

Étude expérimentale de l'infiltration des eaux pluviales à travers les pavés à joints larges : effets de la compaction et des chemins préférentiels pour différents niveaux aquifères

Experimental study of stormwater infiltration through block pavers: effects of compaction and preferential flows for different aquifer levels

Lina SAOUDI¹, Alexandra CERONE¹, Clara JODRY², Loïc MAURER¹, Adrien WANKO NGNIEN¹

¹ Université de Strasbourg, CNRS, ENGEES, ICube UMR 7357

² Université de Strasbourg, CNRS, EOST, ITES UMR 7063

lina.saoudi@etu.unistra.fr

RÉSUMÉ

L'imperméabilisation des sols perturbe profondément le cycle hydrologique, intensifiant le ruissellement et réduisant l'infiltration, l'évapotranspiration et la recharge des nappes. Le changement climatique accentue ces dynamiques en renforçant la fréquence et l'intensité des événements pluvieux extrêmes, augmentant la pression sur les systèmes de gestion des eaux pluviales. Parmi les systèmes d'infiltration, les pavés à joints larges semblent offrir une alternative perméable aux surfaces minérales habituelles.

Malgré le potentiel d'infiltration des pavés à joints larges, plusieurs incertitudes subsistent sur leur comportement hydrodynamique, en particulier l'effet des charges supportées sur la compaction des couches de subsurface et, à terme, sur les propriétés hydrodynamiques des structures. De plus, les interstices inhérents à la conception de ces systèmes d'infiltration génèrent des chemins préférentiels gouvernant les infiltrations en surface. Dès lors, caractériser les géométries des différents modèles de pavés à joints larges permet d'étudier l'influence de ces interstices sur les écoulements subsurface et souterrains.

Cette étude se concentre sur l'évaluation de la sensibilité des pavés à la compaction liée au stationnement, l'analyse de l'infiltration, de l'interaction avec la nappe et la cartographie des écoulements préférentiels par des méthodes hydrogéophysiques afin de mieux comprendre et d'optimiser l'usage des pavés à joints larges pour une gestion intégrée des eaux pluviales.

ABSTRACT

Imperviousness is profoundly disrupting the hydrological cycle, increasing runoff and reducing infiltration, evapotranspiration, and groundwater recharge. Climate change is exacerbating these dynamics by increasing the frequency and intensity of extreme rainfall events, putting greater pressure on stormwater management systems. Among mineral infiltration systems, block pavers appear to be a promising solution, offering a permeable alternative to conventional mineral surfaces.

Despite the infiltration potential of block pavers, several uncertainties remain regarding their hydrodynamic behavior, in particular the effect of the loads supported on the compaction of subsurface layers and on the hydrodynamic properties of the structures. Moreover, the gaps inherent in the design of these infiltration systems create preferential flows that govern surface infiltration. Characterizing the geometries of the different models of block pavers allows the study of the influence of these gaps on subsurface and underground flows.

This study focuses on assessing the sensitivity of pavers to compaction caused by parking, analyzing infiltration and interaction with groundwater, and mapping preferential flows using hydrogeophysical methods, to better understand and optimize the use of block pavers for sustainable stormwater management.

MOTS CLÉS

Chemins préférentiels, Compaction, Ground Penetrating Radar, Interaction infiltration-nappe, Pavés à joints larges

INTRODUCTION

L'urbanisation croissante et notamment l'imperméabilisation des sols qui l'accompagne, altère profondément le cycle hydrologique. Cette imperméabilisation entraîne une intensification du ruissellement ainsi qu'une diminution de l'infiltration, de l'évapotranspiration et de la recharge des nappes souterraines. Le changement climatique accentue ces dynamiques, en grande partie dû à la hausse de la fréquence et de l'intensité des épisodes pluvieux extrêmes (Pachauri et al., 2015), renforçant ainsi les contraintes pesant sur les systèmes de gestion des eaux pluviales. Parmi les solutions grises de gestion intégrée, les pavés à joints larges offrent une alternative perméable aux surfaces minérales traditionnelles (Kuruppu et al., 2019). En effet, que ce soient des pavés perméables ou des pavés imperméables à joints perméables, l'ensemble pavés-sable-sol est poreux et rend possible l'infiltration sur site. Par ailleurs, ce type de structure convient à un usage en zones urbaines car il supporte les charges des véhicules comme pour des parkings. Ci-après, les termes « pavés à joints larges » désigneront l'ensemble structurel composé de pavés carrés en béton non perméables séparés par des joints perméables de 1,5 mm disposés sur une couche de sable.

Malgré leur capacité apparente d'infiltration, plusieurs incertitudes subsistent quant à leurs performances hydrodynamiques. En particulier, la relation entre la conductivité hydraulique des pavés et les charges mécaniques associées au trafic et à la compaction qui en résulte, demeure insuffisamment caractérisée (Kuruppu et al., 2019). De plus, Weiss et al., 2019 dresse une liste des lacunes existantes sur les performances hydrauliques des pavés qui se décline selon deux échelles temporelles. À court terme, il est nécessaire de développer des méthodes *in situ* afin d'estimer la réduction du volume de précipitations infiltré au travers des pavés. À long terme, l'enjeu est d'évaluer les effets de la mise en place des pavés à joints larges à l'échelle d'un bassin versant, notamment sous différentes conditions climatiques.

Notre étude vise à quantifier les effets des chemins préférentiels, de la compaction et des interactions avec la nappe sur les performances hydrodynamiques des pavés à joints larges. Elle s'appuie sur des approches *in situ* et *ex situ* avec l'utilisation de méthodes d'inversions hydrogéophysiques, d'infiltromètres, de sondes TDR et de pression.

METHODOLOGIE PREVISIONNELLE

Présentation du site d'étude

Le territoire de l'EMS (Eurométropole de Strasbourg), métropole de 340 km² dont 26 % de surfaces imperméables, 517 386 habitants (en 2022 et + 0,7 % sur la période de 2012 à 2018) avec une densité 1 533 habitants au km², est situé dans la plaine d'Alsace, sur la nappe phréatique rhénane. Le site d'étude se situe dans le quartier résidentiel de Lizé-Mâcon dans le Neuhof, Strasbourg, France. La profondeur de nappe est de 3 m en moyenne et la perméabilité moyenne du sol est d'environ 10⁻⁵ m/s.

Sur notre site d'étude, plusieurs systèmes d'infiltration ont été mis en œuvre. Parmi eux, les espaces de stationnement ont été convertis en parking à pavés à joints larges. Pour assurer le suivi de l'infiltration, il est prévu d'utiliser des méthodes non intrusives (infiltromètres et GPR). En effet, les tensiomètres et capteurs d'humidité utilisés habituellement en monitoring ne peuvent être insérés dans cette structure.

Suivi hydrogéophysique par GPR

Le radar géologique ou Ground Penetrating Radar (GPR), est une méthode géophysique non invasive pour l'étude de la subsurface. Il repose sur l'émission et la réception d'ondes électromagnétiques dans une gamme de fréquences allant du méga-Hertz (MHz) au giga-Hertz (GHz). La réflexion de ces ondes dépend des contrastes électriques du sous-sol, ce qui permet d'identifier structures et discontinuités (Robinson et al., 2013). Il s'agit de l'une des techniques les plus utilisées pour l'étude des sols (Butler, 2005). Le GPR peut être utilisé en 2D, pour réaliser un profil ou une coupe du sous-sol ou en position statique. Bien que ces deux modes permettent des mesures répétées dans le temps, la position statique est la plus adaptée pour suivre l'évolution des paramètres hydrogéophysiques (Moua et al., 2023). Ces mesures temporelles sont particulièrement pertinentes en raison de la grande différence de permittivité relative entre l'air et l'eau contenus dans les sols (Klotzsche et al., 2019).

L'étude de Di Prima et al., 2020, combinant l'utilisation du GPR et d'infiltromètres, a permis de caractériser les chemins préférentiels d'écoulement en trois dimensions au sein d'un sol. En parallèle, l'étude de Cipolla et al., 2016 a déployé des infiltromètres scellés à la bentonite sur des parkings pavés pour répondre aux contraintes

locales (surfaces non planes notamment). C'est ainsi que notre méthodologie s'appuie sur la combinaison de ces deux méthodologies pour le suivi des chemins préférentiels sur des pavés à joints larges. Quant à la compaction et à l'interaction entre l'infiltration et le toit de la nappe, seul le GPR est prévu d'être utilisé sur un dispositif expérimental.

Études *in-situ* : monitoring d'un système de pavés à joints larges

Le choix des fréquences et le paramétrage d'acquisition des radars a reposé sur des essais préliminaires. Les radars MALÅ (500 et 800 MHz) ont été sélectionnés pour un meilleur compromis entre profondeur d'investigation et résolution d'imagerie. Des acquisitions radar en time-lapse (statique) seront réalisées avant, pendant et après les événements pluvieux, ainsi qu'après plusieurs cycles de sécheresse afin de caractériser les chemins préférentiels. Des campagnes vont également être réalisées en infiltration contrôlée par infiltromètre automatique (développé par Concialdi et al., 2020) en simple et double anneau. Le site ainsi que le matériel utilisé sont visibles **Figure 1**. Enfin, un effet de compaction pourrait être observé par GPR au cours du suivi.



Figure 1 : Transect d'essai au GPR MALÅ 800 MHz sur l'un des parkings d'étude dans le quartier Lizé-Mâcon (a) et infiltromètre automatique développé par Concialdi et al., 2020 (b)

Études *ex-situ* : dispositif expérimental d'un parking de pavés à joints larges

Plusieurs tests en conditions maîtrisées auront lieu en laboratoire. Afin de mieux comprendre le comportement hydrodynamique des pavés à joints larges, deux dispositifs constitués de colonnes de sol avec et sans pavés ont été mis en place (**Figure 2**). Ces colonnes sont composées d'un tuyau en PVC rempli des horizons de sol 0 à 80 cm du site Lizé-Mâcon (excavation avant travaux).

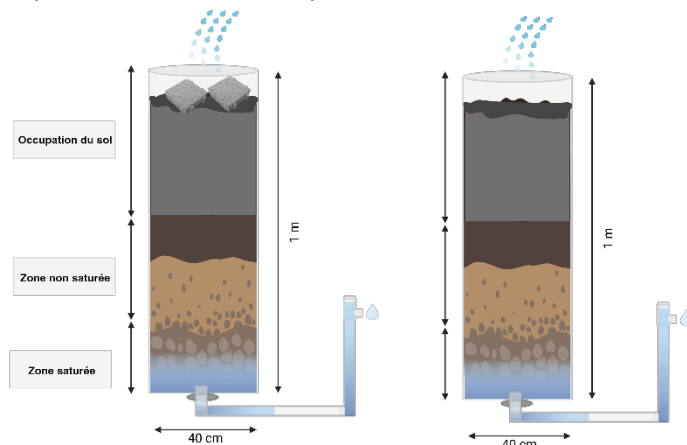


Figure 2 : Schéma des dispositifs de pavés à joints larges (a) et témoin (b) (par Alexandra CERONE)

Ce dispositif nous permettra de simuler les événements pluvieux, d'observer les chemins préférentiels au sein des pavés à joints larges et de pouvoir modifier la hauteur de nappe fictive. L'infiltration, et notamment la visualisation des chemins préférentiels, est prévue d'être suivie par un GPR haute fréquence posé à la surface de la colonne. Ces mesures seront complétées par l'utilisation de sondes TDR et de tensiomètres insérés dans la colonne. Le suivi du niveau piézométrique est réalisé par un système de réhausse, à trois hauteurs différentes au cours de l'expérimentation. Ce suivi permettra de contrôler l'état de saturation du sol, mimant ainsi les interactions entre l'infiltration en surface avec ou sans pavés et la nappe sous-jacente. Enfin, la compaction est reproduite dans la colonne par modification de la densité apparente pour reproduire la charge des véhicules. La compaction du sol modifiant la teneur en eau et la porosité du sol (Wang et al., 2016), elle joue un rôle majeur sur la vitesse de propagation des ondes du GPR. De ce fait, la compaction sera quantifiée par GPR haute fréquence au-dessus du dispositif.

CONCLUSION

Notre étude a pour but de décrire et quantifier les effets de trois facteurs influençant les performances hydrodynamiques des pavés à joints larges (chemins préférentiels, compaction et interactions avec la nappe) au moyen d'une approche conjointe *in situ* et *ex situ*. L'usage de méthodes d'inversions hydrogéophysiques par GPR, d'infiltromètres, ainsi que de sondes TDR et de pression permettra de mieux caractériser les processus d'infiltration et l'efficacité de ces systèmes. Actuellement, le choix et les paramètres d'acquisition des GPR sur site ont pu être déterminés.

BIBLIOGRAPHIE

- Butler, D.K. (Ed.), 2005. Near-Surface Geophysics. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801719>
- Cipolla, S.S., Maglionico, M., Stojkov, I., 2016. Experimental Infiltration Tests on Existing Permeable Pavement Surfaces. CLEAN – Soil Air Water 44, 89–95. <https://doi.org/10.1002/clen.201400550>
- Concialdi, P., Di Prima, S., Bhandari, H.M., Stewart, R.D., Abou Najm, M.R., Lal Gaur, M., Angulo-Jaramillo, R., Lassabatere, L., 2020. An open-source instrumentation package for intensive soil hydraulic characterization. J. Hydrol. 582, 124492. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124492>
- Di Prima, S., Winiarski, T., Angulo-Jaramillo, R., Stewart, R.D., Castellini, M., Abou Najm, M.R., Ventrella, D., Pirastru, M., Giadrossich, F., Capello, G., Biddoccu, M., Lassabatere, L., 2020. Detecting infiltrated water and preferential flow pathways through time-lapse ground-penetrating radar surveys. Sci. Total Environ. 726, 138511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138511>
- Klotzsche, A., Lärm, L., Vanderborght, J., Cai, G., Morandage, S., Zörner, M., Vereecken, H., Van Der Kruk, J., 2019. Monitoring Soil Water Content Using Time-Lapse Horizontal Borehole GPR Data at the Field-Plot Scale. Vadose Zone J. 18, 190044. <https://doi.org/10.2136/vzj2019.05.0044>
- Knight, R., 2001. Ground Penetrating Radar for Environmental Applications. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 29, 229–255. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.229>
- Kuruppu, U., Rahman, A., Rahman, M.A., 2019. Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion. Environ. Earth Sci. 78, 327. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8312-2>
- Moua, R., Lesparre, N., Girard, J.-F., Belfort, B., Lehmann, F., Younes, A., 2023. Coupled hydrogeophysical inversion of an artificial infiltration experiment monitored with ground-penetrating radar: synthetic demonstration. Hydrol. Earth Syst. Sci. 27, 4317–4334. <https://doi.org/10.5194/hess-27-4317-2023>
- Pachauri, R.K., Mayer, L., Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.), 2015. Climate change 2014: synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Robinson, M., Bristow, C., McKinley, J., Ruffell, A., 2013. Ground Penetrating Radar.
- Van Vuuren, J.H., Dippenaar, M.A., Van Biljon, R., Van Rooy, L., 2022. Seepage Through Permeable Interlocking Concrete Pavements and Their Subgrades Using a Large Infiltration Table Apparatus. Int. J. Pavement Res. Technol. 15, 44–62. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00010-8>
- Wang, P., Hu, Z., Zhao, Y., Li, X., 2016. Experimental study of soil compaction effects on GPR signals. J. Appl. Geophys. 126, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.01.019>
- Weiss, P.T., Kayhanian, M., Gulliver, J.S., Khazanovich, L., 2019. Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps. Int. J. Pavement Eng. 20, 143–162.