

Mesures *in situ* et en laboratoire des écoulements dans les bétons bitumineux drainants Modélisation et validation

Hervé DI BENEDETTO

Professeur
Directeur du département génie civil et bâtiment

Malek JOUNI

Docteur

Pierre BOILLON

Ingénieur

Jacques SALHI

Ingénieur

Département génie civil et bâtiment (URA CNRS 1652)
École nationale des travaux publics de l'État

RÉSUMÉ

Trois méthodes différentes de quantification des propriétés d'écoulement dans les bétons bitumineux drainants sont analysées. Les deux perméamètres *in situ* de chantier et automatique fournissent respectivement les vitesses « moyennes » d'écoulement V_p et V_q . Le perméamètre Viabilité Hivernale (VH), fournit le coefficient de perméabilité au sens de Darcy (k) pour différents fluides.

Les développements analytiques et numériques réalisés montrent que V_q est proportionnelle à k et à un facteur dépendant de l'épaisseur de la couche de bétons bitumineux et que V_p est proportionnelle à k et à un facteur dépendant de l'épaisseur et de l'indice des vides. Chacun des facteurs est quantifié pour les structures types de chaussées. La relation entre V_p et V_q est également fournie.

Trois comparaisons de natures différentes entre des résultats expérimentaux et des modélisations valident ces développements.

Un point important qui ressort de l'étude est la forte dépendance des paramètres mesurés (V_q et V_p) avec la température. Une correction semble devoir être introduite pour l'interprétation des essais *in situ*.

MOTS CLÉS : 31 - Mesure - *In situ* - Laboratoire - Enrobé drainant - Écoulement (fluide) - Méthode - Appareil de mesure - Perméabilité - Chantier - Automatique - Vitesse - Viabilité hivernale.

Introduction

Les bétons bitumineux drainants (BBD) sont décrits dans la norme **NF P 98-134**. Ce sont des bétons bitumineux dont le pourcentage de vides (de l'ordre de 20 % et plus) permet aux eaux pluviales de circuler dans les vides communicants [6]. Depuis le début des années 1980, leur utilisation comme couche de roulement de chaussée n'a cessé de croître [5].

En effet, les bétons bitumineux drainants réduisent significativement les risques d'hydroplanage, les projections d'eau par temps de pluie et le bruit de roulement à l'intérieur du véhicule. De plus leurs caractéristiques d'adhérence, à moyenne et grande vitesse, sont élevées. La réduction du bruit pour les riverains contribue également à l'engouement pour ce type de surface.

Un des problèmes majeurs observés sur les chaussées revêtues de bétons bitumineux drainants est le colmatage des vides au cours du temps. En outre, les traitements de viabilité hivernale doivent être adaptés, notamment en raison des propriétés de perméabilité spécifiques à ce type de revêtement. Il est donc important d'avoir une meilleure connaissance des propriétés de conductivité hydraulique des bétons bitumineux drainants. Pour répondre à cet objectif, une recherche sur les propriétés

d'écoulement de plusieurs fluides (eau et solutions salines) dans les bétons bitumineux drainants a été réalisée au laboratoire géomatériaux du département génie civil et bâtiment (DGCB) de l'École nationale des travaux publics de l'État (ENTPE) [1], [2], [3], [4], [9] et [10]. Une partie des résultats obtenus est présentée dans cet article.

Trois appareils mis au point pour évaluer expérimentalement la capacité de drainage des bétons bitumineux drainants sont étudiés dans cet article. Ils ont la particularité de fournir des paramètres différents, *a priori* non comparables entre eux, mais relatifs au même phénomène physique.

Les deux premiers sont les deux appareils d'essais en place les plus utilisés en France : le perméamètre de chantier, qui mesure une vitesse « moyenne » de percolation v_p et le perméamètre automatique, qui mesure un débit Q transformé conventionnellement en une vitesse v_q .

Le troisième appareil est un perméamètre de laboratoire conçu et mis au point au Laboratoire géomatériaux de l'ENTPE, et qui a la particularité de mesurer directement le coefficient de perméabilité k au sens de Darcy.

Le but de l'étude présentée dans cet article est d'établir une relation entre les mesures fournies par ces trois perméamètres (v_p , v_q , k) à partir d'une modélisation de l'écoulement fluide dans une chaussée possédant une couche de roulement en béton bitumineux drainant.

On rappelle, tout d'abord, les caractéristiques des trois perméamètres étudiés. Ensuite, un calcul, à la fois analytique et numérique, permettant de relier les trois paramètres v_p , v_q et k en fonction de l'épaisseur e de l'enrobé et de sa porosité p , est présenté. Une validation de ce calcul est proposée pour des mesures *in situ* provenant de trois expériences différentes. Les conditions de comparaison des résultats entre les trois perméamètres ainsi que les perspectives de l'étude sont rappelées dans la conclusion.

Présentation des perméamètres étudiés

Le perméamètre de chantier à charge variable

Il s'agit d'un appareil normalisé (norme **NF P 98-257-3**), dont le schéma est reproduit sur la figure 1, et qui fonctionne en régime transitoire.

La procédure expérimentale est la suivante :

– on commence par saturer la base de l'enrobé en injectant trois litres d'eau ;

– l'essai consiste, ensuite, en la mesure du temps T nécessaire à l'écoulement de quatre litres supplémentaires d'eau entre deux hauteurs fixées (hauteur de charge variant entre 47,5 cm et 21,5 cm par rapport à la base de l'appareil) ;

– ce temps T est transformé en une vitesse de percolation moyenne v_p par la formule :

$$v_p = \frac{4\,000}{490 * T} \text{ en cm/s}$$

où :

4 000 correspond au volume écoulé (cm³),

490 correspond à la section du tube (cm²).

Le perméamètre automatique de chantier à charge constante

Ce perméamètre fait l'objet d'un projet de norme (**NF P 98-254-4**). Il est schématisé sur la figure 2. Cet appareil fonctionne en régime stationnaire.

On maintient au-dessus de l'enrobé une charge constante correspondant à 1,5 m d'eau, et on mesure le débit Q (en l/s) injecté, pour maintenir cette charge. La valeur du débit est divisée par la section intérieure du patin d'injection ($S_a = 240 \text{ cm}^2$), pour obtenir une vitesse v_q en l/s. m².

La vitesse v_q et la vitesse v_p du perméamètre de chantier sont donc deux paramètres différents.

Le perméamètre Viabilité Hivernale (perméamètre VH)

Il s'agit d'un perméamètre de laboratoire conçu et réalisé au Laboratoire géomatériaux du département génie civil et bâtiment de l'École des TPE [2], [3], [4], [9] et [10] dans le cadre d'une collaboration avec la Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est. Un brevet a été déposé pour ce perméamètre VH [11].

Ce perméamètre, régulé en température, a été conçu spécialement pour étudier la perméabilité des enrobés drainants aux solutions salines. Il répond, pour cela, aux critères suivants :

- permettre des mesures dans la plage de température -20 °C à $+30 \text{ °C}$,
- utiliser des éprouvettes carottées d'épaisseur variable entre 4 et 8 cm,
- résister à la forte action corrosive des solutions salines.

La figure 3 présente le fonctionnement du dispositif.

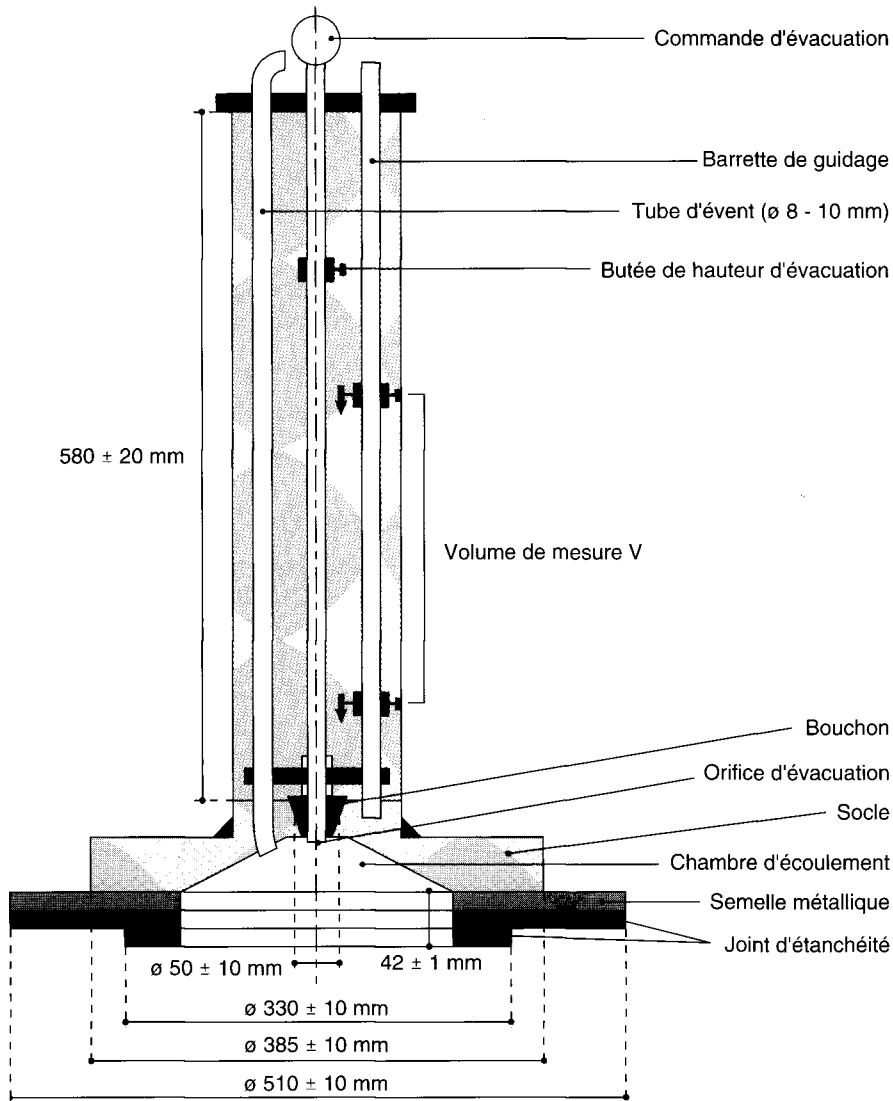


Fig. 1 -
Schéma du perméamètre
de chantier.

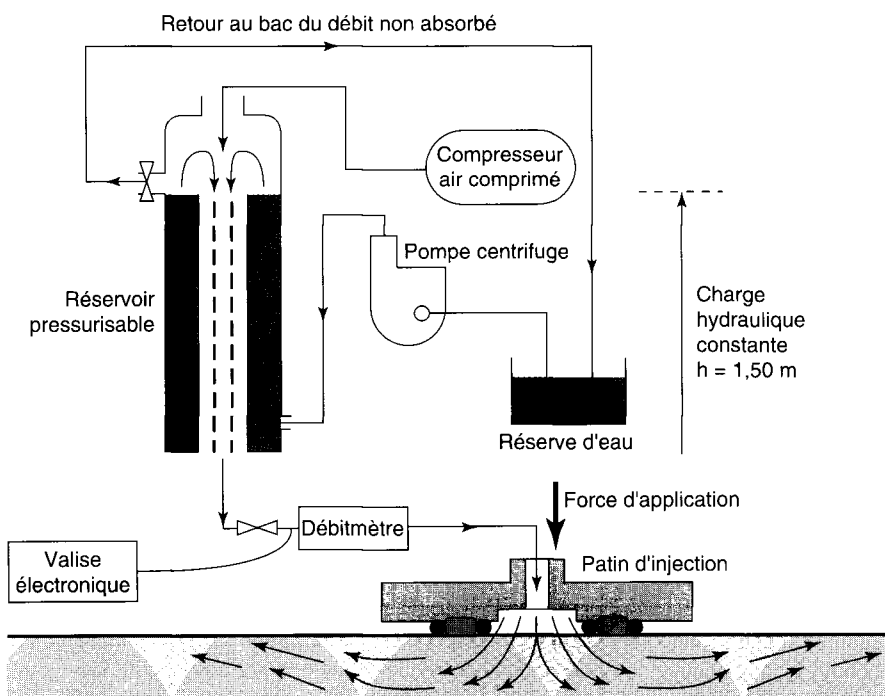


Fig. 2 -
Schéma du perméamètre
automatique.

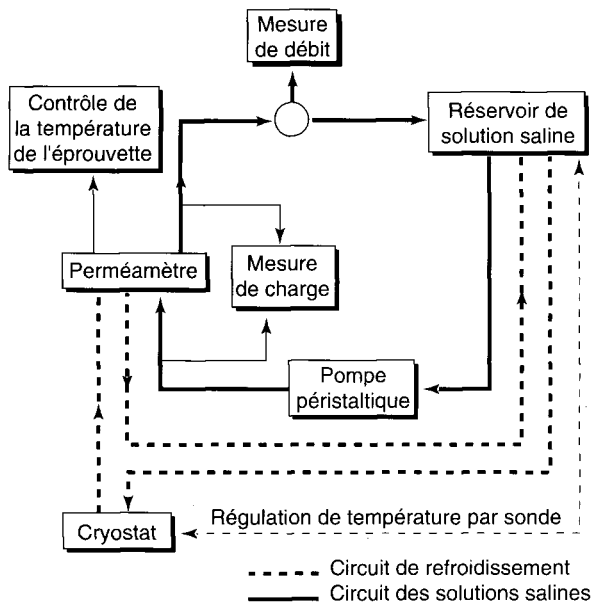


Fig. 3 - Principe de fonctionnement du dispositif.

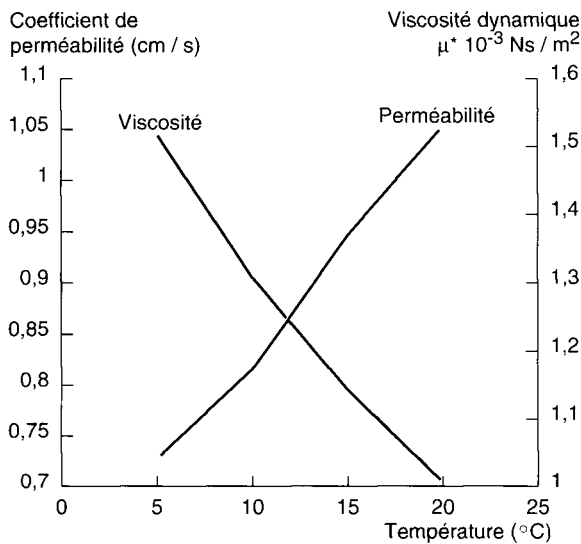


Fig. 4 - Coefficient de perméabilité k du béton bitumineux drainant [9] et viscosité de l'eau pour différentes températures.

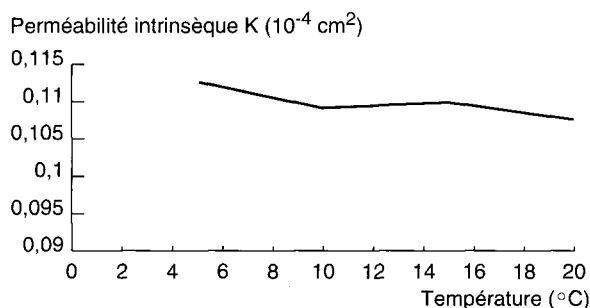


Fig. 5 - Perméabilité intrinsèque (K) des bétons bitumineux drainants (pour les éprouvettes de la figure 4).

Processus de mesure

Le coefficient de perméabilité k est obtenu à partir de la loi de Darcy par mesure du débit et de la différence de charge hydraulique appliquée.

$$k = \frac{Q \cdot h \cdot S}{\Delta H}$$

où :

ΔH est la différence de charge entre les deux faces planes de l'éprouvette cylindrique,

h est la hauteur de l'éprouvette d'enrobé,

Q est le débit de solution saline,

S est la section de l'éprouvette d'enrobé.

Résultats d'essai à l'eau [1], [2], [9]

Des essais avec différents types de fluide (saumure de NaCl , de MgCl_2 , de CaCl_2 ...) [9] ont permis de vérifier la validité de la loi de Darcy. Un autre résultat concerne l'isotropie des bétons bitumineux drainants. Des essais réalisés sur des éprouvettes carottées verticalement et horizontalement, dans des plaques d'un même enrobé, ont donné des coefficients de perméabilité sensiblement identiques. Ce résultat expérimental a été intégré dans les hypothèses du calcul analytique, présenté dans le chapitre suivant.

Des essais à l'eau effectués à différentes températures ont permis, en outre, de mettre en évidence l'effet de la température sur le coefficient de perméabilité. Comme le montre la figure 4, la perméabilité augmente de plus de 50 % entre 5 °C et 20 °C. Les éprouvettes ont été carottées verticalement dans une plaque (600 × 400 × 145 mm) préparée au compacteur de plaques LPC [14]. Le matériau est un béton bitumineux drainant 0/10 à 5,3 ppc de bitume. La porosité de l'éprouvette est de 20,5 %.

Il est possible de mettre en évidence une perméabilité intrinsèque K (fig. 5) :

$$K = \frac{k \cdot \mu}{\rho \cdot g}$$

où :

k est le coefficient de perméabilité de Darcy,

μ est la viscosité dynamique du fluide,

ρ est la masse volumique du fluide,

g est l'accélération de la pesanteur.

Signalons, toutefois, que les essais avec les solutions salines indiquent que la perméabilité intrinsèque diffère selon le fluide considéré. Ces résultats montrent qu'une mesure correcte de perméabilité nécessite une régulation en température ou une correction liée à ce paramètre. Cette conclusion est également valable pour les essais *in situ*, comme nous le montrons dans la suite.

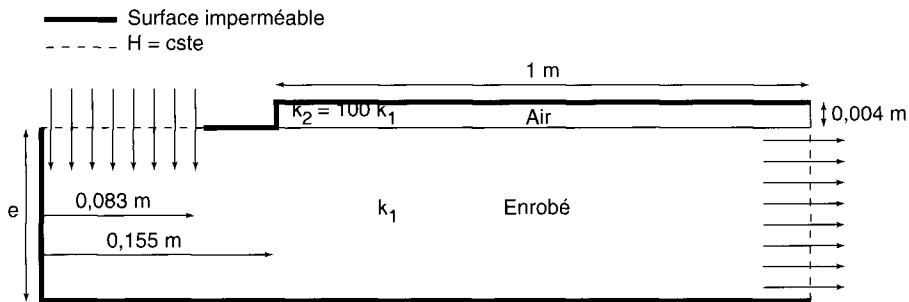


Fig. 6 - Conditions aux limites pour la modélisation numérique d'essais au perméamètre automatique.

Développement du calcul

Le perméamètre automatique de chantier à charge constante

L'objectif est de modéliser le fonctionnement du perméamètre automatique pour déduire de la vitesse v_q (ou du débit Q) fournie par cet appareil une valeur du coefficient de perméabilité k de l'enrobé.

Le calcul est mené en régime stationnaire, car le perméamètre automatique fait une mesure sous charge constante (1,5 m de hauteur d'eau).

Ce calcul a été effectué par la méthode des éléments finis, en utilisant le module SURF de CESAR-LCPC, qui permet la résolution, dans le cas stationnaire, d'un problème d'écoulement plan ou axisymétrique (cas de notre étude) en milieu poreux avec surfaces libres.

Les conditions aux limites et la géométrie retenues pour le calcul sont présentées sur la figure 6. Les conditions hydrauliques imposées à la surface de l'enrobé correspondent, à partir du bord gauche de la figure, à la zone d'alimentation en eau, au contact imperméable du patin du perméamètre avec l'enrobé et à une surface de suintement, représentée ici par une couche de forte perméabilité.

Le choix de ces conditions aux limites est un point délicat en raison des résurgences d'eau qui apparaissent à la périphérie de la semelle du perméamètre. Le calcul prend en compte ces résurgences grâce à la présence d'un milieu à plus grand coefficient de perméabilité (visant à simuler l'air). Néanmoins, cette prise en compte pourrait être améliorée. Soulignons que, pour les calculs présentés dans le paragraphe relatif au perméamètre de chantier à charge variable, ce phénomène de résurgence est beaucoup moins important car les charges hydrauliques appliquées sont notablement plus faibles.

Compte tenu de l'hypothèse d'isotropie et de la linéarité des équations différentielles du pro-

blème (loi de Darcy et conservation de la masse), on montre [1] que le problème respecte l'équation suivante :

$$k = a(e).Q$$

avec :

Q , le débit mesuré par le perméamètre automatique,

k , le coefficient de perméabilité de l'enrobé au sens de Darcy,

$a(e)$, un coefficient qui ne dépend que de la géométrie du problème, donc que de l'épaisseur e de l'enrobé.

Puisque par définition : $v_q = \frac{Q}{S_a}$ ($S_a = 240 \text{ cm}^2$), on déduit :

$$k = A(e).v_q,$$

$$\text{avec } A(e) = a(e).S_a.$$

Cette relation relie le paramètre v_q , obtenu à l'aide du perméamètre automatique, au coefficient de perméabilité k du béton bitumineux drainant pour le fluide considéré, grâce à un coefficient dont la valeur ne dépend que de l'épaisseur de la couche de bétons bitumineux drainants.

Pour une épaisseur fixée de l'enrobé, la relation entre les deux paramètres est donc linéaire.

Les résultats du calcul pour différentes épaisseurs sont présentés par le tableau I.

TABLEAU I
Coefficients de la relation entre le coefficient de perméabilité k (au sens de Darcy) et Q et v_q obtenus au perméamètre automatique

Épaisseur (cm)	$a(m^{-2})$	$A(e)$
4	7,27	1,74
6	5,15	1,24
8	4,13	0,99

Le perméamètre de chantier à charge variable

Rappelons que l'objectif est de modéliser le fonctionnement de l'appareil afin de déduire de la vitesse v_p (ou du temps d'écoulement T) une valeur du coefficient de perméabilité k de l'enrobé. Pour ce perméamètre, les résultats sont moins directs que dans le cas précédent en raison de l'aspect non stationnaire de l'écoulement. Une méthode couplant un développement analytique et un calcul dans un cas stationnaire est proposée.

Hypothèses de calcul

On a fait l'hypothèse d'un écoulement selon un front vertical (sur toute l'épaisseur de l'enrobé) lors de la deuxième étape d'écoulement des quatre litres d'eau servant à la mesure. Cette hypothèse, qui ne peut pas être vérifiée aisément expérimentalement, semble correcte au vu des comparaisons avec les résultats obtenus sur chantier, qui sont présentés dans la suite de l'article.

Les notations adoptées sont indiquées par la figure 7.

R_1 est le rayon de la zone saturée à la fin de la première étape (après l'écoulement des trois litres servant à saturer localement le béton bitumineux drainant), S_1 est la section (latérale) d'enrobé correspondante.

R_1 est déterminé à partir du volume de la partie conique du perméamètre et de la zone d'enrobé remplies par les trois litres d'eau. Il dépend donc de la porosité p et de l'épaisseur e de l'enrobé.

H_{\max} et H_{\min} sont les hauteurs d'eau entre lesquelles on mesure le temps T d'écoulement pour calculer la vitesse de percolation v_p .

La norme définit précisément :

$$H_{\max} = 0,475 \text{ m.}$$

$$H_{\min} = 0,215 \text{ m.}$$

R_2 est le rayon du front à la fin de la seconde étape et S_2 la section d'enrobé correspondante. R_2 dépend, également, de e et de p .

À l'instant t compris entre 0 et T , le front de l'écoulement se trouve en $R(t)$ et on note $\rho(t)$ le rayon d'une section quelconque située dans la zone saturée entre R_1 et $R(t)$.

Compte tenu de l'aspect transitoire de l'écoulement, un calcul analytique a été développé. Ce calcul détermine l'écoulement fluide à partir du début de la phase 2 (entre les sections S_1 et S_2). Dans cette phase, compte tenu de l'hypothèse avancée, l'écoulement est radial (fig. 7).

Le calcul numérique

En appliquant les équations qui régissent l'écoulement : $\vec{v} = -k \cdot \text{grad}H$ et $\text{div } \vec{v} = 0$ entre les sections S_0 et S_1 qui délimitent un volume d'enrobé toujours saturé dans la phase 2, on démontre la formule :

$$Q = k \cdot C \cdot \Delta H \quad (1)$$

où :

k est le coefficient de perméabilité,

Q est le débit à l'instant t ,

ΔH est la différence de charge entre S_0 et S_1 .

C est un coefficient indépendant de k et ΔH . Il dépend de la géométrie du problème et de la position de la section S_1 , c'est-à-dire de l'épaisseur e et de la porosité p de l'enrobé.

Pour obtenir le coefficient C , on utilise le code de calcul CESAR-LCPC pour un problème stationnaire dont les conditions aux limites sont schématisées sur la figure 8.

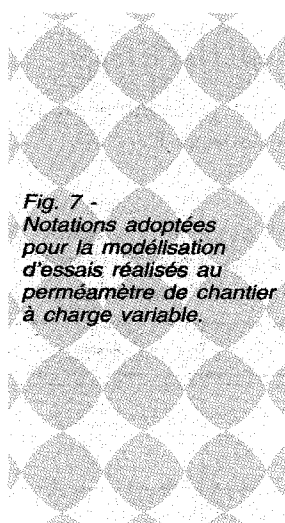
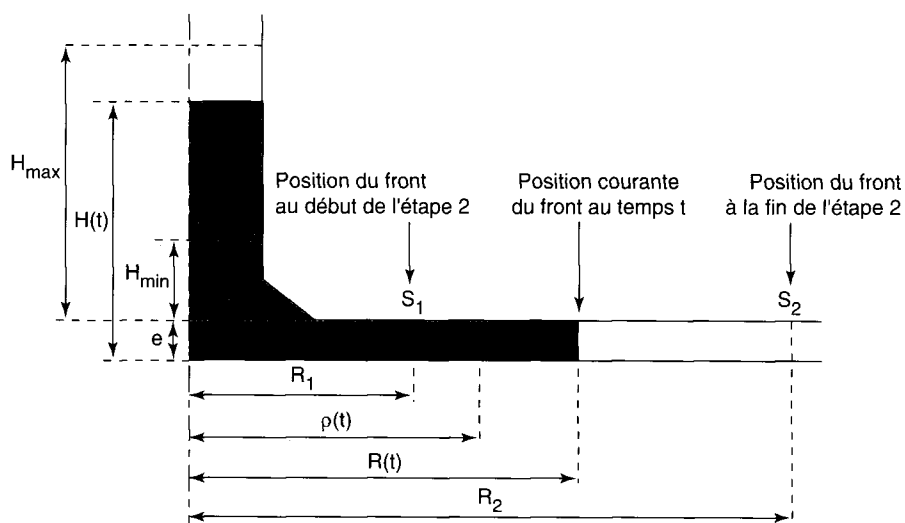
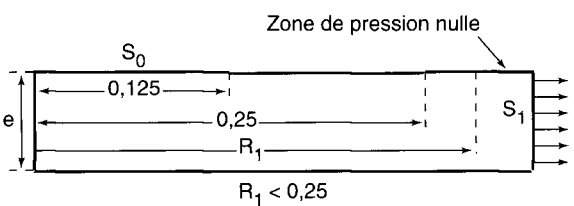
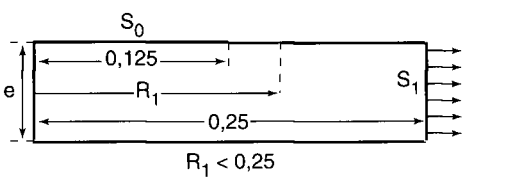
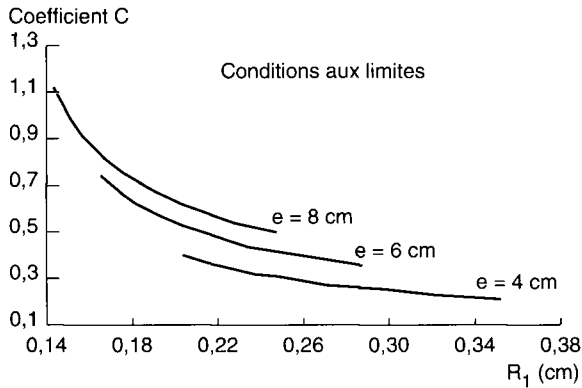


Fig. 7 - Notations adoptées pour la modélisation d'essais réalisés au perméamètre de chantier à charge variable.





— Surface imperméable
 $S_0 : h = 1,5 \text{ m}$ $S_1 : h = 0,5 \text{ m}$

Fig. 8 - Valeurs du coefficient C.

La valeur du coefficient C, pour différents rayons de saturation (R_1) et épaisseurs e, est représentée sur la figure 8.

Le calcul analytique

Pour établir la relation entre v_p et k, cinq équations de base sont introduites (les notations sont celles de la figure 7) :

• **Équation 1**

Cette équation est obtenue à partir de la loi de Darcy et de l'hypothèse du front vertical de l'écoulement.

$$h(t) = \frac{Q(t).B}{k} \cdot \ln\left(\frac{\rho(t)}{R_1}\right) + H_1(t)$$

avec :

$Q(t)$: débit à l'instant t et $B = \frac{-1}{2.\pi.e}$

• **Équation 2**

Au niveau du front (surface libre), la charge est comprise entre 0 et e.

On obtient la deuxième équation en écrivant que cette charge est égale à $\frac{e}{2}$ sur toute la section du front d'onde. Cette valeur est « petite » au regard des valeurs de charge à l'intérieur du perméamètre, ce qui justifie l'approximation.

$$H_1(t) = \frac{e}{2} - \frac{Q(t).B}{k} \cdot \ln\left(\frac{R(t)}{R_1}\right)$$

• **Équation 3**

Cette équation est une réécriture de la formule $Q = k.C.\Delta H$ (introduite au chapitre précédent) entre S_0 et S_1 , la charge sur la surface S_0 étant $h(t)$:

$$Q(t) = \frac{k.C \cdot \left[H(t) - \frac{e}{2} \right]}{1 - B.C \cdot \ln\left(\frac{R(t)}{R_1}\right)}$$

• **Équation 4**

En rattachant la valeur du débit à la variation de hauteur d'eau dans le perméamètre au temps t, on obtient :

$$\frac{k.C \cdot \left[H(t) - \frac{e}{2} \right]}{1 - B.C \cdot \ln\left(\frac{R(t)}{R_1}\right)} = - \frac{dH(t)}{dt} \cdot s$$

où :

s est la section du tube du perméamètre.

• **Équation 5**

Cette dernière équation s'obtient en écrivant la conservation du volume d'eau à partir du début de la phase 2.

$$s \cdot [H_{max} + e - H(t)] = \pi.p.e \cdot [R^2(t) - R_1^2]$$

Il est à souligner que la porosité p introduite est celle relative aux vides communicants : $p = \frac{v_{vc}}{v_t}$, où v_{vc} correspond au volume des vides communicants existant dans un volume v_t de bétons bitumineux drainants.

À partir des équations 4 et 5, on déduit l'équation différentielle en $H(t)$ suivante :

$$dt = - \frac{s}{k.C} \cdot \frac{1 - \frac{B.C}{2} \cdot \ln\left[1 + \frac{s \cdot (H_{max} + e - H(t))}{\pi.p.e.R_1^2} \right]}{H(t) - \frac{e}{2}} dH$$

(2)

Cette relation (2) peut s'écrire :

$$t = \frac{F(H)}{k}$$

Avec F(h) la fonction définie par :

$$F(H) = -\frac{s}{C} \int_{H_{\max}+e}^H \frac{1 - \frac{B.C}{2} \ln \left[1 + \frac{s.(H_{\max} + e - H)}{\pi.p.e.R_1^2} \right]}{\bar{H} - \frac{e}{2}} d\bar{H}$$

Les valeurs de cette intégrale ont été obtenues à l'aide d'un logiciel de calcul formel.

Pour $H = H_{\min} + e$, $T = \frac{F(H_{\min} + e)}{k}$

Le temps T (introduit dans la norme du perméamètre de chantier) et le coefficient de perméabilité k, au sens de Darcy, sont reliés par un paramètre F(H_{min} + e) qui ne dépend que de l'épaisseur e et de la porosité p de l'enrobé.

En se ramenant au paramètre v_p, avec les unités usuelles, on obtient la relation recherchée :

$$k = \beta(e, p) \cdot v_p$$

avec $\beta(e, p) = \frac{49}{4.F(H_{\min} + e)}$ [F exprimé en m]

Le tableau II donne pour plusieurs valeurs d'épaisseur e et de porosité p de bétons bitumineux drainants, les valeurs de β correspondantes.

On constate qu'une fois fixés les paramètres e et p, il y a proportionnalité entre v_p et k.

Validation à partir de mesures sur sites

Expérience sur le site de Vénissieux [1]

Un essai au perméamètre de chantier a été effectué par le CETE de Lyon sur une portion du boulevard urbain sud de Lyon, à Vénissieux. Cet essai a été réalisé sur une portion de bétons bitumineux drainants d'épaisseur e = 4 cm et de porosité (totale) p = 20 %. Nous avons filmé l'expérience et l'analyse de l'essai image par image a permis de tracer la courbe de hauteur d'eau H(t) dans le cylindre du perméamètre de chantier en fonction du temps écoulé.

La valeur de T obtenue est de 4,48 s. L'épaisseur e étant de 4 cm, l'utilisation du tableau 2 permet, pour une valeur de porosité donnée, d'obtenir le coefficient β et donc le coefficient de perméabilité k de l'enrobé (tableau III).

L'utilisation de l'évolution de la hauteur d'eau, obtenue grâce au dépouillement du film, au cours du temps (entre 0 et T) et non seulement de la valeur au temps T permet une analyse plus poussée et une validation de la modélisation développée. Les résultats obtenus expérimentalement et ceux déduits du calcul pour une porosité (des vides communicants) de 20 % et de 15 % sont représentés sur la figure 9, dans les axes : hauteur d'eau (par rapport à la surface de la chaussée) dans le réservoir du perméamètre H(t) - temps t. Le choix de deux porosités est lié à la méconnaissance de cette valeur, qui est nécessairement inférieure à la porosité totale. On constate que la forme de la courbe est peu influencée par ce paramètre, à la différence du coefficient de perméabilité k qui subit une variation sensible (fig. 9).

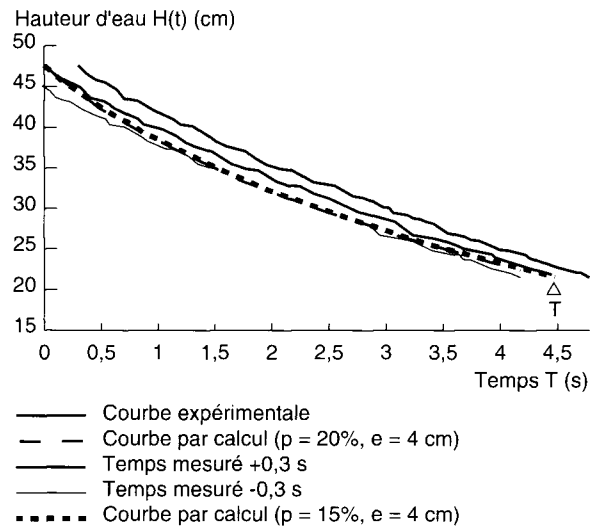


Fig. 9 - Courbes calculées et expérimentales de H(t) pour l'expérience de Vénissieux.

Compte tenu des incertitudes sur la détermination des valeurs expérimentales, les deux courbes déduites de la courbe expérimentale à ± 0,3 s sont également tracées sur cette figure. On observe que la modélisation est située à l'intérieur du fuseau formé par ces deux courbes.

TABLEAU II
Coefficient β reliant le coefficient de perméabilité k et v_p obtenu au perméamètre de chantier à charge variable

e	p = 10 %	p = 12 %	p = 15 %	p = 17 %	p = 20 %	p = 22 %	p = 25 %	p = 27 %	p = 30 %
4 cm	0,891	0,871	0,812	0,775	0,723	0,692	0,659	0,641	0,613
6 cm	0,518	0,515	0,491	0,466	0,428	0,409	0,386	0,370	0,355
8 cm	0,358	0,370	0,349	0,328	0,300	0,284	0,266	0,257	0,245

TABLEAU III
Valeurs du coefficient de perméabilité $k(\text{cm/s})$
en utilisant les valeurs de β (tableau II)

e \ p	15 %	20 %	22 %
4 cm	1,48	1,32	1,26

Expérience sur le site de Dardilly [1]

Depuis 1992, un nouveau type d'enrobé drainant est expérimenté sur la RN6 à Dardilly dans le département du Rhône. Il présente un pourcentage de vide à l'origine supérieur à 30 %.

Des mesures au perméamètre de chantier à charge variable ont été réalisées sur ce site, près d'une zone accidentellement colmatée (ce qui explique les faibles valeurs de vitesse de percolation obtenues). En parallèle, un carottage réalisé sur le même site a permis de réaliser des mesures de perméabilité à l'aide du perméamètre VH du Laboratoire géomatériaux de l'ENTPE.

La connaissance d'une vitesse de percolation v_p et d'une valeur du coefficient de perméabilité k correspondant à un même enrobé a fourni l'occasion de vérifier la validité de nos développements.

L'éprouvette a été carottée près du profil 71 dans le sens Paris-Lyon. À cet endroit, les mesures au perméamètre de chantier du CETE de Lyon donnent une valeur de la vitesse de percolation v_p proche de 0,18 cm/s.

L'épaisseur du béton bitumineux drainant est proche de 4 cm et la porosité à l'origine est de 33 %. Compte tenu des incertitudes qui existent sur les deux valeurs, en raison d'une part de la non-maîtrise de l'épaisseur de la chaussée, d'autre part de la méconnaissance de la porosité des vides communicants après colmatage, nous avons représenté dans le tableau IV les valeurs des coefficients de perméabilité k calculées (k_{cal}) pour deux épaisseurs (4 cm et 4,5 cm) et trois porosités (15 %, 20 % et 22 %). En considérant que la part des vides non communicants est comprise entre 1/4 et 1/3 de la porosité totale, il paraît raisonnable d'adopter une porosité maximale en vides communicants égale à 22 %.

L'application directe de nos développements fournit un coefficient de perméabilité calculé (k_{cal}) compris entre 0,112 et 0,146 cm/s (tableau IV).

TABLEAU IV
Valeurs des coefficients de perméabilité calculés
 k_{cal} (cm/s)

e \ p	15 %	20 %	22 %
4 cm	0,146	0,130	0,125
4,5 cm	0,132	0,117	0,112

Par ailleurs, la carotte a été testée à l'aide du perméamètre VH de l'ENTPE. Une mesure de la capacité de cette carotte a fourni une valeur de porosité totale de 19,6 %.

L'essai a été réalisé à l'eau et à la température ambiante (environ 15 °C) afin de se placer dans les mêmes conditions, en termes de fluide et de viscosité, que lors de la mesure au perméamètre de chantier.

Le résultat de cet essai donne un coefficient de perméabilité k de 0,115 cm/s.

Cette valeur de k obtenue expérimentalement au perméamètre VH se trouve dans la fourchette de celles calculées à partir de la mesure *in situ* (k_{cal}) et fournies dans le tableau IV.

Correspondance entre les deux perméamètres de chantier

À partir des calculs présentés, on peut établir une relation entre les valeurs des vitesses déduites des mesures avec les deux appareils de chantier :

$$k = A(e).v_q,$$

$$k = \beta(e,p).v_p.$$

Il vient alors :

$$v_p = \frac{\beta(e,p)}{A(e)} v_q \quad (3)$$

Pour une structure donnée de chaussée, v_q et v_p sont proportionnels. Le coefficient de proportionnalité dépend de l'épaisseur e et de la porosité p (des vides communicants) de la couche de bétons bitumineux drainants.

La relation (3) permet de comparer différentes campagnes de mesures réalisées avec les deux perméamètres.

Le Laboratoire régional des ponts et chaussées d'Autun a tracé les correspondances entre v_p (perméamètre de chantier) et v_q (perméamètre automatique) obtenues à partir de campagnes expérimentales réalisées en un même point à l'aide des deux appareils, dans différents sites. Ces comparaisons, présentées dans [8], fournissent un nuage de points qui est repris sur la figure 10. Les caractéristiques des couches de bétons bitumineux drainants pour chacun des points ne sont pas fournies.

Les neuf droites obtenues à l'aide de nos calculs, lorsque l'on considère les combinaisons des trois épaisseurs : 4 cm, 6 cm, 8 cm et des trois porosités : 10 %, 20 %, 30 %, sont tracées sur la figure 10. La grande majorité des structures en bétons bitumineux drainants réalisées en France se situe dans les limites, en épaisseur et en porosité, définies par ces neuf combinaisons.

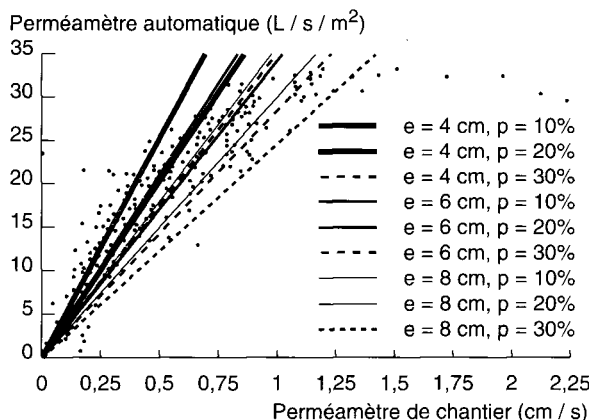


Fig. 10 - Correspondances entre les perméamètres de chantier et automatique : points expérimentaux du LRPC d'Autun et courbes déduites de notre modélisation.

On constate que plus de 85 % des points expérimentaux se trouvent dans la zone délimitée par les droites des deux structures extrêmes : $e = 4$ cm, $p = 10$ % et $e = 8$ cm, $p = 30$ %. En outre, le nombre de points se situant dans la zone correspondant à l'épaisseur $e = 4$ cm est très important. Ce dernier résultat s'explique par la réalisation très fréquente en France de couches de roulement en bétons bitumineux drainants de 4 cm d'épaisseur.

Les points se trouvant « au-dessus » (à gauche) de cette zone (moins de 10 % du total) peuvent s'interpréter comme des structures très minces ou/et colmatées. Les points situés « en dessous » (à droite) de la zone (moins de 4 % du total) peuvent correspondre à des mesures dans des conditions différentes avec les deux appareils : par exemple, à des époques donc à des températures différentes. Cette interprétation pourrait être vérifiée, à partir des caractéristiques des bétons bitumineux drainants (e et p) et des essais, pour chaque point de mesure.

En conclusion, il apparaît que les résultats des modélisations sont en accord avec les résultats de ces campagnes expérimentales.

Conclusion

Une modélisation de l'écoulement d'un fluide dans un béton bitumineux drainant est proposée. Elle permet de relier les valeurs de vitesse (v_q et v_p) obtenues avec les deux principaux perméamètres de chantier utilisés en France (respectivement le perméamètre automatique à charge constante et le perméamètre à charge variable) au coefficient de perméabilité k (au sens de Darcy).

Il ressort de cette modélisation que chacune des vitesses est proportionnelle au coefficient de perméabilité. Le coefficient de proportionnalité ne dépend que de la géométrie, c'est-à-dire de l'épaisseur e de la couche, pour le perméamètre à charge constante. Celui relatif au perméamètre à charge variable est fonction de l'épaisseur e et de la porosité p des vides communicants. Les tableaux I et II, fournissant les valeurs calculées de ces coefficients, permettent de traiter les différentes structures en bétons bitumineux drainants réalisées en France.

L'utilisation de ces coefficients permet, en outre, de trouver la relation entre les résultats obtenus avec les deux perméamètres. C'est, également, une relation de proportionnalité dont le coefficient dépend de l'épaisseur et de la porosité de la couche. À titre d'exemple, ce coefficient varie de plus de 50 % lorsque la porosité passe de 10 % à 30 % !

Trois comparaisons entre des résultats expérimentaux et des modélisations valident la modélisation proposée. Ces trois comparaisons sont de nature différentes. La première traite de l'analyse de l'évolution en cours d'essais de la hauteur d'eau dans le perméamètre à charge variable. La deuxième relie des mesures au perméamètre à charge variable et au perméamètre Viabilité Hivernale (VH) conçu et développé au Laboratoire géomatériaux de l'ENTPE. La troisième interprète une campagne de comparaison systématique, entre les mesures avec les deux perméamètres de chantier, effectuée par le Laboratoire régional des ponts et chaussées d'Autun.

Enfin, des essais réalisés au perméamètre VH [9] du Département génie civil et bâtiment de l'ENTPE ont permis de mettre en évidence l'effet primordial de la température sur le coefficient de perméabilité au sens de Darcy (k) des bétons bitumineux drainants. Ce résultat a des conséquences sur l'interprétation des mesures avec les appareils de chantier, qui ne fait pas intervenir le paramètre température. Ainsi, on montre que, pour un même enrobé et avec le même appareil, deux mesures (sur site) réalisées respectivement à 5 °C et 20 °C donnent deux valeurs qui peuvent différer de 50 % environ.

Cette étude montre que le perméamètre VH de l'ENTPE est un outil performant et utile de mesure du coefficient de perméabilité en laboratoire pour les bétons bitumineux drainants. D'autre part, une correction des mesures de perméabilité *in situ* prenant en compte la température semble nécessaire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BOILLON P., SALHI J. (1994), *Enrobés drainants : Viabilité Hivernale et équivalence de trois perméamètres*, Travail de fin d'Études, Lyon, ENTPE, 110 pages.
- [2] JOUNI M. (1992), *Viabilité Hivernale sur enrobé drainant : étude rhéologique des solutions salines et mise au point d'un perméamètre pour Viabilité Hivernale*, Rapport de stage de DEA, Lyon, ENTPE, 77 pages.
- [3] ROPERS P. (1992), *Viabilité Hivernale sur enrobés drainants : étude rhéologique de solutions salines et conception d'un perméamètre Viabilité Hivernale*, Travail de fin d'Études, Lyon, ENTPE, 57 pages.
- [4] COTE L. (1993), *Mise au point du perméamètre Viabilité Hivernale du laboratoire Géomatériaux et tests de solutions salines*, Travail de Fin d'Études, Lyon, ENTPE, 62 pages.
- [5] LEFEBVRE G. et al. (1993), *Les enrobés drainants*, AIPCR, 161 pages.
- [6] ARPINO J., DELANNE Y., POIRIER J.C., *Les bétons bitumineux drainants*, Bagnaux, Observatoire national des Chaussées, Dossier thématique, SETRA-LCPC, déc. 1993, Pages 5 à 23.
- [7] LIVET J., ROSE F., *Le comportement hivernal particulier de certaines surfaces routières*, Note d'information SETRA n° 67, SETRA, avr. 1991, 8 pages.
- [8] DELANNE Y., LAMALLE P., LAGANIER R., SOULAYE D. (1993), *Performances des bétons bitumineux drainants*, Journée nationale des enrobés drainants du 16 décembre 1993, 15 pages.
- [9] JOUNI M., *Écoulements dans les bétons bitumineux drainants : développement d'un perméamètre VH et modélisations d'essais in situ*. Thèse de Doctorat de l'INSA Lyon, ENTPE, 24 novembre 1995.
- [10] ESGLEAS F. (1991), *Étude d'un perméamètre régulé en température pour enrobés drainants*, Rapport de stage de DEA, Lyon, ENTPE, 56 pages.
- [11] DIBENEDETTO H., ESGLEAS F., HEURTEBISE F., *Brevet n° 2695725*, Bulletin officiel de la propriété industrielle n° 11, 18 mars 1994.
- [12] *Norme française : le perméamètre de chantier NF 98-254-3* (mars 1993).
- [13] *Le perméamètre automatique type « Angers ou Autun » NFP 98-254-4* (en projet).
- [14] *Norme Française : Préparation des mélanges hydrocarbonés : Compactage des plaques NF 98-250-2* (novembre 1993).
- [15] DI BENEDETTO H., JOUNI M., HEURTEBISE F. (1995), *Écoulement dans les bétons bitumineux drainants : Le perméamètre VH* *Revue générale des routes et aérodromes*, **731**, pp. 74-78.

Remerciements

Les auteurs remercient la Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est, dont la collaboration a permis la réalisation de cette étude.

ABSTRACT

In situ and laboratory measurements of flows in porous bituminous concrete : modelling and validation

H. DI BENEDETTO - M. JOUNI - P. BOILLON - J. SALHI

Three different methods for quantifying flow properties in porous bituminous concrete are analysed. The two in situ field and automatic permeameters provide respectively the « average » flow rates v_p and v_a . The « Winter Serviceability » permeameter furnishes the permeability coefficient in the sense of Darcy (k) for different fluids.

Analytical and numerical developments completed show that v_a is proportional to k and to a factor that depends on the thickness of the bituminous concrete layer and that v_p is proportional to k and to a factor depending on the thickness and the voids index. Each factor is quantified for typical pavement structures. The relationship between v_p and v_a is also provided.

Three comparisons of different kinds between experimental results and modelling validate these developments.

An important point shown by the study is the strong dependence of the measured parameters (v_a and v_p) with temperature. The introduction of a correction would appear necessary for the interpretation of the *in situ* tests.