

Modélisation de flux de chaleur pour l'utilisation géothermique

Julien Rajomalahy, Lala Andrianaivo, Miadana Vololomihaja Andriamifidisoa, Hasina Ramamonjisoa, & Nantenaina Volamahefa Rarivoson

Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Département Ingénierie Pétrolière, BP 1500 Antananarivo 101, Madagascar, julienrajomalahy@gmail.com

Résumé

La température du sol dépend de différents facteurs: facteur intrinsèque (dépendant du sol), facteur météorologique (dépendant de la météo), facteur d'interaction sur l'exploitation (dépendant de la manipulation de l'énergie).

Le comportement thermique du sol contribue à l'amélioration des demandes en énergie (électrique, thermique). Il est donc nécessaire de s'y intéresser.

Les objectifs sont de maîtriser tous les paramètres des échanges géothermiques et comparer les performances avec des solutions novatrices, développer les solutions d'investigation ainsi que la méthodologie pour acquérir les connaissances, et enfin de proposer les outils aux chercheurs, bureaux d'étude, techniciens et industriels pour reproduire les comportements de l'exploitation.

Les théories et les disciplines nécessaires concernent le transfert thermique, la thermodynamique, la mécanique du milieu continu, la modélisation mathématique et la simulation numérique.

La méthode des éléments finis a été utilisée pour la modélisation. La simulation a été effectuée sous MATLAB et ANSYS.

A l'issue de ce travail, il est possible d'avoir la possibilité d'électrification indépendante, donc une indépendance énergétique (thermique, électrique). On a pu aussi développer l'étude sur les calculs géothermiques à exploitation directe. L'efficacité énergétique pourrait être appliquée dans le système habitat (pompe à chaleur, etc.).

Mots clés: Flux de chaleur, géothermie, champ de température, transfert, milieux poreux, modélisation thermique

Abstract

Soil temperature depends on various factors: intrinsic factor (depending on soil), meteorological factor (depending on weather), and interaction factor on operations (depending on the manipulation of energy).

The thermal behavior of the soil contributes to improving energy demands (electrical, thermal). It is therefore necessary to be interested.

The objectives are to control all parameters of geothermal exchange and compare performance with innovative solutions, to develop investigative solutions and methodology for acquiring knowledge, and finally proposing the tools for researchers, study offices, industrial technicians and to reproduce the behavior of exploitation.

Theories and disciplines needed concerning heat transfer, thermodynamics, and mechanics of continuous medium, mathematical modeling and numerical simulation.

The finite element method was used for modeling. The simulation was done in MATLAB and ANSYS.

At the end of this work, it is possible to have the possibility of independent electrification therefore energy independence (thermal, electrical). It was also able to expand the study on geothermal direct use calculations. Energy efficiency could be applied in the housing system (heat pump, etc.).

1. INTRODUCTION

La géothermie s'est considérablement développée au cours des dernières années et des environnements très variés sont à présent à envisager pour la mise en place de système d'électrification, système de chauffage ou système de refroidissement [4]. En Afrique et à Madagascar, l'exploitation de l'énergie géothermique n'est pas très développée.

La température en profondeur du sol est caractérisée par deux paramètres principaux l'amplitude et le déphasage par rapport au signal thermique en profondeur. Cette amplitude augmente quand la profondeur augmente [8]. Donc, à quelques mètres de la surface du sol, la température est supérieure à celle en surface. Dans cette étude, le problème de transfert thermique dans les puits géothermiques est modélisé pour pouvoir étudier l'évolution de la température de l'eau hors du pompage.

La connaissance acquise, à l'heure actuelle, dans le domaine des puits géothermiques pour pompage de l'eau concerne essentiellement le comportement thermomécanique des sols [6]. Il apparaît que l'on peut utiliser

efficacement la température de l'eau à la sortie du pompage, dans la gamme de la géothermie basse énergie. Seule la capacité thermique du sol semble présenter des variations sensibles vis-à-vis de l'augmentation de la température.

2. DESCRIPTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les systèmes géothermiques de basse température se scindent en deux grandes catégories : Les systèmes ouverts (puits géothermiques) et les systèmes fermés (sondes géothermiques). Dans notre cas, on utilise le système ouvert qui est constitué d'un puits de pompage et d'une conduite de réinjection. L'eau souterraine captée par le puits de pompage est utilisée pour fournir de la chaleur à un échangeur avant d'être réintroduit dans le lac chaud (Figure 01).

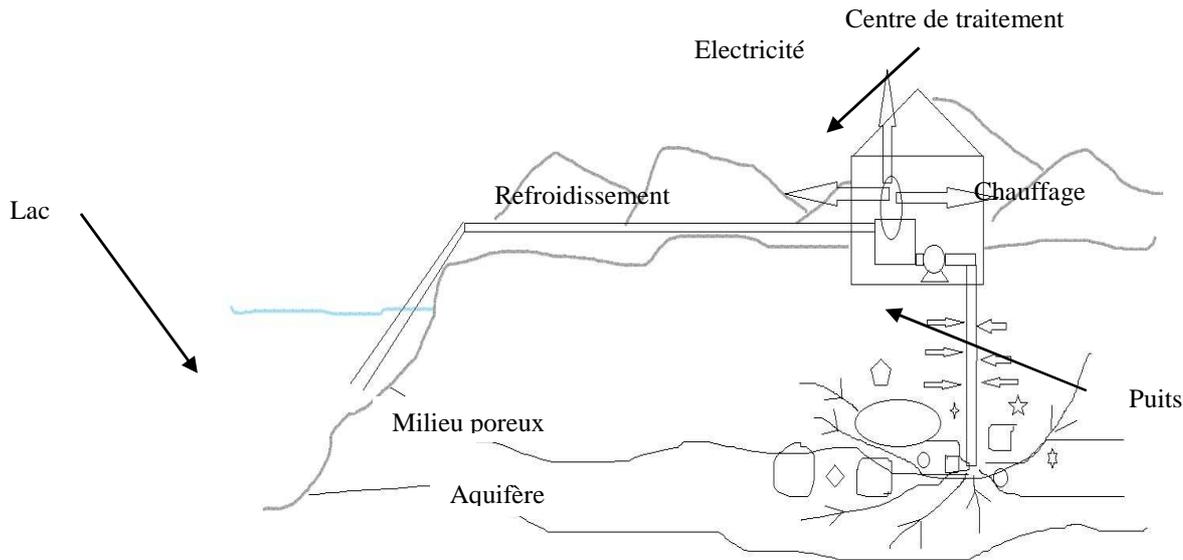


Figure 01 : Mode d'exploitation géothermique basse énergie

Ces systèmes sont généralement repris sous l'acronyme ATEs (Aquifère Thermal Energie Storage) puis la chaleur injectée est transformée en énergie électrique ou en énergie thermique (climatisation). Il est évident que de tels systèmes ne peuvent être installés qu'au sein des formations géologiques suffisamment perméables permettant de pomper l'eau souterraine en quantité suffisante.

Pour pouvoir procéder à une modélisation des puits, on procède à quelques hypothèses simplificatrices :

- Problème en 1D et en 2D
- Ecoulement turbulent
- Domaine macroscopique
- Sol Homogène

3. MODELISATION

Afin de trouver les conditions optimales pour un tel système, il est nécessaire de caractériser de façon précise les conditions hydrologiques et thermiques. Afin de les intégrer dans un modèle numérique couplant écoulement et transfert de chaleur.

3.1. Modélisation du transfert sol-eau-tube de pompage

3.1.1. Principe

Il existe plusieurs méthodes pour la modélisation d'un puits géothermique. Pour cet article, on utilise la méthode de la source cylindrique infinie (SCI). Cette méthode introduite par Carlaw et Mayer (1959) [1], ainsi que par Ingersoll (1954) [3], permet de prédire le profil de température radial autour d'une source cylindrique de longueur infinie (Figure 02), localisée dans un milieu homogène où une quantité constante de chaleur par unité de longueur est puisée. Dans le cadre de cette étude, pour développer cette méthode, on utilise une condition frontière de taux de transfert de chaleur constante.

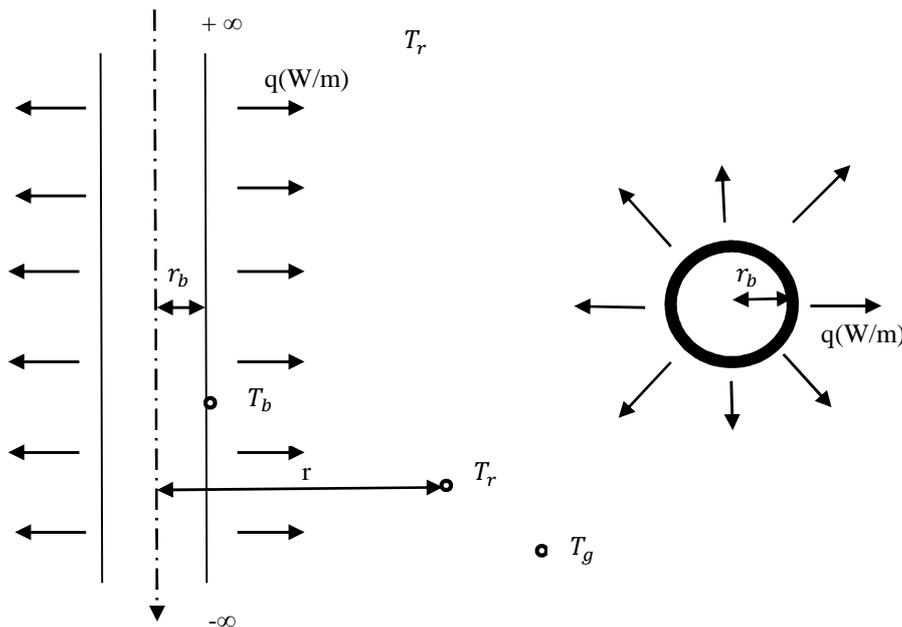


Figure 02 : Méthode des sources infinies par la fonction de Bessel

Le transfert de chaleur radial autour d'un cylindre (Figure 03) est régi par l'équation gouvernante suivante :

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_r}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_r}{\partial r} \quad (1)$$

Où r : Distance du point de mesure par rapport au centre [m]

T_r : Temperature du sol à une distance r [°C]

t : temps [s]

α : Diffusivité thermique du sol [$\frac{m^2}{s}$]

Cette solution de l'équation (1) mène à l'équation (2) suivante :

$$T_g - T_r = q \frac{G(F_0, p)}{k} \quad (2)$$

Où T_g : *Temperature du sol non perturbé* [°C]

q : *Taux de transfert de chaleur par unité de longueur* [$\frac{W}{m}$]

p : *Rapport entre rayon r et r_b*

k : *Conductivité thermique du sol*

F_0 : *Nombre de fourier*

Le facteur $G(F_0, p)$ est donné par

$$G(F_0, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty f(\beta) d\beta \quad (3)$$

Où β : *Variable d'integration*

Et

$$f(\beta) = \frac{(e^{-\beta^2 F_0}) [J_0(p\beta)Y_1(\beta) - J_1(\beta)Y_0(p\beta)]}{\beta^2 [J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]} \quad (4)$$

Les fonctions J et Y sont des fonctions de Bessel du premier et deuxième type respectivement 0 ou 1.

Cette méthode est une solution au transfert de chaleur radiale seulement et la conduction axiale n'est pas résolue.

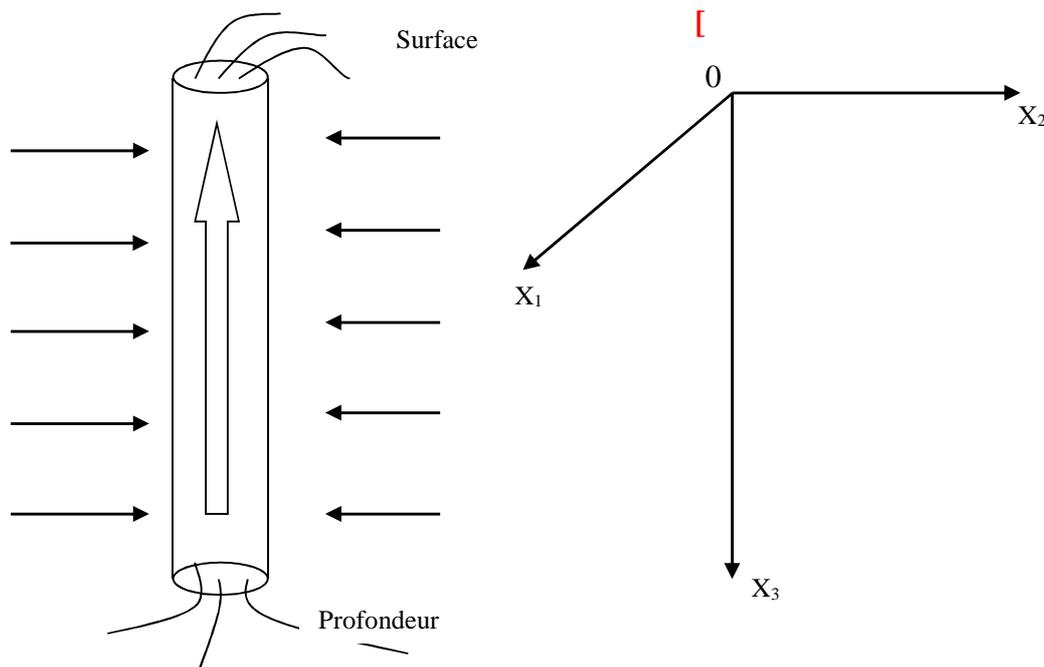


Figure 03 : *Ecoulement axiale pour le pompage de l'eau géothermique*

Les équations utilisées pour résoudre ce problème (détermination des températures le long des puits) deviennent des équations de conservation et sont accompagnées des bilans énergétiques, de la séparation des

vitesse en valeur moyenne et une partie fluctuante. En dehors du repère absolu, les équations peuvent aussi s'exprimer dans des repères relatifs, On a :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \text{div}(a \rho \vec{v} \phi) = \text{div}(\Gamma \overrightarrow{\text{grad}}(\phi)) + S_\phi \quad (5)$$

Où ρ : Densité de masse

\vec{v} : Vitesse

Γ : Coefficient de dilatation

ϕ : Scalaire considéré

Le tableau 1 résume les termes de l'équation (5)

Tableau 01 : Signification de chaque terme de l'équation (5)

Termes	Signification
$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi)$	Terme temporelle
$\text{div}(a \rho \vec{v} \phi)$	Terme accélération
$\text{div}(\Gamma \overrightarrow{\text{grad}}(\phi))$	Terme diffusif
S_ϕ	Terme source

Le système se compose d'un système de transfert de chaleur et de l'écoulement de l'eau géothermique (Tableau 02), ce qui donne :

Tableau 02 : Ecriture de l'équation de conservation

Equations de conservation		ϕ	a	Γ	S_ϕ
Masse		1	1	0	0
Energie	mécanique	mv_i	0	μ	$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} \tau_{i,j}$
		g_i	0	μ	$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} \tau_{i,j}$
	thermique	h	1	$\frac{k}{C_p}$	Q
Quantité de mouvement	mécanique	v_i	1	μ	$g_i v_i$
	thermique	T	0	k	0

3.1.2. Résultats et interprétation

L'étude du champ de puits nous permet d'avoir une première approximation de potentiel thermique à une distance r du puits. Ce cas est effectué sur une zone de 2 mètres.

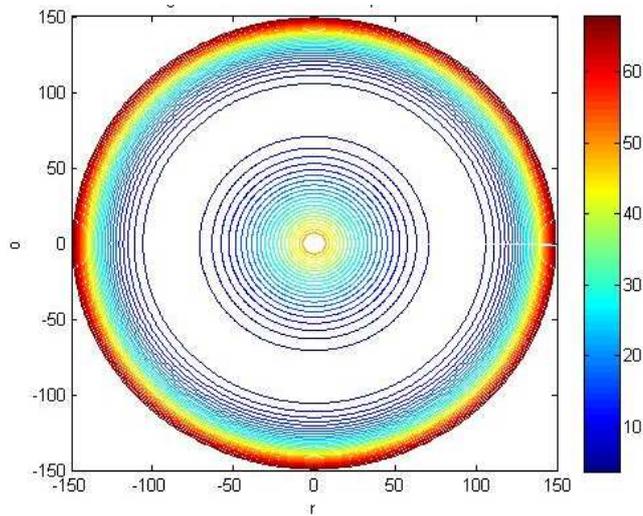


Figure 04 : champ de température radiale autour du puits

Sur la figure 04 les zones de couleur rouge indiquent un fort potentiel de température et au contraire les zones en couleur blanc symbolisent une température moins élevée. L'exemple choisi concerne un puits incrusté dans le sol et présente les propriétés définies sur le tableau 03:

Tableau 03 : Propriétés de l'expérimentation pour le champ de température

Propriété	Puits	Propriété	Sol
Longueur [m]	10	Conductivité thermique	1.5
Diamètre du tube [m]	0.05	Diffusivité thermique	0.5
Epaisseur du tube [m]	0.005	Taux de transfert de chaleur [W/m]	3

On remarque une forte aspiration de la chaleur au milieu du champ de puits (Figure 4).

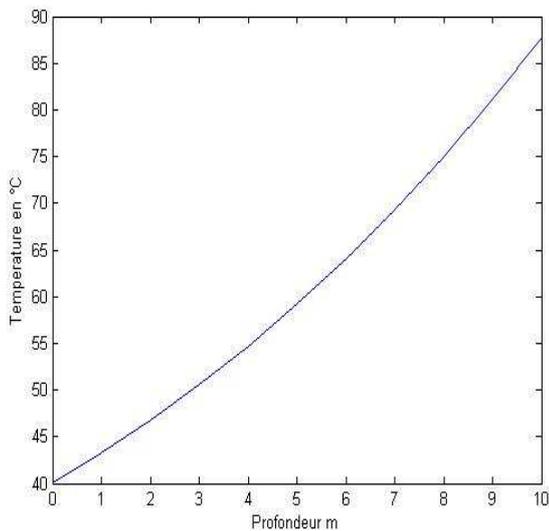


Figure 05 : Températures en fonction de profondeur

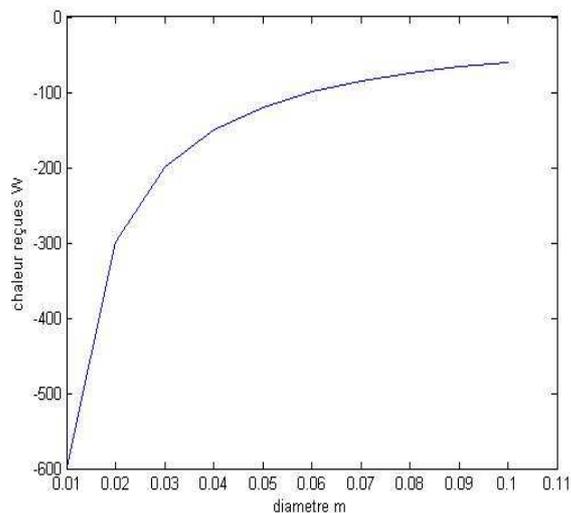


Figure 06 : Chaleur en fonction de diamètre

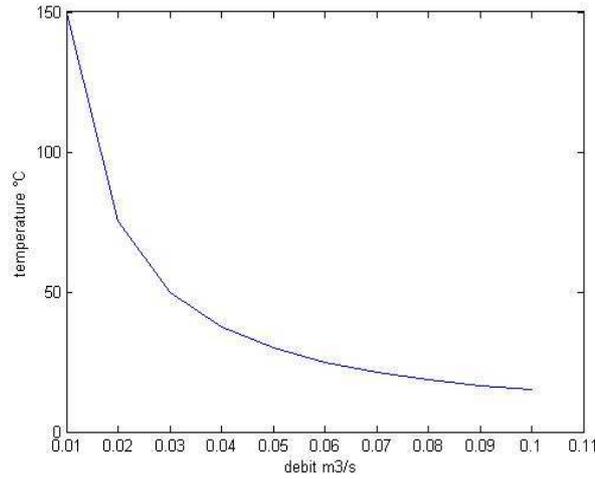


Figure 07 : Température en fonction du débit

La première chose à remarquer est que plus le diamètre du puits augmente la température de l'eau à la sortie diminue (Figure 06). Pour ce qui est de l'effet du débit de l'écoulement dans le puits (Figure 07), sur la température de l'eau, on observe que la température diminue en fonction du débit et donc en fonction de la vitesse. En outre sur (Figure 05), plus la profondeur augmente plus la température augmente. Pour une profondeur 5 m, la température de l'eau est environ 60°C. Mais elle est égale à 90°C pour une profondeur de 10 m.

3.2. Prise en compte du transfert en milieu poreux

L'optimisation nécessite un calcul du transfert de chaleur au sein du milieu poreux saturé. Toutes les variables qu'il faut estimer ou calculer, sont également susceptibles d'être influencées par la mise en fonction du dispositif dans notre zone d'étude.

3.2.1. Caractérisation

Si on prend l'hypothèse simplificatrice d'un équilibre thermique entre l'eau souterraine avec la matrice rocheuse et en négligeant la convection thermique (Panterkar, 1980), l'équation de conservation dans le milieu poreux saturé peut s'écrire :

$$\left(\frac{\rho_m C_m}{n_e \rho_w C_w}\right) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left[\left(\frac{\lambda_m}{n_e \rho_w C_w} + \alpha v_e \right) \text{grad}(T) \right] - \text{div}(v_e T) + \frac{q'}{n_e \rho_w C_w} \quad (6)$$

Où

- ρ_m : Masse volumique du milieu poreux
- C_m : Capacité calorifique massique du milieu
- λ_m : Conductivité thermique du milieu
- n_e : Porosité effective du milieu poreux
- ρ_w : Masse volumique de l'eau
- C_w : Capacité calorifique de l'eau
- q' : Terme source du puits
- α : Dispersivité thermique
- v_e : Vitesse effective de l'eau souterraine
- T : Température de l'eau souterraine
- t : Temps

Le Tableau 04 résume la configuration des paramètres.

Tableau 04 : Configuration des paramètres

	Paramètres	Valeurs
Milieux poreux	Masse volumique [Kg/m ³]	1950
	Capacité calorifique [J/Kg.°C]	800
	Conductivité thermique [W/m ²]	1.5
	Porosité effective [%]	25
	Dispersivité thermique [10 ⁻⁵ J/°C]	0.5
Eau géothermique	Masse volumique [Kg/m ³]	1000
	Capacité calorifique [J/Kg.°C]	150

3.2.2. Résultats et interprétation

Les principales composantes du transfert de chaleur en milieu poreux saturé sont l'advection, la conduction et la dispersion thermique. La conductivité hydraulique K et la porosité effective sont les principaux paramètres gouvernant l'advection puisqu'ils influencent la vitesse effective de l'eau souterraine (Figure 08).

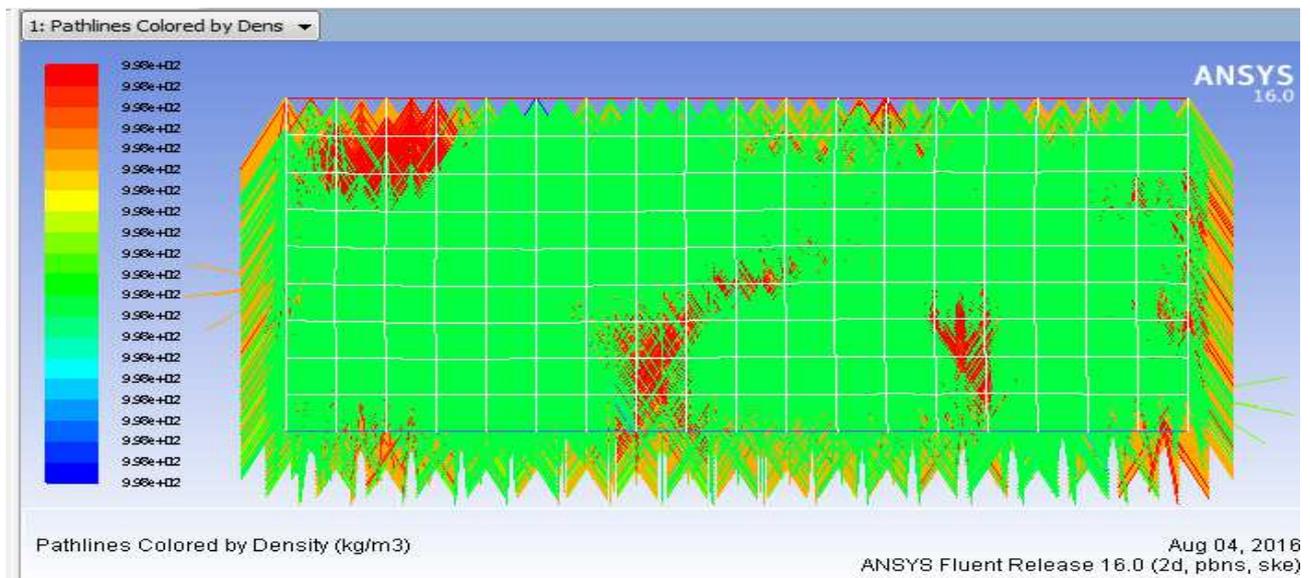


Figure 08 : Densité du fluide dans le milieu poreux

La conductivité thermique et la capacité calorifique spécifique du milieu poreux saturé sont les principaux paramètres gouvernant la conductivité thermique et les échanges de chaleur entre la matrice solide et le fluide (Figure 09).

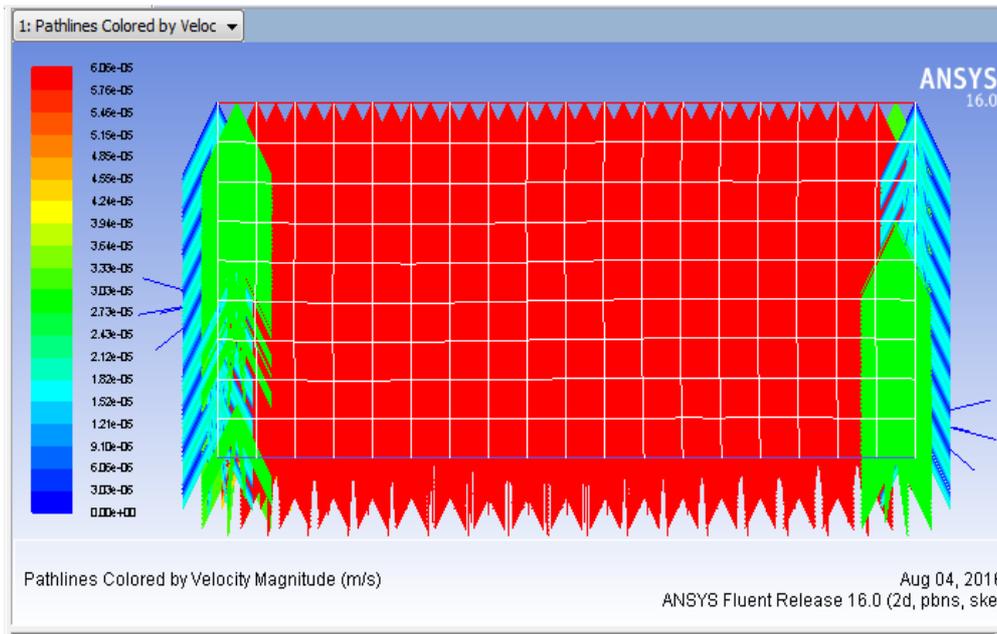


Figure 09 : Vitesse du fluide géothermal dans le milieu

Les dispersivités thermiques longitudinales et transversales gouvernent la dispersivité thermique. Ces coefficients de dispersivité thermomécanique longitudinale et transversale sont très sensibles aux effets d'échelle (Figure 10) à l'instar des coefficients de dispersivité mécanique pour le transfert de solutés.

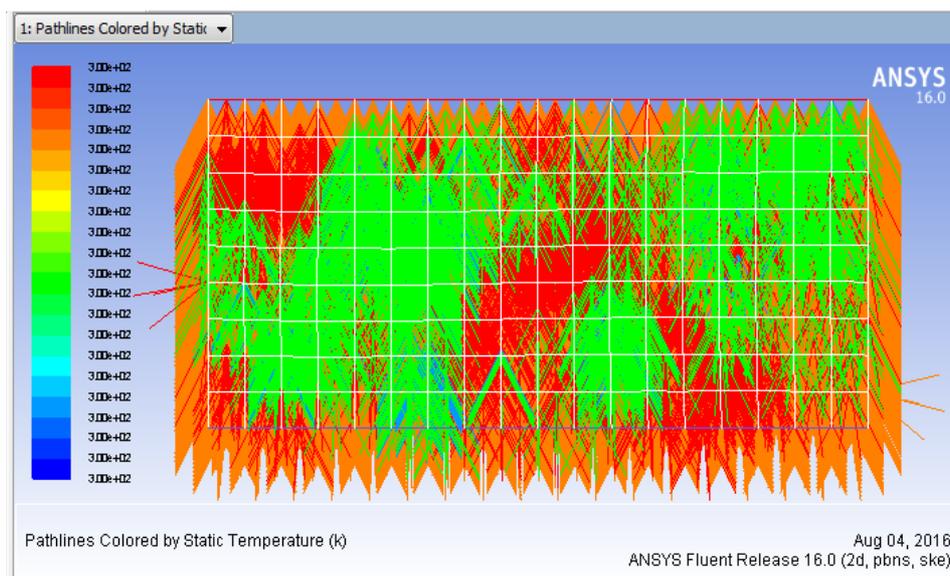


Figure 10 : Température dans le milieu

4. DISCUSSION

L'étude du flux de chaleur pompée à partir du puits géothermique avec la fonction de Bessel a montré le champ radial de température dans les 2 mètres de diamètre. Il y a forte différenciation et aspiration de la chaleur en profondeur. En ajoutant les transferts de chaleur dans le sol poreux, les champs en profondeur sont affectés par la dispersion thermique. La propagation de la chaleur se précise en fonction des capacités calorifiques et conductivités thermiques. De plus, la vitesse de l'eau perturbe les champs dus au fait de la conductivité

hydraulique et de la porosité du milieu. Nous obtenons un meilleur aperçu du champ de chaleur géothermique à basse profondeur.

Avec l'équation d'écoulement et le bilan thermique, il est possible de considérer l'opération de pompage (débit) et le diamètre du puits comme étant des paramètres d'optimisation de la chaleur. Par exemple le débit de pompage peut être calculé à partir du flux axial de chaleur.

La fonction de Bessel est insuffisante pour prendre en compte la plupart des transferts thermiques lors de l'exploitation, l'équation de conservation de la quantité de mouvement avec le bilan d'énergie offre une meilleure étude des différents paramètres (tableau 02). Ensuite, pour le milieu poreux, la considération d'une équation de conservation en écoulement poreux avec échange d'énergie donne de meilleure représentation du comportement de l'eau et de la chaleur dans le sol au voisinage du puits.

5. CONCLUSION

Le transfert de chaleur est influencé par les écoulements souterrains et inversement, les écoulements souterrains peuvent être influencés par le transfert de chaleur. La prise en compte du couplage « écoulements souterrains-transfert de chaleur » nous a permis de trouver la solution en vigueur en accord avec la littérature. L'étude du champ de puits donne la puissance énergétique disponible en matière de chaleur. Cette étude s'élargit avec l'utilisation de la chaleur pompée à des fins d'efficacité énergétique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Articles dans des revues

- [5] Draoui B. (2012) - Simulation et caractérisations d'un échangeur géothermiques à aire destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans la condition climatique de sud de l'Algérie, *Revue des Energies Renouvelables*, **15** (2), pp 275-284

Livres / Chapitres dans des livres

- [1] Bölcs A. (1997). Transmission de chaleur. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire de Thermique Appliquée et de Turbomachines*, Volume 1, 214p
- [3] Bastien Colliard (2005) - Outil de décision et de qualification de potentiel géothermiques pour l'implantation de sondes géothermiques verticale, *Cycle de Spécialisation en Hydrogéologie Centre d'hydrogéologie Université de Neuchâtel*, pp 1-90
- [4] Marilyn R.O (2012) - Performances d'un champ de puits géothermiques verticaux peu profonds en boucle fermée, *HAL Id: tel-00605579*, pp 1-139
- [6] Zayane C. (2011) - Identification d'un modèle de comportement thermique de bâtiment à partir de sa courbe de charge, *HAL Id : Pastel-00590810*, pp 1-135

Rapports

- [7] Becmeur C. (2011) - Etude du comportement thermique d'un échangeur géothermique compacte de type corbeille, *Projet de fin d'étude réalisé au BRGM dans le Département Géothermie*, pp 1-50
- [8] Lacu S. (2001) - Simulation de la perturbation du sol par un puits géothermiques, *Rapport de recherche du CUEPE n°5*, pp 1-17

Webographie

- [2] Millet J.M. (2016) - Programme pour l'étude de la propagation de la chaleur. *Bulletin de l'EPI*, No 47, pp130-135. Web www.epi.asso.fr/fic_pdf/b47p130.pdf, consulté le 01 juin 2016