

Impacts des aménagements sur l'eau souterraine urbaine

Impacts des ouvrages souterrains sur les mélanges entre masses d'eau superposées

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 abrite des ressources en eau stratégiques qu'il convient de protéger des contaminations de surface. En particulier, lors de la construction d'ouvrages souterrains, les contaminations historiques ou accidentelles des formations géologiques superficielles sont amenées à migrer verticalement, vers les aquifères plus profonds. Cette fiche présente les éléments à prendre en compte pour anticiper la migration verticale d'une contamination lors de la construction d'un ouvrage souterrain ayant un comportement drainant ou imperméable. Une loi empirique y est présentée afin d'éviter la migration des contaminations vers les réservoirs stratégiques dans le cadre de la construction d'un ouvrage au comportement imperméable.

Sommaire

1. Enjeux liés à la mise en communication des masses d'eau	2
2. Rôle de différentes techniques de construction	2
3. Délimiter la zone de mélange causée par un ouvrage souterrain au comportement imperméable	3
4. Sensibilité du phénomène aux caractéristiques physiques des formations aquifères	5
5. Bibliographie	6

Fiche n° 03 - septembre 2018



1. Enjeux liés à la mise en communication des masses d'eau

Les ouvrages souterrains favorisent la migration des contaminations des masses d'eau superficielles vers les masses d'eau plus profondes (Attard et al., 2016a). Il en découle un accroissement de vulnérabilité de l'eau souterraine profonde au droit de ces aménagements. Cet accroissement de vulnérabilité est caractérisé par une zone de mélange de la contamination au droit de l'ouvrage.

Lors de la reconversion des sites industriels et de la construction d'ouvrages souterrains, il est important de pouvoir anticiper cette zone de mélange entre les masses d'eau souterraines superficielles et profondes puisque les terrains à urbaniser sont régulièrement pollués par des contaminations historiques et accidentelles.

Cette fiche présente le rôle des différentes techniques de construction sur les mélanges qui peuvent être occasionnés. Dans le cas des ouvrages souterrains au comportement imperméable, une loi empirique est présentée afin d'anticiper l'extension de cette zone et ainsi éviter la migration des contaminations provenant

des formations superficielles vers les réservoirs stratégiques. Cette loi peut notamment être utilisée comme aide à la décision pour délimiter les secteurs pertinents lors d'éventuelles solutions de dépollution pour la réhabilitation des sites pollués. Elle est applicable dans le cas des aquifères poreux à nappe libre de faible gradient hydraulique ($< 1\%$). Cette loi peut également être utilisée pour évaluer l'efficacité des solutions constructives destinées à limiter l'extension de la zone de mélange des eaux.

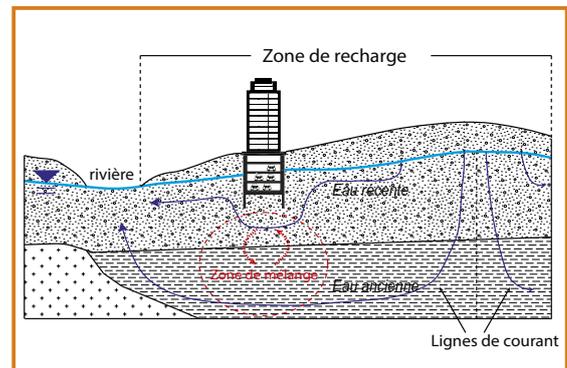


Fig. 1 : phénomène de mélange au droit d'un ouvrage souterrain (Attard et al., 2017)

2. Rôle de différentes techniques de construction

Les ouvrages souterrains perturbent les écoulements naturels des nappes soit en faisant obstacle à l'écoulement (Fig 2a), c'est le cas des structures imperméables, soit en drainant les écoulements afin de réduire la pression hydrostatique exercée par la nappe sur l'ouvrage (Fig 2a). Concernant ces deux techniques de constructions :

- Les ouvrages souterrains équipés d'un système de drainage et de réinjection ont une plus grande influence que les ouvrages imperméables sur les mélanges entre masses d'eau superposées. Compte tenu de leur zone d'influence, de l'ordre de plusieurs centaines de mètres à l'amont et à l'aval de l'ouvrage, les systèmes de drainage-réinjection doivent être considérés comme particulièrement impactant dans les secteurs où la qualité de l'eau représente un enjeu pour le territoire (prélèvement AEP, etc.).

- Les ouvrages souterrains imperméables ont une influence localisée sur le mélange entre masses d'eau superposées. La zone de mélange causée par ce type d'ouvrages peut être délimitée à l'aide d'une loi empirique (Attard et al., 2017) développée dans la section suivante.

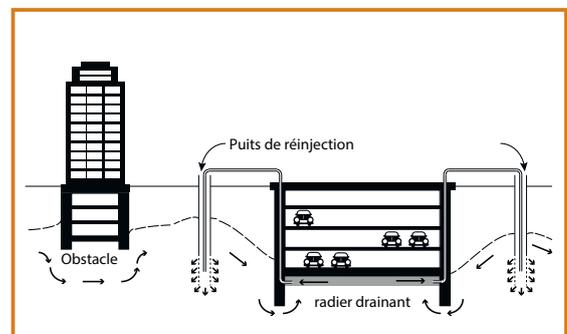


Fig. 2 : a) ouvrage faisant obstacle à l'écoulement (à gauche). b) ouvrage équipé d'un radier drainant et de puits de réinjection (Modifié d'après Attard et al., 2016b).

3. Délimiter la zone de mélange causée par un ouvrage souterrain au comportement imperméable

La zone de mélange causée par un ouvrage souterrain imperméable dépend des dimensions de l'ouvrage (sa profondeur d et sa largeur e) et notamment de l'obstruction qu'il génère sur l'écoulement. Ce facteur d'obstruction δ causé par l'ouvrage est défini par $\delta = (d - WT)/T$, où WT correspond à la profondeur de la surface libre de la nappe et T correspond à l'épaisseur de la zone saturée au droit de l'ouvrage souterrain (Fig.3).

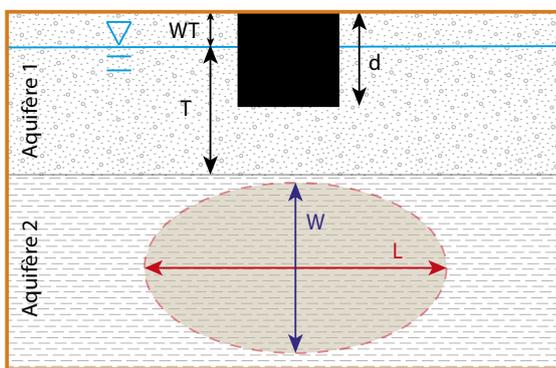


Fig. 3 : Schématisation du problème étudié et de la délimitation de la zone de mélange au droit d'un ouvrage souterrain. (Attard et al., 2017). Il s'agit de la zone où la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère est accrue.

D'autre part, la zone de mélange dépend des caractéristiques physiques des formations aquifères en présence, telles que :

- **La perméabilité** de la formation superficielle K_1 (m/s) et de la formation sous-jacente K_2 (m/s). La perméabilité d'un sol traduit sa capacité faciliter l'écoulement.
- **Le coefficient d'anisotropie** β (sans unité) de la formation sous-jacente. Lorsque la perméabilité du sol n'est pas la même dans toutes les directions de l'espace (c.-à-d. qu'il y a des directions d'écoulement privilégiées, cf. Fig. 4), un coefficient d'anisotropie peut être défini. Il traduit le rapport entre la perméabilité horizontale et verticale. Lorsque ce coefficient est égal à 1, le milieu est isotrope, lorsque ce coefficient est supérieur à 1, l'écoulement est privilégié dans la direction horizontale, et lorsque le coefficient est inférieur à 1, l'écoulement est privilégié dans la direction verticale.

- **La porosité efficace** n_2 (sans unité) de la formation sous-jacente. La porosité efficace correspond à la fraction entre le volume des vides interconnectés qui participent à l'écoulement et de l'eau dans le sol.
- **La dispersivité transversale** D_T (m) de la formation sous-jacente. La dispersivité d'un sol traduit sa tortuosité et sa capacité à disperser une pollution. Cette dispersivité peut être décrite longitudinalement, et transversalement à l'écoulement.

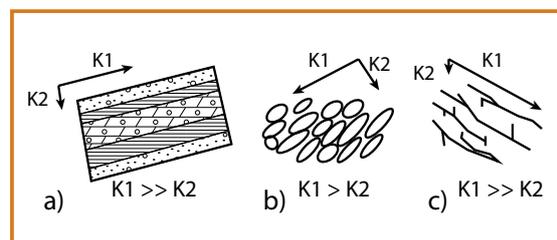


Fig. 4 : Anisotropie de perméabilité : a) Conches sédimentaires, b) graviers dans un dépôt alluvial, c) Roche fracturée. (Modifié d'après Krevsic, 2007)

Ces caractéristiques peuvent être déterminées à l'aide des informations disponibles sur la plateforme [infoterre¹](http://infoterre.brgm.fr), 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 BRGM²](http://www.brgm.fr/mediatheque). Le Tableau 1 récapitule la porosité efficace et la perméabilité de certaines roches.

Délimitation de la zone de mélange :

La longueur L et la largeur W de la zone de mélange (Fig. 3) causée par un ouvrage souterrain faisant obstacle à l'écoulement peuvent être calculées à l'aide de l'équation (1) et (2).

$$L = L_{MAZ}^{ref} \left(1 + \sigma_1 (\delta - C_1^{ref}) \right) \cdot \left(1 + \sigma_2 (e - C_2^{ref}) \right) \cdot \left(1 + \sigma_3 (\log K_1 - C_3^{ref}) \right) \cdot \left(1 + \sigma_4 \left(\log \frac{1}{K_2} - C_4^{ref} \right) \right) \cdot \left(1 + \sigma_5 (\beta - C_5^{ref}) \right) \cdot \left(1 + \sigma_6 \left(\frac{1}{n_2} - C_6^{ref} \right) \right) \cdot (1 + \sigma_7 \log D_T) \quad (1)$$

$$W = 0,23 \times L \quad (2)$$

¹ <http://infoterre.brgm.fr/>

² <http://www.brgm.fr/mediatheque/mediatheque>

Ces formules ont été implémentées dans un classeur Excel accessible en ligne ([lien de téléchargement](#))³ et peuvent être appliquées directement en utilisant les paramètres empiriques reportés dans le Tableau 2.

Roche	Porosité efficace (%)	Perméabilité (K, m/s)
Gravier	20 à 30	10 ⁻³ à 1
Alluvion	10 à 20	10 ⁻³ à 1
Grès	0 à 25	10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁴
Sable	20 à 35	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁴
Sable limoneux	25 à 35	10 ⁻⁸ à 10 ⁻⁴
Limon	15 à 25	10 ⁻⁹ à 10 ⁻⁵
Limon argileux	5 à 10	10 ⁻¹¹ à 10 ⁻⁸
Sable argileux	25 à 35	10 ⁻⁸ à 10 ⁻⁵
Marne	0 à 5	10 ⁻¹⁰ à 10 ⁻⁸
Argile sableuse	5 à 10	10 ⁻¹⁰ à 10 ⁻⁶
Calcaire	2 à 10	10 ⁻¹¹ à 10 ⁻⁹
Dolomie	5 à 10	10 ⁻¹¹ à 10 ⁻⁹
Gypse	2 à 10	10 ⁻¹² à 10 ⁻¹⁰
Argile	0 à 5	10 ⁻¹² à 10 ⁻⁹
Silt	2 à 5	10 ⁻⁹ à 10 ⁻⁶

Tableau 1 : Porosité efficace et perméabilité de certaines roches (Modifié d'après Banton & Bangoy, 1997 et Castany, 1982)

Indice	Pente normalisée σ_i	Paramètre C_i^{ref}	L_{MAZ}^{ref}
1	2,171	0,40	234,7
2	0,015	50	
3	0,767	-2,699	
4	0,400	5	
5	-0,063	1	
6	0,039	20	
7	-0,822	-	

Tableau 2 : liste des paramètres empiriques utilisés pour calculer la longueur et la largeur de la zone de mélange causée par un ouvrage souterrain (Attard et al., 2017).

4. Sensibilité du phénomène aux caractéristiques physiques des formations aquifères

La sensibilité de la zone de mélange aux dimensions d'un ouvrage souterrain faisant obstacle à l'écoulement peut être résumé de la façon suivante :

L'obstruction de la couche superficielle causée par l'ouvrage souterrain a une forte influence sur l'extension de la zone de mélange : au plus l'obstruction est forte, au plus la zone de mélange est étendue.

Également, la zone de mélange augmente lorsque :

- ⇒ la perméabilité de la couche superficielle augmente ;

- ⇒ la perméabilité de la couche profonde diminue ;
- ⇒ l'anisotropie horizontale diminue : les impacts les plus importants sont mis en évidence dans le cas des aquifères isotropes ;
- ⇒ la porosité de la couche profonde diminue ;
- ⇒ la dispersivité transversale diminue.

Enfin, la dispersivité longitudinale a une faible influence sur la zone de mélange. Le gradient hydraulique a également une faible influence sur la zone de mélange tant que celui-ci reste inférieur à 1%.

³ <http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S002216941730464X-mm1.xlsx>

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

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

Attard, G., Rossier, Y., & Eisenlohr, L. (2017). 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.

Banton, O. et Bangoy L. M. (1997). *Hydrogéologie : Multi-science environnementale des eaux souterraines*. Université du Québec / AUPELF, 460p.

Castany, G. (1982). *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Université de Pierre et Marie Curie (Paris VI), 233p.

Kresic, N. (2007). *Hydrogeology and groundwater modeling*. CRC Press, 807p.

Contact

Guillaume Attard
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.

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