

Bruit de contact pneu-chaussée : Etat de l'art

Roger Williams,
Dunlop Tyres Ltd.,
Birmingham,
Royaume Uni,

Thomas Bachmann,
Département d'ingénierie automobile,
Université de Darmstadt,
Allemagne,

Gijsjan van Blokland,
M&P Raadgevende Ingenieurs BV,
Pays-Bas,

Hans-Peter Fingerhut,
MAN Nutzfahrzeuge AG,
Allemagne,

Jean-François Hamet,
INRETS,
France,

Ulf Sandberg,
VTI,
Suède,

N. Taylor,
Rover Group Ltd,
Royaume Uni.

Une des questions les plus cruciales dans le domaine de l'environnement est le bruit de trafic routier. Des enquêtes récentes en Europe centrale, et notamment en Allemagne, montrent que plus de 75 % de la population est gênée par cette nuisance.

La réduction du bruit est tributaire de la compréhension des interactions entre véhicules, pneumatiques et chaussées.

Grâce à une coopération entre la PIARC (Association mondiale routière) et la FISITA (Fédération internationale des sociétés des ingénieurs de l'automobile), un groupe de travail sur le bruit de contact pneu-chaussée a été créé.

Cet article présente les résultats de ce groupe sous la forme d'une revue critique de l'état de l'art international.

Son objectif est d'informer toutes les personnes impliquées dans les techniques du transport routier sur la connaissance actuelle des mécanismes de génération de bruit, les méthodologies expérimentales et les définitions afin de promouvoir une compréhension commune de la question.

Suite à la réduction progressive du bruit émis par les automobiles et les véhicules industriels, il est maintenant établi que c'est le bruit généré par le contact pneumatique-chaussée qui domine lorsque les automobiles roulent à plus de 50 km/h, et les véhicules industriels à plus de 80 km/h. Dans des conditions de trafic fluide, le bruit de contact pneu-chaussée constitue 90 % du bruit total généré à vitesse normale (figure 1).

Le but de cet article est d'établir quels sont les mécanismes importants dans la génération du bruit de contact

pneu-chaussée et de mettre en évidence les domaines majeurs nécessitant une recherche complémentaire pour trouver des solutions à la réduction de ce bruit.

On y discute des méthodes expérimentales et des questions d'ingénierie. On y montre l'influence de la conception du pneu et de ses conditions d'utilisation. Une discussion sur la caractérisation de la surface du revêtement complète ce document. Les progrès récents dans des domaines tels que les asphaltes poreux sont également présentés.

Les auteurs sont conscients de la croissance forte de la recherche au niveau mondial dans ce domaine, non

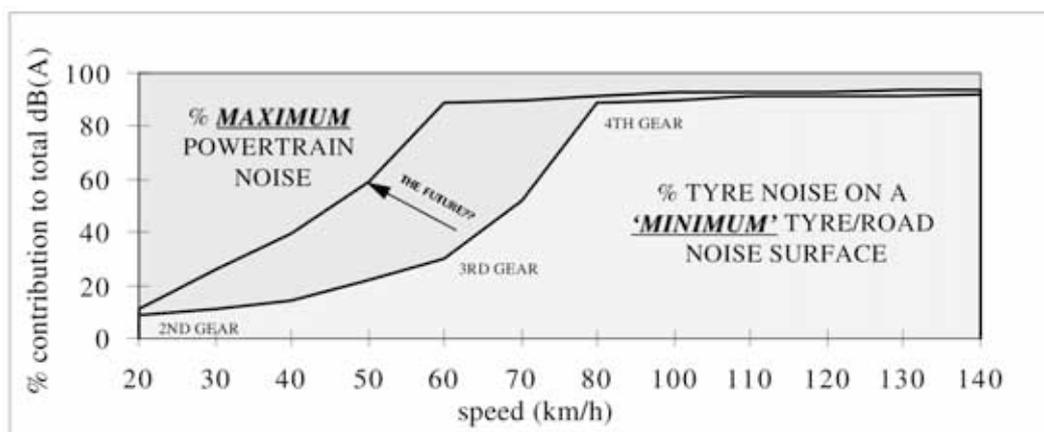


Fig. 1 : Contribution du bruit de contact pneumatique-chaussée au bruit total d'une voiture particulière à vitesse constante

seulement pour les techniques de mesure mais aussi pour les modèles mathématiques qui représentent les mécanismes d'interaction pneu-chaussée relatifs au bruit. Les auteurs sont convaincus que le bruit de contact pneu-chaussée est désormais la préoccupation majeure des pays qui croient aux infrastructures de transport routier pour promouvoir leurs industries.

Cependant, il ne faut pas sous-estimer l'importance des autres aspects de l'interaction pneumatique-chaussée-véhicule tels que la sécurité ou la consommation.

Mécanismes de génération du bruit de contact pneu-chaussée

Mécanismes et phénomènes associés

Il est nécessaire de bien comprendre comment le bruit de contact pneu-chaussée est généré. Cette recherche a commencé au milieu des années soixante-dix et a abouti à une liste très complète de mécanismes et de phénomènes associés dont il a été démontré qu'ils avaient tous de l'influence. Les figures 2 et 3 illustrent ceci de manière compréhensible.

D'abord la figure 2 montre les mécanismes surtout basés sur des vibrations générées dans le pneu; ensuite la figure 3 montre les mécanismes surtout basés sur les mouvements de l'air et sur le bruit aérien.

Cependant, les mécanismes les plus influents ne sont pas si nombreux et nous les avons décrits dans le tableau ci-dessous.

Mécanismes de vibration radiale	1- A Impact des pavés du pneumatique ou d'autres éléments de profil sur la surface de chaussée
	1- B Impact de la texture de chaussée sur la bande de roulement du pneumatique
Mécanismes de résonance de l'air	2-A Résonance de tuyau
	2-B Résonance de Helmholtz
	2-C Air-pumping (également cas particulier de 2-B)
Mécanismes d'adhérence	3-A Mouvements de stick/slip causant des vibrations tangentielles du pneumatique (pourraient provoquer l'excitation de 2-A et/ou 2-B)
	3-B Effet adhésif caoutchouc-chaussée

Tab. 1 : Résumé des mécanismes de génération les plus influents

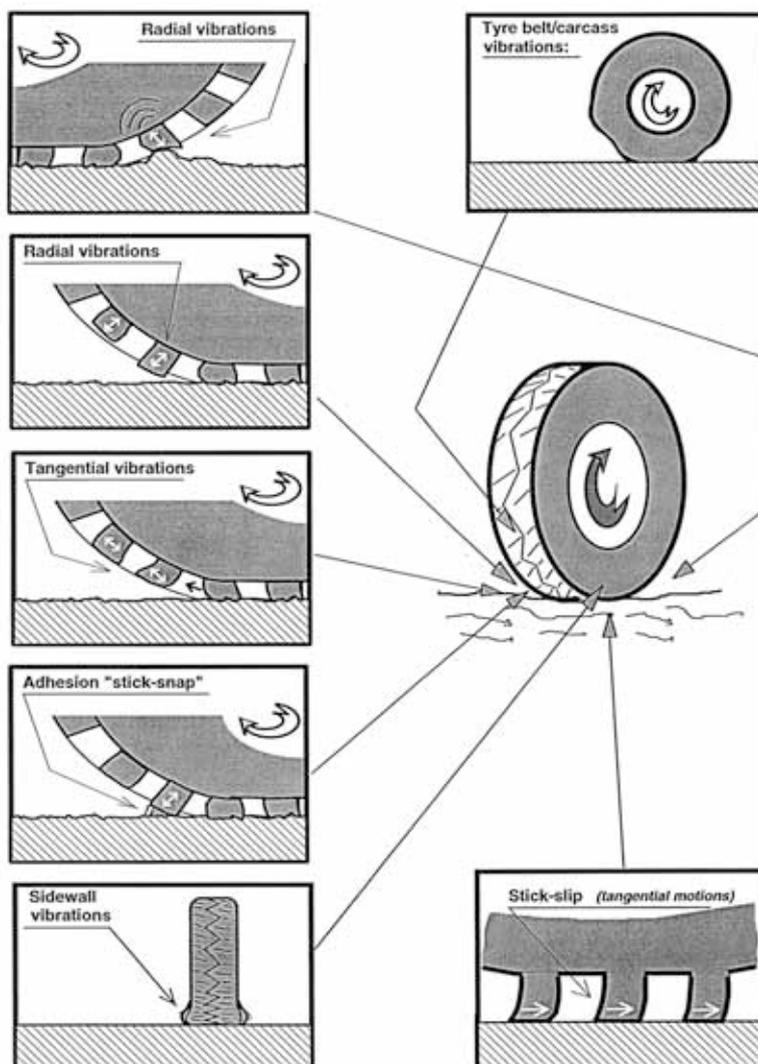


Figure 2 : Mécanismes surtout basés sur les vibrations générées dans le pneumatique

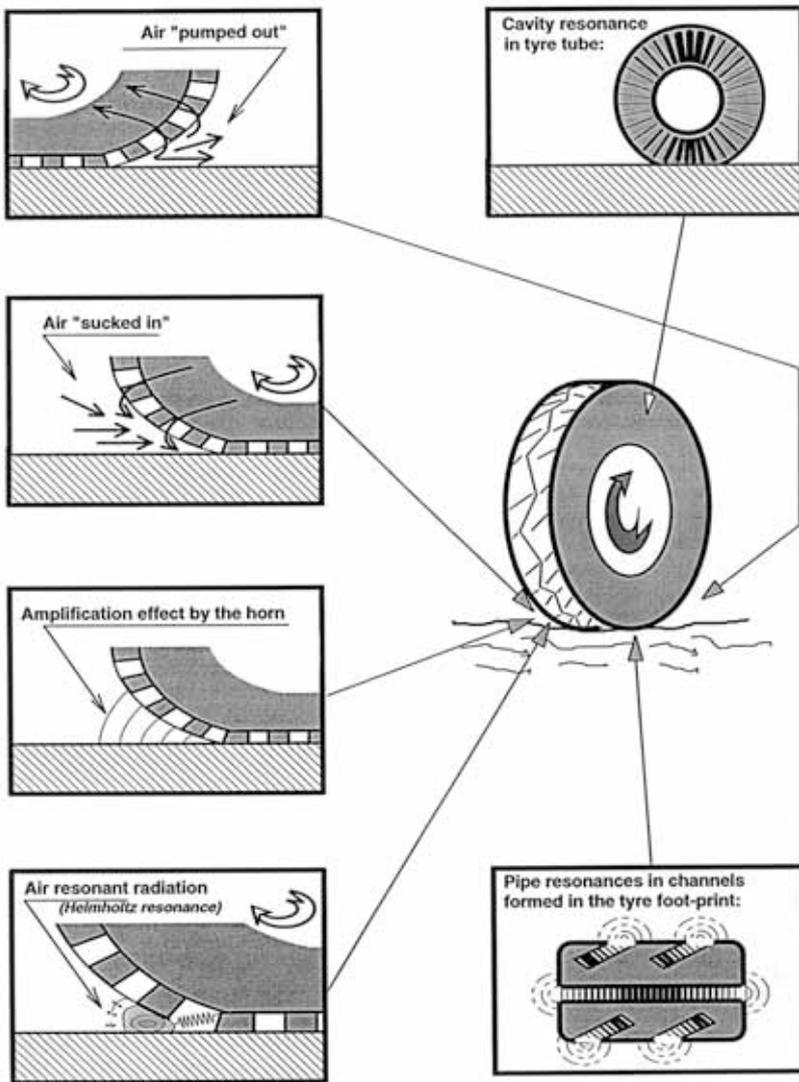


Fig. 3 : Mécanismes surtout basés sur le mouvement d'air ou le bruit aérien

Pour compléter ce tableau, on peut noter d'autres phénomènes qui sont fortement liés à ces mécanismes et qui influent sur l'amplitude sans être des mécanismes de génération. Ce sont :

- L'effet de corne (Horn Effect)
- L'absorption du bruit par la surface de la chaussée
- L'effet d'impédance mécanique

Explications complémentaires et discussion

Les vibrations radiales de la bande de roulement du pneu sont provoquées par des petites déflexions dues aux forces d'impact et de relaxation, et rayonnent du bruit après filtrage passe-bas dans le pneu.

La résonance de tuyau est due aux ondes stationnaires dans le « tube d'air » compris entre les dessins du pneu et la surface de chaussée. Concernant la résonance de Helmholtz, le volume de l'air dans une cavité agit comme un ressort qui résonne avec la masse d'air dans le goulot d'étranglement. Dans un système de référence lié à l'axe du pneu, une cavité de la bande de roulement se déplace

le long du contact du revêtement et autour de la circonférence du pneu. Ceci modifie la fréquence de résonance et sans doute également son amplitude avec la rotation du pneu.

L'air-pumping est provoqué par la fermeture et l'ouverture d'une cavité : l'air est comprimé puis dilaté à une telle vitesse qu'une importante turbulence de l'air se produit, ce qui émet du bruit.

La résonance de Helmholtz peut amplifier ce phénomène. Il faut souligner que pour un pneu dessiné correctement, l'air-pumping devrait être négligeable.

Aux bords antérieur et postérieur du contact, entre la partie courbée de la bande de roulement et la surface de la route, il y a un espace formant une corne acoustique qui augmente l'efficacité du rayonnement vers l'avant et vers l'arrière. Cet effet peut être fortement atténué si un côté de ce dioptré (en l'occurrence, la surface routière) est poreux.

La rigidité de cette surface ou l'impédance mécanique entre le pneu et la chaussée influence l'impact des pavés de la bande de roulement ou de la texture de la route dans le sens d'une amplification (chaussée rigide) ou d'une

atténuation (chaussée souple). Ainsi, elle influence le mécanisme 1 et le mécanisme 2 puisque la résonance de tuyau peut être provoquée par les impacts.

Le mécanisme 1 est limité à des fréquences relativement basses (généralement inférieures à 1,5 kHz); les mécanismes 2 et 3 arrivent principalement au-dessus de 1 kHz malgré quelques exceptions (en particulier à 250 Hz). Les mécanismes 2-B, 2-C et 3-A seraient surtout importants au bord arrière, et accentués par l'effet de corne.

Ainsi, les mécanismes de génération couvrent de nombreux phénomènes acoustiques intéressants, de nature fondamentale, qui constituent un système très complexe.

Influence fondamentale de la texture de chaussée sur le bruit

Dans un programme de coopération entre la Belgique et la Suède, mentionnée dans un rapport du PIARC [1], une étude a recherché les paramètres de chaussée qui influencent la génération du bruit. [2].

On y a considéré des paramètres tels que la macrotexture, le frottement, la capacité de drainage, l'absorption acoustique et la rigidité mécanique. Il a été conclu que l'influence sur le bruit du frottement ou de la capacité de drainage pouvait être aussi bien ou mieux attribué à la macrotexture; que la surface influençait l'absorption du bruit, les surfaces poreuses étant les plus influentes et que la rigidité mécanique pouvait peut-être influencer le bruit mais seulement modérément.

On a préféré remplacer la méthode de mesure de la profondeur au sable qui caractérisait communément la texture par un relevé de profil. Ce relevé de profil fut analysé, d'une

part par filtrage à partir d'une technique analogique, et d'autre part par calcul du contenu spectral à partir d'une technique numérique pour obtenir un spectre de texture en bande de 1/3 d'octave. Sur la gamme de surfaces routières testées, les niveaux de bruit dans chaque bande de fréquences acoustiques furent corrélés aux niveaux des textures routières dans chaque bande de longueurs d'ondes de texture.

La meilleure corrélation entre bruit et texture routière fut obtenue pour certaines fréquences de bruit et certaines longueurs d'ondes de textures.

La figure 4-A illustre la corrélation entre le bruit en basses fréquences et la texture en grandes longueurs d'ondes; la figure 4-B illustre de même la corrélation entre les hautes fréquences du bruit et les courtes longueurs d'ondes de texture. La relation apparaît être inversée dans ces deux cas.

Ces résultats démontrent qu'il n'y a pas de relations simples et générales entre le niveau de bruit total et la texture. Au contraire, le niveau de bruit total est composé de la somme de ces deux effets qui peuvent se contrebalancer ou au contraire s'additionner selon les circonstances.

La corrélation entre bruit et texture pour toutes les fréquences et toutes les longueurs d'ondes de textures est illustrée dans l'étude commune de la référence [2]. Il fut conclu qu'il y avait (au moins) deux mécanismes de génération majeurs qui n'étaient pas corrélés entre eux, l'un dans le domaine des basses fréquences (en dessous de 1 000 Hz) avec une corrélation positive avec la macrotexture routière, l'autre dans le domaine des hautes fréquences (au-dessus de 1 000 Hz) avec une corrélation négative avec la macrotexture. Le mécanisme de basse

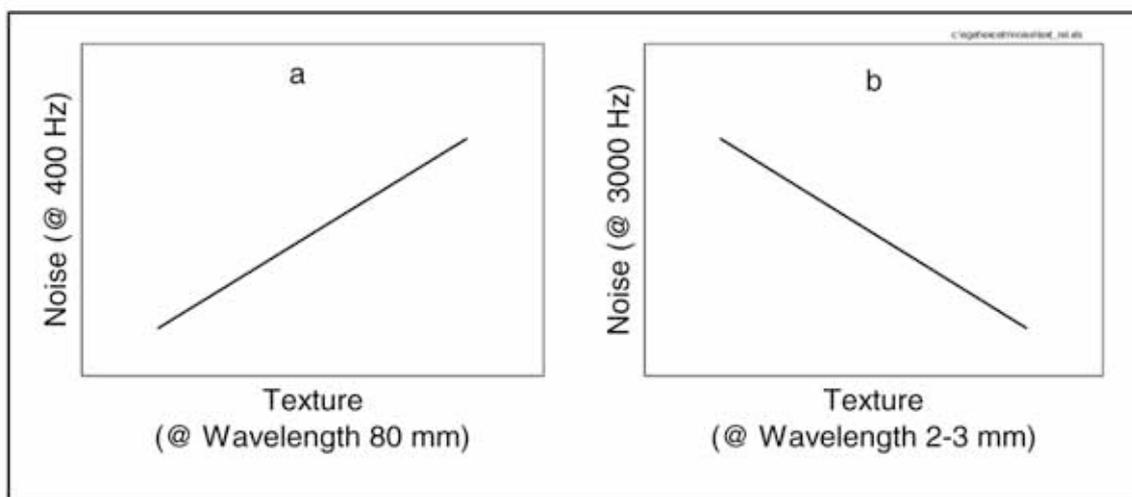


Fig. 4 : Illustration de la manière dont le bruit et la texture sont liés pour les deux situations les plus prononcées :
a - bruit en basses fréquences (environ 400 Hz) en fonction de la texture en grandes longueurs d'ondes (environ 80 mm)
b - bruit en hautes fréquences (environ 3000 Hz) en fonction de la texture en petites longueurs d'ondes (environ 2-3 mm)

fréquence est le mécanisme n° 1, le mécanisme de hautes fréquences est le n° 2 et/ou le n° 3 (voir tableau 1).

Synthèse des techniques de mesure

Le tableau 2 donne une synthèse des méthodes de mesure principales, il faut noter que les microphones sont généralement aux positions suivantes :

- méthodes CB, SPB, TCB, CPB : microphone à 7,5 mètres du centre de la voie d'essai, et 1,2 mètre au-dessus de la surface. Les méthodes CB et TCB utilisent des microphones placés symétriquement de chaque côté de la voie.

- méthodes CPX, DR : microphone(s) à 0,2 ou 0,4 mètre à l'extérieur du pneumatique, l'un à 45° et l'autre à 135° par rapport à la direction de roulement. Dans certains cas on ajoute des microphones à l'avant et à l'arrière du pneu. La hauteur au-dessus de la surface de chaussée est de 0,1 ou 0,2 mètre.

Terminologie

Le tableau 3 page 22 liste et explique quelques-uns des termes importants liés au bruit de contact pneu-chaussée.

Nom de la méthode	Principe de la méthode	Domaine d'application	Normes ou autres références
Coast-by (CB)	Le véhicule muni des pneumatiques d'essai se déplace devant un microphone sur une portion de route ou de piste d'essai, moteur coupé. Les vitesses d'essai sont variables. Usuellement, on retient le niveau de pression sonore maximum. On utilise une régression pour calculer le niveau sonore aux vitesses de référence, 80 km/h pour les voitures, 70 km/h pour les véhicules industriels	- Essai de pneumatique par type - Essai général de pneumatique - Étude détaillée de pneumatique - Étude détaillée de surface de chaussée	ISO/CD 13325 projet de directive européenne Projet de règlement CEE
Controlled pass-by (CPB)	Deux voitures sélectionnées (une petite et une grande) avec des pneus sélectionnés (4 montes de pneumatique, 2 par voiture, sans spécifier) passent devant le microphone avec le moteur en fonctionnement. On retient le niveau sonore maximum. On détermine la valeur moyenne à des vitesses spécifiées.	Étude détaillée de surfaces routières.	Norme NFS 31-119 Norme allemande GestR0'92
Statistical pass-by (SPB)	Les véhicules normaux du trafic passent devant le microphone. On retient le type de véhicule, la vitesse et le niveau sonore maximum. On calcule le niveau sonore moyen aux vitesses de référence 50, 80, 110 km/h par une régression utilisant au moins 100 voitures et 80 véhicules industriels.	- Test de surface routière par type - Étude générale de surface routière	ISO 11819-1 [3]
Close proximity (CPX)	Un pneumatique d'essai sur remorque ou équipant un véhicule normal est essayé sur l'aire d'essai, les microphones sont montés près du pneumatique d'essai. Le niveau sonore moyen sur le site d'essai est retenu. Vitesse de référence 50, 80, 110 km/h.	- Étude détaillée de surface routière - Évaluation d'intervention sur la surface de chaussée - Étude détaillée de pneumatique	ISO/CD 11819-2 [4]
Trailer Coast-by (TCB)	Une remorque équipée de 2 pneumatiques d'essai est tractée sur l'aire d'essai par un véhicule lourd. La longue barre de traction permet d'isoler le bruit de l'essieu arrière de celui du véhicule tracteur. On retient le niveau sonore maximum de l'essieu arrière, une correction est faite pour soustraire le bruit du véhicule tracteur.	- Test général des pneumatiques - Étude détaillée des pneumatiques	ISO/CD 13325 [5]
Laboratory Drum (DR)	Le pneumatique d'essai est appliqué contre un volant en laboratoire. Le(s) microphone(s) près du pneumatique, le niveau sonore moyen est retenu. Le volant doit être équipé de répliques de surface routière. Les conditions d'essai sont bien contrôlées, par exemple, la température et la surface.	- Test général de pneumatique - Étude détaillée de pneumatique	CEE/WP 29/GRB, doc R.1 000

Tab. 2 : Les principales méthodes de mesure pour le bruit de contact pneu-chaussée

Termes	Explication ou définitions	Normes possibles
Bruit de trafic	Bruit global émis par le trafic circulant sur la route étudiée	ISO 11819-1
Bruit de véhicule	Bruit total issu d'un véhicule individuel, les deux composants majeurs étant le bruit mécanique et le bruit de contact pneu-chaussée	ISO 11819-1
Bruit de contact pneu-chaussée	Bruit généré par l'interaction entre le pneumatique et la chaussée	ISO 11819-1
Bruit mécanique	Bruit généré par le moteur du véhicule, le système d'échappement, le système d'admission, le ventilateur, la transmission, etc	ISO 11819-1
« Surface ISO » (10 844)	Ceci est un terme répandu pour désigner la surface de référence spécifiée dans la norme ISO 10 844. Elle est destinée à la mesure du bruit de véhicules selon les normes ISO 362 et ISO 7188, mais également elle a été proposée dans ISO/CD 13325 et les projets associés pour la mesure du bruit de contact pneu/chaussée.	ISO 10 844
Surface de référence	Surface choisie en fonction de l'objectif de la mesure selon certaines règles décrites dans ISO 11819-1. Les niveaux sur la surface de référence sont normalisés à la valeur 0 (0 dB), et les niveaux sur toutes les autres surfaces sont présentés comme des différences par rapport à cette valeur	ISO 11819-1
Pneumatique de référence	Pneumatique spécifié dans la norme ISO/CD 11819-2 pour représenter certaines caractéristiques d'émission de bruit. 4 types de pneumatique de référence pour la mesure du bruit sont spécifiés.	ISO/CD 11819-2
Niveau sonore maximum	Le niveau de pression sonore maximum enregistré par l'instrument de mesure durant le passage d'un véhicule, en utilisant la pondération fréquentielle appropriée (normalement A) et l'intégration temporelle (normalement F), pour les véhicules qui sont acoustiquement identifiables, c'est-à-dire dont le bruit n'est pas altéré de manière significative par celui des autres véhicules.	ISO 11819-1
Niveau sonore de véhicule (Lveh)	Niveau de pression sonore maximum pondéré A déterminé à la vitesse de référence à partir d'une droite de régression des niveaux de pression sonore maximum pondéré A en fonction du logarithme de la vitesse, calculée pour chaque catégorie de véhicule.	ISO 11819-1
Indice statistique Pass-by (SPBI)	Indice de bruit pour comparer les surfaces routières, basé sur les niveaux sonores des véhicules et prenant en compte la proportion des véhicules et leur vitesse.	ISO 11819-1
Indice sonore Close-proximity (CPXI)	Indice de bruit pour comparer les surfaces routières, basé sur les niveaux sonores de contact pneu-chaussée et prenant en compte la composition des pneumatiques	ISO 11819-1
(Vehicle) coast-by	Passage d'un véhicule sur une section de route ou de piste, moteur coupé et transmission désengagée	ISO/CD 13325
(Vehicle) cruise-by	Passage d'un véhicule avec le moteur en fonctionnement à vitesse constante	
(Vehicle) drive-by	Passage d'un véhicule avec le moteur en fonctionnement, en accélération	
(Vehicle) pass-by	Passage d'un véhicule en condition d'utilisation non spécifiée (l'une des trois conditions précédentes)	

Tab. 3 : Termes les plus importants liés au bruit de contact pneu-chaussée

Évaluation du bruit des véhicules - Voiture particulière

Nous présentons ici la méthode de contrôle concernant les véhicules selon la législation de bruit pass-by 92/97/CEE. Il est à souligner que cette méthode de mesure utilise des pneumatiques de profondeur de profil minimum pour limiter le bruit de contact pneumatique-chaussée autant que possible.

Au départ d'un nouveau projet, il faut d'abord tenir compte de la réglementation à satisfaire. Ceci permet de faire des hypothèses précoces sur la conception de chaque composant, par exemple, les écrans sous moteur et les encapsulages. Des objectifs plus détaillés par composant sont élaborés à partir de prédiction sur les performances lors du test pass-by, et de l'expertise sur les émissions des différents composants. Ils sont validés sur des prototypes de véhicules dans des chambres anéchoïques permettant de simuler le bruit pass-by. Puisque les tests intérieurs pass-by sont effectués avec un véhicule fonctionnant sur banc à rouleaux, la contribution du bruit de pneu est réduite grâce à l'utilisation de pneumatique de profondeur de profil minimum. Ceci est dû au fait qu'il est actuellement difficile de reproduire le bruit de pneu en terme de niveau ou de spectre de fréquence. En conséquence, les contributions du bruit de pneu sont validées plus tard et en extérieur, sur les surfaces de bruit ISO pass-by.

La contribution de chaque composant au bruit de passage (pass-by) est établie en utilisant la technique de la fenêtre ouverte :

Tout d'abord, on masque les sources de bruit (admission, échappement, moteur, etc) de manière artificielle. Les essais de bruit de passage sont ensuite effectués en ramenant les sources de bruit les une après les autres à leur condition standard.

La contribution ainsi mesurée est comparée avec le niveau objectif de chaque composant. En outre, on effectue un test acoustique par composant dans une condition standard pour valider la relation entre la contribution au bruit de passage et le niveau dans des conditions standard. Ainsi la boucle est bouclée et un objectif par composant peut être établi et utilisé comme un niveau cible pour les fournisseurs.

Pendant le développement du véhicule, un test de bruit pass-by est effectué sur autant de prototypes que nécessaire pour vérifier la variabilité du bruit global et s'assurer qu'il satisfiera son objectif acoustique global.

De plus, les essais de conformité de production sont effectués au cours de la vie du véhicule pour s'assurer qu'il continue à satisfaire la cible en matière de bruit pass-by.

Évaluation du bruit des véhicules - Véhicules industriels

Les véhicules industriels proposent un nombre très important de variantes pour répondre aux besoins du marché. Les puissances usuelles varient de 100 à 600 chevaux et exceptionnellement jusqu'à 1 200. Les chaînes cinématiques vont du 4 x 2 jusqu'au 10 x 8, avec boîte de vitesse manuelle ou automatique, boîte de transfert, etc. Les charges transportées varient de 6 à 50 tonnes.

Pour satisfaire ces exigences, les configurations les plus diverses sont nécessaires pour les systèmes d'admission et d'échappement, et ceci pour toutes les configurations possibles en matière de liaisons au sol (nombre d'essieux, etc) dans les limites de la réglementation. En conséquence, il y a une grande variété de sources de bruit à la fois en type et en nombre.

L'objectif de développement actuel dans le domaine des véhicules industriels est un niveau sonore global de 80 dB(A) dans les conditions de la directive 96/20/EC. Il est donc nécessaire de réduire chacune des sources élémentaires de bruit jusqu'à des niveaux si possible inférieurs à 70 dB(A). Même si l'on peut, pour certains composants individuels, faire les études nécessaires sur banc d'essai, il est indispensable que la synthèse finale soit faite sur le véhicule complet en accélération sur chaussée. Seules quelques-unes des variantes possibles peuvent être testées in situ.

Les méthodes d'essai imposées par les directives européennes sont décrites dans la norme ISO 362 et sont à peu près semblables pour les automobiles et les véhicules industriels. Cependant, contrairement au cas des automobiles, on évalue le bruit pour le rapport de boîte le plus bruyant dans le cas des véhicules industriels (Worst Case). Mais ceci suppose des conditions d'utilisation du véhicule qui sont extrêmement rares en trafic routier réel, entraînant des conditions de fonctionnement extrêmes et des émissions sonores inadaptées. C'est toutefois nécessaire pour obtenir l'homologation des véhicules.

Pour satisfaire ces valeurs réglementaires, les véhicules industriels sont aujourd'hui équipés d'encapsulage autour du groupe motopropulseur. Si au début on avait retenu le principe d'encapsulage lié au châssis, des applications plus récentes voient apparaître des encapsulages fixés directement sur la source de bruit prédominante, le moteur. Ce qui présente des avantages pour la maintenance et le refroidissement du groupe motopropulseur. Le bruit de contact pneu-chaussée est donc à prendre en compte dans ce contexte. Dans les conditions de la procédure, le véhicule non chargé, avec une puissance par exemple de 450 CV (tout à fait représentative des véhicules tracteurs routiers actuels) est soumis à une accélération maximale sur les rapports de boîtes inférieurs ; ceci signifie des couples très élevés et des vitesses réduites entre 10 et 30 km/h sur la piste d'essai (piste spécifiée dans ISO 10 844).

Ceci entraîne des glissements irréalistes et en conséquence des bruits additionnels de contact pneu-chaussée. Ces bruits sont notablement différents de ceux qui surviennent quand les pneumatiques sont utilisés normalement, et ont été jusqu'à présent peu étudiés. Les autorités chargées de la réglementation ont reconnu cette situation et ont émis un amendement à la directive (96/20/EC) qui autorise les constructeurs de véhicules à choisir des pneumatiques à leur convenance ; les seules conditions étant que le type de pneumatique retenu soit réellement utilisé sur le véhicule à tester et qu'il comporte un profil de roulement autorisé par la réglementation.

Les travaux de recherche importants menés par l'industrie automobile dans les années quatre-vingt et plus

récemment par des instituts de recherche renommés, ont permis d'établir les conditions réelles de fonctionnement des différentes catégories de véhicules dans les situations de trafic les plus variées. Les conditions de fonctionnement les plus usuelles dans le trafic peuvent donc être déterminées clairement ; les vitesses les plus répandues en trafic urbain vont de 30 à 60 km/h. À l'exception du ralenti, les régimes moteur, dans cette classe de vitesse, varient entre 40 et 80 % du régime maximum, et ceci pour toutes les classes de véhicules industriels. Les accélérations maximum sont en dessous de 1 m/s^2 même pour les camions de puissance supérieure à 225 kW, l'accélération la plus fréquente étant inférieure à $0,5 \text{ m/s}^2$. On a déterminé, qu'au-delà de 60 km/h, le bruit total dépend largement du bruit de contact pneumatique-chaussée (sans charge) et qu'en dessous de cette vitesse le bruit total dépend davantage du bruit mécanique.

En conséquence, on peut supposer que dans le trafic réel, les bruits de contact pneu-chaussée liés à la charge des moteurs sont d'importance secondaire. Ces résultats sont confirmés par des études comparables notamment au Japon. Pour les futures conditions de mesure réglementaires, il semble indispensable de mieux tenir compte des conditions réelles d'utilisation des véhicules comme des pneumatiques et des chaussées.

Le rôle des pneumatiques

Du fait des vitesses plus élevées, des meilleures chaussées et des améliorations des performances acoustiques des véhicules, on a été amené à mettre d'avantage l'accent sur le pneumatique et la texture routière en tant que sources de bruit de trafic les plus importantes pour des vitesses moyennes au-dessus de 50 km/h pour les automobiles et de 80 km/h pour les véhicules industriels.

Ces dernières années l'évolution vers des pneus plus larges a rendu la tâche encore plus difficile. Même si cette évolution peut être remise en cause en raison d'exigences de

réduction de la consommation de carburant. On doit aussi insister sur le fait que si le pneu est jugé en fonction du bruit de contact pneu-chaussée, d'autres facteurs importants interviennent également que l'on ne peut pas sacrifier, par exemple la tenue de route sur chaussée humide.

Puisqu'on a démontré que la texture routière influence également l'émission sonore de manière très importante, souvent autant et parfois d'avantage que la géométrie du pneu, les autorités routières ont également un rôle à jouer pour maintenir les textures de revêtement à des valeurs convenables. Mais outre les caractéristiques de bruit, elles doivent également évidemment considérer les performances en comportement routier. Les textures trop ou insuffisamment rugueuses ne sont pas souhaitables du point de vue du bruit. La tenue de route nécessite des textures rugueuses et une faible résistance au roulement demande des textures lisses. En résumé, exactement comme dans le cas du pneu, tout le problème consiste à trouver le juste compromis. La figure 5 montre un exemple d'influence de texture sur le bruit de passage d'un véhicule pour un pneumatique donné.

Les caractéristiques de base du pneumatique qui influencent le bruit extérieur sont indiquées sur la figure 6. Il s'agit de la largeur du pneumatique, du rapport d'aspect, de la profondeur des dessins, de la composition et de la géométrie des sculptures. On peut voir qu'en général, le bruit (pass-by) augmente lorsqu'on réduit le rapport d'aspect et diminue lorsqu'on réduit la profondeur des sculptures (sous réserve que ces réductions de profondeur soient homogènes sur la largeur et la circonférence), qu'il diminue avec une réduction du module de la gomme, et qu'il y a une valeur sonore optimum pour une largeur spécifique de sculpture.

D'autres paramètres de conception du pneumatique influencent le bruit extérieur, ils concernent le profil de l'enveloppe et de la bande de roulement, l'espacement entre nappes, les caractéristiques dynamiques de la bande de roulement, etc.

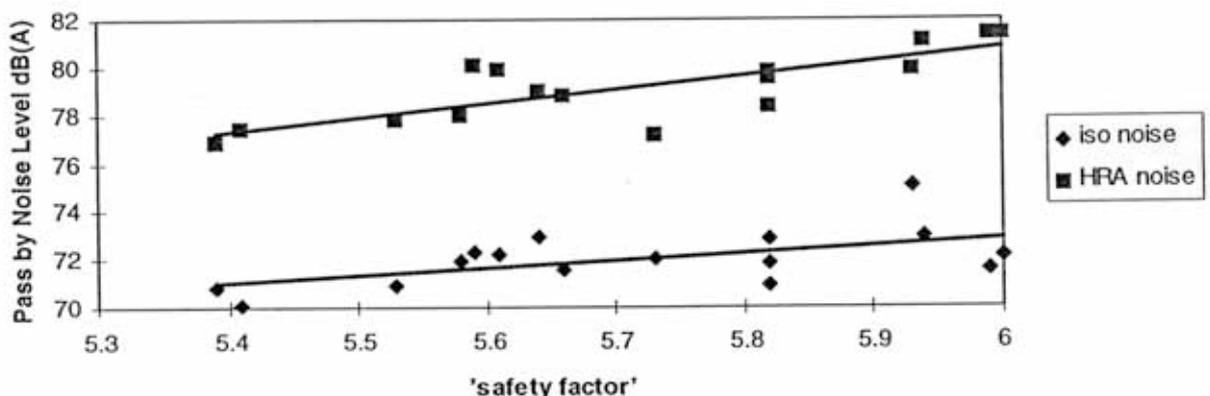


Figure 5 : Effets de la texture routière sur le bruit Coast-by et la tenue de route sur chaussée humide.

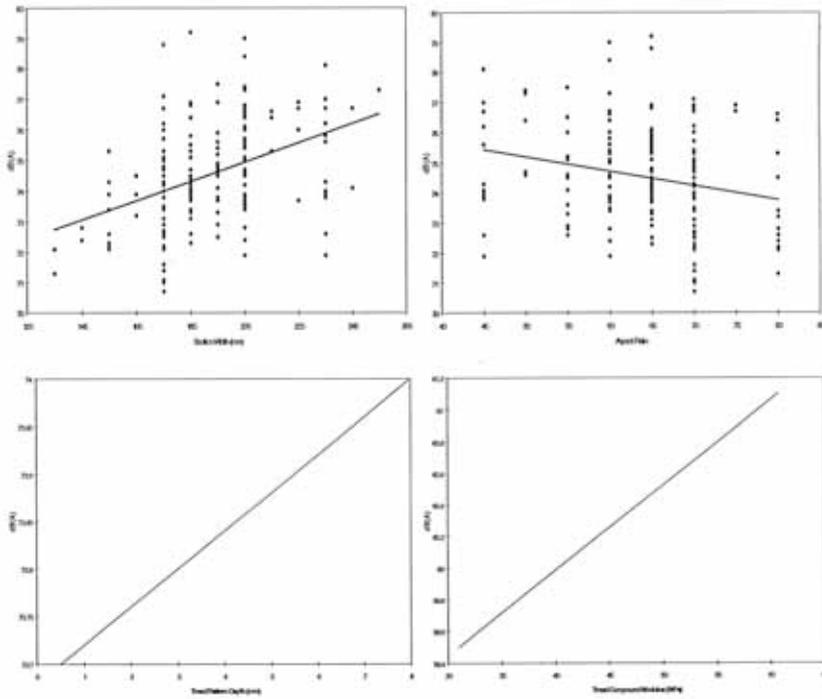


Fig. 6 : Variables du pneumatique qui influencent le bruit pass-by

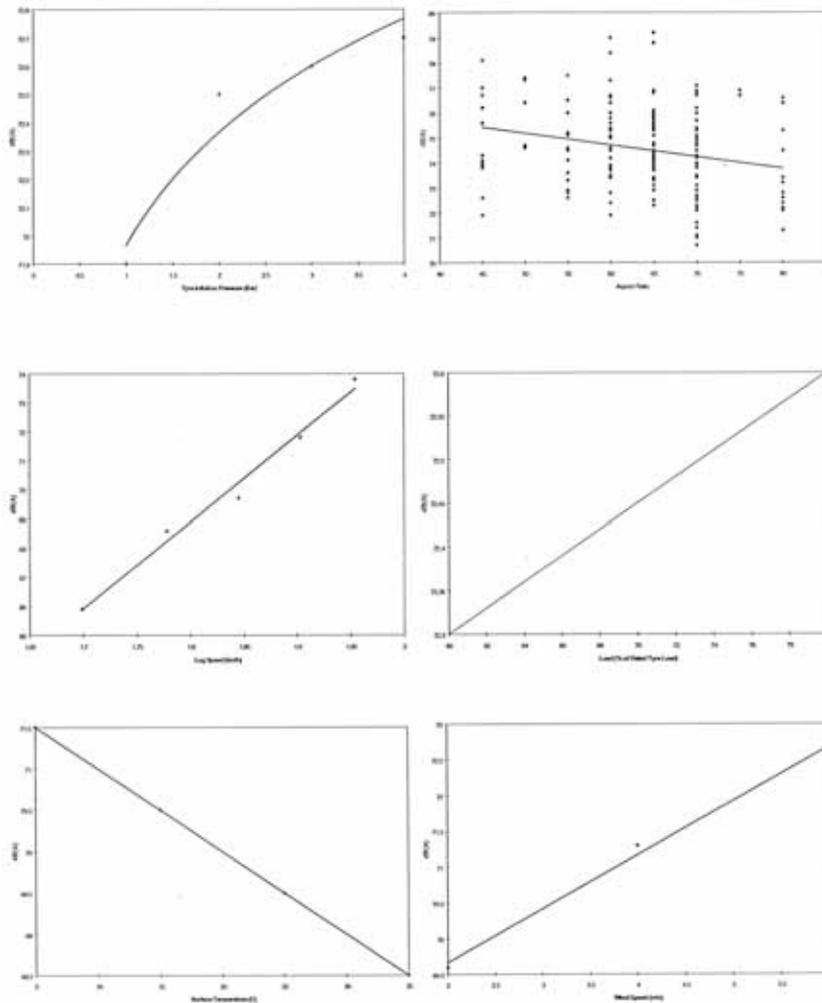


Fig. 7 : Facteurs externes qui influencent le bruit pass-by



Des facteurs extérieurs influencent également le bruit pass-by comme indiqué sur la figure 7. Le bruit augmente avec la pression de gonflage et varie avec la largeur de la jante. L'influence de la pression est faible tant que le pneu n'est pas sur - ou sous gonflé ; typiquement, le bruit augmente de 0,5 dB(A) lors d'une variation de 1 à 4 bars. La vitesse augmente le bruit de contact pneumatique-chaussée selon une relation linéaire entre le logarithme de la vitesse et le bruit. La charge sur le pneu à pression constante influence fortement la génération du bruit. D'autres paramètres d'environnement interviennent comme la température et le vent.

Les éléments de géométrie de la bande de roulement peuvent être considérés comme influençant individuellement la génération de bruit. Chaque bloc a ses caractéristiques propres en vibrations radiale et tangentielle. L'arrangement de ces blocs entre eux induit la formation de sillons qui provoquent les effets de résonance, air-pumping, déplacement d'air. En plus, les vibrations des blocs excitent l'enveloppe, ce qui cause des rayonnements acoustiques, et la forme de l'enveloppe en amont et en aval de l'empreinte provoque l'effet de corne (horn effect).

Les entailles du pneu sont associées à l'air-pumping, leur influence étant déterminée selon qu'elles soient ou non fermées en extrémité et selon leur angle par rapport au mouvement. Leur densité influence la raideur du bloc, et donc la génération de bruit lors de l'impact de ce bloc avec la chaussée. La forte densité d'entailles des pneus été/hiver qui est utilisée augmente le bruit extérieur dans les hautes fréquences même si le bruit total peut être réduit avec la raideur du bloc.

La géométrie des sculptures peut être considérée en trois étapes :

- 1 - la configuration est alignée, les blocs ont des côtés rectilignes. Ce qui crée un bruit dominé par un son tonal.
- 2 - la configuration des blocs à côtés rectilignes décalés d'une moitié de motif. Cette configuration crée un bruit dominé par deux fréquences tonales
- 3 - la troisième configuration comporte des blocs décalés de manière variable. Ceci crée un bruit avec une gamme de fréquences ; en outre, incliner les pavés tend à réduire l'importance de l'impact du pavé sur la chaussée.

Pour éviter des bruits à fréquence unique particulièrement gênants, on tend à faire varier la longueur de pavés le long de la circonférence du pneu. Les techniques de randomisation sont utilisées (application récente de la théorie des chaos). Pour concevoir la géométrie définitive de la bande de roulement, on combine l'influence de la profondeur des dessins, de la largeur et de la profondeur des sillons, de la position de l'angle et de la densité des entailles, enfin des propriétés dynamiques de la gomme.

Bruit dans l'environnement

Depuis les années soixante-dix, on a réduit les limites réglementaires des émissions sonores des véhicules. Pourtant, il apparaît que les bruits maximum en ville sont similaires aujourd'hui à ceux qu'ils étaient à l'époque. Parmi les nombreuses raisons, on peut citer l'augmentation du trafic, l'augmentation des macrotextures routières, les pneumatiques plus larges et à taille basse.

90 % du bruit de trafic fluide est associé au contact pneu-chaussée et on peut penser que des limites seront introduites au niveau international sur le bruit des pneumatiques nouveaux à partir de test Coast-by. Cependant il reste à prouver qu'il en résultera des niveaux sonores plus faibles sur les surfaces routières actuelles.

Le test actuel pour contrôler le bruit de véhicule n'est pas correctement relié au test envisagé pour les mesures de bruit de pneumatique. Celui-ci utiliserait une surface routière homologuée selon ISO 10844, qui est une surface à macrotexture faible, la contribution principale étant dans la bande 500/2000 Hz avec l'accélération du véhicule, le contenu spectral change peu mais son amplitude augmente. Selon le test envisagé, une seule surface serait utilisée même si une surface plus rugueuse est en discussion.

Par rapport au test actuel sur le bruit de véhicule, il s'agirait d'un test coast-by à grande vitesse où les caractéristiques de bruit coast-by du pneumatique seraient évaluées sur une gamme de vitesse, avec des conditions de charge plus importantes. Les données sur la plage de vitesse seront interpolées pour obtenir une seule valeur de bruit à une vitesse unique. Pour l'instant, l'Union européenne a proposé des limites pour les pneumatiques d'automobiles

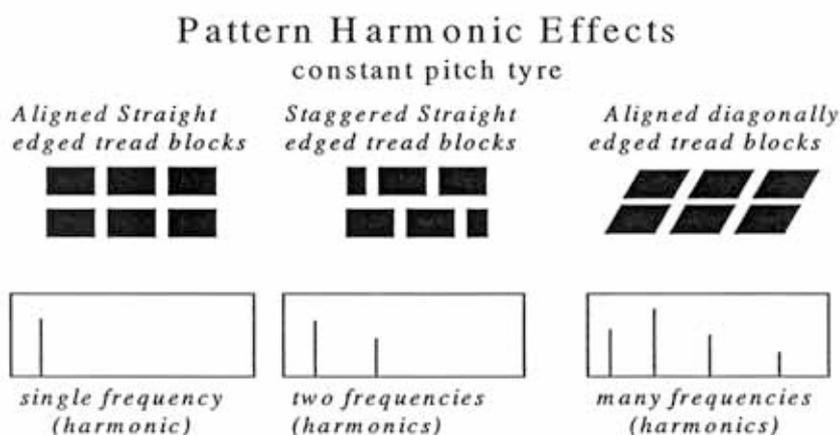


Figure 8 : Effets de la géométrie de la bande de roulement

et de véhicules industriels qui pourraient avoir une influence significative si elles étaient appliquées à la gamme actuelle de pneumatiques.

En Grande Bretagne, on souhaite approfondir la relation entre les niveaux faibles de bruit de pneu et les performances d'adhérence sur les chaussées humides ; d'autres pays ont admis la nécessité d'examiner cette question.

Par ailleurs, l'industrie des pneumatiques met en évidence qu'aucun contrôle n'est encore mis en œuvre concernant les textures de chaussées qu'on peut considérer comme étant l'un acteur majeur dans les phénomènes de genèse du bruit de contact pneu-chaussée.

Les mesures de bruit par la méthode coast-by ont conduit à une gamme de chaussées satisfaisant la norme ISO 10844 et montrent des variations de valeurs significatives. Ces variations sont essentiellement dues à des différences de revêtements. Il a été proposé de faire des tests similaires en utilisant des laboratoires munis de chambres anéchoïques perfectionnées avec bancs à rouleaux, et répliques de surfaces routières. Bien qu'attractive, cette solution a l'inconvénient de ne pas pouvoir simuler correctement le contact du fait de la courbure des rouleaux.

Peut-être que dans le futur une méthode plus appropriée sera d'adapter une approche de modélisation. Ceci permettrait aux concepteurs de routes et de pneumatiques d'envisager de nouveaux produits dans des conditions de coûts et de délais améliorés. Cependant, une telle démarche, bien que largement engagée au niveau mondial, n'est pas encore mure pour aboutir.

Influence du revêtement sur la génération du bruit

Précisons d'abord que le bruit de trafic peut être localement augmenté par des irrégularités de revêtement : route endommagée, joints entre dalles, bandes d'alerte, etc. Ceci peut influencer également l'émission de la carrosserie du véhicule. Dans la suite, nous faisons l'hypothèse que les surfaces routières sont en bon état.

Rappelons que la surface routière a une influence dans trois domaines :

- la génération du bruit de pneu, principalement 1-B et 2-C (tableau 1),

- l'absorption du bruit émis sous le véhicule (incluant le bruit mécanique),
- la propagation du bruit rayonné par les sources près de la surface routière.

L'effet global peut être observé en mesurant les bruits maximum (pass-by) de véhicules individuels à des vitesses telles que le bruit de contact pneu-chaussée soit prépondérant.

Les mesures sont faites notamment sur trafic réel (référence 4). Un exemple de résultat est présenté tableau 4 qui montre les niveaux sur deux chaussées routières voisines sur le même site. Pour chaque surface et chaque catégorie de véhicules on fait une série d'essais.

On constate avec cette méthode des différences de 3 à 4 dB(A) entre un asphalte poreux et un béton bitumineux.

Influence de la texture sur le bruit

Si l'on considère des valeurs moyennées (figure 9 p.28), on peut montrer que pour un type donné de surface, la génération du bruit décroît avec la dimension des granulats. La tendance actuelle est d'utiliser des petites dimensions. Ceci est valide si on dessine des pneumatiques comportant essentiellement des sculptures circumférentielles.

Influence de la porosité sur le bruit

Aux dimensions données, les surfaces poreuses ont de meilleures performances acoustiques ; ceci est notamment dû à la réduction des effets d'air-pumping et des déplacements d'air.

Absorption

Les performances acoustiques favorables des chaussées poreuses ont souvent été attribuées à leurs propriétés en absorption acoustique. Ceci n'est que partiellement vrai. L'absorption acoustique joue certainement un rôle en atténuant le bruit émis par les diverses sources réfléchi sur la chaussée. Mais le rayonnement du bruit des pneumatiques se produit essentiellement au voisinage des contacts, très près de la surface. L'absorption acoustique réduit également l'effet de corne. Les modèles mathématiques d'absorption existent désormais et il est possible de sélectionner les caractéristiques de surface qui donneront le maximum d'absorption pour un domaine de fréquences donné. Les surfaces à couche unique ou multiple peuvent être simulées [7].

	Speed [km/h]	BBSG	BBD _r
Light Vehicles	100	78,2 / 77,9	74,4 / 74,0
Heavy Trucks	80	86,8 / 86,1	83,2 / 82,3

Pass-by noise levels in dB(A) measured under real traffic.
Statistical Pass By method ISO-11819-1.

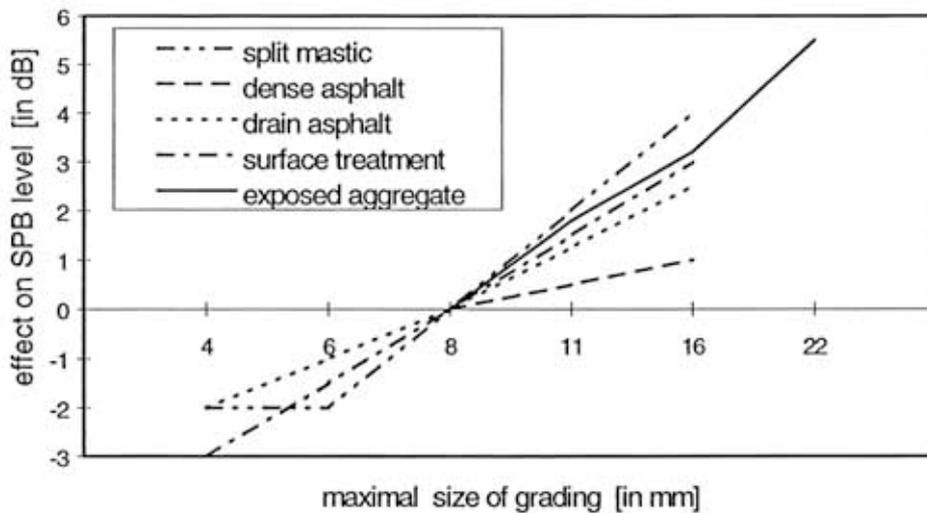


Fig. 9 : Effet de la dimension des granulats sur les caractéristiques de bruit des surfaces routières (tendances)

Impédance mécanique

La force d'impact du pneu sur la surface dépend de leurs rigidités locales respectives que l'on peut se représenter comme des ressorts en série. La rigidité de contact du revêtement peut donc jouer un rôle si elle est du même ordre de grandeur que celle du pneumatique. Il n'y a pas de données sur cette question. Même si on mentionne parfois que les surfaces en béton sont plus bruyantes que les surfaces en asphalte, ceci semble plutôt dû à des raisons de textures qu'à des raisons d'impédance.

Propagation

La propagation aux habitations environnantes se fait le plus souvent à des angles très faibles et elle peut être affectée par les propriétés en absorption de la chaussée routière.

L'avenir des chaussées routières

Parmi toutes les possibilités pour réduire le bruit de trafic, la chaussée routière présente le potentiel le plus élevé. Bien que l'importance du bruit de pneumatique soit bien reconnue, les possibilités de réduire le bruit de trafic grâce à des pneumatiques silencieux sont limitées car la conception du pneumatique doit satisfaire un ensemble de contraintes en même temps (sécurité, usure, consommation).

Pour les chaussées, qui ont également à satisfaire des contraintes spécifiques, des compromis sont aussi à rechercher, la durée de vie étant une exigence majeure mais également l'adhérence par temps humide, le confort et le bruit. Plusieurs types de surfaces peuvent être envisagés pour satisfaire ces compromis et des développements complémentaires doivent être encouragés.

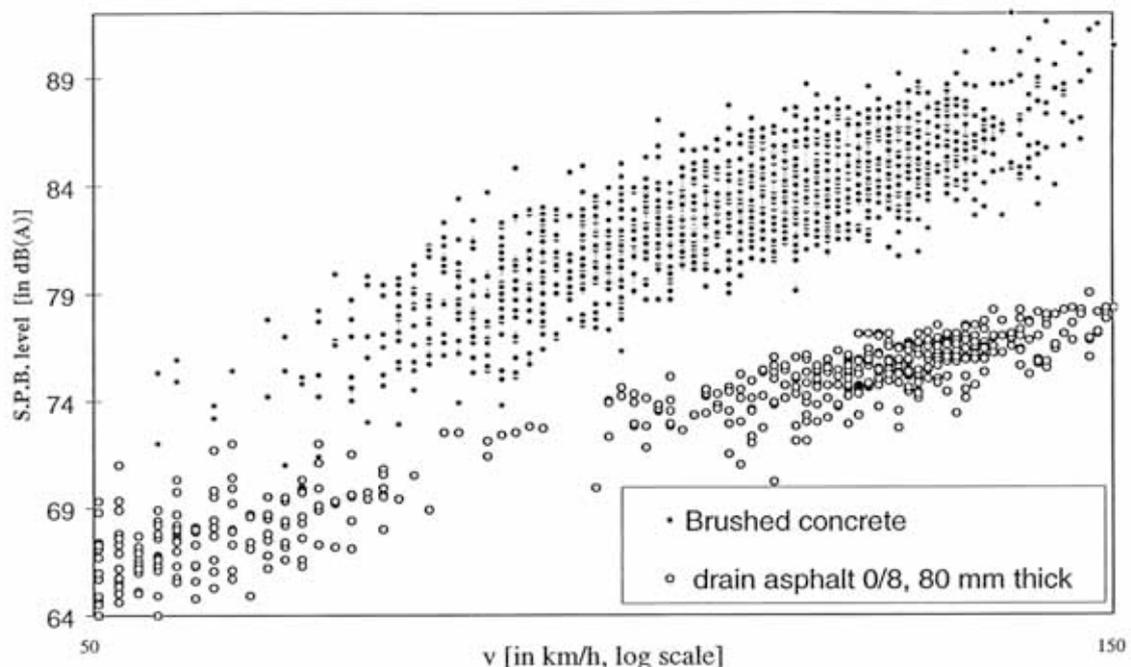


Fig. 10 : Bruit d'automobile en fonction de la vitesse sur deux types de surfaces routières

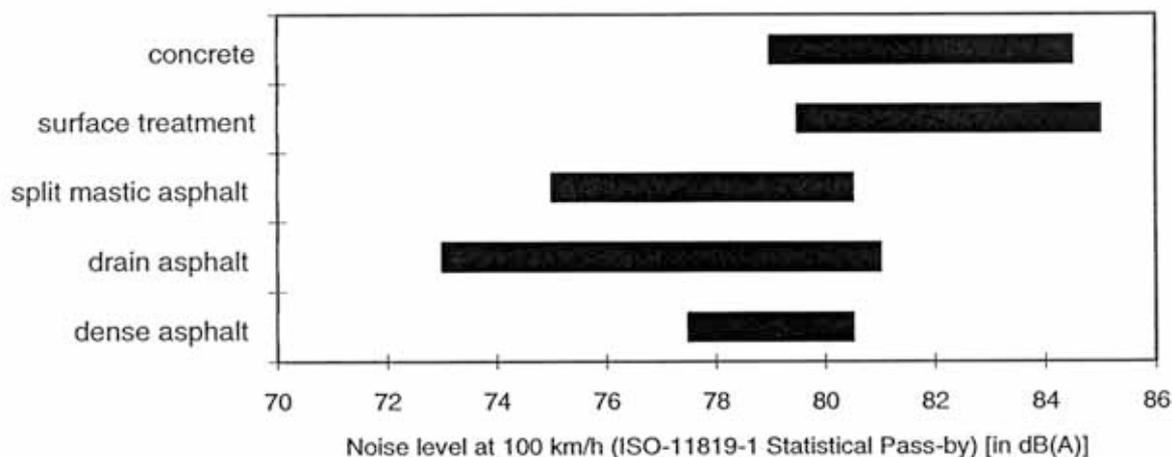


Fig. 11 : Niveau sonore moyen de véhicules pour 5 surfaces routières différentes

Sur la figure 10, on a enregistré le bruit de passage de plusieurs centaines d'automobiles sur deux types de surface, l'une étant un béton brossé transversalement, l'autre étant une surface poreuse. Non seulement le bruit sur la surface poreuse est plus faible mais en outre, les véhicules les plus bruyants y émettent moins de bruit que les véhicules les moins bruyants de la chaussée en béton.

Une synthèse générale des caractéristiques des chaussées routières est présentée sur la figure 11.

Pour des raisons de contraintes techniques générales, il est difficile de choisir des surfaces routières à mettre en œuvre sur des portions de routes réduites. Bien que les surfaces poreuses restent efficaces pendant 10 ans sur des autoroutes, les expériences ne sont pas concluantes pour des routes secondaires, surtout avec trafics agricoles. En ville, les surfaces poreuses à double couche peuvent être utilisées ; cependant un programme régulier de nettoyage est nécessaire. Les performances en résistance au gel sont également un enjeu majeur dans certaines zones. Enfin, une durée de vie de 30 ans est exigée par certains pays européens.

Aucun revêtement ne peut satisfaire toutes ces contraintes, c'est pourquoi différentes technologies doivent être développées pour améliorer leurs caractéristiques acoustiques.

Surfaces poreuses

Ces surfaces doivent être mises en œuvre avec de grandes précautions car des mauvaises manœuvres peuvent fortement atténuer les effets de réduction du bruit et dans quelques cas les aggraver. Un deuxième enjeu important est l'encrassement de la surface. À grande vitesse, les pneumatiques nettoient la surface grâce à l'air injecté. Par contre, à vitesse modérée, il faut appliquer des techniques spéciales. Dans ce cas, une technique à double couche s'avère efficace.

Béton bitumineux

Ce type de surface combine de bonnes propriétés acoustiques et de bonnes propriétés de durabilité et de résis-

tance aux forces mécaniques. En effet, il combine un squelette solide dur avec un contenu en bitume important. Les meilleurs résultats semblent obtenus avec une dimension du granulat de 6 mm maximum. On a montré que réduire jusqu'à 4 mm pouvait s'avérer néfaste du fait de la perte de macrotexture.

Traitement de surface

Les caractéristiques acoustiques de surface en béton peuvent être considérablement améliorées en appliquant une fine couche de matériau texturé collé à la surface par une résine époxy. Ce traitement est destiné à améliorer la micro texture sans en amplifier la rugosité macroscopique. Les matériaux doivent donc remplir des conditions spécifiques concernant la dimension et l'homogénéité du granulat. L'effet de ce traitement peut conduire à des réductions de 4 à 5 dB(A) pour des bruits automobiles.

Développements

Les travaux actuels pour développer les surfaces de chaussées silencieuses s'orientent vers l'optimisation des surfaces poreuses en traitant à la fois la texture de surface et l'absorption acoustique. On cherche à optimiser les dimensions des textures dans les différentes bandes de longueur d'ondes par exemple, en appliquant des granulats fins et anguleux sur une fondation mixte.

Répartitions des taches entre les différents acteurs

A partir de ce constat, les progrès dans le domaine de la réduction du bruit de trafic apparaissent possibles. Une condition préliminaire est que toutes les parties concernées assument leurs responsabilités dans leur champ respectif d'activité et ceci de manière étroitement concertée. Il faut prendre en compte à la fois le trafic urbain et le trafic routier avec une réglementation adaptée. Les parties concernées sont les constructeurs de véhicules, de pneumatiques et de chaussées.

Les réglementations sur le bruit des véhicules existent depuis 1970. Depuis cette époque, des réductions de bruit

considérables ont été obtenues grâce à un effort de recherche très important. L'enjeu apparaît aujourd'hui d'adapter les réglementations aux conditions réelles d'utilisation des véhicules pour obtenir des réductions de bruit encore plus efficaces pour l'environnement.

Des réglementations sur le bruit de pneumatiques sont, aujourd'hui pour la première fois, en passe d'être introduites. Cependant, elles concernent seulement le domaine des grandes vitesses sans traiter la question des vitesses et des conditions de circulation urbaines. Une importante activité de recherche a abouti à des réductions significatives du bruit même en l'absence de réglementation. Bien que le potentiel soit modéré une fois que la réglementation du bruit des véhicules aura été modifiée dans le sens décrit précédemment, il faudra introduire un amendement pour les pneumatiques.

En ce qui concerne les chaussées, il n'existe pas de réglementation sur leurs performances acoustiques et jusqu'à présent cela n'est pas envisagé. Ceci est d'autant plus étonnant que selon de nombreux experts, c'est ce domaine qui présente le potentiel le plus grand de réduction du bruit, en particulier pour les vitesses supérieures à 80 km/h. Des projets de recherche dans ce domaine n'ont pour l'instant pas abouti à des résultats qui pourraient se traduire en mesures concrètes.

Les réglementations nécessaires pour les chaussées doivent également être orientées en fonction des conditions réelles d'utilisation de sorte qu'un ensemble harmonieux de législations concernant les véhicules, les pneumatiques et les chaussées soit créé afin d'aboutir à des réductions significatives du bruit de trafic.

Conclusion

Nous avons essayé de rassembler les opinions des concepteurs de véhicules, de pneumatiques et de chaussées afin de mettre en évidence comment la génération du bruit de contact pneu-chaussée pourrait être réduite. Ceci est un sujet compliqué du point de vue technique et réglementaire ; il concerne deux ou trois industries qui ne reconnaissent pas toujours le bruit comme un facteur de performance majeur. D'autre part, les aspects législatifs sont d'autant plus complexes que les natures de textures routières varient selon les pays et que le nombre d'organismes législatifs ou normatifs est important (l'Union européenne, la CEE, ISO, etc). Cependant, à l'avenir il est reconnu que le bruit de trafic doit être maîtrisé et que le contact pneu-chaussée est devenu prioritaire. Peut-il être obtenu par une démarche réglementaire basée sur une surface unique de type ISO et dans des conditions d'essai restreintes ? Ceci reste à démontrer.

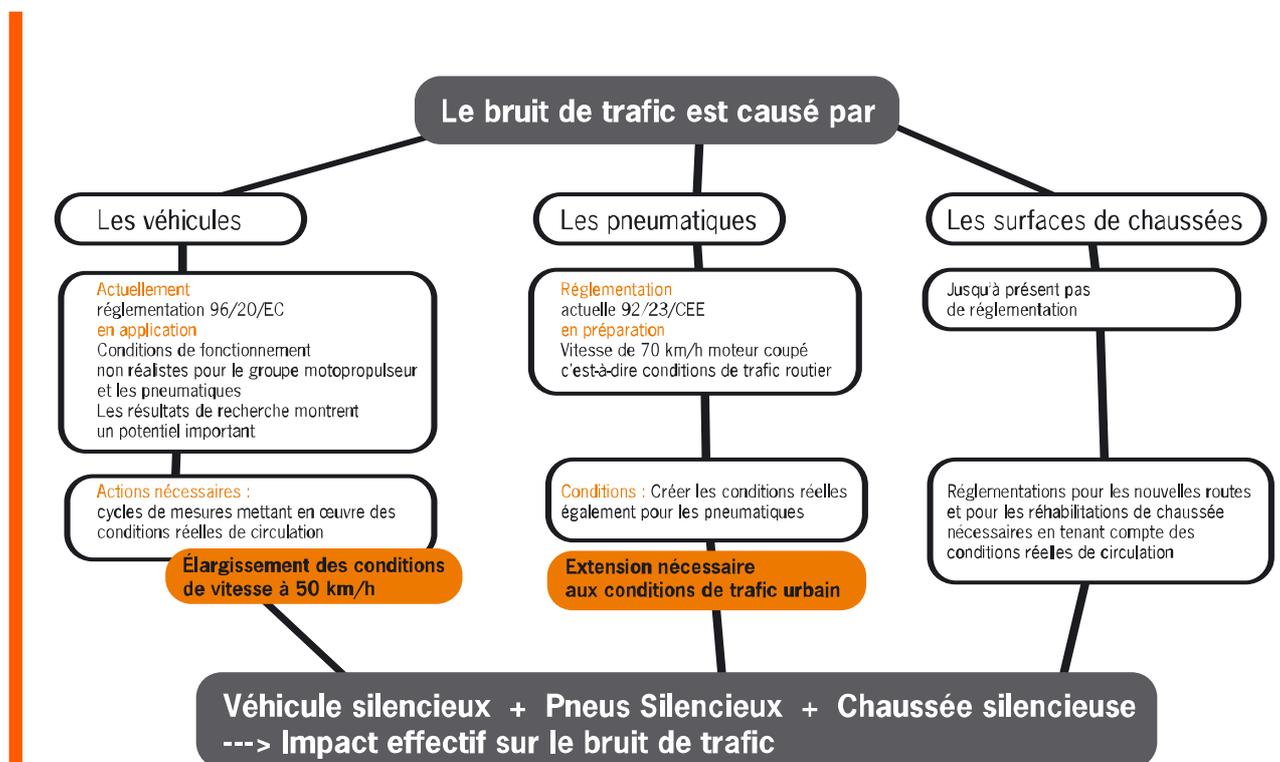


Figure 12 : Réduction du bruit dans des conditions de trafic réel

Les surfaces poreuses existantes, en particulier les multicouches, donnent un résultat potentiel supérieur à toute action sur les pneumatiques dans les conditions actuelles de connaissance. Cependant, l'industrie des pneus doit continuer à développer une meilleure compréhension des mécanismes d'émission acoustique et à en tirer le meilleur parti dans la conception de ses produits.

Pour finir, il est clair qu'une approche de modélisation prévisionnelle du bruit de contact pneu-chaussée couvrant des textures routières et des variantes de pneumatiques peut être une bonne approche mais que jusqu'à présent ceci reste à démontrer.

[2] Sandberg U., Descornet G., Road influence on tire/road noise - Part I et Descornet G., Sandberg U., Road surface influence on tire/road noise - Part II. proceedings of Inter-noise 80. Miami, 1980, Noise control foundation, New York, USA, pp 259-272

[3] ISO 11819-1 : Acoustics - Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1 : the statistical pass-by method. international standardisation organisation, Genève, 1997

[4] ISO/CD 11819-2 : Acoustics - Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2 : The close-proximity method. draft from ISO/TC 43/SC1/WG33, Secr. of SC1, Copenhagen, 1997

[5] ISO 10844 : Acoustics - Test surface for road vehicle noise measurement, international standardisation organisation, Genève, 1997

[6] ISO/CD 13325 : Tyres - Coast-by test method for measuring tyre/road sound emission. draft from ISO/TC 31/WG 3, Secr. of TC 31, New York, 1997

[7] PIARC Review of porous road surfaces, 1993



Références bibliographiques

[1] PIARC, Optimisation of surface characteristics. Report to the XVIIIth World Road Congress de Bruxelles, Belgique from the technical committee on surface characteristics, World Road Association (PIARC) (formerly the Permanent international association of road congresses), Paris, 1987.

Le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement organise, avec le concours du Conseil Régional Ile-de-France, les DEUXIEMES ASSISES DE LA QUALITE DE L'ENVIRONNEMENT SONORE à PARIS les 15-16-17 DECEMBRE 1998

(pré-programme)

Mardi 15 décembre

- Les nouveaux produits et technologies de la lutte contre le bruit : adapter l'offre à la demande dans les domaines de l'instrumentation de mesure, du bâtiment et des transports.
- L'Europe et le bruit, nouvelle directive, programmes de recherche, exemples concrets de politiques de réduction des nuisances sonores.

Mercredi 16 décembre

Travail en deux ateliers parallèles :

Atelier n° 1 : la recherche : bilan de l'appel d'offres GEUS et des recherches du PREDIT

- Prévention des traumatismes sonores des musiques amplifiées, Marc Touché, CNRS UMR 306
- Identification et caractérisation expérimentales des sources sonores en milieu urbain, Jean Pierre Peneteau, Directeur du Centre de recherche Méthodologique d'Architecture
- Les écrans acoustiques : perception et représentation des riverains, Martine Leroux, ML consultants/Cresson
- Les nuisances sonores dues à l'exploitation des bars et des discothèques, Gérard Boussin (Médecin directeur du SCHS de la la Ville d'Angers)
- Comportement des matériaux absorbants dans les champs acoustiques moteurs, Yves Auregan, LAUM/UMR 6613
- Intensité subjective des sources sonores multiples, Stephen Mac Adams, CNRS/URA 316
- Rôle des sources ou des réflexions multiples dans la perception de l'environnement, Georges Canevet, Laboratoire de mécanique et d'acoustique
- Étude psychoacoustique des sons réels et des sons de synthèse, Antoine Chaigne, École nationale supérieure des télécommunications
- Paysage sonore PERSEPHONE, Eli Tête, ACIRENE
- Étude de la qualité sonore du bruit de l'environnement quotidien par une méthode de la catégorisation, Michèle Castellengo, LAM Université Paris VI
- Une nouvelle perspective de réduction de la gêne autour des aéroports : le mât à absorption active, résultats des premiers essais à Satolas, par M. Martinat, Comptoir de la technologie
- Table ronde : les besoins de la recherche dans le domaine de la "psychoacoustique"

Atelier n° 2 : la gestion du bruit en ville : l'atelier discutera trois des propositions du rapport du Conseil Économique et Social "Le bruit dans la ville", présentées par son auteur, Jean-Pierre Gualazzi.

- Organiser une synergie entre les politiques concourant à l'amélioration de la qualité de la vie,
- Mobiliser les communes, échelon essentiel dans la lutte contre le bruit,
- Mieux sensibiliser, mieux informer, mieux former
- Table ronde : attentes des citoyens et témoignages d'usagers

Jeudi 17 décembre

- Transports et environnement : politique du 1% paysage, rapport Lamure, enquête Roissy/Orly, classement des voies..

Si vous souhaitez recevoir le programme détaillé de cette manifestation renvoyez ce bon par fax au 01 47 64 64 63

Nom : Prénom :

Société ou organisme :

Adresse :

Tél. : Fax : e.mail :

Souhaite recevoir le programme détaillé des 2èmes Assises de la qualité de l'environnement sonore.

Pour tout renseignement pratique contactez le Centre d'information et de documentation sur le bruit au 01 47 64 64 62