



Gouvernement du Québec
Ministère des Transports
Service de l'Environnement

LES REVÊTEMENTS ROUTIERS ET LE BRUIT

CANQ
TR
GE
CA
130

285539



Gouvernement du Québec
Ministère des Transports

Service de l'Environnement

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
DIRECTION DE L'OBSERVATOIRE EN TRANSPORT
SERVICE DE L'INNOVATION ET DE LA DOCUMENTATION
700, Boul. René-Lévesque Est, 21^e étage
Québec (Québec) G1R 5H1

LES REVÊTEMENTS ROUTIERS ET LE BRUIT

AVRIL 1991

CANQ

TR

GE

CA

130

Ce document de recherche a été exécuté par le personnel du Service de l'environnement du ministère des Transports du Québec, sous la responsabilité de monsieur Claude Girard, économiste-urbaniste.

ÉQUIPE DE TRAVAIL

Marc Lalonde Ingénieur en contrôle de la pollution
(recherche et rédaction)

Révision:

Line Gamache ingénieure

Graphisme et édition:

Hrant Khandjian technicien en arts appliqués et graphiques

France Benoît technicienne en arts appliqués et graphiques

TABLE DES MATIÈRES

ÉQUIPE DE TRAVAIL	i
INTRODUCTION	1
PARTIE A - LE BRUIT DES VÉHICULES	2
1. LE BRUIT DES VÉHICULES	3
2. LE BRUIT DE ROULEMENT (CONTACT PNEU/CHAUSSÉE)	6
3. LA DIRECTIVITÉ DU BRUIT DE CONTACT PNEU/CHAUSSÉE	12
4. LA RÉDUCTION DU BRUIT À LA SOURCE	13
PARTIE B - LES REVÊTEMENTS POREUX	15
1. LES ENROBÉS DRAINANTS	16
2. L'ADHÉRENCE DES ENROBÉS DRAINANTS	24
3. CARACTÉRISTIQUES ACOUSTIQUES DES REVÊTEMENTS DANS LE TEMPS	26
4. LES MATÉRIAUX CONSTITUANT LES ENROBÉS DRAINANTS	28
5. STRATIFICATION ET CAPACITÉ DE FORMER DES VIDES	30

6. USURE ET POLISSAGE: GÉNÉRALITÉS	31
7. TEMPÉRATURE OPTIMALE DU MÉLANGE DES ENROBÉS DRAINANTS	33
8. PROBLÈMES ET MAINTENANCE DES ENROBÉS DRAINANTS (RÉSUMÉ)	34
BIBLIOGRAPHIE	36

ANNEXE 1: Résumé des types de revêtements routiers

ANNEXE 2: Le gradient de température près de la surface d'une
chaussée (réfraction)

ANNEXE 3: Étude théorique du coefficient d'absorption en
incidence normale des revêtements poreux

INTRODUCTION

Les revêtements routiers doivent satisfaire plusieurs critères tel que la sécurité (l'adhérence), la durabilité, l'économie, le confort et plus récemment le bruit (idéalement du moins).

Il existe plusieurs classifications des revêtements routiers selon leur performance acoustique mais les comparaisons ne sont pas toujours possibles.

L'analyse du bruit de contact pneu/chaussée et du bruit global d'un véhicule ou de plusieurs véhicules n'est pas facile. Les sources sont nombreuses et parfois impossibles à localiser exactement et souvent liées entre elles. En plus, il y a de grandes variations des paramètres physiques selon les caractéristiques géométriques de la route. Pour décrire chacun des mécanismes d'émission acoustique du pneu, il existe quelques modèles relativement satisfaisants, mais il n'y a pas réellement de modèle global. Le raccordement des modèles isolés est plus ou moins boiteux: ils sont plutôt qualitatifs que quantitatifs.

Les revêtements les moins bruyants actuellement sont les enrobés coulés à froid et les enrobés drainants de granulométrie maximale de 10 mm. Plusieurs constatations expérimentales mais peu d'études théoriques sur l'analyse des phénomènes acoustiques des revêtements routiers poreux. La granulométrie maximale est à déterminer pour un niveau de bruit acceptable en tenant compte de l'adhérence, de la durabilité et de l'économie du revêtement routier. Il y a peu ou pas d'études sur l'optimisation du liant pour l'acoustique et la durabilité du revêtement par exemple. L'optimisation d'une chaussée en fonction du bruit et de la sécurité est à venir.

En guise d'introduction sur les principaux types de revêtements routiers (bref résumé), il y a une liste de revêtements à l'annexe 1.

PARTIE A

LE BRUIT DES VÉHICULES

1. LE BRUIT DES VÉHICULES

Les sources de bruit d'un véhicule sont mécaniques ou dues aux interactions avec l'environnement. L'importance relative de ces sources de bruit est liée au mode de conduite (vitesse, accélération, freinage, trajectoire). Les bruits mécaniques dépendent du régime et de la charge du moteur, tandis que le bruit de roulement dépend de la vitesse absolue du véhicule.

Bruits mécaniques: Moteur
 Transmission
 Ventilateur
 Système d'échappement

Bruits d'interaction
 avec l'environnement: Bruits aérodynamiques (turbulence,
 pénétration du véhicule dans l'air)
 Bruits de roulement (contact
 pneu/chaussée)

Au démarrage, le bruit du moteur domine. En trafic urbain, le bruit du pneumatique est à peu près égal au bruit du moteur. Par exemple sur béton bitumineux, on observe (moteur coupé) qu'à partir de 40 km/h la différence entre le bruit de roulement et le bruit global est de 3 dB(A) pour un véhicule isolé. Donc l'intensité acoustique du bruit de roulement est égale à celle des autres bruits. Entre 50 et 60 km/h, cette différence devient inférieure à 3 dB(A), le bruit de roulement devient de plus en plus important (réf.: 2).

Dans le cas des véhicules lourds, le bruit de roulement par rapport aux bruits mécaniques est plutôt faible.

Selon un rapport de l'IRT (réf.: 9), on estime entre 20 et 30% la part du bruit de roulement par rapport au bruit total reçu en façade d'habitations pour les quartiers urbains des grandes agglomérations (sur revêtement d'enrobé fin) et à 60-70% dans le cas des quartiers périphériques traversés par des voies rapides urbaines (revêtement de texture plus forte).



La dynamique du bruit (variation) entre les différents revêtements est de l'ordre de 13 dB(A). La dynamique du bruit entre différents pneumatiques non cloutés est de l'ordre de 3 dB(A).

La carrosserie semble être un bon émetteur du rayonnement des sources de bruit d'un véhicule.

En général, le bruit de roulement est plus atténué par un écran acoustique que le bruit mécanique (spécialement le bruit d'échappement des camions) car les sources sont plus basses et le spectre d'émission est plus aigu. Mais dans certains cas, on trouve le contraire. Par exemple, si l'écran possède des ouvertures ou des fissures (partie basse pour l'écoulement de l'eau, contrebas des ponts routiers à chaussées séparées).

À l'intérieur d'un véhicule, le niveau de pression sonore est plus élevé qu'à l'extérieur. Par exemple, à l'intérieur on trouve un niveau de pression sonore de 76 dB(A) alors qu'à l'extérieur à une distance de 15 mètres de la route on trouve 71 dB(A). À l'intérieur, la pression sonore est située dans les basses fréquences en deçà de 500 Hz. Sans le filtre A, on trouve donc à l'intérieur du véhicule, un niveau de pression sonore de l'ordre de 90 dB comparativement à 73 dB à l'extérieur selon l'exemple à une vitesse de 31 km/h. Le bruit intérieur est transmis en grande partie par le système de suspension du véhicule, qui est un bon conducteur des bruits de basse fréquence.

TABLEAU 1: CONTRIBUTION DES DIFFÉRENTES SOURCES DE BRUIT AU BRUIT TOTAL (PUISSANCES ACOUSTIQUES) DANS LES CONDITIONS DE LA PROCÉDURE ISO R 362 ET À VITESSE STABILISÉE. VÉHICULE PRODUIT EN 1980-82 (DONNÉES IRT / CERNE)

SOURCE DE BRUIT	PLEINE ACCELERATION v = 50 km/h (ISO R 362)		VITESSE CONSTANTE v = 80 km/h	
	VÉHICULES LÉGERS < 3,5 t	POIDS LOURDS > 3,5 t	VÉHICULES LÉGERS < 3,5 t	POIDS LOURDS > 3,5 t
Bouche d'admission		0 - 10 %		
	10 - 35 %			
Bouche d'échappement		20 - 60 %		
Rayonnement du système d'échappement	15 - 30 %		35 - 15 %*	70 - 50 %
Bloc moteur et accessoires	20 - 50 %	10 - 80 %		
Boîte / transmission	5 - 35 %			
Ventilateur / radiateur	0 - 30 %	0 - 65 %		
Pont				
Contact pneu / chaussée	< 15 %	< 15 %	65 - 85 %	30 - 50 %*

*: Selon les revêtements courants

Réf.: Le bruit de contact pneumatique - chaussée, IRT décembre 1984, note d'information #35, Hervé Ghesquere, Bernard Favre, Jacques Lambert, Monique Vernet.

2. LE BRUIT DE ROULEMENT (CONTACT PNEU/CHAUSSÉE)

Les vibrations engendrées dans le pneumatique génèrent une bonne partie du bruit par le rayonnement acoustique de la section du pneu écrasée sur la chaussée et un peu par les flancs (vibration de carcasse).

Cependant, la part respective et l'orientation des différents mécanismes du bruit de roulement sont mal connues. Ceci demande des méthodes de mesures précises. La compréhension du bruit de contact pneu-chaussée présente des difficultés d'analyse et d'interprétation.

Par exemple, dans le passé on pensait que la source principale du bruit de roulement était due à la compression et à la dépression de l'air dans les cavités du pneu et de la chaussée (interface). Ce phénomène (pompage d'air) est considéré comme secondaire aujourd'hui.

Le bruit de roulement:

60 à 80%	vibration de carcasse (pneu)
10 à 30%	pompage d'air + bruit aérodynamique
5 à 25%	tore (volume d'air du pneu)

Dans le bruit de roulement, se trouvent deux zones de fréquence. Une zone de basse fréquence liée à la géométrie (trous, bosses, profils) et à la granulométrie. La deuxième à des fréquences plus hautes, reliée à la déformation des motifs du pneu durant sa rotation, au pompage d'air et à la résonance entre les cavités du pneu et la chaussée.

Les revêtements routiers doivent naturellement satisfaire plusieurs critères dont la sécurité (l'adhérence); or, il n'existe pas une incompatibilité entre le caractère silencieux d'un revêtement et ses qualités d'adhérence (les enrobés drainants présentent un exemple d'un bon compromis).

Forte macrorugosité:	bruit basse fréquence bon coefficient de frottement longitudinal à grande vitesse
Faible macrorugosité:	bruit haute fréquence
Forte microrugosité	faible coefficient de frottement longitudinal à grande vitesse

La roue constitue un bon radiateur, l'axe de la roue transmet des excitations plus ou moins amorties du groupe motopropulseur et des annexes. Le niveau de pression acoustique interne atteindrait 130 dB (pneu d'été) à 140 dB (pneu d'hiver). Il serait transmis à l'extérieur, légèrement atténué par l'enveloppe.

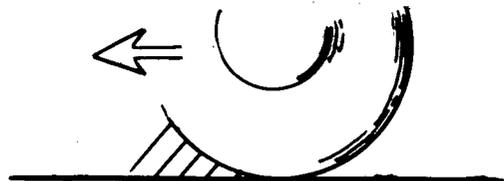
Selon l'IRT (1984), le bruit de contact pneu-chaussée est estimé entre 65 et 72 dB(A) pour les voitures particulières et les petits poids lourds, entre 68 et 78 dB(A) pour les poids lourds de haute et moyenne gamme (réf.: 9).

À l'arrière du pneu, les vibrations se propagent avec une longueur d'onde et une amplitude plus grande qu'à l'avant (effet Doppler). À partir d'une vitesse critique (environ 40 à 80 m/s), les ondes se propagent uniquement en arrière de l'empreinte du pneu (égalité entre la vitesse tangentielle de la bande de roulement et la vitesse de propagation des ondes dans cette partie).

Le bruit aérodynamique du pneu ne devient important qu'à des vitesses supérieures à 200 km/h.

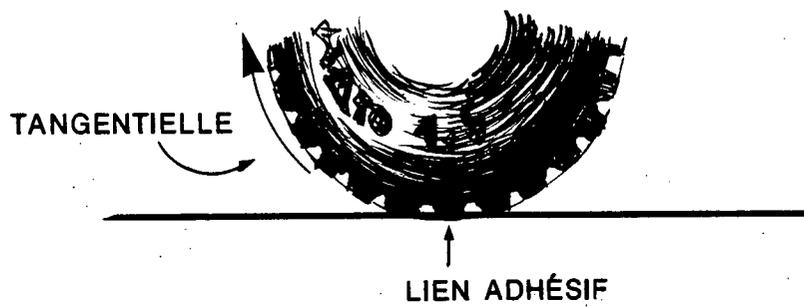
L'effet pavillon:

L'espace compris entre la bande de roulement et la chaussée forme une sorte d'amplificateur pour des sources de bruit se trouvant à l'entrée ou à la sortie de la zone de contact. L'effet pavillon amplifie l'efficacité du rayonnement par 10 dB et est spécialement directionnel à haute fréquence.



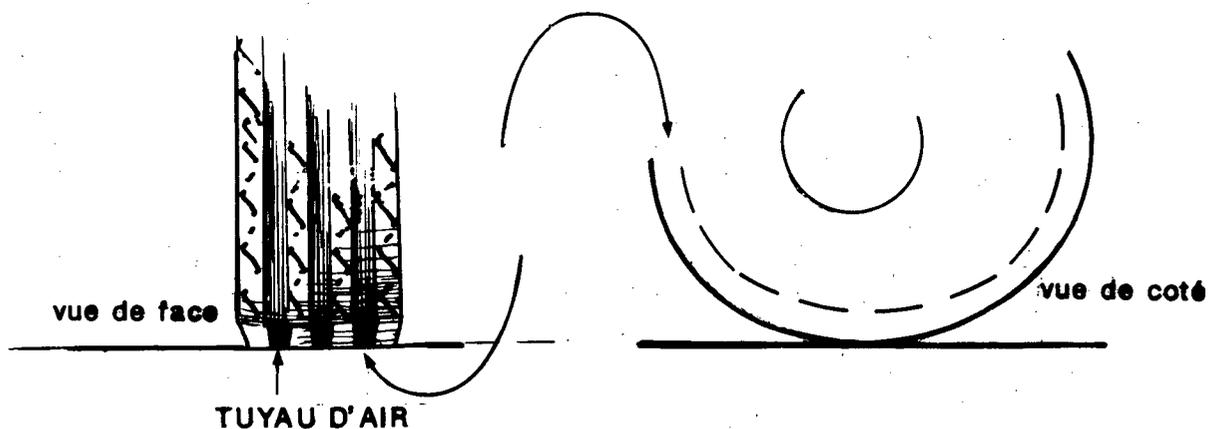
L'effet d'adhérence/glisement:
(stick and slip) (effet ventouse)

Les rainures du pneu sont comprimées verticalement et adhèrent à la chaussée. Elles commencent à glisser mais une fraction de leur section reste en contact avec la route. La séparation du contact se fait de manière impulsive. C'est surtout les vibrations tangentielles qui vont produire l'émission acoustique la plus intense (vibrations tangentielles: analogues à la flexion d'une poutre encastrée).



Résonance dans un tuyau:

L'étude acoustique de différents pneumatiques révèle la présence d'un pic autour de 1000 Hz apparemment indépendant de la vitesse du véhicule. Ce phénomène est peut être relié à la résonance des tuyaux d'air formés par les rainures du pneu.



La fréquence de résonance pour des dessins de tuyaux ouverts est:

$$f = \frac{c}{2L}$$

c: vitesse du son
L: longueur des tuyaux d'air

Cette fréquence dépend de la pression de gonflage des pneus. Pour des dessins de rainure formant des tuyaux obturés à une extrémité, la fréquence de résonance (première fréquence) est:

$$f = \frac{c}{4L}$$

Les résultats expérimentaux semblent confirmer ces hypothèses.

L'EAU SUR LA CHAUSSÉE

L'eau sur la chaussée augmente le niveau de bruit en général de 5 à 10 dB(A). Les mécanismes sont probablement des bruits de projection (projection de l'eau et sa retombée, vibration et accélération de l'eau). Le spectre sonore est légèrement modifié et est décalé vers les hautes fréquences.

Pour avoir une adhérence élevée, il faut éliminer l'eau qui se trouve dans l'aire de contact pneu-chaussée. Plus on augmente la vitesse du véhicule, plus la surface de contact diminue pour une épaisseur d'eau sur la chaussée de 1 mm. Lorsque la zone de contact est presque nulle, on a un phénomène d'hydroplanage; la roue glisse sur un film d'eau sans contact avec la chaussée.

L'IMPÉDANCE MÉCANIQUE DE LA CHAUSSÉE

L'impédance mécanique de la chaussée peut influencer la vibration de la surface du pneu. L'impact pneu/chaussée devrait diminuer si la chaussée est plus souple.

LES TYPES DE PNEUS

Les pneus d'été produisent environ un niveau sonore supérieur de 4 à 6 dB(A) au pneu lisse. Et les pneus à neige sont plus bruyants que les pneus d'été d'environ 1 à 5 dB(A).

Le niveau de bruit du pneu augmente avec la largeur de la bande de roulement à basse fréquence, et le contraire pour les hautes fréquences.

En terme de bruit de contact pneu/chaussée, le mécanisme de pompage d'air est dominant dans le cas d'une faible texture (texture lisse) et le mécanisme de vibration des dessins du pneu domine si la texture augmente.

Le tableau 2 résume l'influence de différents paramètres de conception de revêtement et de pneu à partir de plusieurs rapports publiés par l'industrie pneumatique et par des chercheurs dans le domaine du bruit de roulement.

On peut agir sur la composition de la bande de roulement. En abaissant l'hystérésis du matériau, on diminue la dégradation interne d'énergie mécanique en chaleur. Ainsi on réduit la résistance au roulement et le niveau de bruit émis est diminué. Mais la longévité du pneu et l'adhérence diminuent un peu (sur revêtement sec ou mouillé).

Un matériau à faible dureté SHORE diminue le bruit émis et l'adhérence augmente un peu (sur revêtement sec ou mouillé), mais augmente la résistance au roulement et la vitesse d'usure.

On peut chercher à optimiser acoustiquement le dessin de la bande de roulement par une répartition non-périodique des blocs et par lamellisation transversale (structure qui s'adapte mieux aux irrégularités de la chaussée).

Il semble qu'on ne peut espérer chercher plus de 1 dB(A) par une amélioration acoustique des pneus.

TABLEAU 2: INFLUENCE DES MESURES CONDUISANT À L'ABAISSEMENT DU BRUIT DE ROULEMENT SUR D'AUTRES EXIGENCES DE L'UTILISATEUR

ACTION ENVISAGÉE	ACTION SUR LE PNEUMATIQUE				ACTION SUR LA CHAUSSÉE		
	Adoption d'une carcasse radiale	Dessin bande de roulement optimisé pour le bruit	Matériau bande de roulement		Liant souple contenant du caoutchouc	Revêtement perméable poreux	Granulométrie optimisée pour le bruit
			Faible hystérésis	Faible dureté Shore A			
Diminution du bruit de contact pneu-chaussée	++	++	+	+	+	++	+
Diminution de la résistance au roulement	++	+	++	-	+	?	+
Maintien de la longévité du pneumatique	++	0	-	-	0	0	0
Préservation des performances du pneu	++	?	-	+	0	0	0
Maintien de la sécurité de l'utilisateur	++	0	-	+	-	+	0

++: très favorable
 +: favorable
 0: sans effet
 -: défavorable

(réf.: 9)

3. LA DIRECTIVITÉ DU BRUIT DE CONTACT PNEU/CHAUSSÉE

Selon une étude franco-allemande sur la directivité acoustique (et la puissance acoustique) du bruit de contact pneu/chaussée basée sur un nombre restreint de micros sur un hémisphère (8 de chaque côté du véhicule); la directivité du bruit de contact pneu/chaussée est légèrement plus forte vers l'avant ou l'arrière du véhicule que le rayonnement de côté (réf.: 20).

Lorsque l'angle d'émission sonore augmente par rapport à l'horizontal, le rayonnement latéral diminue.

En général, pour un type de pneu quelconque sur une chaussée quelconque, on n'observe pas de variations particulières de la directivité en fonction de la vitesse (assez stable entre 50 et 90 km/h).

Le bruit de contact pneu/chaussée rayonne surtout sur l'horizontale plutôt que sur la verticale. À un angle de 9° par rapport à l'horizontale, le rayonnement est plus important vers l'avant ou l'arrière que vers le côté. À un angle de 40° par rapport à l'horizontale, le rayonnement est moins important vers l'avant ou l'arrière que vers le côté.

Sur le côté d'un véhicule, le rayonnement sonore du bruit de contact pneu/chaussée, est semblable à une source à rayonnement hémisphérique. Il est un peu plus important pour un angle de 9° par rapport à l'horizontale, et légèrement moins important pour un angle de 40° par rapport à l'horizontale.

Vers l'avant ou l'arrière d'un véhicule, le rayonnement sonore du bruit de contact pneu/chaussée est différent d'une source hémisphérique. Il est plus important pour un angle de 9° par rapport à l'horizontale et moins important pour un angle de 40° par rapport à l'horizontale.

Le maximum de différence observée dans cette étude entre les valeurs de directivité est de 5 dB pour une configuration donnée.

L'effet du gradient de température limite les mesures à des angles pas trop faibles à l'extérieur (annexe 2).

4. LA RÉDUCTION DU BRUIT À LA SOURCE

La réduction à la source des bruits liés au moteur est complexe (la combustion, les chocs du piston contre le bloc moteur, les réactions du vilebrequin ou le rayonnement acoustique du moteur).

L'encapsulage complet du moteur peut procurer des réductions importantes de l'ordre de 10 dB(A). Mais ceci exige la résolution du problème de refroidissement et de la facilité d'entretien. Une solution intéressante consiste à disposer aux entrées et sorties d'air des rideaux antibruit à ouvertures thermo-régulées (réf.: 8).

L'isolation acoustique de l'intérieur du capot

On peut diminuer le bruit du moteur en plaçant un matériau absorbant (de type membrane) sous le capot à une certaine distance.

La paroi acoustique absorbe le maximum d'énergie sonore si elle est placée au lieu des points de vitesse maximum (vitesse des particules soumises à une pression).

Pour un son incident d'une longueur d'onde λ , la meilleure position de la paroi sera à une distance $\lambda/4$ de la surface réfléchissante.

Absorption maximum: $d = \frac{\lambda}{4} (2n + 1)$ $n = 0, 1, 2, \dots$
 (cas des membranes)

d: distance de la paroi réfléchissante

Pour avoir une absorption sur une plage étendue de fréquences ou à plusieurs fréquences particulières d'un spectre de bruit, il faut alors disposer un ensemble de membranes à des distances différentes de la paroi réfléchissante.

L'isolation du tore

On peut réduire le bruit des pneus en insérant un absorbant dans l'espace du tore (où le niveau de bruit est 140 dB). Cela réduit le niveau de bruit extérieur de 0,8 dB(A) (environ 10 dB(A) dans le tore (réf.: 31)).

La reconception des couvertures des roues

La reconception des couvertures des roues en impliquant une absorption de résonateur $\lambda/4$, peut réduire de 2 à 3 dB(A) le bruit. Mais l'efficacité des barrières acoustiques devant les roues décroît avec la diminution de la surface protégée. On doit avoir une marge de sécurité entre le bas de la barrière et la route à cause de l'élasticité des pneus et du système de suspension (réf.: 31).

L'isolation à l'intérieur du pneu

On peut aussi placer un matériau absorbant entre deux ceintures d'acier d'un pneu. L'optimum d'épaisseur de cette couche absorbante semble être environ 0,5 à 1 mm. Le pneu isolé est approximativement 3 dB plus silencieux qu'un pneu de référence en terme de niveau de bruit total (réf.: 31).

La reconception de l'hélice du ventilateur

Le niveau sonore de l'hélice du ventilateur peut être réduit de 3 à 5 dB(A), par une reconception de l'hélice (amélioration aérodynamique, diminution de l'espace d'encadrement, etc.).

PARTIE B

LES REVÊTEMENTS POREUX

1. LES ENROBÉS DRAINANTS



Un enrobé drainant est un revêtement constitué d'environ 20% de vide dans le but d'avoir un drainage rapide des eaux de ruissellement. L'évacuation des eaux de pluie se fait à l'intérieur de la couche et de là vers les côtés de la chaussée avec une pente d'environ 2% formée par la couche de forme qui est imperméable. Normalement on ferme les côtés, on doit donc préalablement poser des drains.

Le bruit de la circulation semble généralement plus faible sur ces revêtements que sur les revêtements classiques. Les enrobés drainants ont une double action acoustique: diminution du bruit de contact pneu-chaussée, absorption partielle de l'ensemble du bruit produit par le véhicule (bruit d'origine mécanique).

Les effets de pavillon ou de résonance peuvent être fortement réduits par des enrobés drainants, car leur porosité empêche la génération du bruit par compression et détente de l'air dans les dessins du pneu.

Le bruit mécanique d'un véhicule peut également être diminué par un revêtement absorbant qui réduit le bruit réfléchi sous la caisse du véhicule. Cette réduction peut atteindre 8 dB(A) pour des revêtements très absorbants qui ne sont pas encore mis en oeuvre.

Des expériences effectuées en France, en Suède, en Angleterre et en Allemagne concluent, malgré les variations entre les méthodes de mesure et les paramètres analysés, que les enrobés drainants sont moins bruyants de 4 à 7 dB(A) par rapport aux enrobés classiques, selon les cas. Cependant, comme les enrobés drainants ne représentent pas encore une classe de revêtement homogène, certains d'entre eux sont aussi bruyants que les enduits superficiels (difficulté à obtenir une porosité satisfaisante).

En France, dans un cas précis (réf. 5), sur un support constitué d'un pavage mosaïque sur fondation de béton sur lequel avait été appliqué un coulis bitumineux, la différence de niveau de bruit de l'enrobé drainant par référence à l'ancien revêtement (Coulis bitumineux) fut estimé à:

2 à 3 dB(A) pour 10% de poids lourds	vitesse
3 à 4 dB(A) pour 5% de poids lourds	moyenne
4 à 5 dB(A) pour 0% de poids lourds	50 km/h

La même référence donne un autre cas d'enrobé drainant, sur un support de chaussée en béton avec de nombreuses microfissures et cassures en coin, où l'on a une diminution du bruit global de l'ordre de 2 à 3 dB(A) pour une vitesse moyenne aussi faible que 25 à 30 km/h.

Le coefficient d'absorption qui exprime la part de l'énergie acoustique incidente qui est absorbée par la chaussée est plus élevé pour des angles d'incidence faible dans le cas des enrobés drainants. Par exemple, par rapport à un béton bitumineux à 3% de caoutchouc à incidence de 10° (par rapport à l'horizontale), les enrobés drainants ont un coefficient d'absorption acoustique beaucoup plus élevé pour la même incidence.

A incidence normale (perpendiculaire à la chaussée), le béton bitumineux précédent est légèrement moins absorbant que l'enrobé drainant (voir figure 1, plus loin).

Une étude américaine de 1981 sur 16 sites avec des enrobés drainants donne une réduction moyenne pour les véhicules légers de 4,1 dB(A) et de 2,9 dB(A) pour les véhicules lourds. Les écarts types sont respectivement de 0,5 dB(A) et 0,4 dB(A) (réf.: 23).

Dans cette étude, il n'y a pas de corrélation statistique obtenue entre le bruit des véhicules et le Δ BFC (Bracking Force Coefficient) pour les enrobés drainants pour chaque catégorie de véhicules.

Les qualités acoustiques des enrobés drainants présentent une haute absorption dans les fréquences de 400 à 2 KHz. Des analyses récentes en tiers d'octave indiquent une réduction significative dans les hautes fréquences 1000 - 5000 Hz (2-4 dB à 1000 Hz jusqu'à 6-7 dB à 2000 - 4000 Hz) correspondant à une réduction de 3 à 4 dB(A) (réf.: 45).

Des études en Suède, montrent qu'à des fréquences plus basses que 500 Hz, les enrobés drainants sont plus bruyants que les revêtements conventionnels. Le OGEAM (open-graded émulsified asphalt mix) si on le compare à un revêtement conventionnel, est très efficace dans la diminution du bruit; 5 à 6 dB(A).

OGFC (open graded friction course) (enrobé drainant)		OGEAM	
Épaisseur	26 mm		46 mm
Vide (%)	21%		30%
Liant (%) par poids du mélange	5,2%		4,1%
Mesure de résistance au drainage	8,2%		7,8%
Rd = 10 log.t	Ex.: OGFC =	t	Rd
t: temps de retrait	DAC	316 s.	25,0
Rd: résistance au drainage	(Dense asphalt concrete)	6 s.	7,8

Réf.: Tire / Road noise on an open-graded friction course Ulf Sandberg, NR 221A - 1981, Suède NRTRI

Par rapport à un revêtement conventionnel, les enrobés drainants sont moins bruyants d'environ 3 dB(A) à 70 km/h et 3,4 dB(A) à 90 km/h, selon cette étude. Cette diminution du bruit est due à la caractéristique du revêtement dans les fréquences au-dessus de 800 Hz.

En général, la diminution du bruit augmente avec l'épaisseur de l'enrobé drainant, jusqu'à une valeur au-delà de laquelle il n'y a pratiquement pas d'augmentation de l'absorption, seulement de faibles oscillations (super-épaisseur). Les tendances actuelles s'orientent vers des enrobés drainants d'épaisseur 4-6 cm, des bétons poreux de 6 cm d'épaisseur et des enrobés drainants d'épaisseur 40-50 cm. Cependant, avec une structure poreuse épaisse on peut envisager un gain acoustique théorique de l'ordre de 10 dB(A) (réf.: 40).

En résumer, les propriétés d'absorption acoustique des structures poreuses dépendent de quatre paramètres principaux:

- la porosité (Ω);
- la résistance spécifique du passage de l'air (R_s);
- le facteur de forme ("tortuosité" du milieu) (K);
- l'épaisseur de la structure (e).

Ces paramètres ne sont pas nécessairement indépendants, par exemple, la résistance spécifique du passage de l'air, le facteur de forme et la porosité peuvent être liés par:

$$R_s \approx \frac{K}{\Omega^2 d^2} \quad d: \text{diamètre des agrégats} \quad (\text{réf.: 47})$$

Théoriquement, dans le cas des structures monocouches minces sur une sous-couche réfléchissante, la courbe d'absorption oscille en fonction de la fréquence.

Les extrêmes d'absorption sont aux fréquences:

$$f_m = \frac{mC}{4e} \cdot \frac{1}{K^{1/2}} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad C: \text{vitesse du son}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (\text{max.: } 1, 3, 5, \dots \text{ impair}) \\ (\text{min.: } 2, 4, 6, \dots \text{ pair}) \end{array} \right.$$

Le coefficient d'absorption d'un enrobé drainant est faible en bas de la première fréquence f_1 et oscille en haut de f_1 .

$$f_1 = \frac{C}{4e} \cdot \frac{1}{K^{1/2}}$$

Si on cherche à avoir une valeur de f_1 faible, il est avantageux de choisir des enrobés épais plutôt que des enrobés à facteur de forme élevée. Si on cherche à avoir un coefficient d'absorption élevé tout en acceptant de fortes amplitudes d'oscillation, on ajuste la résistance spécifique au passage de l'air à une certaine valeur: (voir annexe 3)

$$R_s \text{ opt.} = \frac{2 \rho_0 C_0}{\Omega e} K^{1/2} \text{th}^{-1} \left(\frac{\Omega}{K^{1/2}} \right)$$

L'augmentation de l'épaisseur et du facteur de forme décalent les pics vers les basses fréquences. L'amplitude des oscillations dépend du produit $R_s \times e$. Après une valeur maximale lorsque R_s croît, les oscillations diminuent et l'absorption tend vers une courbe limite.

Si on double l'épaisseur, les pics d'absorption sont déplacés vers les basses fréquences d'une octave.

Une augmentation de la porosité favorise une haute absorption entre les valeurs maximales d'absorption (élargissement des pics d'absorption).

La présence d'humidité diminue l'absorption et déplace légèrement les pics d'absorption vers les basses fréquences (réf.: 41).

Condition de super-épaisseur

$$e \geq \frac{3 \rho C}{R_s} \frac{K^{1/2}}{\Omega}$$

$$\begin{aligned} \text{ex.: } \Omega &= 0,20 & e &\geq 58 \text{ cm} \\ K &= 3,5 \\ R_s &= 20 \text{ rayls / cm} \end{aligned}$$

La super-épaisseur varie de 40 à 60 cm selon les matériaux.

Théoriquement, avec les revêtements poreux, on a comme le choix entre un revêtement à fortes valeurs d'absorption dans des bandes de fréquences limitées (fortes oscillations entre valeurs maximales et minimales en fonction de la fréquence) ou un revêtement à absorption assez régulière en fonction de la fréquence mais relativement faible.

Dans le domaine des fréquences du bruit routier, les propriétés acoustiques d'un enrobé drainant sont très fortement influencées par l'inertie de l'air dans les pores (et donc par le facteur de forme). Mais pour un matériau fibreux c'est plutôt la résistance spécifique au passage de l'air du matériau qui importe.

Les études existantes n'ont pas montré que les systèmes poreux en multicouche étaient plus avantageux qu'un système monocouche à épaisseur égale.

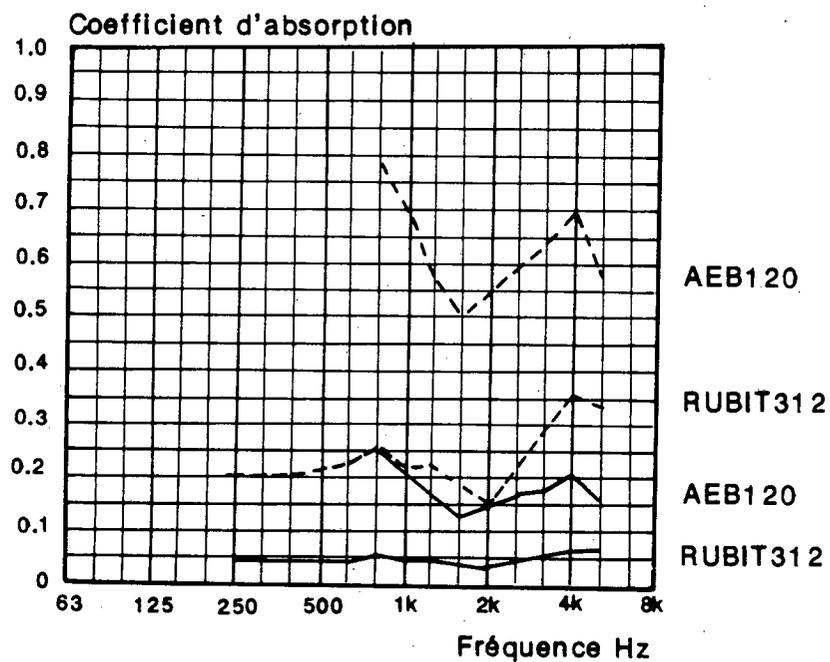
Dans une analyse française, un calcul théorique utilisant une méthode par éléments finis semble montrer que la réduction du niveau de bruit en façade d'immeuble riverain d'une voie de circulation peut atteindre des valeurs de 5 à 6 dB(A) par rapport à une structure non poreuse.

Des expériences en Allemagne utilisent une combinaison d'enrobés drainants et de sable enrobé. La partie des basses fréquences du spectre du sable enrobé est "combinée" avec la partie des hautes fréquences du spectre d'un enrobé drainant (transition à 1000 Hz), on peut gagner une réduction additionnelle de 2 dB(A) comparativement avec le sable enrobé ou un enrobé drainant. Les revêtements d'asphalte poreux sont moins bruyants que les autres revêtements au-dessus de 1000 Hz et les revêtements de sable enrobé sont relativement assez lisses et moins bruyants que les autres revêtements en bas de 1000 Hz (réf.: 27).

Les enrobés drainants ont d'autres propriétés. On observe une réduction du brouillard d'eau à l'arrière des véhicules, spécialement des camions, durant une pluie (meilleure visibilité des conducteurs). Il semble aussi qu'ils diminuent la réflexion de la lumière (meilleure visibilité). Sur les chaussées conventionnelles, lorsqu'elles sont recouvertes d'eau, on a un effet miroir: les marquages deviennent souvent invisibles et la réflexion des sources lumineuses peut provoquer de l'éblouissement.

Les enrobés drainants avec moins de 15% de vide présentent de mauvaises caractéristiques de drainage de l'eau. Aujourd'hui on utilise plutôt des enrobés avec au moins 20% de vide.

Le coefficient d'absorption intervient dans l'atténuation de l'onde réfléchie (dû à l'absorption) mais aussi dans le déphasage de l'onde réfléchie par rapport à l'onde directe (causé par la partie imaginaire de l'impédance complexe).



Absorptions acoustiques de différents revêtements

RUBIT : béton bitumineux a 3% caoutchouc

AEB : enrobé ouvert

— : incidence normale 0°

----- : incidence 80°

FIGURE 1: (RÉF. : 9)

2. L'ADHÉRENCE DES ENROBÉS DRAINANTS

Les performances des enrobés drainants reliées à l'adhérence à basse vitesse pour les distances d'arrêt, particulièrement dans leur jeune âge, ne sont relativement pas très bonnes. La porosité a comme effet négatif, une diminution de l'aire de contact (important pour l'adhérence à sec).

En milieu urbain, les revêtements sont soumis à de fortes sollicitations d'adhérence (démarrage / freinage) qui provoquent un polissage des granulats de surface et ils sont sujets à la fermeture du revêtement par empoussiérage.

Les techniques actuelles des enrobés drainants ne permettent pas d'obtenir des caractéristiques parfaites de texture pour le bruit et l'adhérence à basse vitesse.

Le comportement différent des enrobés drainants en période hivernale est ambigu. Certains états américains rapportent une formation prématurée de glace sur les enrobés drainants. Mais même lorsque la neige y est piégée, l'adhérence n'est pas aussi faible que l'on pourrait imaginer, en autant que la traction est maintenue par les points élevés des agrégats.

On peut s'interroger sur l'adhérence et le comportement des motocyclettes et des bicyclettes pendant une longue période de temps sur ce type de chaussée.

L'action du trafic, même sur un revêtement optimisé diminue l'adhérence, en général cela n'implique pas une baisse équivalente du niveau sonore.

L'action répétée des véhicules provoque un polissage des granulats de surface qui sont parfois arrachés. Certains granulats de surface s'enfoncent et on a des zones glissantes propices aux dérapages durant une pluie.

Certains facteurs de conception et de formulation favorisent la glissance: une proportion trop élevée de liant, un pourcentage de vide plus faible, une plus grande proportion de gros agrégats, une trop bonne résistance à l'usure des agrégats aux dépens de la résistance au polissage. A long terme, la résistance au glissement dépend des caractéristiques de polissage des agrégats. L'introduction de poudre de caoutchouc dans le bitume des liants fait craindre une diminution de l'adhérence.

Notons que les enduits monocouches, les enrobés coulés à froid et les enrobés ouverts ont des risques d'évolution dans le temps de leurs caractéristiques plus élevées que les autres types de revêtements.

3. CARACTÉRISTIQUES ACOUSTIQUES DES REVÊTEMENTS DANS LE TEMPS

Au début de la vie d'un revêtement routier on peut dire que les revêtements à l'asphalte sont plus silencieux que les revêtements au ciment portland. Les revêtements à l'asphalte ont tendance à devenir plus bruyants avec l'âge, alors que le niveau de bruit pour les revêtements au ciment portland (modifié ou non) sont relativement constants pour la même période de temps.

Les surfaces au ciment portland sont plus durables. L'usure des surfaces asphaltiques est plus rapide et expose plus rapidement les gros agrégats. Alors que les surfaces au ciment portland s'usent plus lentement et l'exposition des gros agrégats est retardée.

Selon un rapport du Transport and Road Research Laboratory, il y a une réduction du niveau sonore des pics du bruit routier sur surface poreuse, d'environ 0,2 dB(A)/an pour des véhicules lourds et 0,36 dB(A)/an environ pour des véhicules légers* (réf.: 23).

En Hollande, des études sur les revêtements à l'asphalte poroélastique montrent que sur une période de 3 ans, le niveau de réduction sonore reste le même (3,4 à 3,8 dB(A)) mais la réduction par bande de fréquences change sensiblement; il y a une réduction des basses fréquences (réf.: 26).

Ce phénomène peut s'expliquer par l'augmentation de la résistance spécifique du matériau de surface de la route due à la déposition de poussières et particules étrangères qui s'accumulent dans les pores année après année. Ceci peut amener le coefficient d'absorption à augmenter dans les basses fréquences au détriment des hautes fréquences.

*: Basé sur plusieurs surfaces poreuses (moyenne) âgées d'au moins 40 mois.

Dans un rapport final du Washington State Department of Transportation on ne note pas de variations significatives des propriétés acoustiques sur une période de deux ans (réf.: 24).

Cependant, les enrobés drainants présentent des variations de niveau sonore durant une année. Maximum de bruit au mois de mars et minimum de bruit au mois de septembre. La variation saisonnière du bruit dans ce cas (class "D" open graded) est d'environ 3,3 dB(A).

4. LES MATÉRIAUX CONSTITUANT LES ENROBÉS DRAINANTS

Les caractéristiques des matériaux constituant les revêtements routiers sont:

- la nature du liant
- la composition granulométrique (calibre et discontinuité)
- la dureté du granulat
- le procédé de mise en oeuvre et compacité

La conception d'une route poreuse optimisée acoustiquement n'est pas limitée au matériau bitumineux.

Le matériau routier composé d'un liant et de granulats est visco-élastique. Pour une haute fréquence d'excitation ou à basse température, le béton bitumineux est plutôt élastique et à basse fréquence ou à haute température, il est plutôt visqueux.

La fissuration transversale de la chaussée à basse température des revêtements bitumineux, dépend de la rigidité à basse température du mélange de béton bitumineux, qui dépend elle de la viscosité (dureté du bitume à cette température). Il est donc avantageux d'utiliser du bitume de plus grande viscosité pour éviter la fissuration (le mélange pourra se déformer suffisamment à basse température).

LES LIANTS ROUTIERS

Il y a deux catégories de liants routiers: Les liants hydrocarbonés et les liants hydrauliques.

Les liants hydrocarbonés sont composés d'hydrocarbures visco-élastiques, ils sont plutôt solides à froid et liquides entre 100°C à 180°C.

Le liant au bitume perd avec les années ses qualités d'origine et devient plus cassant et rigide. Les matériaux bitumineux (asphalte et goudron) sont susceptibles de perdre leur capacité de liaison par oxydation et polymérisation due à l'exposition à la chaleur, à l'air, à l'eau et au rayonnement ultra-violet.

Les ciments hydrauliques ont une susceptibilité similaire à l'attaque par des agents qui cause la détérioration des roches.

L'usure du revêtement décroît lorsque la teneur en liant est élevée.

Les liants polymères semblent donner des niveaux sonores un peu inférieurs aux bitumes purs (à développer) (réf.: 39).

5. STRATIFICATION ET CAPACITÉ DE FORMER DES VIDES

Les performances des agrégats dépendent largement de leur minéralogie. Les agrégats représentent environ 90% du poids des matériaux des revêtements bitumineux. Les propriétés de la macrostructure et les caractéristiques du drainage interne des revêtements poreux sont principalement fonction de la stratification du mélange.

Une caractéristique des enrobés drainants est la capacité de former des vides après compaction. Ceci est contrôlé principalement par la compressibilité des gros agrégats qui est fonction de la forme des particules et de l'écrasement de leurs faces. Les vides interstitiels des gros agrégats doivent être assez larges pour accommoder le volume total de l'asphalte plus le volume des agrégats fins et créer suffisamment de vide dans la mixture. L'absorption de l'asphalte par l'agrégat résulte probablement en un plus grand volume de vide.

La pente de la courbe de stratification (tamis) doit être aussi forte que possible au-dessus de 2-4 mm, pour obtenir une bonne absorption. Une limite de 15% du tamis # 8 (2,36 mm) est nécessaire pour éviter la saturation des gros agrégats.

L'expérience semble démontrer que le matériel qui passe au travers du tamis # 200 (75 μm) est nécessaire (minimum 2%) pour assurer une bonne stabilité et prévenir l'effilochage. On peut ajouter 1 ou 1,5% d'hydrate de chaux, de la chaux dolomite ou du ciment portland pour favoriser l'adhésion. Tous ces matériaux fins ont tendance à se mélanger avec l'asphalte et ainsi augmenter la viscosité du liant et réduire le drainage de l'asphalte dans le mélange.

Pour diminuer la détérioration, on peut aussi ajouter au mélange des liants aux polymères modifiés, des polyamides, des fibres ou des combinaisons d'intervention (réf.: 44).

En pratique, la porosité réellement obtenue n'est pas toujours parfaitement cohérente avec la porosité souhaitable lors de la conception.

- . sable et gravelle (avec moins de 10 % de particules de carbonates) (catégorie excellente);
- . vase, argilites, certains quartz, basalte, gneiss, granites, scorie de fournaise, gravelle (avec 10 à 25% de carbonates) (catégorie élevée);
- . la plupart des quartz (catégorie bonne);
- . etc.

Par exemple, dans le cas d'un débit de véhicules de 20 000 par jour, il est recommandable de prendre des agrégats de la catégorie excellente.

De rares études comparatives confirment que la quartzite avec une bonne performance dans les revêtements conventionnelles donne dans le cas des enrobés drainants des résultats meilleurs que la pierre calcaire à grains fins, la pierre calcaire à gros grains et les shistes expansés.

La plupart des roches dolomitiques sont composées de minéraux dont la dureté varie de $H = 3$ à $H = 4$, ils présentent une plus grande susceptibilité au polissage que le sable et les granites. De plus, les carbonates et les sulfates sont dissous ou partiellement dissous par la pluie (acide dilué) et par des polluants atmosphériques dont la concentration augmente depuis quelques décennies (Bioxyde de soufre, bioxyde d'azote, chlore, trioxyde de soufre) (usure chimique).

Notons qu'une augmentation de la compacité augmente fortement la résistance à l'usure, mais malheureusement est défavorable pour l'absorption acoustique.

7. TEMPÉRATURE OPTIMALE DU MÉLANGE DES ENROBÉS DRAINANTS

Les agrégats doivent être chauffés suffisamment pour faciliter le recouvrement et l'adhésion, mais pas au point que la viscosité du liant d'asphalte est réduite à un niveau qui cause le drainage ou la séparation de l'asphalte des agrégats durant le transport du site de mélange au point de pose. La valeur cible de température de mélange est celle où on obtient une viscosité de 7 à 9 cm²/sec. pour l'asphalte (selon la F.H.W.A.).

La température de pose est plus critique pour les enrobés drainants que pour les revêtements conventionnels. La pose à des températures inférieures à 60°F (15,6°C) peut amener une pauvre adhésion et plus tard des brisures. La pose à des températures supérieures à 100°F (37,8°C) peut amener une non-uniformité de la finition du revêtement.

Le contenu élevé en air (vide) dans le mélange accélère la dureté (temps de prise) du revêtement.

8. PROBLÈMES ET MAINTENANCE DES ENROBÉS DRAINANTS (RÉSUMÉ)

- Demandent plus de fondants pour la glace et la neige (verglas prématuré);
- la durée de vie est probablement inférieure aux revêtements conventionnels;
- la réparation des trous est difficile;
- la température de pose doit être respectée pour une bonne mise en place;
- on doit poser préalablement une couche de forme imperméable pour éviter que l'eau de drainage atteigne la structure de la chaussée;
- formation de craques, particulièrement dans le cas d'une couche sur ciment de Béton Portland;
- on doit entretenir le système de drainage;
- il y a peut être des dégâts causés par les chasse-neige;
- la récupération de produits dangereux demeure problématique lors d'un accident;
- le renversement accidentel de produits pétroliers endommage le matériau;
- immédiatement après la pose, on doit procéder au roulage des enrobés drainants;
- risque de colmatage en zone rurale, sur les routes fréquemment souillées (boue véhiculée par les tracteurs...);
- l'épandage de sable d'abrasion l'hiver n'est vraiment pas recommandable;
- le trafic rapide et les grands volumes assurent un auto-nettoyage de la surface de l'asphalte poreux (effet de succion par les véhicules rapides);

- pour les bétons poreux, la mise en oeuvre de la couche de roulement est plus délicate que les enrobés drainants (compactage, arrachement des matériaux, mauvaise formulation, etc.);
 - la porosité finale est souvent inférieure à celle souhaitée.
-

BIBLIOGRAPHIE

- 1) Notes explicatives sur l'utilisation d'enrobés drainants comme couche d'usure mince, préparé par Paul Lemieux, ministère des Transports, Québec, mars 89.
- 2) Bruit et voirie urbaine, par Raymond Lebret, Janic Gourlet, Revue Générale des Routes et Aérodroemes, #642 juin 87 (Paris).
- 3) Les recherches sur le bruit de contact pneumatiques-chaussées, Pascal Bar, Jacques Beaumont, Jean-Michel Gernez, Revue Générale des Routes et Aérodroemes, #637 janvier 87.
- 4) Bruit routier et revêtements des chaussées, par Yves Delanne, Revue Générale des Routes et des Aérodroemes, #637 janvier 87.
- 5) Efficacité acoustique des enrobés drainants, par Yves Delanne, Raymond Lebret, Revue Générale des Routes et Aérodroemes, #653 juin 88.
- 6) Noise and the Road is there a Conflict between Requirements for Safety and Noise, par U. Sandberg, Ingénieurs de l'automobile, janvier-février 87.
- 7) Transportation Noise Reference Book, Édité par P.M. Nelson et autres, Butterworths, 1987.
- 8) Réduction du bruit du trafic routier et du bruit extérieur des automobiles, ingénieurs de l'automobile, décembre 1984.
 - . Bruit de contact pneu-chaussée, par M. Perulli
 - . Les différentes sources de bruit extérieur d'automobile, par M. P. Rapin

- . L'absorption acoustique dans le compartiment moteur des voitures, par A. Chappuis et M. Fortez
 - . Utilisation des absorbants membranes à fibres longues dans le compartiment moteur, par M.M. Joret
 - . Réduction des bruits par encapsulage du moteur et absorbants sous capot moteur, par M. Shilling
- 9) Le bruit de contact pneumatique-chaussée, IRT décembre 1984, note d'information #35, Hervé Ghesquere, Bernard Favre, Jacques Lambert, Monique Vernet.
 - 10) Modélisation acoustique d'un enrobé drainant, Étude théorique en incidence normale, rapport INRETS #59, janvier 88, J.F. Hamet.
 - 11) Caractéristiques de surface des revêtements routiers: leur interaction et leur optimisation, OCDE 1984.
 - 12) Réduction du bruit émis par les véhicules, C. Lamure, Travaux #628, janvier 1988.
 - 13) Mesure de la macrotecture des chaussées, F. Brillet, Paul Marsac, Bull. liaison labo. P. et Ch., novembre-décembre 1985.
 - 14) The Tire Pavement Interface, Pottinger/Yager, éditeurs ASTM Special Technical Publication 929, 1986.
 - 15) Action du gel sur les chaussées, Recherche Routière, OCDE 195 (1974) (Paris).
 - 16) Dégâts hivernaux causés aux chaussées, OCDE 1972, Recherche Routière, OCDE 119 (Paris).
 - 17) Noise Generated by an Aggregation of Vehicles Interacting with Thirteen Different Road Surfaces, James R. O'Connor, Inter-Noise, 8-10 décembre 1980.

- 18) The Generation of Tire Noise by Air Pumping and Carcass Vibration par K.J. Plotkin, M.L. Montroll, W.R. Fullet, inter-Noise 80, 8-10 décembre 1980.
- 19) Puissance et directivité acoustiques du bruit de contact pneu/chaussée, J.F. Hamet, J.C. Bruyère, G. Pachiaudi, rapport INRETS #15, décembre 1986.
- 20) Bruit de contact pneumatique/chaussée, coopération franco-allemande expérimentation CD 302, rapport INRETS #47, J.F. Hamet, J.C. Bruyère, octobre 1987.
- 21) Bruit de contact pneumatique/chaussée, comparaison expérimentale entre vibration du pneumatique/pression à proximité/puissance, rapport INRETS #40, J.F. Hamet, J.C. Bruyère, J.M. Clairet, septembre 1987.
- 22) Alternatives for the Optimization of Aggregate and Pavement Properties related to Friction and Wear Resistance, S.H. Dahir et J.M. Rice, October 1978, F.H.A., F.H.W.A.-RD-79-107.
- 23) Noise from Vehicles Running on Open Textured Road Surfaces, P.M. Nelson et N.F. Ross, Transport and Road Research Laboratory, Supplementary Report 696, 1981.
- 24) Acoustic Characteristics of Roadway Surfaces, par J.D. Chalupnik et D.S. Anderson, Washington State Department of Transportation Final Report WA-RD 129,1, September 1987.
- 25) Relationship between Stick-Slip Friction and his Acoustic Signal, G.R. Symmons et G.J. McNulty, Inter-Noise, July 21-23 (86).
- 26) Acoustically Optimized Porous Road Surface: Recent Experience and New Developments, Inter-Noise, 1988, A.Von Meier.

- 27) Acoustical Experiences with Open-Graded Asphalt Concrete Road Surfaces in the Federal Republic of Germany, S. Ullrich, Inter-Noise, 1988.
- 28) Open-Graded Friction Courses for Highways, TRB Washington Synthesis 49, 1978.
- 29) A Review of Aggregate Selection Criteria for Improved Wear Resistance and Skid Resistance of Bituminous Surfaces, S.H. Dahir, Journal of Testing and Evaluation, vol. 7, no 5, September 1979.
- 30) Les enrobés drainants: analyse de leurs propriétés vis-à-vis du bruit de roulement et de l'adhérence des pneumatiques des véhicules de tourisme, Y. Delanne, Bull. liaison Labo. P. et Ch. 162, juillet-août 1989.
- 31) Reduction of Tire Noise, Oskar Bschorr, Inter-Noise 85, 18-20 September, Munich, p. 271.
- 32) Directivity of Tire/Road Noise Radiation, Dirk Ronneberger, Inter-Noise 85.
- 33) Road Influence on Tyre/Road Noise, Y. Delanne, F. Brillet, Inter-Noise 1985.
- 34) A Poro-Elastic Road Surface for Traffic Noise Reduction, A. Von Meier, Inter-Noise 1985.
- 35) Tire/Road Noise on an Open-Graded Friction Course, Ulf Sandberg, NR 221A-1981, Suède, NRTRI.
- 36) Wear Resistance and Friction Properties of Pavement Surfaces, S.H. Dahir, W.G. Meyer, The American Society of Mechanical Engineers, 1977.
- 37) Petrographic Insights into the Susceptibility of Aggregates to Wear and Polishing, S.H. Dahir, Transportation Research Record 695 Bituminous Materials, Mixtures and Performance.

- 38) Porous Friction Courses and Roadway Surface Noise, par R.A.Kay, J.K. Stephens, rapport final, Implementation Package 74-11, Federal Highway Administration Acoustic Laboratory San Francisco (1975).
- 39) Efficacité acoustique des enrobés drainants: la méthode franco-allemande de mesures de bruit de roulement, par Jacques Beaumont, Yannick Guillard, Didier Soulage, Revue Générale des Routes et des Aéroports #677, septembre 1990.
- 40) Voirie urbaine: chaussées poreuses urbaines, par Gilles Pipien, Marc Tesson, Pascal Bar, J.-P. Christory, J.-P. Pétroungari, Revue générale des routes et des aéroports #677, septembre 1990.
- 41) Acoustical Properties of the Porous Asphalts Theoretical and Environmental Aspects, par M.Berengier, J.F.Hamet, P. Bar, conférences TRB, 69e congrès 7-11, janvier 1990.
- 42) Experiences with Porous Asphalt in Switzerland, par T.Isenring, H.Köster, I. Scazziga, conférences TRB, 69e congrès 7-11, janvier 1990.
- 43) Ten Years Experience of Porous Asphalt in Belgium, par G. Van Heystraeten, C.Moraux, Belgian Road Research Center, conférences TRB, 69e congrès 7-11, janvier 1990.
- 44) Improving Durability of Open-Graded Friction Courses, par S. Shuler et D.I. Hanson, conférences TRB, 69e congrès 7-11, janvier 1990.
- 45) Field Testing of the Effectiveness of Open-Graded Asphalt Pavement in Reducing Tire Noise from Highway Vehicles, par K.D. Polcak, conférences TRB, 69e congrès 7-11, janvier 1990.
- 46) Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications, par Allan D. Pierce, (1981) McGraw-Hill.

- 47) Acoustique des milieux poreux par T. Bourbie, O. Coussy, B. Zinszner, 1986, Éditions Technip.
 - 48) Theoretical Acoustics par P.M. Morse et K.U. Ingard, McGraw-Hill, New-York, 1968.
 - 49) Acoustical Characteristics of Rigid Fibrous Absorbents and Granular Materials, J.A.S.A. 73 (3) 1983, par K. Attenborough.
-

ANNEXE 1

RÉSUMÉ DES TYPES DE REVÊTEMENTS ROUTIERS

ENROBÉS DRAINANTS

- . mélanges chauds: on utilise un liant à l'asphalte
- . mélanges froids: on utilise une émulsion (coulés à froid)

Synonymes: enrobés poreux
 enrobés ouverts
 porous friction course (aviation)
 porous wearing course
 drain asphalt
 asphalt friction courses
 pop corn mix
 open friction course
 open-graded asphalt friction course
 open textured surfaces
 revêtement "antibruit"
 revêtement poreux

OGEAM (open-graded emulsified asphalt mix) (variante d'enrobé drainant)

30% de vide

ASPHALTE POROÉLASTIQUE

Synonyme: asphalte caoutchouc
 rubber bitumen

Notons qu'avec l'asphalte caoutchouc, l'effet de la fumée sur l'environnement créé par le mélange caoutchouc-asphalte, l'impact du noir de charbon et autres substances dans les pneus sont à analyser.

- . bitume conventionnel avec un certain pourcentage de granules de caoutchouc de pneus déchiquetés (un peu plus riche en asphalte) ~ 7,5% du poids (style 3-4% du poids en caoutchouc).

RUBBER FILLED TREATMENTS

Addition à sec de brisures de caoutchouc au mélange d'asphalte.

BITUMES MODIFIÉS

Addition de polymères ou autres constituants pour avoir des enrobés de plus grande durabilité que le bitume pur.

ASPHALTE DENSE

Asphalte conventionnel.

SABLE ENROBÉ (Sand Asphalt)

Texture assez lisse peu profonde.

ENROBÉ MIXTE (une partie des granulats sont en calcaire)
(granulats polissables)

EPOXY

Le liant qui remplace partiellement ou totalement l'asphalte.

MÉLANGES FERMÉS

Lorsque l'on a moins de 5% de vide après compactage (ex.: Hot rolled asphalt - Topeka - Gussasphalt).

MÉLANGES HYDROCARBONÉS COULÉS

Riche en mortier, utilisé à haute température sans compactage (généralement avec vibration). C'est un revêtement qui a une bonne résistance à la déformation due à la rigidité du mortier (type gussasphalt (en Allemagne)).

ENDUITS SUPERFICIELS (surface dressings)

On répand un film liant hydrocarboné sur une couche de surface pour assurer l'étanchéité et le collage de granulats soupoudrés en 1 ou 2 couches. On obtient des cailloux saillants collés sur le liant qui est un bitume fluidifié aux huiles de houille et parfois un élastomère. La granulométrie est serrée.

LE CLOUTAGE

Répardage à la surface du béton frais de gravillons ou d'un sable. La surface peut être aussi des matériaux hydrocarbonés. Cette surface est pauvre en gros éléments.

ANNEXE 2

LE GRADIENT DE TEMPÉRATURE PRÈS DE LA SURFACE D'UNE CHAUSSÉE (RÉFRACTION)

**Réf.: Puissance et directivité acoustique du bruit
de contact pneu/chaussée, J.F. Hamet, J.C.
Bruyère, G. Pachiaudi. Rapport INRETS #15,
décembre 1986.**

La température à la surface d'un revêtement dépasse rarement 50°C sauf sous les climats extrêmes où la température peut atteindre 60°C. Près de la surface (1,5 cm à 5 cm) la température peut atteindre environ 45 à 50°C (pays chaud 55 à 60°C).

Par temps dégagé, la température de l'air dans les premiers mètres au-dessus du sol varie rapidement avec la hauteur. Ainsi la vitesse du son dans l'air va varier elle aussi. Ce phénomène peut avoir une influence sur des mesures à grandes distances (> 15 m) et à faible hauteur (le jour naturellement).

Pour de l'air sec:

$$C_{\text{sec.}} = 331,4 + 0,607 \theta$$

Pour de l'air humide:

$$C_{\text{hum.}} = [1 + 0,16 h] C_{\text{sec.}}$$

C: vitesse du son (célérité) m/s

θ : température °C

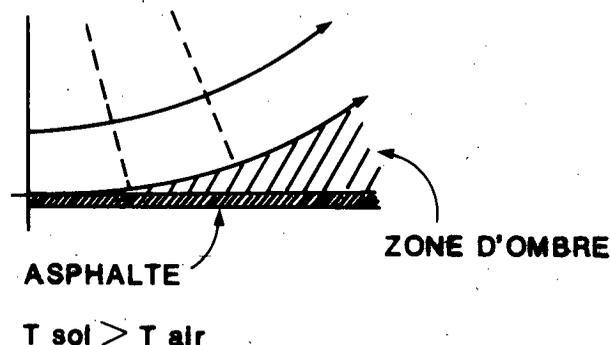
h: fraction moléculaire qui est de l'eau dans l'air

h = 0,07 à 100% d'humidité à 40°C

(réf.: 46)

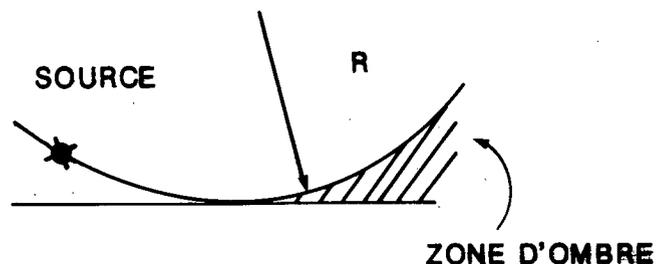
Les rayons sonores vont être courbés vers le haut. Ce phénomène favorise la formation d'une zone d'ombre proche du sol. Un vent contraire courbe aussi vers le haut la propagation sonore.

Il y a un rayon sonore limite qui frôle le sol et délimite deux régions distinctes dans le cas d'une source proche du sol.



Au-dessus du rayon limite, le champ sonore est composé d'ondes directes et d'ondes réfléchies sur le sol. En-dessous du rayon limite on a de l'énergie sonore uniquement par diffraction.

En supposant une variation linéaire de la vitesse du son en fonction de la hauteur, les rayons sonores passant par la source sont des arcs de cercle avec un rayon de courbure de:



$$R = \frac{C}{\frac{dC}{dh}}$$

C: vitesse du son (m/s)
h: hauteur (m)
R: (en mètre)

$$\frac{dC}{dh} = 0,607 \quad \frac{d\theta}{dh} \quad \frac{d\theta}{dh} : \text{gradient de température en fonction de la hauteur}$$

h : hauteur en mètre

Des mesures de température en fonction de la hauteur au-dessus de la chaussée pointent un fort gradient de température dans les cinquante premiers centimètres au-dessus du sol. Selon un rapport de l'IRT, la température entre le sol et le micro (à 1,20 m) peut varier de 5°C. Selon un rapport de l'INRETS le gradient est évalué à 14 heures à 8°C/mètre.

Le rayon de courbure R du rayon sonore passant par la source (cas de la zone de contact pneu/chaussée) pour une température au niveau du sol d'environ 30°C est:

$$R = \frac{331,4 + 0,607 \cdot 30}{\frac{dC}{dh}} = \frac{350}{\frac{dC}{dh}}$$

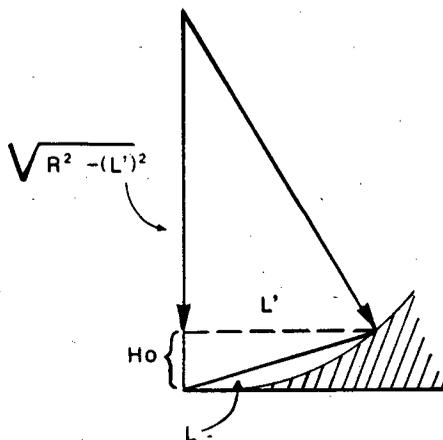
Si on prend un gradient de température conservateur:

$$\frac{-5^{\circ}\text{C}}{1,2 \text{ m}}$$

$$\frac{dC}{dh} = 0,607 \cdot \left(\frac{-5}{1,2}\right) = 2,53 \text{ s}^{-1}$$

$$R = \frac{350}{2,53} = 138,3 \text{ m}$$

La limite de la zone d'ombre d'une mesure située à L mètres de la source et à 1,5 m au-dessus du sol, est donnée par H_0 .



Géométriquement on a:

$$L' = \left((L)^2 - (1,5)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

pour $L \gg 1,5$ on a $L \approx L'$
(cas des mesures à l'extérieur)

$$E_t \quad H_0 = R - \left\{ R^2 - (L')^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

En-dessous de H_0 on a une baisse des niveaux mesurés.

En haut de H_0 on a aucun effet sur les niveaux mesurés.

Exemples:	$L' = 7,5 \text{ m}$	$H_o = 0,2 \text{ m}$
	$L' = 15 \text{ m}$	$H_o = 0,82 \text{ m}$
	$L' = 20 \text{ m}$	$H_o = 1,46 \text{ m}$

Si on prend un gradient de température de: $-8^\circ\text{C}/2\text{m}$ on a donc:

$$L' = 7,5 \text{ m} \quad H_o = 0,4 \text{ m}$$

$$L' = 15 \text{ m} \quad H_o = 1,63 \text{ m}$$

$$L' = 20 \text{ m} \quad H_o = 2,9 \text{ m}$$

À l'intérieur de la zone d'ombre, il se développe des ondes rasantes (creeping waves) sur une épaisseur l et sur une longueur Δr (réf.: 46)..

$$l = \left\{ \frac{R}{2 k_o^2} \right\}^{1/3} \quad (\text{fonction de la fréquence})$$

Δr (longueur mesurée à partir de la source)

$$k_o = \frac{\omega}{C_o} \quad \text{nombre d'ondes}$$

Selon l'auteur de cette théorie (Pierce), les ondes rasantes interviennent de deux façons sur la propagation:

1) Atténuation $e^{(-\alpha \cdot \Delta r)}$

$$\alpha = 0,7 \left\{ \frac{k_o}{2 R^2} \right\}^{1/3}$$

2) Vitesse de phase $V < C_o$

$$V = \frac{\omega}{k_r} \quad \text{avec } k_r = k_o + 0,4 \left\{ \frac{k_o}{R^2} \right\}^{1/3}$$

ANNEXE 3

ÉTUDE THÉORIQUE DU COEFFICIENT D'ABSORPTION EN INCIDENCE NORMALE DES REVÊTEMENTS POREUX

Réf.: Modélisation acoustique d'un enrobé drainant, étude théorique en incidence normale, rapport INRETS 59, janvier 1988, par J.F. Hamet + réf.: 34, 48 et 49.

Avec l'approximation de l'acoustique linéaire:

$$(1) \quad \Omega \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial \underline{u}}{\partial x} = 0$$

$$\text{en 3 dim. on a: } \Omega \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \underline{u} = 0$$

Ici les pores connectés du matériau sont isotropes: le fluide se déplace dans toutes les directions avec la même facilité.

Équation d'état

L'équation d'état relie la variation de densité à la variation de pression.

Déf.: K_p : la compressibilité

$$K_p = \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dP} \quad \begin{array}{l} \rho_0: \text{densité de l'air} \\ P: \text{pression} \end{array}$$

$$(2) \quad \frac{dP}{d\rho} = \frac{C_0^2}{\gamma_p}$$

$\gamma_p \rightarrow 1$ aux hautes fréquences (adiabatique)

$\gamma_p \rightarrow 1,4$ aux basses fréquences (compressibilité isotherme)

Déf.: Facteur de forme K :

Tient compte de l'accroissement de la densité d'énergie cinétique de l'air dû aux composantes de vitesse transverses à la vitesse moyenne et secondairement à l'augmentation de masse de l'air traversant un étranglement.

On considère donc la densité égale à $\rho_0 K$ et non à ρ_0 .

Déf.: La résistance spécifique au passage de l'air par unité d'épaisseur:

$$R_s = \frac{\Delta P}{e(Q/S)} = \frac{1}{e} \frac{\Delta P}{u}$$

e: épaisseur

Q/S: vitesse moyenne = u

Q: débit traversant un matériau d'épaisseur e à une différence de pression ΔP

S: section

L'équation de la dynamique relie au gradient de pression $\frac{\partial P}{\partial x}$, l'accélération des particules dans les pores et la résistance à l'écoulement.

$$K \rho_o \frac{\partial u_{\text{air}}}{\partial t} + R_s u = - \frac{\partial P}{\partial x}$$

La vitesse de l'air dans les pores et la vitesse moyenne sont liées par:

$$Su = S_{\text{air}} u_{\text{air}} \rightarrow u_{\text{air}} = \frac{S}{S_{\text{air}}} u = \frac{u}{\Omega}$$

$$\text{On a donc: } \rho_o \frac{K}{\Omega} \frac{\partial u}{\partial t} + R_s u = - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3)$$

$$\text{en 3 dimensions } \rho_o \frac{K}{\Omega} \frac{\partial u}{\partial t} + R_s u = - \text{grad } P$$

L'équation de propagation

En éliminant u et p avec les équations (1), (2) et (3), on obtient l'équation caractérisant le champ de pression acoustique dans le matériau de la façon suivante:

i) avec l'éq. (1): $\Omega \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_o \frac{\partial u}{\partial x} = 0$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\Omega}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t}$$

ii) avec l'éq. (2): $\frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\Omega}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial t} \cdot \frac{\gamma_{p2}}{C_o}$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \cdot \partial x} = - \frac{\Omega}{\rho_o} \frac{\gamma_{p2}}{C_o} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}$$

iii) si on dérive l'éq. (3) par rapport à x on a:

$$\rho_o \frac{K}{\Omega} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + R_s \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$$

$$\text{De là } \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{K \gamma_p}{C_o^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \frac{R_s \Omega}{\rho_o C_o} \frac{\partial P}{\partial t} = 0$$

l'équation de propagation

N.B.: Lorsque la résistance spécifique au passage de l'air R_s est assez faible, on obtient l'équation de propagation habituelle avec une célérité $C_e = \frac{C_o}{(K \gamma_p)^{1/2}}$

$$(K \gamma_p)^{1/2}$$

Si R_s est suffisamment importante, on obtient une équation de diffusion.

Analyse en fonction de la fréquence

On définit le potentiel de vitesse $\Psi(x,t)$

$$U(x,t) = - \text{grad } \Psi(x,t)$$

avec l'équation (3) en 3 dimensions, on trouve donc:

$$P = \rho_0 \frac{K}{\Omega} \frac{\partial \Psi}{\partial t} + R_s \Psi$$

Ψ vérifie l'équation de propagation (équ. d'onde):

$$\nabla^2 \Psi - \frac{K \gamma_p}{C_0^2 \rho_p} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} - \frac{R_s}{\rho_0 C_0} \frac{\Omega \gamma_p}{C_0} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = 0$$

Pour analyser le phénomène à une fréquence f quelconque, on utilise

$$\Psi(x, t) = \Psi(x) e^{i\omega t}$$

$$\text{d'où: } P(x) = (i\omega \rho_0 \frac{K}{\Omega} + R_s) \cdot \Psi(x)$$

en définissant: $\rho_p = \rho_0 \frac{K}{\Omega}$ un terme associé à l'inertie de l'air dans les pores du matériau

$$P(x) = i\omega \rho_p \left\{ 1 - i \frac{R_s}{\omega \rho_p} \right\} \cdot \Psi(x)$$

On définit une densité équivalente fonction de la fréquence:

$$\rho_e = \rho_p \left\{ 1 - \frac{iR_s}{\omega \rho_p} \right\}$$

$$\text{D'où } P(x) = i\omega \rho_e \Psi(x)$$

L'équation de propagation s'écrit donc:

$$\nabla^2 \Psi + K \gamma_p \frac{\omega^2}{C_0^2} \Psi - i \frac{\omega}{C_0} \frac{R_s}{\rho_0 C_0} \Omega \gamma_p \Psi = 0$$

$$\text{Déf.: } C_p = \frac{C_0}{(K \gamma_p)^{1/2}}$$

$$C_e = \frac{C_p}{\left\{ 1 - \frac{iR_s}{\omega \rho_p} \right\}^{1/2}}$$

On a alors l'équation d'ondes pour une onde harmonique

$$\nabla^2 \Psi + \left\{ \frac{\omega}{C_e} \right\}^2 \Psi = 0$$

La solution générale est deux ondes planes se propageant dans la direction des X positifs $\Psi_+ e^{(-ik_e x)}$ et des X négatifs $\Psi_- e^{(ik_e x)}$

$$k_e = \frac{\omega}{C_e} = \frac{\omega}{C_p} \left\{ 1 - \frac{iR_s}{\omega \rho_p} \right\}^{1/2}$$

$$P(x) = i\omega \rho_e \Psi(x) = P_+(x) + P_-(x)$$

$$u(x) = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} = u_+(x) + u_-(x)$$

Et l'impédance caractéristique:

$$w = \frac{P_+(x)}{u_+(x)} = \rho_e C_e = \rho_p C_p \left\{ 1 - \frac{iR_s}{\omega \rho_p} \right\}^{1/2}$$

Les ondes se trouvent atténuées au cours de leur propagation dans le matériau, le nombre d'onde étant complexe (à cause du terme dû à la friction air / solide).

$$\text{en posant } k_e = \beta - i\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_e} - i\alpha$$

la constante de propagation est:

$$\gamma = ik_e = \alpha + i\beta$$

On trouve:

$$\alpha = -\text{Im} \{ k_e \} = \frac{\omega}{C_p} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{R_s}{\omega \rho_p} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{1}{2} \right\}^{1/2}$$

$$\beta = \text{Re} \{ k_e \} = \frac{\omega}{C_p} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{R_s}{\omega \rho_p} \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{2} \right\}^{1/2}$$

L'impédance caractéristique complexe: (déphasage entre pression et vitesse moyenne de l'air dans le matériau)

$$w = R + iX$$

$$R = \rho_p C_p \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{R_s}{\omega \rho_p} \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{2} \right\}^{1/2}$$

$$X = - \rho_p C_p \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{R_s}{\omega \rho_p} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{1}{2} \right\}^{1/2}$$

$$\text{avec } \rho_p C_p = \frac{\rho_o C_o}{\Omega} \left(\frac{K}{\gamma_p} \right)^{1/2}$$

Le terme $\frac{R_s}{\omega \rho_p}$ est une quantité sans dimension, qui représente le rapport entre la force de friction et la force d'inertie de l'air dans le matériau.

La fréquence critique est définie comme:

$$f_c = \frac{1}{2\eta} \frac{R_s \Omega}{\rho_o K} = \frac{1}{2\eta} \frac{R_s}{\rho_p}$$

$$\frac{f_c}{f} = \frac{R_s}{2\eta f \rho_p} = \frac{R_s}{\omega \rho_p}$$

si $R_s / \omega \rho_p \ll 1$ i.e. $f \gg f_c \rightarrow$ le phénomène d'inertie domine

Le coefficient d'absorption d'un enrobé drainant (étude des tendances)

Les enrobés drainants sont posés sur des supports imperméables, l'impédance acoustique à la surface imperméable est pratiquement infinie et est connue.

$$\lim_{Z_t \rightarrow \infty} Z = w \frac{Z_t \coth \gamma e + w}{Z_t + w \coth \gamma e}$$

$$Z = w \coth \gamma e$$

$$Z = \rho_o C_o \left(\frac{K}{\gamma_p} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \frac{i R_s \Omega}{\omega \rho_o K} \right\}^{1/2} \coth \left\{ (K \gamma_p)^{1/2} \frac{\omega e}{C_o} \left\{ \frac{1 - i R_s \Omega}{\omega \rho_o K} \right\}^{1/2} \right\}$$

Le coefficient d'absorption en incidence normale est:

$$\alpha_n = 1 - \left\{ \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \right\}^2$$

il dépend donc de l'épaisseur e , du facteur de forme K , de la porosité Ω , de la résistance spécifique au passage de l'air R_s et de la fréquence $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

Optimisation acoustique d'un enrobé drainant

Pour des fréquences assez élevées: $\gamma_p \approx 1$ et si le terme $\frac{R_s}{\omega \rho_p}$ est bien inférieur à 1, on a alors avec l'approximation $(1 + X)^n \approx 1 + nX$ (valable dans ce cas $X \ll 1$)

N.B.: Les premiers termes d'un binôme $(a + x)^n = a^n + na^{n-1}x + \frac{n(n-1)}{2!}a^{n-2}x^2 + \dots$

$$(1 + x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \dots$$

$$\alpha \approx \frac{\omega}{c_p} \frac{1}{2} \frac{R_s}{\omega \rho_p} = \frac{1}{2} \frac{\Omega}{K^{1/2}} \frac{R_s}{\rho_0 c_0}$$

La solution

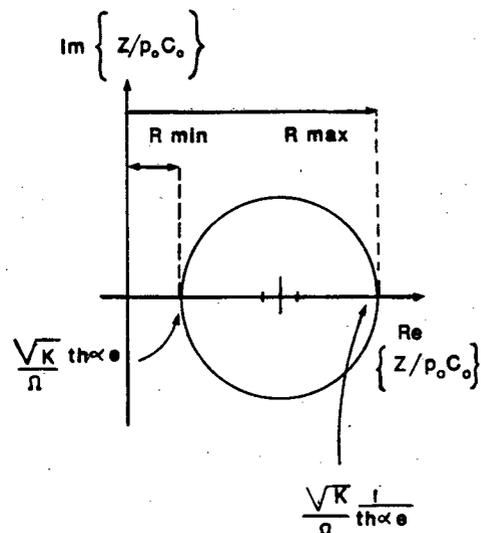
Lorsque la fréquence varie, Z se déplace sur un cercle centré sur l'axe des réels.

Abscisse du centre:

$$\frac{K^{1/2}}{\Omega} \frac{1}{2} \left\{ \text{th} \alpha e + \frac{1}{\text{th} \alpha e} \right\}$$

Et comme rayon du cercle:

$$\frac{K^{1/2}}{\Omega} \frac{1}{\text{sh} 2\alpha e}$$



Le coefficient d'absorption oscille en fonction de la fréquence, entre deux valeurs extrêmes sur l'axe des réels.

$$\alpha_n \text{ max.} = 1 - \left(\frac{R \text{ min} - 1}{R \text{ min} + 1} \right)^2$$

$$\alpha_n \text{ min} = 1 - \left(\frac{R \text{ max} - 1}{R \text{ max} + 1} \right)^2$$

Déf.: $R_{\text{t,air}} = R_s e$: résistance totale au passage de l'air

Maximum d'absorption élevé

α_n max sera élevé si R min tend vers l'unité:

$$R \text{ min} = 1 \text{ alors } \frac{(K)^{1/2}}{\Omega} \text{ th} \omega e = 1$$

$$\text{soit } \frac{K^{1/2}}{\Omega} \text{ th } \frac{1}{2} \frac{\Omega}{K^{1/2}} \frac{R_t}{\rho_o C_o} = 1$$

$$\frac{R_t}{\rho_o C_o} \text{ opt.} = 2 \frac{K^{1/2}}{\Omega} \text{ th}^{-1} \frac{\Omega}{K^{1/2}}$$

$$\text{N.B.: } 0 \leq \frac{\Omega}{K^{1/2}} \leq 1$$

Les fréquences où il y a un maximum d'absorption

$$f_m = \frac{m C_o / K^{1/2}}{4e} = \frac{m C_o}{4e} \quad (m = 1, 3, 5, \dots)$$

MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 134 762
