



HAL
open science

Quantification des impacts des revêtements perméables - Construction d'un modèle à base physique avec FlexPDE

Olivier Cortier, D H Nguyen, M Boutouil, O. Maquaire

► To cite this version:

Olivier Cortier, D H Nguyen, M Boutouil, O. Maquaire. Quantification des impacts des revêtements perméables - Construction d'un modèle à base physique avec FlexPDE. 7èmes Journées Doctorales Hydrologie Urbaine, Oct 2016, Nantes, France. hal-02189431

HAL Id: hal-02189431

<https://normandie-univ.hal.science/hal-02189431>

Submitted on 19 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Quantification des impacts des revêtements perméables – Construction d'un modèle à base physique avec FlexPDE

O. Cortier^{1,2,*}, D.H. Nguyen¹, M. Boutouil¹, O. Maquaire²

¹ ESITC Caen - 1 rue Pierre et Marie Curie, 14610, Épron, France

² Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, LETG - Campus 1, Bâtiment A, Esplanade de la Paix, 14032 Caen Cedex 5, France

*Email : olivier.cortier@esitc-caen.fr

RESUME

Les revêtements perméables se développent en France et à l'étranger comme une technique d'avenir en réponse aux enjeux de la protection des sols et de l'amélioration du cycle de l'eau en milieu urbain. Le développement de pavés drainants au sein du laboratoire de l'ESITC Caen a mis en évidence le besoin de quantifier les apports des revêtements perméables pour répondre aux attentes des acteurs locaux et favoriser l'utilisation de ces techniques par les aménageurs.

Ce travail de recherche vise à quantifier leurs performances hydrologiques tant à l'échelle de la structure que d'un bassin versant urbain. Dans ce but un modèle physique a été construit en utilisant le logiciel FlexPDE. Ce modèle sera calé et validé en utilisant les résultats du projet de recherche VECOPEXP qui assure le suivi in situ du fonctionnement hydraulique de plusieurs places de parkings perméables.

Les résultats de ce travail de modélisation, à l'échelle de quelques places de parking, permettent de quantifier les différents aspects du bilan hydrologique des structures perméables ; infiltration, stockage, évaporation, ruissellement et drainage vers le réseau. Le modèle sera également utilisé pour quantifier l'impact des différentes caractéristiques des structures à revêtement perméable sur leurs performances. Les résultats obtenus serviront ensuite de données d'entrée à une approche spatialisée au niveau d'un bassin versant.

MOTS CLES

Béton drainant ; Eaux pluviales ; In situ ; Modélisation ; Structure perméable

INTRODUCTION

Contexte

L'urbanisation entraîne une augmentation de l'imperméabilisation des sols naturels et la perturbation du cycle hydrologique de l'eau en réduisant les capacités d'infiltration des sols et en augmentant le ruissellement. Elle participe, entre autre, à des inondations plus fréquentes, à des surcharges épisodiques des réseaux et à la pollution des milieux récepteurs par lessivage en temps de pluie, Zhou (2014).

La protection des sols et de leurs fonctionnalités ainsi que l'amélioration de la gestion des eaux de pluie sont des enjeux pour l'aménagement urbain, CERTU (2003). Les revêtements perméables sont une des solutions à ces problématiques et suscitent un intérêt certain en France comme à l'international, Tennis et al. (2004). Un intérêt qui invite à apporter des réponses concrètes et quantifiées quant aux bénéfices et aux limites des revêtements perméables, pour combattre les idées reçues sur l'infiltration, Chocat (2015), et favoriser leur utilisation par les aménageurs.

En réponse à ces enjeux, un programme de recherche a été initié au sein du laboratoire de l'ESITC Caen et du laboratoire LETG Caen, il a pour objectif de quantifier les impacts et les bénéfices des revêtements perméables sur les enjeux liés à l'urbanisation. Ce programme de recherche se situe dans la continuité du projet VECOP, Boutouil et Nguyen (2014) et en parallèle avec le projet VECOPEXP, qui a pour but de suivre in situ des pavés perméables sur plusieurs chantiers expérimentaux.

La conception de la structure et des revêtements perméables s'est appuyée sur le récent guide émis par le CERIB, Faleyieux (2015) ainsi que sur les ouvrages du CIMBéton sur les revêtements et structures réservoirs (Abdo, 2007) et du CERTU sur les chaussées poreuses urbaines CERTU (1999).

La compréhension des processus hydrologiques au sein des revêtements perméables s'est quant à elle appuyée sur de nombreux articles et ouvrages comme celui de Illgen et al. (2007). Par ailleurs, la compréhension des processus physiques gouvernant les écoulements en milieux poreux dans le but de construire le modèle mathématique utilisé dans FlexPDE est notamment basée sur les ouvrages de Marsily (1981), Soutter et al. (2007) et sur la thèse de Dakhlaoui (1996).

Enfin, concernant la compréhension du logiciel FlexPDE et son utilisation pour la modélisation des écoulements dans les structures perméables il faut souligner ici l'apport de la thèse de Liu (2005).

Problématique et questions scientifiques associées

Les questionnements centraux du programme de recherche se construisent autour de l'objectif de quantification des bénéfices potentiels de ces techniques. En effet, si ces techniques sont bien connues des scientifiques, elles restent peu utilisées par les aménageurs et les collectivités qui doivent prendre en compte dans leur gestion l'héritage du patrimoine actuel, Carré & Deutsch (2015). Pour favoriser l'utilisation de cette technique de contrôle à la source, apporter des réponses quantifiées aux décideurs est un enjeu important, notamment dans le contexte du renouvellement urbain.

Les techniques de contrôle à la source présentent beaucoup d'intérêt mais leur généralisation faite sans considérer l'échelle urbaine peut présenter des effets d'échelle négatifs. C'est ce que présente Petrucci (2012) dans sa thèse en soulignant les limites d'une régulation des débits et en préconisant au contraire une approche par volume. Cette thèse appelle à une approche intégrée de l'eau en ville que ce travail souhaite privilégier.

Objectifs scientifiques

Pour apporter des réponses quantifiées, ce travail de recherche s'organise entre différentes échelles d'étude (Figure 1). La première étape vise à quantifier les processus hydrologiques au sein des structures perméables à l'échelle de quelques places de parking. L'étude portera notamment sur la répartition entre infiltration, évaporation et stockage en fonction des paramètres de conception et des propriétés du site. Dans la seconde étape, il s'agira de quantifier certains des bénéfices des structures perméables sur la gestion des eaux pluviales au niveau d'un bassin versant urbain, à l'échelle d'un quartier. L'accent sera alors mis sur la limitation du ruissellement et la lutte contre le risque d'inondation. Cette démarche sera enfin appliquée à un cas d'étude en Normandie pour confronter les bénéfices mis en évidence à des situations réelles.

Les travaux présentés ici concernent la première étape, la modélisation verticale du comportement hydrogéologique des revêtements perméables. Elle a pour objectif de proposer une simulation fidèle du fonctionnement de ces ouvrages et d'étudier l'influence de leur conception et du contexte local sur leurs performances.

Les résultats de cette première étape, qui se base sur une approche physique, seront synthétisés pour servir de données d'entrée pour la modélisation hydrologique à l'échelle d'un quartier. Cette dernière s'appuiera sur une base SIG avec un module pour simuler les processus hydrologiques (avec une approche conceptuelle). Ce travail de capitalisation entre les étapes 1 et 2 sera un élément clef pour la suite de la thèse. Le couplage entre les deux échelles se fera par un processus itératif, les caractéristiques locales des cas d'études pouvant servir de données d'entrée pour ajuster les résultats de l'étape 1 aux cas étudiés avant de les modéliser spatialement avec le modèle utilisé à l'étape 2.

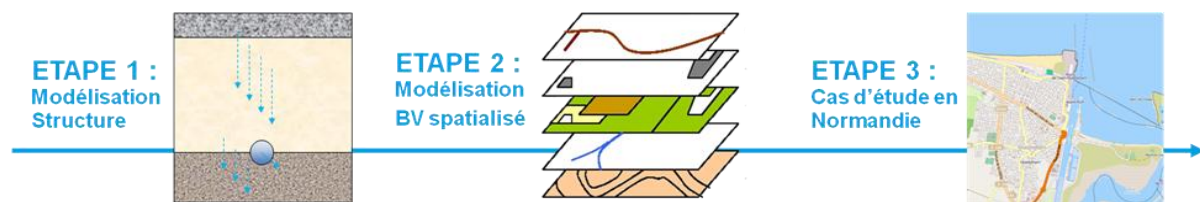


Figure 1 - Démarche scientifique

METHODOLOGIE

Afin d'évaluer l'influence des caractéristiques de la structure sur son fonctionnement, le choix a été fait de construire la modélisation à partir d'un modèle à base physique permettant de prendre en compte les connaissances des mécanismes hydrologiques, Cosandey and Robinson (2000), ainsi que leur formulation mathématique, Marsily (1981).

Au départ, FlexPDE a été utilisé dans une démarche d'autoformation avec comme finalité de comprendre les équations qui régissent la modélisation des écoulements en milieux poreux. Son utilisation a été confirmée par la suite au regard de la simplicité et de la souplesse d'utilisation de ce logiciel ainsi que des résultats intéressants qu'il permet d'obtenir.

FlexPDE est un logiciel de résolution d'équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis. Il se compose d'un espace de rédaction où l'utilisateur écrit le modèle à résoudre et d'un espace de résultats où les sorties demandées par l'utilisateur sont affichées par FlexPDE. Il s'agit donc seulement d'un outil de résolution numérique et c'est à l'utilisateur de décrire le contexte qu'il souhaite modéliser.

La base mathématique du modèle qui a été rédigé est l'équation de conservation de la masse (1) en deux dimensions. Les termes U_x et U_y représentent les composantes de la vitesse et θ la teneur en eau.

L'égalité (2) est obtenue par dérivation successive ce qui permet, en substituant l'égalité (2) dans l'équation (1) d'obtenir l'équation de continuité (3) avec H qui représente la charge hydraulique, γ_w le poids volumique de l'eau et $m_w = d\theta/du_w$ avec u_w la pression de l'eau.

En combinant l'équation (3) avec la loi de Darcy (4), où K représente la conductivité hydraulique, l'équation de Richards (5) est obtenue avec H et K qui sont fonction de θ . C'est cette équation qui est écrite dans le modèle et résolue par FlexPDE.

La courbe caractéristique d'humidité est décrite en utilisant l'équation de Fledlund et King (6), m_w étant alors obtenue par dérivation, avec ψ qui représente la succion dans la structure, h_r , a , n et m étant des paramètres à caler en fonction des matériaux utilisés.

Enfin, la relation entre K et θ est décrite par l'équation de Leong et Rahardjo (7), p étant un paramètre à caler pour chaque matériau.

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} = -\frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = m_w \cdot \gamma_w \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} = -m_w \cdot \gamma_w \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{U} = -K \cdot \vec{grad}(H) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \cdot \frac{\partial U_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \cdot \frac{\partial U_y}{\partial y}) = m_w \cdot \gamma_w \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

$$\theta = \theta_s \cdot 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\Psi}{h_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{h_r})} \cdot \frac{1}{\ln(e + (\frac{\Psi}{a})^n)^m} \quad (6)$$

$$K = K_s \cdot \left(\frac{1}{\ln(e + (\frac{\Psi}{a})^n)^m}\right)^p \quad (7)$$

Concernant la géométrie, dans un premier temps une approche 2D est utilisée avec une vue en coupe d'une tranche de place de parking et du sol naturel sous jacent (1 m de large sur 1,1 m de profondeur). Trois situations ont été décrites pour le moment, une évacuation de l'eau par infiltration dans le sol seulement, par drainage via un drain seulement ou par combinaison des deux. Les propriétés des matériaux et du sol sont celles du site expérimental de l'ESITC Caen.

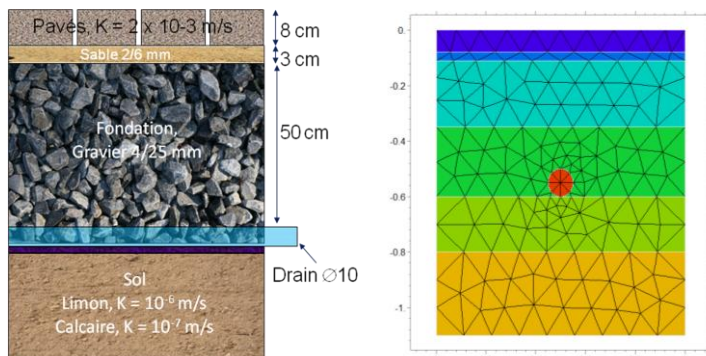


Figure 2 - Vue en coupe d'une place de parking du site de l'ESITC et vue de sa représentation dans le logiciel FlexPDE (unité en mètre sur le maillage de FlexPDE)

Les conditions aux limites utilisées sont les suivantes (*Flux = condition de Neumann*) :

- A la surface :
 $Flux = 'Pluie'$ si ' $Pluie < K$ ', sinon K .
- Au niveau du drain :
 $Flux = V = C_{ds} \cdot \sqrt{2} \cdot u_w$, si $u_w > 0$
 $= V = C_{dcr} \cdot \sqrt{2} \cdot u_w$, si $0 > u_w > u_{cr}$
 $= 0$ sinon.

Avec : θ_{cr} la capacité de rétention.

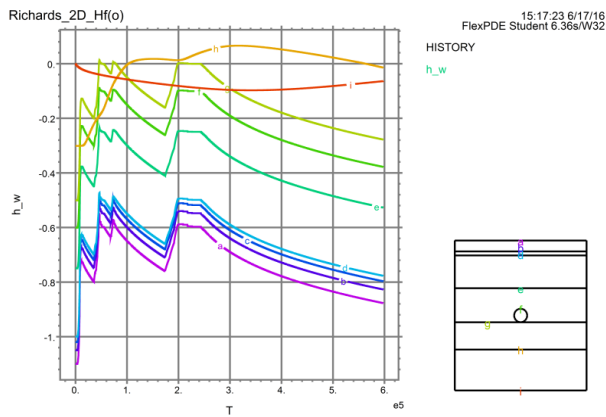
u_{cr} = pression de l'eau pour $\theta = \theta_{cr}$
 C_{ds} et C_{dcr} des coefficients à caler.

- Au fond de la structure (dans le sol) :
 $Flux = -K$

Le modèle sera calé et validé en comparant les résultats des simulations aux valeurs de débit entrant et sortant et de hauteur d'eau dans un ouvrage observées in situ. Cet ouvrage comprend quatre places de parking en pavés de béton poreux, instrumentés avec une acquisition continue des données météorologiques, du débit sortant de l'ouvrage et de la hauteur d'eau dans la structure.

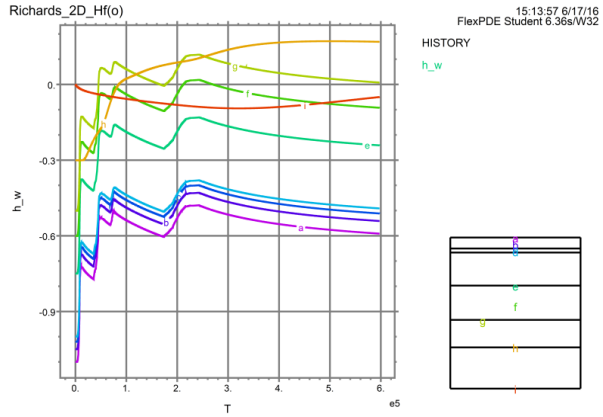
PREMIERS RESULTATS

Dans l'attente du calage du modèle, il est simplement possible de comparer les résultats des simulations pour différentes configurations. Ainsi, les graphiques, Figure 3 et Figure 4 donnent l'évolution de la pression de l'eau (exprimée en mètre) en fonction du temps pour une série de quatre pluies en entrée. Les situations avec ou sans drain peuvent ainsi être comparées. Les pluies sont construites avec la méthode de Montana, avec respectivement une durée de 10 min, 50 min, 5h et 48h et une période de retour 50 ans. Ces deux figures donnent un aperçu des résultats pouvant être obtenus avec FlexPDE. Les différentes courbes représentent l'évolution de la pression à différentes profondeurs dans la structure.



Continuité 2D Hf(o) 3.3: Cycle=10169 Time= 5.9760e+5 dt= 53.353 P2 Nodes=638 Cells=297 RMS Err= 1.1e-5

Figure 3 – Evolution de la pression de l'eau (m) dans le temps à différentes profondeurs - structure avec drain



Continuité_2D_Hf(o)_2.91: Cycle=10182 Time= 5.9760e+5 dt= 56.074 P2 Nodes=534 Cells=245 RMS Err= 4.4e-6

Figure 4 - Evolution de la pression de l'eau (m) dans le temps à différentes profondeurs - structure sans drain

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail de recherche, inscrit dans le cadre d'une thèse à l'ESITC Caen et au laboratoire LETG Caen, doit permettre de quantifier les apports des structures perméables pour apporter des éléments de connaissance et de réponse tant sur le plan scientifique que vis à vis des décideurs locaux. Il bénéficie de la collaboration étroite avec un projet de suivi in situ de parkings perméables équipés de pavés en béton drainant. Le travail a constitué jusqu'à présent à l'élaboration du modèle. Dans sa version actuelle il permet de quantifier le volume stocké, infiltré et drainé. La suite du travail de modélisation devra permettre de quantifier également le volume d'eau évaporée et le ruissellement de surface avec le passage à un modèle 3D. Les premiers résultats du suivi in situ permettront très prochainement le calage et la validation du modèle. Une fois éprouvée cette modélisation pourra être utilisée pour évaluer l'influence des caractéristiques du milieu ou des différents paramètres de la structure sur ces performances.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdo, J., 2007. Voiries et aménagements urbains en béton - Revêtements et structures réservoirs, CIMBéton. ed, Collection Technique CIMBéton. CIMBéton, La Défence, France.
- Boutouil, M., Nguyen, D.H., 2014. Rapport technique final du rapport VECOP - Valorisation dE COProduits coquilliers marins en ECO-Pavé drainant. ESITC Caen, Caen.
- CERTU, 2003. La ville et son assainissement principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (France).
- CERTU, 1999. Chaussées poreuses urbaines. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, France.
- Chocat, B., 2015. Faut-il infiltrer les eaux pluviales en ville, Méli Mélo. Graie.
- Cosandey, C., Robinson, M., 2000. Hydrologie continentale. A. Colin, Paris.
- Dakhlouï, M., 1996. Fonctionnement hydraulique des structures réservoirs pour l'assainissement pluvial : étude des dispositifs de diffusion d'eau et modélisation du couple drain-milieu poreux. Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Faleyieux, J., 2015. Elements modulaires en beton pour revêtement des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales : référentiel technique. CERIB, Epernon, France.
- Illgen, M., Harting, K., Schmitt, T.G., Welker, A., 2007. Runoff and Infiltration characteristics of permeable pavements - Review of an intensive monitoring program. Presented at the Novatech, p. 8.
- Liu, Y., 2005. Three dimensional finite element modeling of pavement subsurface drainage systems. University of Kentucky.
- Marsily (de), G., 1981. Hydrogéologie quantitative. Masson, Paris.
- Petrucci, G., 2012. La diffusion du contrôle à la source des eaux pluviales urbaines : confrontation des pratiques à la rationalité hydrologique. Paris Est.
- Soutter, M., Mermoud, A., Musy, A., 2007. Ingénierie des eaux et du sol: processus et aménagements, Science & technologie de l'environnement. Presses Polytechniques et Univ. Romandes, Lausanne.
- Tennis, P.D., Leming, M.L., Akers, D.J., 2004. Pervious concrete pavements. Portland Cement Association and National Ready Mixed Concrete Association, Skokie, Illinois.
- Zhou, Q., 2014. A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. Water 6, 976-992. doi:10.3390/w6040976