



QUANTIFICATION DES IMPACTS DES OUVRAGES SOUTERRAINS SUR LES NAPPES URBAINES

QUANTIFICATION OF UNDERGROUND STRUCTURES IMPACTS ON URBAN GROUNDWATER

Guillaume ATTARD^{1*}, Laurent EISENLOHR¹, Yvan ROSSIER²

¹Cerema,

²Univ. Grenoble-Alpes

* Correspondant : guillaume.attard@cerema.fr

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, les acteurs de l'aménagement sont soumis à des contraintes antagonistes, qui favorisent l'optimisation de l'espace urbain. En effet, malgré des pressions anthropiques toujours plus fortes, puisque d'ici à 2030, 60% des hommes vivront en ville (UN-Habitat, 2008), la protection des espaces naturels demeure un enjeu majeur, limitant ainsi l'étalement horizontal des villes. La préservation de ces espaces privilégie une croissance verticale de l'espace urbain (MEDDTL : Ministère de l'Ecologie, 2012). Cette croissance peut s'opérer en surface, mais également en exploitant le potentiel que le sous-sol offre au développement de la ville. Dès lors, une planification raisonnée de l'espace souterrain apporterait une réponse sérieuse aux préoccupations actuelles de développement durable des villes.

Ce développement urbain passe par une compréhension du comportement des ressources offertes par le sous-sol comme les ressources en eau, la géothermie et les géomatériaux (Parriaux *et al.*, 2010), ainsi que des risques dus aux tassements différen-

tiels, aux inondations, ou à l'altération de la ressource. En particulier, la résilience de la ressource en eau souterraine apparaît comme un enjeu considérable dépendant de la densification urbaine qui conduit à la réalisation d'ouvrages de plus en plus profonds (Blunier, 2009) comme les métros, les fondations de bâtiments, les parkings souterrains qui constituent des obstacles à l'écoulement naturel des nappes (Pujades *et al.*, 2012). La fragilité de cette ressource en eau souterraine montre qu'un outil de planification est indispensable pour la gestion durable de ces « villes souterraines » (Foster *et al.*, 2013). Actuellement, la réglementation tient peu compte de l'espace souterrain et ne permet pas une pleine maîtrise des usages qui en sont faits (Maire, 2011). Egalement, le manque d'expertise en matière de compréhension du sous-sol urbain représente un véritable obstacle à l'élaboration d'une planification tridimensionnelle de la ville (Bobylev, 2009).

Depuis 2013, des travaux ont été engagés à l'échelle de l'agglomération lyonnaise afin d'améliorer la compréhension des impacts cumulés des ouvrages souterrains sur les écoulements, la qualité, et la température de l'eau souterraine urbaine





(Attard, *et al.*, 2016a,b,c,d ; Attard *et al.*, 2017a). L'objectif de cet article est de présenter les principaux résultats qui ressortent de ces travaux.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Site d'étude

La ville de Lyon (France) a été choisie pour étudier les impacts cumulés des ouvrages souterrains sur les écoulements, la température et la qualité de l'eau souterraine urbaine. La ville de Lyon est bâtie sur la plaine alluviale du Rhône. Le dépôt alluvial moderne de la zone urbaine est d'environ 20 mètres d'épaisseur et sa conductivité hydraulique est de l'ordre de 10^{-3} m/s (Nicolas *et al.*, 2004). Ce dépôt quaternaire surmonte une formation de molasse Miocène d'environ 150 m d'épaisseur et d'une conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-5} m/s (Brenot *et al.*, 2009). Dans le quartier de la Part-Dieu, le plus densément bâti de l'agglomération, la nappe se trouve à environ 5 m de profondeur. Usuellement, on considère que la température de référence de la nappe alluviale est d'environ 15 °C (Chartier *et al.*, 2009).

2.2. Modélisation déterministe des impacts des ouvrages souterrains sur l'eau souterraine

La mise en œuvre d'un modèle numérique 3D a permis de simuler les impacts des ouvrages souterrains à l'aide du logiciel FEFLOW (Diersch, 2013), à l'échelle du site d'étude Lyon-Villeurbanne de 44 km². Un modèle géologique 3D a été construit (Cuvillier, 2014) afin d'associer les caractéristiques physiques aux différentes formations du domaine d'étude. La géométrie des ouvrages souterrains a été intégrée au modèle numérique grâce à une discrétisation du domaine d'étude par la méthode des éléments finis. Une perméabilité de 10^{-8} m/s a été définie au niveau des éléments constitutifs des ouvrages. Afin de reproduire le comportement hydrodynamique des ouvrages, des conditions aux limites ont été associées au niveau des ouvrages équipés de radiers drainant et de puits de réinjection (Attard *et al.*, 2016a). La première partie des simulations a été consacrée à l'étude des impacts cumulés, en régime permanent, des ouvrages souterrains sur la structure des systèmes d'écoulement et sur la position de la surface libre (Attard *et al.*, 2016b). Le scénario (1) incluant l'ensemble des ouvrages recensés dans l'agglomération a été simulé et calibré sur la base des données piézométriques du domaine d'étude. Le scénario de référence (2) excluant l'ensemble de ces ouvrages a été simulés. Dans ce scénario, les ouvrages souterrains ont été retirés. Ainsi, les impacts cumulés des ouvrages souterrains sur les écoulements de nappes ont été obtenus par comparaison entre les scénarios (1) et (2). La deuxième partie des simulations a été consacrée à l'étude des impacts cumulés des ouvrages souterrains sur la température de l'eau souterraine urbaine (Attard *et al.*, 2016c). Pour cela, le modèle d'écoulement développé (Attard *et al.*, 2016b) a été adapté à la résolution d'un problème de transfert thermique (Attard *et al.*, 2016c). Notamment, un gradient géother-

mique de 0,075 W/m² a été associé à la base du modèle (Gable *et al.*, 1982). La température à l'intérieur des ouvrages a été définie comme variant de 16 °C au 1^{er} Janvier, à 27 °C au 1^{er} Août (Benz *et al.*, 2015 ; COPARLY, 2011). Dans ces simulations, l'écoulement est supposé permanent et le transfert thermique transitoire est simulé sur 20 ans. La comparaison entre un scénario incluant les ouvrages souterrains et un scénario les excluant a permis d'évaluer les impacts cumulés sur la température de l'eau souterraine à l'échelle du quartier de la Part-Dieu. Enfin, la troisième partie des simulations a été consacrée à l'évaluation du rôle des ouvrages souterrains sur la migration des contaminations urbaines (Attard *et al.*, 2016d et Attard *et al.*, 2017a). Pour cela, la théorie généralisée des réservoirs appliquée aux systèmes hydrodispersifs (Cornaton *et al.*, 2006a,b) a été utilisée. L'utilisation de cette théorie permet de simuler l'âge de l'eau souterraine en tout point du domaine d'étude. L'âge d'une molécule d'eau étant défini comme le temps qui s'est écoulé entre le moment où la molécule d'eau a pénétré le sol, et l'instant présent. L'utilisation de cette théorie a l'avantage de proposer une description des écoulements d'eau souterraine qui tient compte des phénomènes de diffusion et de dispersion. Cette description a été utilisée afin de mettre en évidence le rôle des ouvrages souterrains sur la migration de contaminants d'un réservoir aquifère superficiel à un réservoir plus profond. Un scénario a été simulé afin de quantifier l'impact d'un ouvrage souterrain de 50 m de large, 100 m de long, et 15 m de profondeur, sur l'âge de l'eau.

3. RÉSULTATS

3.1. Impacts sur les écoulements d'eau souterraine

Les scénarios simulés ont permis de mettre en évidence l'évolution des systèmes d'écoulement et de la position de la surface libre de la nappe entre un état aménagé, et non aménagé de l'aquifère urbain. Les principaux systèmes d'écoulement sont délimités en identifiant les aires d'alimentation reliées à des exutoires communs. Les impacts cumulés sont représentés à la Figure 1. Les infrastructures dites drainantes telles que les prélèvements et les infrastructures construites avec un système de pompage et de réinjection causent une fragmentation des systèmes d'écoulement de la nappe urbaine. Dans l'état potentiel illustré à la Figure 1a, trois systèmes d'écoulement sont délimités. Dans l'état actuel, cinq systèmes d'écoulement sont délimités. Cette fragmentation est responsable d'une modification notable du fonctionnement de la nappe et de son régime d'alimentation. En particulier, des inversions de gradient sont observées le long du Rhône, à l'ouest du domaine d'étude. Cela se traduit par l'apparition du système d'écoulement S3 sur la Figure 1b.

L'évolution de la position de la surface libre de la nappe entre l'état potentiel et actuel de l'écoulement montre une importante dépression piézométrique générée par l'ensemble des systèmes de pompage. La Figure 1c montre que cette dépression est concentrée sur le quartier de la Part-Dieu où elle dépasse 3 m. Par ailleurs, aucun effet de barrière hydraulique qui aurait pu être causé par des fondations profondes telles que les lignes de métro, n'a été mis en évidence. En effet, du fait du faible gradient



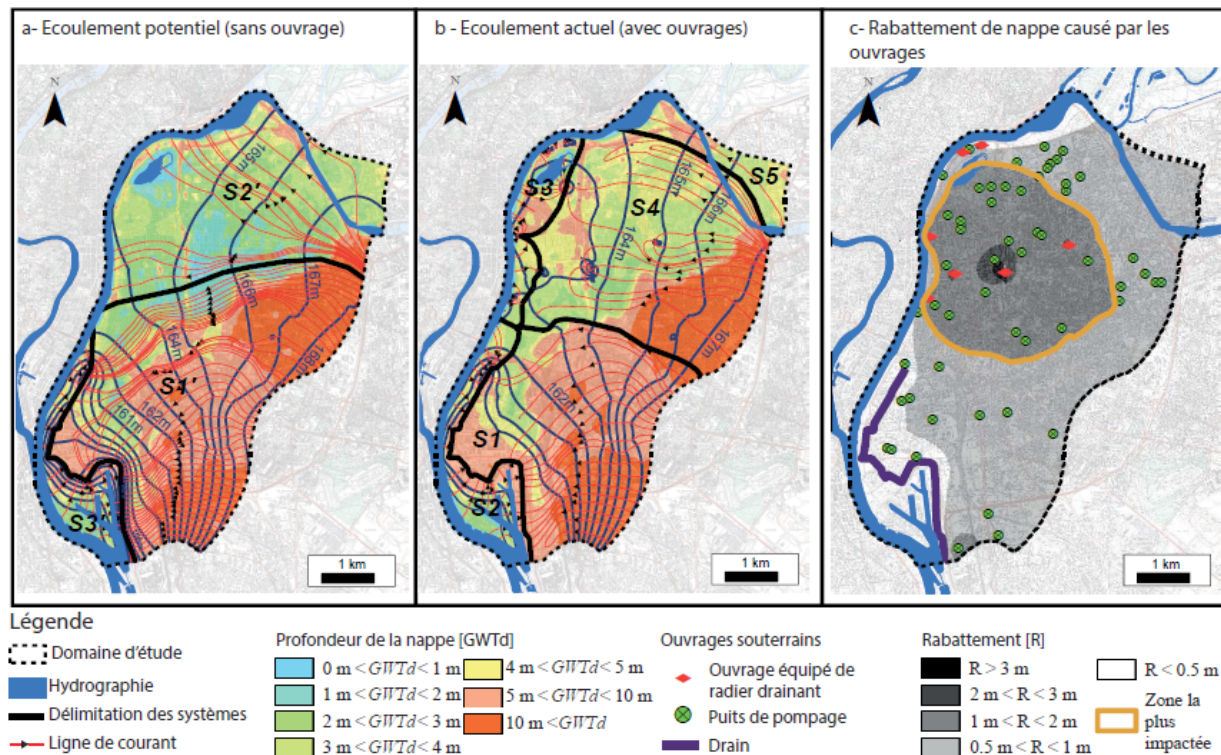


Figure 1 : (a) Structure des systèmes d'écoulement et profondeur de la nappe dans l'état potentiel (sans ouvrage) et (b) actuel (avec ouvrages). (c) Impacts cumulés des ouvrages souterrains sur la position de la surface libre de la nappe. (Modifié d'après Attard et al., 2016b)

hydraulique, de l'ordre de 0,2 % en moyenne sur le domaine d'étude, et de la forte conductivité hydraulique des formations alluviales superficielle, de l'ordre de 10^{-3} m/s, ce phénomène est marginal. La caractérisation des états potentiel et actuel des écoulement et de la position de la surface libre de la nappe a permis de formuler des recommandations destinées à limiter le risque d'inondation par remontée de nappe lors de la construction de nouveaux ouvrages souterrains (Attard et al., 2017b).

3.2. Impacts sur la température de l'eau souterraine

Les impacts thermiques cumulés des ouvrages souterrains ont été simulés à l'échelle du quartier de la Part-Dieu. Ces impacts sont représentés sur la Figure 2. La zone thermiquement impactée, c'est-à-dire où le réchauffement est supérieur à 0,5 °C représente 1,63 km², soit 14 % du domaine d'intérêt, ou encore 10 fois la surface au sol occupée par les ouvrages souterrains. Comme le montrent les Figures 2a et b, le panache thermique accompagne les ouvrages structurants du domaine d'étude, les lignes de métros. Localement, les Figures 2b et c montrent que les impacts cumulés peuvent dépasser plusieurs degrés et atteindre 4 °C à proximité des ouvrages souterrains. D'une part, le réchauffement causé par les ouvrages souterrains est donc susceptible d'altérer le potentiel géothermique de refroidissement des aquifères urbains, en altérant la performance des pompes à chaleur. D'autre part, ce réchauffement significatif peut altérer la qualité de l'eau en favorisant le développement de germes pathogènes ainsi que l'évolution des constantes d'équilibre des substances minérales dissoutes et des gaz.

Enfin, un bilan de transfert thermique a été réalisé à l'échelle du domaine d'intérêt (Figure 2a) entre les ouvrages souter-

rains et l'aquifère. Les résultats montrent que les ouvrages souterrains, tels que les lignes de métros et les parcs de stationnement souterrains sont responsable d'un transfert thermique annuel de l'ordre de 4,5 GW.h. Ce transfert thermique représente ainsi une opportunité pour une exploitation géothermique en chauffage. En effet, l'exploitation de ce transfert thermique pourrait constituer une mesure de compensation à l'impact thermique généré.

3.3. Impacts sur la qualité de l'eau souterraine

Dans cette section, l'influence d'un ouvrage souterrain sur l'âge moyen de l'eau souterraine a été testée. Le cas de la fondation profonde est illustré à l'aide de la Figure 3. Cette représentation en coupe montre que la fondation profonde est responsable d'une variation relative significative de l'âge moyen de l'eau souterraine. A 20 m de profondeur sous l'ouvrage, la réduction relative d'âge moyen est de l'ordre de -50 %. La perturbation atteint -10 % à 100 m de profondeur, sous l'ouvrage. Cette diminution de l'âge moyen de l'eau successif à l'insertion de la fondation profonde dans le modèle numérique est interprétée comme un apport d'eau jeune en provenance du réservoir des formations fluviales (de l'ordre de quelques décennies), dans le réservoir molassique où l'âge de l'eau est plus important (de l'ordre de plusieurs siècles). Ce résultat démontre que les ouvrages souterrains contribuent ainsi à accroître la vulnérabilité des réservoirs profonds aux contaminations anthropiques qui interviennent à la surface. Il doit être noté que cette mise en vulnérabilité du réservoir profond intervient malgré un impact marginal sur le potentiel hydraulique, et malgré le non ancrage de l'ouvrage dans le réservoir



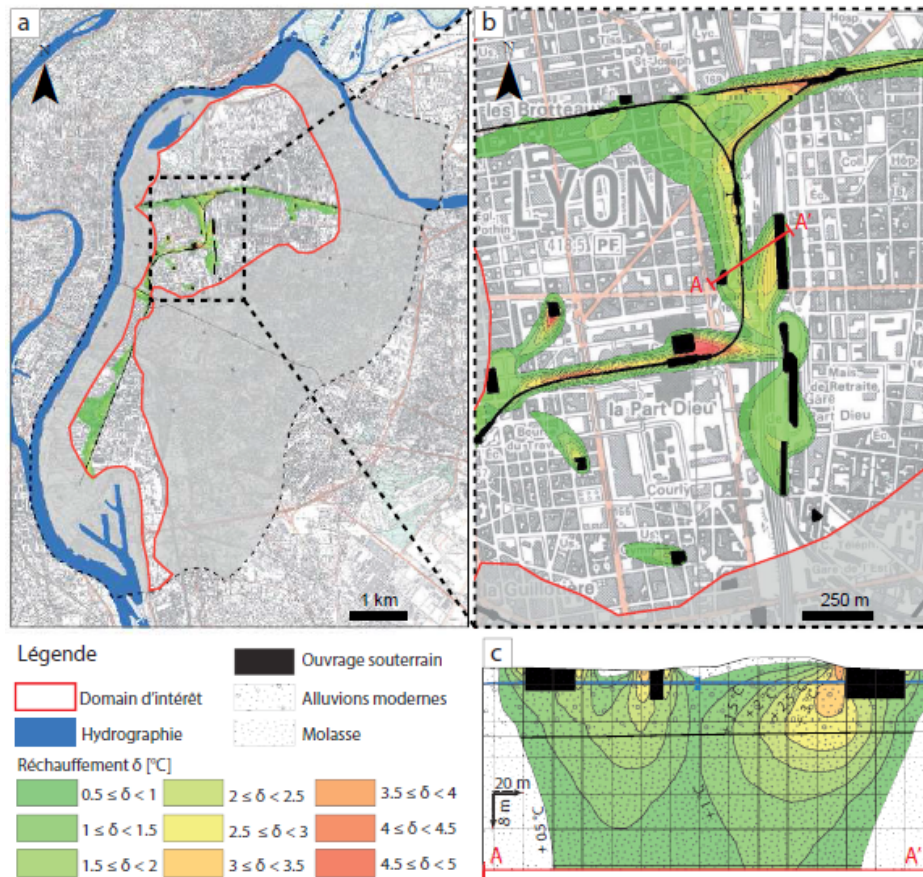


Figure 2 : (a) Vue en plan des impacts cumulés causés par les ouvrages souterrains à Lyon. (b) Vue en plan de l'impact cumulé dans le secteur de la Part-Dieu. (c) Vue en coupe de l'impact cumulé autour de trois ouvrages souterrains. (Modifié d'après Attard et al., 2016c)

molassique. Ce résultat montre ainsi l'importance de tenir compte des phénomènes de dispersion et de diffusion (1) lors de l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères profonds et (2) lors de l'évaluation de l'impact des objets ou de facteurs anthropiques sur l'eau souterraine.

D'autres simulations ont été réalisées afin de tester l'influence d'une autre technique de construction : les ouvrages souterrains équipés d'un radier drainant et de puits de réinjection (Attard

et al., 2016d). Les résultats ont démontré dans ce cas que l'ampleur de ce phénomène était beaucoup plus importante : l'effet d'échange entre les formations superficielles et la formation molassique intervient sur plus de 1 km à l'aval de l'ouvrage, et sur plus de 400 m à l'amont de l'ouvrage. Cette technique de construction apparaît ainsi comme particulièrement défavorable au regard de sa capacité, à grande échelle, à accroître la vulnérabilité des aquifères profonds.

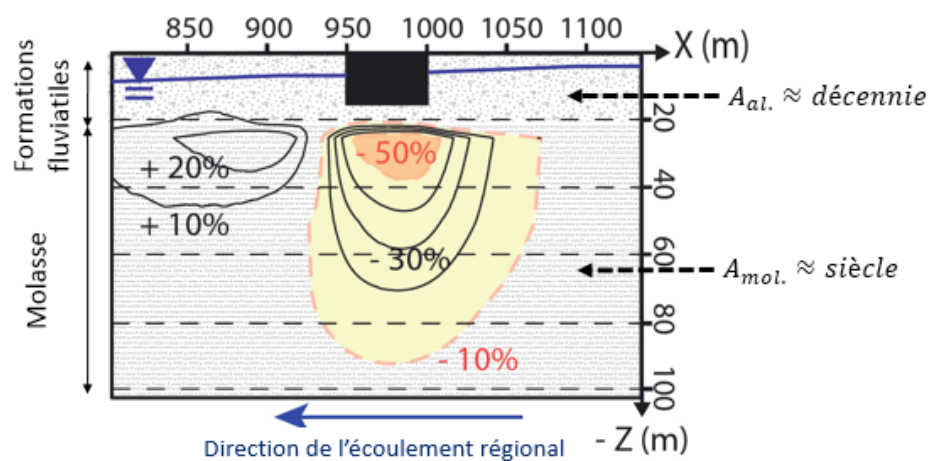


Figure 3 : Mise en évidence de la réduction de l'âge moyen de l'eau souterraine au droit d'une fondation profonde. Les isolignes représentent la variation relative de l'âge moyenne de l'eau entre un scénario sans ouvrage et un scénario avec ouvrage. Dans l'état non perturbé, l'âge moyen dans le réservoir superficiel est de l'ordre de la décennie et de l'ordre de plusieurs siècles dans le réservoir molassique. (Modifié d'après Attard et al., 2016d)



4. CONCLUSION

Les travaux réalisés ont permis d'améliorer la compréhension des impacts des aménagements sur (1) les écoulements, (2) la température et (3) la qualité de l'eau souterraine urbaine.

L'influence de plusieurs types d'infrastructures souterraines sur les écoulements a été évaluée : des infrastructures drainantes susceptibles de perturber le bilan de masse des systèmes d'écoulement et des infrastructures imperméables susceptibles de faire obstacle à l'écoulement. Il a été démontré que les ouvrages faisant intervenir des systèmes de drainage sont responsables d'une fragmentation des systèmes d'écoulements et donc susceptibles de modifier le régime d'alimentation de l'aquifère. Egalement, l'étude des impacts cumulés des prélèvements d'eau souterraine a mis en évidence un rabattement de plusieurs mètres dans les secteurs les plus impactés. Enfin, dans les conditions de faible gradient hydraulique du contexte lyonnais, il a été démontré que les fondations profondes ont un impact marginal sur la position de la surface libre de la nappe.

Les impacts cumulés des ouvrages souterrains sur la température des nappes ont été évalués. La densité de flux thermique surfacique ouvrage-aquifère ainsi que la zone d'influence thermique des ouvrages ont pu être calculées de manière déterministe à l'échelle du quartier de la Part-Dieu. Il a été démontré que les ouvrages souterrains, du fait de leur zone d'influence thermique, pouvaient affecter le potentiel géothermique des nappes urbaines.

La généralisation de la théorie des réservoirs aux systèmes hydrodispersifs a été exploitée afin d'évaluer l'influence des ouvrages souterrains sur l'âge moyen de l'eau souterraine urbaine. Les simulations ont démontré que les ouvrages souterrains sont responsables d'un échange entre l'eau du réservoir superficiel alluvial et l'eau du réservoir molassique profond accroissant ainsi sa vulnérabilité. De plus, il a été démontré que les ouvrages équipés d'un radier drainant et de puits de réinjection impactaient la vulnérabilité de l'eau souterraine sur une zone beaucoup plus large que les fondations profondes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère de la Transition écologique et solidaire pour le financement de ces travaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ATTARD, G., WINIARSKI, T., ROSSIER, Y., EISENLOHR, L. 2016a. Review: Impact of underground structures on the flow of urban groundwater. *Hydrogeology Journal*, 24: 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. *Hydrogeology Journal*, 24: 1213-1229.
- ATTARD, G., ROSSIER, Y., WINIARSKI, T., EISENLOHR, L. 2016c. Deterministic modeling of the impact of underground structures on urban groundwater temperature. *Science Of The Total Environment*, 572: 986-994.
- ATTARD, G., ROSSIER, Y., EISENLOHR, L. 2016d. 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., & 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.
- ATTARD, G., ROSSIER, Y., WINIARSKI, T., EISENLOHR, L. 2017b. 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.
- BENZ, S. A., BAYER, P., MENBERG, K., JUNG, S. and BLUM, P. 2015. Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *Science of the total Environment*, 524: 427-439.
- BLUNIER, P. 2009. Méthodologie de gestion durable du sous-sol urbain. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- BOBYLEV, N. 2009. Mainstreaming sustainable development into a city's Master plan: A case of Urban Underground Space use. *Land Use Policy*, 26, 1128-1137.
- BRENOT, A., NICOLAS, J., CHRETIEN, M., DEWANDEL, B., COURTOIS, N., CASTAGNAC, C., BOURGINE, B., COUEFFE, R., and G., M. 2009. Acquisition de connaissances sur la nappe de la molasse du territoire du SAGE de l'Est lyonnais. Rapport final. BRGM RP-57474-FR.
- CHARTIER, R., DESPLAN, A. et BEZEGUES COURTADE, D. 2009. Surveillance des installations géothermiques sur aquifères dans l'agglomération lyonnaise (69) – Rapport final. BRGM RP-57507-FR.
- COPARLY, 2011. Qualité de l'air dans les parcs de stationnement couvert – Etude détaillée dans le parc République à Lyon. [url : http://www.air-rhonealpes.fr/sites/ra/files/publications_import/files/rapport_republique.pdf - téléchargé le 19 Février 2016]
- 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 (9):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 (9):1292-1305.
- CUVILLIER, L. 2014. Eléments de construction d'un modèle hydrogéologique en contexte urbain – proposition d'un modèle géologique 3D : le cas de la ville de Lyon. Mémoire de travail de fin d'études. Ecole nationale des travaux publics de l'Etat. 81p.
- DIERSCH, H.-J. 2013. FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer Science & Business Media.
- FOSTER, S., CHILTON, J., NIJSTEN, G.-J. & RICHTS, A. 2013. Groundwater – a global focus on the 'local resource'. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 685-695.



GABLE, R., FOUCHER, J., MENJOZ, A., PHILIP, J. et ROIGNOT, G. 1982. Mesures, analyse et interprétation de profils thermiques – Application à la détermination des températures in-situ. BRGM 82 SGN 423 GTH.

MAIRE, P. 2011. Etude multidisciplinaire d'un développement durable du sous-sol urbain. Aspects socio-économiques, juridiques et de politique urbaine. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

MEDDTL : MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, D. D. D., DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT 2012. Etude de montage du Projet National « Ville 10D - Ville d'idées » Différentes Dimensions pour un Développement urbain Durable et Désirable Décliné Dans une Dynamique « Dessus/Dessous ».

NICOLAS, J., PETIT, V., THIERRY, P., BESSE, A. & LONGGET, A. 2004. Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise. Rapport d'étape - Phase 1. BRGM.

PARRIAUX, A., BLUNIER, P., MAIRE, P., DEKKIL, G. & TACHER, L. 2010. Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains. Lausanne.

PUJADES, E., LÓPEZ, A., CARRERA, J., VÁZQUEZ-SUÑÉ, E. & JURADO, A. 2012. Barrier effect of underground structures on aquifers. *Engineering Geology*, 145–146, 41–49.

UN-HABITAT 2008. State of the World's Cities 2008/9: Harmonious Cities, Earthscan.