

ESTIMATIONS ANALYTIQUE ET NUMERIQUE DE LA CHALEUR EXTRAITE D'UNE GALERIE DE MINE NOYEE

PREDICTING THE ENERGY EXTRACTED IN A FLOODED MINE GALLERY BY MEANS OF ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS

Maria SURYATRIYASTUTI¹, Olivier DECK¹, François GLORANT², Chady NASSAR³, Antoine DEFER³, Steve HERVE³

¹ Université de Lorraine, CNRS, CREGU, Laboratoire GeoRessources, Ecole des Mines de Nancy, Nancy Cedex, France

² ICube – UMR 7357, INSA de Strasbourg, Strasbourg Cedex, France

³ Département Géomécanique, Ecole des Mines de Nancy, Nancy Cedex, France

RÉSUMÉ – Cet article propose une solution analytique pour estimer l'évolution de la température de l'eau dans une galerie géothermique sans la prise en compte de l'écoulement souterrain. Puis, une comparaison entre les résultats analytiques et ceux obtenus à partir d'un modèle de mécanique des fluides numérique est effectuée sur la base d'une mine de charbon en Lorraine. Ces deux approches permettent de donner une bonne estimation de la puissance d'extraction afin de caractériser la réponse globale d'une mine géothermique.

ABSTRACT – An analytical model is presented in this article in order to estimate the temperature evolution in a geothermal mine gallery without considering the groundwater flow in the rock. Then, a comparison of analytical results with those obtained by a computational fluid dynamics model is conducted on a site corresponding to a coal mine in Lorraine. The results coming from both analyses allow giving a rough estimation of the production power to predict the global response of the geothermal mine.

1. Introduction

Au cours du dernier siècle, l'exploitation minière des ressources du sous-sol était l'une des principales industries en France et jouait un rôle clé dans l'économie régionale ainsi que nationale. Lorsque les mines étaient actives, les galeries souterraines ont été asséchées par pompage afin de maintenir un environnement de travail sécurisé pour les mineurs. Une fois ces mines abandonnées, les pompages d'exhaure minière ont cessé et l'eau a commencé à remplir les vides souterrains. En conséquence, aujourd'hui, de nombreux sites miniers français sont ennoyés.

Du fait de la chaleur géothermique terrestre, cette eau minière présente une ressource de faible enthalpie et l'on peut considérer qu'elle est à une température quasi-identique à celle de la terre. Si la température de la roche augmente de 3°C tous les 100 mètres de profondeur (Sanner, 2005), la température de l'eau est d'environ 30–35°C à une profondeur de 800 m sous la surface. Ainsi, ces mines inondées peuvent être de nouveau exploitées et valorisées en tant que nouvelle source d'énergie durable. Associée à une pompe à chaleur (PAC), l'eau contenue dans les galeries des mines profondes peut être utilisée pour les besoins en chauffage urbain. Le principe repose sur un système de « doublet géothermique ». Un captage pompe l'eau chaude contenue dans un aquifère minier (puits d'extraction), la PAC prélève l'enthalpie de cette eau, puis celle-ci est réinjectée dans le même ou un autre aquifère (puits d'injection). Si la climatisation de bâtiments est requise, le circuit peut être inversé, on stocke alors la chaleur dans les

bassins sédimentaires. Cette double fonctionnalité permet au système de s'adapter à la saison et l'alternance de cycles d'extraction et de stockage de la chaleur assure l'équilibre thermique de la roche.

Par rapport au système de doublet géothermique standard, l'aquifère minier présente de nombreux atouts. Tout d'abord, l'accès à la ressource est plus facile grâce aux puits de grand diamètre existants. Ensuite, compte tenu de sa profondeur, cet aquifère possède une bonne isolation thermique, une forte perméabilité et un gradient hydraulique faible de la nappe souterraine. De nombreuses expériences menées dans les pays d'Europe confirment les avantages de cette technique (Malolepszy, 2003 ; Banks *et al.*, 2009 ; Kranz et Dillenardt, 2010 ; Verhoeven *et al.*, 2014).

Afin d'assurer la rentabilité du système géothermique à eau minière pour le chauffage d'un quartier urbain, il est nécessaire de garantir la quantité (débit) et la qualité (température) du puits d'extraction pour délivrer la puissance énergétique désirée. Si l'objectif est de comprendre la réponse locale du puits d'extraction et de son réservoir minier, une modélisation complète du transfert thermo-hydro-géologique est essentielle. Des études numériques prenant en compte la géométrie tridimensionnelle et les transferts thermo-hydrodynamiques ont été menées pour une mine de potassium en Allemagne (Renz *et al.*, 2009) et pour une mine de charbon en France (Hamm et Sabet, 2010). Cependant, si l'objectif est d'interpréter la réponse globale de l'aquifère minier, telle que la puissance récupérée ou l'épuisement de la ressource, une étude de bilan énergétique dans la galerie géothermique peut en première approximation être suffisante. Des modèles simplifiés pour prédire l'évolution de la température dans la galerie ont ainsi été proposés par Rodríguez et Díaz (2009) et Ghoreishi-Madiseh *et al.* (2012). Le modèle proposé par Rodríguez et Díaz (2009) est basé sur l'analogie unidimensionnelle de la résistance thermique en régime stationnaire. Celui proposé par Ghoreishi-Madiseh *et al.* (2012) repose sur la résolution des équations de conservation de l'énergie par la méthode des volumes finis. Ils ont alors développé leur propre code numérique avec la prise en compte d'une géométrie bidimensionnelle en régime transitoire.

Néanmoins, il s'avère que le modèle proposé par Rodríguez et Díaz (2009) présente une expression erronée de la résistance thermique dans un repère cylindrique. Dans ce contexte, cet article vise à corriger le modèle analytique. Puis, afin de tester la validité de cette approche, est réalisé un modèle bidimensionnel de mécanique des fluides numérique avec un code commercial Fluent[®], qui lui-même est basé sur la méthode des volumes finis (Ansys, 2013). Après l'étude en régime stationnaire, une analyse numérique en régime transitoire est menée permettant de compléter le modèle analytique proposé. L'étude présentée se limite au transfert conducto-convectif de la chaleur sans la prise en compte de l'écoulement souterrain dans un site correspondant à une mine de charbon de lorraine.

2. Modélisation des transferts de chaleur dans une galerie minière

2.1. Hypothèses et limitations de l'étude

Une mine est en pratique constituée de nombreuses galeries communicantes en plusieurs étages connectées aux deux puits (Fig. 1a). L'eau monopolisée pour la géothermie est principalement prélevée dans le volume de galerie de l'étage le plus profond et réinjectée à l'étage le moins profond. Dans le cas de notre étude, nous considérons une unique galerie circulaire non effondrée de rayon r_p et de longueur L située à une profondeur z . Ainsi, les points d'extraction et d'injection se trouvent à la même profondeur z . Cette galerie est creusée dans une roche homogène ayant une température naturelle géothermique égale à T_0 . Puisque le rayon de la galerie est très

petit devant sa profondeur, nous considérons que la température initiale de la roche est constante et égale à T_0 dans un cylindre de rayon r autour de la galerie (Fig. 1b). Toutefois, au-delà de quelques centaines de mètres autour de la galerie, le gradient géothermique ne peut plus être négligé et la variation de la température de la roche avec la profondeur doit être prise en compte.

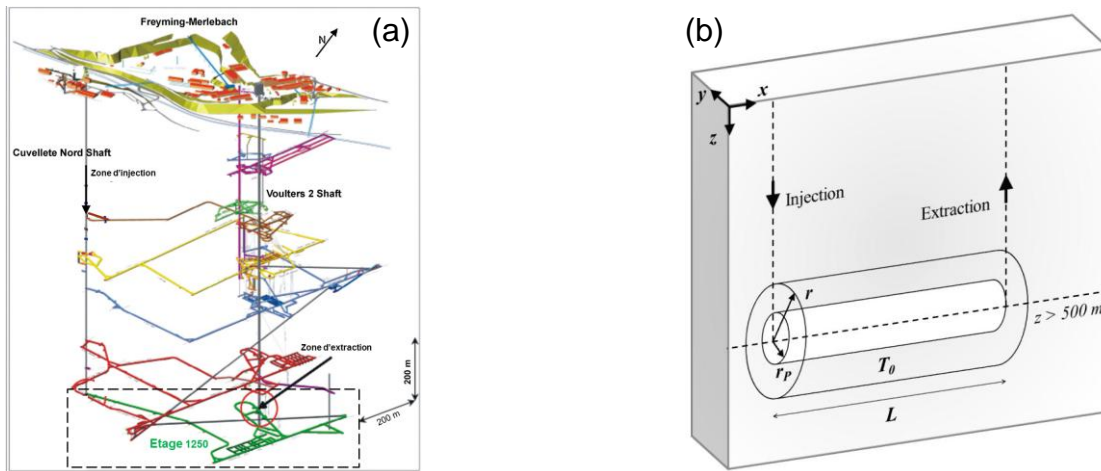


Figure 1. (a) Représentation en 3D de la mine de Vouters (d'après Hamm et Sabet 2010)
(b) Représentation du domaine étudié

Dans notre étude, nous posons les hypothèses suivantes : (i) le domaine d'étude est situé en dessous de la nappe phréatique, (ii) la roche est complètement saturée avec un gradient hydraulique très faible (absence de l'écoulement souterrain), (iii) il n'y a plus d'infiltration d'eau souterraine à l'intérieur de la galerie (fin du noyage), (iv) le fluide caloporteur entre dans la galerie à une température $T_{F1} < T_0$ avec un débit Q_F constant et uniforme tout le long de la galerie, (v) le transfert de chaleur dû au mouvement du fluide (convection) est prépondérant devant la diffusion du fluide le long de la galerie (conduction axiale) et (vi) les propriétés des matériaux, tels que la densité volumique ρ , la chaleur spécifique c_p et la conductivité thermique λ , sont isotropes et indépendants de la température. Par la suite, les indices F et R sont utilisés pour représenter les propriétés du fluide et de la roche, respectivement.

Le fluide entre à une température T_{F1} , il se réchauffe tout le long de la galerie et sort à une température T_{F2} . Nous supposons qu'à un certain rayon caractéristique r_0 , la température de la roche n'est plus influencée par les échanges thermiques avec l'eau et est égale à T_0 . Ce paramètre dépend directement de la durée d'exploitation de la mine, il est égal au rayon de la galerie r_p à l'instant initial et augmente au cours du temps. Il convient de souligner que le rayon caractéristique r_0 est un paramètre inconnu qu'il sera nécessaire de déterminer si l'on souhaite rendre compte de l'épuisement thermique de la galerie au cours du temps. C'est à l'aide du modèle numérique en régime transitoire que l'on pourra estimer ce paramètre. Pour le définir, nous supposons que la position r_0 correspond à la frontière au niveau de laquelle le flux thermique est égal au flux géothermique. Compte tenu de toutes ces hypothèses, le domaine d'étude peut être réduit à une géométrie axisymétrique (Fig. 2).

2.2. Modèle analytique en régime stationnaire

Dans un premier temps, nous nous attachons à développer un modèle simple permettant une bonne approximation de l'évolution de la température de l'eau le long de la galerie. Pour cela, nous réalisons un bilan thermique en régime stationnaire. La puissance

récupérée par le fluide], $P_{récup}(x)$, est définie dans l'équation (1). Cette puissance est égale à la puissance cédée par la paroi de la galerie, P_{conv} , qui elle-même est égale à celle cédée par le cylindre de roche de rayon caractéristique r_0 , P_{cond} (Fig. 2).

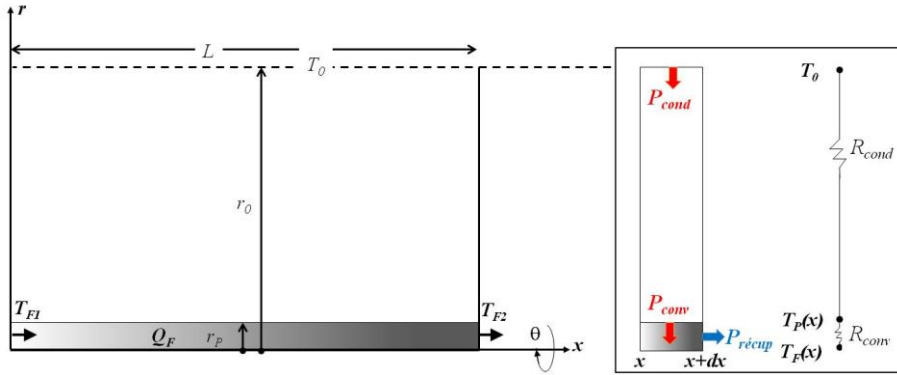


Figure 2. Représentation de la géométrie axisymétrique du modèle étudié

Par analogie avec la loi d'Ohm, la puissance échangée dans chaque conducteur est associée à sa résistance thermique correspondante R (Fig. 2). Sous l'hypothèse que la température de la roche ne dépend que de r , l'équation de la chaleur en repère cylindrique peut être résolue. La résistance thermique de la couche de roche située entre les rayons r_p et r_0 est alors proportionnelle au logarithme népérien du rapport r_0/r_p (Éq.2) (Bianchi *et al.*, 2004). La prise en compte de ce logarithme népérien dans la résistance thermique de la roche rend cette étude différente de celle menée par Rodríguez et Díaz (2009). Du fait que les deux conducteurs sont traversés par le même flux de chaleur, la résistance thermique équivalente pour l'ensemble du système est la mise en série des résistances de chaque conducteur. Finalement, la puissance cédée par les deux conducteurs, $P_{cédée}(x)$, peut être exprimée (Éq. 2).

Dans l'équation (2), h_F est le coefficient de transfert convectif à la paroi. Il dépend du régime d'écoulement du fluide et de la géométrie de galerie. Pour cette approche analytique, le coefficient h_F est supposé constant et uniforme tout le long de la galerie. Il est calculé par une corrélation empirique en fonction des nombres de Reynolds, de Prandtl et de Nusselt (Whitaker, 1972). L'égalité des équations (1) et (2) permet d'obtenir l'évolution de la température du fluide le long de la galerie sous la forme d'une fonction exponentielle décroissante (Éq. 3). L'efficacité du système ξ peut alors être définie comme le rapport entre le gain de température au point d'extraction x et le gain maximal (Éq. 4). Notons que pour ce modèle, le rayon r_0 est un paramètre d'entrée et doit être défini par l'utilisateur.

$$P_{récup}(x) = \rho_F c_p F Q_F dT_F(x) \quad (1)$$

$$P_{cédée}(x) = \frac{1}{(R_{conv} + R_{cond})} (T_0 - T_F(x)) \text{ avec } \begin{cases} R_{conv} = 1/h_F r_p 2\pi dx \\ R_{cond} = \ln(r_0/r_p)/\lambda_R 2\pi dx \end{cases} \quad (2)$$

$$T_F(x) = T_0 + (T_{F1} - T_0) \exp\left(-\frac{2\pi\lambda_R h_F r_p}{\rho_F c_p F Q_F (\lambda_R + h_F r_p \ln(r_0/r_p))} x\right) \quad (3)$$

$$\xi(x) = 1 - \left(\frac{T_0 - T_F(x)}{T_0 - T_{F1}}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{2\pi\lambda_R h_F r_p}{\rho_F c_p F Q_F (\lambda_R + h_F r_p \ln(r_0/r_p))} x\right) \quad (4)$$

2.3. Modèle numérique

Un modèle de mécanique des fluides numérique est élaboré à l'aide du logiciel Fluent®. Il doit permettre d'une part de vérifier la validité de l'approche analytique en régime stationnaire et d'autre part de rendre compte de l'évolution des échanges thermiques en régime transitoire par l'estimation du rayon r_0 en fonction du temps. Ce modèle numérique repose sur la méthode des volumes finis (Ansys, 2013). La discrétisation spatiale des équations de conservation de l'énergie et du mouvement est basée sur un schéma décentré amont du premier ordre. Le maillage structuré non uniforme est raffiné autour de la paroi de la galerie ainsi qu'à l'entrée et à la sortie de la galerie. L'indépendance de la solution numérique convergée vis-à-vis du maillage a été étudiée préalablement et n'est pas présentée dans cet article.

La température T_{F1} du fluide ainsi que le débit sont imposés à l'entrée de la galerie. A la limite radiale du cylindre de la roche, à $r = r_0$, la température T_0 est fixée. Au niveau de l'axe axisymétrique et des deux bords latéraux situés aux extrémités du volume cylindrique modélisé de la roche, une condition de paroi adiabatique est imposée.

3. Etude de la performance énergétique d'une galerie de mine de Vouters

Le site des mines de Vouters en Lorraine est choisi pour notre cas d'étude. La galerie étudiée est située à 1250 m de profondeur avec un rayon r_P de 2 m et une longueur L de 1000 m (Fig. 1a) (Cartannaz, 2008 ; Hamm et Sabet, 2010). A partir des données stratigraphiques du bassin houiller lorrain, la roche à cette profondeur est considérée homogène de type grès (Cartannaz, 2008). Le tableau 1 résume les propriétés des matériaux utilisés dans cette étude (Hommand et Duffaut, 2000). La température naturelle à cette profondeur T_0 vaut 55°C tandis que la température d'entrée du fluide T_{F1} est fixée à 20 °C (Hamm et Sabet, 2010).

3.1. Analyse en régime stationnaire

Tout d'abord, nous étudions l'influence du débit injecté sur la performance énergétique de la galerie minière. Pour cela, nous nous plaçons à l'instant initial pour lequel $r_0 = r_P$. Cela signifie que la température de la paroi de la galerie est à la température T_0 . Quatre débits différents représentant les différents types d'écoulement sont étudiés (Tableau 2).

Tableau 1. Propriétés du modèle

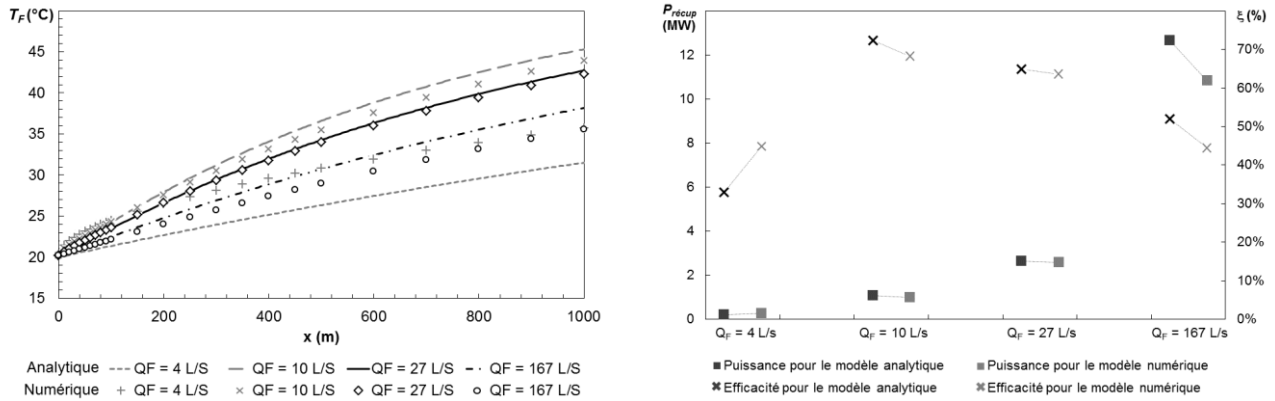
Propriété			Fluide	Roche
Densité volumique	ρ	kg/m ³	1000	2700
Conductivité thermique	λ	W/m.°C	0,58	2,7
Chaleur massique	c_p	J/kg.°C	4180	800
Viscosité dynamique	μ	Pa.s	1,02x10 ⁻³	

Tableau 2. Débits du fluide

Débit	Type d'écoulement
4 L/s	Laminaire
10 L/s	Transition laminaire-turbulent
27 L/s	Turbulent
167 L/s	Fortement turbulent

La figure 3 présente la comparaison des résultats obtenus pour chacune des deux approches, analytique et numérique. Le profil de la température du fluide (Fig. 3a) montre une parfaite concordance pour un débit $Q_F = 27$ L/s. Dans le cas des débits $Q_F = 10$ L/s et 167 L/s, les profils obtenus par le modèle analytique sont légèrement surestimés par rapport à ceux obtenus par le modèle numérique bien qu'ils suivent la même pente. Ceci s'explique par une sous-estimation du coefficient h_F dans le modèle numérique. Un fort désaccord est trouvé dans le cas d'un faible débit $Q_F = 4$ L/s. Pour ce débit correspondant à un écoulement laminaire, l'analyse numérique montre que le coefficient h_F varie fortement selon x . L'hypothèse d'un coefficient h_F uniforme le long de la galerie n'est donc pas valable pour cet écoulement de faible débit.

La figure 3 confirme la forte influence du débit injecté sur le gain énergétique au point d'extraction à $x = 1000$ m. La température de sortie T_{F2} est d'autant plus importante que le débit est faible (cf. cas de l'écoulement turbulent). Cependant, plus le débit est important, plus la puissance récupérée est élevée. Le débit injecté joue donc un rôle crucial dans le dimensionnement du système géothermique. Si la centrale de chauffage urbain doit couvrir une demande importante, le débit du fluide devra être élevé, mais cela aura pour conséquence une efficacité amoindrie. Bien entendu, l'efficacité dépend de la position du point d'extraction.



(a) Profil de la température du fluide

(b) Gain énergétique au point d'extraction

Figure 3. Comparaison des modèles analytique et numérique pour $r_0 = r_P$

Nous étudions ensuite l'influence de la position du rayon r_0 sur la performance énergétique de la galerie minière. A mesure que le rayon r_0 augmente, nous remarquons que le gain de température au point d'extraction devient de plus en plus faible et qu'il se stabilise (Fig. 4). Les résultats présentés dans la figure 5 montrent que les puissances récupérées pour différents débits se rejoignent à partir de $r_0 = 20 r_P$. Cela signifie qu'au-delà du rayon $r_0 = 20 r_P$, la puissance cédée par la roche se stabilise et l'échange thermique n'a plus vraiment d'influence sur la température de la roche.

Puisque la performance thermique de la mine est fonction du rayon caractéristique r_0 qui lui-même dépend de la durée d'exploitation, il est nécessaire de mener une étude en régime transitoire de façon à déterminer l'évolution du rayon r_0 en fonction du temps t .

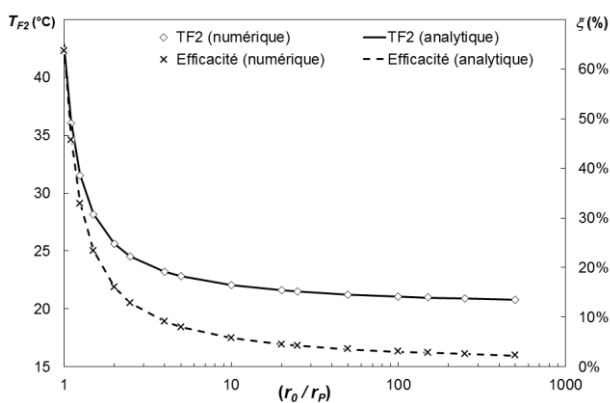


Figure 4. Variation de la température et de l'efficacité au point d'extraction pour un débit $Q_F = 27$ L/s

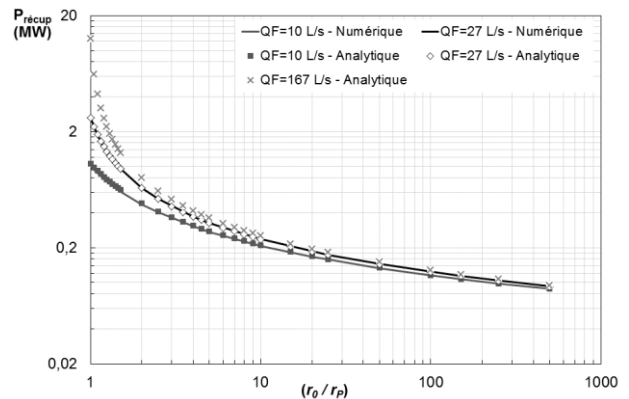


Figure 5. Variation de la puissance récupérée en fonction de r_0 pour différents débits

3.2. Analyse en régime transitoire

Afin de déterminer le rayon caractéristique r_0 en fonction du temps, nous menons une simulation numérique en régime transitoire pour un débit constant $Q_F = 27$ L/s. La température initiale de la roche et de l'eau vaut $T_0 = 55^\circ\text{C}$. Le cylindre de la roche prise en compte présente un rayon $r = 20 r_p$ afin de s'affranchir des effets de bord. A ce bord limite, une condition de température constante $T = T_0$ est imposée.

La figure 6 montre que la température du fluide au point d'extraction T_{F2} diminue très rapidement lors du premier mois d'exploitation. Par la suite, elle continue à baisser légèrement et commence à se stabiliser à partir de 2 ans d'exploitation. Quant à la température moyenne de la roche dans le cylindre de rayon $r = 20 r_p$, elle varie peu et ne subit qu'une perte de 6°C au bout de 10 ans d'exploitation ininterrompue. Ces résultats montrent que l'influence des échanges thermiques dans la galerie minière géothermique sur la température naturelle de la roche se limite à un cylindre de faible rayon bien inférieur à $20 r_p$.

Il convient de souligner que l'exploitation géothermique est rarement continue au cours du temps. Dans un scénario plus réaliste, les ressources géothermiques sont exploitées durant la saison de chauffe et sont ensuite régénérées durant l'été. La prise en compte de durées d'exploitation intermittentes fera l'objet de la prochaine étude.

A partir des profils de température de la roche selon r au cours du temps, nous déduisons une relation permettant de définir le rayon r_0 en fonction de la durée de l'exploitation. Nous rappelons que nous définissons ce rayon r_0 comme le rayon caractéristique au niveau duquel le flux radial de la roche est égal au flux géothermique.

A partir des données de la Figure 7, nous obtenons la relation suivante permettant de compléter la solution analytique proposée précédemment :

$$(r_0/r_p) = 0,0195t^{0,3739} \quad (6)$$

Cette relation montre que le rayon r_0 varie dans le temps selon une loi de puissance. Dans une prochaine étude, il serait intéressant à travers une analyse dimensionnelle d'exprimer cette relation en fonction des propriétés du fluide et de la roche, comme celle exprimée par Rodríguez et Díaz (2009). Dans la Figure 7, nous présentons également la formulation analytique proposée par Rodríguez et Díaz (2009) et nous trouvons un fort désaccord avec celle obtenue par notre modèle numérique. Ceci est probablement dû à l'expression erronée de la résistance thermique dans un repère cylindrique utilisée par Rodríguez et Díaz (2009).

4. Conclusion

Nous présentons dans cet article une analyse de la performance thermique globale d'une galerie minière géothermique. Un modèle analytique simple, basé sur un bilan thermique, est proposé et permet d'estimer rapidement le gain énergétique d'une galerie minière en régime stationnaire. Ce modèle est ensuite confronté à un modèle numérique bidimensionnel qui prend en compte la dynamique du fluide. Les résultats montrent que le modèle analytique proposé est en concordance avec le modèle numérique sauf pour les faibles débits. Le modèle analytique est alors complété par une relation en fonction du temps d'exploitation résultant de l'analyse numérique transitoire.

Le modèle analytique proposé pourrait alors être un outil pratique pour le dimensionnement d'une galerie minière géothermique. Pour cela, une étude approfondie sur l'analyse dimensionnelle est nécessaire. La prise en compte de durées d'exploitation intermittentes est également attendue dans une prochaine étude.

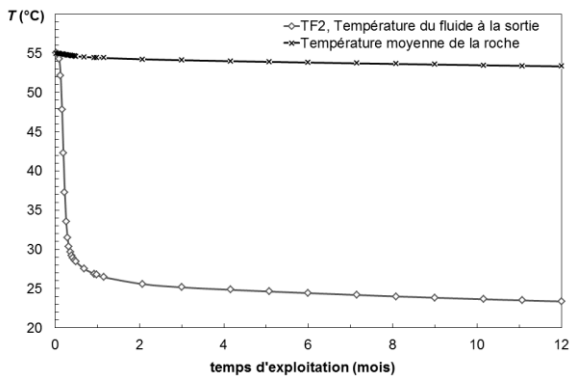


Figure 6. Baisse de la température en fonction du temps d'exploitation

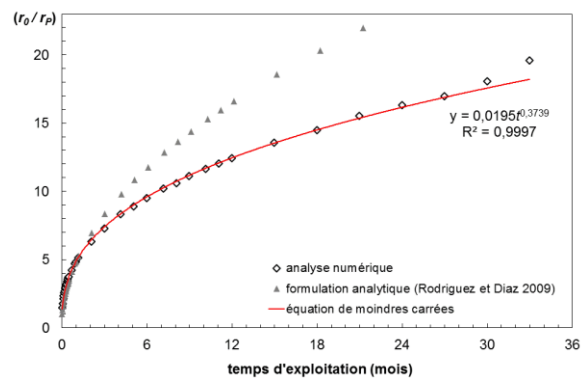


Figure 7. Relation du rayon caractéristique r_0 avec le temps d'exploitation

5. Références bibliographiques

- Anslys, Inc. (2013). ANSYS Fluent theory guide. Canonsburg, PA, 814 pages.
- Banks D., Fraga Pumar A., Watson I. (2009). The operational performance of Scottish minewater-based ground source heat pump systems. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 42, n° 3, pp. 347–357.
- Bianchi A.M., Fautrelle Y., Etay J. (2004). Transferts thermiques. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 550 pages.
- Cartannaz C. (2008). Projet Minewater : Géologie du reservoir minier du bassin houiller lorrain (puits Vouters 2 et Simon 5), BRGM/RP-56257-FR, 49 pages.
- Ghoreishi Madiseh S.A., Ghomshei M.M., Hassani F.P., Abbasy F. (2012). Sustainable heat extraction from abandoned mine tunnels: A numerical model. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 4, n° 3, pp. 033102-1–16.
- Hamm V., Bazargan Sabet B. (2010). Modelling of fluid flow and heat transfer to assess the geothermal potential of a flooded coal mine in Lorraine, France. *Geothermics*, vol. 39, n° 2, pp. 177–186.
- Homand F., Duffaut P. (2000). Manuel de mécanique des roches Tome 1 : Fondements. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 280 pages.
- Kranz K., Dillenardt J. (2010). Mine water utilization for geothermal purposes in Freiberg, Germany: Determination of hydrogeological and thermophysical rock parameters. *Mine Water and the Environment*, vol. 29, n° 1, pp. 68-76.
- Malolepszy Z. (2003). Low temperature, man-made geothermal reservoirs in abandoned workings of underground mines. *Proceedings of the 28th workshop on geothermal reservoir engineering*, pp. 259-265, Stanford University, USA.
- Renz A., Rühaak W., Schätzl P., Diersch H. J. (2009). Numerical modeling of geothermal use of mine water: Challenges and examples. *Mine Water and the Environment*, vol. 28, n° 1, pp. 2-14.
- Rodríguez R., Díaz M.B. (2009). Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means a semi-empirical prediction method. *Renewable Energy*, vol. 34, n° 7, pp. 1716-1725.
- Verhoeven R., Willems E., Harcouët-Menou V., et al. (2014). Minewater 2.0 project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling. *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 58-67.
- Whitaker, S. (1972). Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles. *AIChE Journal*, vol. 18, pp. 361-371.