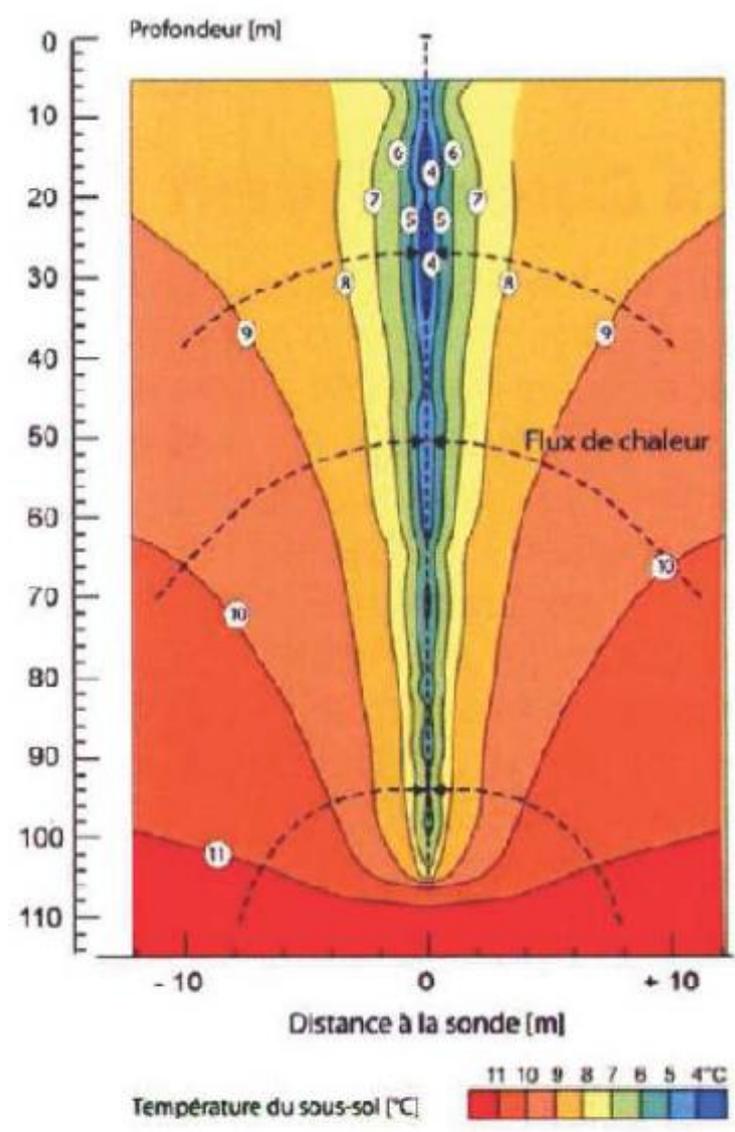


Simulation de la perturbation du sol par un puits géothermique



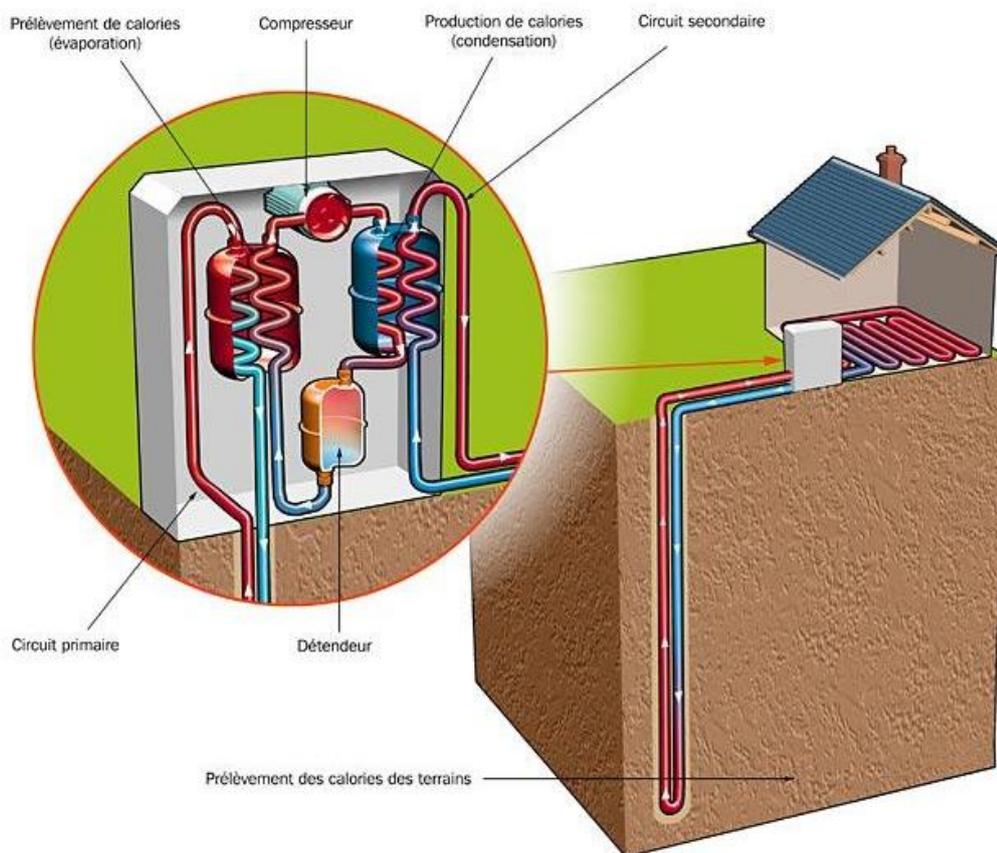
Profil dans le terrain illustrant l'influence d'une sonde géothermique verticale sur la température du sous-sol (Rybach 2001).

A) Introduction

1. Principe de l'échangeur de chaleur souterrain :

Le sous-sol de nos habitations peut être une gigantesque réserve d'énergie, en effet il possède une inertie lui conférant une température naturellement constante tout au long de l'année. Un puits géothermique permet de venir puiser les calories du sol pour les restituer à son habitation. Il est constitué d'une sonde verticale en forme de U dans lequel circule un fluide frigorigène, le fluide se réchauffe (en hiver) ou se refroidit (en été). Puis la sonde est couplée à une PAC et lui restitue la chaleur captée à l'aide d'un échangeur.

Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur sur sonde géothermique :



Pour une installation standard, la profondeur des forages peut varier de 30 à 200 m, avec un diamètre foré de 130 à 200 mm. Une fois les sondes posées dans le forage, l'espace entre le forage et les sondes est comblé par l'injection d'un ciment à prise hydraulique. Ceci permet d'assurer un bon contact thermique entre la sonde et le terrain et évite le risque d'infiltration d'eau indésirable le long des tubes échangeurs.

Avec une installation de qualité et correctement dimensionnée, le sous-sol fournit environ 70% de l'énergie thermique à la sortie de la pompe à chaleur. Les 30% restants sont fournis à la pompe à chaleur sous forme d'électricité.

2. Sujet de l'étude :

Nous souhaitons connaître les impacts d'une telle installation sur le comportement calorifique du massif de sous-sol à proximité de la sonde. Nous voulons étudier la forme et l'étendue des gradients thermiques engendrés par le captage, et la capacité du sol à retrouver sa température naturelle. En effet nous nous demandons s'il peut exister des restrictions au sujet de ces installations dans le cas où des propriétés sont rapprochées, et donc s'il y a risque de perturbation d'une sonde sur une autre.

D'après notre recherche bibliographique sur cette problématique, nous apprenons qu'il existe par exemple une norme suisse qui fixe une distance à respecter entre plusieurs sondes (SIA 384/6), elle recommande un « *espace minimal de 7 à 8 mètres entre les sondes* », ou encore une « *distance de 5 m par rapport à la bordure de parcelle, afin de limiter les influences thermiques sur les parcelles voisines.* » (la Suisse possède la plus grande densité au monde de sondes géothermiques par unité de surface, 1 installation pour 2 km²).

Comprenons le mécanisme des flux thermiques dans le sol pour bien appréhender notre problématique :

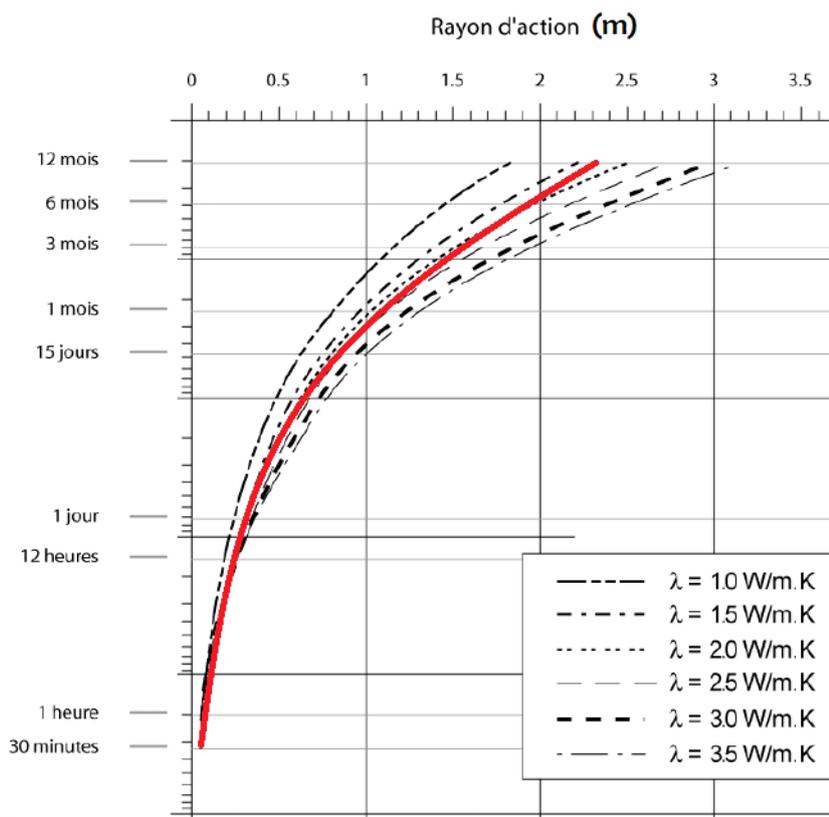
La surface du sol reçoit une quantité d'énergie sous forme de rayonnement solaire et sous forme de chaleur sensible par échange convectif avec l'air ambiant. Elle perd à son tour une partie de sa chaleur par rayonnement, par conduction et par la convection sous forme de chaleur latente en échange avec le sol et l'air ambiant respectivement. Ainsi, en surface, le rayonnement solaire influence la température du sous-sol jusqu'à environ 20 m de profondeur.

A partir de 10 à 20 m de profondeur, la température du sous-sol est stable tout au long de l'année et plus élevée de 1°C environ que la température moyenne annuelle de l'air à l'altitude considérée. La température du terrain augmente ensuite progressivement sous l'influence du gradient géothermique (en moyenne 3°C/100 m).

Analysons le comportement thermique du sous-sol sous l'influence d'une sonde:

A court terme :

Nous allons plus tard modéliser une sonde pour équiper une habitation familiale moyenne (puissance de chauffe de 7 kW), l'extraction du sous-sol atteindra alors environ 20000 kWh/an. Selon nos recherches, dans l'hypothèse d'un régime stationnaire, cela impliquerait une surface d'environ 28000 m² délimitée par un rayon de 95 mètres (flux géothermique de 0.07 W/m²), malgré le fait qu'un régime stationnaire soit peu probable en raison d'apports d'eaux souterraines fréquents. Nous avons choisi de modéliser un sol argileux de conductivité thermique égale à $(\lambda) = 1,28 \text{ W/(m.K)}$. Un abaque basé sur le calcul de l'abaissement de température en fonction de la conductivité thermique du terrain définit le rayon d'action minimum à partir duquel la perturbation locale est de 1% de celle de la source.



— Conductivité thermique de l'argile (λ) = 1,28 W/(m.K)

Par conséquent, dans notre terrain, l'abaissement de température serait négligeable au-delà de 3.5 mètres et le périmètre d'influence serait donc de 7 mètres, dans lequel aucune autre sonde ne devrait être installée afin de ne pas avoir de problème de surexploitation thermique du sol.

A long terme:

Après quelques années d'exploitation, le système atteindrait un équilibre et la température se stabiliserait. Cette baisse de température pourrait entraîner une légère baisse du coefficient de performance et une augmentation des coûts d'exploitation. Les résultats d'autres simulations indiquent qu'il faudrait arrêter l'installation sur une durée égale à la période d'exploitation (en général on considère 50 ans) pour que le terrain retrouve sa température initiale. Cette règle ne s'applique pas aux systèmes utilisant un système de recharge thermique ou ceux en présence d'une nappe souterraine active.

Nous avons pensé à la possibilité d'optimiser l'installation en isolant le massif de sol autour de la sonde et en alternant des périodes de captage des calories (hiver) et de déchargement (été). Peut-on créer un réservoir de chaleur (ou de froid) et l'exploiter à la saison suivante ? Mais finalement nous n'avons pas trouvé de publications sur ce type de système, et nous n'avons pas été capables de modéliser ce réservoir.

Notons que la température du sous-sol varie selon les régions, il faut donc adapter son installation selon sa situation. Par exemple, à 1000m de profondeur, les températures sont très variées :

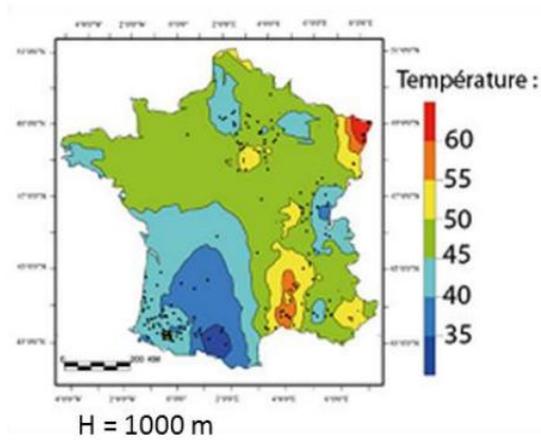
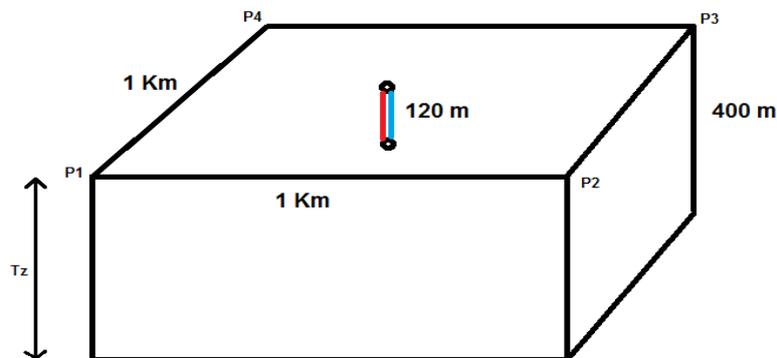


Figure 3 – Cartes de température du sous-sol à l'échelle nationale

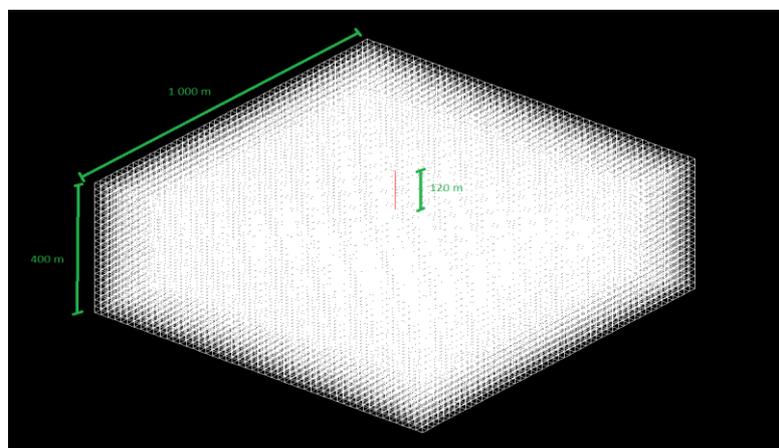
3. Les paramètres de notre modélisation :

- La modélisation de la terre :

Notre modèle d'étude représente un terrain d'argile sous une maison, il s'agit d'un pavé d'1 km de côté et de 400m de profondeur. La sonde est placée au centre et est profonde de 120m.



Représentation sous Cast3m :



- Les caractéristiques de l'argile :

Nous pouvons distinguer deux grandes familles de roches pour lesquelles les qualités calorifiques sont différentes, les roches meubles et les roches cohérentes. Notre argile fait partie des roches meubles, cette catégorie regroupe les roches ayant une faible cohésion. Les plus courantes sont : sables, graviers, limons et les mélanges associés (moraine, alluvions,...). La phase fluide est en mouvement et chaque particule de fluide transporte son énergie au cours de son déplacement.

Le transport de la chaleur s'opère, d'une part par conduction dans le terrain et d'autre part par convection associée au fluide caloporteur en mouvement.

Masse volumique = $1,45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

Chaleur spécifique ou capacité calorifique (c_p) = $0,88 \text{ KJ}/(\text{kg},\text{K})$

Conductivité thermique (λ) = $1,28 \text{ W}/(\text{m},\text{K})$

Diffusivité thermique (a) = $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

- Modélisation de la sonde:

La puissance thermique spécifique calculée pour une villa familiale de dimension moyenne est d'environ 40 à 80 W par mètre de sonde selon le type de terrain. Nous modélisons un captage en U (1 aller et 1 retour) de 7 500 kW sur une profondeur de 120m, nous avons donc un captage d'environ **62 W par mètre** de sonde. Le transport de la chaleur s'opère, d'une part par conduction dans le terrain et d'autre part par convection associée au fluide caloporteur en mouvement.



Forage d'une sonde

Les échangeurs couramment utilisés sont des sondes double-U (cf. Figure 4).

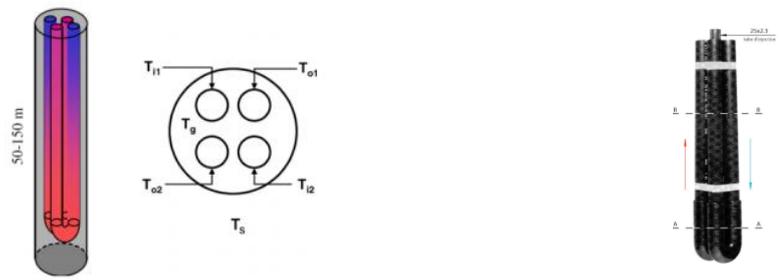
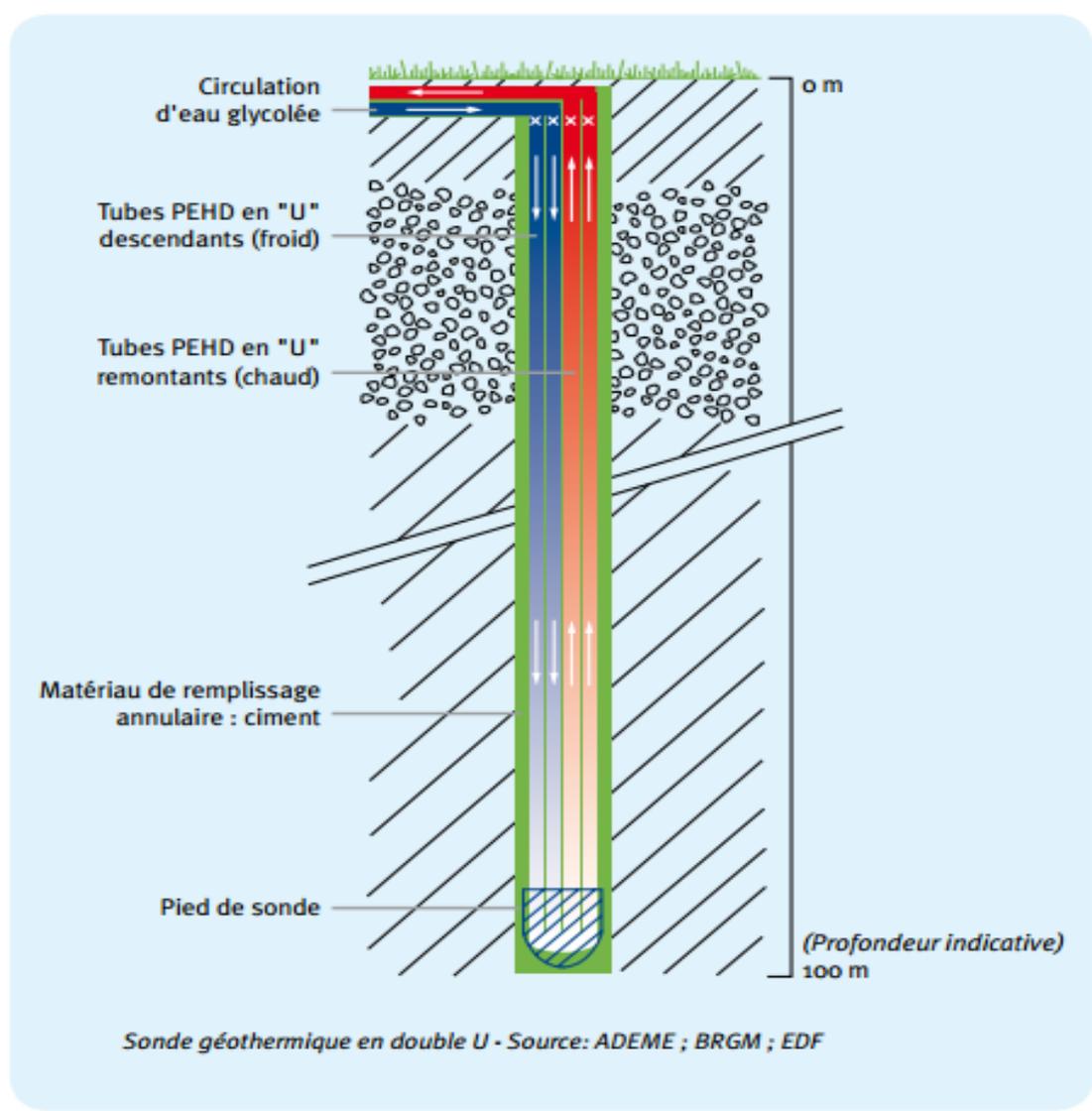


Figure 4 – Echangeur géothermique double-U. Le fluide est injecté par deux tubes i1 et 12, se réchauffe au contact du sol, puis est extrait par les tubes o1 et o2

Schéma de la mise en place d'une sonde géothermique :



B) Description phase par phase de la première étude

1. Définition du volume d'étude:

** Nous créons un volume de matière qui modélise le sol et qui contiendra le puits.*

ei=1000.;

h1=-120.;

h2=-400.;

diam1=0.1;

** Nous renseignons la section du puits avec la formule $\pi \cdot d^2 / 4$*

SEC1=PI*(DIAM1**2)/4.;

densité 20.;

**Nous créons les 3 points principaux du maillage*

p1=0. 0. 0.;

p2=0. 0. h1;

p3=0. 0. h2;

**Nous créons les droites qui nous serviront à créer le volume*

D1=D P1 P2;

D2=D P2 P3;

tracer (D1 et D2);

**Nous créons les surfaces qui par différentes translations permettent de créer le volume*

VEC1=(ei/2) 0. 0.;

SI1=(D1 et d2) trans VEC1 trans VEC1;

**Nous créons le volume*

VEC2=0. (ei/2) 0.;

VI1=SI1 VOLU TRANS VEC2 VOLU TRANS VEC2;

2. Création du puits:

**Création du puits*

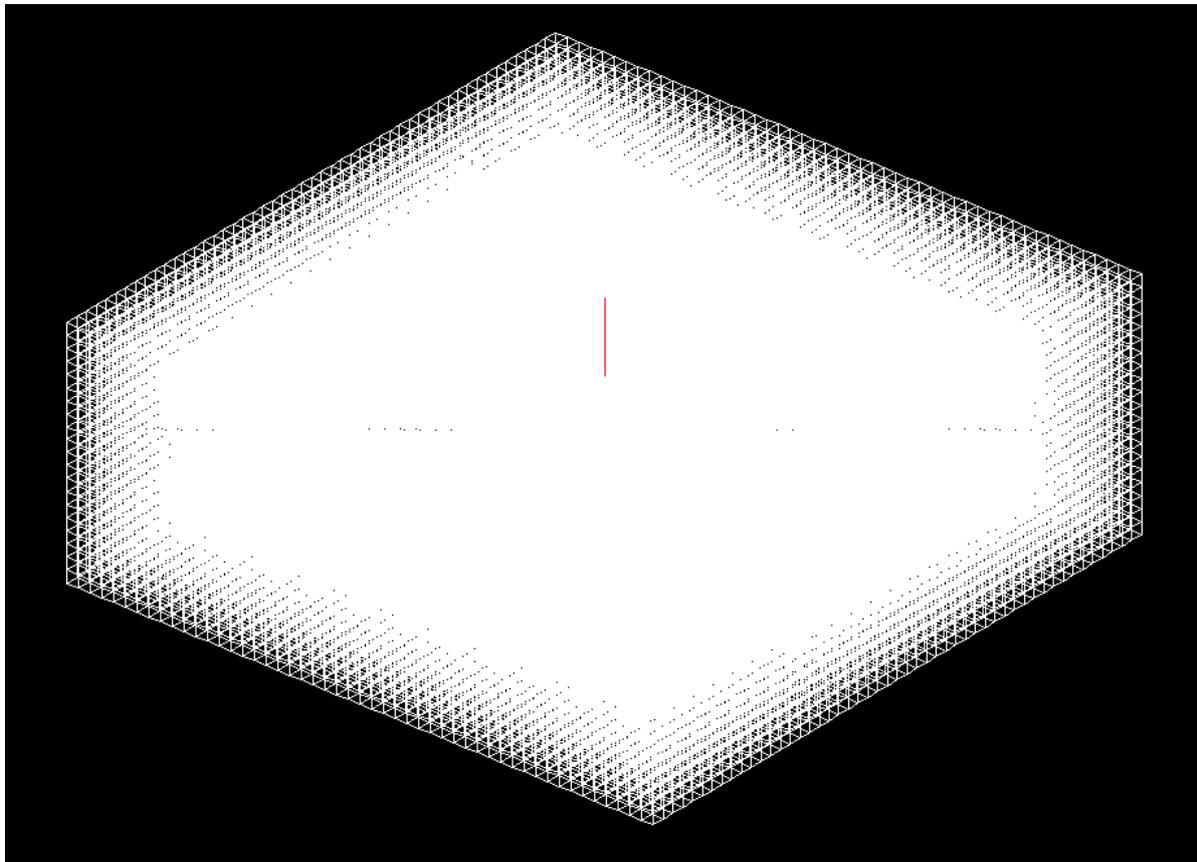
Pieu=D1 PLUS VEC1 PLUS VEC2 COUL ROUG;

elim VI1 PIEU;

**elim permet de supprimer les points du maillage de la droite qui sont les mêmes que ceux du volume*

**donc on n'a pas besoin de 2 fois les mêmes points*

TRAC (VI1 et Pieu);



3. Définition de la température du sol:

**Nous créons l'enveloppe du volume pour pouvoir lui appliquer une température égale à 12°C*

env1=enve vi1;

modtmp=mode env1 thermique;

ch1=manu chml modtmp scal 1.;

z1=coord 3 ch1;

** Nous retirons les points de la surface*

env2=z1elem infe 0.;

**Nous définissons la température de l'enveloppe 2 (sans la surface) à 12°C*

CL1=BLOQ ENV2 T ;

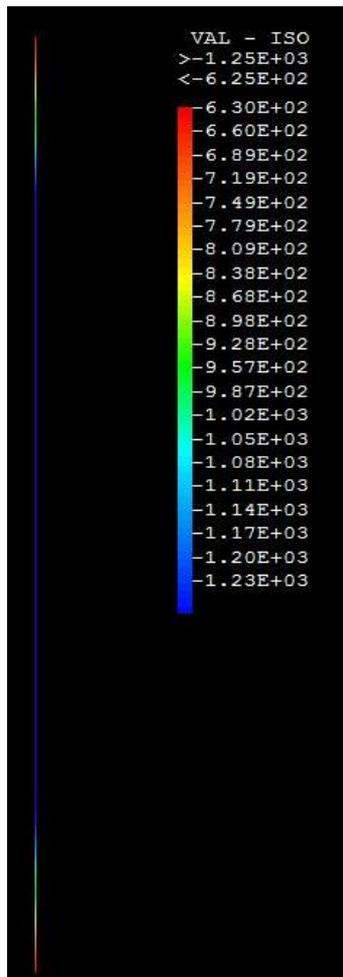
FCL1=DEPI CL1 12.;

4. Mise en place des modèles d'étude:

**Nous appliquons un modèle thermique de conduction pour l'argile du sol*
 MODB=MODE VI1 THERMIQUE;
 MODPIEU=MODE PIEU THERMIQUE BARRE;
 MATPIEU=MATE MODPIEU 'K' 100. SECT SEC1;

**Nous appliquons un flux calorifique de 7500 W sur le pieu, ce qui correspond à la puissance nécessaire au fonctionnement d'une PAC pour le chauffage d'une maison classique.*
 FL1=7500/(SEC1*h1);
 FLU1=source MODPIEU MATPIEU FL1 PIEU;

trac FLU1 Pieu;



**Nous renseignons les caractéristiques du sol*

**Conductivité thermique de l'argile en W/(m.K)*
 Kcond=1.28;
**Masse volumique de l'argile en kg/m3*
 rho1=1450.;

**Caractéristique du sol*

MATB=MATE MODB K Kcond RHO RHO1;

MOTOT=MODB ET MODPIEU;

MATOT=MATPIEU ET MATB;

**Matrice de conduction*

COND1=COND MOTOT MATOT;

CONDTOT=COND1 et CL1;

**Vecteur flux total*

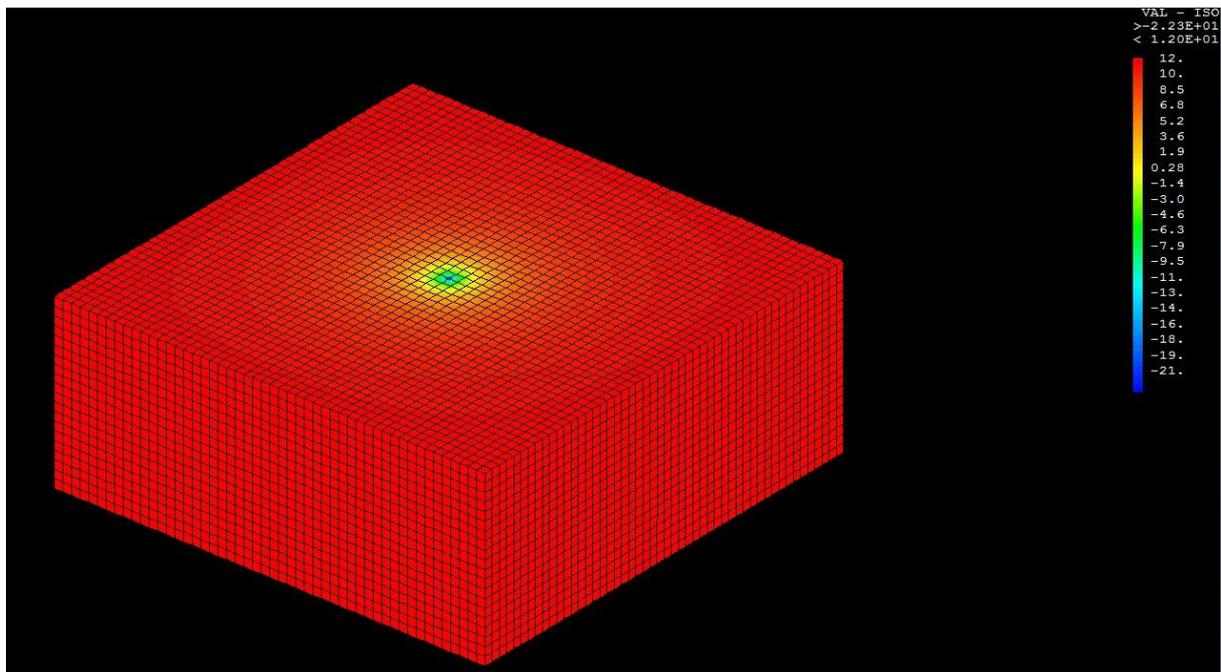
FLTOT=FCL1 et FLU1;

5. Résultats:

**Nous visualisons le champ de températures résultat de la simulation*

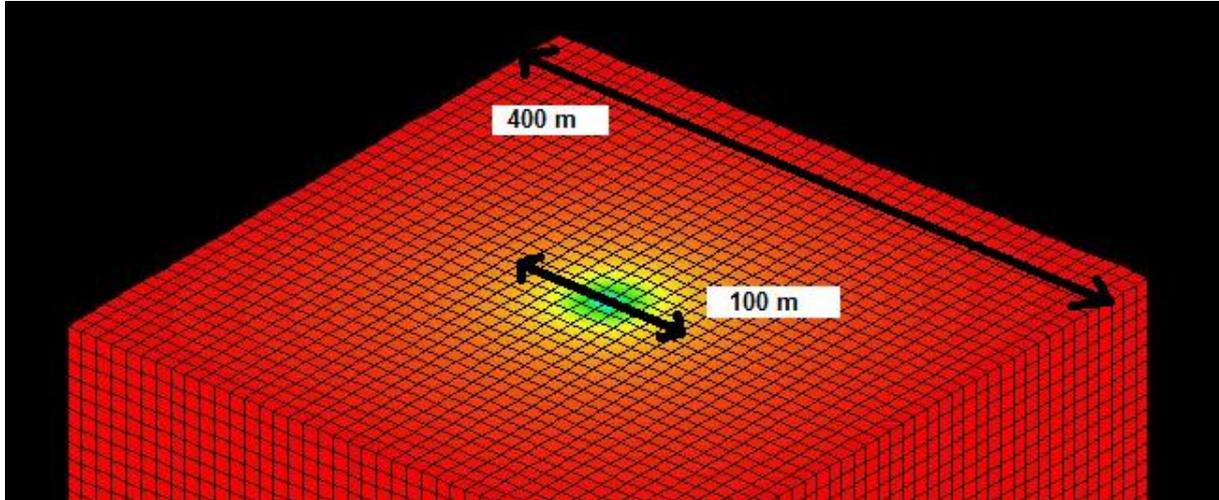
CHTER1=RESOU CONDTOT FLTOT;

trac CHTER1 (VI1 et Pieu);



Conclusion intermédiaire:

Pour cette conclusion intermédiaire nous avons modifié le volume d'étude (400 m de côté), pour mieux visualiser l'influence du puits.



Nous remarquons que le périmètre d'impact d'un puits géothermique dégageant un flux de 7500 W correspond à un cercle d'environ 100m de diamètre. Ce type d'installation ne conviendrait donc pas au sein d'un quartier résidentiel car il n'est pas envisageable d'impacter les qualités thermiques du sous sol de son voisin, cela pourrait avoir des conséquences sur la croissance des plantations par exemple.

Pour notre deuxième étude, nous avons modélisé un second puits pour chercher à montrer les impacts possibles entre deux puits, et donc les distances minimales à respecter entre deux installations. Les deux puits sont distants de 100m.

C) Description phase par phase de la deuxième étude

Pour cette deuxième étude nous avons restreints le volume à un cube de 300 m de côté. Cela nous permet de mieux visualiser l'influence entre les deux puits.

1. Définition du volume d'étude:

- * projet
- * simulation de la perturbation du sol par un fluide géothermique
- opti dime 3 elem cub8;

- * dimensions
- ei=300.;
- h1=-120.;
- h2=-300.;
- diam1=0.1;

*section du pieu
 $SEC1=PI*(DIAM1**2)/4.;$

densite 10.;

*definition des points

p1=0. 0. 0.;

p2=0. 0. h1;

p3=0. 0. h2;

*definition des droites

D1=D P1 P2;

D2=D P2 P3 dini 10 dfin 50.;

*on met en place une densité régressive pour la partie basse du maillage, cela permet de réduire le temps de calcul

*TRAC (D1 et D2);

*creation de surfaces

VEC1=(ei/3) 0. 0.;

SI1=(D1 et d2) trans VEC1 trans VEC1 trans VEC1;

*creation de volumes

VEC2=0. (ei/2) 0.;

VI1=SI1 VOLU TRANS VEC2 VOLU TRANS VEC2;

2. Création des 2 puits:

VEC3=((2*ei)/3) 0. 0.;

Pieu=D1 PLUS VEC1 PLUS VEC2 COUL ROUG;

Pieu2=D1 PLUS VEC3 PLUS VEC2 COUL VERT;

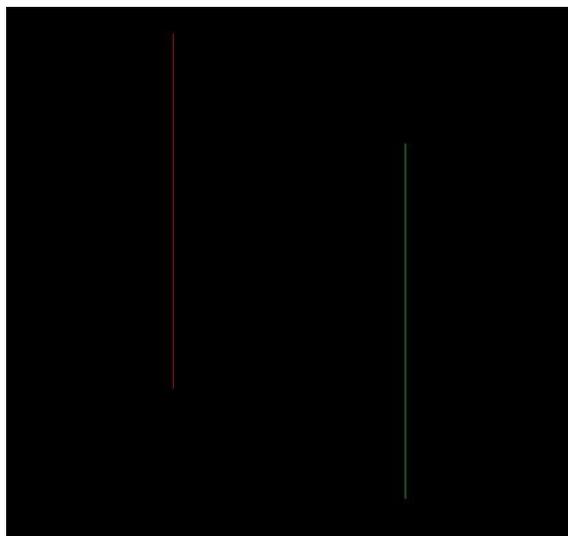
elim VI1 PIEU;

elim VI1 PIEU2;

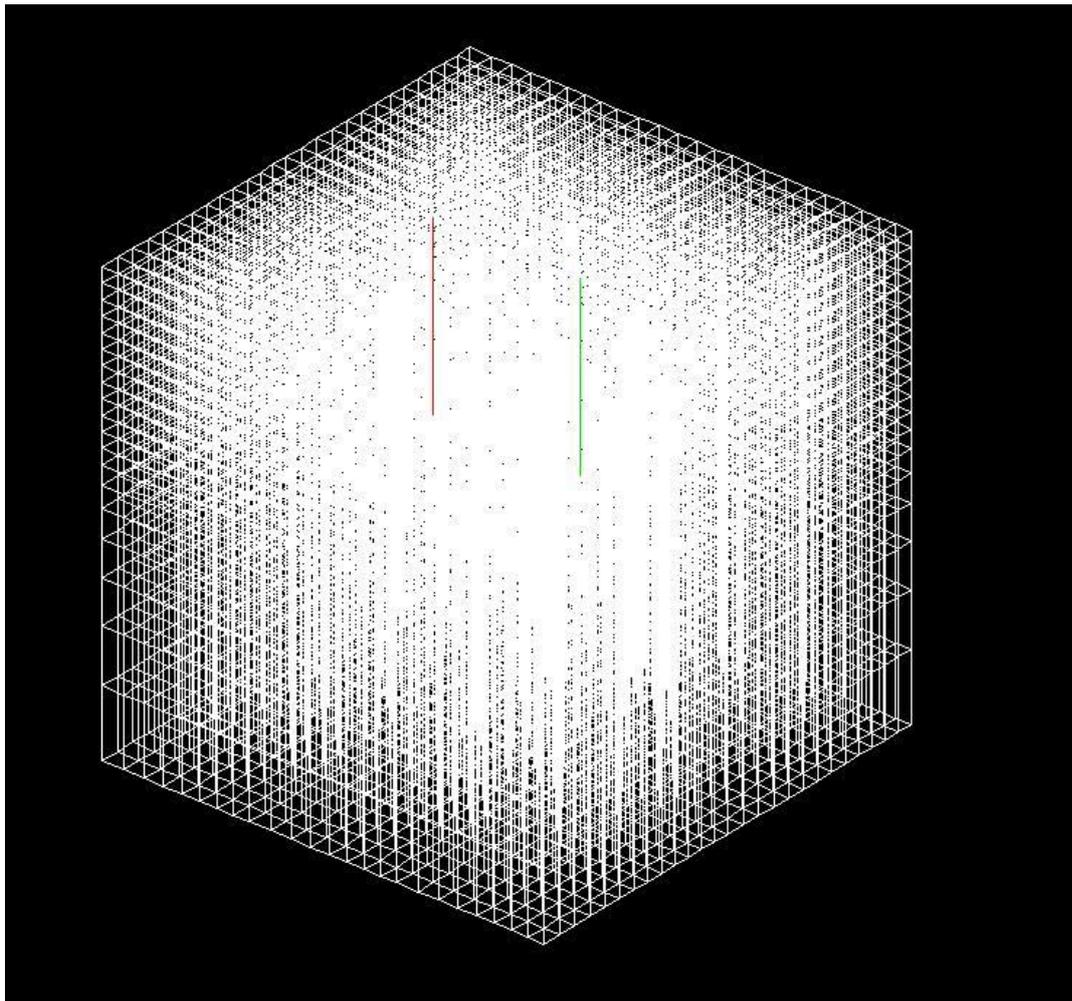
*elim permet de supprimer les points du maillage de la droite qui sont les mêmes que ceux du volume;

*donc on n'a pas besoin de 2 fois les mêmes points;

TRAC (Pieu et Pieu2);



TRAC (VI1 et Pieu et Pieu2);



3. Définition de la température du sol:

*création de l'enveloppe du volume

env1=enve vi1;

modtmp=mode env1 thermique;

ch1=manu chml modtmp scal 1.;

z1=coord 3 ch1;

*on enleve les points de la surface

env2=z1 elem infe 0.;

*definition de la temperature de l'enveloppe 2 (sans la surface)

CL1=BLOQ ENV2 T ;

FCL1=DEPI CL1 12.;

*trac FCL1 VI1;

4. Mise en place des modèles d'étude:

*modele de thermique de conduction pour l'argile du sol

MODB=MODE VI1 THERMIQUE;

MODPIEU=MODE PIEU THERMIQUE BARRE;

MODPIEU2=MODE PIEU2 THERMIQUE BARRE;

MATPIEU=MATE MODPIEU 'K' 100. SECT SEC1;

MATPIEU2=MATE MODPIEU2 'K' 100. SECT SEC1;

*definition du flux sur les puits (w/m)

* 7500W

*

FL1=7500/(SEC1*h1);

FLU1=source MODPIEU MATPIEU FL1 PIEU;

FLU2=source MODPIEU2 MATPIEU2 FL1 PIEU2;

*trac FLU1 Pieu;

*trac FLU2 Pieu2;

*caracteristiques du sol

*conductivite thermique de l'argile en W/(m.K)

Kcond=1.28;

*masse volumique de l'argile en kg/m3

rho1=1450.;

*caracteristique du sol

MATB=MATE MODB K Kcond RHO RHO1;

MOTOT=MODB ET MODPIEU et MODPIEU2;

MATOT=MATPIEU ET MATB ET MATPIEU2;

*matrice de conduction

COND1=COND MOTOT MATOT;

CONDTOT=COND1 et CL1;

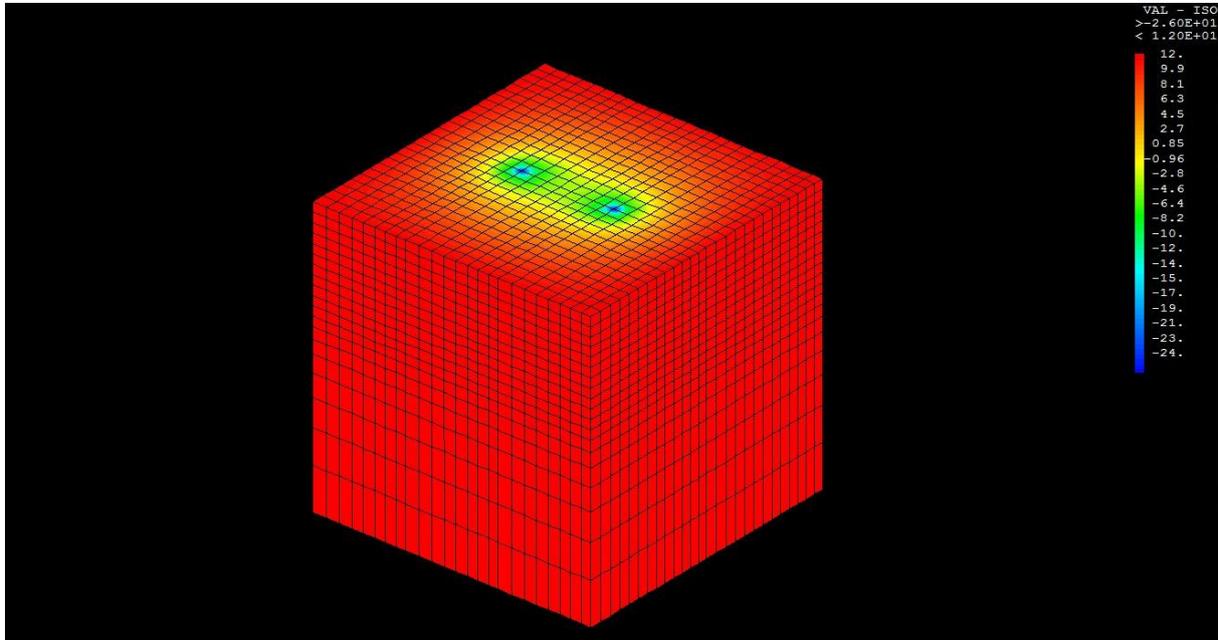
*vecteur flux total

FLTOT=FCL1 et FLU1 et FLU2;

5. Résultats:

*champs de températures résultats de la simulation
CHTER1=RESOU CONDTOT FLTOT;

trac CHTER1 (VI1 et Pieu et Pieu2);



*tracé d'une coupe au niveau des puits

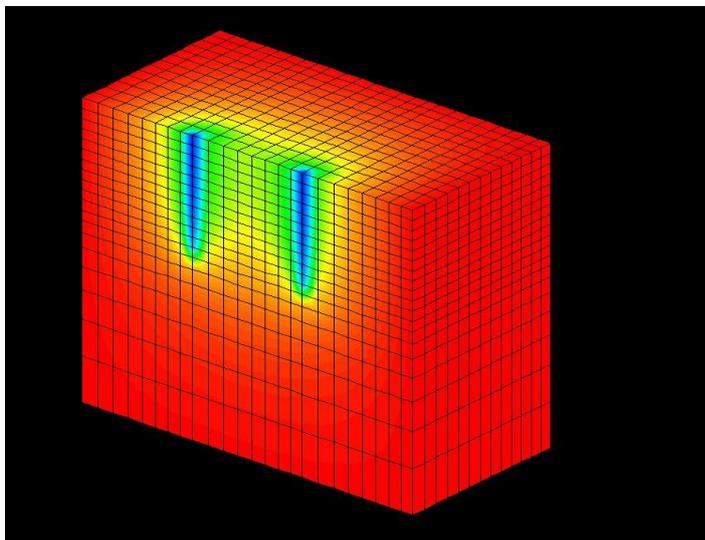
*points du plan de coupe

p4=0. (ei/2) h2;

p5=0. (ei/2) 0.;

p6=ei (ei/2) 0.;

trac VI1 CHTER1 COUP p4 p5 p6;



Sur cette coupe on peut voir l'influence entre les deux puits séparés de 100 m.

Conclusion :

La ressource en chaleur du sous-sol est limitée. Les interactions possibles avec des installations voisines de prélèvement de chaud/froid doivent être prises en considération, et ceci particulièrement en milieu urbain. Une installation standard correctement dimensionnée provoque un abaissement moyen de 1 à 4 °C de la température du terrain a proximité immédiate de la sonde.

Les deux études qui nous avons menées nous prouvent bien que la mise en place d'un puits géothermiques dans un lotissement à une influence considérable sur le sous-sol environnant. En modélisant deux puits espacés d'une distance de 100 m, nous pouvons voir l'influence importante entre ces deux échangeurs de chaleur.

Bibliographie :

Sondes géothermiques verticales. Guide d'aide au dimensionnement des ouvrages de petite dimension et procédures d'autorisation dans le Canton de Neuchâtel (Suisse).

http://www.ne.ch/autorites/DDTE/SENE/energie/Documents/Efficacite_energies_renouvelables/RA_PPORT_FINAL_PDGN_Ao%C3%BBt2010.pdf

Université de Neuchâtel, Outil de décision et de quantification du potentiel géothermique pour l'implantation de sondes géothermiques verticales.

http://www.crege.ch/download/rapports/Ann_PGF_dipl_BColliard_ecran.pdf

Etude technico-économique de la reconversion de forages profonds en échangeurs géothermiques en boucle fermée.

<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60685-FR.pdf>