Cerema

Impacts des aménagements sur l'eau souterraine urbaine

Méthodes analytiques et numériques pour quantifier l'impact des installations géothermiques basse énergie sur la température de l'eau souterraine

Les fiches « Impacts des aménagements sur l'eau souterraine urbaine » visent à fournir aux maîtres d'ouvrages, aux services instructeurs de l'État et aux bureaux d'études, les éléments de compréhension et d'aide à la décision concernant les impacts des aménagements sur l'eau souterraine urbaine.

Le sous-sol urbain est soumis à des contraintes de développement qui favorisent les interactions entre l'environnement construit et les ressources, telles que l'eau souterraine et l'énergie géothermique. Afin de permettre un développement de la filière géothermique tout en maîtrisant le potentiel géothermique des aquifères, les impacts des installations géothermiques doivent être quantifiés. La première partie de cette fiche présente le contexte et les enjeux liés à l'exploitation du potentiel géothermique des aquifères urbains. La deuxième partie propose un tour d'horizon des impacts des dispositifs géothermiques basse énergie verticaux à échangeurs fermés ou ouverts sur la température de l'eau souterraine. Plusieurs méthodes, analytiques et numériques permettant d'évaluer ces impacts sont illustrées.

Sommaire

1. Le potentiel géothermique des aquifères urbains 2
2. Estimation des impacts thermiques par des méthodes analytiques 3
3. Estimation des impacts thermiques par modélisation numérique 6
4. Bibliographie 8

Fiche n° 04 - Juillet 2019

Collection | **Références**

1. Le potentiel géothermique des aquifères urbains

Le potentiel géothermique des aquifères superficiels urbains représente une importante source d'énergie renouvelable qu'il convient de considérer pour l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Bayer *et al.* 2012 ; Kammen et Sunter, 2016). En effet, la géothermie basse énergie est aujourd'hui reconnue comme une ressource robuste, permettant de subvenir à une part significative de la demande énergétique exprimée par les territoires densément urbanisés.

Les dispositifs les plus fréquents permettant l'exploitation de la ressource géothermique contenue dans les couches supérieures du sous-sol urbain sont les pompes à chaleur sur sondes verticales (systèmes fermés) (Fig. 1a), et les pompes à chaleur sur eau de nappe[1] (systèmes ouverts) (Fig. 1b). Dans le cas des systèmes fermés, l'échange de chaleur entre la pompe à chaleur et le sous-sol se fait grâce à la circulation d'un fluide caloporteur au sein d'une sonde verticale. De tels systèmes n'échangent donc que de l'énergie avec le milieu. Dans le cas des systèmes ouverts, l'échange de chaleur se fait grâce au prélèvement d'eau souterraine où les calories sont échangées. La plupart du temps, l'eau est ensuite réinjectée dans l'aquifère d'origine. Suivant la puissance de l'installation, ces systèmes ouverts ou fermés permettent de subvenir aux besoins en chauffage ou refroidissement d'habitations individuelles, de bâtiments collectifs, tertiaires, d'industries ou de commerces.

Cependant, l'exploitation géothermique basse température des aquifères urbains peut avoir des conséquences environnementales et poser des problèmes d'interférences entre dispositifs géothermiques voisins (Bayer *et al.* 2019).

En effet, lorsque qu'ils sont utilisés pour du refroidissement, la multiplication des dispositifs géothermiques sur un territoire peut favoriser l'apparition d'îlots de chaleur souterrains et participer aux impacts thermiques cumulés des aménagements. Ce réchauffement des aquifères urbains peut modifier les paramètres physico-chimiques de l'eau, et son activité biologique. D'autre part, ce réchauffement peut réduire la performance des dispositifs géothermiques et menacer le potentiel d'exploitation géothermique en refroidissement. La maîtrise du potentiel géothermique des aquifères et de la qualité de la ressource en eau souterraine passe ainsi par la quantification des impacts des installations géothermiques sur la température de l'eau souterraine. Dans ce document, des méthodes analytiques et numériques permettant de quantifier ces impacts sont illustrées. Ces méthodes peuvent être utilisées dans le cadre des études d'impacts des projets.

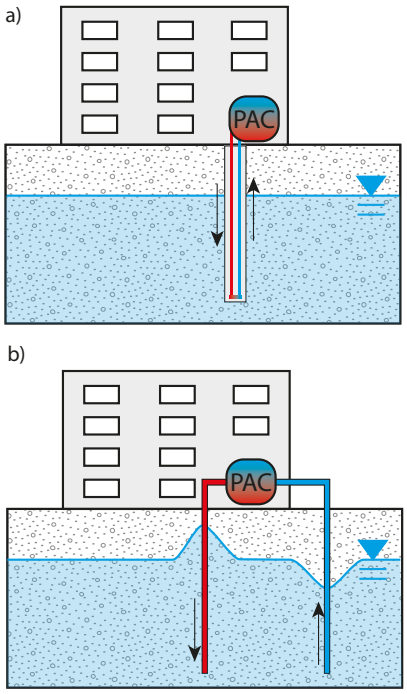

Fig. 1 : Les systèmes géothermiques et fermés sur sondes verticales (a) et ouverts, sur eau de nappe (b) sont les dispositifs les plus fréquemment employés en zone urbaine.

1 Le lecteur peut se référer à la fiche n°2 du fascicule du Cerema « Impacts des aménagements sur l'eau souterraine urbaine » consacrée à la géothermie sur eau de nappe

2. Estimation des impacts thermiques par des méthodes analytiques

2.1. Les facteurs d'influence

L'impact d'une installation géothermique basse énergie sur la température de l'eau souterraine dépend de la nature de l'échangeur, fermé (Fig. 1a) ou ouvert (Fig. 1b), de la puissance de l'installation, et du contexte hydrogéologique. Notamment :

- de la **vitesse effective[2] de l'eau** v_a :

$v_a = \frac{v_D}{n}$ avec n la porosité efficace[3] de l'aquifère et $v_D = K \times i$ la vitesse de Darcy de la nappe (m/s), K est la conductivité hydraulique[2] de l'aquifère (ou perméabilité) et i le gradient hydraulique de la nappe. La conductivité hydraulique K d'une formation aquifère traduit sa capacité à faciliter l'écoulement. Pour obtenir une valeur représentative de l'environnement hydrogéologique de l'installation géothermique, la conductivité hydraulique peut être obtenue à l'aide d'un essai de pompage ou d'un essai de pompage par paliers[4] (Trupin, 1969 ; Fitts, 2012). Le gradient hydraulique de la nappe peut quant à lui être déterminé à l'aide d'une carte piézométrique.

- du facteur de retard engendré par la **diffusion et dispersion thermique** :

Il est généralement exprimé par le facteur de retard $R = \frac{C_m}{n \times C_w}$, où C_m et C_w correspondent respectivement à la capacité thermique volumique de l'aquifère et de l'eau (en J m^{-3} K^{-1}). Il est ainsi possible de définir la vitesse caractéristique de transfert thermique $u_t = \frac{v_a}{R}$, ainsi que le coefficient de diffusion thermique transversal ($D_{t,T}$) et longitudinal ($D_{t,L}$) :

$$D_{t,L/T} = \frac{\lambda_m}{C_m} + u_t \times \alpha_{x/y}$$

avec λ_m la conductivité thermique de l'aquifère (en W m^{-1} K^{-1}) et α la dispersivité thermique transversale (α_y) ou longitudinale (α_x) en mètre. Ces caractéristiques qui conditionnent le transfert thermique au sein de l'aquifère peuvent être déterminées à l'aide d'un test de réponse thermique (TRT) et ou d'un essai de traçage thermique (TTT) (Stauffer *et al.* 2014).

Pour estimer les impacts des installations géothermiques sur la température de l'eau souterraine, il est possible d'utiliser des solutions analytiques. Les solutions analytiques sont les équations mathématiques qui permettent de calculer la différence de température générée en un point et un temps donnés dans les configurations les plus simples, notamment lorsque les caractéristiques de l'aquifère sont supposées homogènes, et l'écoulement uniforme. Ces solutions peuvent notamment être utilisées pour donner une première estimation de l'impact thermique d'une installation géothermique (par exemple dans le cadre d'une étude de faisabilité d'un projet). Puisqu'elles sont simples à mettre en œuvre, elles peuvent également être implémentées dans un logiciel SIG (Système d'information géographique) et aider à la planification et la gestion de la ressource, notamment dans les secteurs fortement sollicités.

2 Selon la définition de Castagny et Margat (1977).

3 En première approximation, par exemple dans le cadre d'une étude de faisabilité, ces caractéristiques physiques peuvent être déterminées à l'aide des informations disponibles sur la plateforme infoterre, ou à l'aide des informations contenues dans les études géologiques et hydrogéologiques régionales réalisées dans l'environnement de la construction considérée. Ces études sont regroupées dans la médiathèque du BRGM.

4 Il existe des classeurs Excel préformattés qui permettant d'aider à l'interprétation ou la réinterprétation d'essais de pompages. L'un d'entre eux peut être téléchargé ici (Fitts, 2012). Il existe également le logiciel OUAIP (gratuit) développé par le BRGM (Gutierrez et Dewandel, 2013).

2.2. Impact d'une installation géothermique sur sondes verticales

Plusieurs solutions analytiques permettant de quantifier l'impact d'une installation géothermique sur sondes verticales sont inventoriées par Stauffer *et al.* 2014. L'une des solutions analytiques les plus couramment utilisées est l'équation de Carslaw & Jaeger (1959). Considérant un aquifère homogène, assimilé à un plan horizontal d'extension infinie, sans échange thermique au travers de ses surfaces supérieure et inférieure, et avec un écoulement orienté dans le sens des x positifs, l'impact d'une sonde géothermique verticale localisée en x=0 et y=0 sur la température de la nappe est donné en tout point par l'équation suivante :

$$\Delta T(x,y,t) = \frac{q}{4\pi C_m \sqrt{D_{t,L} D_{t,T}}} \exp\left[\frac{u_t x}{2D_{t,L}}\right] \times \int_{\frac{x^2}{4D_{t,L}t}+\frac{y^2}{4D_{t,T}t}}^{\infty} \exp\left[-\Psi - \left(\frac{x^2}{D_{t,L}} + \frac{y^2}{D_{t,T}}\right)\frac{u_t^2}{16 D_{t,L}\Psi}\right]\frac{d\Psi}{\Psi}$$

avec $u_t = \frac{v_a}{R}$ et q la puissance exploitée par unité de longueur de sonde (W/m) : $q = \frac{P}{H}$. Cette solution analytique peut être appliquée par superposition dans le cas d'une installation comportant plusieurs sondes verticales.

La Figure 2 illustre une vue en plan de l'impact thermique d'une installation géothermique constituée de six sondes verticales de 50 m. Ces sondes sont espacées de 7 m dans la direction transversale à l'écoulement, et de 10 m dans la direction de l'écoulement. Elles exploitent un aquifère dont la vitesse effective est de 0,1 m/jour. L'impact thermique total de l'installation est égal à la somme des impacts de chaque sonde calculable avec la solution analytique présentée dans cette section.

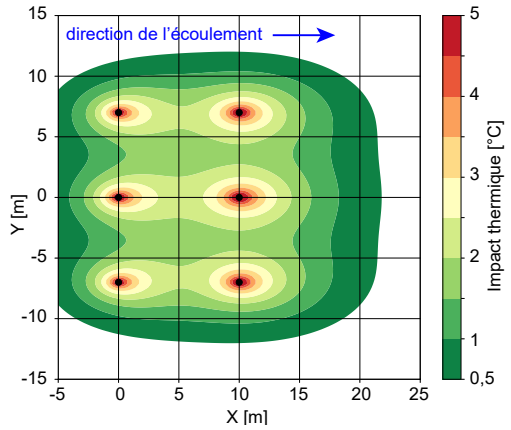

Fig. 2 : Impact thermique d'une installation géothermique basée sur six sondes verticales (points noirs sur la figure) sur la température de la nappe.

Après une saison de fonctionnement (120 jours) l'impact thermique est de l'ordre de 0,5°C à une distance d'environ 15 m autour de l'installation. A proximité directe des sondes, l'impact thermique est de l'ordre de 5 °C.

2.3. Impact d'une installation géothermique sur eau de nappe

Plusieurs solutions semi-analytiques permettent d'estimer l'impact thermique d'une installation géothermique sur eau de nappe mobilisant un débit Q et appliquant une différence de température ΔT_i (Stauffer *et al.* 2014). En particulier, l'applicabilité de deux modèles semi-analytiques – un modèle plan PAHM (Domenico et Robbins 1985 ; Hähnlein *et al.* 2010) et un modèle linéaire LAHM (Kinzelbach 1987) – a récemment été étudiée dans diverses conditions d'écoulement (Pophillat *et al.* 2018). Cette étude a montré que les modèles analytiques plan et linéaire étaient adaptés pour donner une première estimation des impacts des installations géothermiques sur eau de nappe ne subissant pas de recyclage thermique[5].

5 Pour plus d'information sur le phénomène de recyclage d'une installation géothermique sur eau de nappe, le lecteur peut se référer à la fiche n°2 du fascicule du Cerema « Impacts des aménagements sur l'eau souterraine urbaine » et à la littérature associée au sujet (Banks, 2009 ; Milnes et Perrochet 2013).

2.3.1. Utilisation du modèle PAHM

La Figure 3a illustre le modèle analytique plan PAHM. Il s'agit d'un modèle semi-infini qui assimile le puits de rejet de l'installation géothermique à une source thermique surfacique localisée à l'origine et caractérisée par la dimension transversale $Y = \frac{Q}{bv_a n}$. Ce modèle n'est pas défini pour les x < 0. Autrement dit, il ne permet pas de calculer un impact thermique à l'amont du puits de rejet. L'impact thermique calculé à partir de ce modèle est obtenu à l'aide de l'expression suivante :

$$\Delta T(x,y,t) = \left(\frac{\Delta T_0}{4}\right) \mathrm{erfc}\left(\frac{Rx - v_a t}{2\sqrt{D_x R t}}\right) \left\{ \mathrm{erf}\left[\frac{y + \frac{Y}{2}}{2\sqrt{D_y \frac{x}{v_a}}}\right] - \mathrm{erf}\left[\frac{y - \frac{Y}{2}}{2\sqrt{D_y \frac{x}{v_a}}}\right] \right\}$$

Avec $\Delta T_0 = \frac{F_0}{v_a n C_w Y}$, $F_0 = \frac{q_h}{b}$ où $q_h = C_w \Delta T_i Q$.

Et $D_{x,y} = \frac{\lambda_m}{n \times C_m} + \alpha_{x/y} \times v_a$.

La Figure 3b montre une application de ce modèle PAHM dans le cas d'une installation fonctionnant avec un débit de 1 L/s et une différence de température ΔT_i=10 °C, dans un aquifère de 20 m d'épaisseur où l'eau circule avec une vitesse effective de 1 m / jour. Après une saison de fonctionnement, la zone où l'impact thermique est supérieur à 2°C s'étend sur environ 60 m.

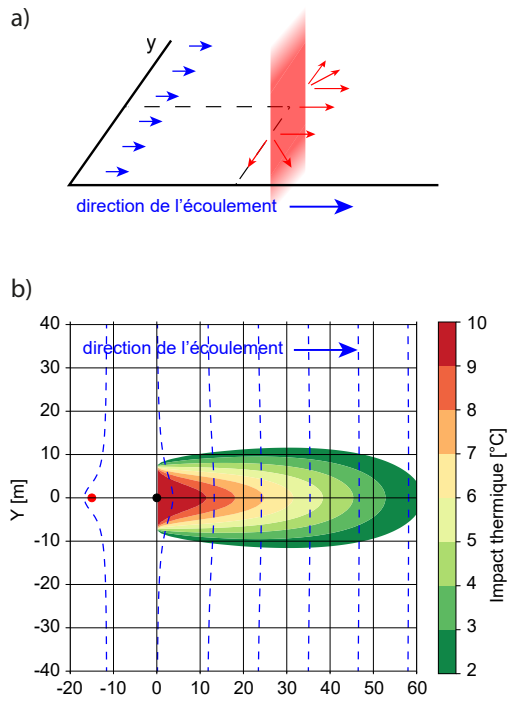

Fig. 3 : a) Modèle analytique plan PAHM (d'après Pophillat et al. 2018) b) Impact thermique d'une installation géothermique sur eau de nappe calculé avec le modèle PAHM.

2.3.2. Utilisation du modèle LAHM

La Figure 4a illustre le modèle analytique linéaire LAHM. Il s'agit d'un modèle d'extension infinie qui assimile le puits de rejet de l'installation géothermique à une source thermique linéaire localisée à l'origine. Contrairement au PAHM, ce modèle est défini pour les x < 0 et permet ainsi de calculer l'impact thermique de l'installation à l'amont et à l'aval du puits de rejet.

L'impact thermique calculé à partir de ce modèle est obtenu à l'aide de l'expression suivante :

$$\Delta T(x,y,t) = \frac{Q\,\Delta T_i}{4nbv_a\sqrt{\pi\alpha_T}} \exp\left(\frac{x - r'}{2\alpha_L}\right) \frac{1}{\sqrt{r'}}\, \mathrm{erfc}\left(\frac{r' - v_a t/R}{2\sqrt{v_a \alpha_L t/R}}\right)$$

avec $r' = \sqrt{x^2 + y^2 \frac{\alpha_L}{\alpha_T}}$.

La Figure 4b montre une application de ce modèle LAHM dans le cas d'une installation fonctionnant avec un débit de 5 L/s et une différence de température ΔT_i=10 °C, dans un aquifère 20 m d'épaisseur où l'eau circule à une vitesse effective de 10 m/jour. Après une saison de fonctionnement, la zone où l'impact thermique est supérieur à 2°C s'étend sur plus de 150 m.

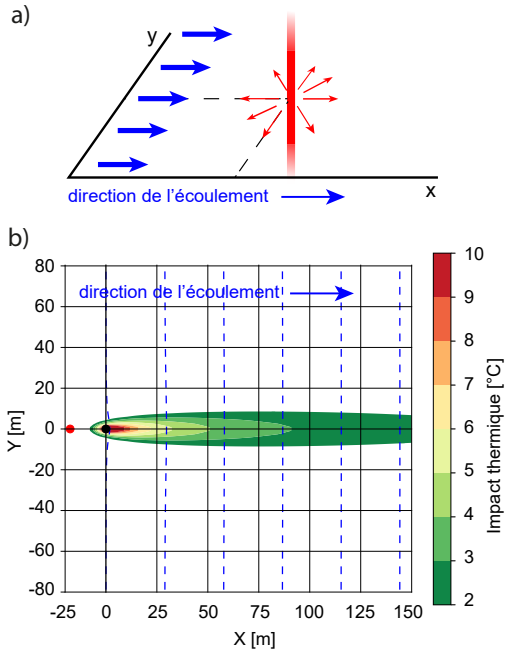

Fig. 4 : a) Modèle analytique linéaire LAHM (d'après Pophillat et al. 2018) b) Impact thermique d'une installation géothermique sur eau de nappe calculé avec le modèle LAHM.

3. Estimation des impacts thermiques par modélisation numérique

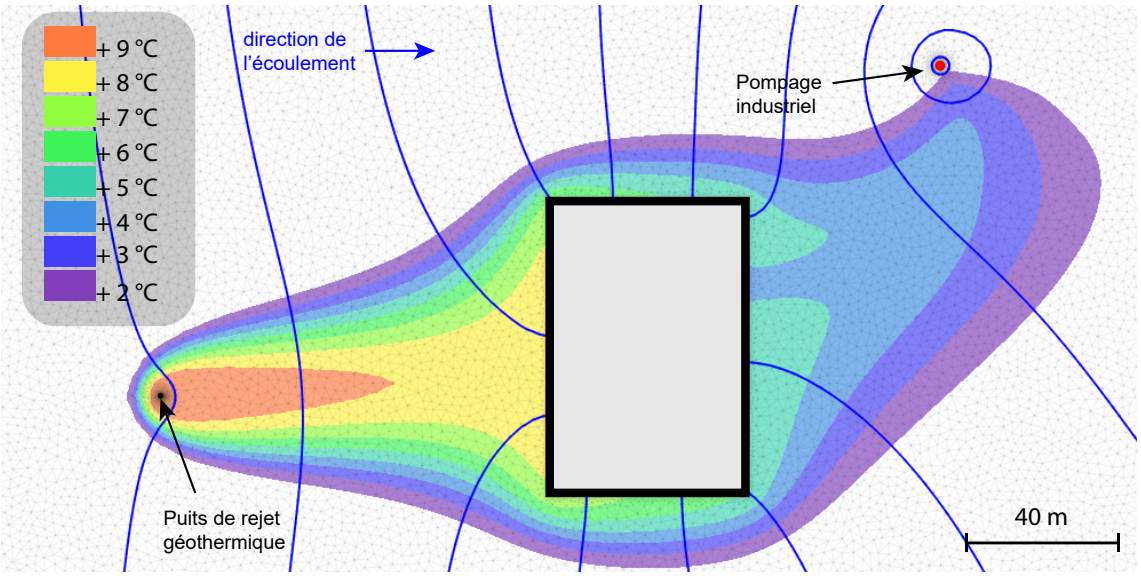

Fig. 5 modélisation numérique de l'impact du puits de rejet d'une installation géothermique sur eau de nappe en zone urbaine. Les impacts hydrauliques causés par un aménagement imperméable (parois moulées en noir) et un puits de pompage situé à l'aval hydraulique sont pris en compte. Les lignes piézométriques sont représentées en bleu par pas de 0,1 m.

La modélisation numérique permet de quantifier les impacts dans les situations plus complexes à décrire. Par exemple lorsque la piézométrie est perturbée, ou lorsque les impacts hydrauliques ou thermiques se cumulent avec d'autres installations. Une approche par modélisation numérique nécessite la délimitation d'un domaine d'étude, une discrétisation spatiale et temporelle du problème de transfert, ainsi que la définition des caractéristiques physiques, de conditions aux limites et de conditions initiales sur le domaine d'étude.

La Figure 5 illustre l'impact du puits de rejet d'une installation géothermique sur eau de nappe fonctionnant en refroidissement après trois années de fonctionnement. La nappe en question est d'une épaisseur de 25 m et l'eau circule avec une vitesse efficace d'environ 1 m/jour. L'installation géothermique prélève un débit moyen de 2 L/s et la pompe à chaleur applique une différence de température de 10°C entre l'eau prélevée et l'eau rejetée. Cette installation est implantée dans une zone urbaine où le sous-sol est densément aménagé. Notamment, sont présents sur le secteur, le puits de rejet d'une installation géothermique sur eau de nappe, une construction comprenant des niveaux souterrains imperméabilisés par des parois moulées, et un puits de pompage industriel.

L'impact de l'installation géothermique est simulé par modélisation numérique afin de prendre en compte l'influence de l'aménagement imperméable et du puits de pompage sur l'écoulement de la nappe.

L'intégration du puits de rejet géothermique dans le modèle numérique se fait par la définition des conditions aux limites suivantes :

- Il s'agit d'une installation géothermique sur eau de nappe, le débit d'eau rejetée est donc associé au niveau de la localisation du puits.
- L'eau réinjectée présente une température altérée de ΔTi par rapport à la température naturelle de l'eau de la nappe. Cette différence de température dépend de la pompe à chaleur. Une condition limite correspondant à cet apport d'énergie est donc définie au niveau de la localisation du puits.
- Ces conditions limites sont définies en régime transitoire, c'est-à-dire en tenant compte du régime de fonctionnement saisonnier de l'installation géothermique.

Cette approche permet notamment de vérifier que l'évolution de la température de l'eau de nappe prélevée par le pompage industriel reste acceptable.

Ces fiches ont une vocation pédagogique et sont destinées :

- ***aux maîtres d'ouvrages** : les fiches précisent les éléments de contexte dont il faut tenir compte lors de la construction d'un nouvel aménagement ;*
- ***aux services instructeurs de l'État** : des éléments méthodologiques sont proposés afin de hiérarchiser les enjeux en fonction du contexte, et quantifier les impacts ;*
- ***aux bureaux d'études** : certaines rubriques peuvent directement être exploitées par les bureaux d'étude afin de quantifier les impacts des projets d'aménagements ou d'identifier les solutions constructives nécessaires à la mise en œuvre du projet.*

4. Bibliographie

Banks, D. (2009). Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of analytical approaches. Hydrogeology Journal, 17(5), pp. 1149-1155.

Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L., & Blum, P. (2012). Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2), pp. 1256-1267.

Bayer, P., Attard, G., Blum, P., Menberg, K. (2019) The geothermal potential of cities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 106C, pp. 17-30.

Castany, G., & Margat, J. (1977). Dictionnaire français d'hydrogéologie. Editions du BRGM.

Domenico, P. A., and Robbins, G. A. (1985) A new method of contaminant plume analysis, Groundwater, vol. 23, no. 4, pp. 476–485.

Fitts, C. R. (2002). Groundwater science – 2e Edition. Elsevier.

Gutierrez, A., Dewandel, B. (2013) L'interprétation des pompages d'essai : quelles nouveautés ? Géologues n° 178, pp. 49-53.

Hähnlein, S., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P. and Grathwohl, P. (2010) 'Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden', Grundwasser, vol. 15, no. 2, pp. 123–133.

Kammen, D. M., & Sunter, D. A. (2016). City-integrated renewable energy for urban sustainability. Science, 352(6288), pp. 922-928.

Milnes, E., & 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(2), pp. 505-514.

Pophillat, W., Attard, G., Bayer, P., Hecht-Méndez, J., & Blum, P. (2018). Analytical solutions for predicting thermal plumes of groundwater heat pump systems. Renewable energy.

Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Giraldo, N. M., & Kinzelbach, W. (2013). Thermal use of shallow groundwater. CRC Press.

Trupin, G. (1969). Manuel pratique des pompages d'essai. Rapport BRGM 69-SGN-258-HYD. http://infoterre.brgm.fr/rapports/69-SGN-258-HYD.pdf

Contact
Guillaume Attard
guillaume.attard@cerema.fr

Photo de couverture
Usine de géothermie
© Laurent Mignaux - Terra

Maquettage
Cerema Eau, mer et fleuves
Service édition

Collection
Références
ISSN 2276-0164

Date de publication
Juillet 2019

© 2019 - Cerema
La reproduction totale ou partielle du document doit être soumise à l'accord préalable du Cerema.

Sur le même thème

Les fiches Impacts des aménagements sur l'eau souterraine urbaine		
Fiche n°1 Revue introductive des impacts des aménagements sur les écoulements la qualité et la température de l'eau souterraine urbaine	**Fiche n°2** Impact thermique de la géothermie sur eau de nappe	**Fiche n°3** Impacts des ouvrages souterrains sur les mélanges entre masses d'eau superposées

La collection « Références» du Cerema

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoirs-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement – www.cerema.fr
Cerema Eau, mer et fleuves – 134, rue de Beauvais – CS 60039 – 60280 Margny-lès-Compiègne - Tél. +33(0)3 44 92 60 00
Siège social : Cité des mobilités – 25, avenue François Mitterrand – CS 92 803 – F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30