

## *Impacts des aménagements sur l'eau souterraine urbaine*

# Revue introductive des impacts des aménagements sur les écoulements la qualité et la température de l'eau souterraine urbaine

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 ville qui garantisse la pérennité de ces ressources, les impacts des aménagements doivent être quantifiés. Cette fiche propose un tour d'horizon des différents impacts des aménagements sur l'eau souterraine vis-à-vis des écoulements, de la qualité et de la température. Il s'agit de l'introduction d'un plus large fascicule dédié aux impacts des aménagements sur l'eau souterraine urbaine.

### Sommaire

1. Contexte en enjeux liés aux nappes urbaines	2
2. Impacts des aménagements souterrains sur les écoulements d'eau souterraine	2
3. Impacts des aménagements souterrains sur la qualité de l'eau souterraine	3
4. Impacts des aménagements souterrains sur la température de l'eau souterraine	4
5. Objectifs du fascicule	5
6. Bibliographie	6

Fiche n° 01 - septembre 2018



## 1. Contexte en enjeux liés aux nappes urbaines

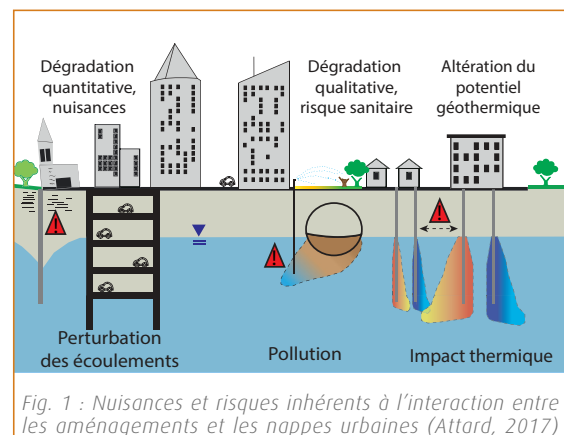
Aujourd'hui la moitié de la population vit en ville. D'ici 2050, cette proportion atteindra 70%. La densification des territoires urbanisés, et l'économie du foncier favorisent la croissance verticale de l'espace urbain (réseaux, ouvrages souterrains, infrastructures à fondations profondes, etc.) et les compétitions avec les ressources du sous-sol : en particulier l'eau souterraine et l'énergie géothermique.

La gestion de ces ressources en milieu urbain est un enjeu considérable : en Europe plus de 40% de l'eau distribuée dans les réseaux provient d'aquifères urbains (Eiswirth et al., 2004) et depuis que le Conseil Européen s'est engagé à réduire de 20% les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2020 (Commission Européenne, 2009), l'énergie géothermique est considérée comme une ressource stratégique. Parallèlement, la construction d'ouvrages souterrains peut favoriser les interactions avec ces ressources et générer des risques et nuisances :

- Les ouvrages souterrains peuvent impacter les écoulements de nappes. L'eau drainée (points de prélèvements, etc.) peut favoriser la compaction des sols et l'altération de ses propriétés géotechniques. Les barrières hydrauliques peuvent favoriser les remontées de nappe et impacter le bâti existant.

- Les ouvrages souterrains peuvent impacter la qualité de l'eau souterraine du fait des matériaux de construction employés, et de la perturbation des écoulements occasionnée. Ils peuvent par exemple favoriser la migration des pollutions superficielles vers des masses d'eau souterraines profondes.
- Les ouvrages souterrains peuvent favoriser le phénomène d'îlot de chaleur souterrain et modifier le potentiel géothermique des aquifères urbains

L'objectif de cette fiche introductive est de présenter les principales pressions exercées par les aménagements souterrains sur l'eau souterraine, qu'il s'agisse d'impacts sur les écoulements, la qualité, ou la température de l'eau souterraine urbaine.



## 2. Impacts des aménagements souterrains sur les écoulements d'eau souterraine

Les techniques de construction souterraines les plus communes consistent à (1) lester l'ouvrage pour résister à la pression exercée par la nappe ou à (2) drainer l'eau souterraine afin de réduire cette pression. Ces techniques de construction peuvent, dans le premier cas, faire obstacle à l'écoulement du fait de l'étanchéité de la structure. Dans le second cas, elles perturbent la structure des systèmes d'écoulement du fait du drainage (Fig. 2). L'eau drainée sous l'ouvrage

puis réinjectée dans le milieu favorise ainsi les circulations d'eau dans des directions opposées au sens naturel de l'écoulement.

Dans le cas des ouvrages faisant obstacle à l'écoulement, le niveau de nappe peut augmenter à l'amont de l'ouvrage (respectivement, il peut diminuer à l'aval de l'ouvrage). L'augmentation des niveaux d'eau à l'amont de l'ouvrage peut favoriser les inondations par remontée de nappe,

ou la mise en communication de la nappe avec des réseaux d'eaux usées. La diminution des niveaux d'eau à l'aval de l'ouvrage peut favoriser les tassements des terrains qui peuvent causer des dommages au bâti. Les études de cas apparaissant dans la littérature (Attard et al., 2016a) montrent que dans les contextes de nappes libres, lorsque le gradient hydraulique est inférieur à 0,5%, ce phénomène de barrière hydraulique est marginal. En revanche, dans les contextes de nappes captives, l'effet de barrière hydraulique peut générer des surélévations piézométriques de l'ordre de plusieurs mètres (Pujades et al., 2012). Cet impact peut être réduit lorsque des by-pass sont implantés (Fig. 3) afin de favoriser la circulation de l'eau souterraine au voisinage de l'ouvrage (Serrano-Juan et al., 2018).

Dans le cas des ouvrages drainant l'eau souterraine afin de réduire la pression exercée par la nappe, les systèmes de drainages contribuent à morceler la structure des écoulements de la masse d'eau, et la direction de l'écoulement peut se retrouver inversée (Attard et al., 2016b).

Ces changements de direction des écoulements sont problématiques dans la mesure où ils traduisent une évolution du régime

d'alimentation de la nappe susceptible de menacer la maîtrise de la ressource.

Pour éviter ce phénomène, les débits mobilisés par les ouvrages souterrains (puits de prélèvements, drains, ouvrages équipés d'un système de drainage et de réinjection) doivent être inférieurs, de plusieurs ordres de grandeurs, au débit caractéristique de circulation de la masse d'eau dans lequel se trouve l'ouvrage souterrain.

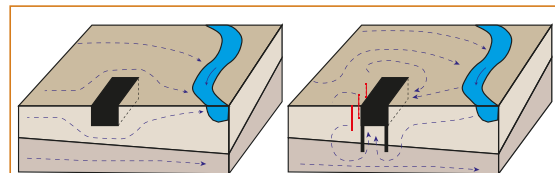


Fig. 2 : Impact d'un ouvrage souterrain imperméable (à gauche) et d'un ouvrage souterrain équipé d'un radier drainant (à droite) sur l'écoulement (Attard et al., 2017a)

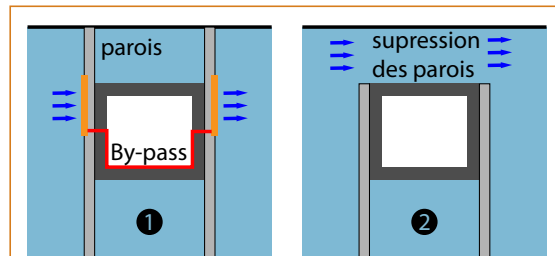


Fig. 3 : techniques de by-pass consistant à (1) canaliser l'eau souterraine entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou (2) à retirer une partie du mur d'étanchéité (d'après Serrano-Juan et al., 2018).

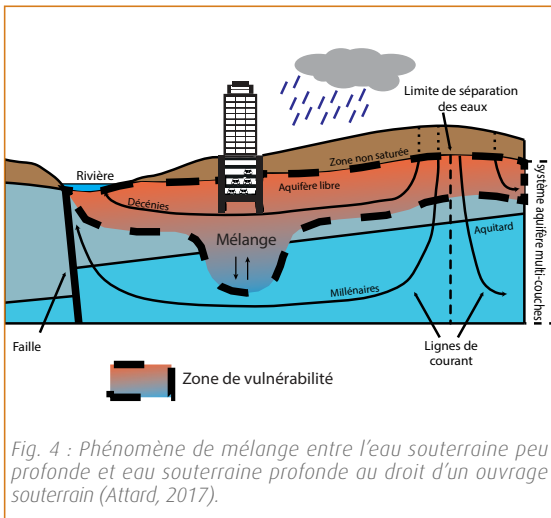
### 3. Impacts des aménagements souterrains sur la qualité de l'eau souterraine

Les aménagements souterrains peuvent favoriser la dégradation qualitative de la ressource en eau souterraine soit lorsqu'ils agissent comme source de contamination, soit lorsqu'ils favorisent la migration d'une contamination existante.

Par exemple, les fuites des réseaux d'eaux usées, chargées en pathogènes et en éléments toxiques, contribuent à l'altération qualitative de la ressource en eau souterraine urbaine (Lerner, 2002). Il en est de même des matériaux de construction utilisés pour les ouvrages souterrains. Lorsque les conditions physico-chimiques sont réunies, le contact des matériaux de construction avec l'eau souterraine

peut conduire à des dissolutions, par exemple de fer et de manganèse (Chae et al., 2008) et altérer la qualité de l'eau.

Par ailleurs, les ouvrages souterrains perturbent les circulations d'eau et peuvent favoriser la migration des contaminations urbaines historiques ou accidentelles (Attard et al., 2016c; 2017b), et l'atteinte de ressources préservées. En effet, les ouvrages souterrains génèrent des mélanges entre les masses d'eau souterraine de proche surface et les masses d'eau souterraine profondes (Fig. 4). Les ouvrages souterrains accroissent ainsi directement la vulnérabilité des masses d'eau souterraine profondes.



Concrètement, cela signifie que la présence d'ouvrages souterrains raccourcit le chemin entre les formations superficielles – très exposées aux activités humaines et aux pollutions, - et les formations plus profondes et préservées.

Ce phénomène est problématique dans la mesure où les masses d'eau souterraine de grande profondeur peuvent être identifiées comme des ressources stratégiques, ou comme des ressources de substitution, même lorsqu'elles se situent au droit de zones densément bâties. C'est par exemple le cas de la masse d'eau de la molasse Miocène à Lyon, et de la masse d'eau de l'Albien à Paris

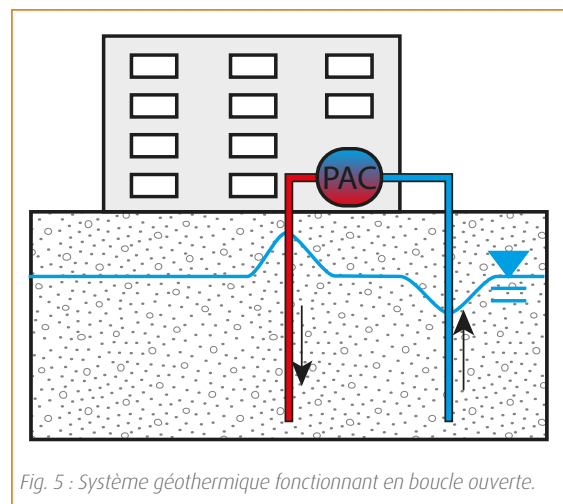
## 4. Impacts des aménagements souterrains sur la température de l'eau souterraine

Les aménagements souterrains (systèmes géothermiques ou constructions souterraines) peuvent contribuer à accélérer la formation d'îlots de chaleur souterrains. Ces îlots de chaleur représentent une opportunité pour une exploitation géothermique en chauffage, et une menace pour une exploitation géothermique en refroidissement. Dans certains cas, l'augmentation de la température de la nappe peut également impacter la qualité de la ressource du fait d'une modification de l'activité microbienne et des caractéristiques physico-chimiques de cette dernière. L'augmentation de température contribue à déplacer les équilibres thermodynamiques et peut ainsi faciliter la mobilisation d'éléments solubles.

Lorsqu'ils fonctionnent en refroidissement, les systèmes géothermiques ouverts ou fermés sont responsables d'un réchauffement de l'aquifère : les calories du bâtiment à refroidir sont récupérées par le système géothermique, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur, et sont rejetées dans la nappe.

Ce réchauffement de nappe peut altérer les performances de l'installation géothermique elle-même. Concernant les systèmes en boucle ouverte par exemple (Fig. 5), si les puits de prélèvement et de rejets sont trop rapprochés l'un de l'autre, un phénomène de recyclage peut se produire. C'est-à-dire que l'eau rejetée

(plus chaude) retourne au niveau du puits de prélèvement. Lorsque ce phénomène se produit, la performance de l'installation diminue et un réchauffement plus important que prévu se produit au niveau de la nappe jusqu'à ce que l'installation ne puisse plus fonctionner.



Selon le même principe, la multiplication des installations géothermiques peut conduire à l'apparition d'îlots de chaleur à plus grande échelle (Herbert et al., 2013).

Les perturbations thermiques causées par les ouvrages géothermiques fonctionnant en boucle ouverte ou fermée peuvent être évaluées à l'aide d'approches analytiques ou numériques (Stauffer et al., 2013). L'amplitude de l'impact causée par ces dispositifs dépend de (1) la puissance

thermique de l'installation (2) du régime de fonctionnement (chauffage, climatisation, usage réversible) (3) de l'écart de température appliqué entre l'entrée et la sortie du dispositif et (4) de la capacité de l'aquifère à atténuer l'impact thermique.

Les déperditions de chaleur provenant des constructions peuvent également avoir une contribution significative au réchauffement des aquifères urbains (Ampofo et al., 2004 ; Attard et al., 2016d, Epting et al., 2017). Dans les secteurs les plus densément construits, les anomalies de températures peuvent dépasser plusieurs degrés par rapport aux zones voisines non aménagées. Par exemple, les lignes de métro ou les tunnels ferroviaires génèrent une déperdition thermique importante en raison des systèmes de freinage. Il en est de même des parcs de stationnement souterrains qui transfèrent la chaleur provenant des moteurs des véhicules stationnés. Dans ce dernier cas, les impacts thermiques peuvent être de l'ordre de plusieurs degrés

à proximité de l'ouvrage. La puissance nette de réchauffement de l'ouvrage (il s'agit de la part de la puissance qui contribue effectivement au réchauffement de la nappe, le reste est dissipé par la surface du sol) peut représenter environ 1 W par mètre carré d'ouvrage en contact avec l'aquifère (Fig. 6).

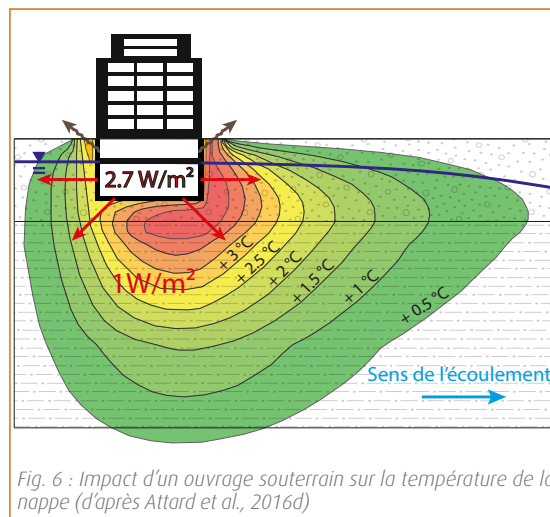


Fig. 6 : Impact d'un ouvrage souterrain sur la température de la nappe (d'après Attard et al., 2016d)

## 5. Objectifs du fascicule

Cette fiche introductive montre que les pressions exercées par les aménagements sur l'eau souterraine urbaine peuvent être de diverses natures et impacter les écoulements, la qualité et la température des masses d'eau souterraine. Ces pressions ont des conséquences sur l'état et l'accessibilité de la ressource en eau et de l'énergie géothermique. Ces pressions peuvent se traduire par d'autres risques et nuisances indirects comme :

- ⇒ le risque d'inondation par remontée de nappe ;
- ⇒ le risque sanitaire lié à la contamination d'une ressource exploitée ;
- ⇒ le risque de dégradation du bâti lié à un tassement des terrains, etc.

Bien que ces pressions aient été présentées individuellement, des impacts combinés et cumulés peuvent être observés. Par exemple, une obstruction de l'écoulement causée par une barrière hydraulique se traduit directement par une diminution du niveau d'eau et de la quantité d'eau disponible à l'aval de la construction. Ainsi, peuvent s'en suivre une augmentation des

concentrations en pollutions puisque les sources diffuses de contaminations seront moins diluées. De même les impacts thermiques exercés par les installations géothermiques et les autres sources de chaleur anthropiques seront plus forts.

Pour limiter les risques et nuisances liés aux perturbations de l'eau souterraine, il convient, d'une part, de maîtriser ces impacts individuels, combinés et cumulés. À ce titre, les fiches proposées dans la suite de ce fascicule présentent des méthodes afin :

- (1) d'identifier les secteurs plus ou moins favorables à l'accueil de nouveaux aménagements en fonction des impacts qui peuvent être générés ;
- (2) de hiérarchiser les enjeux en fonction des contextes hydrogéologiques urbains rencontrés ;
- (3) de quantifier les impacts des aménagements sur les écoulements la qualité et la température de l'eau souterraine ;
- (4) de réduire les impacts par des solutions constructives.

## 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.

## 6. Bibliographie

Ampofo, F., Maidment, G., & Missenden, J. (2004). Underground railway environment in the UK Part 2: Investigation of heat load. *Applied Thermal Engineering*, 24(5), 633-645.

Attard, G., Winiarski, T., Rossier, Y., & Eisenlohr, L. (2016a). Impact of underground structures on the flow of urban groundwater. *Hydrogeology Journal*, 24(1), 5-19.

Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., Cuvillier, L., & Eisenlohr, L. (2016b). 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(5), 1213-1229.

Attard, G., Rossier, Y., & Eisenlohr, L. (2016c). Urban groundwater age modeling under unconfined condition—Impact of underground structures on groundwater age: Evidence of a piston effect. *Journal of hydrology*, 535, 652-661.

Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., & Eisenlohr, L. (2016d). Deterministic modeling of the impact of underground structures on urban groundwater temperature. *Science of The Total Environment*, 572, 986-994.

Attard, G. (2017). Impacts des ouvrages souterrains sur l'eau souterraine urbaine : Application à l'agglomération lyonnaise. Thèse de doctorat. Université de Lyon.

Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., & Eisenlohr, L. (2017a). Urban underground development confronted by the challenges of groundwater resources: Guidelines dedicated to the construction of underground structures in urban aquifers. *Land Use Policy*, 64, 461-469.

Attard, G., Rossier, Y., & Eisenlohr, L. (2017b). Underground structures increasing the intrinsic vulnerability of urban groundwater: Sensitivity analysis and development of an empirical law based on a groundwater age modelling approach. *Journal of Hydrology*, 552, 460-473.

Chae, G. T., Yun, S. T., Choi, B. Y., Yu, S. Y., Jo, H. Y., Mayer, B., & Lee, J. Y. (2008). Hydrochemistry of urban groundwater, Seoul, Korea: The impact of subway tunnels on groundwater quality. *Journal of contaminant hydrology*, 101(1), 42-52.

Commission Européenne (2009). Decision n° 406/2009/EC of the European Parliament and Council of 23 April 2009 on the effort of member states to reduce their greenhouse gas emissions to meet the community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0136:0148:EN:PDF>

Eiswirth, M., Wolf, L., & Hötzl, H. (2004). Balancing the contaminant input into urban water resources. *Environmental Geology*, 46(2), 246-256.

Epting, J., Scheidler, S., Affolter, A., Borer, P., Mueller, M. H., Egli, L., ... & Huggenberger, P. (2017). The thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater resources—A paradigmatic example. *Science of The Total Environment*, 596, 87-96.

Herbert, A., Arthur, S., & Chillingworth, G. (2013). Thermal modelling of large scale exploitation of ground source energy in urban aquifers as a resource management tool. *Applied energy*, 109, 94-103.

Lerner, D. N. (2002). Identifying and quantifying urban recharge: a review. *Hydrogeology journal*, 10(1), 143-152.

Pujades, E., López, A., Carrera, J., Vázquez-Suñé, E., & Jurado, A. (2012). Barrier effect of underground structures on aquifers. *Engineering geology*, 145, 41-49.

Serrano-Juan, A., Pujades, E., Vázquez-Suñé, E., Velasco, V., Criollo, R., & Jurado, A. (2018). Integration of groundwater by-pass facilities in the bottom slab design for large underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 231-243.

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

### Contact

Guillaume Attard  
[guillaume.attard@cerema.fr](mailto:guillaume.attard@cerema.fr)

### Photo de couverture

Parking relais en construction  
© Bernard Suard - 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.

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