

VIABILITE D'UNE EXPLOITATION GEOTHERMIQUE EN MILIEU URBAIN : EVITER LES INTERFERENCES

SUSTAINABLE EXPLOITATION OF GEOTHERMAL ENERGY IN URBAN AREAS: AVOID INTERFERENCE

Guillaume ATTARD^{1*}, Peter BAYER², Yvan ROSSIER³, Philipp BLUM⁴, Laurent EISENLOHR¹

¹ Cerema, Direction Centre-Est, 46 rue Saint-Théobald, F-38081, L'Isle d'Abeau, France
(* auteur correspondant : guillaume.attard@cerema.fr)

² Martin Luther University Halle-Wittenberg Institute of Geosciences and Geography, Allemagne

³ Univ. Grenoble Alpes, Institut des Géosciences de l'environnement (IGE), Domaine universitaire, 1381 rue de la piscine, F-38400 Saint Martin d'Hères, France

⁴ Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute of Applied Geosciences (AGW), Kaiserstrasse 12, 76131 Karlsruhe, Allemagne

RÉSUMÉ – L'objectif de cette étude est d'élaborer une démarche visant à éviter qu'un projet géothermique soit perturbé par d'autres installations ou d'autres sources de chaleur souterraines. Des modèles analytiques et numériques sont pour cela mis en œuvre afin de cartographier un périmètre de protection. La démarche est illustrée dans le cadre de plusieurs exemples où le contexte hydrogéologique s'appuie sur contexte de la ville de Lyon.

ABSTRACT – The aim of this study is to draw a methodology dedicated to the protection of geothermal systems in regards with other installations and underground anthropogenic heat sources. Analytical and numerical models are used to map protection perimeters. The methodology is illustrated on several examples where the hydrogeological context relies on the context of Lyon (France).

1. Introduction

L'exploitation du sous-sol et des eaux souterraines comme source d'énergie géothermique suscite un intérêt croissant pour subvenir aux besoins de chauffage et de refroidissement exprimés par les territoires. Des échangeurs, ouverts ou fermés (Figure 1), permettent un transfert d'énergie thermique entre le bâtiment et le sous-sol. Les échangeurs géothermiques ouverts sont constitués d'un ou plusieurs groupes de puits captant l'eau souterraine pour couvrir les besoins énergétiques d'un bâtiment. Ces dispositifs regroupent couramment un puits d'extraction servant au pompage de l'eau souterraine, et un puits de rejet où l'eau souterraine est restituée au milieu à un débit similaire, mais à une température altérée : plus froide lorsque le dispositif est utilisé pour du chauffage, ou plus chaude lorsque le dispositif est utilisé pour du refroidissement. Les échangeurs géothermiques fermés sont généralement constitués de plusieurs sondes à l'intérieur desquelles circule un fluide caloporteur permettant d'échanger de la chaleur avec le sous-sol.

Le développement non contrôlé de la filière géothermique conduit à l'apparition de secteurs fortement sollicités, notamment en zone urbaine, où des interférences hydrauliques et thermiques peuvent survenir entre des échangeurs trop proches les uns des autres, et ainsi dégrader leurs performances. Afin d'éviter ces interférences, le code

minier prévoit que les gîtes géothermiques ne puissent être exploités qu'en vertu d'un permis d'exploitation accordé par l'autorité administrative. Ce permis d'exploitation confère un droit exclusif d'exploitation dans un volume déterminé, dit « volume d'exploitation », défini par un périmètre et deux profondeurs, conformément à l'article 134-6 de ce même code.

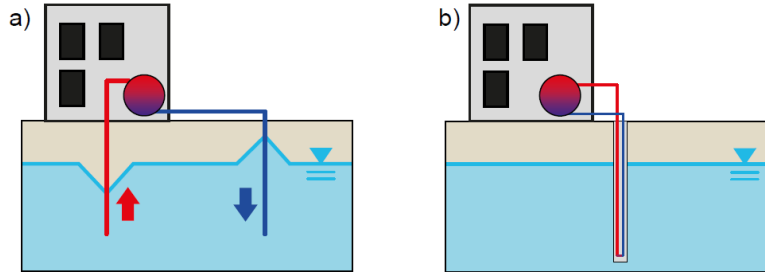


Figure 1. échangeurs géothermiques (a) ouvert et (b) fermé (Modifié d'après Bayer et al., 2019)

Le décret n°78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie, fixe le contenu de la demande de permis d'exploitation qui, selon l'article 8 du décret susvisé, doit préciser le volume d'exploitation sollicité par le pétitionnaire. De plus, depuis le 1er juillet 2016, conformément à l'article 18 de ce même décret, tout nouvel échangeur géothermique relevant du régime de minime importance (GMI) est interdit dans le volume d'exploitation d'un gîte géothermique. Le décret susmentionné demande ainsi aux pétitionnaires de déterminer le volume d'exploitation qui sera alloué à l'installation en exploitation.

Actuellement, les seules prescriptions méthodologiques associées à la détermination des volumes d'exploitation des gîtes géothermiques reposent sur des considérations géométriques et sur le choix de distances indépendantes du contexte hydrogéologique. En conséquence, ces prescriptions ne permettent pas de garantir la pérennité des installations géothermiques dans les secteurs soumis aux impacts cumulés et aux interférences de multiples installations. Ainsi, l'objectif de la présente étude est de (1) donner une définition technique à la notion de volume d'exploitation et (2) de présenter un cadre méthodologique permettant de cartographier la puissance thermique qu'il est possible d'exploiter autour d'une installation sans pour autant altérer son fonctionnement. Cette cartographie permet finalement d'appuyer la délimitation du volume d'exploitation sur un critère de puissance admissible autour du projet. Dans cet article, seul le cas des échangeurs géothermiques ouverts (sur eau de nappe) est traité.

2. Définitions et démarche pour déterminer la puissance thermique exploitable autour d'une installation

L'objectif de ce chapitre consiste à préciser les étapes permettant de définir une zone de protection autour d'une installation géothermique afin d'éviter qu'une nouvelle installation d'une puissance thermique moyenne P ne génère d'altération thermique ΔT_{max} susceptible de dégrader les performances de l'installation (Figure 1). Pour ce faire, les définitions suivantes sont données :

- La **Zone de Protection Cible (ZPC)** : elle correspond à la localisation des puits de pompage (échangeurs ouverts) permettant les échanges thermiques avec le sous-sol.
- La **Puissance thermique moyenne P** : correspond à la puissance thermique moyenne à laquelle une installation géothermique échange de la chaleur avec le sous-sol.

La puissance thermique moyenne d'une installation géothermique tierce est dite

acceptable si l'impact thermique qu'elle génère sur la ZPC de l'installation du pétitionnaire reste inférieure à ΔT_{max} .

- Le **Volume d'Exploitation** (VE) : il correspond à l'espace où l'injection d'une puissance thermique donnée P génère une altération thermique de la ZPC supérieure ou égale à ΔT_{max} .

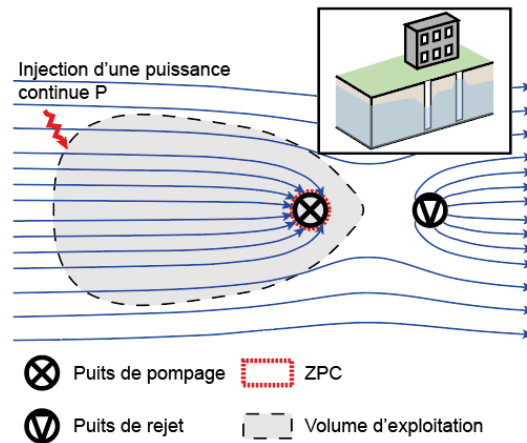


Figure 1 : Zone de protection cible et volume d'exploitation vus en plan dans le cas d'un échangeur ouvert.

La réponse thermique ΔT de la ZPC à l'injection d'une puissance thermique P en un point donné du milieu aquifère peut être étudiée à l'aide d'une fonction de transfert hydrogéologique¹ permettant (1) de décrire les temps de transfert thermique² dans le système, et (2) quantifier la probabilité p que le transfert thermique se fasse jusqu'à la ZPC en un temps donné. En raison de l'analogie qui existe entre les équations du transfert de chaleur et les équations du transport de contaminants dans un système aquifère, la définition du volume d'exploitation est un problème analogue à la définition du périmètre de protection d'un captage d'eau potable, problème pour lequel la théorie associée aux fonctions de transferts hydrogéologiques est couramment exploitée³.

Le volume d'exploitation d'un gîte géothermique correspond ainsi à l'espace où la probabilité qu'un transfert thermique atteigne la ZPC est suffisamment élevée pour que l'altération thermique qui en découle devienne supérieure à ΔT_{max} et soit ainsi indésirable. Ainsi, pour déterminer le volume d'exploitation d'un gîte géothermique, les étapes suivantes sont nécessaires :

- **Etape 1** : déterminer la perturbation thermique ΔT_{max} admissible pour maintenir les performances de l'installation sur la durée du permis sollicité. Elle dépend des préconisations techniques associées à l'échangeur et des variations saisonnières des températures du sous-sol ou de la nappe.
- **Etape 2** : cartographier les probabilités que des transferts thermiques atteignent la ZPC à l'aide de solutions analytiques ou d'une modélisation numérique. Ensuite, la formule de passage qui lie puissance thermique, probabilité, débit et variation admissible de température (équation 1) est utilisée pour cartographier la puissance thermique exploitable autour d'une installation.

Ces deux étapes sont développées dans la suite.

¹ Le transfert hydrogéologique correspond à la description du déplacement des molécules d'eau dans un système aquifère sous l'action de l'advection-dispersion et de la diffusion moléculaire.

² Le transfert thermique correspond à la description du déplacement des calories/frigoriques dans un système aquifère sous l'action de l'advection-dispersion et de la conduction thermique.

³ Pour plus de détails sur les techniques mathématiques permettant d'obtenir des fonctions de transfert en hydrogéologie, les lecteurs peuvent consulter les travaux de Cornaton et Perrochet (2006a, b) et les travaux de Milnes et Perrochet (2013) qui concernent directement une application à la géothermie.

3. Méthode de calcul de la probabilité d'atteinte et de la puissance thermique exploitable autour d'une installation

3.1. Définir la perturbation thermique ΔT_{max} acceptable

Cette amplitude ΔT_{max} correspond à l'écart maximal de température du sous-sol ou de l'eau souterraine admissible pour le maintien des performances de l'installation. En effet, une altération de la température du sous-sol ou de l'eau souterraine trop importante peut dégrader le coefficient de performance de la pompe à chaleur raccordée au dispositif géothermique ouvert ou fermé.

Ce terme conditionne l'extension du volume d'exploitation : plus ΔT_{max} est faible, plus le volume d'exploitation sera étendu et inversement, plus ΔT_{max} est grande, plus le volume d'exploitation sera restreint. En conséquence, l'amplitude ΔT_{max} doit être suffisamment faible pour garantir les performances de l'installation. Elle doit être déterminée en s'appuyant sur :

- Les préconisations techniques relatives au bon fonctionnement de l'échangeur,
- La variation naturelle de la température du sous-sol ou de la nappe dans l'environnement du projet

3.2. Cartographier les probabilités que des transferts thermiques atteignent une installation géothermique

3.2.1. Utilisation d'un modèle analytique

Dans le cas d'un échangeur ouvert, la ZPC est réduite à la localisation du/des puits de production fonctionnant avec un débit Q_p . Le critère de protection permettant de maintenir une variation de température induite par une puissance thermique externe P_{ex} , en deçà du seuil ΔT_{max} , s'exprime à l'aide de l'équation suivante :

$$p \leq \frac{\Delta T_{max} \cdot Q_p \cdot c_w}{P_{ex}} \quad (1)$$

avec c_w la capacité thermique volumique de l'eau.

Ce critère de protection signifie que toute puissance thermique externe P introduite dans une zone où la probabilité d'atteindre l'installation du pétitionnaire est supérieure à $\frac{\Delta T_{max} \cdot Q_p \cdot c_w}{P_{ex}}$ n'est pas acceptable pour maintenir la température de l'eau prélevée dans la gamme souhaitée.

Dans un système aquifère captif où les écoulements sont uniformes, d'une vitesse effective⁴ v_a et orientés dans le sens des x positifs, le modèle analytique de Domenico et Robbins (1985)⁵ modifié par Hähnlein et al. (2010) peut être utilisé pour décrire les probabilités que des transferts thermiques atteignent le dispositif (Attard et al. 2020). Ce modèle analytique est appliqué à un dispositif géothermique ouvert fonctionnant avec un débit annuel moyen de 8 m³/h, implanté dans un aquifère captif de 50 m d'épaisseur, d'une porosité efficace de 30%, où l'eau circule à une vitesse effective de 1 m par jour. La Figure 3 présente les secteurs où la probabilité que des transferts thermiques atteignent le captage est élevée (il s'agit des secteurs représentés en orange - rouge). Plus en

⁴ La vitesse effective de l'eau est définie par $v_a = \frac{K \cdot i}{n}$, où K correspond à la conductivité hydraulique de la nappe, i correspond au gradient hydraulique et n à la porosité efficace de la nappe.

⁵ Ce modèle analytique considère que la source de chaleur représentée par l'eau réinjectée est une source plane d'extension verticale infinie et orthogonale à la direction d'écoulement.

amont, cette probabilité est plus faible, notamment en raison des phénomènes de dispersion et de conduction thermique (il s'agit des secteurs représentés en vert – jaune).

Dans cet exemple, il est considéré que la variation de température de l'eau prélevée ne doit pas excéder $\Delta T_{max} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Puisque la probabilité d'atteindre l'installation est connue, il est alors possible de déterminer la puissance thermique moyenne acceptable autour de l'installation à l'aide de l'équation (1) (Figure 3). Dans l'axe de l'écoulement, et jusqu'à 125 m à l'amont de l'ouvrage, la puissance moyenne exploitable est comprise entre 0 et 50 kW. Transversalement à l'écoulement (dans l'axe des Y positifs), la puissance moyenne acceptable croît rapidement jusqu'à dépasser 500 kW (zone blanche sur la figure).

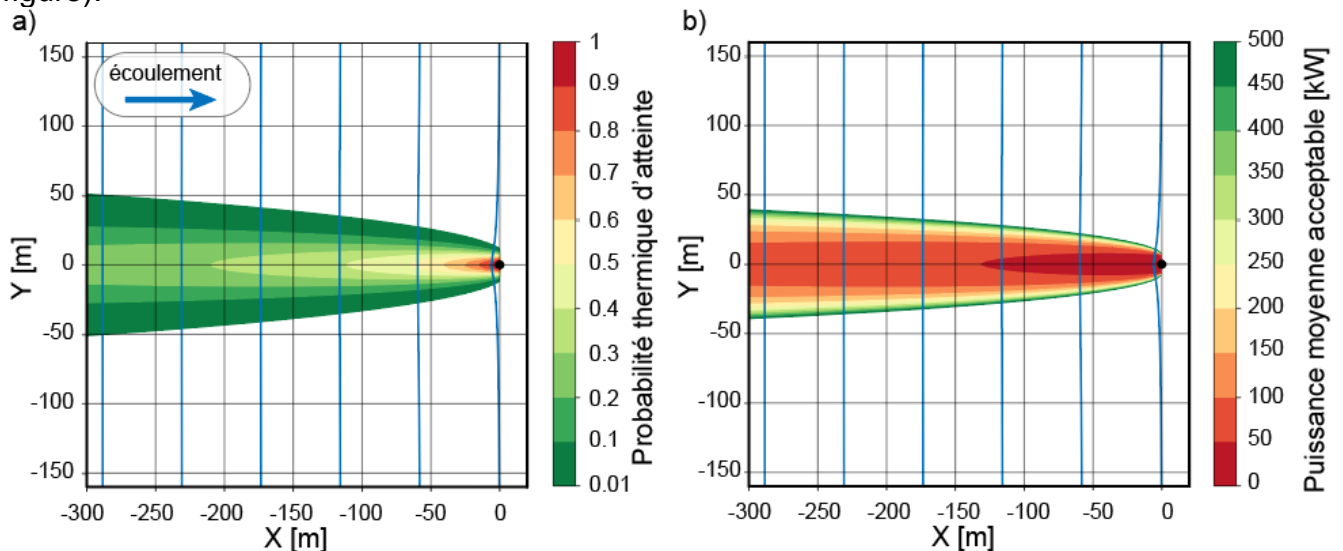


Figure 3 (a) Probabilité que des transferts thermiques atteignent l'installation après 30 ans et (b) puissance moyenne acceptable à l'amont de l'installation (en considérant $\Delta T_{max} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Les lignes piézométriques sont représentées par des lignes bleues. Le puits de prélèvement de l'échangeur ouvert est représenté par un point noir.

3.2.2. Utilisation d'un modèle numérique

Dans les contextes hydrogéologiques complexes, par exemple lorsque l'aquifère présente des caractéristiques hétérogènes, où lorsque les écoulements de nappes sont perturbés, une approche par modélisation numérique déterministe peut être mise en œuvre.

Le présent exemple consiste à simuler numériquement les probabilités que des transferts thermiques atteignent une installation géothermique en échangeur ouvert et d'en déduire la puissance thermique qui peut être exploitée autour de cette installation. L'installation est localisée dans un secteur urbanisé où les écoulements de nappes sont perturbés par plusieurs constructions souterraines imperméables. Pour simuler cet exemple, le logiciel FEFLOW a été utilisé.

Tout d'abord, les écoulements de nappe sont simulés en régime permanent sur le secteur d'intérêt. La configuration modélisée est illustrée par la Figure 4a. L'installation géothermique est implantée dans une formation aquifère alluviale d'une épaisseur d'environ 25 m, d'une conductivité hydraulique de 10^{-3} m/s et d'une porosité efficace de 20%. Les localisations du puits de prélèvement (point rouge sur la Figure 4a) et du puits de rejet (point noir sur la Figure 4a) sont introduites dans le modèle numérique. Le doublet géothermique a un débit de fonctionnement moyen de $Q_p = 4.5\text{ l s}^{-1}$ qui est défini comme condition limite au niveau de chacun des puits. Les constructions souterraines imperméables sont introduites dans le modèle numérique par des limites à flux nul. La

taille des mailles du modèle numérique varie de l'ordre de quelques centimètres à proximité des constructions et des puits, à quelques mètres au niveau des limites du domaine d'étude⁶.

Ensuite, le sens des écoulements est inversé sur l'ensemble du domaine d'étude. De cette façon, les particules d'eau se déplacent de l'aval vers l'amont, les zones de recharge deviennent des exutoires et vice-versa. La probabilité d'atteindre l'installation peut ainsi être quantifiée. La technique mathématique permettant de calculer et cartographier cette probabilité consiste à simuler l'effet d'une injection localisée et instantanée de chaleur au niveau de l'installation, et d'étudier sa migration dans le champ d'écoulement inversé (Cornaton et Perrochet, 2006a, 2006b). Le champ de probabilité est ainsi obtenu en intégrant le signal thermique migrant dans la direction inverse des écoulements.

La Figure 4b montre que les franges d'iso-probabilité sont fortement influencées par les constructions souterraines qui perturbent les écoulements. Cette figure montre également que le dispositif d'intérêt est sous influence d'un puits de rejet situé environ 330 m en amont. Cette installation tierce rejette un débit de $6,8 \text{ l s}^{-1}$. L'approche numérique mise en œuvre a permis de quantifier l'influence de cette installation tierce sur le projet du pétitionnaire : les résultats montrent que l'installation tierce se situe dans une zone où la probabilité d'atteinte est inférieure à 1%. La formule de passage (équation (1)) permet finalement de calculer la puissance thermique moyenne acceptable autour de l'installation (Figure 4c).

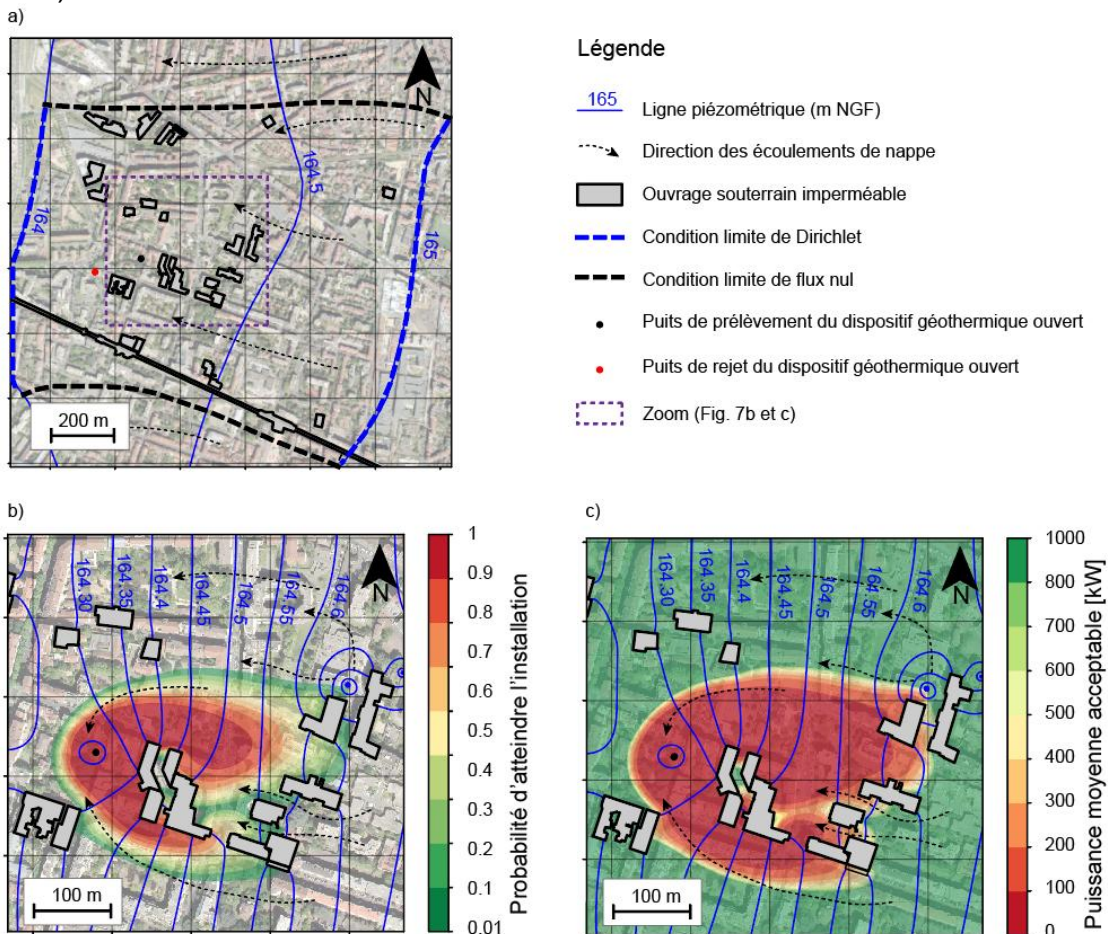


Figure 4 : (a) Configuration et conditions aux limites du site d'étude modélisé numériquement dans le secteur urbanisé ; (b) Probabilité d'atteindre le puits de prélèvement de l'installation

⁶ Pour plus de détails sur la calibration, la validation et la sensibilité du modèle numérique utilisé dans le cadre de cet exemple, les lecteurs peuvent consulter la littérature appropriée (Attard et al., 2016a, 2016b).

géothermique étudiée (échangeur ouvert) ; (c) Puissance thermique moyenne acceptable autour de l'installation.

4. Conclusions

Le code minier prévoit que les gîtes géothermiques ne puissent être exploités qu'en vertu d'un permis d'exploitation accordé par l'autorité administrative. Ce permis d'exploitation confère un droit exclusif d'exploitation dans un volume déterminé, dit « volume d'exploitation ». Cette étude apporte une définition technique à la notion de volume d'exploitation applicable aux installations géothermiques sur échangeurs ouverts.

Également, cet article illustre une démarche et plusieurs techniques analytiques et numériques permettant de cartographier les probabilités qu'un transfert thermique atteigne une installation, et la puissance thermique qu'il est possible d'exploiter autour d'une installation sans altérer son fonctionnement. L'application de cette démarche requiert la connaissance des écoulements de nappe (carte piézométrique) et des caractéristiques hydrauliques et thermiques des formations aquifères (conductivité hydraulique, porosité efficace, coefficient de dispersion, conductivité thermique, capacité thermique).

Le choix entre solutions analytiques et numérique repose sur :

- le contexte hydrogéologique : les modèles analytiques disponibles sont adaptés aux aquifères dont les propriétés hydrodynamiques et thermiques sont homogènes, et lorsque l'écoulement de la nappe est uniforme. La modélisation numérique permet une meilleure prise en compte des hétérogénéités du sous-sol, et des échanges thermiques avec la surface du sol.
- l'environnement construit du projet : la modélisation numérique permet de prendre en compte des perturbations d'écoulements causées, par exemple, par des aménagements souterrains, ou éventuellement par d'autres installations géothermiques.

L'application de cette démarche permet d'une part, de garantir le bon fonctionnement des installations géothermiques en évitant qu'elles interfèrent entre elles, et d'autre part, d'optimiser l'extension du volume d'exploitation qui leur est attribué afin de maintenir l'accessibilité à la ressource géothermique, et de favoriser ainsi le développement de cette énergie renouvelable.

5. Références bibliographiques

- Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., Cuvillier, L., and Eisenlohr, L. (2016a). Deterministic modelling of the cumulative impacts of underground structures on urban groundwater flow and the definition of a potential state of urban groundwater flow: example of Lyon, France. *Hydrogeology Journal* 24, 1213–1229.
- Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., and Eisenlohr, L. (2016b). Deterministic modeling of the impact of underground structures on urban groundwater temperature. *Science of The Total Environment* 572, 986–994.
- Attard, G., Bayer, P., Rossier, Y., Blum, P., & Eisenlohr, L. (2020). A novel concept for managing thermal interference between geothermal systems in cities. *Renewable Energy*, 145, 914-924.
- Bayer, P., Attard, G., Blum, P., and Menberg, K. (2019). The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 106, 17–30.
- Cornaton, F., and Perrochet, P. (2006a). Groundwater age, life expectancy and transit time distributions in advective–dispersive systems: 1. Generalized reservoir theory. *Advances in Water Resources* 29, 1267–1291.

- Cornaton, F., and Perrochet, P. (2006b). Groundwater age, life expectancy and transit time distributions in advective–dispersive systems; 2. Reservoir theory for sub-drainage basins. *Advances in Water Resources* 29, 1292–1305.
- Domenico, P.A., and Robbins, G.A. (1985). A new method of contaminant plume analysis. *Groundwater* 23, 476–485.
- Hähnlein, S., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., and Grathwohl, P. (2010). Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden. *Grundwasser* 15, 123–133.
- Milnes, E., and Perrochet, P. (2013). Assessing the impact of thermal feedback and recycling in open-loop groundwater heat pump (GWHP) systems: a complementary design tool. *Hydrogeology Journal* 21, 505–514.