

Développement d'un infiltromètre pour mesurer les infiltrations d'eau à la surface des chaussées

Laetitia LETELLIER

Laboratoire central des Ponts et Chaussées,
Bouguenais, France

Emmanuel BERTHIER

CETE Île-de-France, Trappes, France

Nadège DARBOUX

Direction régionale de l'Environnement,
de l'Aménagement, et du Logement
de Bretagne, Rennes, France

■ RÉSUMÉ

La problématique de l'infiltration à la surface des chaussées est au cœur de différentes recherches menées par le LCPC pour la sécurité routière, la conception et la durabilité des infrastructures, la maîtrise de la pollution des eaux et des sols. Un prototype permettant une mesure simple, non destructive, et rigoureuse de l'infiltration à la surface des chaussées est présenté dans le cadre de cet article. Le principe retenu est celui du double anneau avec une mesure en continu et le maintien en surface d'une charge d'eau constante et faible. Les premiers résultats obtenus sont encourageants : le dispositif donne satisfaction, et les mesures sont affectées par des incertitudes acceptables en rapport à l'objectif poursuivi. Les infiltrations mesurées sur un transect de voirie peu circulée montrent une grande variabilité spatiale et temporelle, et s'avèrent non négligeables dans tous les cas : entre 10^{-6} et 10^{-7} m/s, soit équivalentes à celles observées dans un sol de type limon.

Development of an infiltrometer for measuring water infiltration at the pavement surface

■ ABSTRACT

The concern over water infiltration at the pavement surface lies at the core of various research projects conducted by LCPC, specifically targeting the topics of: road safety, infrastructure design and durability, and control of water pollution and soil. A prototype device, which offers a simple, non-destructive and rigorous measurement of pavement surface infiltration, is presented in this article. The device's underlying principle features a double ring with continuous measurement that is able to maintain a constant and low water charge at the surface.

The initial results obtained are most promising: device performance satisfies expectations; moreover, the measurements contain uncertainties that remain within an acceptable range with respect to the intended objective. Infiltration levels measured over a transect of lightly-travelled street surface indicate considerable spatial and temporal variability, which in all cases proves to be significant: between 10^{-6} and 10^{-7} m/s, i.e. equivalent to what can be observed in a silty soil.

* AUTEUR À CONTACTER :

Emmanuel BERTHIER

emmanuel.berthier@developpement-
durable.gouv.fr

INTRODUCTION

Le cycle de l'eau autour des infrastructures routières intéresse différents enjeux sur lesquels des recherches sont menées par le LCPC :

- la sécurité routière : les conditions hydriques dans l'air et à la surface des infrastructures sont à l'origine de pertes de visibilité de la part des usagers et des pertes d'adhérence des véhicules ;
- la conception et la durabilité des infrastructures : l'eau est un facteur de dégradation des structures de chaussées, et on a toujours intérêt à minimiser sa présence (sauf pour les chaussées réservoir) ;

– la maîtrise de la pollution des eaux et des sols : l'eau qui ruisselle à la surface est potentiellement un vecteur de la pollution préalablement présente dans l'atmosphère ou en surface de chaussée. L'eau qui s'infiltré dans la structure de la chaussée peut être source de lixiviation de matériaux (matériaux recyclés alternatifs) et entraîner des impuretés et contaminants dans les eaux souterraines.

Les études et recherches menées sur ces sujets nécessitent donc des informations sur le cycle de l'eau ; informations différentes en fonction de l'enjeu : caractéristiques de la pluie et état de surface pour la sécurité routière (tenant compte des infiltrations d'eau bénéfiques dans ce cas), flux et teneur en eau dans la structure pour la durabilité des infrastructures, flux d'eau ruisselé et infiltré pour les enjeux environnementaux.

D'un point de vu physique, le cycle de l'eau est un tout et les grandeurs qui interviennent (état et flux) interagissent entre elles. Une étape importante de ce cycle de l'eau est le bilan hydrique à la surface de l'infrastructure, qui peut s'écrire simplement de la façon suivante (sur un volume élémentaire situé en sub-surface de chaussée et pendant un pas de temps Δt) :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P - E - I - R$$

où ΔV est la variation du volume d'eau dans l'élément pendant le pas de temps Δt , P est le débit de pluie, E est le débit d'évaporation qui repart dans l'atmosphère, I est le débit d'infiltration qui pénètre dans la structure et R est le débit de ruissellement qui s'écoule aux limites du volume élémentaire.

Un terme clé de ce bilan est le flux d'infiltration, terme qui intéresse directement les enjeux de durabilité des structures et de transfert de pollution dans le cas d'utilisation de matériaux recyclés. La couche de surfaces des chaussées est conçue pour limiter, voire annuler l'infiltration (sauf dans le cas de couche volontairement drainante, situation qui n'est pas considérée dans cet article). Cet objectif recherché « d'imperméabilisation » de la couche de surface n'est malheureusement jamais atteint et il existe bien des chemins d'écoulements de l'eau de la surface vers la structure : i) les revêtements de surface sont poreux, et des connexions entre pores de la surface jusqu'à la couche sous-jacente peuvent exister ; ii) il existe de nombreuses hétérogénéités à la surface des chaussées, particulièrement en milieu urbain, comme des joints, des fissures, des liaisons entre couche de surface et bordures, des réfections plus ou moins localisées, etc., qui sont autant de lieux préférentiels d'infiltration.

L'objectif de cet article est de contribuer à une meilleure connaissance de l'infiltration dans les chaussées, en développant un infiltromètre utilisable in situ sur des chaussées existantes et capable de mesurer la gamme de valeurs attendues. Cet article résume d'abord l'état des connaissances sur le sujet, dans un deuxième temps le prototype développé est présenté, et enfin les premiers résultats obtenus sont détaillés.

ÉTAT DES PRATIQUES ET DES CONNAISSANCES

■ Connaissances actuelles sur l'infiltration dans les chaussées

La prise de conscience que les couches de surface des chaussées ne sont pas imperméables n'est pas nouvelle. Principalement pour des enjeux de durabilité des structures, des études et recherches sur les infiltrations dans les structures ont été menées (le projet européen Water Mov auquel a participé le Laboratoire central des Ponts et Chaussées comprend une large revue bibliographique [1]).

Les observations in situ d'infiltration dans les structures sont relativement difficiles : la complexité de la structure des chaussées rend compliquée l'installation d'une métrologie de suivi des flux et le peu de mesures effectuées se heurtent à des difficultés d'interprétation (du fait entre autre d'une forte hétérogénéité des écoulements par rapport au volume de mesure représentatif qui est limité).

On peut citer les études et résultats suivants qui sont assez illustratifs des connaissances mais aussi des incertitudes existantes :

- des mesures de teneur en eau ont été testées dans des structures en place sur de longues périodes (de l'ordre de l'année) [2, 3] : des variations de teneur en eau pendant les événements pluvieux ont été mises en évidence. Les auteurs ont essayé d'en déduire des flux d'infiltration : pour Raimbault *et al.*, le flux moyen est de l'ordre de $1 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, avec en bilan une infiltration estimée à 25 % à 30 % de la pluie annuelle ; pour Ragab *et al.*, l'infiltration est estimée entre 5 % à 10 % de la pluie ;
- des mesures globales et indirectes d'infiltration de surface ont été menées par Hollis *et al.* [4] sur des tronçons de voirie urbaine en les irriguant artificiellement et en mesurant la part qui ruisselle à l'exutoire. Les flux estimés s'avèrent très importants, avec un rôle important des infiltrations au niveau des caniveaux (estimées indépendamment) ; les valeurs d'infiltration obtenues en fin d'irrigation sont de l'ordre de $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- des mesures globales directes d'infiltration ont aussi été effectuées en insérant une géomembrane imperméable dans la structure de chaussée et en mesurant les eaux récoltées par la géomembrane [5].

Il existe des explications physiques à la variabilité de ces résultats. La première est la nature et l'état de la structure de chaussée et surtout de sa couche de surface. La seconde est le régime pluviométrique et en particulier la durée des précipitations. Plusieurs paramètres peuvent influencer la capacité d'infiltration d'une couche de surface. Son état et l'importance des infiltrations préférentielles au niveau des hétérogénéités sont un premier paramètre. Le second est la perméabilité intrinsèque du matériau, qui a fait l'objet de quelques études dans la littérature, en particulier pour les bétons bitumineux (BB). La porosité volumique des BB varie entre 5 à 8 % une fois en place, l'espace poreux étant constitué principalement de macro-pores de dimension typique du 10^{e} de mm [6]. Les tests pour mesurer la perméabilité des BB sont réalisés dans des conditions et avec des protocoles différents d'une étude à l'autre : certaines sont menées en laboratoire sur des échantillons [6-7] et d'autres in-situ sur des chaussées existantes [8]. Les valeurs de perméabilité obtenues sont variables, parfois contradictoires [6], et très difficiles à interpréter.

Cooley [8] a fait sur des BB une série de mesures de perméabilité in-situ et de densité en laboratoire. Il montre que la perméabilité varie avec la porosité du matériau, d'une façon exponentielle, mais aussi avec la distribution des granulats et en particulier leur taille maximale : l'explication donnée est, qu'à porosité égale, plus la taille des granulats augmente plus la taille des pores est importante et plus l'interconnexion de ces pores est élevée. Les valeurs trouvées pour une porosité de 5 % sont de l'ordre de 10^{-7} m/s .

■ Infiltromètres existants

Des protocoles et des matériels ont été développés pour mesurer in-situ l'infiltration dans les chaussées. Sans être exhaustif et pour illustration, il est possible de présenter 3 types de moyen de mesure existants, en partant du plus rustique au plus développé (cf. [figure 1](#)) :

- le California Test n° 341 [9] : développée par le « Department of Transportation » de Californie, la méthode a pour but d'estimer la perméabilité de la couche de surface ou d'un joint d'étanchéité. Le matériel et le protocole de mesure sont élémentaires. On maintient sur une surface délimitée par un « boudin » de graisse une lame d'eau entre 1 et 2 mm pendant 2 min. La « perméabilité » est calculée en divisant par deux la quantité d'eau qui a été nécessaire au maintien de cette consigne ;
- l'infiltromètre FP3 du National Center for Asphalt Technology de l'université d'Auburn (Alabama, États-Unis) [10] : il est constitué de la superposition de 4 cylindres dont les diamètres vont de 166 mm (à la base) à 24,3 mm (en haut), la réduction des diamètres permettant de choisir selon l'infiltration observée 4 niveaux de lecture. Le protocole de mesure est simple : l'infiltromètre est posé de façon étanche sur la couche de surface (joint silicone écrasé avec l'addition d'une

charge déposée sur l'infiltromètre), la couche de surface étudiée est saturée (l'eau contenue dans le 2^e cylindre inférieur s'infiltré en plus de 1 min) et la mesure du flux infiltré est ensuite effectuée en chronométrant le temps Δt nécessaire à la diminution de hauteur d'eau dans un même cylindre entre 2 hauteurs prédéterminées. Une valeur de « perméabilité » est ensuite déduite de la façon suivante :

$$K = \left(\frac{s \cdot e}{S \cdot \Delta t} \right) \cdot \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (1)$$

où S est la section du cylindre du bas, s la section du cylindre de mesure, e l'épaisseur de la couche de surface, et h_1 et h_2 respectivement les hauteurs d'eau initiale et finale dans le cylindre de mesure ;

– le Worcester Polytechnic Institute (WPI) à l'University of Massachusetts (Dartmouth, États-Unis) [11], a développé un prototype d'infiltromètre qui peut fonctionner en laboratoire (sur une carotte de matériau) ou sur le terrain. Sur le terrain, il est possible de faire des tests non destructifs (mesure de l'infiltration à partir d'un anneau posé en surface) ou à partir d'un carottage dans la structure. Le prototype intègre un réservoir d'eau, un compresseur et une mesure en continu de l'eau injectée dans l'anneau. Les tests se font sous une pression donnée et le suivi de l'eau injectée permet une simple estimation d'une « perméabilité » :

$$K = \frac{V_{\text{eau}}}{(S \cdot \Delta t)}$$

où V_{eau} est le volume d'eau injecté (donc infiltré) pendant la durée Δt et S est la section de l'anneau posé à la surface.



figure 1

Illustrations de matériels et protocoles existants pour mesurer l'infiltration à la surfaces des chaussées (de gauche à droite) : California Test 341 [9], l'infiltromètre FP3 de l'Université d'Auburn [10], et l'infiltromètre du Worcester Polytechnic Institute à Dartmouth [11].

DÉVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE

■ Cahier des charges

Au vu des objectifs de l'étude, de la bibliographie effectuée, de nos connaissances sur l'infiltration dans les chaussées et les écoulements en milieu poreux, et après quelques premiers essais à partir de dispositifs élémentaires ressemblant à l'infiltromètre FP3, un cahier des charges a été établi pour décrire les fonctions du futur appareil.

Notre infiltromètre doit permettre une mesure non-destructive et in-situ de l'infiltration en surface de chaussées existantes. Sa mise en œuvre doit être le plus simple possible, avec une gamme de mesure de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-8} m·s⁻¹.

Une attention particulière doit être portée à l'étanchéité du contact infiltromètre – surface de chaussée, surtout en vue des faibles quantités d'eau que l'on souhaite suivre.

La mesure doit être automatisée, les premiers essais ayant montré que la mesure manuelle est fastidieuse (temps de mesure variant de quelques secondes à plusieurs heures) et imprécise. Il est aussi apparu une variation temporelle de l'infiltration en cours de test qui sera mieux suivie, par une mesure en continu.

Un paramètre important, cité dans la littérature, est la pression d'eau imposée à la surface (on parlera dans la suite de « charge » d'eau, exprimée en hauteur d'eau équivalente). Dans les conditions réelles par temps de pluie, la charge d'eau à l'origine de l'infiltration est très réduite, quelques mm voire quelques cm aux endroits d'accumulation (caniveau, flaque...). Pour notre mesure, on souhaite se rapprocher de ces conditions réelles et travailler à charge constante faible tout au long d'un test.

En conditions réelles, c'est toute la surface de la chaussée qui est couverte par une charge d'eau. Or le principe des infiltromètres in-situ est de mesurer sur une superficie réduite, la surface adjacente n'étant généralement pas humidifiée. Dans ce cas, des infiltrations horizontales et même des résurgences apparaissent entre la superficie testée en charge et la superficie adjacente, entraînant une surestimation de la capacité d'infiltration par rapport aux conditions réelles. Le futur dispositif doit permettre de minimiser cet effet.

La viscosité de l'eau est dépendante de la température [12] et la perméabilité d'un matériau par rapport à un fluide est directement proportionnelle à la viscosité du fluide (la viscosité de l'eau est de 1,6, 1 et $0,6 \cdot 10^{-3}$ Pa·s pour respectivement des températures de 5, 20 et 40°C, gamme que l'on peut rencontrer à la surface d'une chaussée). Même si les incertitudes de mesure sont par ailleurs très importantes, on corrigera les mesures effectuées en les ramenant toutes à 20°C.

Enfin tout au long de cette phase de définition du cahier des charges, on s'est interrogé sur le lien entre l'infiltration que l'on mesurait et des caractéristiques intrinsèques de la couche de surface de la chaussée. Il y a une certaine confusion dans la littérature sur le terme de « perméabilité » qui est supposé être une caractéristique du matériau : il est parfois considéré comme égal au flux infiltré (alors que les charges de test sont variables), il est parfois calculé en faisant une série d'hypothèses non vérifiées sur les conditions d'écoulements et sur les lois suivies par ces écoulements (c'est le cas de l'équation (1) par exemple), etc. Dans notre travail, nous serons très prudents sur l'interprétation des infiltrations mesurées et nous parlerons simplement « d'infiltration » ou de « capacité d'infiltration », valeurs que l'on sait variables dans le temps et dans l'espace et qui ne caractérisent pas uniquement le matériau de surface.

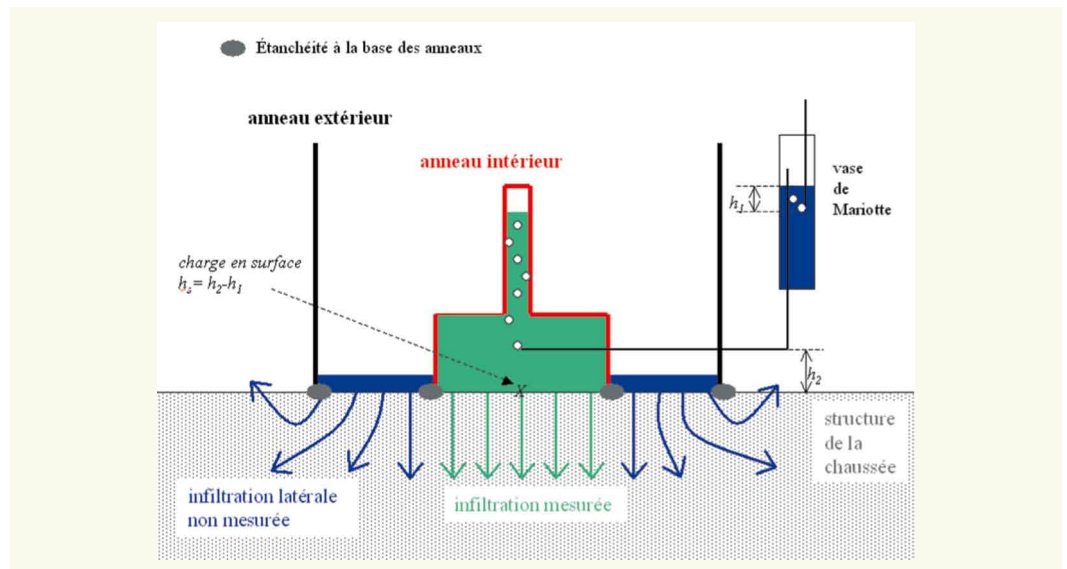
■ Principes du dispositif

On s'est intéressé à l'infiltromètre type « double anneau fermé » utilisé dans les domaines géotechnique et hydrologie [13], en se limitant à l'application de charges positives (cas d'une hauteur d'eau en surface). Le principe a été adapté pour respecter notre cahier des charges et se présente comme suit (figure 2) :

- l'infiltromètre comprend 2 anneaux : un petit anneau (diamètre = 290 mm) posé à l'intérieur d'un plus grand (diamètre = 475 mm). La charge d'eau imposée est équivalente dans les 2 anneaux, les infiltrations latérales et les résurgences apparaissent uniquement dans l'anneau extérieur, et la mesure d'infiltration est effectuée dans l'anneau intérieur ;
- l'anneau intérieur à une section réduite dans sa partie supérieure (diamètre intérieur = 26 mm) où la mesure est effectuée. Un tube de Mariotte [14] connecté à la base de l'anneau intérieur permet de contrôler et de maintenir une charge d'eau constante sur la superficie de mesure ;
- l'étanchéité à la base des anneaux est assurée par un mastic en élastomère posé sur une couche de peinture bitumineuse préalablement déposée à la surface de la chaussée (la peinture permet d'aplanir en partie les espaces entre les granulats de surface).

figure 2

Schéma de principe du prototype d'infiltromètre développé (a) et photo d'ensemble du dispositif (b) (la charge $h_s = h_2 - h_1$ imposée en surface est constante en régime permanent).



a
b

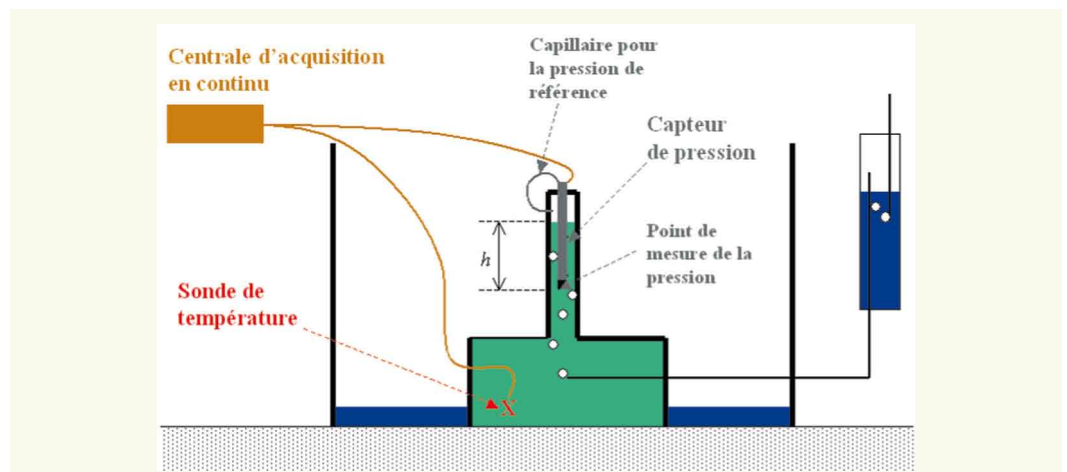
■ Acquisition et traitement des mesures

Avec un tel principe, la métrologie est limitée à 2 simples capteurs très utilisés dans le domaine de la mesure physique (figure 3). Un capteur de température est placé dans l'anneau intérieur, à proximité de la surface. La mesure du volume infiltré au cours du temps est réalisée dans la section réduite de l'anneau intérieur en suivant la diminution de la hauteur d'eau dans le tube. Le principe de mesure du capteur piézométrique utilisé est le suivant (on supposera l'eau incompressible) :

– le capteur est constitué d'une membrane déformable reliée d'un côté à une pression de référence à l'aide d'un capillaire (généralement la pression atmosphérique) et de l'autre côté à la pression

figure 3

Métrologie associée au prototype d'infiltromètre développé.



que l'on souhaite mesurer. La différence de pression entre les deux côtés de la membrane entraîne une déformation de celle-ci, déformation suivie par un module de pression et traduit en un signal électrique ;

– comme on recherche les variations de hauteur d'eau h dans le tube, la pression de référence doit être prise dans l'air au-dessus de h , cet air étant à une pression variable en cours de test et inférieure à la pression atmosphérique du fait du maintien de la charge constante (cf. [figure 3](#)).

Les deux capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition en continu, avec un pas de temps d'acquisition fixé à 10 s.

■ Mode opératoire, traitement des données et grandeurs obtenues

Le mode opératoire du prototype développé est simple :

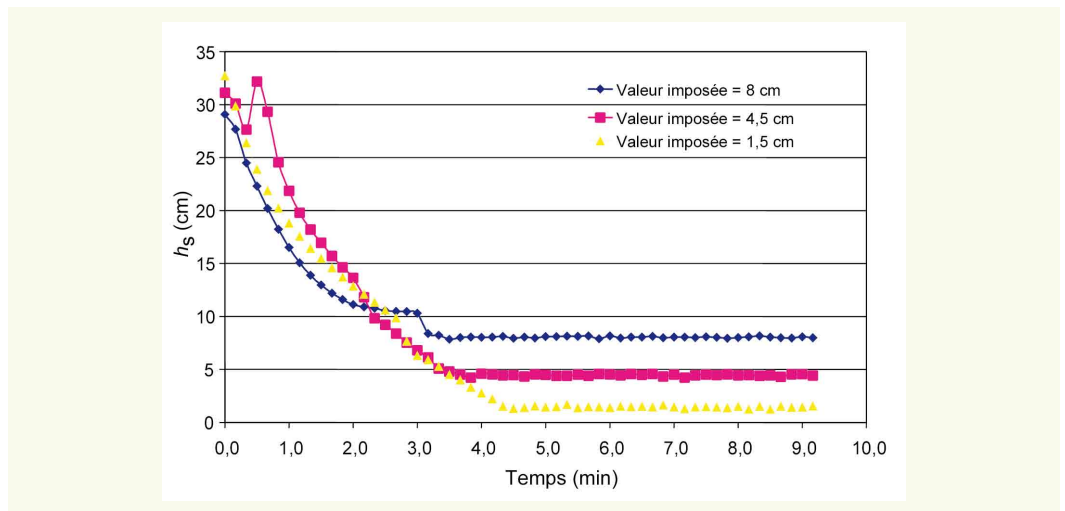
- ❶ balayer soigneusement la zone de test, déposer la peinture bitumineuse et laisser sécher (environ 4 heures) ;
- ❷ appliquer l'infiltromètre sur la zone de test, en ayant préalablement appliqué le mastic sur les 2 anneaux ;
- ❸ mettre en eau l'anneau extérieur avec la charge souhaitée, puis remplir l'anneau intérieur à partir du sommet du tube de mesure, introduire le capteur de mesure de pression puis fermer le tube de mesure à l'aide du bouchon étanche. Il faut que le niveau d'eau dans le tube de mesure en début de test soit bien au-dessus du capteur de pression mais le tube ne doit pas être entièrement rempli (cf. [figure 3](#)) ;
- ❹ connecter le vase de Mariotte à l'anneau intérieur (ouverture d'un robinet). La mesure peut alors commencer. L'opérateur doit compléter régulièrement le niveau d'eau dans l'anneau extérieur afin qu'il conserve une charge équivalente à celle de l'anneau intérieur.

La plus grande difficulté de ce mode opératoire est d'assurer l'étanchéité anneaux – surface de chaussée. Un moyen de vérifier cette étanchéité est de colorer l'eau introduite dans l'anneau de mesure afin de mieux détecter d'éventuelles fuites.

Le prototype développé ainsi que son mode opératoire sont très élémentaires et les incertitudes de mesure sont sûrement importantes. L'imparfaite étanchéité entre la surface de la chaussée et l'anneau intérieur est la première cause d'incertitude : la pratique de notre prototype nous montre que cette étanchéité n'est jamais complète ; parfois elle se détériore en cours de test ce qui oblige à arrêter, voire annuler l'essai. Une autre source d'incertitude est la précision de mesure du capteur de pression : une imprécision de 1mm sur la diminution de hauteur d'eau pendant un pas de temps de 10 s entraîne une incertitude sur la mesure du flux de 1×10^{-7} m/s (l'imprécision de 1 mm est supérieure à la précision affichée par le fabricant mais elle paraît réaliste au vu de notre expérience et des conditions de mesure). En résumé et sans avoir fait une étude d'incertitude poussée, on retiendra que la simplicité du dispositif entraîne sûrement de fortes incertitudes de mesure ; le dispositif permet d'estimer un ordre de grandeur de l'infiltration, ce qui est déjà très intéressant ; y a-t'il infiltration ? si oui, est-elle plutôt de l'ordre de 10^{-6} , 10^{-7} , ou 10^{-8} m/s ?

Des tests ont été effectués afin de valider le fonctionnement du vase de Mariotte et le temps nécessaire à l'obtention d'une charge constante faible à la base de l'infiltromètre. Pour ces tests, il a été rajouté un capteur de pression à la base de l'anneau intérieur afin de mesurer directement la charge en surface de chaussée (h_s). La [figure 4](#) illustre les résultats obtenus pour 3 charges imposées dans le vase de Mariotte : le vase fonctionne correctement (y compris pour la charge très faible de 1,5 cm) mais un temps est nécessaire entre le début du test et l'obtention de la charge souhaitée : il est de quelques minutes.

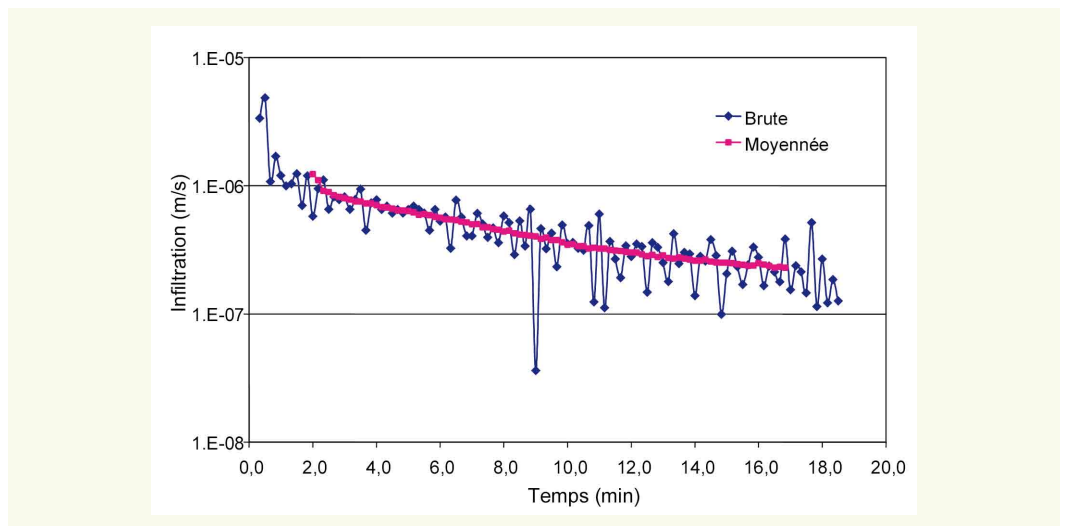
figure 4
Évolution temporelle de la charge à la base de l'infiltromètre (h_s) en début de test pour différentes valeurs théoriques imposées avec le vase de Mariotte.



Une valeur de flux infiltré est calculée toutes les 10 s à partir de l'enregistrement des variations de niveau d'eau dans le tube de mesure. Cette valeur est bruitée par les incertitudes de mesure du capteur de pression et par le bullage du vase de Mariotte inhérent au maintien de la charge constante. Un simple traitement des données par moyenne glissante (sur 20 points) permet d'obtenir des variations d'infiltration plus interprétables (**figure 5**).

Dans tous les tests effectués, on observe des variations temporelles du flux d'infiltration mesuré, variations qui diffèrent d'un point à un autre et d'un test à un autre. Dans beaucoup de cas, l'infiltration tend de façon plus ou moins nette vers une valeur constante : on nommera par la suite « Infiltration finale », noté I_f , cette valeur (par exemple pour le test de la **figure 5**, $I_f = 2,3 \times 10^{-7}$ m/s).

figure 5
Exemple d'infiltrations brutes et traitées par moyenne glissante (sur 20 points) obtenues lors d'un test.

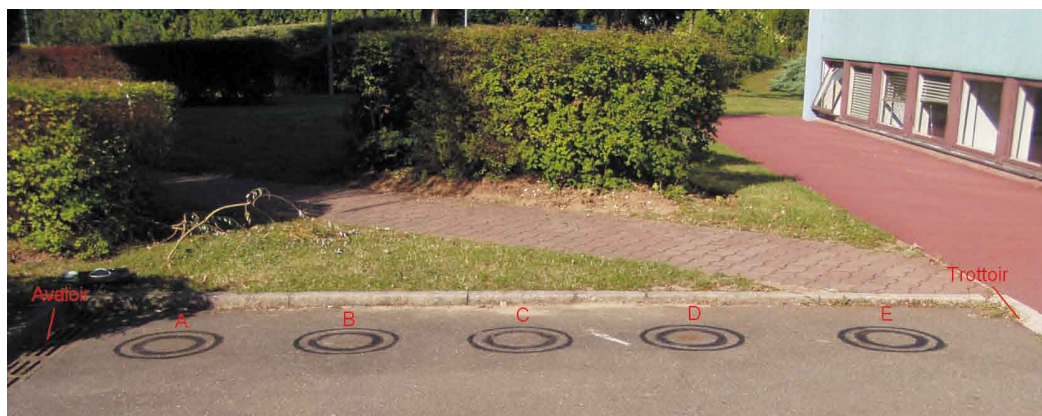


PREMIERS RÉSULTATS SUR UNE VOIRIE URBAINE PEU CIRCULÉE

Des premiers essais ont été effectués sur une voirie interne du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Ouest Parisien (Trappes, France). Un transect de 5 points a été tracé sur un secteur *a priori* en bon état, sans fissures apparentes en surface (**figure 6**). La voirie est très peu circulée et sert d'accès et de parking temporaire pour un bâtiment.

figure 6

Photo de la zone de test avec mention des points de mesure.



Lors des tests effectués, sur les points A, B et C, un régime permanent d'infiltration est rapidement atteint (ce qui permet de calculer une infiltration finale I_p), alors que sur les points D et E, le régime permanent ne semble pas atteint, même après 1 heure de test.

■ Répétabilité de la mesure

On a cherché dans un premier temps à vérifier la répétabilité de la mesure, c'est-à-dire à s'assurer que sur un même point et dans des conditions équivalentes, les valeurs mesurées étaient proches. L'exercice a été fait sur tous les points, et des valeurs d'infiltrations finales ont été calculées (**tableau 1** ; pour les points D et E, les valeurs finales sont approximatives car le régime permanent n'est pas atteint). Les tests ont été effectués avec une charge de surface $h_s = 1,5$ cm, et pour retrouver les mêmes conditions sur la voirie, la répétition des mesures a été espacée durant les 2 mois d'été (du fait des difficultés météorologiques déjà mentionnées, les tests n'ont pas pu tous être menés à leur terme sur les différents points, ce qui explique les absences de valeur dans le **tableau 1**).

tableau 1

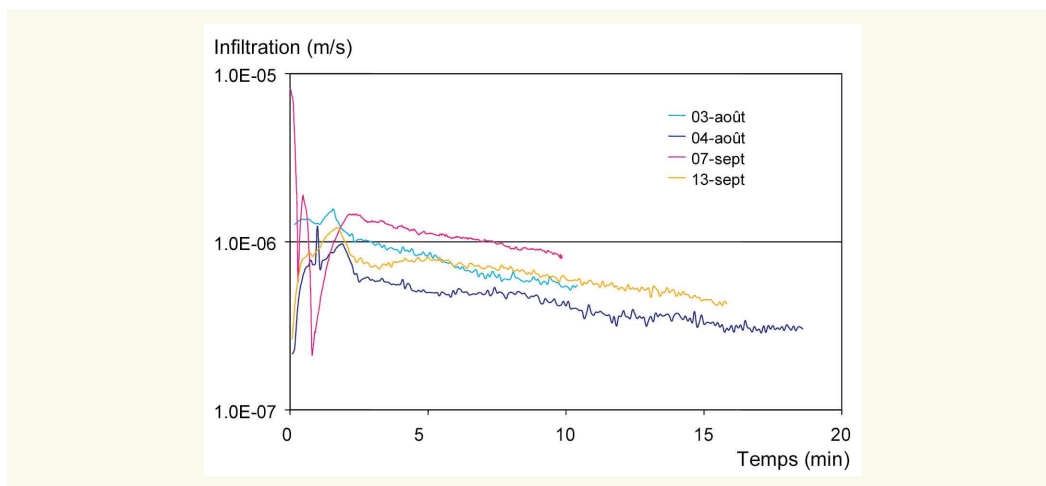
Infiltrations finales (m/s) obtenues sur les différents points pour différents tests effectués dans des conditions équivalentes ($h_s = 1,5$ cm ; voirie initialement sèche).

Test	Point A	Point B	Point C	Point D	Point E
3 août	$4,3 \times 10^{-6}$		$2,8 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-7}$	
4 août		$5,8 \times 10^{-7}$		$3,0 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-7}$
7 sept.				$8,0 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-7}$
8 sept.	$3,8 \times 10^{-6}$	$9,1 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-6}$		
13 sept.			$1,8 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$
Moyenne (m/s)	$4,1 \times 10^{-6}$	$7,5 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$5,3 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$
Écart-type (m/s)	$3,5 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-7}$	$6,1 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-8}$
Écart moyen (% de la moyenne)	6	22	22	26	7

Les résultats sont très bons sur les points A et E (avec 2 et 3 tests respectivement) où l'écart moyen de mesure représente moins de 10 % de la valeur moyenne. Pour les points B, C et D, l'écart moyen est plus important (avec un maximum à 26 % de la moyenne sur le point D) mais il reste acceptable au vu de la précision attendue pour notre mesure.

Afin d'illustrer les variabilités d'un test à un autre, les courbes d'infiltration mesurées au point D pour les 4 tests réussis sont représentées dans la **figure 7**. Au bout de quelques minutes (phase de mise en eau de l'appareil), les courbes sont relativement proches en valeur, avec une tendance à la décroissance régulière et constante d'un test à un autre.

figure 7
Évolution de l'infiltration sur le point D pour 4 tests effectués dans des conditions équivalentes ($h_s = 1 \text{ cm}$; voirie initialement sèche).

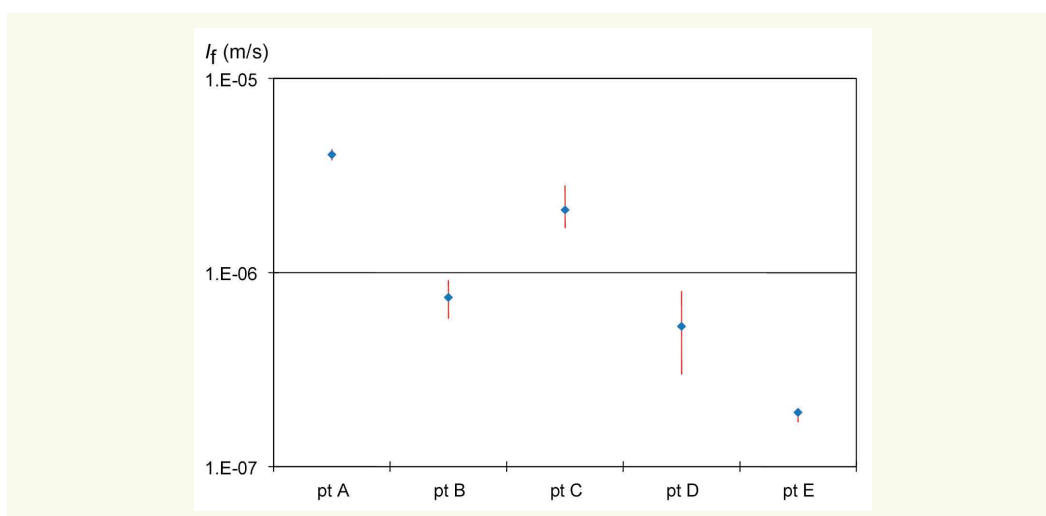


■ Variabilité spatiale le long du transect

L'infiltration mesurée est variable d'un point à un autre du transect étudié (voir [tableau 1](#)). La [figure 8](#) représente pour les 5 jours de test, les valeurs d'infiltrations finales I_f obtenues sur les différents points, avec leur intervalle de valeurs minimale et maximale. On rappelle que les valeurs de I_f sont approximatives pour les points D et E car le régime permanent n'est pas totalement atteint (cf. [figure 7](#)).

Il existe une forte variabilité spatiale des mesures sur le transect étudié, variabilité supérieure à l'écart type de mesure que l'on retrouve d'un test à l'autre et donc qui doit avoir un vrai sens physique. Les infiltrations les plus élevées sont observées sur le point A qui est à proximité de l'avaloir, alors que les plus faibles sont observées sur le point E qui est à l'opposé à proximité du trottoir. Comme explication de cette observation, on pourrait citer des différences dans l'épaisseur de l'enrobé de surface ou dans la densité de l'enrobé en place. Il est aussi possible que cette variabilité spatiale ait un côté aléatoire du fait de la rencontre, ou pas, de chemins d'écoulements d'eau (existence de fissures ou micro-fissures non visibles en surface).

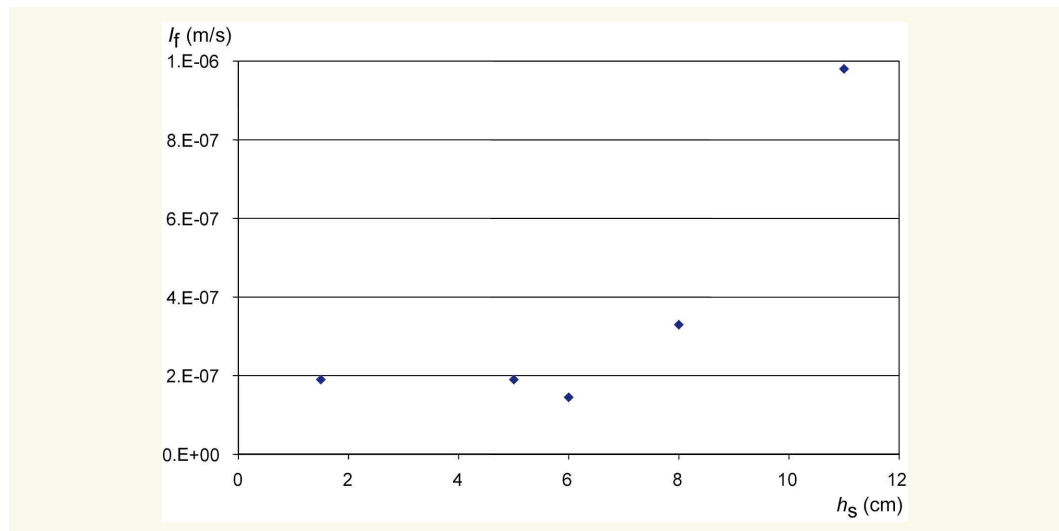
figure 8
Infiltrations finales obtenues sur les différents points du transect étudié lors des différents tests (en bleu, les valeurs moyennes ; en rouge les intervalles des valeurs minimales et maximales).



■ Influence de la charge imposée en surface

Notre dispositif permet d'étudier l'influence de la charge de surface, h_s , sur l'infiltration mesurée. L'exercice a été réalisé sur le point E où l'infiltration est la plus faible, sur quelques valeurs de h_s : 1,5 ; 5 ; 6 et 11 cm ([figure 9](#)).

figure 9
Infiltration finale obtenue
sur le point E pour
différentes charges de
surface h_s



L'influence de la charge est notable : l'infiltration finale augmente d'un facteur 10 si l'on passe de $h_s = 1,5$ cm à $h_s = 11$ cm. Sur cette série de tests, l'augmentation n'apparaît qu'à partir d'une valeur seuil de h_s (environ 5 cm) et ensuite augmente très rapidement et d'une façon exponentielle.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'infiltration d'eau à la surface des chaussées est une composante importante du cycle de l'eau autour des infrastructures routières, cycle au cœur de différents enjeux comme la sécurité routière, la conception et la durabilité des structures, la maîtrise de la pollution des eaux et des sols. Un prototype d'infiltromètre, non destructif et de mise en œuvre simple, a été développé et testé sur une série de premiers essais.

Le principe de mesure retenu est apparu adapté à l'objectif poursuivi : il permet une mesure simple mais rigoureuse de l'infiltration de surface. Par rapport aux autres appareils existants, il apporte une mesure en continu, un double anneau pour tenir compte de la diffusion horizontale et un dispositif pour maintenir constant la charge d'eau à une valeur proche des conditions réelles d'infiltration. Si l'intérêt d'un tel matériel se confirme (pour des travaux de recherche ou opérationnels), le prototype mériterait d'être fiabilisé et amélioré : l'étanchéité anneaux-surface de la chaussée devra être retravaillée, la mise en eau du dispositif ainsi que sa mise en équilibre en charge d'eau pourraient être améliorées.

Les premiers résultats obtenus sur un transect d'une voirie d'accès sont intéressants : les valeurs mesurées, dont on a l'assurance qu'elles ont un sens physique, sont variables temporellement, spatialement, et en fonction de la charge d'eau de surface. Elles s'avèrent toutes relativement importantes, avec des valeurs moyennes entre 10^{-6} et 10^{-7} m/s, valeurs équivalentes à la perméabilité d'un sol limoneux ! Ces premiers résultats doivent être confirmés sur d'autres chaussées. Les tests à venir auront pour objectif de confirmer, ou infirmer, les constats actuels mais aussi d'aller plus loin dans l'interprétation et l'explication des mesures. Des tests sur des plaques de matériau devraient permettre de progresser vers cet objectif : la caractérisation précise des plaques (densité, espace poral, etc.) et la maîtrise des conditions à leur base doivent en effet simplifier la compréhension et l'interprétation des infiltrations mesurées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **PERERA Y.Y., ZAPATA C.E., HOUSTON W.N.**, Predicting moisture movement under pavement systems, *International Journal of Road materials and Pavement Design*, Special issue, **2006**.
- 2 **RAIMBAULT G.**, Cycle annuels d'humidité dans une chaussée souple et son support. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. **145**, **1986**, pp. 79-84.
- 3 **RAGAB R., ROSIER P., DIXON A., BROMLEY J., COOPER J.D.**, Experimental study of water fluxes in a residential area: 2. Road infiltration, runoff and evaporation. *Hydrological processes*, vol. **17**, **2003**, pp. 2423-2437.
- 4 **HOLLIS G.E., OVENDEN J.C.**, One year irrigation experiment to asses losses and runoff volume relationships for a residential road in Hertfordshire, England. *Hydrological processes*, vol. **2**, **1988**, pp. 61-74.
- 5 **JULLIEN A., MONERON P., VENTURA A., LEGRET M., DEMARE D., DE LA ROCHE C., SCHEMID M., LACHET C., GAILLARD D., OUDIN J., JACQUES J.-P., ODIE L., MERIEL B., BOITTIN R., CABANNES H., JUMONTIER P., SEYTRE S., LACOSTE K., WENDLING L., BERNARDS M.**, Analyse du Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN76 – Évaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage, Ed. LCPC, Coll. Études et Recherches des LPC, **2006**, 232 p.
- 6 **HUANG B., MOHAMMAD L.N., RAGHVENDRA A., ABADIE C.**, Fundamentals of Permeability in Asphalt Mixture. *Journal of Asphalt Paving Technologist*, vol. **68**, **1999**, pp. 479-500.
- 7 **HASSAN H.F., WHITE T.D.**, Laboratory and field moisture conditions for flexible pavement. *Transportation Research Record*, vol. **1568**, **1997**, pp. 96-105.
- 8 **COOLEY A., RAY BROWN E., MAGHSOODLOO S.**, Development of critical field permeability and pavement density values for coarses-graded superpave pavements, NCAT report n° 01-03, **2001**, 14 p.
- 9 **CALIFORNIA TEST 341**, Method of test for measuring the permeability of bituminous pavements and seal coats, Transportation Laboratory, Business Transportation and Housing Agency, Sacramento, California, **2000**, 3 p.
- 10 **COOLEY A.**, Permeability of Superpave Mixtures: Evaluation of field perméamètres, National Center for Asphalt Technology, report No.99-1, **1999**, 39 p.
- 11 **WALAA S. MOGAWER, RAJIB B. MALLICK, MATTHEW R. TETO, CROCKFORD W.**, Evaluation of Permeability of Superpave Mixes, NETC 34, Project No. 00-2, New England Transportation Consortium, **2002**, 82 p.
- 12 **HILLEL D.**, L'eau et le sol, principes et processus physiques. Pédasup. Academia, Louvain-la-Neuve, **1988**, 276 p.
- 13 **NORME FRANÇAISE NF X 30-420**, Infiltromètres à simple ou double anneau, de type fermé, AFNOR, **1999**, 20 p.
- 14 **NORME FRANÇAISE NF X31-513**, Détermination de la conductivité hydraulique au moyen d'un infiltromètre à disque, à pression contrôlée, AFNOR, **1994**, 20 p.