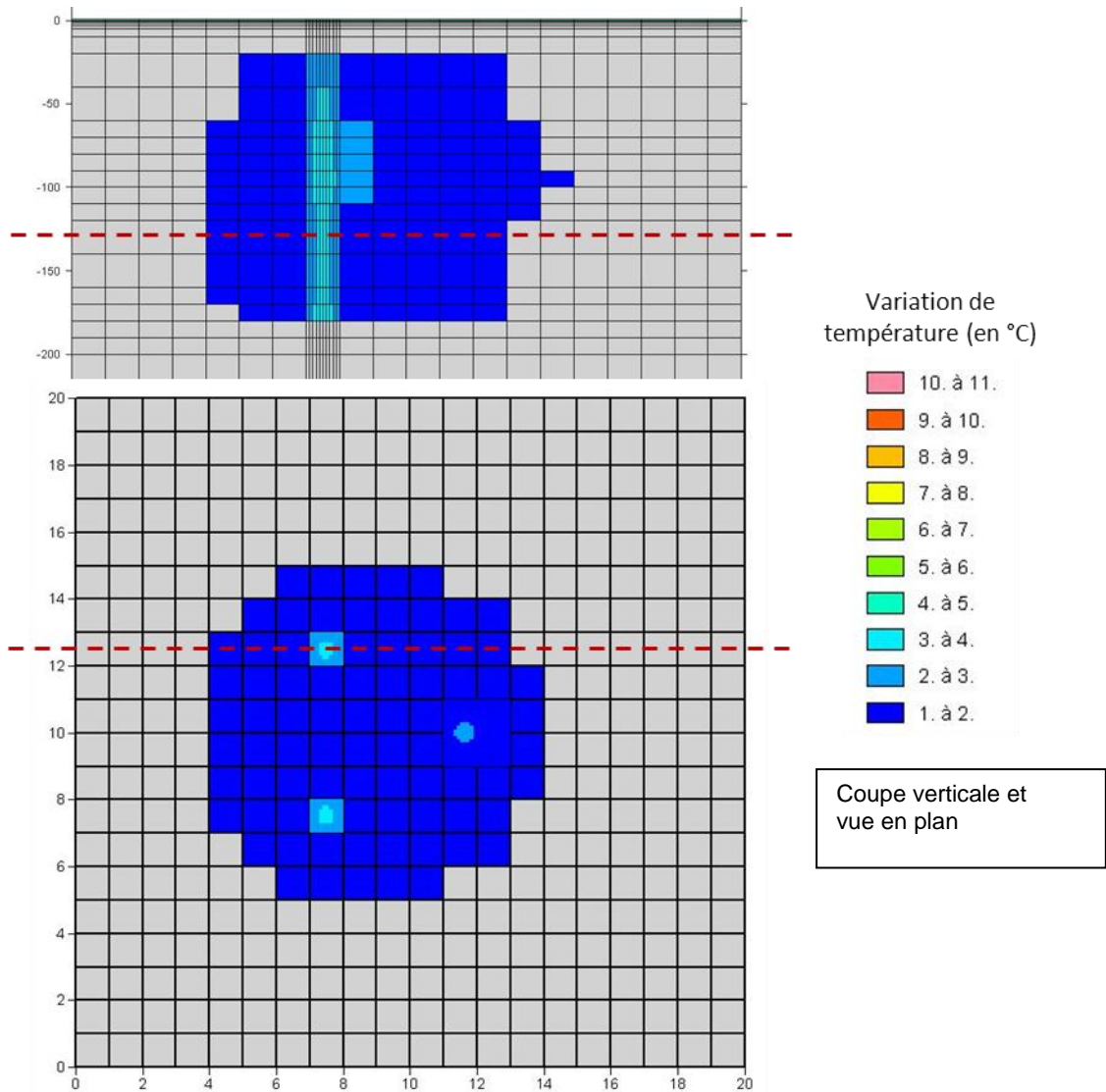


Illustration 61 – Variation de température dans le massif après six ans d'injection de chaleur dans les trois sondes

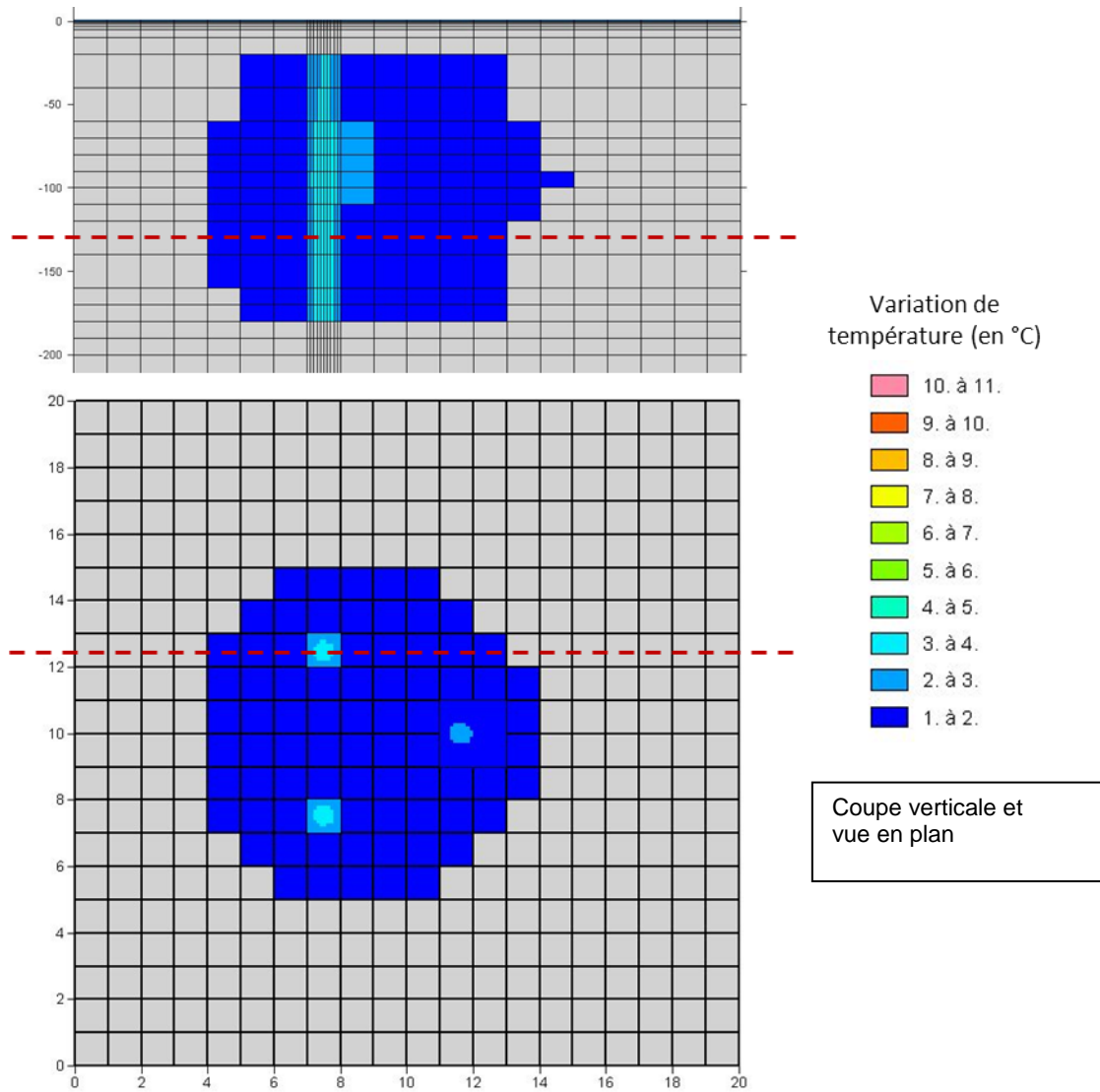


Illustration 62 – Variation de température dans le massif après douze ans d'injection de chaleur dans les trois sondes

## Annexe 5

### Données numériques

Les fichiers numériques permettant de reproduire les travaux de modélisation développés dans l'étude sont fournis pour référence (Illustration 63).

Document
Données numériques du modèle Comsol
Paramètres numériques du modèle Marthe
Texte du rapport d'étude (*.pdf).

*Illustration 63 – Contenu du cédérom joint en annexe du rapport d'étude*



**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemain  
BP 6009 - 45060 Orléans Cédex 2 - France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional Languedoc-Roussillon**  
1039, rue de Pinville  
34000 Montpellier - France  
Tél. : 04 67 15 79 80