

Impact thermique de la géothermie sur eau de nappe

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.

Afin de garantir la pérennité du potentiel géothermique des aquifères urbains, les zones d'influence thermique des systèmes géothermiques doivent être quantifiés. Cette fiche s'intéresse aux impacts thermiques des pompes à chaleur (PAC) sur eau de nappe. Son objectif est de présenter les différentes approches permettant (1) de déterminer les conditions à respecter afin d'éviter le recyclage thermique et (2) d'évaluer la zone d'influence thermique de ces dispositifs afin d'éviter les impacts cumulés et de perturber les installations voisines.

Sommaire

1. Contexte en enjeux liés à la géothermie sur eau de nappe	2
2. Fonctionnement d'une PAC sur eau de nappe	2
3. Éviter le recyclage thermique	3
4. Evaluer la zone d'influence d'une PAC sur eau de nappe	4
5. Bibliographie	6



1. Contexte en enjeux liés à la géothermie sur eau de nappe

Dans un contexte de croissance de la population urbaine, la gestion de l'énergie disponible dans le sous-sol urbain sous forme d'énergie géothermique constitue un enjeu majeur pour le développement futur des villes. Le contexte réglementaire français facilite aujourd'hui l'usage de ce type d'énergie grâce au critère dit de minime importance. Il concerne les installations géothermiques dont (1) les forages n'excèdent pas 200 m de profondeur, (2) la puissance thermique maximale prélevée du sous-sol et utilisée est inférieure à 500 kW, et pour les circuits dit ouverts, dont (3) la température de l'eau prélevée est inférieure à 25 °C, (4) le débit pompé est inférieur à 80 m³/h, et (5) la réinjection se fait dans le même aquifère avec un bilan de masse nul. Ces systèmes sont soumis à une simple déclaration auprès du ministère de la Transition écologique et solidaire¹.

Mais la multiplication des installations géothermiques accentue la formation d'îlots de chaleur urbains et menacent la pérennité du potentiel géothermique des aquifères fortement sollicités. Dans le cas des pompes à chaleur (PAC) sur eau de nappe, un phénomène de recyclage thermique peut se produire entre le puits de pompage et d'injection menaçant ainsi la performance du dispositif. Le panache thermique peut également perturber les installations voisines. Il convient donc, dans un souci d'égalité d'accès à la ressource et de pérennité des dispositifs techniques de bien analyser les impacts des installations et de leur zone d'influence. À ce titre, Cette fiche s'intéresse aux impacts thermiques causés par ces dispositifs.

2. Fonctionnement d'une PAC sur eau de nappe

Le principe d'une PAC sur eau de nappe (Fig. 1) repose sur un doublet de puits comprenant un puits de pompage puisant l'eau souterraine à un débit Q (m³ s⁻¹) et à une température T_0 , et un puits de réinjection au même débit Q et à une température modifiée T_{inj} . La puissance P (W) prélevée sur la nappe est alors égale à :

$$P = Q \times C_w \times (T_0 - T_{inj})$$

avec C_w la capacité thermique volumique de l'eau (J.m⁻³.K⁻¹). au débit caractéristique de circulation de la masse d'eau dans lequel se trouve l'ouvrage souterrain.

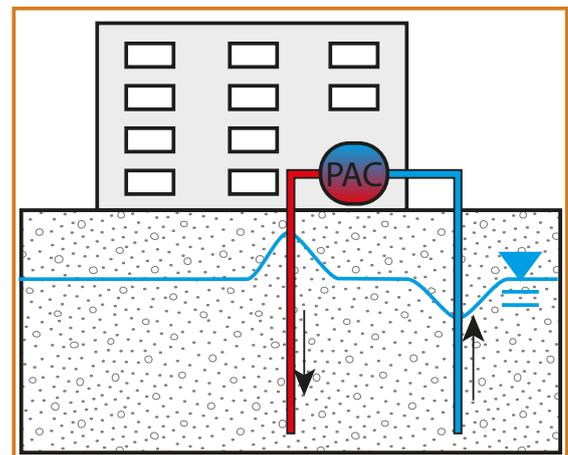


Fig. 1 : Pompe à chaleur sur eau de nappe fonctionnant en refroidissement.

¹ Le cadre réglementaire de la géothermie en France (géothermie haute température, géothermie basse température, et géothermie de minime importance) et de l'évaluation environnementale de ces projets est développé sur le site internet de la DREAL AuRA dans une rubrique dédiée.

3. Éviter le recyclage thermique

Pour éviter de polluer thermiquement le puits de pompage par la température altérée du puits d'injection, les puits doivent être séparés d'une distance L , respectant l'équation suivante (Banks, 2009) :

$$L > \frac{2Q}{T \cdot \pi \cdot i}$$

avec T la transmissivité de l'aquifère (m^2/s) et i son gradient hydraulique naturel et Q le débit de fonctionnement du système ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

Il n'est parfois pas possible de respecter cette distance, notamment dans des régions présentant de fortes contraintes foncières. Dans ce cas, il est possible de déterminer le temps à partir duquel commence à apparaître ce recyclage thermique tr (s) avec l'équation suivante (Banks, 2009) :

$$tr = \frac{\pi \cdot D \cdot C_s \cdot L^2}{3 \cdot C_w \cdot Q} \text{ pour } i = 0$$

$$tr = \frac{C_m \cdot L}{C_w \cdot K \cdot i} \times \left(1 + \frac{4\alpha}{\sqrt{-1+4\alpha}} \times \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{-1+4\alpha}}\right)\right) \text{ pour } i < 0$$

avec C_m et C_w les capacités thermiques volumiques de l'aquifère saturé et de l'eau réinjectée, K la conductivité hydraulique (m/s), et $\alpha = Q/(2 \cdot \pi \cdot T \cdot i \cdot L)$. Dans cette formule, le gradient hydraulique est considéré comme un nombre négatif. Il en est donc de même du coefficient α .

Application numérique :

Par exemple, pour un système géothermique ouvert fonctionnant quatre mois par an avec un débit moyen de $Q = 50 \text{ m}^3/\text{heure}$ ($0,014 \text{ m}^3/\text{s}$), dans un aquifère sableux présentant les caractéristiques suivantes :

⇒ Conductivité hydraulique :
 $K = 10^{-3} \text{ m/s}$,

⇒ Epaisseur de la zone saturée de la nappe :
 $e = 20 \text{ m}$,

⇒ Transmissivité de l'aquifère :
 $T = K e = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

⇒ Gradient hydraulique de la nappe :

$$i = -0,5\%$$

⇒ Capacité thermique volumique d'un aquifère sableux :

$$C_m = 2,5 \times 10^6 \text{ J/m}^3/\text{°C}$$

⇒ Capacité thermique volumique de l'eau :

$$C_w = 4,2 \times 10^6 \text{ J/m}^3/\text{°C}$$

La distance à respecter entre le puits de pompage et le puits d'injection pour éviter le phénomène de recyclage est de :

$$L > \frac{2Q}{T \cdot \pi \cdot i} = \frac{2 \times 0,014}{2 \cdot 10^{-2} \times \pi \times 0,5\%} = 90 \text{ m}$$

Si la contrainte de foncier est trop forte et que les puits sont seulement espacés de 70 m, le recyclage interviendra au bout de :

$$tr = \frac{C_m \cdot L}{C_w \cdot K \cdot i} \times \left(1 + \frac{4\alpha}{\sqrt{-1+4\alpha}} \times \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{-1+4\alpha}}\right)\right) \approx 14 \cdot 10^6 \text{ s,}$$

(avec $\alpha = Q/(2 \cdot \pi \cdot T \cdot i \cdot L) = -0,32$)

soit environ 160 jours.

Le cycle de fonctionnement étant de quatre mois par an, le recyclage ne menace pas l'installation.

Recommandations pour éviter le phénomène de recyclage :

Si la distance minimale entre le puits de pompage et de réinjection ne peut être respectée pour des contraintes foncières, le temps d'apparition du recyclage doit être calculé. Ce temps (tr) doit être comparé à la durée de fonctionnement (C) sur une année, de la PAC sur eau de nappe :

⇒ Si $tr \ll C$: Le recyclage menace le dispositif à très court terme,

⇒ Si $tr \approx C$: Le recyclage menace le dispositif à moyen/long terme (en fonction du contexte),

⇒ Si $tr \gg C$: Le recyclage ne menace pas le dispositif

4. Evaluer la zone d'influence d'une PAC sur eau de nappe

Les méthodes développées dans cette section concernent l'évaluation de la zone d'influence thermique d'une PAC sur eau de nappe ne subissant pas de recyclage (cf. section 3). Ces méthodes ne concernent pas l'évaluation des impacts cumulés causés par plusieurs installations.

4.1 Calcul analytique

Il n'existe pas de solution analytique exacte pour simuler la réponse thermique d'un aquifère en considérant la réinjection d'eau à une température différente de la température de l'eau prélevée (Stauffer et al. (2014)). Cependant, des solutions semi-analytiques existent et permettent d'estimer la zone d'influence thermique causée par un système géothermique ouvert sur eau de nappe. Lorsque le système ouvert ne subit pas de recyclage, la progression du front de pollution thermique peut par exemple être estimée à partir de l'équation suivante (Banks, 2011) :

$$x_p = \frac{K i}{n \frac{C_m}{C_w}} t$$

avec x_p (m) la distance entre le puits de réinjection du système ouvert et le front thermique, K la conductivité hydraulique de l'aquifère (m/s) et n la porosité. Cependant, cette formulation ne tient pas compte des phénomènes de conduction et de dispersion, et conduit à une majoration importante de la zone d'influence thermique.

4.2 Comparaison à des valeurs de référence

Le Tableau 1 regroupe les distances entre le puits d'injection et le front thermique à $\pm 0,5$ °C, observées à 10 ans, en hiver (D_{\max} hiver) et en été (D_{\max} été), en fonction de l'usage

(chauffage, climatisation, ou réversible), de la demande en calorie estivale et hivernale, de la différence de température moyenne entre le puits de pompage et d'injection. Ces valeurs sont issues d'une approche par modélisation numérique déterministe réalisée dans un cas générique présentant les caractéristiques suivantes :

- ⇒ Aquifère d'une épaisseur de 25 m avec une zone saturée de 20 m, d'une conductivité hydraulique de 10^{-3} m/s, d'une porosité de 20%, d'un gradient hydraulique égale à 0,2%.
- ⇒ La température de la surface du sol est supposée constante toute l'année et égale à 15 °C.
- ⇒ Le coefficient de performance de la pompe à chaleur est supposé égal à 3,5 en chauffage et 2,8 en refroidissement.

Par ailleurs la sensibilité au contexte hydrodynamique de la zone d'influence thermique (aire (m²) ou l'impact thermique est supérieur à 0,5 °C) causée par une pompe à chaleur sur eau de nappe est connue : en considérant que les capacités thermiques volumique fluides et solides sont connues et inchangées, les paramètres qui ont la plus grande influence sur l'étendue de la zone d'influence thermique sont : (1) la conductivité hydraulique de l'aquifère, (2) le gradient hydraulique de la nappe et (3) la dispersivité longitudinale et (4) la porosité de l'aquifère.

4.3 Modélisation et calcul numérique

Lorsque la complexité de la situation l'impose, par exemple dans le cas d'un contexte urbain où l'étude d'impact de la pompe à chaleur sur eau de nappe nécessite la prise en compte d'impacts cumulés (d'autres PAC ou d'autres sources de chaleur anthropiques), une modélisation numérique déterministe doit être envisagée.

Dans ce cas, pour obtenir une bonne représentativité des résultats, le fonctionnement

de la pompe à chaleur sur eau de nappe doit au plus être discrétisé à l'échelle de temps saisonnière (c'est-à-dire que les simulations doivent prendre en compte les variations saisonnières de fonctionnement de la PAC sur eau de nappe). Les simulations considérant un comportement annuel moyen de la pompe à chaleur sur eau de nappe, en termes de débits prélevés et de différence de température appliquée, donnent une représentation erronée de la zone d'influence thermique de l'ouvrage

Usage	Demande hiver kW.h	Demande été kW.h	Débit de fonctionnement (m ³ /jour)	Delta_T	Dmax hiv (m)	Dmax été (m)
Chauffage	157 500		642	1,0	146	138
			208	3,1	227	227
			128	5,0	243	243
			66	9,8	257	258
	245 000		629	1,6	240	240
			200	4,9	305	308
			100	10,0	322	326
	350 000		290	4,9	359	362
	Climatisation			70 000	678	0,8
107		5,0			216	216
53		10,0			228	229
150 000		114		10,0	341	347
200 000		1520		1,0	210	208
		304		5,0	368	372
		152		10,0	386	390
Réversible		245 000		70 000	650	1,3
	257		3,7		41	91
	125		7,5		145	102

Tableau 1 : Valeurs de référence de la distance d'impact thermique consécutive au fonctionnement d'une PAC sur eau de nappe. (Mugnier, 2017).

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.

5. Bibliographie

Banks, D. (2011). The application of analytical solutions to the thermal plume from a well doublet ground source heating or cooling scheme. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 44(2), 191-197.

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

Lo Russo, S., Taddia, G., & Verda, V. (2012).

Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: A sensitivity analysis. *Geothermics*, 43, 66-74.

Mugnier, P. (2017). Impact thermique du milieu construit sur les nappes urbaines. Mémoire de fin d'études du master hydroressources. Université Grenoble Alpes.

Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Giraldo, N. M., & Kinzelbach, W. (2014). Thermal use of shallow groundwater. CRC Press.

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

septembre 2018

© 2018 - Cerema

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

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