

## GÉOTHERMIE DE TRES BASSE TEMPERATURE

Alain Dassargues <sup>(1)</sup>, Samuel Wildemeersch <sup>(1)</sup>

(1) Université de Liège, Département ArGenCo, GEO<sup>3</sup>, Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement, Chemin des Chevreuils, 1, B52/3 Sart-Tilman, B-4000 Liège.  
[alain.dassargues@ulg.ac.be](mailto:alain.dassargues@ulg.ac.be), [swildemeersch@ulg.ac.be](mailto:swildemeersch@ulg.ac.be).

### INTRODUCTION

La géothermie s'est considérablement développée au cours des dernières années et des environnements très variés sont à présent envisagés pour la mise en place de systèmes de chauffage et/ou de refroidissement. La preuve en est que le nombre de systèmes géothermiques a considérablement augmenté partout dans le monde, y compris en Belgique, avec la mise en place de systèmes géothermiques de très basse température (Lund et al., 2011).

L'expression « géothermie de très basse température » est utilisée dans le cas d'aquifères peu profonds, exploités de quelques mètres à moins d'une centaine de mètres de la surface du sol, au sein desquels la température de l'eau souterraine est comprise entre 5 à 30° C. La valorisation thermique de tels aquifères nécessite systématiquement l'usage de pompes à chaleur. L'objectif principal lors de la mise en place de systèmes géothermiques de très basse température est le chauffage (eau sanitaire ou chauffage central) et/ou la climatisation de maisons individuelles et d'immeubles.

Les systèmes géothermiques de très basse température se scindent en deux grandes catégories (Fig. 1) : les systèmes ouverts (puits géothermiques) et les systèmes fermés (sondes géothermiques (Rafferty, 2003).

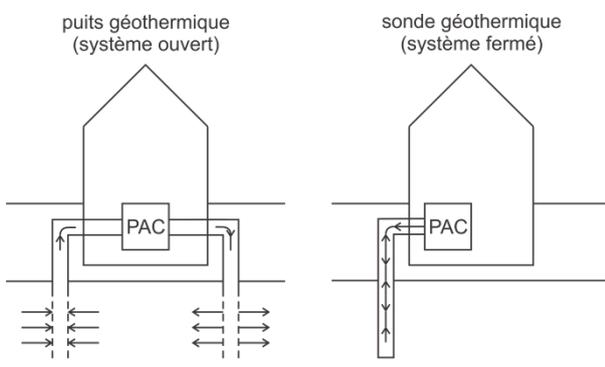


Figure 1 – Puits géothermiques (système ouvert) vs sonde géothermique (système fermé).

Les systèmes ouverts privilégiés sont le plus souvent constitués d'un puits de pompage et d'un puits de réinjection. L'eau souterraine captée par le puits de pompage est utilisée pour fournir (en mode chauffage) ou reprendre (en mode refroidissement) de la chaleur au milieu à chauffer ou à climatiser avant d'être réintroduite dans la nappe par le puits d'injection. Ces systèmes sont également repris sous l'acronyme ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) puisque la chaleur injectée lors des phases de climatisation, en été, sera (en partie) reprise par les pompages pour les phases de chauffage, en hiver. Il est évident que de tels systèmes ne peuvent être installés qu'au sein de formations géologiques suffisamment perméables permettant de pomper l'eau souterraine en quantité suffisante.

Les systèmes fermés sont constitués d'un réseau de tubes en polyéthylène enterrés à l'intérieur desquels circule un fluide caloporteur pour extraire (en mode chauffage) ou restituer (en mode climatisation) de la chaleur au sol. Ces réseaux de tubes sont installés horizontalement dans une tranchée ou verticalement dans un forage. Ces systèmes peuvent être installés au sein de toutes les formations géologiques, y compris les horizons peu perméables ou non-saturés.

### PUITS GEOTHERMIQUES (SYSTEME OUVERT)

Lorsque l'eau souterraine captée par le puits de pompage et servant de fluide géothermal est réinjectée dans la nappe via un puits de réinjection, le système est qualifié de « doublet géothermique » et une distance minimale doit être calculée entre les puits de pompage et de réinjection pour éviter toute interférence susceptible de limiter les performances du système. La variante habituellement la plus intéressante du doublet géothermique est le système qualifié de « puits chaud/puits froid ». Ce système qui allie chauffage et climatisation consiste à coupler les deux puits sur une pompe à chaleur. En hiver, l'eau souterraine est pompée dans le puits A (« puits chaud ») et, après passage dans la pompe à chaleur, est réinjectée plus froide dans le puits B (« puits froid »). En été, le système est inversé, l'eau souterraine est pompée dans le

puits B (« puits froid ») et, après passage dans le milieu à climatiser, est réinjectée plus chaude dans le puits A (« puits chaud »). Ce système mise donc sur une certaine inertie thermique de l'aquifère pour obtenir de meilleures performances. Ce système de type ATES nécessite, en fonction des débits à pomper, que les formations géologiques sollicitées présentent des conductivités hydrauliques élevées. Ce dernier point peut, dans certains, être en contradiction avec un stockage efficient de chaleur puisque les formations les plus perméables sont souvent le siège d'écoulements souterrains significatifs lorsqu'un gradient piézométrique est présent. Afin de trouver les conditions optimales pour un tel système, il est nécessaire de caractériser de façon précise les conditions hydrogéologiques et thermiques et de les intégrer dans un modèle numérique couplant écoulement et transfert de chaleur. Cet outil est non seulement indispensable pour le dimensionnement optimal du système mais également pour estimer son impact, à moyen et à long terme, sur la nappe aquifère, y compris en tenant compte d'éventuels effets additifs dus à la multiplication de systèmes similaires en zones urbaines. Ces simulations ne sont pas triviales et nécessitent une caractérisation minimum de l'aquifère en termes de propriétés hydrogéologiques et thermiques. C'est d'autant plus vrai que des contraintes supplémentaires sont souvent à considérer, par exemple :

- la limitation des rabattements induits, spécialement en cas de terrains superficiels susceptibles de se tasser (argiles, limons, alluvions tourbeuses...). Ceci demande d'intégrer dans les calculs les autres pompages existants et de prendre en compte les interactions éventuelles avec les eaux de surface.
- la concertation avec le voisinage afin de ne pas placer son « puits chaud » à proximité immédiate du « puits froid » du voisin tout en tenant compte de la direction de l'écoulement souterrain et du transport de chaleur au sein de cet écoulement.
- l'assainissement de l'état potentiellement contaminé de la nappe (en zone urbaine). Le système (avec pompage et réinjection) favorise la dispersion des éventuels contaminants, solubilisés ou non, présents dans la nappe aquifère ou au sommet de celle-ci. Il est possible, dans certains cas, de considérer que la hausse des températures près du « puits chaud » favorisera certaines réactions d'atténuation et de bioremédiation naturelles mais ces processus nécessiteraient au minimum de faire l'objet d'un monitoring voire d'un véritable contrôle.
- l'impact hydrochimique potentiel sur la qualité de la ressource en eaux souterraines. Ce point est particulièrement important pour les zones dans lesquelles des potentialités de production d'eau sont reconnues. Il paraît, par contre, abusif voire trop conservateur d'un point de vue de la sécurité de la ressource en eau, de vouloir appliquer les mêmes règles aux puits de pompage géothermiques que

celles pratiquées pour les captages d'eau potabilisables.

Si l'eau souterraine captée n'est pas réinjectée dans la nappe, elle est rejetée dans le milieu naturel en surface, à condition que cela ne présente pas de risques pour l'environnement (eau fortement chargée), ou dans le réseau de distribution d'eau potable. Il est également possible de l'utiliser pour toutes autres applications (procédés industriels...) à condition que les contraintes chimiques, techniques et légales le permettent.

### SONDES GEOTHERMIQUES (SYSTEME FERME)

Les sondes géothermiques peuvent être installées dans tout type de terrain et les tubes peuvent y être disposés dans différentes configurations. Quoiqu'un réseau de tubes horizontaux soit possible, le plus souvent, les sondes duplex ou coaxiales (Fig. 2) sont disposées dans des puits ou dans des tranchées de façon à minimiser l'emprise au sol. L'avantage du type duplex est que l'échange de chaleur a lieu tout le long du circuit alors que dans le type coaxial, il se fait uniquement pendant la descente ou la remontée (le sens de circulation peut être modifié pour l'extraction et l'injection de chaleur). Toutefois, dans le type coaxial, l'échange a lieu sur une plus grande surface. Le tubage interne des sondes coaxiales est souvent isolé pour éviter tout court-circuit thermique. Les puits dans lesquels sont installées les sondes peuvent atteindre 100 à 400 m de profondeur. Le fluide caloporteur est souvent de l'eau claire ou un mélange d'eau et d'antigel à base d'éthylène glycol (Tyberghien, 2005).

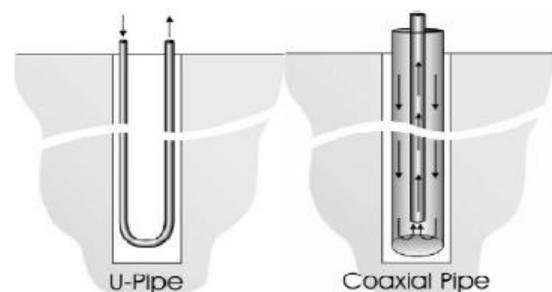


Figure 2 – Sondes géothermiques duplex (tubes en U) et coaxiale (Gehlin, 2002).

L'utilisation d'une pompe à chaleur est, dans la plupart des cas, indispensable pour transférer la chaleur au milieu à chauffer, ces dispositifs sont le plus souvent désignés par l'abréviation anglo-saxonne GSHP (Ground Source Heat Pumps). Ces systèmes ont intrinsèquement moins de rendement thermique que les systèmes ouverts et, pour de grands immeubles, les longueurs de

forages cumulées deviennent parfois rédhibitoires pour fournir la puissance souhaitée dans le scénario le plus énergivore. Comme pour les puits géothermiques, les sondes géothermiques nécessitent également de caractériser le milieu souterrain saturé ou partiellement saturé dans lequel elles sont installées pour pouvoir dimensionner de façon optimale le système et estimer son impact sur les éventuelles ressources en eaux souterraines présentes au droit du site.

### PARAMETRES IMPORTANTS

La quantité de chaleur qui pourra être extraite du milieu souterrain dépend de nombreux paramètres et variables caractéristiques de la zone concernée. Ceux-ci sont d'une importance capitale dans le dimensionnement du système (nombre de puits, positionnement des puits et débits à pomper pour les systèmes ouverts, longueur et nombre de tubes échangeurs de chaleur pour les systèmes fermés, capacité des pompes à chaleur...). Les principaux paramètres sont :

- la géologie et l'hydrogéologie des terrains : nature et géométrie des couches en présence (continuité, épaisseur...),
- les paramètres hydrodynamiques du milieu souterrain : conductivité hydraulique, porosité totale, porosité effective et coefficient d'emmagasinement,
- les paramètres thermiques du milieu souterrain : conductivité thermique, capacité calorifique spécifique et dispersivité thermique,
- les paramètres thermiques de l'eau souterraine : conductivité thermique et capacité calorifique spécifique,
- les caractéristiques physico-chimiques de l'eau souterraine : concentration en solutés et gaz dissous,
- les caractéristiques géomécaniques des terrains exploités ainsi que de la couverture puisque ceux-ci ont un impact direct sur le coût et la méthode de forages,
- le transfert annuel net d'énergie au sous-sol (en provenance de la surface et de la profondeur),
- l'efficacité et la consommation énergétique des pompes à chaleur.

Qui plus est, dans le cas des sondes géothermiques, il faut considérer les paramètres relatifs au puits et au fluide caloporteur qui y circule. Les principaux sont :

- la configuration (en série et/ou en parallèle) et le diamètre des puits,
- la résistance thermique du puits (ensemble tubage, coulis de remplissage, PEHD),
- le type de fluide caloporteur et ses propriétés thermiques,
- la vitesse et le mode d'écoulement du fluide caloporteur à l'intérieur du tube.

Une série de variables peuvent être fixées, calculées ou optimisées par modélisation numérique en vue de l'optimisation globale du système :

- le degré de saturation, le gradient hydrogéologique et les vitesses effectives d'écoulement dans l'aquifère ou la couche géologique concernée,
- la température du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie du système et leur gamme de variation,
- l'interdistance et les interactions entre puits de pompage et/ou sondes géothermiques.

Toutes ces variables qu'il faut estimer/calculer, sont également susceptibles d'être influencées par la mise en fonction du dispositif dans la zone d'étude.

### TRANSFERT DE CHALEUR EN MILIEU POREUX SATURE

Une série de logiciels spécialisés, avec plus ou moins de simplifications dans les calculs, existent pour optimiser les sondes géothermiques. Ce n'est pas le cas pour les puits géothermiques pour lesquels l'optimisation nécessite un calcul du transfert de chaleur au sein du milieu poreux saturé. Quel que soit le système envisagé, il est également nécessaire d'évaluer son impact à court, à moyen et à long terme sur le milieu souterrain. Cet impact peut influencer la structure du système à retenir mais il est surtout à comparer à une série de règles et lois dans un nombre croissant de pays. A titre d'exemple, en Suisse, la loi stipule que la modification de température ne peut dépasser 3° C à 100 m en aval hydrogéologique des installations.

Si nous prenons l'hypothèse simplificatrice d'un équilibre thermique entre l'eau souterraine et la matrice rocheuse et en négligeant la convection thermique (Pantakar, 1980), l'équation de conservation exprimant le transfert de chaleur dans un milieu poreux saturé peut s'écrire :

$$\left(\frac{\rho_m c_m}{n_e \rho_w c_w}\right) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} \left[ \left( \frac{\lambda_m}{n_e \rho_w c_w} + \alpha v_e \right) \operatorname{grad} T \right] - \operatorname{div}(v_e T) + \frac{q'}{n_e \rho_w c_w}$$

où la variable principale  $T$  est la température de l'eau souterraine,  $t$  est le temps,  $\rho_m$  et  $c_m$  sont, respectivement, la masse volumique et la capacité calorifique spécifique du milieu poreux saturé,  $\rho_w$  et  $c_w$  sont, respectivement, la masse volumique et la capacité calorifique spécifique de l'eau,  $n_e$  est la porosité effective du milieu poreux,  $\lambda_m$  est la conductivité thermique du milieu poreux saturé,  $\alpha$  est la dispersivité thermique,  $v_e$  est la vitesse effective de l'eau souterraine et  $q'$  est un terme source/puits.

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  $n_e$  sont les principaux paramètres gouvernant l'advection puisqu'ils influencent la vitesse effective de l'eau souterraine  $v_e$  (3<sup>ème</sup> terme du membre de droite). La conductivité thermique  $\lambda_m$  et la capacité calorifique spécifique  $c_m$  du milieu poreux saturé sont les principaux paramètres gouvernant, respectivement, la conduction thermique (1<sup>er</sup> terme du membre de droite) et les échanges de chaleur entre la matrice solide et le fluide (membre de gauche de l'équation). Les dispersivités thermiques longitudinale et transversale gouvernent la dispersion thermique (2<sup>ème</sup> terme du membre de droite). Ces coefficients de dispersivité thermomécanique longitudinale et transversale sont très sensibles aux effets d'échelle à l'instar des coefficients de dispersivité mécanique pour le transport de solutés.

L'équation de transfert de chaleur est fort similaire à l'équation de transport de soluté pour un traceur idéal qui s'écrit habituellement:

$$R \frac{\partial C^v}{\partial t} = \text{div}[(D_m + \alpha v_e) \text{grad } C^v] - \text{div}(v_e C^v) + \frac{q' C^v}{n_e} - \lambda C^v R$$

où la variable principale est la concentration volumique  $C^v$ ,  $R$  est le facteur de retard,  $D_m$  est le coefficient de diffusion moléculaire,  $\alpha$  est la dispersivité,  $v_e$  est la vitesse effective de l'eau souterraine,  $n_e$  est la porosité effective du milieu poreux,  $q'$  est un terme source/puits et  $\lambda$  est le coefficient de dégradation linéaire.

L'analogie entre les équations de transfert de chaleur et de transport de soluté en milieu poreux saturé permet d'utiliser des modèles numériques développés pour le transport de soluté pour modéliser le transfert de chaleur (Hecht-Méndez, 2008 ; Fossoul, 2009 ; Hecht-Méndez *et al.*, 2010 ; Fossoul *et al.*, 2010). Cependant, il convient de noter que la conductivité thermique  $\lambda_m$  et la capacité calorifique spécifique  $c_m$  sont des paramètres qui varient avec la température. Ceci conduit à des non-linéarités dans les calculs puisque des paramètres de l'équation sont dépendants de la variable principale et donc de la solution au problème. Il en est de même pour la conductivité hydraulique qui varie avec la température de l'eau souterraine via essentiellement sa viscosité dynamique.

Le transfert de chaleur est influencé par les écoulements souterrains, et inversement, les

écoulements souterrains peuvent être influencés par le transfert de chaleur. La solution rigoureuse à un tel problème nécessite donc de prendre en compte le couplage « écoulement souterrain – transfert de chaleur » et les non linéarités des paramètres dans les simulations effectuées. L'utilisation de modèles numériques habituellement utilisés pour le transport de solutés en milieu souterrain saturé tels que MT3DMS (Zheng et Wang, 1999) ne constitue qu'une approximation d'une situation plus complexe. Les utilisateurs choisissant ce genre de simplifications devraient vérifier clairement, et mentionner dans leurs rapports techniques, les limites de validité de telles hypothèses, exprimées par rapport aux variations de températures atteintes ou prévues dans leur système. Il a été démontré (Fossoul *et al.*, 2011) que pour des cas d'étude relevant de la géothermie de très basse température, l'utilisateur peut se contenter le plus souvent d'un calcul non-couplé avec des paramètres aux valeurs constantes choisies de façon à se placer du côté de la sécurité.

Les études d'impact des sondes géothermiques sur le sous-sol saturé ou partiellement saturé à moyen et long termes ne sont pas simples à effectuer. Celles-ci nécessitent l'utilisation de logiciels permettant notamment de représenter avec une certaine finesse les sondes elles-mêmes de façon à simuler de façon ad hoc la manière dont les flux calorifiques sont soutirés du sous-sol (Raymond, 2010). L'utilisation de logiciels habituellement utilisés pour le transport de solutés en milieu souterrain saturé et la façon d'y définir les conditions aux frontières ne permet généralement pas de représenter ces flux échangés entre les sondes et le sous-sol. Une solution consiste à utiliser un processus itératif, alternant une condition de température imposée à la sonde (condition de Dirichlet) et un calcul du flux calorifique correspondant, puis à l'itération suivante, l'imposition de ce flux calorifique entre le milieu poreux et la sonde permettant le calcul de la température à la sonde, cette température étant imposée à l'itération suivante, etc. Tout cela en espérant une convergence du processus itératif vers une seule valeur du flux calorifique et de la température. Il est clair que ce processus, surtout en régime transitoire (comme c'est le cas la plupart du temps), peut devenir extrêmement lourd et, par conséquent, difficile à gérer en terme de temps de calcul.

## ESSAIS IN SITU POUR L'ESTIMATION DES PARAMETRES THERMIQUES

La construction de modèles numériques simulant l'impact thermique des systèmes géothermiques sur le milieu souterrain est

complexe à cause du couplage entre écoulement souterrain et transfert de chaleur, de la non-linéarité des paramètres mais également et surtout à cause de la relative méconnaissance des valeurs à fournir aux principaux paramètres thermiques que sont la conductivité thermique  $\lambda_m$  et la capacité calorifique spécifique  $c_m$ . L'influence de ces paramètres thermiques est souvent jugée secondaire par rapport à l'influence de paramètres hydrodynamiques tels que la conductivité hydraulique  $K$ . Toutefois, une estimation précise des paramètres thermiques permettrait de diminuer les incertitudes sur les résultats des modèles numériques et, par conséquent, sur les prévisions à long terme concernant (1) les interactions internes au dispositif, (2) les interactions cumulatives des différents dispositifs, et (3) les impacts sur le milieu souterrain en général.

La capacité calorifique spécifique peut être estimée en laboratoire grâce à des calorimètres (calorimètre de mélange ou calorimètre différentiel à flux de chaleur). La conductivité thermique peut également être estimée en laboratoire (barre divisée, aiguille chauffante ou balayage optique). Toutefois, les mesures en laboratoire sont toujours effectuées sur des échantillons de volume limité et potentiellement remaniés. Cela pose irrémédiablement la question de la représentativité des mesures effectuées. Les essais in situ sont, par conséquent, souvent jugés plus représentatifs.

L'essai in situ relatif aux paramètres thermiques le plus populaire pour l'instant est le Test de Réponse Thermique (TRT). Cet essai est effectué dans un forage équipé d'une sonde géothermique et d'une chaudière électrique grâce à laquelle une grande quantité de chaleur est injectée en continu dans le sous-sol. Lors de l'injection de chaleur, le débit du fluide caloporteur (souvent de l'eau) et les températures d'entrée et de sortie de celui-ci sont mesurées simultanément. Ces mesures permettent de calculer la quantité de chaleur absorbée par le sous-sol et d'en déduire la conductivité thermique. Toutefois, la conductivité thermique estimée est une conductivité thermique effective globale entre le fluide caloporteur et le sous-sol, prenant en compte implicitement les effets de l'écoulement souterrain et de la convection naturelle et intégrant toutes les interactions avec l'équipement de la sonde (Gehlin, 2002). Cette conductivité thermique effective est représentative pour les sondes géothermiques (système fermé) mais pas pour les puits géothermiques (système ouvert) qui influencent de façon significative l'écoulement souterrain via leur pompage. Le TRT ne fournit, en outre, aucune information sur la capacité calorifique spécifique du milieu poreux saturé qui

est pourtant essentielle puisqu'elle conditionne les échanges de chaleur entre l'eau souterraine et la matrice solide.

Les lacunes du TRT ont conduit au développement d'un essai in situ inédit pour estimer les paramètres thermiques. Cet essai consiste à injecter simultanément de l'eau chaude et un traceur fluorescent dans un puits (Fig. 3) et à suivre l'évolution de la température et de la concentration en traceur au puits de reprise et dans une série de piézomètres intermédiaires (Wildemeersch *et al.*, 2013, 2014). L'essai en question a été effectué dans la plaine alluviale de la Meuse sur le site expérimental de Hermalle-sous-Argenteau. Tout d'abord, la comparaison entre les courbes de restitution de température et de traceur a mis en évidence que le transfert de chaleur est nettement plus lent et plus dispersif/diffusif que le transport de soluté. Le taux de restitution de chaleur mesuré au puits de pompage n'est que de 1 % alors que le taux de restitution pour le soluté est de l'ordre de 70 % (Wildemeersch *et al.*, 2014). C'est principalement lié aux échanges de chaleur entre l'eau souterraine et la matrice solide. L'interprétation de la courbe de restitution de température au puits de reprise a ensuite permis d'estimer la capacité calorifique spécifique du milieu poreux saturé à partir (1) d'un bilan d'énergie et (2) d'une modélisation en série des courbes de restitution du traceur fluorescent et de température au puits de reprise. Les estimations obtenues avec les deux méthodes sont similaires et de l'ordre de  $2.38 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ .



Figure 3 – Injection simultanée d'eau chaude et de traceur. L'eau chaude est produite par la chaudière de terrain portative (en bleu sur la photo).

Le potentiel d'un tel essai de traçage thermique est énorme puisque l'ensemble des mesures de température effectuées dans le puits de reprise et les piézomètres intermédiaires contient en théorie suffisamment d'information pour estimer

simultanément tous les paramètres thermiques et leur distribution spatiale. Toutefois, en pratique, cela nécessite de développer un modèle numérique complet de l'essai en question de façon à estimer les paramètres thermiques par inversion. L'essai de traçage n'est pas forcément nécessaire pour estimer les paramètres thermiques. Toutefois, avant l'inversion, les mesures de concentration en traceur peuvent être utilisées pour estimer les paramètres communs au transfert de chaleur et au transport de soluté tels que la porosité effective.

La géothermie est en plein essor et les scientifiques s'accordent sur l'importance d'effectuer des calculs rigoureux pour estimer l'impact thermique des systèmes géothermiques à court, à moyen et à long terme sur le milieu souterrain. Ces calculs ne sont pas triviaux et nécessitent de développer des modèles numériques complexes couplant écoulement souterrain et transfert de chaleur. L'estimation précise des paramètres thermiques est, en outre, capitale pour réduire les incertitudes des prévisions effectuées. Il y a de fortes chances que les prochaines années voient le développement (1) d'essais de terrain spécialement dédiés à l'estimation des paramètres thermiques et (2) la mise au point de logiciels spécialement conçus pour le dimensionnement des systèmes géothermiques. Il est en effet essentiel de disposer d'outils moins empiriques que les outils

utilisés pour l'instant par la plupart des acteurs économiques actifs dans le secteur parce que ceux-ci ne permettent pas de répondre de manière fiable à l'ensemble des questions évoquées ci-dessus et que les parties concernées sont en droit de se poser. Il en va du développement futur de la géothermie.

#### EXEMPLE DE SIMULATION DE L'IMPACT DE PUIITS GEOTHERMIQUES SUR LES INTERACTIONS EAUX DE SURFACE – EAUX SOUTERRAINES

Afin d'illustrer les propos du présent chapitre, la figure 4 représente les températures simulées dans la nappe alluviale de la Meuse à Liège à la suite de pompages continus dans le cadre d'un projet de puits géothermique pour le refroidissement d'un important immeuble de bureaux. Le cas extrême le plus défavorable (« worst case scenario ») s'est avéré correspondre à une période estivale fort chaude exigeant une capacité de refroidissement, via les pompes à chaleur, nécessitant un pompage continu de 200 m<sup>3</sup>/h réparti sur 10 puits géothermiques pompant de l'eau souterraine de la nappe alluviale à une température de 13 °C. Les interactions avec le fleuve sont prises en compte via une condition aux frontières imposant une température de 25°C le long de la Meuse (également « worst case scenario »).

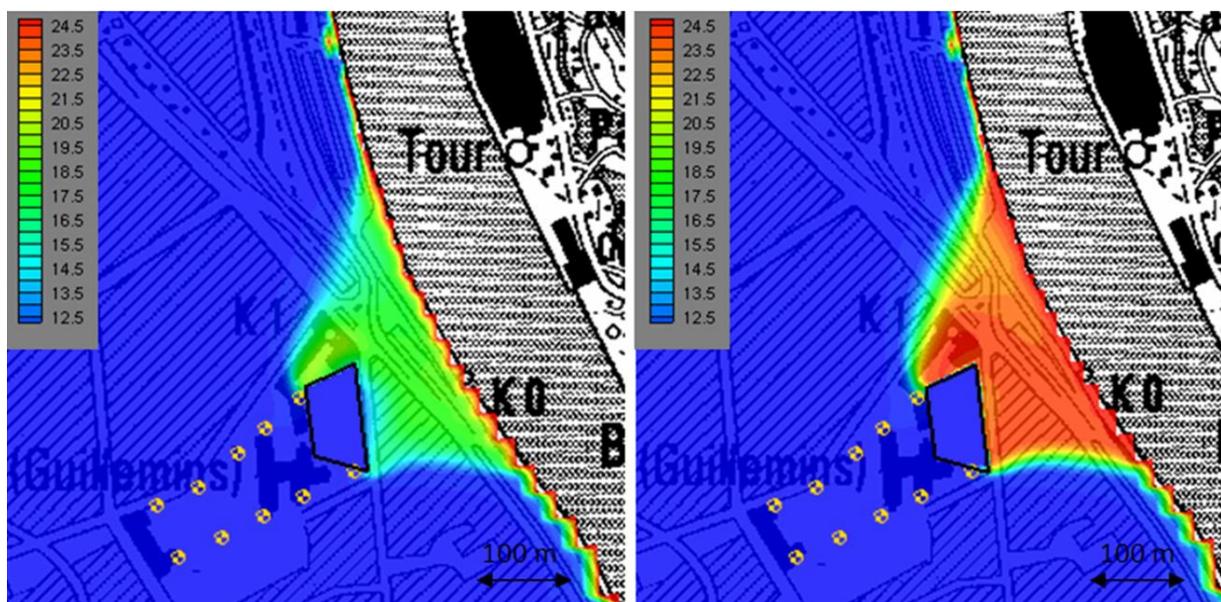


Figure 4 – Températures, en °C, simulées dans l'aquifère alluvial (graviers, sables et limons) après 1 mois (à gauche) et 3 mois (à droite) de pompage à 200 m<sup>3</sup>/h répartis uniformément sur 10 puits (adaptée de Fossoul et al., 2011). Les simulations ont été effectuées avec HGS (Therrien et al., 2005).

La figure montre clairement que la contamination thermique de la nappe alluviale par l'eau du fleuve est fortement accentuée par les pompages. Le calcul en régime transitoire permet éventuellement d'optimiser la façon (intermittente) de pomper. Cependant, dans la pratique et pour le cas d'étude en question, il s'est avéré que les conductivités hydrauliques locales mesurées in situ étaient inférieures à celles prévues et ne permettraient pas de pomper les débits nécessaires.

## REFERENCES

- Fossoul, F., 2009. Etude et modélisation d'un aquifère alluvial en vue de la mise en place d'installations de refroidissement et de conditionnement d'air, Thèse de Master, Université de Liège, 154 p.
- Fossoul, F., Orban, Ph., Dassargues, A., 2010. Modelling groundwater pumping and coupled heat transport in a alluvial aquifer: test using different codes and optimization, Proc. of the XVIII<sup>th</sup> International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR 2010), J. Carrera (Ed.), CIMNE, Barcelona.
- Fossoul, F., Orban, Ph., Dassargues, A., 2011. Numerical simulation of heat transfer associated with low enthalpy geothermal pumping in an alluvial aquifer, *Geologica Belgica*, 14(1-2), pp. 45-54.
- Gehlin, S., 2002. Thermal Response Test, Method, development, and evaluation, Thèse de Doctorat, Luleå University of Technology, 186 p.
- Hecht-Méndez, J., 2008. Implementation and verification of the USGS solute transport code MT3DMS for groundwater transport modeling, Thèse de Master, University of Tübingen, 73 p.
- Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., 2010. Evaluating MT3DMS for heat transport simulation of closed geothermal systems, *Ground Water*, 48(5), pp. 741-756.
- Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L., 2011. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, *Geothermics*, 40(3), pp. 159-180.
- Pantakar, S., 1980. Numerical heat transfer and fluid flow, Editions Taylor & Francis, New York, 214 p.
- Rafferty, K., 2003. Ground water issues in geothermal heat pump systems, *Ground Water*, 41(4), pp. 408-410.
- Raymond, J., 2010. Geothermal system optimization in mining environments, Thèse de Doctorat, Université Laval, 242 p.
- Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A., Panday, S.M., 2005. HydroGeoSphere, A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport, User manual, 343 p.
- Tyberghein, G., 2005. Etude du comportement des pieux échangeurs de chaleur, Thèse de Master, Université de Liège.
- Wildemeersch, S., Jamin, P., Orban, Ph., Hermans, T., Brouyère, S., Dassargues, A., 2013. Coupling heat and salt tracer experiment for the estimation of heat transfer and solute transport parameters, 8<sup>th</sup> IAHS International Groundwater Quality Conference (GQ13), Gainesville, USA.
- Wildemeersch, S., Jamin, P., Orban, Ph., Hermans, T., Nguyen, F., Brouyère, S., Dassargues, A., 2014. Coupling heat and chemical tracer experiments for estimating heat transfer parameters in shallow alluvial aquifers, submitted to *Journal of Contaminant Hydrology*.
- Zheng, C., Wang, P.P., 1999. MT3DMS, A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems, Documentation and user's guide, Contract Report SERDP-99-1, U.S. Army, Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Massachusetts, USA, 202 p.