

Chapitre 3

Application aux enrobés drainants

Les enrobés drainants sont des couches de roulement placées en partie supérieure de la chaussées, en contact direct avec les véhicules. Cette technique qui apparaît pour la première fois au début des années cinquante en Angleterre fut par la suite l'objet de quelques campagnes d'expérimentations aux USA et en France. Après une période de balbutiement et encouragée par le développement des revêtement poreux dans les pays voisins (Belgique, Autriche, Pays Bas) cette méthode fut introduite en France au niveau de développement industriel depuis 1987. En 1992, on estimait que plus de 30 millions de mètres carrés ont été mis en oeuvre sur l'ensemble du réseau routier français.

Cette technique avait comme objectif initial d'offrir un maximum de sécurité aux usagers du réseau routier en supprimant l'aquaplanage et les projections d'eau par temps de pluie par une bonne évacuation des eaux. Il s'est avéré par la suite que ce type de revêtement a également des propriétés acoustiques intéressantes en réduisant le bruit de roulement à la source et en absorbant une partie avec un gain de l'ordre de 3 à 6dB. Il est maintenant admis qu'au delà de 50 km/h, le bruit de roulement est prédominant et que les contributions des bruits moteur, d'échappement et aérodynamiques deviennent négligeables, du moins pour les véhicules légers.

On estime généralement que les principaux processus générateurs de bruit de roulement se décomposent en trois mécanismes [Bar *et al.*, 1993] :

- bruit d'impact des sculptures du pneumatique sur la chaussée. Ce phénomène génère du bruit dans le domaine des basses et moyennes fréquences (125 – 1000 Hz). Il est d'autant plus important que la surface du revêtement est irrégulière.
- bruit lié au phénomène de compression/décompression (air pumping) de

l'air emprisonné dans les rainures du pneumatique. Les vibrations de l'air engendrent une émission acoustique dans le domaine des moyennes et hautes fréquences (1000 – 3000 H_z).

- bruit de collage/décollage (slip and stick) du pneumatique sur la chaussée. Lors du déplacement du pneumatique, ses pavés élémentaires en contact avec la chaussée se déforment et subissent une succession d'adhérence et de rupture d'adhérence engendrant un bruit dans les basses et moyennes fréquences.

La porosité de la chaussée permet de supprimer l'air pumping par échappement de l'air dans les pores, ce qui entraîne une réduction du bruit émis.

Après une multitude d'expérimentations et devant le succès des enrobés drainants, une étude théorique fut menée par l'INRETS [Hamet, 1988] en collaboration avec le LCPC. Ce modèle qui repose sur une approche macroscopique où le squelette est considéré rigide, montre que les phénomènes thermiques ne peuvent être négligés, en particulier pour les hautes fréquences [Hamet, 1992]. Cette modélisation met également en évidence que les performances acoustiques des enrobés drainants augmentent avec l'épaisseur jusqu'à une super-épaisseur (40 à 60 cm) au delà de laquelle on ne peut plus espérer une absorption supplémentaire.

Après une description du milieu poreux considéré, nous proposons d'appliquer le modèle microscopique établi au second chapitre afin d'optimiser les propriétés acoustiques de revêtements routiers poreux. Nous utiliserons plus précisément le modèle classique qui assimile le milieu poreux à un matériau à squelette rigide perforé par des conduits cylindriques identiques, non connectés et de section circulaire uniforme (§2.6.1). Nous étudierons ainsi l'influence des paramètres caractérisant physiquement l'enrobé drainant (épaisseur, tortuosité, résistance au passage de l'air et porosité). Nous introduirons pour cela le coefficient d'absorption en incidence normale qui est une bonne mesure des performances acoustiques d'un milieu poreux. Nos résultats seront comparés à ceux de l'INRETS puis validés expérimentalement.

3.1 Description d'un enrobé drainant

Les enrobés drainants sont des couches de matériau placées en partie supérieure de la chaussée, directement en contact avec les véhicules circulant. Cette couche est constituée d'un empilement de grains rigides "collés" les uns aux autres à l'aide d'un bitume enrichi de produits élastomères (COLFLEX) de manière à obtenir une bonne tenue mécanique de l'ensemble. La composition granulaire est généralement de l'ordre de 0/10 mm ou 0/14 mm avec une coupure 2/6

ou encore 2/10 selon les cas, dans la courbe granulométrique. Le matériau est donc composé de petites particules 0/2 (maximum 15%) et de gros grains 6/10 (ou encore 6/14, 10/14 lorsque l'intervalle de formulation est 10/14). Les gros grains occupent généralement 80% du volume, le liant 4 à 5%. Cette composition granulaire constitue donc un squelette rigide qui laisse apparaître un réseau poreux. Les vides communicants présentent des avantages sur le plan hydraulique et acoustique en permettant l'évacuation des eaux vers la couche d'étanchéité et la réduction du bruit de roulement par dissipations visqueuses et thermiques.

La porosité est généralement supérieure à 20% et l'épaisseur de l'ordre de 4 cm. Nous verrons par la suite qu'il est avantageux d'augmenter l'épaisseur et la porosité pour une meilleure absorption des ondes acoustiques.

3.2 Influence des paramètres physiques sur le coefficient d'absorption en incidence normale

Lorsque l'impédance de surface est supposée indépendante du point d'observation, la surface est dite à réaction localisée. Dans ces conditions, et en incidence normale, le coefficient d'absorption (noté α) est donnée par :

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z^s - 1}{Z^s + 1} \right|^2 \quad (3.1)$$

où Z^s est l'impédance de surface du revêtement poreux. Cette définition repose sur des considérations énergétiques et traduit la différence entre le flux d'énergie incident et le flux réfléchi par le matériau. Le coefficient α évolue entre 0 et 1, en étant minimal lorsqu'il n'y a pas d'absorption et maximal lorsque celle-ci est totale.

Les performances acoustiques des enrobés drainants seront mesurées à l'aide de ce coefficient et nous tâcherons d'en donner l'évolution en fonction de la fréquence pour différentes distributions de paramètres physiques. Nous supposerons par ailleurs que la couche de roulement repose sur une surface imperméable.

3.2.1 Influence de l'épaisseur

Nous proposons d'étudier l'influence de l'épaisseur sur les qualités acoustiques d'un enrobé drainant dont la résistance au passage de l'air, la porosité et la tortuosité sont maintenus constants. Nous avons choisi pour ces grandeurs des valeurs standards que nous pouvons retrouver dans des couches de roulements réelles ($R_s = 20kNs/m^4$, $\Omega = 0.2$, $k_s = 3$). Les résultats sont illustrés par la figure (3.1) où nous présentons l'évolution du coefficient d'absorption pour quatre épaisseurs (2, 4, 10 et 20 cm) et pour des fréquences allant jusqu'à $10kH_z$.

On constate que le coefficient d'absorption nul aux très basses fréquences, est soumis à des oscillations pour les fréquences plus grandes et ceci pour toutes les épaisseurs considérées. Cependant, la nature des oscillations dépend de l'épaisseur du matériau. Elles ont une amplitude importante pour les faibles épaisseurs avec des maxima d'absorption proches de 1, et plus modérée avec des largeurs de pics plus grandes pour les fortes épaisseurs. Les positions de ces pics sont également influencées, en les décalant vers les basses fréquences lorsque l'épaisseur augmente.

Quoi qu'il en soit, dans les deux cas, le maximum des pics d'absorption diminue lorsque la fréquence augmente.

En résumé, l'épaisseur permet de choisir le type d'absorption adéquat au problème posé, en proposant une absorption importante mais sélective pour les faibles épaisseurs, et une absorption plus faible mais relativement constante sur une gamme de fréquences plus étendue lorsqu'il s'agit d'une forte épaisseur.

Pour ce qui nous concerne, il est avantageux d'avoir une bonne absorption dans le domaine fréquentiel $500 - 1200 H_z$, où le bruit de roulement est concentré. Une épaisseur de 4 à 6 cm est donc optimale.

3.2.2 Influence de la résistance au passage de l'air

L'étude de l'influence de la résistance au passage de l'air est abordée en affectant au matériau des valeurs standards pour la porosité, la tortuosité et l'épaisseur ($\Omega = 0.2$, $k_s = 3$ et $E_p = 4$ cm) et en faisant varier le paramètre considéré ($R_s = 4, 20, 60$ et 100 kNs/m⁴). Nous rappelons que la résistance au passage de l'air est d'autant plus grande que les dimensions transverses des pores sont petites. Il s'agit en fait de l'inverse de la perméabilité statique relative à l'air. Nous verrons en fin de chapitre comment relier cette grandeur à la perméabilité mesurée *in situ* par le perméamètre de chantier. En effet cette mesure ne donne pas une perméabilité au sens Darcy, mais plutôt une vitesse de percolation moyenne.

Les résultats sont illustrés sur la figure (3.2).

Comme dans le cas précédent (§3.2.1), l'absorption fait l'objet d'oscillations aux moyennes et hautes fréquences. L'analyse des courbes montre que l'augmentation de la résistance au passage de l'air entraîne :

- Une diminution des maxima associée à un élargissement des pics.
- Un léger décalage des pics vers les basses fréquences.
- Une absorption relativement constante.

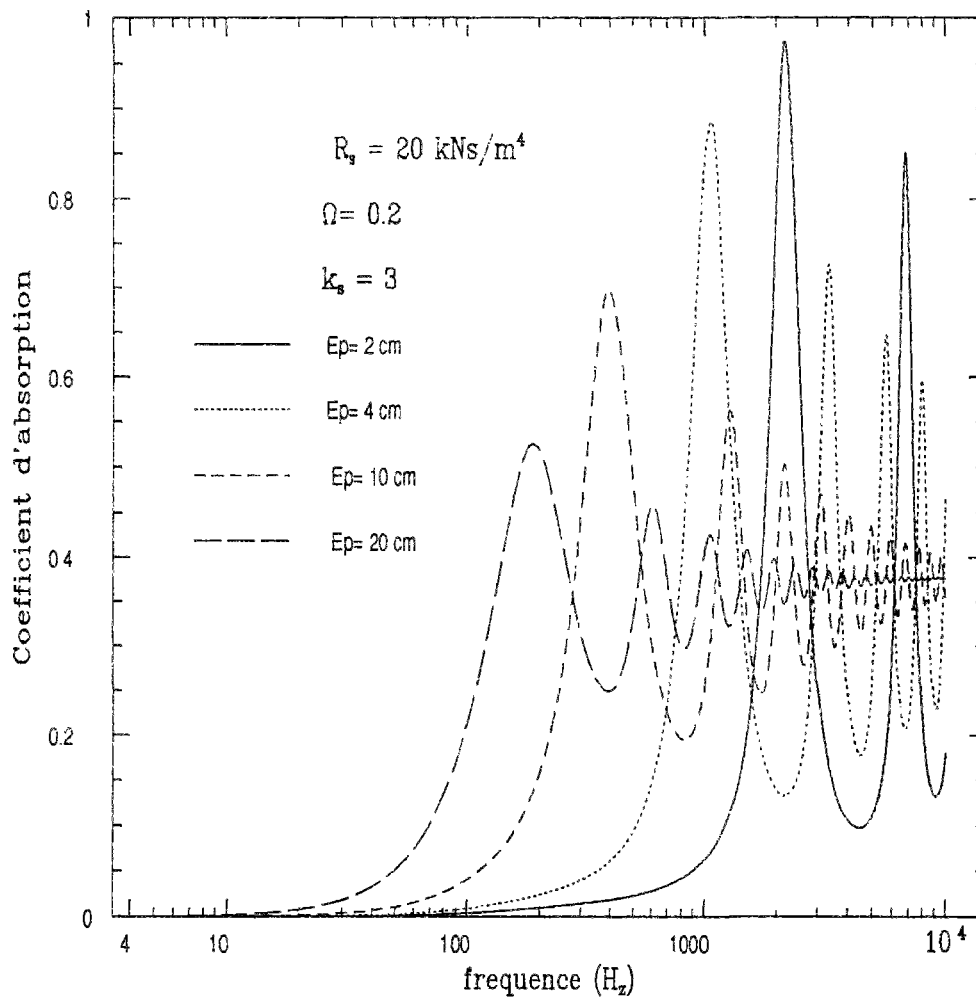


FIG. 3.1 - Influence de l'épaisseur

Quelque soit la résistance, les valeurs des maximas diminuent lorsque la fréquence augmente. Une faible résistance au passage de l'air peut ainsi offrir de fortes absorptions, mais dans un domaine fréquentiel réduit. Une forte résistance au passage de l'air (faible perméabilité) permet d'obtenir une absorption peut être plus faible, mais plus régulière sur une gamme de fréquence plus large. Mais il ne faut pas perdre de vue que ce matériau plus sensible au colmatage, perd les propriétés de drainabilité des eaux de pluie. Il est donc préférable de se donner une épaisseur associée à une résistance minimale offrant un maximum d'absorption au voisinage des 1000 Hz où le bruit routier est relativement important. Ainsi, pour une épaisseur de 4 cm , une résistance au passage de l'air de 20 kNs/m^4 est un bon compromis.

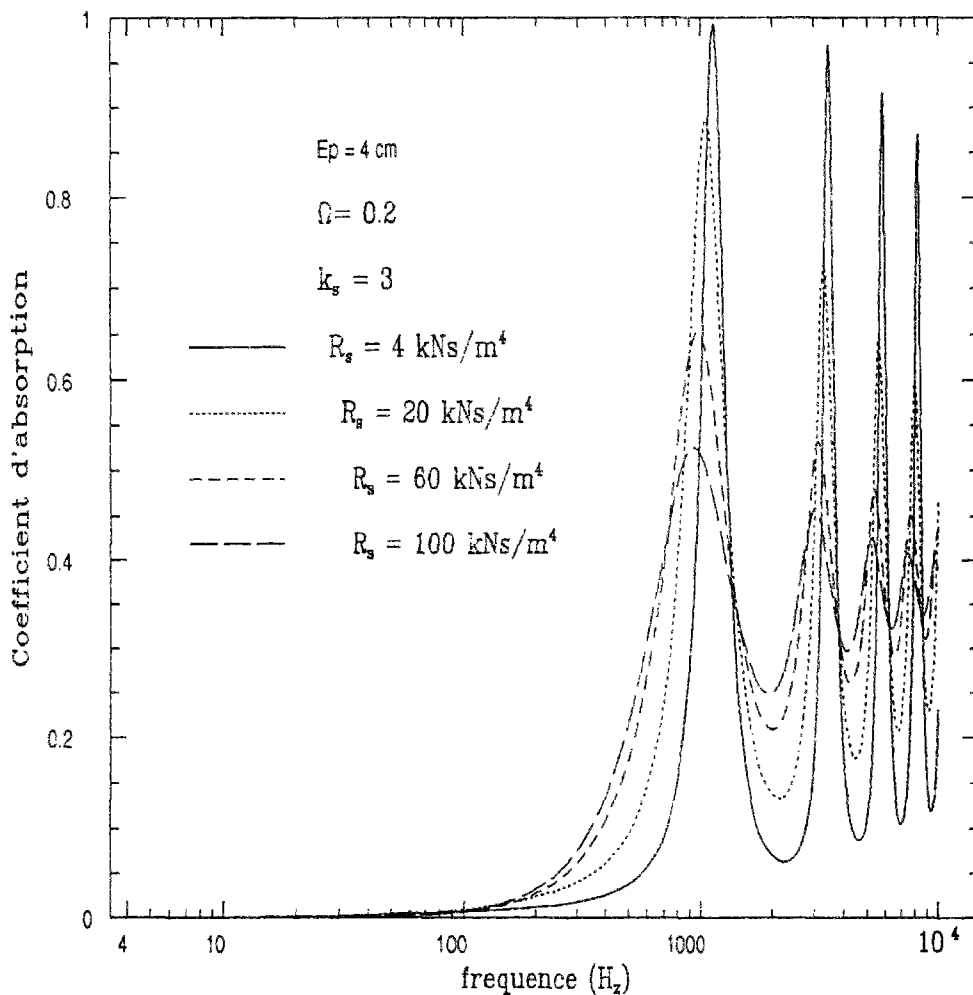


FIG. 3.2 - Influence de la résistance au passage de l'air

3.2.3 Influence de la porosité

Le matériau considéré d'épaisseur 4 cm, a une tortuosité égale à 3 et une résistance au passage de l'air à 20 kNs/m^4 . Le calcul du coefficient d'absorption est effectué pour quatre porosités différentes ($\Omega = 0.1, 0.2, 0.3$ et 0.5). Les résultats sont donnés par la figure (3.3).

Il s'avère que les maxima diminuent toujours avec la fréquence quelque soit la distribution des paramètres et le coefficient d'absorption oscille pour les moyennes et hautes fréquences. Une augmentation de la porosité se traduit par :

- Un élargissement des pics accompagné d'une augmentation d'absorption.
- Un léger décalage des maxima vers les basses fréquences. Toutefois, on peut estimer que la position de ces maxima est inchangée avec une erreur de 10% maximum (calculée entre une porosité de 0.1 et de 0.5). Si l'on désire déplacer

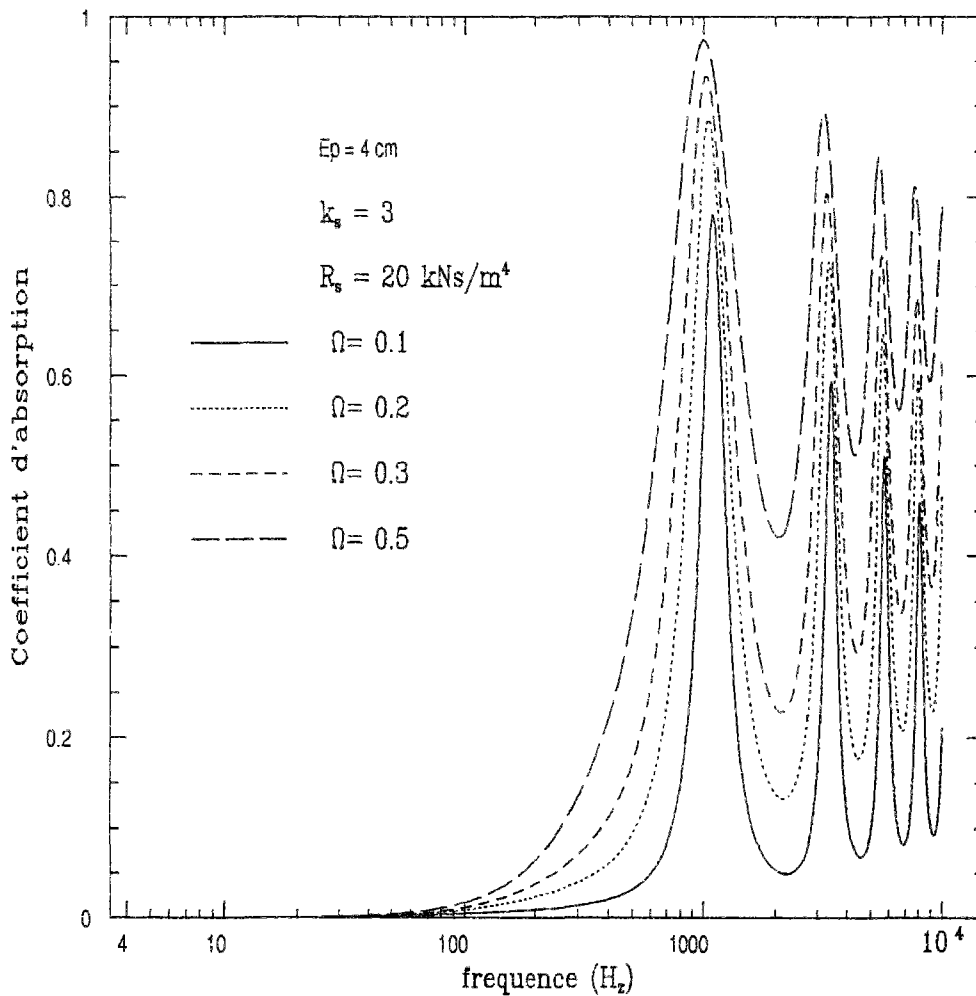


FIG. 3.3 - Influence de la porosité

les pics, il est préférable de modifier l'épaisseur.

Il est donc avantageux d'augmenter au maximum la porosité de façon à obtenir une absorption optimale. Actuellement l'utilisation de liants enrichis permet d'atteindre des teneurs en vides très élevées, pouvant atteindre 30% de vides. Des bitumes encore plus performants pourrait tout en améliorant la tenue mécanique, offrir une meilleure absorption par une porosité plus importante. On peut aussi penser à utiliser un revêtement à forte porosité sur une voie à faible trafic comme sur les bandes d'arrêt d'urgence. Quoiqu'il en soit, il serait intéressant de mener des recherches sur des couches de roulement à très fortes porosités. Outre les qualités acoustiques, celles-ci ont également l'avantage d'offrir une bonne capacité à drainer les eaux de pluies et une bonne résistance au colmatage.

3.2.4 Influence de la tortuosité

Nous calculons le coefficient d'absorption pour quatre tortuosité différentes simulant ainsi des configurations allant de pores droits ($k_s = 1$) à des pores fortement sinueux ($k_s = 6$). On maintient pour les autres paramètres les valeurs standards ($\Omega = 0.2$, $R_s = 20kNs/m^4$ et $E_p = 4\text{ cm}$).

Les résultats illustrés par la figure (3.4) indiquent qu'il y a une diminution des maxima avec la fréquence mais également avec la tortuosité.

Il est profitable d'utiliser une tortuosité permettant de positionner le premier pic au voisinage des fréquences de bruit que l'on désire atténuer. Ainsi pour une tortuosité égale à 3, le domaine fréquentiel ($500 - 1200H_z$) est alors bien couvert et on obtient une bonne réduction du bruit routier. Notons que l'on peut modifier la position du premier pic, par une augmentation de l'épaisseur. La figure (3.5) montre qu'en augmentant l'épaisseur (6 cm) l'absorption est bien meilleure pour des pores droits ($k_s = 1$) que pour des pores tortueux ($k_s = 3$). Les maxima au voisinage de $1000H_z$ sont quasiment identiques, mais la largeur du pic est plus importante. Cependant, ceci représente un coût de production supplémentaire. Il convient plutôt d'ajuster la tortuosité pour une épaisseur aussi petite que possible.

Cependant pour un milieu granulaire, la tortuosité est encore une grandeur mal maîtrisée. Sa mise en oeuvre est délicate et nécessite un savoir faire technique qu'il faut développer davantage. Il semblerait toutefois que la porosité et la tortuosité ne sont pas indépendantes. Attenborough [Attenborough, 1983] introduit la relation $k_s = \Omega^n$, où n est une constante à déterminer pour un milieu donné. Cette constante dépend de la distribution granulaire choisie et une étude statistique sur un grand nombre d'éprouvettes est nécessaire pour son identification et pour en vérifier la pertinence. Hamet par une analyse d'échantillons de laboratoire constate qu'il existe une tendance à ce que la tortuosité augmente avec le pourcentage de vides. Ici aussi, il s'agit d'un penchant à confirmer. Cette analyse met tout de même en évidence l'opportunité d'une étude granulométrique qui conditionne la tortuosité des vides.

A défaut de mesures, ce paramètre peut être ajusté de manière à caler l'outil numérique aux mesures expérimentales.

3.3 Corrélation entre résistance au passage de l'air et perméabilité mesurée *in situ*

Comme nous l'avons déjà évoqué, la résistance au passage de l'air peut être déduite de la perméabilité intrinsèque à travers une mesure *in situ* de la perméabilité relative à l'eau. On utilise en général deux types d'appareils pour définir les qualités de drainage des enrobés drainants : le perméamètre de chantier à charge variable (norme NF P 98-257-3) qui fonctionne en régime transitoire et le perméamètre automatique (NF P 98-254-4) à charge constante qui travaille en régime

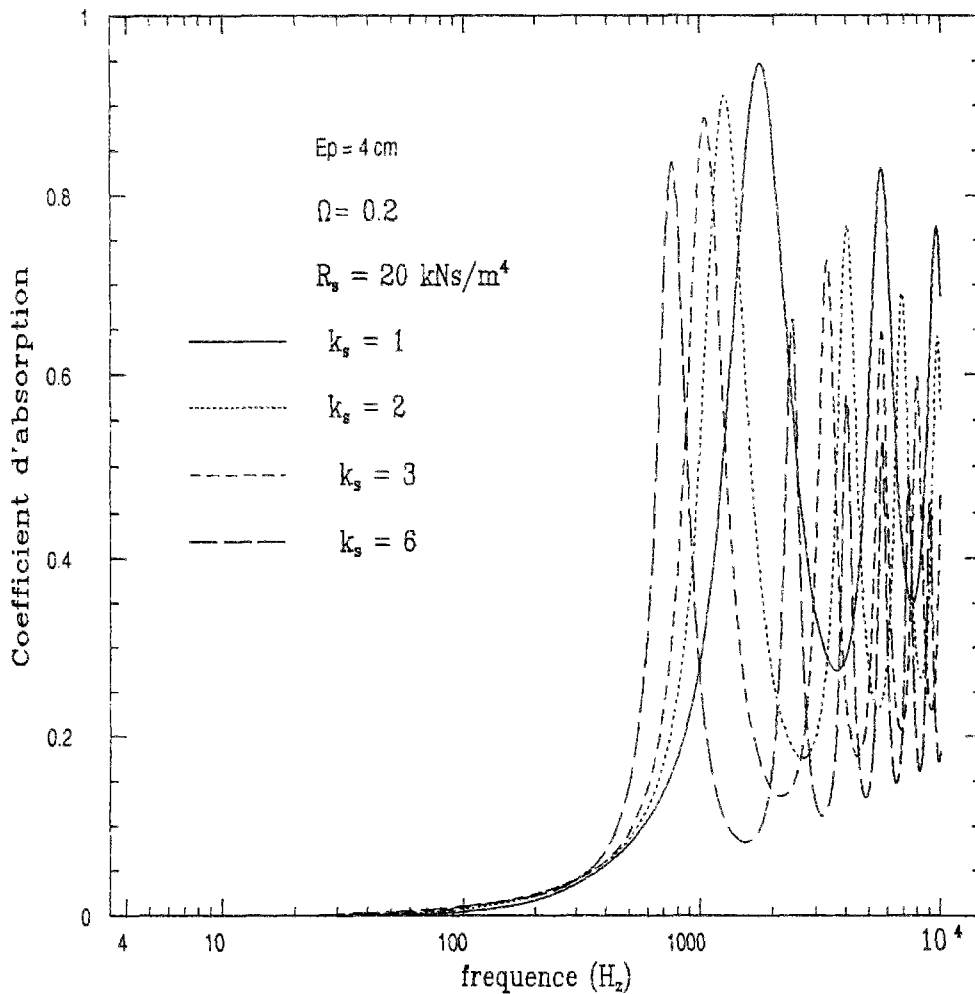


FIG. 3.4 - Influence de la tortuosité

stationnaire. Ces deux outils permettent d'effectuer des mesures directement sur la chaussée. Le perméamètre à charge constante a l'avantage de fournir des mesures courantes avec un appareillage réduit. Le perméamètre automatique donne des mesures plus fines en utilisant un matériel plus volumineux et lourd. Quoiqu'il y en soit ces deux appareils ne donnent pas une mesure de la perméabilité au sens de Darcy, mais plutôt une vitesse moyenne de percolation (en cm/s pour le perméamètre de chantier) ou encore un débit (en l/s pour le perméamètre de chantier ou encore en $\text{l/m}^2.\text{s}$ lorsque l'on divise le débit par la section du patin d'injection) et il est alors difficile de relier ces quantités à la résistance au passage de l'air.

Une étude récente menée à l'ENTPE [Di Benedetto *et al.*, 1996] nous a permis de surmonter cette difficulté. Celle-ci fut consacrée à la mise au point d'un perméamètre de laboratoire régulé en température et susceptible de fournir une estimation de la perméabilité de Darcy relative à un fluide. Les auteurs se sont

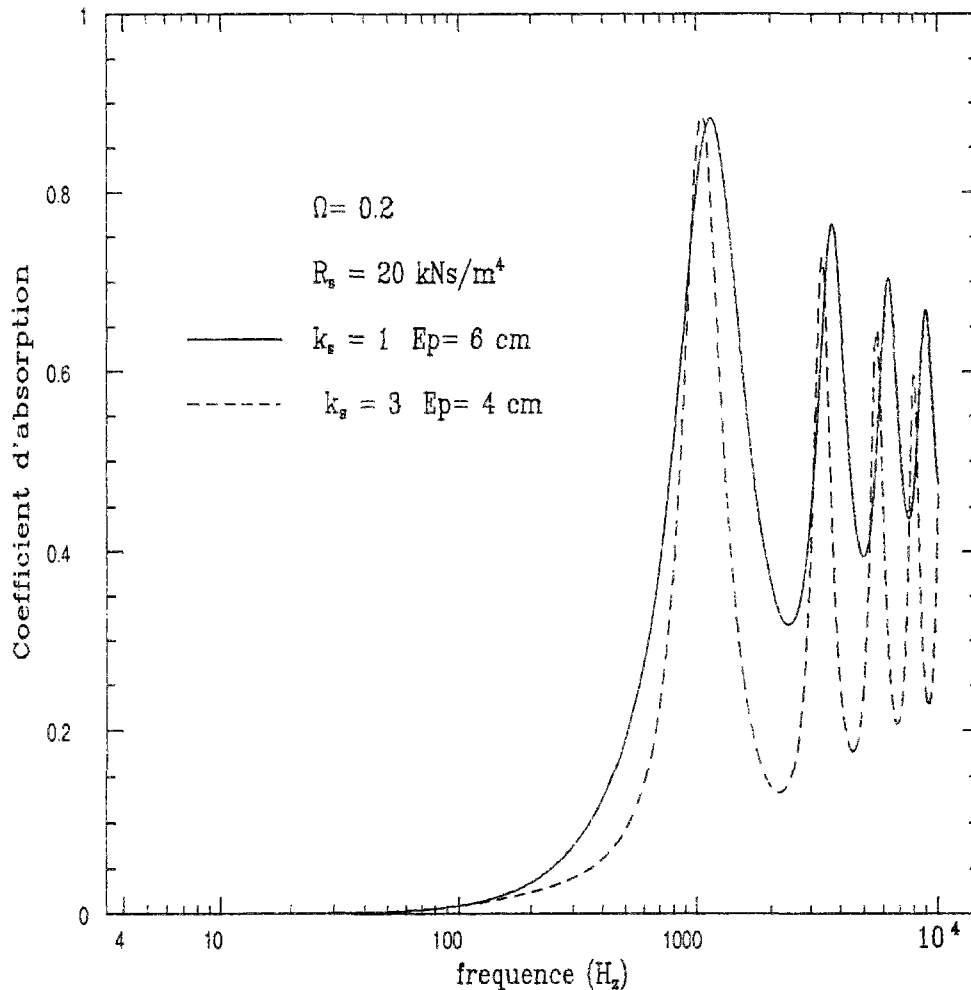


FIG. 3.5 - Optimisation de la tortuosité

également efforcés de dégager une relation entre cette mesure et celle donnée par les perméamètres à charge variable et constante. Ils mettent ainsi en évidence une relation de proportionnalité entre la perméabilité de Darcy \mathcal{K} et les perméabilités V_q et V_p données respectivement par les perméamètres automatique et de chantier. Nous nous contenterons d'en donner les résultats, le lecteur pourra se reporter à leur publication pour d'avantage de détails. Nous dirons simplement que les auteurs modélisent le fonctionnement du perméamètre en utilisant un calcul numérique en régime stationnaire lorsqu'il s'agit du perméamètre automatique et en raison du caractère transitoire de l'écoulement pour un perméamètre de chantier, une méthode associant un calcul analytique couplé à un développement numérique dans un cas stationnaire.

Pour un revêtement donné, les coefficients de proportionnalité (notés A et β) dépendent de l'épaisseur et de la porosité pour le perméamètre de chantier et uniquement de l'épaisseur lorsqu'il s'agit du perméamètre automatique. Les

relations recherchées s'expriment donc de la manière suivante :

$$\mathcal{K} = A(E_p) V_q \quad (3.2)$$

$$\mathcal{K} = \beta(E_p, \Omega) V_p \quad (3.3)$$

Le calcul de ces coefficients est résumé par les tableaux (3.1) et (3.2) pour différentes épaisseurs et porosités que l'on retrouve généralement dans les revêtement poreux classiques :

$E_p(cm)$	$A(E_p)$
4	1.74
6	1.24
8	0.99

TAB. 3.1 - Coefficient A reliant la perméabilité relative de Darcy et la mesure effectuée à l'aide d'un perméamètre automatique

$E_p(cm)$	$\Omega(\%)$	10	12	15	17	20	22	25	27	30
4		0.891	0.871	0.812	0.775	0.723	0.692	0.659	0.641	0.613
6		0.518	0.515	0.491	0.466	0.428	0.409	0.386	0.370	0.355
8		0.358	0.370	0.349	0.328	0.300	0.284	0.266	0.257	0.245

TAB. 3.2 - Coefficient β reliant la perméabilité relative de Darcy et la mesure effectuée à l'aide d'un perméamètre de chantier à charge variable

En utilisant les valeurs numériques des coefficients A et β , nous pouvons à présent relier directement la résistance au passage de l'air à la perméabilité mesurée sur site pour des épaisseurs et porosités courantes. Le coefficient de perméabilité mesuré par le perméamètre de laboratoire est décrit par la relation suivante issue de la loi de Darcy :

$$\mathcal{K} = \frac{Q E_p}{S \Delta H} \quad (3.4)$$

où nous avons noté ΔH la différence de charge pour une éprouvette de section S et d'épaisseur E_p soumise à un flux de débit Q . Nous pouvons y associer la perméabilité intrinsèque :

$$\kappa = \frac{\mathcal{K} \eta_{sat}}{\rho_{sat} g} \quad (3.5)$$

η_{sat} , ρ_{sat} désignent respectivement la viscosité et la densité du fluide saturant, g l'accélération de la pesanteur. En notant η la viscosité de l'air saturant les pores, la résistance au passage de l'air est définie par :

$$R_s = \frac{\eta}{\kappa} \quad (3.6)$$

En reportant les équations (3.5), (3.2) et (3.3), nous exprimons directement la résistance au passage de l'air en fonction des mesures de perméabilités effectuées sur site à l'aide des perméamètres de chantier et automatique :

- Perméamètre de chantier à charge variable

$$R_s = \frac{\eta \rho_{sat} g}{\eta_{sat} \beta(E_p, \Omega) V_p} \quad (3.7)$$

- Perméamètre automatique à charge constante

$$R_s = \frac{\eta \rho_{sat} g}{\eta_{sat} A(E_p) V_q} \quad (3.8)$$

Ces deux perméamètres utilisent de l'eau comme fluide saturant, nous avons donc dans les conditions standards :

$$\eta_{sat} = 101 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (3.9)$$

$$\rho_{sat} = 10^3 \text{ kg m}^{-3} \quad (3.10)$$

Pour le coefficient de viscosité de l'air et l'accélération de la pesanteur, nous prenons :

$$\eta = 1.84 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (3.11)$$

$$g = 9.81 \text{ m s}^{-2} \quad (3.12)$$

3.4 Validation expérimentale

La validation a été effectuée sur une éprouvette (non usagée, c'est à dire non colmatée) fourni par la société COLAS et issue d'un carottage sur la rocade de Rion. Nous avons pu réaliser une mesure du coefficient d'absorption en incidence normale en utilisant un tube de Kundt Brüel&Kjaer de type 4002 (fig 3.6). Le

principe de mesure est relativement simple : On fixe l'éprouvette à une extrémité d'un conduit cylindrique fermée par un embout réfléchissant. A l'autre extrémité se trouve un haut parleur qui émet une onde harmonique. Celle-ci est atténuée en se réfléchissant sur l'échantillon et se superpose avec l'onde incidente. Nous obtenons ainsi un système d'ondes stationnaires dans le conduit.

Le coefficient d'absorption se calcule par une mesure de la pression à différentes positions par l'intermédiaire d'un microphone mobile. En notant p_{max} et p_{min} la pression maximale et minimale pour une fréquence donnée, le coefficient d'absorption est donné par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{4n}{n^2 + 2n + 1} \quad \text{avec } n = \frac{p_{max}}{p_{min}} \quad (3.13)$$

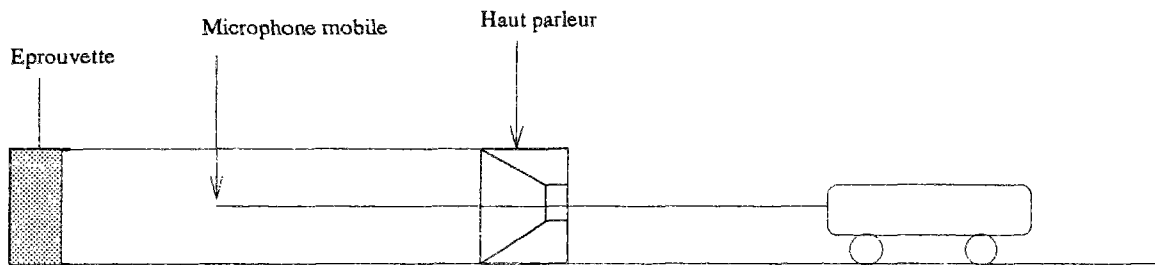


FIG. 3.6 - Tube de Kundt

Cette technique nécessite un carottage précis permettant à l'échantillon de s'insérer parfaitement dans le tube. Elle est bien entendu limitée à des fréquences inférieures à la fréquence de coupure du tube au delà de laquelle se propagent les modes supérieurs. Le tube utilisé de section circulaire et de diamètre de $0.1m$ autorise donc les fréquences inférieures à $1800H_z$.

La figure (3.7) illustre les résultats du calcul et des mesures effectuées au tube de Kundt. Tous les paramètres physiques ont été fournis par la COLAS à l'exception de la tortuosité que nous avons ajusté de manière à caler la courbe théorique aux mesures expérimentales. Nous obtenons toutefois un ordre de grandeur tout à fait plausible ($k_s = 2.5$), que l'on retrouve souvent dans la littérature. Pour ce qui est de la résistance au passage de l'air, celle-ci fut déduite d'une mesure de vitesse de percolation effectuée au perméamètre de chantier à charge variable en utilisant les considérations de la section précédente et en particulier la définition (3.7).

Les résultats sont satisfaisants notamment dans le domaine des fréquences moyennes. Pour les basses fréquences, les différences peuvent s'expliquer par une erreur de mesure des pressions. En effet, pour ces fréquences, la longueur d'onde

grande devant la dimension du tube ne nous a pas permis d'obtenir les véritables pressions maximales.

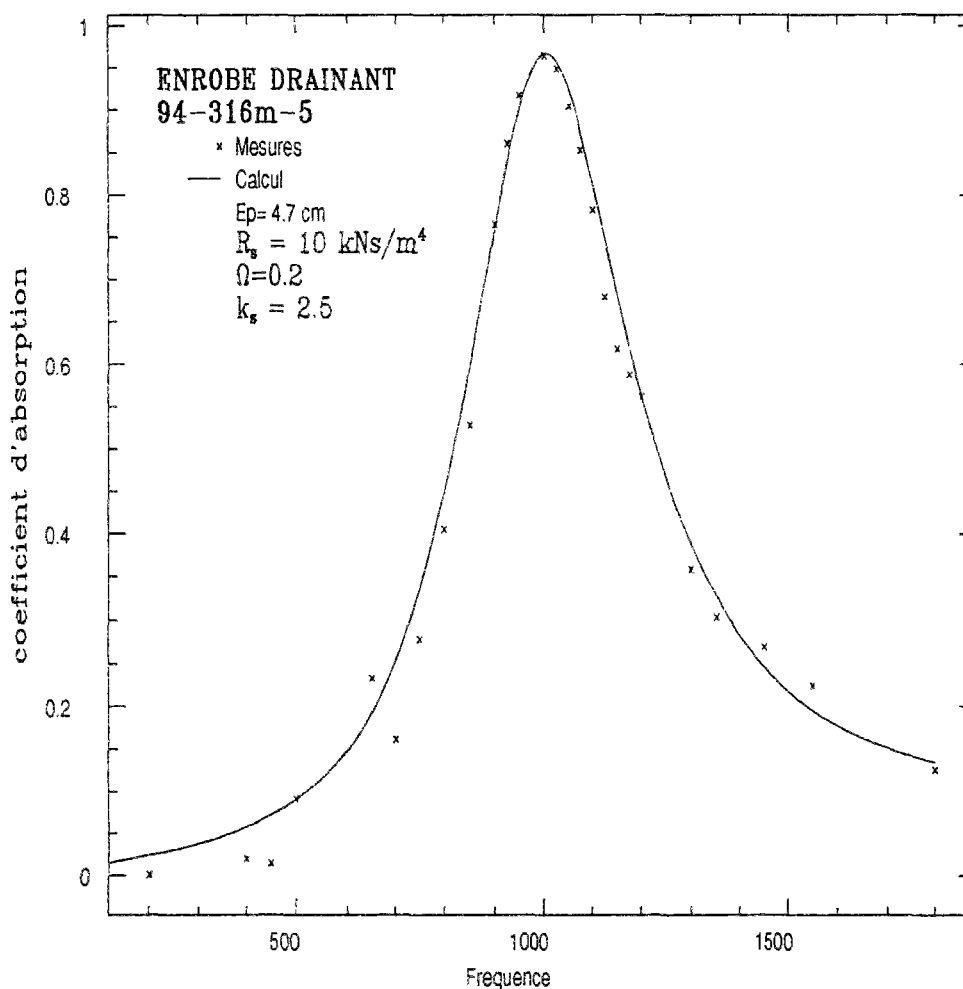


FIG. 3.7 - Comparaison entre les résultats théoriques du modèle microscopique et les mesures expérimentales

Nous avons également comparé les résultats du modèle microscopique au modèle de l'INRETS (Figure 3.8), toujours pour le même matériau, mais pour des fréquences plus grandes allant jusqu'à $5000H_z$. Les courbes d'absorption sont sensiblement identiques au voisinage du premier pic, mais différent légèrement lorsque les fréquences sont plus élevées. Nous constatons un décalage vers les basses fréquences associé à un maxima d'amplitude plus importante pour le modèle microscopique, au voisinage du second pic. Il faudrait effectuer des mesures au delà de $1800H_z$ pour identifier la modélisation la plus performante. Ceci pourrait se faire par l'utilisation d'un tube de Kundt de diamètre réduit, mais nous risquerions de perdre l'homogénéité du matériau. Quoi qu'il en soit, pour un pro-

blème d'absorption de bruit routier (voisinage des $1000H_z$ où se situe le premier pic pour des épaisseurs et tortuosités courantes), les deux modélisations sont tout a fait efficaces.

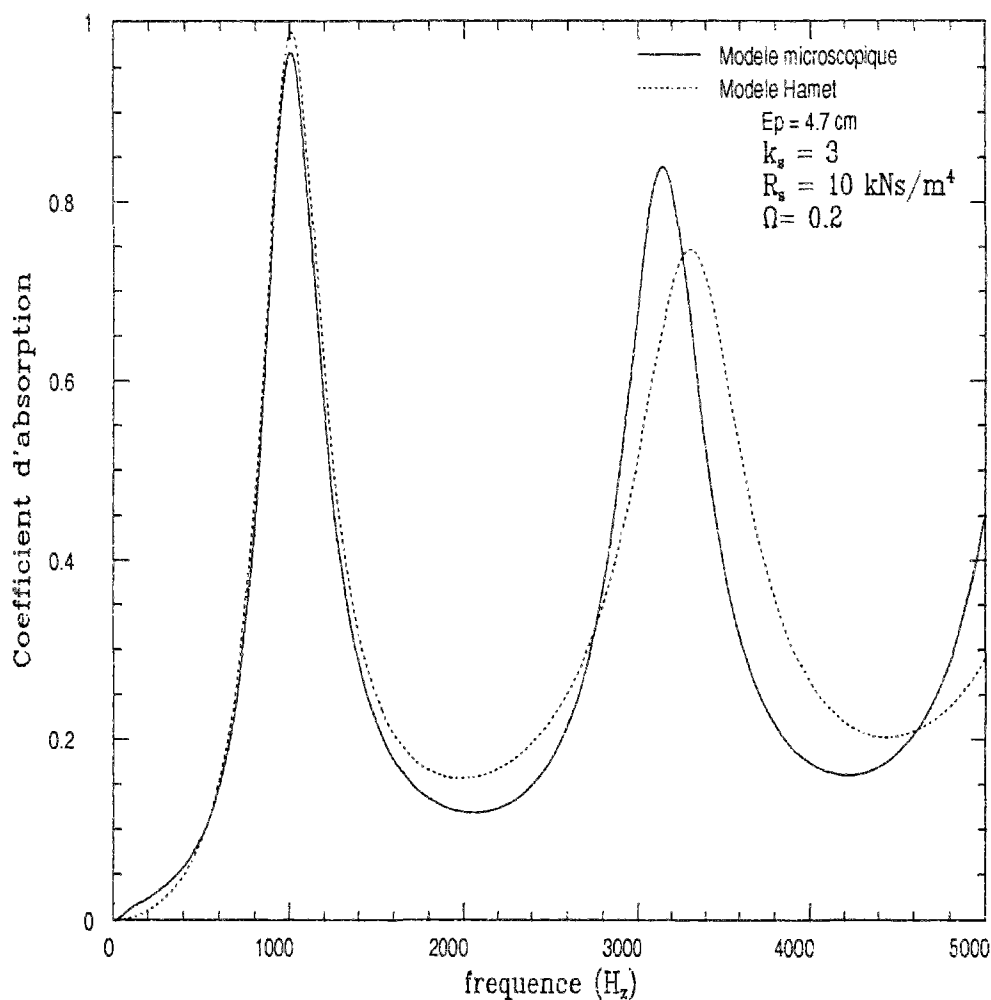


FIG. 3.8 - Comparaison entre les résultats théoriques du modèle microscopique et le modèle macroscopique de Hamet

3.5 Conclusion

Nous avons illustré la modélisation microscopique par une application aux enrobés drainants en retenant un modèle relativement simple à quatre paramètres (épaisseur, porosité, tortuosité, résistance au passage de l'air) où tous les pores sont supposés non connectés.

Les résultats validés expérimentalement, indiquent qu'une approche microscopique peut être utilisée pour optimiser le comportement acoustique de ces chaussées.

Il en ressort principalement que l'épaisseur et la tortuosité conditionnent fortement l'amplitude et la position des pics d'absorption tandis que la résistance au passage de l'air et la porosité influencent plutôt l'amortissement des oscillations.

Une situation idéale serait de construire un enrobé où les pores sont de préférence le moins tortueux, d'épaisseur suffisante pour positionner le pic au voisinage des fréquences que l'on désire atténuer, de faible résistance au passage de l'air (de manière à limiter les risques de colmatage) et de forte porosité. Bien entendu, si l'on désire atténuer les fréquences au voisinage des $1000H_z$, une diminution de la tortuosité va se traduire par une augmentation de l'épaisseur, donc du coût de production. Il faut toutefois préciser que ces propos n'indiquent que des tendances et ne sont pas en soit les résultats d'un problème d'optimisation. Celui-ci sera posé formellement en seconde partie en fonction du site considéré. Nous verrons qu'il est nécessaire d'utiliser des méthodes numériques pour le résoudre.

Nous avons pu également nous affranchir de l'utilisation d'un réamètre de laboratoire et dégager une estimation de la résistance au passage de l'air directement à partir de la vitesse de percolation mesurée *in situ*.

Il reste alors à définir une méthodologie susceptible de contrôler et reproduire la tortuosité des chaussées poreuses.

Conclusion

Cette première partie de nature bibliographique pour une bonne part, nous a permis de présenter les différents modèles utilisés pour caractériser les propriétés acoustiques de milieux poreux. Ceux-ci utilisent au moins trois paramètres (porosité, tortuosité et résistance au passage de l'air) pour décrire le matériau poreux.

Nous les avons classés en deux familles.

Le premier chapitre, consacré à la première famille, regroupe les approches macroscopiques et introduit la théorie de Biot. Celle-ci est valable lorsque le squelette est élastique et pour des dissipations thermiques négligeables. La rigidité de la phase solide simplifie les équations et donne le modèle de Biot-Allard.

Le modèle phénoménologique considère que le squelette est rigide et suppose que le matériau poreux peut être assimilé à un fluide compressible dissipatif. Le nombre de paramètres réduit et la simplicité des équations en fait un outil pratique.

Le second chapitre fut consacré à la famille des modèles issus de l'approche microscopique. Les différentes modélisations supposent que le matériau est composé de pores identiques. Ils consistent à caractériser les qualités acoustiques d'un pore pour les remonter à l'échelle macroscopique du matériau. Nous avons montré (ce qui résume l'essentiel de notre contribution à ce niveau) que l'influence de la forme du pore est négligeable dans le cadre de cette étude.

Le troisième chapitre présente une application de l'approche microscopique pour des matériaux de type enrobés drainants et indique l'influence des paramètres macroscopiques classiques (porosité, tortuosité et résistance au passage de l'air) sur les performances acoustiques.

L'approche microscopique semble révéler que l'utilisation de trois paramètres (Ω , R_s et k_s) est insuffisante lorsque l'on considère des pores à géométries complexes. Cependant, le régime de validité des différents modèles généralisés par l'introduction de paramètres additionnels n'est toujours très clair. Il apparaît même un désaccord entre les modèles qui utilisent un nombre de variables complémentaires différent. D'un autre côté, la littérature souligne souvent les incom-

patibilités entre les résultats issus des méthodes théoriques et ceux fournis par l'expérience.

Nous pensons qu'il est nécessaire d'affiner la description du réseau poreux pour expliquer ces différences et enrichir les modèles existants. Cela ne peut se faire que dans le cadre d'une approche à l'échelle du pore, et sera l'objet de la seconde partie de ce document.

Deuxième partie

Milieu poreux avec discontinuités