

Mesure des propriétés d'absorption acoustique d'échantillons d'asphalte

Préparé pour :

Danielle Fleury
Service des matériaux d'infrastructure
Ministère des transports du Québec

Préparé par :

Raymond Panneton, ing.
Professeur

Rémy Oddo
Professionnel de recherche

Youssef Ghatrifi
Stagiaire Ingénieur

Juin 2006

TABLES DES MATIÈRES

OBJECTIF :	2
PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX ABSORBANTS :	2
MESURE D'ABSORPTION EN TUBE DE KUNDT	5
PRINCIPE DE LA MÉTHODE	5
MISE EN ŒUVRE :	6
RÉSULTATS DE MESURE	7
MESURES EN INCIDENCE RASANTE :	12
ÉVALUATION DU BRUIT DE ROULEMENT À GRANDE DISTANCE :	13
MESURES (EFFECTUÉES PAR LE MTQ)	13
CALCUL D'UN FILTRE DE PROPAGATION	15
CONCLUSION	18

Objectif :

L'objectif principal de cette étude est de mesurer les propriétés d'absorption acoustique des différents types de revêtement classiquement utilisés au Québec.

Parallèlement, on cherchera à classer les différents types d'asphalte en fonction des niveaux de bruit calculés à 100 m de l'autoroute.

Principales caractéristiques des matériaux absorbants :

Les matériaux absorbants acoustiques sont des matériaux poreux dont les pores sont interconnectés et ouverts. L'intérieur des pores est rempli d'air. Ils agissent en dissipant l'énergie acoustique de l'onde incidence en chaleur dans la structure du matériau.

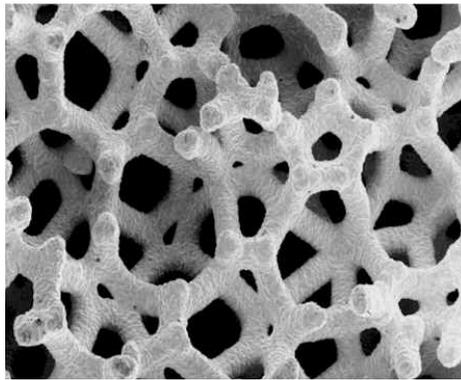


Figure 1: Exemple typique de structure d'un matériau acoustique

Deux phénomènes physiques permettent la dissipation de l'énergie acoustique en chaleur :

- dissipation visqueuse
- dissipation thermique

La courbe suivante montre la façon dont ces deux phénomènes peuvent intervenir sur l'absorption totale d'un matériau.

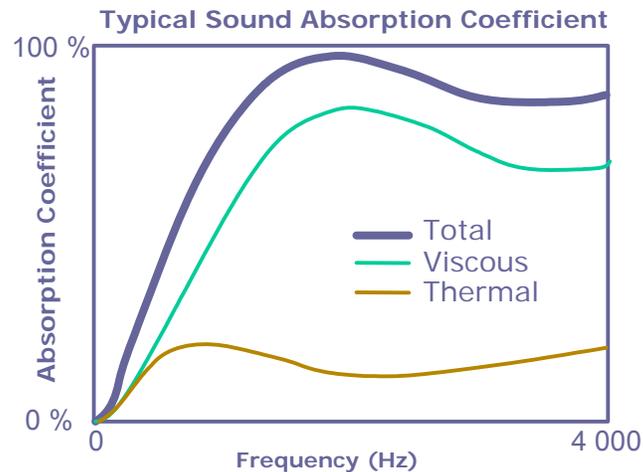


Figure 2 : Effet des différents phénomènes physiques sur l'absorption d'un matériau

Il est à noter que pour chaque mode de dissipation, l'absorption acoustique est nulle en basse fréquence puis augmente progressivement.

Les différents paramètres influant sur l'efficacité acoustique d'un matériau poreux sont :

- **Porosité:** La porosité est définie comme étant le rapport de volume occupé par l'air dans les pores interconnectés sur le volume total.
- **Résistance à l'écoulement:** La résistance à l'écoulement exprime le retard dû à la friction lors d'un écoulement quasi-statique à travers les pores (ici l'onde sonore qui pénètre dans le matériau). C'est équivalent à la chute de pression nécessaire pour provoquer un écoulement à travers le matériau.
- **Tortuosité:** La tortuosité est un paramètre géométrique qui indique la déviation subie à travers le matériau par rapport au chemin direct.
- **Longueurs thermiques et visqueuses:** Ces deux longueurs représentent les dimensions moyennes des cellules reliées respectivement aux pertes visqueuses (échange de chaleur dans les cellules de petite taille) et les pertes thermiques (échange de chaleur dans les cellules de grande taille).

Le tableau ci-dessous montre des exemples de valeurs de chacun de ces paramètres. Les courbes d'absorption équivalentes de ces matériaux sont données figure 3.

La résistance au passage de l'air du mauvais matériau est beaucoup plus élevée que celle du bon. De même, les longueurs de pore caractéristiques sont de l'ordre de 100 μm pour les bons absorbants, et dix fois plus grande pour les mauvais matériaux.

Tableau 1 : Propriétés typiques d'un bon et d'un mauvais matériau acoustique

Material Name	Bon absorbant sonore	Material Name	Mauvais absorbant sonore
Open Porosity	0.96	Open Porosity	0.7
Resistivity (Pa*s/m ²)	15000	Resistivity (Pa*s/m ²)	1e+007
Tortuosity	2	Tortuosity	3.2
Viscous Length (m)	100	Viscous Length (m)	1200
Thermal Length (m)	200	Thermal Length (m)	2000

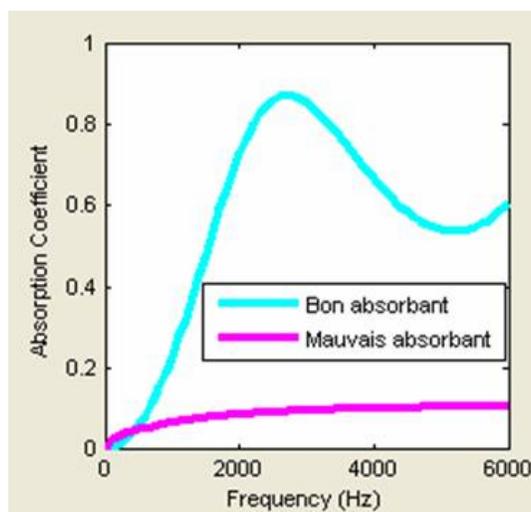


Figure 3 : Courbes d'absorption calculées pour les matériaux listés tableau 1

Les matériaux tels que décrits plus haut présentent des comportements globaux. Certains matériaux, tels les enrobés drainant, vont présenter une réaction plus locale. Généralement, ce type de matériaux est caractérisé par les phénomènes suivants :

- Interconnectivité faible entre les cellules
- Taille des pores homogène

Ce type de comportement se traduit par une absorption acoustique beaucoup plus sélective en fréquence. La figure suivante montre les coefficients d'absorption mesurés sur des enrobés drainants de deux types. Dans le premier cas, l'enrobé est composé d'une couche homogène de 4,1 cm d'épaisseur tandis que la seconde est composée d'un enrobé bicouche dont la granulométrie de surface est plus fine que la granulométrie en profondeur, destinée à assurer le drainage du revêtement. [1]

On observe sur la courbe de l'enrobé double couche des pics dédoublés en fréquence traduisant le phénomène de double porosité.

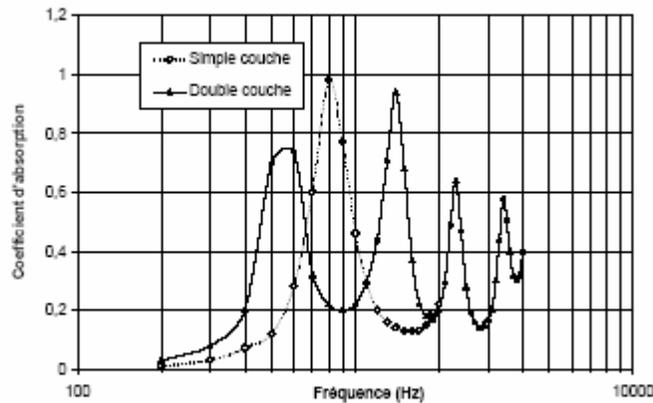


Figure 4 : Exemple typique d'une courbe d'absorption d'un enrobé drainant [1]

Mesure d'absorption en tube de Kundt

Principe de la méthode

Les mesures d'absorption sont effectuées selon la méthode dite du tube d'impédance. Cette méthode permet de mesurer l'absorption acoustique d'un matériau sous incidence normale. La mesure et le traitement des données sont réalisés selon la norme ASTM-E 1050-86.

Le schéma suivant montre le principe de la mesure d'absorption en tube d'impédance.

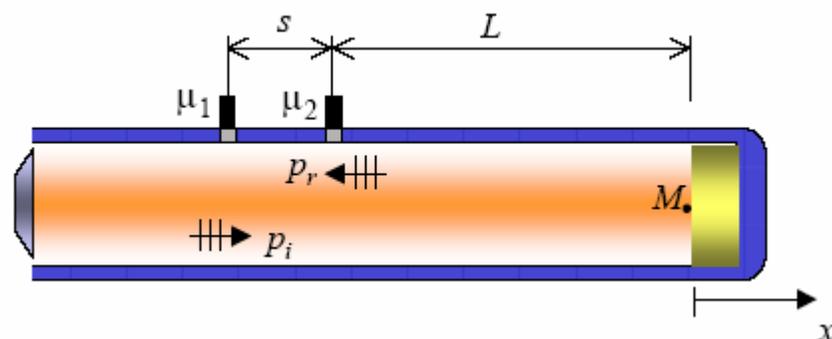


Figure 5 : Principe de fonctionnement du tube d'impédance

Le haut-parleur émet une onde plane acoustique large bande. Une fraction de l'onde acoustique est absorbée par l'échantillon tandis qu'une autre partie est réfléchi à l'intérieur du tube, formant ainsi un système d'ondes stationnaires. Le champ acoustique à l'intérieur du tube se décompose donc en une partie propagative, correspondant à la fraction de l'énergie acoustique absorbée par le matériau, et une partie stationnaire, correspondant aux réflexions sur l'échantillon.

La méthode de mesure utilisée, dite du doublet microphonique, permet de mesurer la partie propagative de l'onde, et donc d'estimer le coefficient de réflexion sur le matériau.

L'équation suivante est utilisée pour décrire le coefficient de réflexion du matériau à partir de la fonction de transfert mesurée entre les deux microphones.

$$\tilde{R} = \frac{e^{jks} - \tilde{H}_{12}}{\tilde{H}_{12} - e^{-jks}} e^{j2kl}$$

Le terme H_{12} est déterminé en mesurant la fonction de transfert entre les micros 1 et 2.

Le coefficient d'absorption du matériau peut être déterminé à partir du coefficient de réflexion via la formule suivante :

$$\alpha = 1 - |\tilde{R}|^2$$

Mise en œuvre :

Une des principales problématiques de la mesure d'absorption en tube d'impédance provient de la forme des échantillons qui doivent parfaitement s'insérer dans le tube. Habituellement, pour des matériaux semi-rigides comme les mousses, on utilise des échantillons cylindriques dont le diamètre correspond au diamètre du tube + 1% afin de s'assurer d'une très légère compression du matériau et qu'aucune fuite ne se forme sur les côtés de l'échantillon. Pour des échantillons rigides, on utilise des échantillons découpés au même diamètre que le tube, avec une légère tolérance négative afin de s'assurer qu'ils soient bien insérés dans le tube.

Dans notre cas, comme la résistance à l'écoulement des échantillons est très importante, on cherchera à sceller uniquement l'extrémité du tube sur les échantillons testés. Différentes méthodes de scellage ont été utilisées. Finalement, la meilleure méthode a consisté à sceller un anneau métallique sur la surface du matériau. De la cire liquide est utilisée afin de bien colmater les différentes aspérités du matériau situées sous la couronne. Finalement, la couronne fixée à l'échantillon est vissée au tube de Kundt, lui-même placé en position verticale.

La figure suivante montre le tube de Kundt ainsi qu'un échantillon prêt à être testé avec sa couronne.



Figure 6 : Tube de Kundt en position verticale et échantillon prêt à être testé

L'efficacité de l'étanchéité entre la couronne et le matériau est testée sur chaque échantillon en remplissant la couronne d'eau. Une fois l'étanchéité de la fixation bien assurée, on sèche la surface de l'échantillon et on l'installe pour la mesure.

Cette opération est répétée pour chaque échantillon testé.

Résultats de mesure :

L'absorption acoustique des différents échantillons fournis par le MTQ a été mesurée à l'aide de la méthode du tube de Kundt.

Les résultats présentés ici montrent les courbes d'absorption telles que mesurées sur différents types de matériaux fournis par le MTQ.

Les différentes courbes présentées ici sont classées par type de revêtement :

- **Matériaux type HMA /traitement de surface**

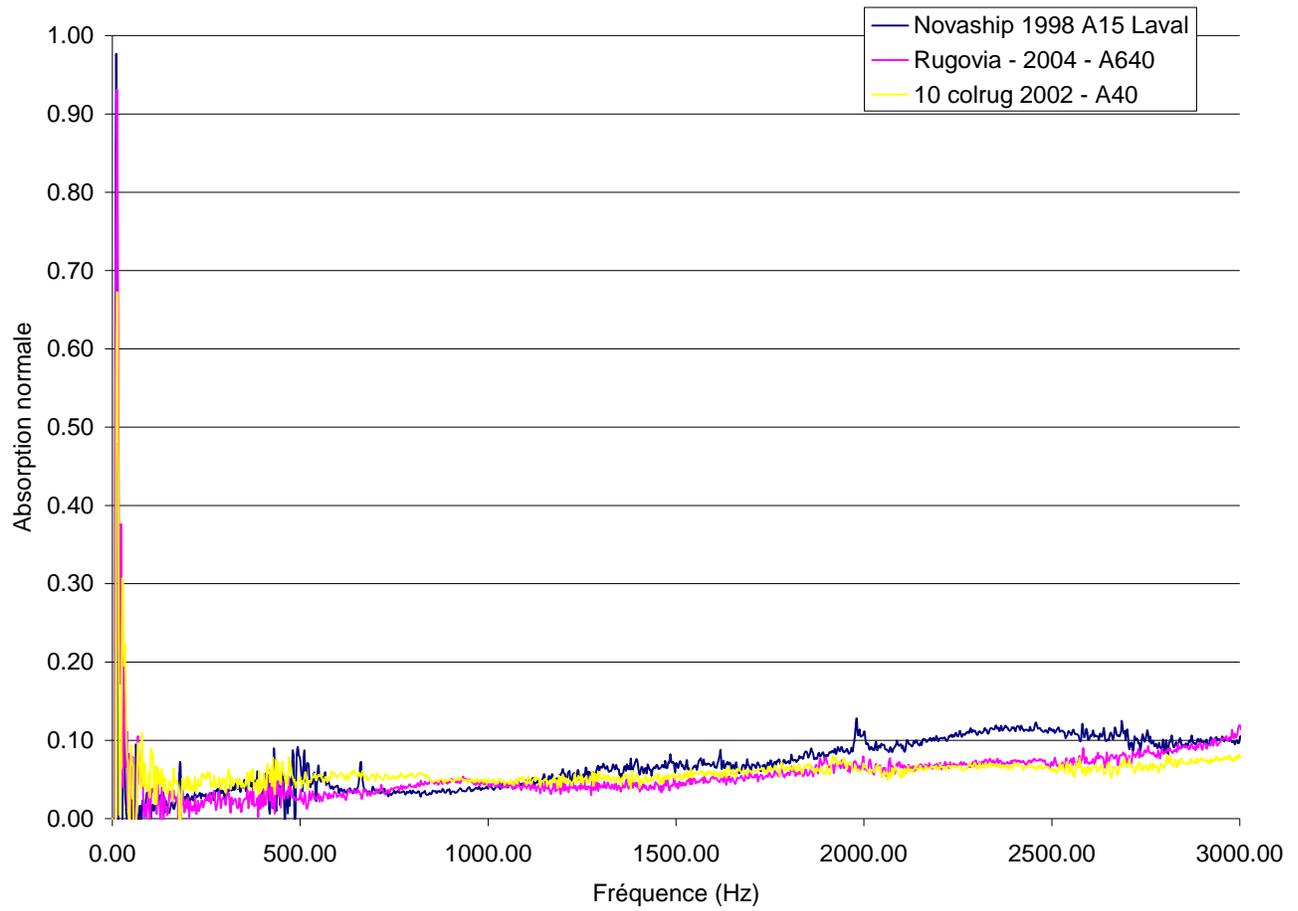


Figure 7 : Mesures d'absorption sur les traitements de surface HMA

- **Matériaux type HMA /grade dense**

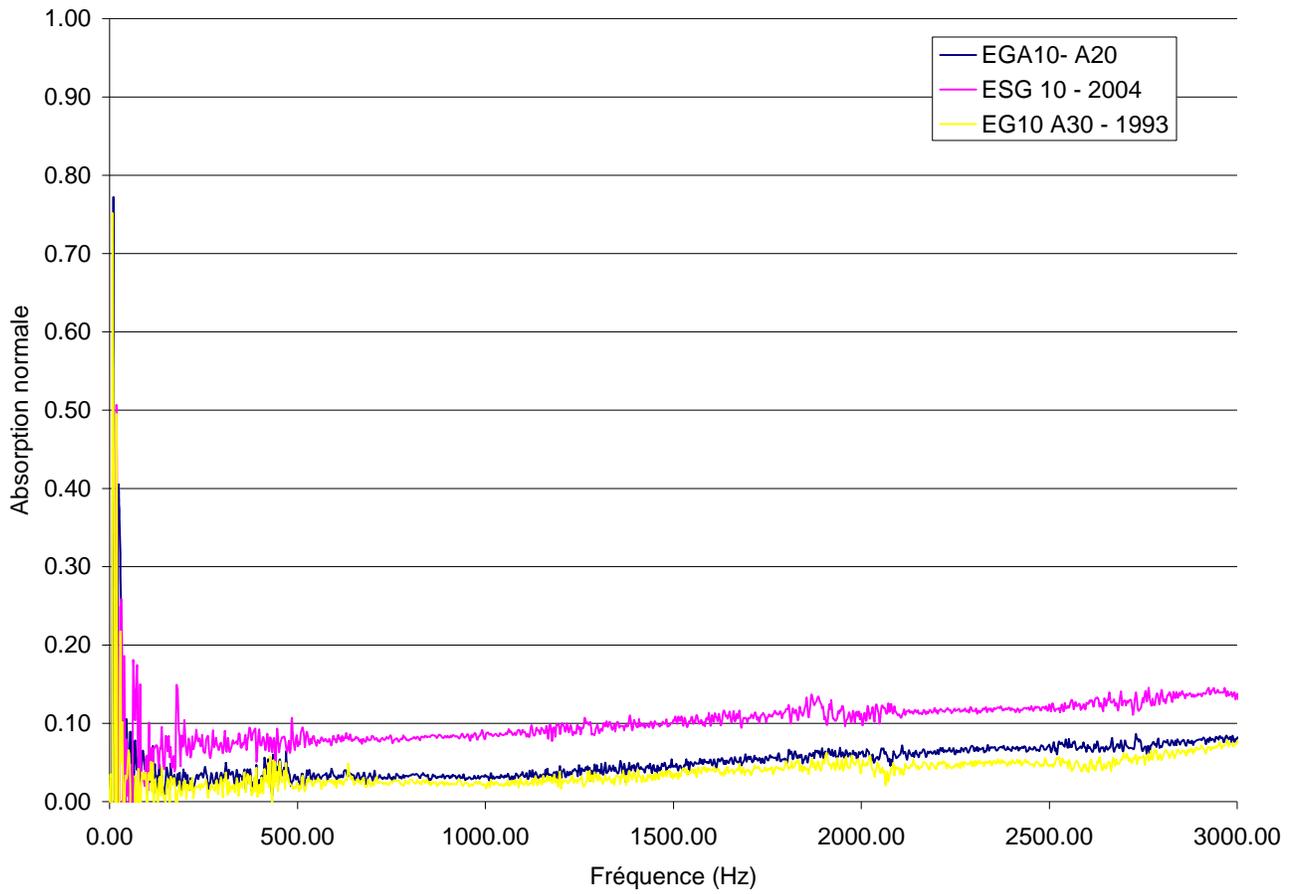


Figure 8 : Mesure d'absorption sur des matériaux de type HMA grade dense

- **Matériaux type HMA /SMA**

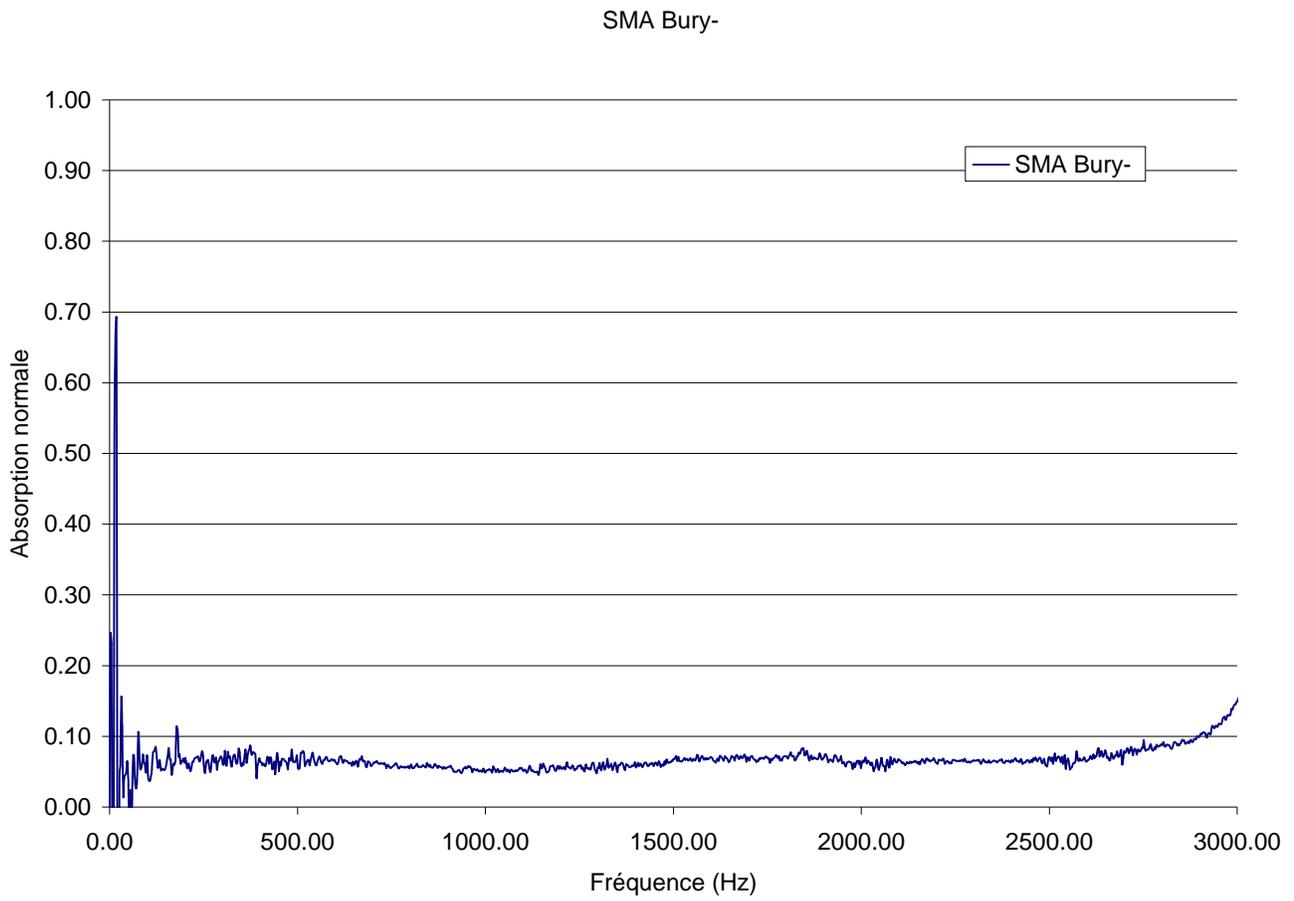


Figure 9 : Mesures d'absorption sur des matériaux de type HMA –SMA

- **Matériaux type béton**

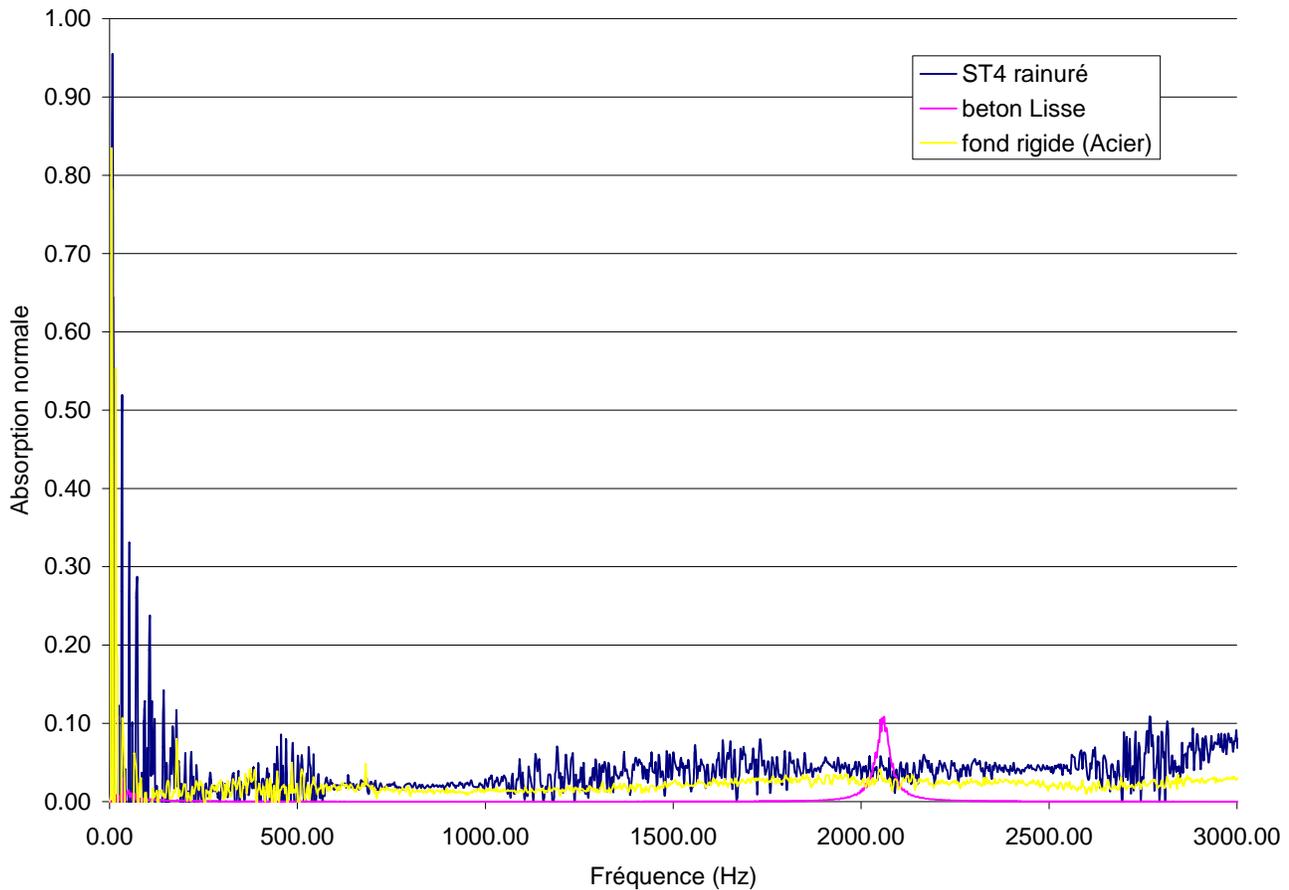


Figure 10 : Mesures sur des matériaux de type béton

L'ensemble des résultats de mesure effectués en tube de Kundt montre que l'absorption des différents échantillons testés est proche de zéro. On peut donc conclure hors de tout doute qu'il n'existe aucun phénomène d'absorption significatif sur les types de revêtement testés. Seuls les enrobés drainants, possédant une structure interne poreuse avec un réseau de pores largement ouvert vont présenter une absorption acoustique intéressante.

Mesures en incidence rasante :

Des mesures en incidence rasante ont été effectuées afin de valider la mesure d'absorption en tube de Kundt.

La mesure en incidence rasante s'effectue sur des échantillons de grande surface, en plaçant une source ponctuelle à une faible distance de l'échantillon testé. On mesure la fonction de transfert entre la source et un microphone, placé lui aussi à une faible distance de la surface d'essais. La figure suivante montre le système de mesures.

Les mesures sous incidence normale seront validées par des mesures en incidence rasante sur 2 plaques d'asphalte de 1 m² de surface.

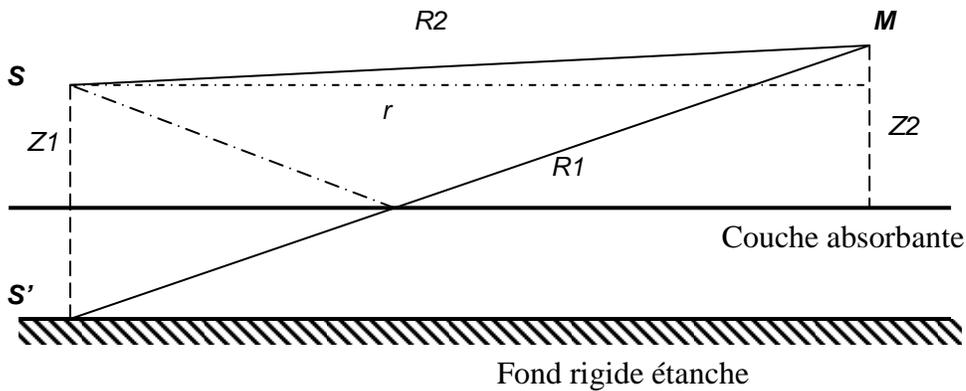


Figure 11: Schéma de principe de la mesure en incidence rasante

La pression réfléchie sur la surface de l'élément absorbant est calculée à partir de la mesure de pression totale, c'est-à-dire la pression incidente directe + pression réfléchie dans le cas d'un sol rigide (plancher bétonné et peint de la chambre semi-anéchoïque) puis d'une mesure de la pression totale en présence du matériau absorbant. La pression réfléchie est donnée par l'équation suivante :

$$P_r = \frac{P_t^l}{P_t^r} \left[\frac{\exp(ikR_1)}{R_1} + \frac{\exp(ikR_2)}{R_2} \right] - \frac{\exp(ikR_2)}{R_2}$$

Avec :

P_r , la pression réfléchie

P_t^l , la pression totale mesurée en présence du matériau

P_t^r , la pression totale mesurée sur fond rigide

La source utilisée lors de ces mesures était une source ponctuelle composée d'une chambre de compression à haute puissance reliée à un tube d'acier rigide de 1m de long et de diamètre intérieur de 1cm. Le signal d'excitation correspondait à une série de sinus situés sur les différentes fréquences de bande d'octave.

Lors des mesure de P_i^l et P_i^r , les écarts obtenus étaient inférieurs à l'incertitude de mesure (moins de 0,3 dB(A) sur chacune des fréquences). Ceci est principalement dû au faible taux d'absorption des échantillons testés. Des mesures additionnelles en chambre réverbérante sont prévues lors du mois de juillet. Les résultats de ces essais seront fournis au MTQ dès que disponibles.

Évaluation du bruit de roulement à grande distance :

Mesures (effectuées par le MTQ)

Des mesures de bruit de roulement ont été effectuées par le MTQ. Ces mesures ont été réalisées proches de la roue du véhicule à l'aide d'un audiomètre routier dynamique développé par le MTQ. La figure suivante montre le montage de mesure de l'ARD sur une roue de véhicule.



Figure 12 : Audiomètre routier dynamique développé par le MTQ [2]

Niveaux de bruit en bandes fines, mesure a 50 cm (données MTQ)

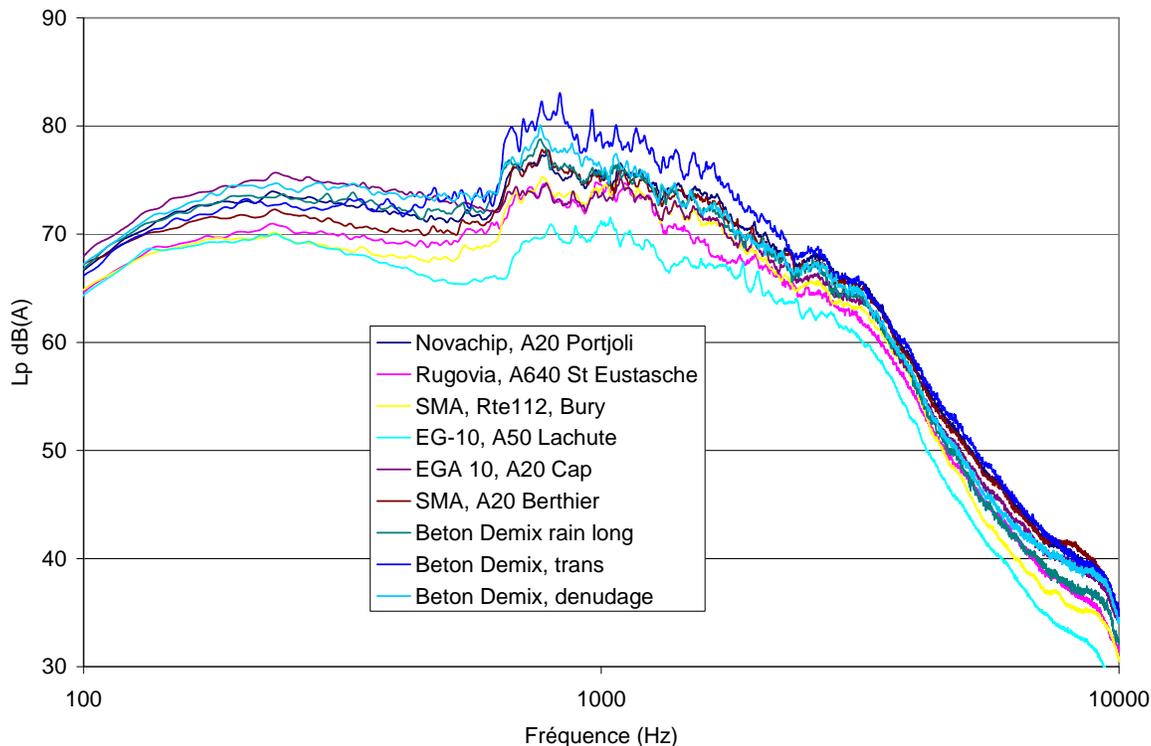


Figure 13 : Niveaux de bruit mesurés proches de la roue à l'aide de l'ARD pour différents types de revêtements

On remarque que les niveaux de bruit varient considérablement en fonction du type de revêtement. Le revêtement le plus bruyant est le béton rainuré transversalement. Ceci est dû aux impacts répétés du pneu sur les bords du rainage qui génèrent l'apparition de raies entre 900 et 1200 Hz.

Tous les spectres semblent présenter 2 zones distinctes :

- entre 100 et 900 Hz, un spectre relativement lisse en forme de cloche centrée sur 300 Hz;
- une zone plus mouvementée commençant aux environs de 900 Hz.

Il serait intéressant d'étudier plus en détail ce phénomène afin de vérifier s'il correspond à la transition entre deux modes de génération du bruit de roulement.

On rappelle ici les différents phénomènes responsables du bruit de roulement :

- **Vibration des pneus :** Les vibrations des pneus ont généralement 3 causes :
 - o L'impact du pneu sur de petites aspérités de la surface de roulement
 - o Le phénomène de 'stick-snap' lorsque l'une des formes du pneu quitte l'asphalte.
 - o Le phénomène 'stick and slip' produisant un bruit de type 'couinement', similaire à celui d'une chaussure de sport glissant sur une surface lisse ou au bruit de pneus entendu dans les stationnements intérieurs recouverts d'une peinture lisse.

- **Bruit aérodynamique** : Le bruit aérodynamique est généré par l'air tourbillonnant autour du pneu. Il est aussi dû en grande partie au phénomène de pompage de l'air emprisonné dans les cavités formées par les sculptures du pneu ou les aspérités de surface de la route.
- **Phénomènes d'amplification** : Ces phénomènes ont deux causes :
 - o L'effet de pavillon créé par l'angle de contact entre la roue (arrondie) et la chaussée
 - o L'effet de résonances acoustiques dues à la création d'éléments acoustiques résonnants, comme des tuyaux d'orgue ou de résonateur de Helmholtz créés par les cavités entre les sculptures et les aspérités de l'asphalte.

L'ensemble de ces phénomènes peut être favorisé ou atténué par les propriétés de surface de l'asphalte. Ainsi, un enrobé absorbant permettra de limiter les phénomènes d'amplification tandis qu'un enrobé présentant de fortes aspérités va amplifier les phénomènes de vibration du pneu.

Des tests en laboratoire et sur site permettraient de déterminer le contenu spectral de chacune de ces sources.

Calcul d'un filtre de propagation :

En utilisant le logiciel ISO dB2 développé par la firme Soft dB de Québec, on a évalué une fonction de transfert entre le bruit mesuré proche de la roue et le bruit entendu à grande distance. Cette fonction de transfert est évaluée en bandes d'octave. Elle tient compte à la fois des phénomènes d'atténuation atmosphérique en hautes fréquences ainsi que des phénomènes d'effets de sol. Ces phénomènes sont surtout sensibles à grande distance.

La courbe d'atténuation avec la distance est présentée sur la figure suivante.

Atténuation en fonction de la distance

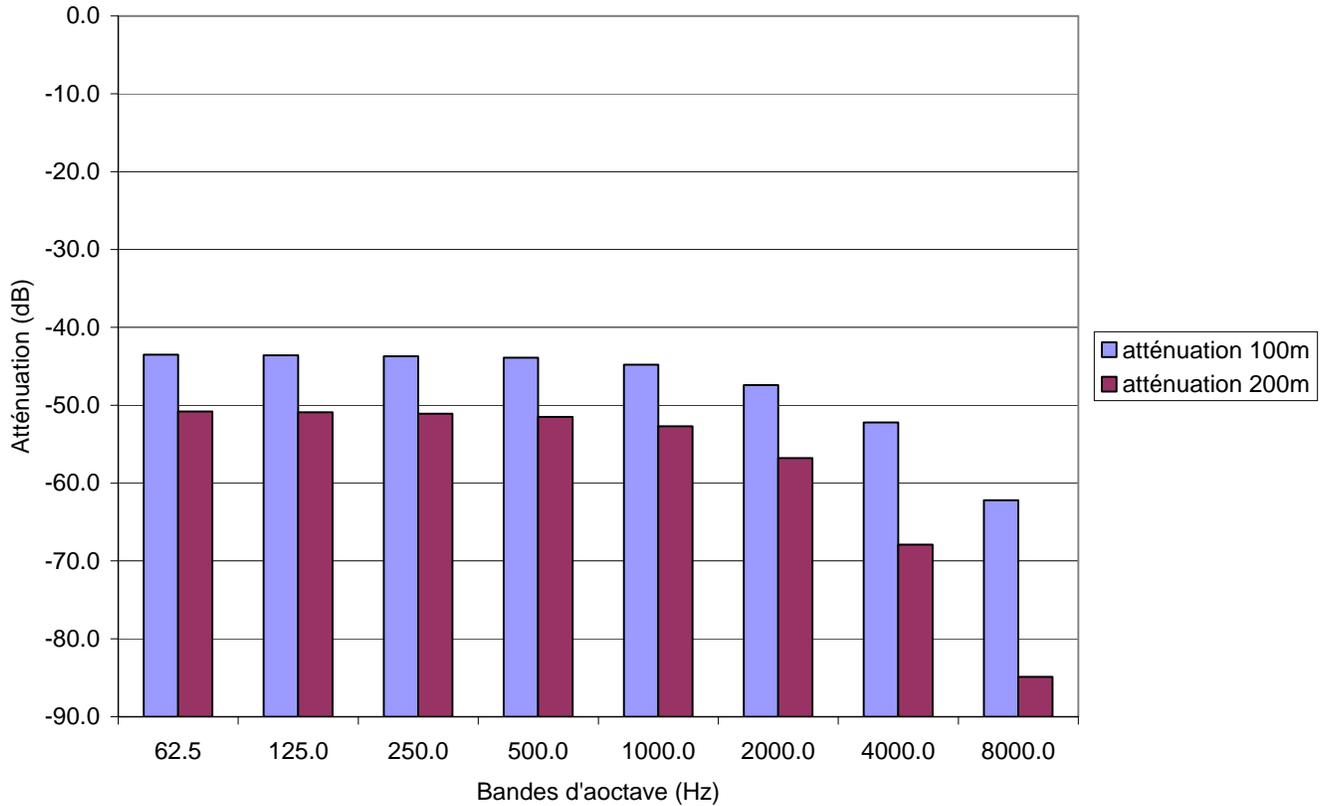


Figure 14 : Atténuation en fonction de la distance

On remarque sur la figure 14 que l'atténuation en fonction de la distance est sensiblement constante pour des fréquences inférieures à 500 Hz. Pour ces fréquences, l'atténuation est d'environ 6 dB par doublement de distance. Au-delà, l'atténuation devient de plus en plus importante avec la fréquence et la distance. À 2000 Hz, cette atténuation atteint environ 10 dB pour 2 kHz et près de 20 dB pour 4 kHz.

Niveaux de bruit calculés en fonction du type de revêtement

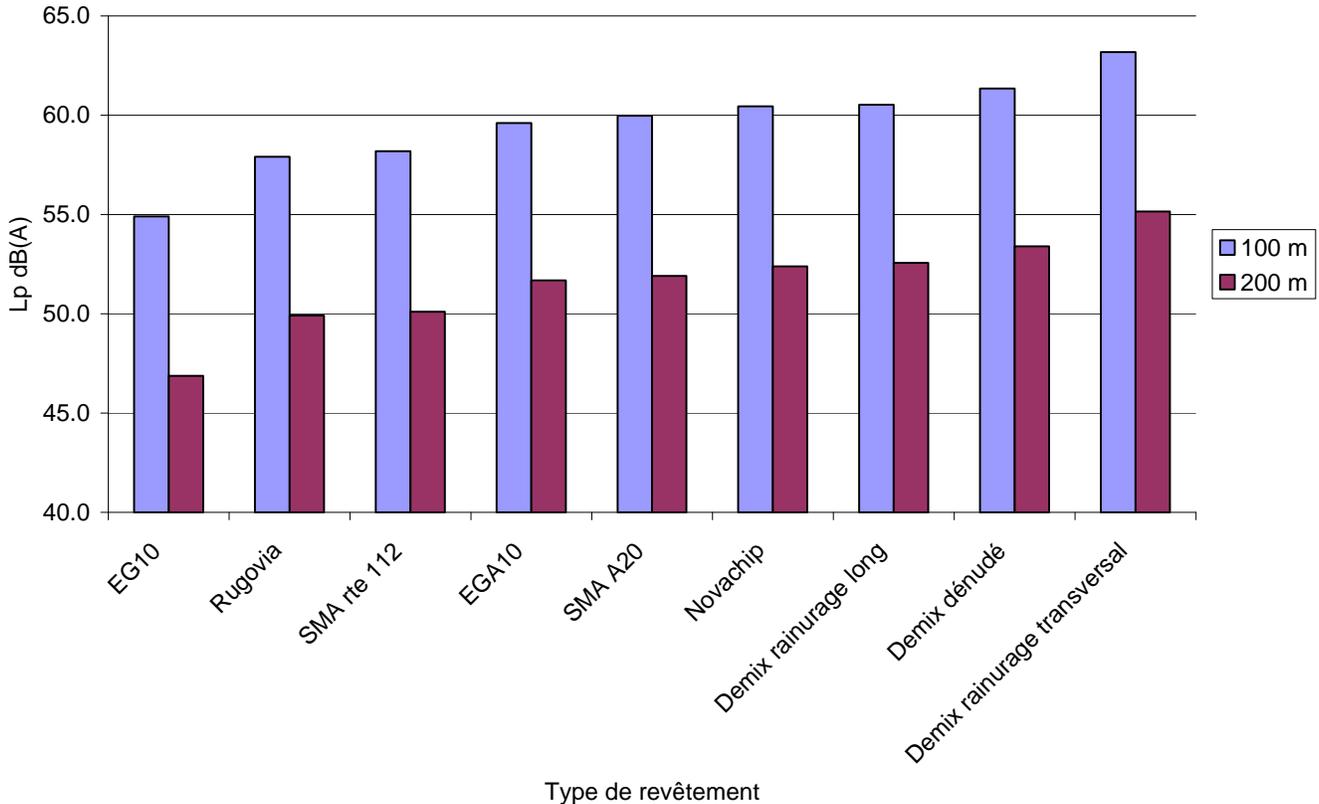


Figure 15: Niveaux de bruit générés pour différents types de revêtements

L'application du filtre relié à la propagation n'influence pas le classement des différents types de revêtements testés. Ceci s'explique essentiellement par l'allure des spectres, présentant le maximum d'énergie dans les bandes de fréquences de 1 et 2 kHz, ou l'effet de l'absorption atmosphérique et les effets de sol se font peu ressentir.

Le tableau suivant indique les niveaux de bruit mesurés en fonction de la texture du revêtement telle que mesurée par l'équipe du Highway Research Center de Auburn University.

Tableau 2 : texture du revêtement et niveau de bruit mesuré

	Texture (moy)	Texture (min)	Texture (max)	Lp 100 m dB(A)
EG10	0.83	0.50	1.26	54.9
Rugovia	1.34	1.30	1.34	57.9
SMA rte 112	0.47	0.50	0.47	58.2
EGA10	0.51	0.47	0.55	59.6
SMA A20	0.47	0.47	0.47	60.0
Novachip	0.76	0.76	0.76	60.4
Demix rainurage long	1.18	1.18	1.18	60.5
Demix dénudé	0.43	0.43	0.43	61.3
Demix rainurage transversal	0.65	0.58	0.72	63.2

Les résultats tels que présentés ici ne semblent pas montrer de lien direct entre la texture et le niveau de bruit mesuré. Toutefois, il n'est pas sûr que les sections testées soient les mêmes, ce qui complique l'analyse des résultats. Des recherches plus poussées seraient nécessaires afin de relier les résultats à la texture mesurée.

Conclusion

Les différents échantillons testés présentaient des coefficients d'absorption proche de zéro. Ce résultat était prévisible puisque, même si des échantillons pouvaient présenter une certaine porosité de surface, aucune connectivité entre les pores n'était visible. Tous les échantillons étaient également étanches à l'eau. Seuls les enrobés drainants, présentant une structure poreuse, donnent des valeurs d'absorption intéressantes. Par contre, l'utilisation de tels enrobés dans le contexte particulier du Québec reste problématique.

Les niveaux de bruit de roulement tels que mesurés par le MTQ montrent une grande disparité entre les revêtements. Les revêtements les plus bruyants étant ceux à base de béton, surtout avec une texture de type rainurage transversal. Les enrobés de surface de type EG10 ou Rugovia semblent acoustiquement efficaces. Toutefois, des mesures à différents stades d'usure seraient intéressantes afin de relier leur état de surface au bruit rayonné. Les données disponibles actuellement ne permettent toutefois pas de tirer des conclusions claires quant au rapport entre la texture du revêtement et son efficacité acoustique.

Référence :

[1] 'Les mesures d'absorption acoustiques de revêtements de chaussées' Fabienne Anfosso – Lédée (Laboratoire central des ponts et Chaussées, Bouguenais); Journées d'étude 'Bruit du trafic routier', Nantes, Nov 2001

[2] 'Mesure en continu du bruit au contact pneu-chaussée', Nadia Pouliot Ing, Ph. D. bulletin d'information technique vol. 11-1 fev. 2001, laboratoire des chaussées,