



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la
communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle
comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen

In situ Validierung des neuen europäischen Drainometers

In situ experimentation with the new European drainometer

IMP Bautest SA

Christian Angst, ingénieur civil, dr sc. techn. EPF

Françoise Beltzung, ingénieur matériaux, dr ès sc. EPF

**Mandat de recherche VSS 2006/504 sur demande de l'Association
suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)**

> Sommaire

>	Résumé	3
>	Zusammenfassung	5
>	Summary	7
>	Remerciements	9
>	Introduction	11
1	> Objectifs	13
1.1	Contrôle des fonctionnalités de l'appareil	13
1.2	Estimation des spécifications équivalentes	13
2	> Etat de la technique et de la normalisation	15
2.1	Travaux antérieurs	15
2.2	Etat de la normalisation	16
3	> Appareillage	17
3.1	Drainomètre « Yverdon »	17
3.1.1	Description générale	17
3.1.2	Incidence de la rigidité du joint sur les mesures	18
3.2	Drainomètre européen	20
4	> Mesures comparatives sur routes	23
4.1	Choix des tronçons	23
4.2	Disposition des points de mesure sur la chaussée	24
4.3	Méthodologie à chaque point de mesure	24
5	> Essais en laboratoire	26
5.1	Dureté Shore du joint	26
5.2	Facteur de correction de la température	27
5.3	Temps de résistance à l'écoulement	30
5.4	Temps de fuite parallèle	30
5.5	Fidélité des résultats	31
5.6	Sources d'incertitude	31
5.7	Synthèse	33
6	> Résultats	35
6.1	Résultat avec et sans correction de température	35
6.2	Résultat de l'ensemble des tronçons	36
6.3	Résultat restreint aux tronçons neufs et récents	38
6.4	Résultat restreint aux tronçons neufs	40
6.5	Propositions à l'adresse de la VSS	41
6.5.1	Valeurs guides	41
6.5.2	Recommandations	42
7	> Conclusions	43
>	Index	44
	Abréviations	44
	Figures	44
	Tableaux	44
	Littérature	44

> Résumé

L'expérimentation a montré que le drainomètre proposé par la norme EN 12697-40 donne entière satisfaction. L'étendue de la zone de contact entre le joint et la chaussée garantit une bonne étanchéité. La sensibilité de mesure est élevée, de l'ordre de la seconde. La fidélité des résultats est estimée à 3%.

Pour le calcul de la conductivité hydraulique à partir du temps d'écoulement, la norme prévoit une correction de température afin de tenir compte de la variation de la viscosité de l'eau. En pratique, cependant, nous avons constaté que le temps d'écoulement est peu sensible à la température de l'eau. Nous en déduisons que les conditions expérimentales in situ ne permettent pas d'appliquer la loi de Darcy et que, par conséquent, cette correction biaise le résultat de l'essai.

Les drainomètres européen et « Yverdon » fournissent des valeurs qui, dans une comparaison graphique, peuvent être considérées comme approximativement alignées avec un coefficient de corrélation égal à 0,88. Cette relation permet de définir des valeurs guides proches des exigences de débit fixées par la norme suisse SN 640 430b.

La comparaison entre le PA 8 et le PA 11 montre que la capacité drainante augmente avec la dimension du plus gros grain. Cette observation indique que les exigences de perméabilité ne peuvent être identiques pour les deux sortes d'enrobé.

> Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Messapparatur die in der Norm EN 12697-40 beschrieben ist, gut funktioniert. Die grossflächige Kontaktzone zwischen der Dichtung und der Fahrbahn ermöglicht eine gute Abdichtung. Die Messempfindlichkeit liegt im Bereich der Sekunde und ist als hoch einzustufen. Die Wiederholbarkeit der Ergebnisse beträgt ca. 3%.

Die Berechnung der Wasserdurchlässigkeit, ausgehend von der Ausflusszeit, sieht eine Temperaturkorrektur vor. Diese Korrektur berücksichtigt die theoretische Änderung der Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur. In der Praxis konnte aber festgestellt werden, dass die Ausflusszeit nur geringfügig von der Wassertemperatur abhängt. Wir gehen davon aus, dass die Prüfbedingungen in situ die Anwendung des Darcy Gesetzes nicht zulassen. Folglich bewirkt die Temperaturkorrektur einen systematischen Fehler im Ergebnis.

Sowohl der europäische als auch der „Yverdon“ Drainometer liefern Werte, die in einer graphischen Darstellung ungefähr linear zueinander stehen. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,88. Dank dieser Korrelation ist es möglich, die bisherigen in der Norm SN 640 430b festgelegten Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeit (gemessen mit dem „Yverdon“ Drainometer) in Richtwerte (gemessen mit dem europäischen Gerät) zu übertragen.

Der Vergleich zwischen dem PA 8 und dem PA 11 zeigt eine positive Abhängigkeit zwischen der Wasserdurchlässigkeit und dem Grösstkorn. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass die Anforderungen an PA-Schichten mit unterschiedlichem Grösstkorn nicht identisch sein sollten.

> Summary

The experimentations in situ have shown that the standard measuring device as described in EN 12697-40 gives full satisfaction. The width of the contact zone between the apparatus and the surface ensures good watertightness. The sensitivity of the measurement lies within an order of magnitude of one second and can be considered as high. The repeatability of the data has been estimated to be equal to 3 %.

For the calculation of the hydraulic conductivity, based on the outflow time, a temperature correction has to be applied. The correction allows for the change in viscosity of water as a function of temperature. In practice however such a dependency between outflow time and temperature can scarcely be observed. We assume that Darcy's Law is not valid for in situ experimental conditions. As a consequence the temperature correction introduces a bias to the result.

Both European and "Yverdon" drainometers provide results with a rough linear dependency and a correlation coefficient of 0.88. Equivalent guidance values for relative conductivity have been established in accordance with the requirements of the Swiss standard SN 640 430b.

A comparison between PA 8 and PA 11 has shown that the hydraulic conductivity increases with the dimension of the maximum aggregate size. From this observation we deduce that the requirements for drainability should be adapted to the type of hot mix asphalt.

> Remerciements

Cette expérimentation in situ d'un drainomètre récemment normalisé en Europe a été essentiellement financée par le Département des transports, de l'équipement et de l'environnement du canton du Valais. La VSS, la Commission de suivi ainsi que les auteurs du présent travail remercient vivement les autorités valaisannes de leur soutien et de leur intérêt pour le sujet.

Par ailleurs, les auteurs souhaitent remercier en particulier Michel Pittet, Stefan Aebersold et Claude Bron, respectivement président et membres de la Commission de suivi, pour leurs contributions personnelles, leur appui et leur disponibilité.

Oberbuchsiten, 31 juillet 2008

> Introduction

Les enrobés bitumineux poreux PA sont perméables ; les pores occupent entre 15 et 28 % du volume et environ 70% des vides sont communicants [14]. La mesure de leur conductivité hydraulique, soit au moment de la réception de la chaussée, soit dans le cadre d'un suivi périodique, permet de contrôler leur capacité à drainer (évacuer par infiltration) les eaux apportées par les précipitations ou à absorber le bruit émis par l'interaction pneumatique/chaussée [7]. En effet, ce type de revêtement est fort apprécié pour le confort de conduite, la sécurité et la qualité acoustique qu'il offre aux usagers et riverains de la route. En particulier, du fait de leur drainabilité, ils améliorent la visibilité diurne et nocturne en atténuant les projections d'eau et l'éblouissement. Ils sont également adoptés dans la lutte contre le bruit car ils réduisent de façon perceptible la gêne sonore du trafic grâce à leur bonne absorption acoustique. En revanche, comparé à un béton bitumineux conventionnel, leur utilisation comme couche de roulement implique pour le maître d'ouvrage des surcoûts dus à un système d'évacuation de l'eau et à un service hivernal plus contraignants. De plus, le colmatage des pores, surtout sur les routes à circulation lente, diminue progressivement leurs caractéristiques acoustiques et hydrauliques.

Avant la mise en place, début 2008, d'une gestion nationale des autoroutes, certains cantons en faisaient largement usage tandis que d'autres demeuraient plus réticents (Fig.1). A l'avenir, leur utilisation comme couche de roulement sur autoroute fera l'objet d'une analyse coût-avantage par les services techniques fédéraux dans le cadre d'un vaste programme de lutte contre le bruit. En effet, dans certains secteurs particulièrement critiques, l'enrobé poreux est actuellement le seul revêtement qui permette de passer durablement sous le seuil d'immission sonore fixé par la loi [5].

Avec l'entrée en vigueur des normes d'essai européennes, plusieurs méthodes d'essai normalisées en Suisse doivent être remplacées. Si le nouvel essai européen diffère sur de nombreux points de ce qui se faisait jusqu'alors en Suisse, les résultats ne sont pas comparables et, par conséquent, les exigences minimales et/ou maximales définies par les normes suisses deviennent caduques. C'est notamment le cas de l'essai de drainabilité des enrobés poreux PA: les appareils d'essai ne fonctionnent pas selon un même régime d'écoulement et, par conséquent, fournissent des paramètres hydrauliques d'inégales grandeurs physiques.

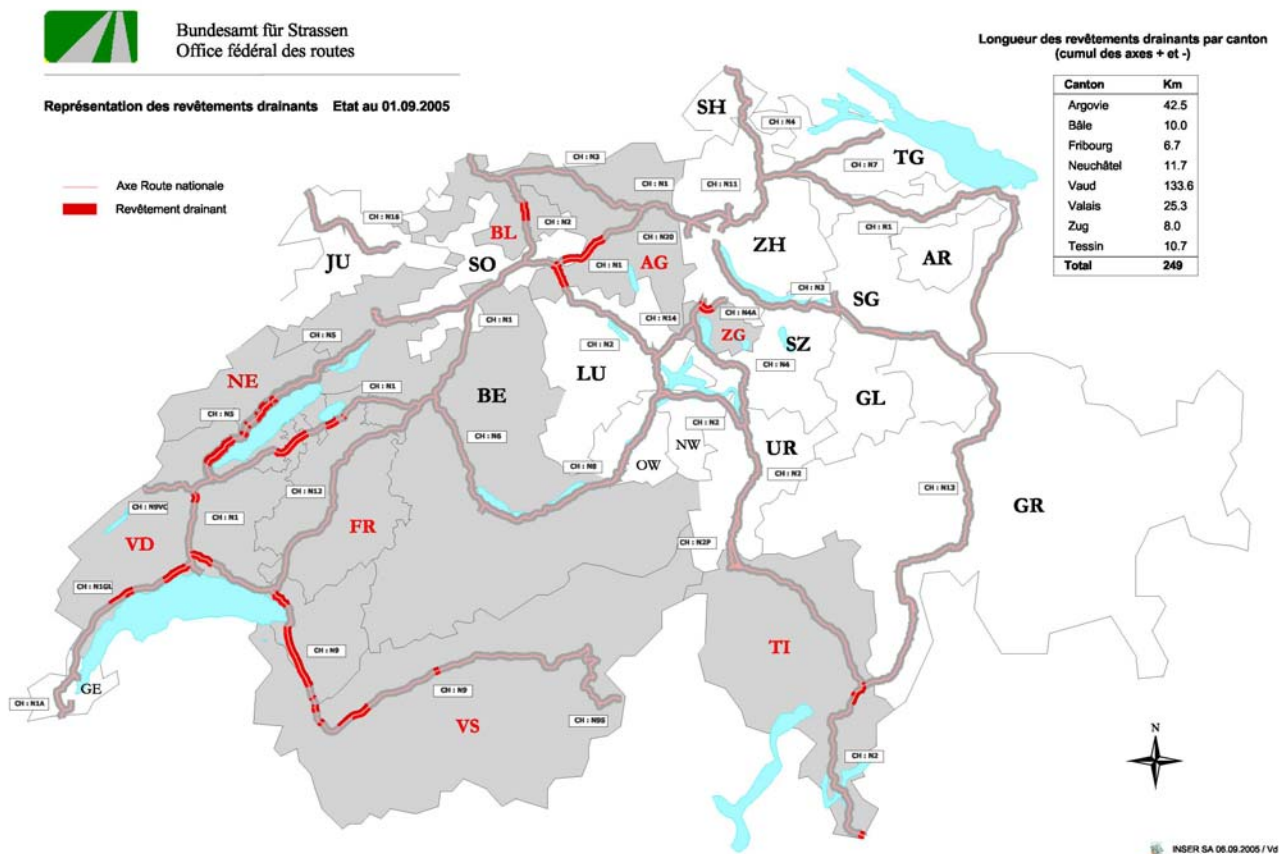
Le présent travail examine les conditions d'utilisation du nouvel appareil européen et fournit plusieurs séries de mesures réalisées in situ avec les deux drainomètres suisse et européen. La mise en parallèle des résultats doit servir à définir de nouvelles valeurs minimales de conductivité hydraulique pour, ensuite, les soumettre aux commissions d'experts VSS chargées d'élaborer ou d'adapter les normes.

L'utilisation d'une même méthode de mesure de la drainabilité dans tout l'espace européen permettra, à l'avenir, de comparer les valeurs et, surtout, de normaliser une

gamme de revêtements silencieux à l'échelle du continent. Ici, l'important est d'harmoniser les méthodes de prédiction du bruit dus au trafic et de délivrer un label de conformité aux normes ou recommandations ayant trait à la qualité acoustique des revêtements.

Fig. 1 > Répartition des sections d'autoroute en PA.

En 2007, la Suisse compte 236 km d'autoroute et 34 km de route cantonale recouverte d'enrobé poreux PA. Ce type de surface a connu un engouement particulier dans le canton de Vaud.



OFROU (2005)

Souvent on emploie drainomètre comme synonyme de perméamètre. Dans le présent rapport une distinction sémantique sera faite.

Remarque sémantique

- Perméamètre : appareil de mesure du coefficient de perméabilité (vis-à-vis de l'eau ou de tout autre fluide) d'un matériau sur échantillon en laboratoire.
- Drainomètre : appareil de mesure de la capacité drainante in situ d'un revêtement de chaussée.

1 > Objectifs

L'objectif principal consiste à fournir aux commissions de normalisation des données leur permettant de substituer l'exigence minimale de débit actuellement en vigueur par une conductivité hydraulique minimale équivalente en termes de perméabilité. En second, il s'agit de cerner les points critiques de la norme et de tester les fonctionnalités du nouvel appareil.

1.1 Contrôle des fonctionnalités de l'appareil

Après avoir recherché, en vain, en Allemagne, en France et en Italie, un fournisseur en situation de livrer le nouveau drainomètre, nous avons fait construire un prototype conforme à la norme EN 12697-40 par la société IGM, à Magny les Hameaux, en France. D'autre part, une courte enquête auprès des principaux laboratoires routiers en Europe montre que personne ne semble travailler avec cet appareil. Une situation inédite, puisqu'une norme propose une méthode de mesure pour laquelle les expériences pratiques préalables seraient inexistantes.

Afin de remédier à cette lacune et nous familiariser avec la méthode, il est prévu de réaliser un certain nombre de manipulations préliminaires qui permettront d'estimer les performances de l'appareil. Il s'agit, notamment, de déterminer la reproductibilité et la répétabilité, d'estimer la sensibilité de mesure, d'évaluer la maniabilité, de vérifier l'étanchéité et de mesurer la dureté du joint.

Une particularité intéressante de la norme EN 12697-40 consiste à corriger le temps d'écoulement in situ en ramenant cette valeur à ce qu'elle serait, théoriquement, si la température de l'eau était égale à 20 °C. La vérification de la réalité physique et l'évaluation de la pertinence de cette correction de température représentent un pan important de ce mandat de recherche.

1.2 Estimation des spécifications équivalentes

La norme suisse SN 640 430b [3] définit une perméabilité minimale pour les revêtements poreux neufs. Celle-ci s'exprime en litres par minute et représente un débit mesuré à charge constante. Pour la méthode d'essai européenne introduite il y a peu, les commissions VSS 5.01 et 5.09 doivent entériner le remplacement des exigences actuelles par des prescriptions, exprimées en s^{-1} , qui représentent une conductivité hydraulique mesurée à charge variable. Une campagne d'essais in situ avec les deux

drainomètres, suisse et européen, permettra de collecter les données nécessaires. Celles-ci seront mises à la disposition des commissions d'experts chargées de la normalisation.

2 > Etat de la technique et de la normalisation

Il règne en Europe et en Suisse une grande diversité de méthodes de mesure. En Suisse, très souvent, l'appareil normé a fait l'objet d'adaptations pratiques. La nouvelle norme EN, bien qu'entrée en vigueur, semble peu suivie dans les pays de l'UE.

2.1 Travaux antérieurs

Une étude OFROU [12] fait l'inventaire des drainomètres utilisés en Europe au début des années 90 et présente des tests comparatifs réalisés in situ avec une sélection de cinq d'entre eux. A la lecture du rapport, il apparaît que le drainomètre « Autun » manuel doit être à l'origine de l'appareil européen. De conception similaire, les deux appareils ne se distinguent que par des détails, notamment, la surface de mesure, la géométrie du bouchon, les dimensions du joint ou la présence d'un tube d'évent. A noter que le drainomètre « Autun » manuel fait l'objet en France d'une norme [4]. Les tests comparatifs, dans leur ensemble, montrent un faible ajustement entre les résultats. Les auteurs mettent cette observation sur le compte des différentes qualités de joint. La comparaison des mesures des drainomètres « Yverdon » [3] et « Autun » manuel, cependant, indique une corrélation satisfaisante. Un résultat qui laisse présager une concordance identique entre les drainomètres « Yverdon » et européen.

Le Service des routes et des cours d'eau du canton du Valais a réalisé, en 2001, un examen de la perméabilité des sections PA de l'autoroute A9 [8]. La section la plus ancienne remonte à 1991. Les mesures de réception avaient été réalisées par cinq laboratoires à l'aide de trois types de drainomètre. Le rapport montre la difficulté qu'il y a, dans ces conditions, à suivre l'évolution de la perméabilité en fonction de l'âge du revêtement et à comparer les performances des sections entre elles. Néanmoins, pour se sortir de cette impasse, l'auteur propose une comparaison qualitative des résultats obtenus avec deux drainomètres, l'un à régime transitoire, l'autre à régime stationnaire. Plusieurs mesures comparatives réalisées dans le cadre du présent travail l'ont été sur les mêmes sections PA de l'autoroute A9. A ce titre, elles fournissent un état des lieux de la drainabilité pour l'année 2007.

Le développement en France du drainomètre Autun manuel a permis à la norme NF P-98-254-3 de voir le jour en 1993. Bien que les appareils NF et EN soient semblables, la norme NF ne prévoit pas de correction en fonction de la température de l'eau. La proposition d'introduire une correction de température n'est venue que plus tard, en 1995, à la suite de mesures effectuées en laboratoire avec un perméamètre réglé en température [10, 11].

Etat de la normalisation

En Suisse, la méthode de mesure de la drainabilité et les spécifications sont normées depuis 2001. Cette norme (méthode de mesure et exigences) est basée sur les expériences du Service des routes nationales du canton de Vaud de 1991 à 1995. L'appareil de mesure est décrit au paragraphe 3.1. La norme actuellement en vigueur [3] définit des valeurs individuelles et moyennes minimales en fonction du type d'enrobé poreux. Ces valeurs indiquent un débit exprimé en litres par minute. Elles sont données au Tab. 1.

Tab. 1 > Exigences de drainabilité des couches PA.

Valeurs minimales de débit en fonction du type de PA. A noter que, pour les couches de roulement et de liaison, les exigences sont identiques et indépendantes de la dimension du plus gros granulats.

Type de PA	Valeur individuelle minimale [l/min]	Valeur moyenne minimale [l/min]
PA 8, PA 11	13	15
PA B 16, PA B 22, PA B 32	13	15
PA S 16, PA S 22, PA S 32	8	10

Source : SN 640 430b [3]

A partir de 1997, le Service des routes nationales du canton de Vaud, fort de ses expériences pratiques et des résultats de mesures de chantiers, a décidé d'évaluer la performance des enrobés poreux selon des spécifications plus sévères. Ici la couche de roulement en PA 8 ou PA 11 doit offrir au moment de la réception de l'ouvrage des valeurs individuelle et moyenne de, respectivement, 16 l/min et 18 l/min. Une règle empirique veut que la perméabilité de la couche de roulement diminue de moitié après deux années de service. La règle plus sévère édictée par le canton de Vaud vise à assurer, après deux ans de service, une perméabilité encore satisfaisante.

Il existe deux exemples de pratique ne respectant pas la norme SN 640 430b :

- Certains laboratoires travaillent avec un drainomètre à charge variable de type IVT (voir [12] pour la description de l'appareil). Les spécifications appliquées à cet essai sont issues d'un rapport OFROU datant de 1991 [13].
- Une Notice technique de l'OFROU [6] concernant les revêtements poreux peu bruyants préconise une teneur en vide réduite en sorte que pour cette catégorie de PA (semi-poreux), destinée avant tout à l'absorption acoustique, les exigences de drainabilité devraient être moins élevées.

L'avant-propos national SN 670 440 de la norme EN 12697-40:2005 est officiellement entré en vigueur le 1^{er} février 2007. Il remplace l'annexe 2 de la SN 640 430 et devrait être complété par une annexe nationale dans laquelle seraient définies les nouvelles exigences minimales en matière de drainabilité.

3 > Appareillage

Les appareils européen et suisse se distinguent essentiellement quant à leur régime, transitoire dans le cas du premier et stationnaire dans le cas du second, la dimension des orifices, la dimension et la qualité des joints. L'exploitation des résultats d'après la norme européenne fait intervenir des facteurs de correction dont la norme suisse ne se préoccupe pas.

3.1 Drainomètre « Yverdon »

3.1.1 Description générale

Le drainomètre décrit dans la norme SN 640 430b [3] est un modèle développé en 1991 par le laboratoire du Service des routes du canton de Vaud. Ce laboratoire étant situé à Yverdon, il est connu sous la dénomination drainomètre « Yverdon ». L'appareil et ses dimensions sont présentés à la Fig. 2.

Le joint en mastic synthétique de type Bostik 35024 requis par la norme est un joint très malléable qui est formé et mis en place dans la rainure prévue à cet effet avant chaque essai. Au moment de l'application de la charge, le joint épouse le profil de la surface de contact. La charge est celle du poids d'un opérateur d'environ 70 kg qui pose ses pieds sur le socle.

Dans le cas particulier du modèle IMP de l'appareil « Yverdon », le joint est fixe. Un peu plus rigide que celui prévu par la norme, il est collé dans la rainure et remplacé à intervalles réguliers. Ce système fixe permet de gagner du temps.

L'orifice percé dans le socle à un diamètre de 40 mm. La surface de mesure sous-jacente est nettement plus grande, avec un diamètre de 240 mm.

La mesure du débit est réalisée de façon indirecte. Un premier opérateur règle le débit jusqu'à ce que la hauteur d'eau se stabilise au niveau de la graduation à 120 mm. Puis, en veillant à conserver le même débit, un second opérateur mesure le temps nécessaire pour remplir un récipient avec 2,0 litres d'eau. Dans le cas de l'appareillage IMP, cette procédure a été remplacée par une mesure directe du débit à l'aide d'un débitmètre électronique. Le débitmètre indique le débit à 0,01 l/min près avec une précision de 2 %. La plage de mesure du débit est comprise entre 3,8 l/min et 37,9 l/min. C'est la raison pour laquelle nous ne mesurons pas les débits inférieurs à 4 l/min.

Tab. 2 > Description de la qualité des joints.

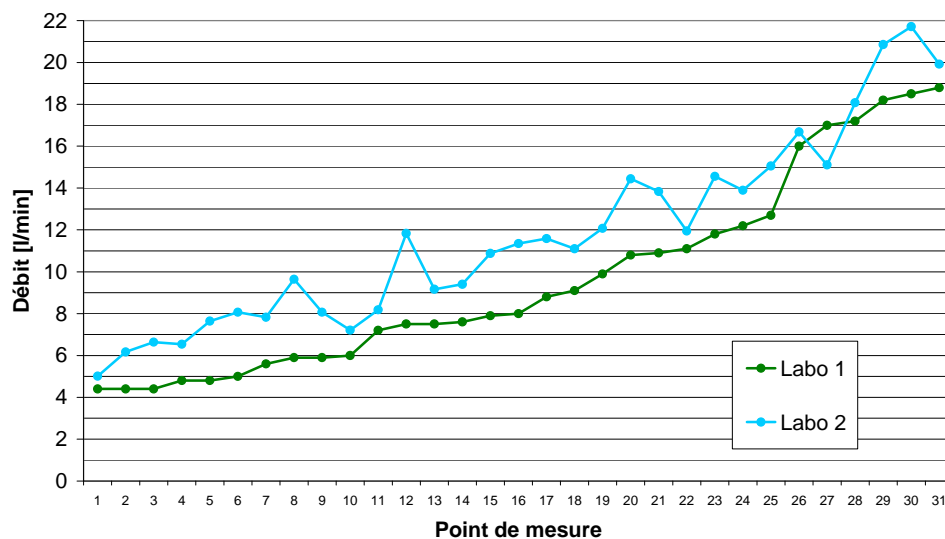
Les trois laboratoires qui participent aux essais croisés possèdent le même appareil « Yverdon » mais emploient des joints dont la rigidité est très différente.

Laboratoire	Type de joint	Rigidité, mode de fixation
Laboratoire 1	Bostik 35024	Très malléable, amovible
Laboratoire 2	Mastic 20/40 N, Mastix SA, Lausanne	Semi-rigide, collé
Laboratoire 3	Joint DD-BAV-10, Hilti (Suisse) SA	Rigide, collé

Les mesures croisées effectuées entre les laboratoires 1 et 2 mettent en évidence un écart systématique, indépendant de la capacité drainante du revêtement. En effet, l'appareil du laboratoire 2 mesure des valeurs de débit supérieures de 2 l/min par rapport à l'appareil du laboratoire 1 (Fig. 3). Cet écart est à mettre sur le compte d'une différence dans la qualité du mastic qui forme les joints. L'appareil du laboratoire 1 est muni d'un joint très malléable qui colmate efficacement les irrégularités de la surface et réduit les fuites horizontales. Par conséquent, le débit est relativement faible. A l'inverse, le joint plus rigide collé sur l'appareil du laboratoire 2 est moins efficace en matière de colmatage; d'où des fuites horizontales plus importantes, qui se traduisent par une augmentation quasi systématique du débit.

Fig. 3 > Mesures croisées avec deux types de joint.

Les résultats indiquent une différence moyenne de débit de 2 l/min entre les drainomètres des laboratoires 1 et 2. Il faut imputer cette différence à la qualité du mastic. Le mastic du laboratoire 1, très malléable, colmate plus efficacement les anfractuosités et réduit d'autant mieux les fuites horizontales.



Les mesures croisées effectuées entre les trois laboratoires sur deux plaques de contrôle en PA 11 confirment les résultats précédents : plus le joint est rigide, plus les fuites horizontales sont élevées (Tab. 3).

Tab. 3 > Mesures croisées avec trois types de joint.

Débits mesurés sur deux plaques de contrôle en fonction de la qualité du joint. Le joint rigide du laboratoire 3 favorise les fuites horizontales. Le débit dépasse de 20 l/min les résultats obtenus avec des joints mous.

	Laboratoire 1 [l/min]	Laboratoire 2 [l/min]	Laboratoire 3 [l/min]
Plaque 1	18,5	21,7	40
Plaque 2	18,2	20,9	40

Cette constatation rejoint une autre observation faite in situ sur un enrobé PA 8. La comparaison de mesures effectuées à l'aide des appareils des laboratoires 2 et 3 montre, là aussi, un surpassement moyen de 20 l/min.

Toutes les mesures croisées citées dans ce paragraphe illustrent le rôle primordial du joint sur le résultat de l'essai. Les débits mesurés à l'aide de différents appareils sont comparables à condition d'employer des joints d'égale rigidité. Il faut rappeler ici que les exigences minimales de perméabilité à l'eau définies dans la norme SN 640 430b ont été établies à l'aide d'un appareil muni d'un joint Bostik 35024, c'est-à-dire un mastic dont la rigidité est comparable à celle d'une pâte à modeler. Il paraît donc capital que tous les laboratoires accrédités de Suisse emploient ce type de joint.

3.2

Drainomètre européen

Le drainomètre décrit dans la norme EN 12697-40:2005 [1] est un modèle inspiré par le drainomètre de chantier à charge variable « Autun » manuel qui fait l'objet d'une norme en France [4]. L'appareil et ses dimensions sont présentés à la Fig.4.

Le joint en caoutchouc cellulaire doit avoir une dureté Shore 00 de 30 à 45 et une résistance à la rupture de 0,9 MPa. Dans le cas particulier de l'appareil IMP, les mesures de dureté Shore 00 à 23 °C indiquent une dureté de 41. Nous verrons au paragraphe 5.1 comment cette valeur varie en fonction de la température. L'épaisseur du joint est de 20 mm et sa largeur de 100 mm. Cette dernière caractéristique représente un atout puisqu'elle confère au drainomètre européen une très bonne étanchéité horizontale.

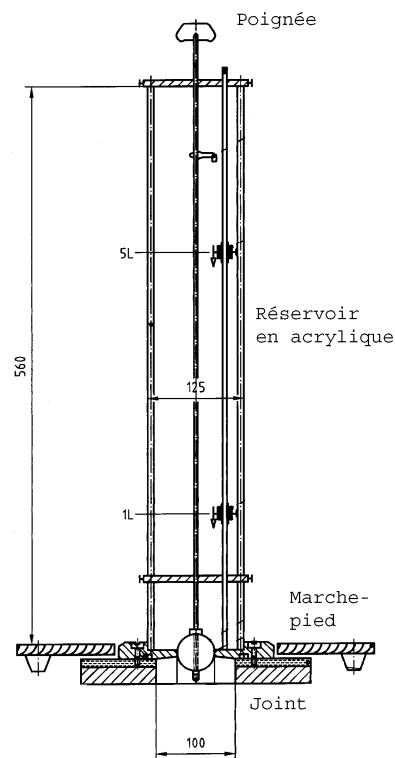
Le diamètre de l'orifice à la base est égal à 48 mm. La surface de revêtement à travers laquelle l'eau s'infiltré (surface de mesure) possède un diamètre de 100 mm, ce qui est, comparé au drainomètre « Yverdon », relativement petit.

Le marche-pied doit être lesté d'une charge uniformément répartie et comprise entre 1000 et 2000 N. Nos mesures ont été réalisées avec quatre masses de 300 N chacune,

soit une charge totale de 1200 N. Une solution qui, pour des raisons de dépassement de la charge maximale indiquée par la SUVA, n'est pas recommandable.

Fig. 4 > Schéma détaillé du drainomètre européen.

L'appareil est constitué d'un tube en verre acrylique fixé sur un socle circulaire en acier. Il mesure le débit à pression hydraulique variable. Des capteurs de niveau relèvent le temps d'écoulement de 4,0 litres d'eau. Le joint est formé par un caoutchouc cellulaire d'épaisseur 20 mm. Sa largeur est égale à 100 mm.



EN 12697-40

Les temps d'écoulement sont mesurés à l'aide de deux sondes de niveau fixées à la hauteur de 5 litres, ainsi que de 1 litre, et reliées à un boîtier électronique. Les résultats in situ doivent être par deux fois corrigés au moment du dépouillement. Les corrections concernent:

Facteurs de correction

- le temps d'écoulement sans entrave propre à chaque appareil (temps de résistance série à l'écoulement)
- la viscosité de l'eau en fonction de la température (facteur de correction de température).

Le résultat final est exprimé sous la forme d'une conductivité hydraulique, dite relative car elle s'exprime en fonction de paramètres invariables qui sont le volume d'eau infiltré, la charge hydraulique et la surface de mesure.

Le principe du calcul de la conductivité hydraulique relative HC est décrit par l'équation:

$$HC = 1/((t_{\text{moyen}}/f) - r) \quad [s^{-1}]$$

avec t_{moyen} la moyenne d'une série de 10 mesures in situ du temps d'écoulement en s, f le facteur de correction tiré de la norme EN 12697-40 [1] et r le temps de résistance à l'écoulement en s. Dans le cas de l'appareil IMP, r est égal à 1,4 s.

Le symbole HC désigne l'abréviation anglaise de Hydraulic Conductivity. La conductivité hydraulique relative HC est indiquée à $0,01 \text{ s}^{-1}$ près et prend des valeurs comprises entre $0,00 \text{ s}^{-1}$ et $0,08 \text{ s}^{-1}$. Les aspects théoriques de la détermination de la conductivité hydraulique de matériaux poreux saturés sont exposés au paragraphe 5.2. Nous verrons également dans ce même paragraphe comment du seul fait de la correction de la température on induit une erreur d'appréciation du temps d'écoulement.

Contrairement à la norme suisse, la norme européenne n'indique pas de limite de température, ni pour l'eau, ni pour l'air, ni pour la surface de la chaussée. A titre indicatif, la température de l'eau se situe dans une plage comprise entre 1°C et 30°C , sans que cette dernière valeur représente une limite supérieure. En définitive, la méthode d'essai s'applique sans restriction pour autant que l'eau ne gèle pas.

Notons l'existence d'un essai de perméabilité en laboratoire pour lequel la norme (EN 12697-19 [2]) prévoit de réaliser les mesures à température ambiante, dans des limites comprises entre 15°C et 25°C . Ici, l'influence de la température de l'eau sur le débit est supposée négligeable et les résultats s'interprètent sans correction de la température.

4 > Mesures comparatives sur routes

Les essais in situ englobent des revêtements poreux d'inégale qualité; certains sont usés ou colmatés, d'autres neufs, d'autres encore sont constitués d'un mélange granulaire 0/8 mm ou 0/11 mm. Une série d'essais comparatifs comporte dix points de mesure répartis sur un tronçon d'une centaine de mètres. A chaque point élémentaire, la capacité drainante est mesurée en premier avec le drainomètre européen, puis avec le drainomètre « Yverdon ».

4.1 Choix des tronçons

Le choix des tronçons s'est principalement porté sur les nombreuses sections revêtues de PA 11 des autoroutes A2, A5 et A9. Le revêtement PA 8 étant plus rare, il n'est représenté que par deux tronçons sur un total de treize. L'épaisseur de couche des surfaces sélectionnées est comprise entre 30 et 40 mm. Certains revêtements étaient neufs le jour des mesures, d'autres datent des années 90, le plus vieux d'entre eux ayant été posé en 1991. Le Tab. 4 présente l'ensemble des revêtements sélectionnés.

Tab. 4 > Description des revêtements sélectionnés.

Indications du type d'enrobé poreux, de l'épaisseur de couche, de l'année de pose, de l'emplacement géographique et de la température de l'eau du réservoir.

Type	Épaisseur de la couche [mm]	Année de pose	Secteur	T eau [°C]
PA 8	39	neuf	RC Salgesch	17
	30	2005	A40 Zug	8
PA 11	35-40	neuf	A2 Erstfeld	18
	35	neuf	A5 La Neuveville	21
	40	neuf	plaques de contrôle VD	19
	40	2005	A5 Grandson	19
	40	2005	A2 Zofingen	13
	40	2000	A9 Charrat	12
	40	1999	A9 Riddes	12
	40	1998	A9 Evionnaz	10
	40	1997	A9 Saxon	12
	40	1996	A9 Granges	12
	40	1993	A9 St-Maurice	10
40	1991	A9 Vernayaz	10	

4.2

Disposition des points de mesure sur la chaussée

Les points de mesure, au nombre de dix, sont répartis sur une diagonale parcourant la largeur de la chaussée ou de la voie de circulation. Dans ce dernier cas, par exemple, les points sont distants de 0.40 m perpendiculairement à l'axe de la route et de 20.0 m parallèlement à cet axe. Selon la longueur et la largeur à disposition, ces distances ont quelquefois été adaptées.

Font exception à cette règle, les essais sur la A40 à Zug, les essais sur la A2 à Zofingen où nous ne disposons que de 3 points de mesure et les points cloutés sur la A5 à Grandson où nous ne disposons que de 7 points de mesure. Dans les trois cas, il s'agit de mesures réalisées dans le cadre d'un projet plus ancien.

4.3

Méthodologie à chaque point de mesure

A chaque point élémentaire, la capacité drainante est mesurée en premier avec le drainomètre européen, puis avec le drainomètre « Yverdon ». Les deux mesurages suivent scrupuleusement les indications des normes EN 12697-40 [1] et SN 640 430b [3]. Les paragraphes suivants décrivent le détail de chacune des procédures d'essai.

L'orifice du drainomètre européen étant ouvert, son réservoir est rempli d'eau dans le but de saturer une première fois les pores de l'échantillon d'enrobé sous-jacent. L'orifice est fermé et le réservoir est complètement rempli, c'est-à-dire bien au dessus de la sonde des 5 litres. L'orifice est ouvert et l'opérateur contrôle la montée des bulles d'air et la baisse simultanée du ménisque. Si à l'approche de la sonde des 5 litres, les bulles d'air restent volumineuses et/ou nombreuses, il faut immédiatement rajouter de l'eau. L'essai peut valablement démarrer aussitôt que la surface du ménisque n'est plus perturbée par des bulles à l'approche de la sonde des 5 litres.

Drainomètre européen

A chaque point, la mesure est répétée et le second temps d'écoulement t_2 est comparé au premier t_1 . La valeur absolue de la différence doit respecter la condition

$$|t_1 - t_2| < 0.05 \cdot (t_1 + t_2)/2$$

La mesure est répétée jusqu'à ce que la différence entre deux temps d'écoulement consécutifs soit inférieure à 5 % du temps d'écoulement moyen.

Par ailleurs, l'opérateur détermine la température de l'eau dans le réservoir, la température de la surface d'essai sèche et, facultativement, la température de l'air. Il schématise la disposition des points de mesure sur le tronçon dont il faut déterminer la conductivité hydraulique relative.

Le réservoir du drainomètre « Yverdon » est d'abord rempli abondamment, puis le débit est ajusté à l'aide du débitmètre en sorte que le ménisque se stabilise à la hauteur de mesure normalisée (170 mm). La valeur du débit est relevée après 10 secondes de

Drainomètre « Yverdon »

stabilisation. A chaque point élémentaire, la mesure est répétée, c'est-à-dire le réservoir est vidé, puis rempli bien au-dessus du niveau normalisé avant de stabiliser à nouveau le ménisque au niveau normalisé. La moyenne des deux mesures consécutives donne le résultat. Celui-ci est indiqué à 0,1 l/min près. Par ailleurs, l'opérateur détermine la température de la surface d'essai sèche et la température de l'air.

5 > Essais en laboratoire

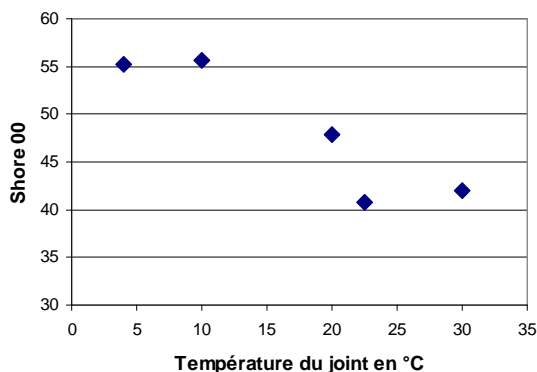
Les essais en laboratoire visent à estimer l'influence de la température du joint et de l'eau du réservoir sur le temps d'écoulement, à vérifier la conformité de l'appareillage aux prescriptions de la norme, à déterminer la fidélité des résultats. Le chapitre est clos par une représentation graphique des différentes sources d'incertitude.

5.1 Dureté Shore du joint

D'après la norme EN 12697-40 [1], le joint en caoutchouc cellulaire doit avoir, à 23 °C, une dureté Shore 00 de 30 à 45. Le joint de l'appareil IMP possède à cette température une dureté de 41. Il se trouve ainsi dans la plage supérieure de l'intervalle prescrit. En répétant les mesures à différentes températures comprises entre 4 et 30 °C, on constate, à la Fig.5, une nette augmentation de la dureté dès que la température passe sous 20 °C. L'effet de cette rigidification sur le temps d'écoulement pourrait être sa diminution. Cependant au vu des résultats (Fig.9), sachant qu'à Salgesch et à La Neuveville la température de l'air avait dépassé 23 °C, tandis qu'à Erstfeld elle s'élevait à environ 16 °C, on ne constate rien qui puisse laisser penser que la température du joint ait un impact sur le temps d'écoulement. En somme, la largeur de la zone de contact entre le joint et la chaussée garantit une bonne étanchéité et compense d'éventuels changements de dureté.

Fig. 5 > Dureté Shore 00 du joint en fonction de sa température.

La norme EN 12697-40 requiert à température ambiante (23 °C) une dureté Shore 00 comprise entre 30 et 45. Avec une dureté Shore 00 égale à 41, le joint de l'appareil est conforme à la norme. On observe une nette augmentation de la dureté du caoutchouc cellulaire à $T < 20$ °C.



5.2 Facteur de correction de la température

Pour éliminer l'effet de la dépendance en température de la viscosité de l'eau sur le temps d'écoulement, la norme EN 12697-40 prévoit un facteur de correction de température. La température de référence ayant été fixée à 20 °C, le temps d'écoulement in situ, mesuré alors que la température de l'eau peut varier de beaucoup, est rapporté à la viscosité théorique de l'eau à 20 °C. Dans la Fig.6 sont portées la viscosité dynamique de l'eau μ en fonction de la température T en Celsius. La courbe a été calculée d'après l'équation

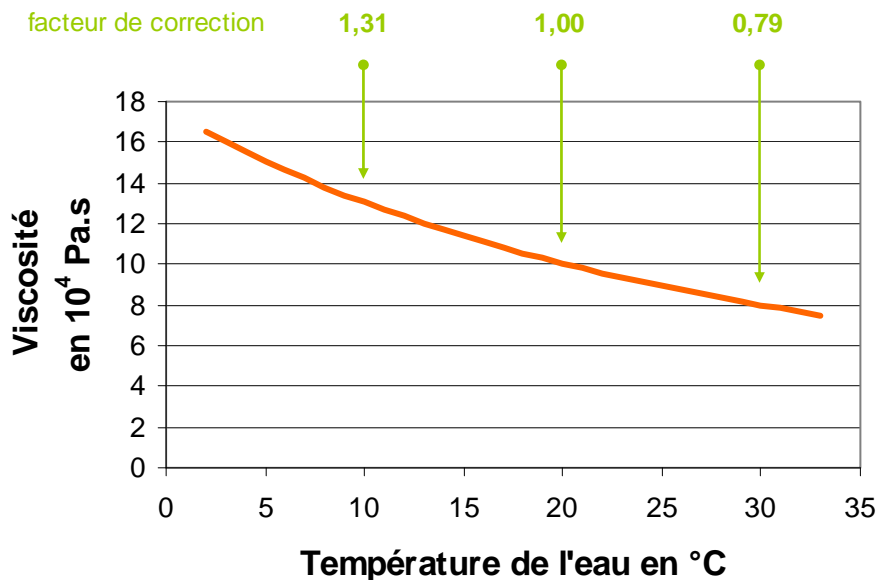
$$\mu = 2,414 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{247,8 / (T-140)} \quad [\text{Pa.s}]$$

avec T en Kelvin [15].

On constate d'emblée que la variation est importante et que nous avons, par exemple, une augmentation de la viscosité de 50% entre 20 et 5 °C.

Fig. 6 > Viscosité de l'eau en fonction de la température.

La viscosité de l'eau diminue avec l'augmentation de sa température. Le calcul de la conductivité hydraulique tient compte d'un temps d'écoulement corrigé à 20 °C. A cet effet, le temps d'écoulement est divisé par le facteur de correction dont 3 exemples ont été ajoutés au graphe.



EN 12697-40

La loi de Darcy décrit l'écoulement dans un milieu poreux saturé. Elle relie un débit Q par unité de surface à une viscosité selon

$$Q = k/\mu \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta H/\Delta z \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

avec k la perméabilité en m^2 , μ la viscosité dynamique du fluide en Pa.s , ρ la masse volumique en kg.m^{-3} , g l'accélération de la gravité en m.s^{-2} et $\Delta H/\Delta z$ le gradient de charge hydraulique en m.m^{-1} .

La perméabilité k est une propriété secondaire du milieu qui ne dépend que de la tortuosité et de la connectivité des pores. Elle ne prend en compte ni les propriétés physiques du fluide (viscosité, densité), ni l'interaction entre le fluide et les surfaces du solide. Par conséquent, comme cela a été montré par Di Benedetto et al. [10], la perméabilité est indépendante de la température. Ainsi, toutes choses étant égales par ailleurs, le temps d'écoulement est directement proportionnel à la viscosité, elle-même dépendante de la température de l'eau. Par souci d'exactitude, il faut remarquer que le temps d'écoulement est inversement proportionnel à la densité de l'eau. Cet aspect est, en général, négligé.

On définit la conductivité hydraulique K , ou le coefficient de perméabilité, comme

$$K = k/\mu \cdot \rho \cdot g \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

et la conductivité hydraulique relative K_{rel}

$$K_{\text{rel}} = 1/t \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

avec t le temps d'écoulement en s , en admettant que le volume d'eau, la surface d'infiltration et le gradient de charge hydraulique demeurent inchangés d'un essai à l'autre.

D'après ce qui précède, la température de l'eau joue un rôle essentiel. Nous devrions observer une nette augmentation du temps d'écoulement lorsque la température de l'eau décroît. A titre d'exemple, l'augmentation devrait être de l'ordre de 90% lorsque la température passe de 30 °C à 5 °C.

En pratique, cependant, nous avons observé que le temps d'écoulement est peu sensible à la température de l'eau se trouvant dans le réservoir. En effet, après avoir réalisé 6 séries de 5 mesures chacune sur une plaque de contrôle en PA 11, force est de constater que les variations du temps d'écoulement restent très inférieures aux estimations faites à partir de la courbe de la Fig.6. Rassemblés dans le Tab. 5, les résultats font apparaître une augmentation du temps d'écoulement de 8% seulement entre des mesures faites à 30...32 °C et des mesures faites à 4...7 °C.

La raison de ce décalage réside sans doute dans les conditions expérimentales. En effet, des mesures réalisées avec un perméamètre de laboratoire à charge constante, à écoulement vertical, dans des conditions de température stable et homogène [11], permettent de valider le rôle essentiel de la température sur le temps d'écoulement. En revanche, dans le cadre de la présente étude, les conditions expérimentales sont semblables à celles qui règnent sur un chantier ; elles sont mal appropriées pour assurer une bonne

homogénéité de la température le long du passage de l'eau. La température de la plaque de contrôle est différente de celle de l'eau du réservoir ; la température de l'appareil n'est pas contrôlée ; l'écoulement radial dans le volume d'enrobé conduit à un échange calorifique entre l'eau et la surface des pores. En bref, aucune température ne peut être maintenue constante in situ. Reste à savoir si ces imprécisions de température dues aux conditions d'essai permettent à elles seules d'expliquer l'absence d'ajustement car, il se pourrait également que la loi de Darcy ne soit pas applicable. En effet, le milieu n'est que partiellement saturé. Il faut considérer le front de l'écoulement qui est une surface libre et la résurgence d'eau à la périphérie du joint. De plus, il faut songer que la diminution de charge dans le réservoir conduit à une onde d'écoulement horizontal transitoire dans la zone saturée du revêtement. Et, finalement, l'eau du réservoir contient une quantité non négligeable d'air sous forme de bulles qui affectent aussi la viscosité. De manière générale, il nous semble très difficile de distinguer l'effet « viscosité » sur un système ouvert, dont les conditions aux limites ne sont pas stationnaires.

Tab. 5 > Temps d'écoulement en fonction de la température de l'eau.

Toutes choses étant égales par ailleurs, on constate que le temps d'écoulement mesuré est peu sensible à la température de l'eau. La correction introduit une grande disparité des résultats.

température de l'eau [°C]	température initiale de la plaque de contrôle [°C]	temps d'écoulement mesuré [s]	facteur de correction	temps d'écoulement corrigé [s]
4	7	29.5 ± 0.2	1.57	18.8
7	12	30.4 ± 0.2	1.43	21.3
15	19	29.9 ± 0.3	1.14	26.2
16	13	27.2 ± 0.3	1.11	24.5
32	13	27.3 ± 0.4	0.77	35.5
32	32	28.0 ± 1.0	0.77	36.4

En définitive, les manipulations sur la plaque de contrôle en modifiant les températures montrent que, pour le drainomètre européen, la variation du temps d'écoulement en fonction de la température de l'eau est très faible. Par conséquent, les facteurs de correction proposés dans la norme EN 12697-40 introduisent une erreur systématique importante. Une révision de la norme paraît incontournable.

En revanche, la correction de température pourrait contribuer à réduire l'incertitude de mesure de la méthode d'essai « Perméabilité des éprouvettes » définie par la norme EN 12697-19 [2]. La norme préconise que cet essai doit être exécuté à une température ambiante comprise entre 15°C et 25°C, sans donner de précision quant à la température de l'eau. Avec cet essai de laboratoire, les conditions opératoires sont réunies pour garantir et la saturation complète de l'éprouvette, et un écoulement stationnaire. Il y a donc tout lieu de croire que la loi de Darcy s'applique sans restriction et que, si tel est le cas, la viscosité de l'eau influence la valeur du débit. A titre d'exemple, d'après la courbe de la Fig.6, la perméabilité d'une éprouvette d'enrobé poreux augmenterait de 20% si, au lieu de d'exécuter l'essai à 15 °C (température de l'air et de l'eau), il l'était à 25 °C.

Temps de résistance à l'écoulement

Selon la norme européenne, chaque appareil possède un temps d'écoulement sans entrave qui lui est propre. Comme précédemment, ce temps a été mesuré en fonction de la température de l'eau afin d'estimer l'influence de la viscosité sur la vitesse d'écoulement. L'appareillage a été maintenu à une température de 19 °C pendant toute la durée des essais. Les résultats sont présentés dans le Tab. 6.

On constate que le temps d'écoulement mesuré est indépendant de la température de l'eau et donc de sa viscosité. Inutile donc d'appliquer à cette valeur, environ égale à 1,4 s, le facteur de correction tel que le prévoit la EN 12697-40 afin d'obtenir le temps de résistance série à l'écoulement r [s]. Dans Tab. 6, à chaque température expérimentale correspond un temps d'écoulement théorique calculé sur la base du temps d'écoulement à 20 °C multiplié par le facteur de correction. Selon la température de l'eau, le temps d'écoulement théorique est soit plus élevé soit plus faible que le temps mesuré qui, lui, est resté à peu près constant.

Tab. 6 > Temps de résistance à l'écoulement r .

Temps d'écoulement théorique par rapport au temps d'écoulement de référence à 20 °C, soit 1,4 s. La variation du temps d'écoulement théorique n'est pas validée par les mesures. L'introduction du facteur de correction est une source d'erreur.

température de l'eau [°C]	facteur de correction	temps d'écoulement théorique [s]	temps d'écoulement mesuré [s]	r [s]
2	1.67	2.3	1.4	0.8
10	1.31	1.8	1.4	1.1
14	1.17	1.6	1.6	1.4
20	1.00	1.4	1.4	1.4
37	0.69	1.0	1.4	2.0

Ces mesures du temps de résistance à l'écoulement en faisant varier la température de l'eau corroborent les résultats obtenus avec la plaque de contrôle en PA 11. La correction biaise la réalité physique. Par la suite, nous admettons pour l'appareil IMP un temps de résistance à l'écoulement constant et égal à 1,4 s.

Temps de fuite parallèle

Le temps de fuite parallèle a été établi sur une plaque de contrôle en béton bitumineux AC 8. Après 30 minutes d'écoulement, la perte d'eau est inférieure à 1 litre. L'essai a été interrompu. Nous estimons que le temps de fuite parallèle de l'appareil est négligeable.

5.5

Fidélité des résultats

La norme ne comprend aucune indication en matière d'incertitude de mesurage. Les résultats successifs obtenus avec le même opérateur, le même appareil et la même surface d'essai montrent que l'incertitude liée à la répétabilité se situe autour de 3%. La répétabilité a été estimée pour une étendue de 4 écart-types autour de la moyenne (intervalle de confiance de 95%) sur une série de 9 mesures d'après la définition,

$$\text{répétabilité} = 1,96 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{écart-type} \quad [\text{s}]$$

Les résultats sont rassemblés dans le Tab. 7.

Tab. 7 > Incertitude de mesurage.

Dispersion des temps d'écoulement liée à la répétabilité. L'incertitude est environ égale à 3%.

Mesure	Temps d'écoulement en s
1	27.3
2	27.2
3	27.1
4	27.2
5	27.1
6	26.9
7	26.5
8	26.4
9	26.9
Moyenne	27.0
Ecart-type	0.3
Répétabilité	0.9
Répétabilité relative	3.3%

5.6

Sources d'incertitude

La grandeur mesurée, le temps d'écoulement en s, est affectée par trois grandes catégories d'incertitude :

- L'appareillage qui est constitué du drainomètre, des sondes et du chronomètre.
- L'échantillonnage, soit dix fois 7850 mm², qui peut être plus ou moins représentatif du tronçon à évaluer.
- Les conditions ambiantes qui fixent les températures de l'eau, du revêtement et du joint.

En ce qui concerne l'appareillage, il faut relever les erreurs systématiques dus aux dimensions de l'appareil (par exemples, diamètre intérieur du joint de caoutchouc cellulaire qui est fixé à 100 ± 2 mm, diamètre intérieur du réservoir fixé à 125 ± 0,5

mm, diamètre de l'orifice $48 \pm 0,1$ mm) ou à des variables qui évoluent peu dans le temps et qui font l'objet d'un calibrage annuel (par exemples, le temps de fuite parallèle, la position des sondes de niveau). Par ailleurs, il y a la dérive non quantifiable de la rigidité du joint en fonction de l'âge.

Le temps d'écoulement dépend également du volume d'eau qui s'écoule à travers l'orifice du drainomètre. Ce volume, fixé par la norme à 4 litres, est légèrement réduit de la quantité plus ou moins importante d'air sous forme de bulles migrant de l'orifice vers la surface. De plus, la concentration d'air dans l'eau affecte la viscosité du fluide. En pratique, c'est l'opérateur qui, en veillant à ne pas débiter la mesure avant l'évacuation des bulles d'air, cherche à réduire au maximum cette source d'incertitude.

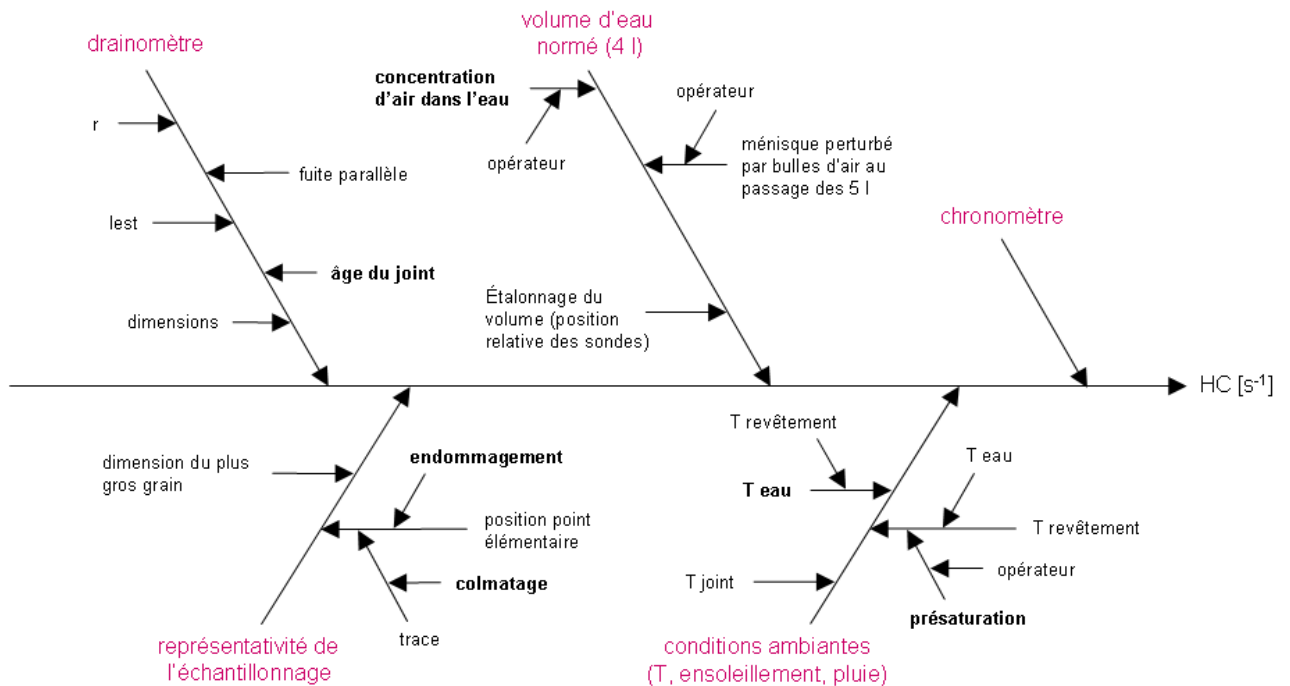
L'échantillonnage, c'est-à-dire la répartition régulière de dix points de mesure à travers la largeur de la chaussée, n'est représentatif que si le revêtement est neuf. (Notons qu'il faut s'attendre à un accroissement de la disparité des résultats entre les dix points élémentaires lorsque la dimension du plus gros grain augmente). Dans le cas d'une chaussée en service, les sources d'incertitude à chaque points de mesure sont nombreuses: les traces de roue, l'orniérage, le colmatage, les salissures et les endommagements ponctuels conduisent à une très grande disparité du temps d'écoulement. Pour qu'une telle série de mesures fasse sens, par exemple dans le cadre d'un suivi de la capacité drainante à moyen et long terme, il faut au préalable judicieusement choisir les points de mesure et si possible les « clouter ».

En ce qui concerne les conditions ambiantes, c'est la température de l'eau qui constitue la plus grande source d'incertitude. En effet, nous avons vu au paragraphe 5.2 dans quelle mesure la viscosité, et donc la température, influence le débit de l'eau à travers le réseau poreux de l'enrobé. Si l'étape de présaturation est suffisamment longue (voir [1], chiffre 6.3.5), l'échange calorifique entre l'eau du réservoir et les surfaces des pores conduit à une diminution progressive de la différence de température entre l'eau et le revêtement. La température initiale de l'eau étant toujours la même et la capacité calorifique de l'eau étant plus élevée que celle du bitume, on doit s'attendre à ce que la température du revêtement tende à s'approcher de la température de l'eau.

Les différentes sources d'incertitude sont représentées dans le diagramme général à la Fig.7 avec une estimation qualitative de l'importance de chacune d'elles.

Fig. 7 > Sources d'incertitude dans la détermination de HC.

Diagramme des différentes sources d'incertitude en omettant le facteur de correction de la température de l'eau. L'influence propre à chaque source d'incertitude sur la conductivité hydraulique relative HC est très variable ; les sources les plus significatives sont indiquées en caractères gras.



5.7

Synthèse

Si la température du joint en caoutchouc cellulaire est inférieure à 20 °C, celui-ci ne répond plus exactement à la spécification de la norme. La performance du joint ne semble pourtant pas souffrir de cet écart. Ce type de joint garantit une très bonne étanchéité. Au prix de quelques légères modifications, le drainomètre « Yverdon » gagnerait à adopter la même largeur et la même qualité de joint.

Le mode opératoire et les conditions aux limites in situ ne permettent pas de vérifier la loi de Darcy, c'est-à-dire l'ajustement entre le temps d'écoulement et la température de l'eau du réservoir. La correction de la température telle que proposée par la norme 12697-40 représente une source d'erreurs systématiques. Pour éviter ce biais, nous y avons renoncé.

La répétabilité est estimée à 3%.

De nombreuses sources d'incertitude réduisent la précision de la mesure du temps d'écoulement. Si le revêtement est neuf, les sources les plus importantes sont l'âge du joint, la concentration d'air dans l'eau du réservoir, la température de l'eau et la durée de la saturation préalable de l'échantillon d'enrobé. Mais il ne faut pas perdre de vue que le résultat de l'essai, la conductivité hydraulique relative exprimée avec seulement deux chiffres significatifs après la virgule, est une valeur fortement tronquée. Il faudrait au moins trois chiffres significatifs pour rendre l'incertitude estimée sur le temps d'écoulement.

6 > Résultats

Les résultats sont présentés et interprétés en ayant fait le choix de ne pas corriger le temps d'écoulement en fonction de la température de l'eau. On observe un dédoublement des résultats selon que le revêtement était neuf ou déjà en service le jour des mesures. On observe une distinction entre le PA 8 et le PA 11. Le présent rapport propose des valeurs guides de conductivité hydraulique à l'adresse des utilisateurs et des experts.

6.1 Résultat avec et sans correction de température

Au cours des chapitres précédents, nous avons relevé le problème de la correction de température. Alors que la norme EN 12697-40 prévoit une telle correction, nous avons constaté que, en réalité, la variation du temps d'écoulement en fonction de la température de l'eau est négligeable et que, de ce fait, la correction des valeurs mesurées expérimentalement introduit une erreur systématique. La méthode est plus juste sans correction. Dès lors, il faut se poser la question de la présentation des résultats: avec ou sans correction.

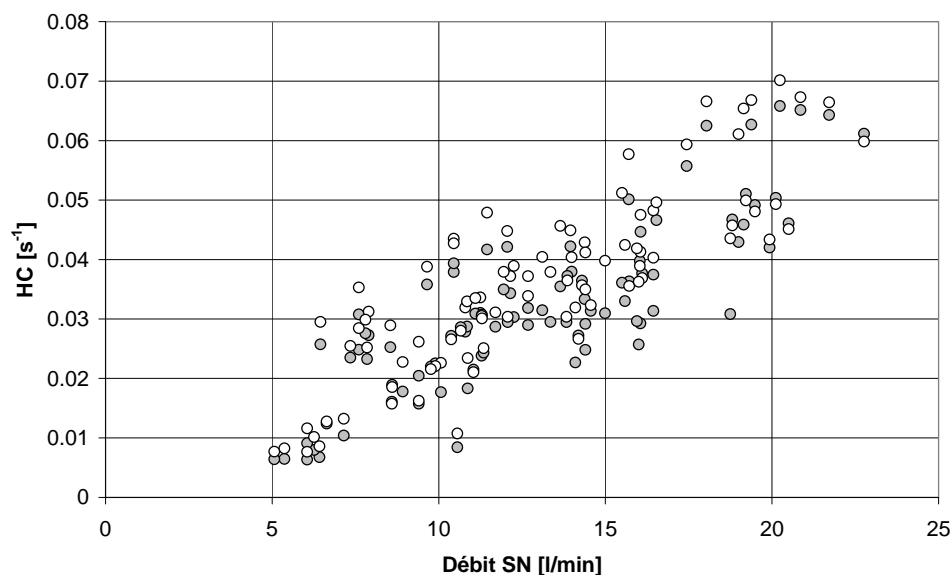
Une comparaison graphique à la Fig.8, portant sur les résultats de huit tronçons, avec et sans correction de température, permet de se faire une idée de l'ordre de grandeur du biais. Les données avec correction de température sont indiquées par des points blancs, ceux sans correction par des points gris. Si l'on considère que les températures de l'eau au cours des essais étaient comprises entre 8 °C et 21 °C (Tab. 4), les facteurs de correction, dans presque tous les cas supérieurs à 1,00, conduisent à une réduction du temps d'écoulement pour, finalement, aboutir à une conductivité hydraulique relative HC majorée. Ceci explique la raison pour laquelle, à la Fig.8, les points blancs (avec correction) sont situés au-dessus de leur point gris (sans correction) respectif.

L'application ou non de la correction ne change visiblement rien à la dispersion des points de mesure. Néanmoins, la translation du nuage de points vers des valeurs HC plus basses n'est pas sans conséquence pour l'objectif principal de ce travail, qui est de fournir des valeurs guides aux commissions d'experts chargées de la normalisation.

Pour la présentation et l'exploitation des résultats, et en l'absence de possibilité d'effectuer des comparaisons inter-laboratoires, nous retenons les enseignements issus de l'expérience empirique décrite au paragraphe 5.2 et optons en faveur de la justesse des valeurs au détriment de l'application stricte de la norme. En d'autres termes, nous exposerons dans les paragraphes suivants les résultats bruts.

Fig. 8 > Ecart entre les résultats corrigés et bruts.

Comparaison des résultats obtenus avec les drainomètres « Yverdon » (en abscisse) et européen (en ordonnée). Points blancs: interprétation de la conductivité hydraulique relative HC avec correction de température ; points gris: sans correction de température.



6.2

Résultat de l'ensemble des tronçons

Les essais englobent des revêtements PA de qualité fort différente ; certains sont endommagés ou usés, d'autres neufs ou récents, d'autres encore sont constitués d'un mélange granulaire 0/8 mm ou 0/11 mm. Cette diversité s'exprime dans une grande dispersion des points de mesure. Dans l'ensemble, cependant, les deux types de drainomètre fournissent des valeurs qui, dans une comparaison graphique, peuvent être considérées comme approximativement alignées (Fig.9).

Un certain nombre de points de mesure, pourtant, font exception. Ils apparaissent nettement excentrés par rapport à la tendance générale et se singularisent par un débit anormalement élevé. La grande majorité d'entre eux correspondent à des tronçons endommagés comme, par exemples, Vernayaz (1991) ou St-Maurice (1993), où de l'arrachement de gravillons a été observé. Cette concordance de faits suggère qu'en cas de défauts superficiels, le joint du drainomètre « Yverdon » est moins capable d'endiguer les résurgences d'eau à sa périphérie que ne l'est le large joint de l'appareil européen.

Fig. 9 > Résultat de l'ensemble des tronçons.

Comparaison des résultats obtenus avec les drainomètres « Yverdon » (en abscisse) et européen (en ordonnée). Les points de mesure entourés se distinguent par une surestimation du débit. L'observation s'explique par des fuites horizontales dues à des revêtements endommagés. Elle indiquerait que l'étanchéité du drainomètre européen est plus performante.

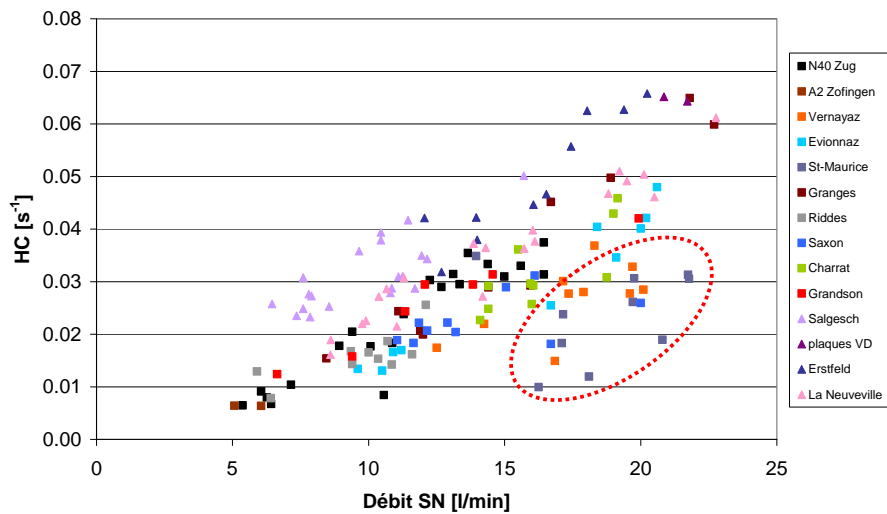
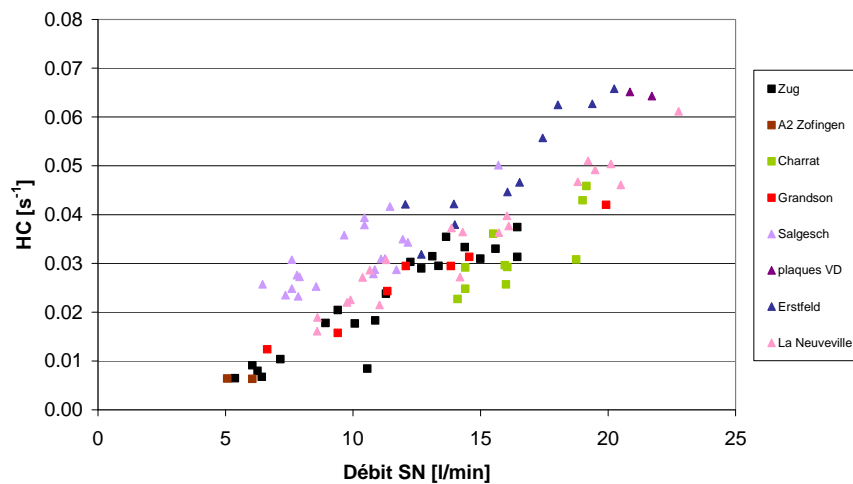


Fig. 10 > Résultat restreint aux tronçons récents.

Comparaison de la capacité drainante mesurée avec les drainomètres « Yverdon » (en abscisse) et européen (en ordonnée). Les revêtements qui figurent dans ce diagramme ont été posés entre 2000 et 2007. Les mesures sur PA neuf sont représentées par des triangles; les autres par des carrés.



Dans le but de limiter la dispersion des points de mesure, nous réduisons le nombre de tronçons significatifs en ne conservant que les tronçons les plus récents, supposés sans défauts de surface ponctuels. Concrètement, la suite de l'étude ne concernera plus que les tronçons posés à partir de l'année 2000. Le choix de cette année butoir est aléatoire, ne repose sur aucune observation in situ et ne reflète en aucune façon l'état réel des revêtements. La Fig.10 montre le résultat d'après cette nouvelle approche.

6.3

Résultat restreint aux tronçons neufs et récents

En réduisant la comparaison aux tronçons neufs et récents, la dispersion est moins importante. Le modèle linéaire se précise, même s'il n'y a en fait, dans la réalité, aucun lien linéaire entre la capacité drainante mesurée par chaque appareil, et ce d'autant plus, qu'aucune des deux grandeurs n'est connue avec certitude. On observe également que les points de mesure se scindent en deux familles : le graphique à la Fig.10 met en évidence une différence entre les revêtements neufs (triangles) et les revêtements en service (carrés), qui se traduit par deux nuages de points (Fig.11) possédant chacun sa propre droite des moindres carrés. Le traitement statistique des résidus permet ensuite de quantifier la plus ou moins bonne adaptation du modèle linéaire aux données grâce au coefficient de détermination R^2 . Il est souhaitable que la valeur du coefficient de détermination soit proche de 1, car plus la valeur de R^2 est élevée plus la variation de la variable HC s'explique par les variations de la variable débit. Dans le cas présent, le coefficient de détermination est estimé à 78% et 85% pour, respectivement, les PA neufs et les PA en service au moment de l'essai (Tab. 8). Si l'on considère que les écarts à l'alignement sont dûs à des erreurs de mesures aléatoires et sur la variable HC et sur la variable débit, ces coefficients de détermination doivent être considérés comme satisfaisants. Rappelons que, en général, la droite de régression $y = ax + b$ est calculée en admettant que l'incertitude sur les x_i est négligeable.

Tab. 8 > Coefficients de détermination et de corrélation.

Les coefficients de détermination et de corrélation expriment la qualité de l'ajustement du modèle linéaire aux résultats expérimentaux.

Coefficient	PA neuf	PA en service
de détermination R^2	0.78	0.85
de corrélation R	0.88	0.92

La Fig. 11 montre que le colmatage des revêtements en service se traduit par un décalage des points de mesures vers des valeurs de conductivité hydraulique et, dans une moindre mesure, de débit plus faibles. Pourtant le résultat surprend puisque les points, au lieu de se trouver sur une et même droite, se répartissent sur deux droites. La raison du décalage trouve peut-être son explication, tout comme au paragraphe 6.2, dans le phénomène de résurgence d'eau; ce mécanisme est plus prononcé avec le joint du drainomètre « Yverdon »; et il l'est d'autant plus, que l'écoulement au droit de l'ouverture est entravé.

Fig. 11 > PA en service et neufs.

Une distinction est faite entre les PA neufs (points jaunes) et les PA en service (points verts) au moment des mesures.

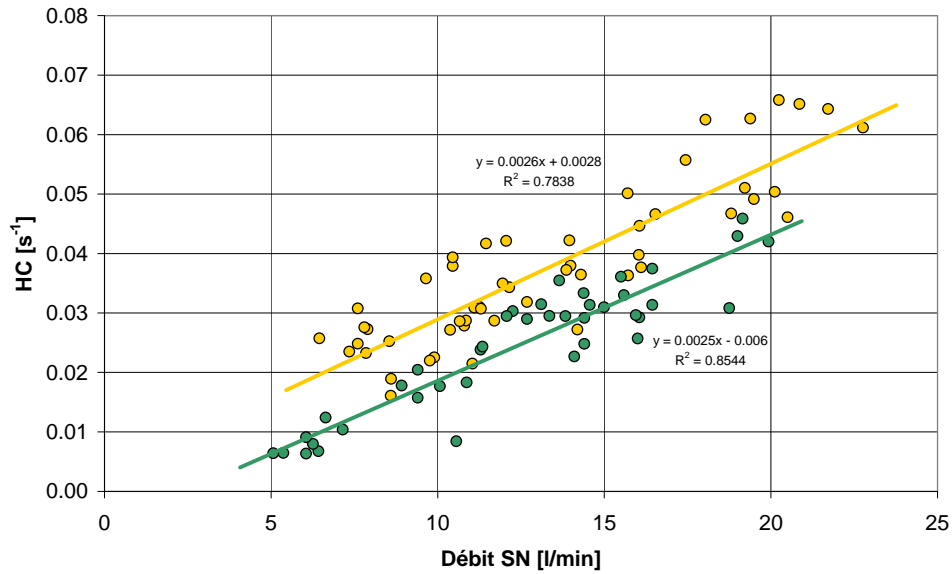
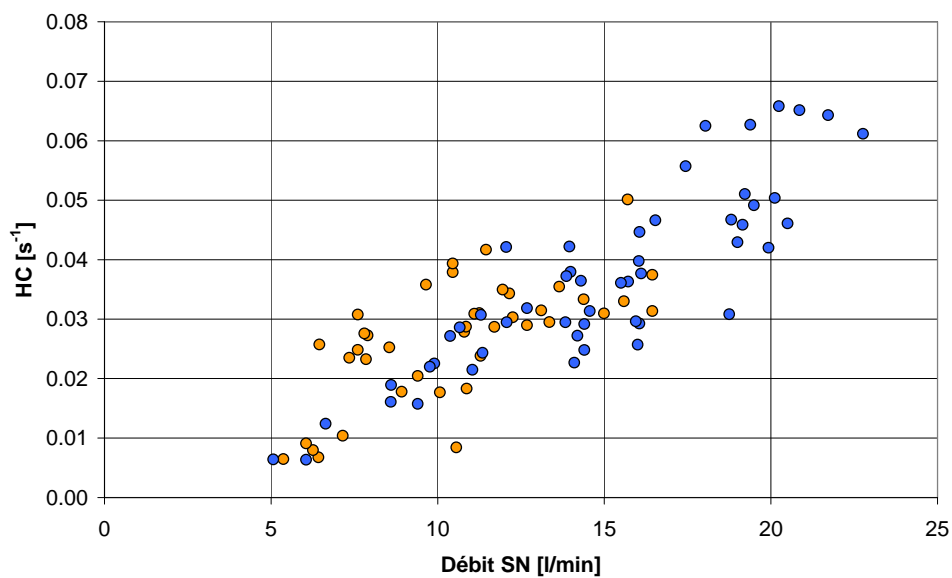


Fig. 12 > PA 8 et PA 11.

Une distinction est faite entre les PA 8 (points oranges) et les PA 11 (points bleus).



La Fig.12 montre dans quelle mesure la drainabilité des PA 8 est nettement inférieure à celle des PA 11. Le PA 8 atteint difficilement 15 l/min alors que cette valeur est dépassée dans 50% des points de mesure sur du PA 11. Cette observation indique que les exigences de perméabilité ne peuvent être identiques pour les deux sortes d'enrobé. A fortiori, la même remarque pourrait s'appliquer au PA 4.

6.4

Résultat restreint aux tronçons neufs

En définitive, les commissions d'experts s'intéressent avant tout au pouvoir de généralisation du modèle linéaire lorsque ce dernier est appliqué aux points de mesure sur revêtement neuf (contrôle de réception). C'est la raison pour laquelle nous présentons ici une analyse statistique succincte des résultats restreints aux tronçons neufs.

Suite au calcul de la droite des moindres carrés $y = a x + b = 0,0026 x + 0,0028$ établies pour les PA neufs (Fig. 11), on détermine l'incertitude sur la pente a et sur l'ordonnée à l'origine b de cette droite, avec pour résultat $\Delta a = 0,0004$ et $\Delta b = 0,0059$.

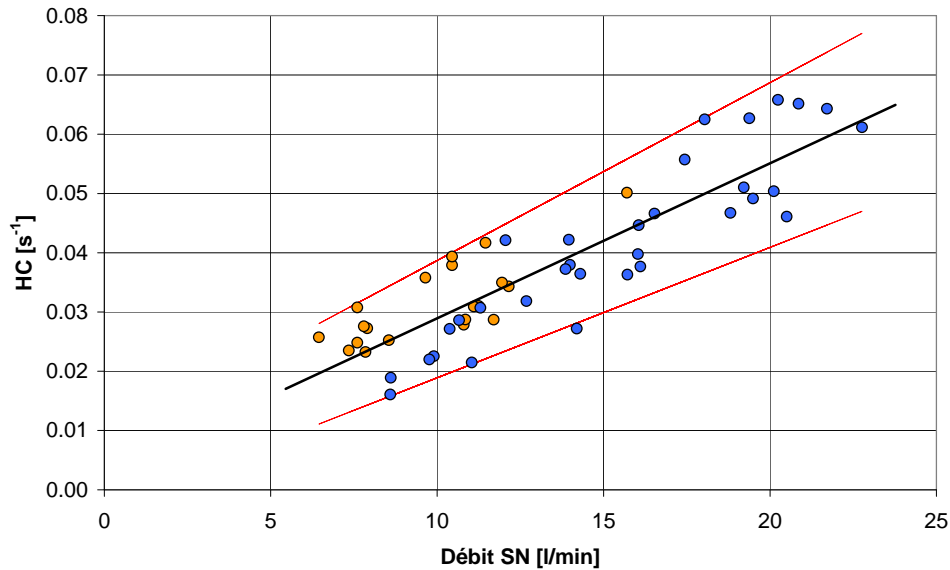
Puis, en introduisant ces valeurs dans le calcul de l'incertitude sur y

$$\Delta y = (\delta y / \delta a) \Delta a + (\delta y / \delta b) \Delta b = x \Delta a + \Delta b = 0,0004 x + 0,0059$$

on obtient les droites $y + \Delta y$ et $y - \Delta y$ qui délimitent l'intervalle de confiance du modèle linéaire. Le résultat est schématisé à la Fig. 13. L'intervalle de confiance s'élargit légèrement lorsque le débit et HC s'accroissent. Pour une valeur donnée du débit, il faut se contenter d'une équivalence HC à $\pm 0,01$ près. Il s'agit d'une incertitude importante qui incite à la prudence quant au choix des valeurs guides équivalentes. Concrètement, pour des valeurs de débit de 15 l/min et 13 l/min, les équivalences sont respectivement égales à $0,042 \pm 0,012 \text{ s}^{-1}$ et $0,037 \pm 0,011 \text{ s}^{-1}$. Ces valeurs, arrondies conformément à la norme à deux chiffres après la virgule, ne permettent plus de distinguer entre équivalences moyenne et individuelle. Il y aurait ainsi une unique équivalence égale à $0,04 \pm 0,01 \text{ s}^{-1}$ qui conduirait à une unique valeur guide minimale égale à $0,03 \text{ s}^{-1}$. En d'autres termes, il suffirait que chaque mesure individuelle in situ satisfasse l'inéquation $HC \geq 0,0245 \text{ s}^{-1}$, c'est-à-dire un temps d'écoulement $t < 42 \text{ s}$, pour que la drainabilité soit jugée suffisante. C'est là une exigence très peu contraignante. Dans le paragraphe suivant nous allons développer une approche à la fois plus nuancée et plus exigeante.

Fig. 13 > Résultat restreint aux tronçons neufs.

Incertitude sur la droite des moindres carrés; en rouge, les droites $y + \Delta y$ et $y - \Delta y$. Une distinction est faite entre les PA 8 (points oranges) et les PA 11 (points bleus).



6.5 Propositions à l'adresse de la VSS

6.5.1 Valeurs guides

Une approche raisonnable consiste à choisir des valeurs guides moyennes relativement exigeantes, accompagnées de valeurs guides individuelles relativement faibles. Cette configuration permet d'assurer une capacité drainante satisfaisante à moyen terme (deux ans au moins) tout en tenant compte de l'inévitable dispersion des résultats. Par ailleurs, il est souhaitable d'établir une distinction entre les PA 11 et les PA 8. Cet ensemble de réflexions nous amène à proposer à ceux et celles qui veulent se lancer dans des campagnes de mesures avec le drainomètre européen les valeurs guides présentées dans le Tab. 9.

Tab. 9 > Valeurs guides minimales pour couches de roulement.

Conductivité hydraulique relative HC minimale recommandée pour diverses couches de roulement.

Type d'enrobé	HC _{min} moyen [s ⁻¹]	HC _{min} individuel [s ⁻¹]
PA 11	0.04	0.03
PA 8	0.03	0.02
PA 4	à définir	à définir

6.5.2 **Recommandations**

Les travaux montrent d'une part, que le drainomètre européen fonctionne de façon très satisfaisante et d'autre part, que la correction de la température introduite au chiffre 7.2 par la norme EN 12697-40:2005 [1] n'est pas fondée in situ. Au vu de cette observation, il convient de considérer que la norme manque de fondement pratique et que, faute de révision imminente, il vaut mieux ne pas retirer la norme suisse en vigueur.

Au niveau national

Concernant le drainomètre « Yverdon » sous sa forme actuelle, il faut noter l'importance de la rigidité du joint sur le résultat des mesures de débit. Il est vivement conseillé que tous les laboratoires emploient la même qualité de joint.

Les performances du joint européen étant meilleures que celle du joint « Yverdon », il convient d'envisager de transformer l'appareil « Yverdon » en adoptant un joint large en caoutchouc cellulaire.

Ayant constaté une nette différence entre la capacité drainante des PA 11 et des PA 8, il convient d'adapter les exigences SN actuelles à la dimension du plus gros grain (y compris pour le PA 4).

Une intervention suisse au sein de la commission CEN/TC 227 doit soulever la question de la correction de température. Celle-ci n'a pas été correctement évaluée et biaise le résultat de l'essai in situ.

Au niveau européen

7 > Conclusions

Le prototype de drainomètre européen qui a servi dans le cadre du présent travail de recherche est conforme aux spécifications de la norme EN 12697-40 [1]. Le bilan des calibrages est positif. L'appareil possède un joint large de 100 mm en caoutchouc cellulaire. L'étendue de la zone de contact entre le joint et la chaussée garantit une bonne étanchéité et compense d'éventuelles variations de rigidité dues à la température ou à l'âge. La méthode d'essai s'applique sans restriction de température, pour autant que l'eau ne gèle pas. En termes de temps d'écoulement la sensibilité de mesure est élevée ; en revanche, l'expression du résultat en conductivité hydraulique avec seulement deux chiffres significatifs après la virgule est insuffisante.

Fonctionnalités du drainomètre européen

La norme ne précise aucune valeur concernant la fidélité des résultats. Des calculs d'incertitude sur une série de 9 mesures consécutives indiquent que la répétabilité se situe autour de 3 %. Si le revêtement est neuf, les principales sources d'incertitude sont la concentration de bulles d'air dans l'eau, la température de l'eau et l'étape de saturation préalable du point de mesure.

Incertitude de mesure

Le temps d'écoulement est directement proportionnel à la viscosité (loi de Darcy), elle-même dépendante de la température de l'eau. Pour éliminer l'effet de la dépendance en température, la norme EN 12697-40 prévoit un facteur de correction, la température de référence ayant été fixée à 20 °C. En théorie, la variation du temps d'écoulement est importante, de l'ordre de 50 % entre 20°C et 5 °C. En pratique, cependant, nous avons observé que le temps d'écoulement est peu sensible à la température de l'eau. Les conditions expérimentales in situ ne permettent pas d'appliquer la loi de Darcy. La correction de température biaise le résultat de l'essai.

Biais dû à la correction de température

Puisque l'appareil proposé dans la norme EN 12697-40:2005 donne entièrement satisfaction et que la correction de température peut être supprimée dans le calcul de la conductivité hydraulique, rien n'empêche d'employer cette méthode d'essai. A cette fin, les mesures comparatives ont permis d'établir une relation linéaire (coefficient de corrélation $R = 0,88$) entre le débit mesuré avec le drainomètre « Yverdon » et la conductivité hydraulique obtenue avec le drainomètre européen. Cette relation a permis de définir des valeurs guides proches des exigences de débit fixées par la norme suisse. Elles s'appliquent aux enrobés PA 8 et PA 11 et tiennent compte du diamètre du plus gros grain.

Valeurs guides

Compte tenu du problème posé par la correction de température, et en prévision de la modification de la EN 12697-40 qui s'impose, il convient de reporter le remplacement du drainomètre « Yverdon ». Cette recommandation a d'ores et déjà été suivie d'effet puisque la SN 640 430b révisée, qui est entrée en vigueur le 1.2.2008, maintient la méthode de mesure « Yverdon ». L'avant-propos national SN 670 440 devra être modifié en conséquent.

Report de l'introduction de la EN en Suisse

> Index

Abréviations

OFROU

Office fédéral des routes

SUVA

Organisme suisse d'assurance-accidents obligatoire

Figures

Fig. 1	> Répartition des sections d'autoroute en PA.	12
Fig. 2	> Schéma détaillé du drainomètre « Yverdon ».	18
Fig. 3	> Mesures croisées avec deux types de joint.	19
Fig. 4	> Schéma détaillé du drainomètre européen.	21
Fig. 5	> Dureté Shore 00 du joint en fonction de sa température.	26
Fig. 6	> Viscosité de l'eau en fonction de la température.	27
Fig. 7	> Sources d'incertitude dans la détermination de HC.	33
Fig. 8	> Ecart entre les résultats corrigés et bruts.	36
Fig. 9	> Résultat de l'ensemble des tronçons.	37
Fig. 10	> Résultat restreint aux tronçons récents.	37
Fig. 11	> PA en service et neufs.	39
Fig. 12	> PA 8 et PA 11.	39
Fig. 13	> Résultat restreint aux tronçons neufs.	41

Tableaux

Tab. 1	> Exigences de drainabilité des couches PA.	16
Tab. 2	> Description de la qualité des joints.	19
Tab. 3	> Mesures croisées avec trois types de joint.	20
Tab. 4	> Description des revêtements sélectionnés.	23
Tab. 5	> Temps d'écoulement en fonction de la température de l'eau.	29
Tab. 6	> Temps de résistance à l'écoulement r.	30
Tab. 7	> Incertitude de mesurage.	31
Tab. 8	> Coefficients de détermination et de corrélation.	38
Tab. 9	> Valeurs guides minimales pour couches de roulement.	41

Littérature

[1] EN 12697-40: 2005 Drainabilité in situ

[2] EN 12697-19:2004 Perméabilité des éprouvettes

- [3] SN 640 430b Annexe 2
- [4] NF P 98-254-3 Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés, Partie 3: Essai au drainomètre de chantier (1993)
- [5] Ordonnance sur la protection contre le bruit OPB RS 814.41 - Modification du 1^{er} septembre 2004
- [6] Notice technique sur les enrobés poreux peu bruyants destinés aux autoroutes, OFROU (2006)
- [7] Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces, FEHRL Report 2006/02, EU 5th Framework Project "Silvia"
- [8] Aebersold S., Investigation sur l'état de la chaussée de la A9 - Examen de la perméabilité, Service des routes et des cours d'eau, Section routes nationales, Sion (2001)
- [9] Angst C. et al., Lärmarme Beläge innerorts, ASTRA Report xxx (to be published)
- [10] Di Benedetto H. et al., Mesures in situ et en laboratoire des écoulements dans les bétons bitumineux drainants, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 204 (1996)
- [11] Di Benedetto H. et al., Ecoulement dans les BBDr : le perméamètre VH, Revue générale des routes et des aérodromes, n° 731 (1995)
- [12] Dumont A.-G. et al., Méthodes de mesure de la drainabilité des enrobés drainants, Rapport OFROU 346, 1995
- [13] Köster H., Beobachtungen des Verhaltens von Drainasphalt unter Verkehr, ASTRA Bericht 218 (1991)
- [14] Poulidakos L.D. et al., Mechanical properties of porous asphalt, ASTRA Report 333 (to be published)
- [15] Touloukian Y.S. et al, Viscosity, Numerical Data p. 94, IFI/Plenum, New York (1975)