

## Le Réamètre

### Appareil de mesure de la résistance spécifique au passage de l'air des revêtements poreux

Michel JACQUES

Technicien supérieur

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux

Michel BERENGIER

Chargé de recherche

Docteur en acoustique

Section Interaction route/véhicule et acoustique routière

Division Gestion de l'entretien des routes

Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Centre de Nantes

### Introduction

Depuis plusieurs années, les bétons bitumineux drainants sont utilisés pour lutter contre le bruit routier. Leur formulation particulière, comportant entre autre un pourcentage de vides élevé (voisin ou supérieur à 20 %), permet de réduire le bruit de contact pneumatique/chaussée dans des proportions intéressantes.

La modélisation du comportement acoustique de ces matériaux routiers poreux nécessite la connaissance de leurs diverses caractéristiques physiques. Parmi celles-ci, la résistance spécifique au passage de l'air, souvent notée  $R_s$  ou  $\sigma$ , est avec la porosité  $\Omega$ , la tortuosité  $q^2$  et l'épaisseur  $l$  [1], un des paramètres majeurs qui influence l'absorption de la couche poreuse.

Aucun appareil de mesure de résistance spécifique au passage de l'air d'échantillon de revêtement de chaussée poreux n'existant sur le marché, son étude et sa réalisation se sont avérées indispensables pour la poursuite de l'étude des caractéristiques acoustiques de ce type de couches de roulement.

### Quelques rappels théoriques

Un modèle mathématique [2] utilisant trois paramètres physiques représentatifs du milieu poreux a

été mis au point pour évaluer les capacités d'absorption acoustique d'un revêtement routier. Dans ce modèle, les paramètres pris en compte sont :

- > la porosité,
- > la tortuosité,
- > la résistance spécifique au passage de l'air.

### La porosité ( $\Omega$ )

La porosité est une grandeur caractéristique d'un matériau poreux. Elle s'exprime par le rapport du volume des vides sur le volume total.

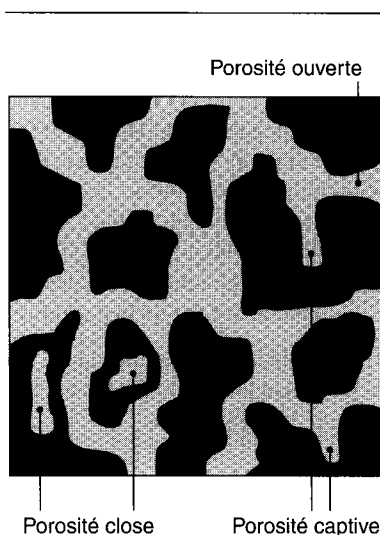


Fig. 1 - Coupe d'un milieu poreux.

Comme le montre la figure 1, il y a lieu de considérer plusieurs sortes de porosités :

- > porosité ouverte,
- > porosité captive,
- > porosité close.

La porosité peut être mesurée :

- > au banc gamma [3], si l'on désire connaître la porosité globale,
- > par pesée hydrostatique qui ne donne pas accès à la porosité close. Cette dernière ne joue évidemment aucun rôle dans le comportement acoustique du revêtement.

### La tortuosité ou facteur de forme ( $q^2$ )

Ce paramètre représente les « chemins » que va emprunter l'onde acoustique au cours de son trajet au sein de la structure poreuse. Ces chemins sont rarement perpendiculaires à la surface. Ils sont donc plus ou moins tortueux et, de plus, leur section peut varier tout au long du trajet.

Actuellement, nous ne possédons pas de méthode permettant de caractériser directement ce paramètre. Néanmoins, il est possible de l'appréhender indirectement à partir de la courbe d'absorption mesurée sur un échantillon monocouche de matériau à l'intérieur d'un tube à ondes stationnaires [4].

### La résistance spécifique au passage de l'air ( $R_s$ ou $\sigma$ )

La résistance spécifique au passage de l'air est le troisième paramètre agissant sur l'absorption acoustique de la structure poreuse. Si l'on considère un flux d'air omnidirectionnel traversant un échantillon de matériau poreux, celui-ci oppose une certaine résistance qui se traduit par une perte de charge entre les deux faces de l'échantillon.

Lorsque la vitesse d'écoulement du flux diminue, l'écoulement turbulent se transforme en écoulement laminaire. Nous entrons alors dans le domaine d'application de la loi de Darcy, qui exprime la proportionnalité entre

Note

technique

la vitesse d'écoulement du fluide et le gradient de pression associé. La résistance spécifique au passage de l'air du matériau, donnée par la formule

$$R_s = \frac{\Delta P \cdot S}{Q \cdot l}, \quad (1)$$

est indépendante de la vitesse d'écoulement. Dans la formulation (1),  $\Delta P$  représente la différence de pression de part et d'autre de l'échantillon de section  $S$  et d'épaisseur  $l$ .  $Q$  est le débit volumétrique d'air par unité de temps au travers de l'échantillon.

### La loi de Darcy globale

Considérons l'écoulement laminaire d'un fluide de viscosité  $\mu$  au travers d'un cylindre élémentaire, représentatif d'un milieu poreux dont l'axe est parallèle à la direction de l'écoulement. Pour la configuration représentée sur la figure 2, la loi de Darcy globale exprime la proportionnalité entre la vitesse d'écoulement du fluide et le gradient de pression qui produit cet écoulement.

Pour une éprouvette homogène de dimensions finies, il existe la relation :

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{l}, \quad (2)$$

où  $V$  est la vitesse de filtration,  $Q$  est le débit de l'écoulement,  $K$ , la perméabilité globale de l'échantillon,  $l$ , l'épaisseur de l'échantillon,  $\mu$ , la viscosité dynamique du gaz utilisé lors de l'expérimentation et  $\Delta P$ , la perte de charge qui exprime la différence de pression entre les deux faces de l'échantillon.

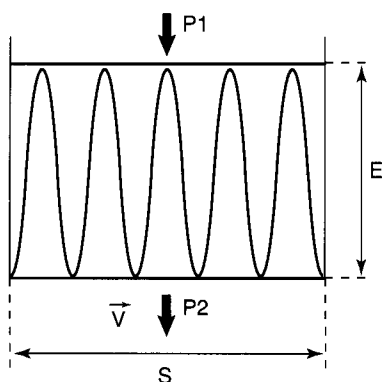


Fig. 2 - Schéma synoptique de l'écoulement au travers de l'échantillon.

### Limitation à la loi de Darcy

De nombreuses études ont montré que la loi de Darcy n'était pas toujours vérifiée. Des expériences diverses ont mené à la conclusion que cette loi déviât à des vitesses du fluide supérieures à une vitesse critique variant suivant le milieu. Plus précisément, cette déviation à la loi de Darcy se manifeste pour un nombre de Reynolds limite compris entre 1 et 10.

Le nombre de Reynolds est un nombre adimensionnel qui permet de préciser de quel type d'écoulement il s'agit. Il se présente comme un rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité.

$$Re = \frac{V_f d}{\nu} \quad (3)$$

$V_f$  est la vitesse fictive du fluide,  $d$ , une dimension caractéristique représentative du diamètre des grains et  $\nu$ , la viscosité cinématique.

À la viscosité près, la résistance spécifique d'un matériau poreux apparaît donc comme l'inverse de la perméabilité de ce matériau.

### Pourquoi un réamètre ?

Après plusieurs contacts pris avec des spécialistes des études des roches et des poudres ainsi qu'après quelques recherches sur divers types de perméamètres, l'inadaptation des matériels existants aux matériaux routiers est très vite apparue. C'est alors que le LCPC, sur les conseils de l'INRETS, a confié au LRPC de Bordeaux la conception et la réalisation d'un appareillage permettant la mesure de la résistance spécifique au passage de l'air ( $R_s$ ) dans les conditions d'un écoulement darcéen d'un flux. Ainsi est né le réamètre.

L'utilisation de cet appareil en laboratoire relève de la norme ISO 9053 [5].

### Principe de la mesure

Un flux d'air unidirectionnel traverse un échantillon du matériau qui oppose une certaine résistance ; ceci se traduit par une

perte de charge entre les deux faces de l'échantillon (fig. 3). La mesure en laboratoire de la résistance spécifique au passage de l'air nécessite donc de prélever sur site diverses carottes du revêtement. La valeur finale de  $R_s$  sera donc égale à la valeur moyenne des divers  $(R_s)_i$  de l'ensemble des échantillons.

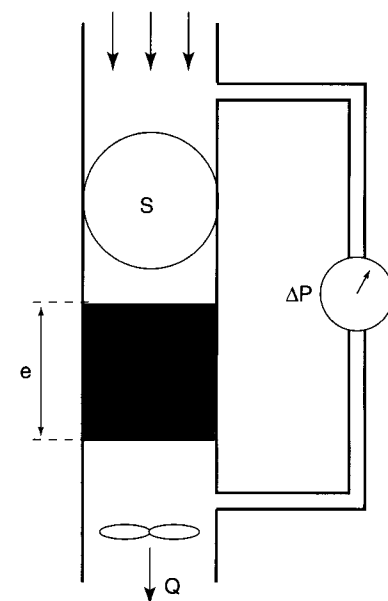


Fig. 3 - Schéma de principe du réamètre.

### Description de l'appareillage

L'appareillage est constitué d'un bol de mesure de diamètre intérieur correspondant à l'échantillon à tester (97 mm). L'échantillon étanché sur toute sa circonférence par une membrane élastique en latex est posé sur ce bol en reposant sur trois pointes d'appui.

La perte de charge est mesurée dans la partie basse du bol à l'aide d'un manomètre à aiguille. Le débit d'air est quant à lui mesuré par une sonde à fil chaud placée dans un tube situé dans le prolongement du bol de mesure, mais de plus petit diamètre. La sonde mesure une vitesse  $V$  et le débit  $Q$  est obtenu par la relation :  $Q = V \cdot S$ , où  $S$  est la section du tube.

Pour un débit donné, nous avons donc intérêt à mesurer la plus grande vitesse possible, et la diminution du diamètre du tube constitue un artifice courant pour accéder au résultat souhaité.

L'élément sensible de la sonde est placé au tiers du diamètre intérieur du tube afin de fournir une indication aussi réelle que possible de la vitesse du flux d'air. La figure 4 illustre ce choix.

Afin de s'affranchir au maximum d'éventuelles turbulences du flux, la sonde est placée en partie basse du tube dont la longueur est d'environ 0,90 m.

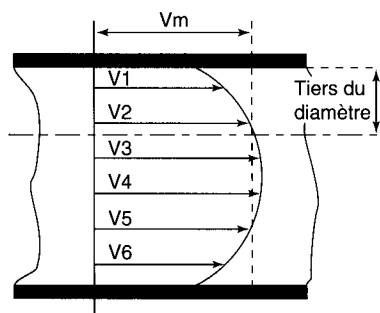


Fig. 4 - Mesure du débit.

**Nota :** Dans une conduite, il n'y a pas de contraction mais les vitesses sont différentes aux divers points d'une section droite. Il est donc nécessaire de prendre plusieurs mesures pour obtenir la vitesse moyenne  $v_m$ . Pratiquement, elle est fournie par une seule lecture au tiers du diamètre. Si  $\Sigma$  est la section de la conduite, le débit a pour valeur :  $Q = \Sigma \cdot v_m$ .

## Premiers essais

Les premiers essais ont consisté à tester un échantillon de matériau absorbant industriel de type « laine de verre » pour lequel les valeurs de résistance spécifique au passage de l'air sont déjà connues. Sur la figure 5, nous avons reporté la courbe d'évolution de la résistance spécifique au passage de l'air ( $R_s$ ) en fonction de la vitesse du flux.

L'obtention de l'écoulement laminaire est obtenue pour les faibles valeurs de flux lorsque celui-ci ne varie plus lorsque la vitesse varie. La valeur de  $R_s$  est alors obtenue.

Dans le cas de la figure 5, celle-ci est égale à 30 Rayls/cm, ce qui est généralement admis pour ce type de matériau.

Suite à l'évolution des formulations des bétons bitumineux drainants, et plus particulièrement de leur teneur en vide, il était de plus en plus délicat d'obtenir des conditions d'écoulement darcéen à l'intérieur d'un matériau présentant un grand nombre de vides. Les limites métrologiques de cet appareillage ayant été rapidement atteintes, un second prototype a dû être ainsi réalisé.

L'évolution métrologique ainsi que les différences essentielles entre les deux appareillages apparaissent à la fois dans le tableau I et sur les deux schémas de la figure 6.

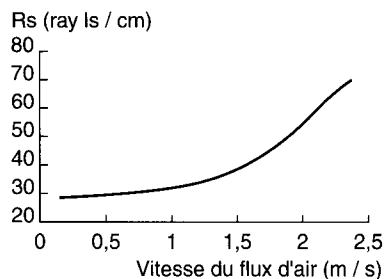


Fig. 5 - Mesure de la résistance spécifique au passage de l'air ( $R_s$ ) d'un échantillon de laine de verre.

## Déroulement de la mesure

### Opérations préliminaires

Après avoir réduit l'échantillon aux dimensions du diamètre intérieur du bol du réamètre, il est nécessaire de :

- > mesurer l'épaisseur exacte à l'aide d'un pied à coulisse. Trois mesures successives pour trois positions de l'échantillon sont recommandées ;
- > s'assurer que l'échantillon soit parfaitement sec. Un séchage à la température ambiante du local par un stockage de quelques jours est préconisé ;

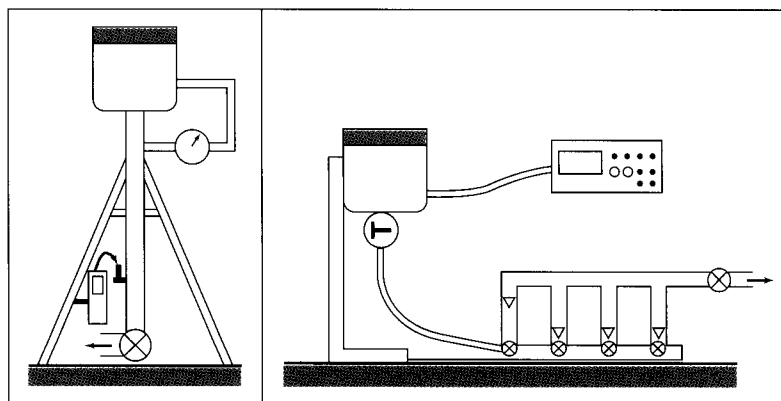


Fig. 6 - Schémas synoptiques des appareils des deux générations.

TABLEAU I  
Caractéristiques des deux générations d'appareillage

Paramètres	Appareillage de première génération	Appareillage de seconde génération
$\Delta P$ (perte de charge)	Manomètre à aiguille 0 → -20 mbar	Micro-manomètre double échelle ± 1,999 et ± 19,99 m H <sub>2</sub> O à affichage numérique
Q (débit)	Sonde à fil chaud 0,01 → 12,00 m/s associée à un module électronique d'affichage numérique	Jeu de débitmètres complémentaires 0,063 → 2 400 l/h

➤ s'assurer de la non-turbulence aéraulique du local de mesure (courant d'air, air pulsé, etc.). Ceci est indispensable compte tenu des faibles pertes de charge à mesurer.

### Déroulement de la mesure

Après avoir étanché circonférentiellement l'échantillon à l'aide d'une membrane en latex, on pose l'échantillon sur le bol de mesure. On veille à ce que la membrane élastique enserre également le haut du bol sur quelques centimètres afin d'assurer l'étanchéité échantillon/bol.

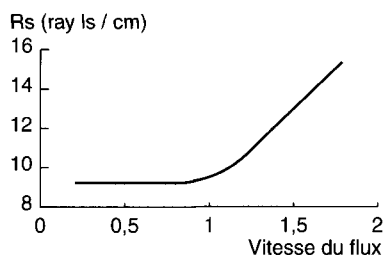


Fig. 7 - Mesure de la résistance spécifique au passage de l'air ( $R_s$ ) d'un échantillon de béton bitumineux drainant 0/10.

Pour un débit nul ( $Q = 0$ ), on règle le paramètre « Perte de charge » ( $\Delta P$ ) à zéro à l'aide du bouton de réglage situé sur la face avant du micromanomètre.

On procède ensuite à la mesure en augmentant graduellement le débit par paliers successifs après avoir relevé à chaque palier la valeur stabilisée de  $\Delta P$  correspondante. Lorsque nous disposons d'une douzaine de valeurs, nous effectuons l'opération inverse sur les mêmes paliers. La mesure est validée si les deux conditions ci-après sont réunies :

- $Q = 0 \Rightarrow \Delta P = 0$ ,
- $Q$  identique  $\Rightarrow R_s$  déterminée à  $\pm 2\%$ .

Dans le cas contraire, la mesure doit être recommencée. Lorsque la mesure est validée, on obtient le tableau II et la courbe représentée sur la figure 7.

Nous pouvons alors apprécier la nature de l'écoulement du fluide. Si celui-ci est darcéen, c'est-à-

dire que la valeur de  $R_s$  n'évolue plus lorsque le débit diminue, la mesure est terminée. Dans le cas contraire, il faut recommencer la totalité de l'opération avec des débits plus faibles.

### Performances de l'appareillage

Les deux grandeurs physiques essentielles à mesurer sont :

- le débit,
- la pression.

### Mesure de débit

Comme nous l'avons signalé précédemment, nous disposons d'une « batterie » de quatre débitmètres individuels couvrant les plages de débit ci-après :

- ❶ n° 1 : 0,063 → 4,4 litres/heure ;
- ❷ n° 2 : 0,63 → 33 litres/heure ;
- ❸ n° 3 : 6,3 → 250 litres/heure ;
- ❹ n° 4 : 63 → 2 400 litres/heure.

TABLEAU II  
Évolution de la mesure de la résistance spécifique au passage de l'air

Réamètre de Bordeaux					
Mesure de résistivité à l'écoulement de l'air à travers un échantillon de matériau poreux					
Date de l'essai : octobre 1989		Échantillon : béton bitumineux poreux Épaisseur (mètre) : 0,050 - carotte XXX			
Dbt l/h	V*10E3 m/s	δP Pa	δP/Q*10E6 Pa*s/mE3	σ*10E3 Pa*s/mE2	Observation
47,900	1,801	1,379	0,104	15,321	Écoulement  des filets  d'air  vertical  Haut  ↓  Bas
42,590	1,602	1,091	0,092	13,628	
37,290	1,402	0,846	0,082	12,066	
31,980	1,203	0,616	0,069	10,250	
26,600	1,000	0,460	0,062	9,203	
21,240	0,799	0,361	0,061	9,044	
18,640	0,701	0,317	0,061	9,037	
16,000	0,602	0,272	0,061	9,033	
13,210	0,497	0,224	0,061	9,033	
10,670	0,401	0,181	0,061	9,035	
7,970	0,300	0,135	0,061	9,035	
5,310	0,200	0,090	0,061	9,034	
Valeur retenue : ===== R <sub>s</sub> ⇒ 9,00 Rayls/cm					
Observations : néant					

Pour chacun d'entre eux, nous disposons d'une table de débit fournie par le constructeur donnant le débit pour un certain nombre de points de lecture disposés le long d'une échelle graduée en millimètres. Ces points de lecture ne correspondant pas à des graduations entières, nous avons interpolé les débits par pas de 5 mm entre deux points consécutifs extraits de la table de débit, sous la forme : débit (litre/heure) =  $a + b \cdot \text{hauteur (mm)}$ . Ceci nous permet d'obtenir face à des graduations plus de 20 points de lecture sur un même tube.

Pour des essais réalisés dans des conditions de température et de pression très différentes des conditions d'étalonnage, sachant que la densité d'un gaz varie en fonction de la température et de la pression, il est possible de corriger les résultats obtenus à partir des relations suivantes :

$$\delta_t = \delta_\eta \left( \frac{273,15}{273,15 + t} \right) \cdot \frac{P_t}{P_\eta} \quad (4)$$

où  $\delta_t$  et  $\delta_\eta$  représentent respectivement la densité du gaz lors de la mesure et à la référence.  $P_\eta$  représente la pression de référence de 1,013 bars.

La viscosité évolue également en fonction de la température selon la relation :

$$\eta_t = \eta_0 \cdot \frac{(273,15 + C)}{273,15^{1,5}} \cdot \frac{T^{1,5}}{T + C} \quad (5)$$

où  $\eta_t$  et  $\eta_0$  représentent respectivement la viscosité dynamique en centipoises à la température  $t$  °C et à la température de 0 °C.  $T$  représente la température absolue ( $t + 273,15$ ) et  $C$  la constante des gaz parfaits.

Les corrections susceptibles d'être apportées aux résultats obtenus sont négligeables pour les plages de températures habituelles des locaux d'essais. Sauf cas exceptionnel, ces corrections ne seront pas appliquées.

### Mesure de la pression

La mesure de la pression s'effectue à l'aide d'un micro-manomètre à double échelle et affichage

numérique. Les paramètres d'étalonnage sont fournis par le constructeur de l'appareillage.

Dans le cas de nos essais, le différentiel de pression est mesuré en « relatif », c'est-à-dire au sein d'une même atmosphère. De ce fait, les corrections inhérentes aux éventuelles différentes conditions de pression, température, hygrométrie... de l'air dans le cas de la nécessité d'un référentiel sont inexistantes.

### Précision de la mesure

En fonction de la précision propre à chacun des instruments de mesure et de leur « influence » respective dans la formulation globale du calcul de la valeur de  $R_s$ , la précision de la mesure au réamètre est estimée à  $\pm 1$  %.

### Suivi dans le temps des performances du réamètre

Afin de surveiller les éventuels dysfonctionnements de la chaîne de mesure, nous disposons d'un jeu de dix-huit rondelles minces en aluminium dites « rondelles étalons ». Elles sont circulaires, ajustées en fonction du diamètre intérieur du bol de mesure et sont percées en leur centre. Le diamètre des trous est compris entre 3 et 50 mm. Il est ainsi possible de tracer pour chaque rondelle la

courbe  $\frac{\Delta P}{Q} = f(V)$  où  $V$  est la vitesse du flux.

La rondelle joue alors le rôle d'un échantillon poreux de faible épaisseur.

Le suivi de l'appareillage consiste à s'assurer à intervalles réguliers, que la nouvelle courbe obtenue pour une ou plusieurs rondelles se superpose à la courbe initiale considérée comme la référence. L'écart maximal toléré pour un point de mesure quelconque situé sur la courbe ne doit pas dépasser  $\pm 0,5$  %.

### Influence de la résistance au passage de l'air sur la courbe d'absorption acoustique d'un revêtement de chaussée poreux

Les courbes de la figure 8 montrent l'influence de la valeur de  $R_s$  sur la détermination du coefficient d'absorption acoustique. De façon générale,  $R_s$  agit sur l'amplitude des pics d'absorption et peu sur la position fréquentielle de ces derniers, qui est plutôt reliée à l'épaisseur et à la tortuosité. Les prévisions théoriques sont obtenues à partir du modèle développé conjointement par l'INRETS et le LCPC [1]. Les mesures correspondent à un échantillon de béton bitumineux drainant 0/10 d'épaisseur 4 cm.

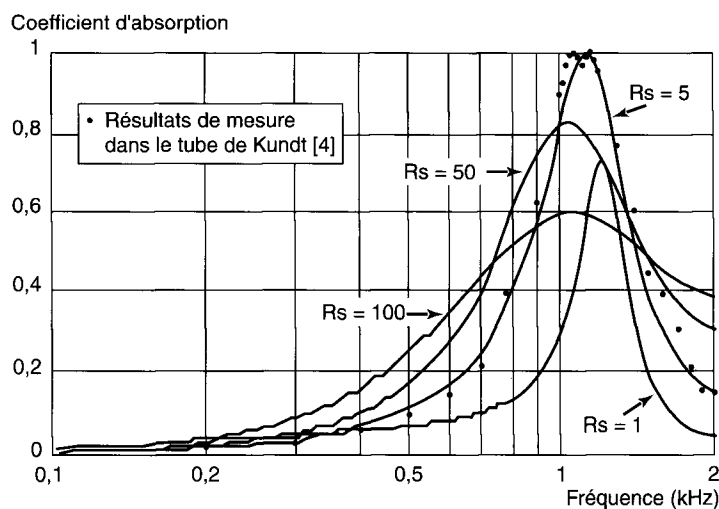


Fig. 8 - Évolution de l'absorption acoustique d'un béton bitumineux drainant 0/10.  $R_s \in \{1, 5, 50, 100\}$  rayls/cgs ;  $\Omega = 0,28$  ;  $q^2 = 3,1$  ;  $e = 4$  cm.

---

## Conclusion

---

Depuis sa conception et sa réalisation, le réamètre a été utilisé pour mesurer plus d'une centaine d'échantillons de revêtement poreux. Les résultats de  $R_s$  introduit dans le modèle prévisionnel [1] ont toujours permis un calcul du coefficient d'absorption acoustique qui, dans la quasi-

totalité des cas, a pu être avantageusement comparé aux résultats de mesure par la technique du tube à ondes stationnaires [4] ou celle en champ libre [6]. Cet appareil semble donc bien adapté pour déterminer indirectement les caractéristiques d'absorption acoustique d'un matériau poreux

soit au niveau de la formulation (échantillon de laboratoire), soit en contrôle de performance à la mise en œuvre (carottes prélevées sur site), soit enfin en terme de tenue dans le temps des caractéristiques de la structure poreuse notamment vis-à-vis des phénomènes de colmatage.

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] BERENGIER M.-C., HAMET J.-F. (1997), Étude acoustique des milieux poreux - Application aux revêtements drainants, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **212**, nov.-déc., pp. 65-74.
  - [2] HAMET J.-F. (1992), Modélisation acoustique d'un enrobé drainant : prise en compte des phénomènes de thermoconductivité dans une nouvelle formulation phénoménologique, *Rapport INRETS*, **159**.
  - [3] Équipement LPC (1991), *Banc gamma vertical A 322C*, Publication LCPC, p. 29.
  - [4] **NORME NFS 31 065** (1980), *Acoustique : Détermination du facteur d'absorption acoustique et de l'impédance acoustique en incidence normale par la méthode du tube*.
  - [5] **NORME ISO 9053** (1988), *Acoustics : Materials for acoustical application - Determination of airflow resistance*.
  - [6] DELANNE Y. (1989), Les enrobés drainants : Analyse de leurs propriétés vis-à-vis du bruit de roulement et de l'adhérence des pneumatiques des véhicules de tourisme, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **162**, juil.-août, pp. 33-43.
-