

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Influence du revêtement routier sur le bruit de roulement: le modèle HyRoNE

Philippe Klein

INRETS, 25, av. François Mitterrand, F-69675 BRON Cedex, philippe.klein@inrets.fr

La texture et la porosité sont des caractéristiques du revêtement routier déterminantes pour l'émission acoustique provoquée par le contact pneumatique/chaussée. Le modèle HyRoNE (Hybrid Rolling Noise Estimation), développé dans le cadre des projets Prédit "Texture&Bruit" et Deufrako P2RN, a pour objectif la prévision du bruit de roulement à partir de profils de texture et des propriétés d'absorption acoustique des revêtements. Le modèle est basé sur des lois statistiques utilisant, d'une part, la texture "enveloppée" (partie supérieure du profil susceptible de rentrer en contact avec la gomme du pneumatique) pour l'évaluation de la composante due au phénomène de mise en vibration et rayonnement du pneumatique, et d'autre part, la texture brute pour la détermination de la composante due au phénomène de pompage d'air. L'influence d'éventuelles propriétés d'absorption du revêtement est prise en compte en introduisant l'effet de sol entre la source et le point récepteur. Le modèle est construit sur un jeu de données de niveaux de bruit et de texture, d'absorption acoustique, mesurées sur un ensemble de revêtements. L'introduction, dans ce jeu de données, d'un revêtement lisse permet de quantifier plus finement l'influence du revêtement sur le bruit dû à la vibration et au rayonnement du pneumatique.

1 Introduction

Le bruit généré par l'interaction pneumatique/chaussée est une contribution majeure à l'émission acoustique des véhicules routiers. Cette contribution augmente avec la vitesse. Pour les véhicules légers circulant à vitesse constante sur des revêtements classiques, le bruit de roulement prédomine par rapport au bruit moteur à partir de 25 km/h [1, 2].

Plusieurs mécanismes de génération du bruit de contact pneumatique/chaussée sont identifiés. Les deux phénomènes principaux sont, d'une part, la mise en vibration de l'enveloppe du pneumatique par la rugosité du revêtement et le rayonnement acoustique associé, d'autre part, le phénomène de pompage d'air correspondant à des variations de débit d'air au niveau de la zone de contact et les possibles résonances associées dans les rainures du pneumatique. D'autres mécanismes sont liés aux vibrations des pavés de gomme du pneumatique produits par phénomène d'adhérence/glisement et les forces d'adhésion.

La texture (relief) du revêtement routier ainsi que son éventuelle porosité sont des caractéristiques intrinsèques déterminantes pour l'émission sonore due au contact pneumatique/chaussée. Différentes approches sont utilisées pour évaluer cette émission sonore à partir de ces caractéristiques. Les approches empiriques s'appuient sur des expérimentations pour établir des lois statistiques entre niveaux de bruit et caractéristiques [3, 4]. A l'opposé, les approches physiques consistent à modéliser les mécanismes de génération du bruit de roulement. Les approches "hybrides", quant à elles, consistent à combiner des lois statistiques et des modèles physiques simplifiés dans le but d'améliorer la qualité de prédiction et le champ d'application des modèles

empiriques tout en conservant leur caractère d'outil opérationnel que n'ont pas pour l'instant les modèles physiques.

Le modèle HyRoNE (Hybrid Rolling Noise Estimation) fait partie de cette catégorie de modèles hybrides. Il a été développé pour la prévision du niveau de bruit au passage (norme NF S 31119-2) dans le cadre des projets Prédit "Texture&Bruit" et Deufrako P2RN (Prediction and Propagation of Rolling Noise) (Partenaires français : INRETS, LCPC, ENPC, COLAS, EIFFAGE - Partenaires allemands : BAST, Müller-BBM). La partie modélisation a été réalisée par l'Inrets. L'ensemble des essais destinés à fournir les données expérimentales a été assuré par le LCPC.

Dans cet article, la première partie est consacrée à la présentation du modèle. La deuxième partie concerne son adaptation à la prédiction de niveaux de bruit de proximité. Dans la troisième partie sont présentés des résultats obtenus en intégrant dans le jeu de données un revêtement lisse.

2 Le modèle HyRoNE

Il est reconnu que la texture du revêtement routier joue un rôle fondamental dans la génération du bruit de roulement tant que les motifs du pneumatique ne sont pas trop "agressifs". Des modèles empiriques ont été proposés pour estimer le bruit de roulement global au passage en dB(A) à partir du spectre de texture du revêtement, lui même obtenu à partir de relevés linéaires (profils de texture). Ces modèles sont mis en défaut sur les revêtements poreux. Plusieurs raisons sont avancées pour expliquer cela :

- la texture d'un revêtement poreux présente des

creux prononcés. Au delà d'une certaine profondeur, le contact pneumatique/chaussée, partiel, n'est plus influencé par une augmentation de la profondeur des pores alors que le spectre de rugosité l'est,

- la porosité du revêtement permet des fuites dans le milieu poreux susceptibles de limiter la compression de l'air dans la zone de contact ce qui peut affecter le phénomène de pompage d'air,
- l'absorption acoustique des enrobés drainants affecte le rayonnement acoustique et la propagation.

Les modèles physiques introduits dans HyRoNE visent à étendre le champ d'application des modèles empiriques aux revêtements poreux et améliorer leur précision sur les revêtements imperméables. Ces modèles physiques concernent l'interaction pneumatique/chaussée et l'absorption acoustique.

2.1 Principe du modèle

Le modèle HyRoNE est basé sur l'estimation des niveaux de bruit en bande de tiers d'octave pour reconstruire un niveau de bruit global en dB(A). Le niveau de bruit à la fréquence f_i est estimé à partir du niveau de texture à la longueur d'onde $\lambda_i = V/f_i$, où V est la vitesse de roulement.

Dans le domaine des basses et moyennes fréquences, dans lequel prédomine le bruit dû à la vibration du pneumatique, le niveau de texture enveloppée est utilisé pour prendre en compte le contact partiel gomme/rugosité. Cette texture enveloppée est obtenue à l'aide d'un modèle de contact statique entre un massif élastique semi-infini incompressible de module d'Young E et le profil de texture, considéré comme parfaitement rigide et périodique pour éviter les effets de bord rencontrés sur ce type de problème en bord d'échantillons [6] (voir Figure 1). Dans ce domaine de fréquence, le niveau de bruit est d'autant plus élevé que le niveau de texture enveloppée est important.

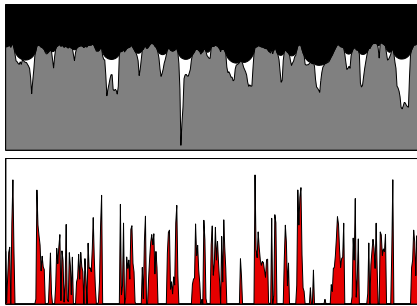


FIGURE 1 – Texture enveloppée - Haut : Profil de texture - Bas : Répartition de pression.

Dans le domaine des hautes fréquences, dans lequel prédomine le phénomène de pompage d'air, on utilise le spectre de texture brute pour prendre en compte la possible limitation des surpressions dans la zone de contact : latéralement entre la gomme du pneumatique et le revêtement, ou dans le revêtement lui-même s'il est poreux. Dans ce domaine de fréquences, au contraire, on observe une diminution du niveau de bruit lorsque le niveau de texture brute augmente.

Le niveau de bruit en tiers d'octave à la fréquence f_i induit par la texture du revêtement s'écrit sous la forme des lois affines suivantes :

$$\begin{aligned} L(f_i) &= a(f_i) + b(f_i) \cdot L_{eT}(E, V/f_i) & f_i \leq f_c, \\ L(f_i) &= a(f_i) + b(f_i) \cdot L_T(V/f_i) & f_i > f_c, \end{aligned} \quad (1)$$

f_c étant la fréquence de transition entre domaines de prédominance du bruit rayonné par le pneumatique et de pompage d'air.

Dans le cas d'un revêtement poreux, l'effet de l'absorption est pris compte en introduisant l'effet de sol $\Delta L_p(f_i)$ entre la source et le point récepteur ($\Delta L_p(f_i) = 0$ pour un revêtement parfaitement réfléchissant). L'influence de l'absorption sur l'effet dièdre, dû à la géométrie formée par le pneumatique sur la chaussée, n'est lui pas pris en compte. La source est considérée comme omnidirectionnelle, au niveau du sol ; le sol est considéré comme homogène à réaction étendue. Le milieu poreux est modélisé par le modèle phénoménologique de Hamet [7, 8].

Les niveaux de bruit tiers d'octave ainsi que la correction éventuelle pour effet d'absorption sont utilisés pour reconstruire le niveau global en dB(A) :

$$L_g = 10 \log \left(\sum_i 10^{(L(f_i) + \Delta L_p(f_i))/10} \right) \quad (2)$$

2.2 Construction du modèle

La construction du modèle est effectuée sur la base de données de bruit, de texture et d'absorption acoustique collectées sur un ensemble de revêtements. Le modèle n'intégrant pas de paramètres liés au pneumatique à l'exception du module d'Young E de la gomme, le calage est effectué pour chaque configuration pneumatique/véhicule/vitesse, donc à partir de niveaux de bruit mesurés dans cette configuration.

Les données de bruit concernent le bruit au passage selon la procédure "Véhicule Maîtrisé", à 7.50 m de l'axe de la voie et 1.20 m du sol (norme NF S 31119-2 [5]). La gamme de fréquences prise en compte s'étend de 100 Hz à 5 kHz. Les données de texture consistent en 12 profils de 1.20 m relevés dans les passages de roues droite et gauche à un mètre d'intervalle ce qui permet de caractériser le revêtement sur une longueur de 12 m. Les données d'absorption consistent en des coefficients d'absorption en incidence normale.

Le calage a deux objectifs : fixer la valeur optimale du paramètre d'enveloppement E et déterminer les coefficients des lois statistiques $a(f_i)$ et $b(f_i)$ (cf. equation 1) correspondants dans chaque tiers d'octave.

Le calage est effectué en trois étapes :

- identification des paramètres acoustiques des revêtements poreux (porosité, résistance au passage de l'air, tortuosité) à partir des coefficients d'absorption en incidence normale ; évaluation de l'atténuation excédentaire selon la configuration de mesure du bruit ; correction de l'effet d'absorption des niveaux de bruit tiers d'octave mesurés,
- évaluation des coefficients des lois statistiques entre niveaux de bruit corrigés et niveaux de texture,

- détermination de la valeur optimale du paramètre d’enveloppement E , qui minimise l’erreur commise sur le niveau global en dB(A), moyennée sur l’ensemble des revêtements.

Le modèle a été construit pour une configuration pneumatique/véhicule et trois vitesses $V = 70, 90$ et 110 km/h [9, 10] sur la base de dix planches de la piste d’essai du LCPC [11]. La correspondance obtenue pour $V = 90$ km/h entre niveaux de bruit globaux mesurés et calculés pour ces 10 revêtements est donnée Figure 2. L’erreur moyenne s’élève à 0.7 dB(A), revêtements poreux compris, l’erreur maximale à 2 dB(A).

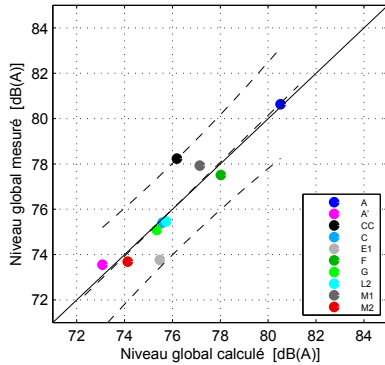


FIGURE 2 – Correspondance entre niveaux globaux en dB(A) prédits et mesurés pour $V = 90$ km/h (revêtements poreux : A’ et M2).

2.3 Éléments de validation

Des premiers éléments de validation ont été obtenus en appliquant le modèle ainsi construit sur un autre jeu de données concernant 10 revêtements, dont deux poreux, situés sur des sections routières circulées. Les mesures de bruit, de texture et d’absorption acoustique ont été réalisées selon des protocoles expérimentaux identiques à ceux utilisés pour la construction du modèle. Le véhicule utilisé pour les mesures de bruit était identique à celui ayant servi pour la construction du modèle. Les pneumatiques étaient des pneumatiques de même gamme (dimensions, usage) mais différents.

Si les mesures de bruit utilisées pour la construction ont été réalisées dans des conditions de température relativement homogène (amplitude de 8°C , moyenne de 20°C), il n’en a pas été de même pour celles utilisées pour la validation (moyenne de 12.5°C et amplitude de 21°C). Une correction pour tenir compte de l’effet de la température a été appliquée aux niveaux globaux mesurés pour permettre la comparaison modèle/mesure à la température de calage du modèle (20°C). Les coefficients utilisés pour cette correction dépendent du type de revêtement et sont tirés de [12].

La correspondance entre niveaux de bruit globaux en dB(A) calculés et mesurés pour $V = 90$ km/h est donnée Figure 3. La dispersion autour de la droite de régression est limitée. Cependant, on constate un biais entre les deux jeux de données. Ce biais pourrait être attribué à la différence de pneumatiques utilisés ainsi qu’à l’influence du bord de voie compte-tenu des différents accotements rencontrés (enherbés, présence de fossés,...) sur les revêtements du jeu de validation.

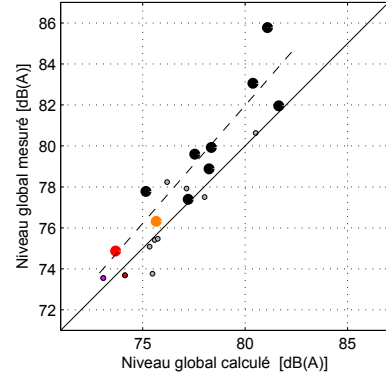


FIGURE 3 – Correspondance entre niveaux globaux au passage prédits et mesurés (petits points : calage). Points noirs : non poreux - Autres : poreux

3 Prédiction du niveau de bruit de proximité

Parallèlement aux mesures de bruit au passage, des mesures de bruit de proximité (mesures embarquées) ont été réalisées sur l’ensemble des revêtements des deux jeux de données selon la méthode développée par le LCPC [13, 14, 15]. Ces mesures de bruit consistent à mesurer le bruit de roulement à proximité de la roue arrière droite du véhicule d’essai (même pneumatique, même véhicule d’essai que pour la mesure au passage) en trois points : un microphone arrière, et deux microphones latéraux. Les niveaux de bruit au niveau des trois microphones sont obtenus pour la vitesse de référence de 90 km/h par régression linéaire sur plusieurs essais réalisés dans une gamme de vitesses comprises entre 50 et 110 km/h. Le niveau de proximité à 90 km/h est la moyenne des niveaux de bruit mesurés par les deux microphones latéraux, donné en niveaux de tiers d’octave pour les fréquences comprises entre 315 Hz et 5 kHz et en niveau global en dB(A) recomposé sur cette gamme de fréquences.

3.1 Construction

Dans cette configuration de mesure, évaluer l’effet de l’absorption par rapport à un revêtement parfaitement réfléchissant requiert la prise en compte de l’effet dièdre, moyennant la connaissance du champ vibratoire du pneumatique [16] et de la distribution des sources de pompage d’air.

Le modèle HyRoNE a été calé sur le premier jeu de données en utilisant la valeur du paramètre d’enveloppement identifiée précédemment. Seuls les revêtements considérés comme parfaitement réfléchissant ont été utilisés pour la détermination des coefficients des lois statistiques $a(f_i)$ et $b(f_i)$ (cf. equation 1).

La correspondance entre niveaux globaux de proximité prédits et mesurés est donnée Figure 4 pour l’ensemble des revêtements. Aucune correction pour effet d’absorption n’est appliquée aux deux revêtements poreux. L’erreur de prédiction maximale est de 2 dB(A) pour le revêtement E1 (point gris clair). Les erreurs de prédiction sur les deux revêtements drainants s’élèvent à 2.1 et 2.7 dB(A).

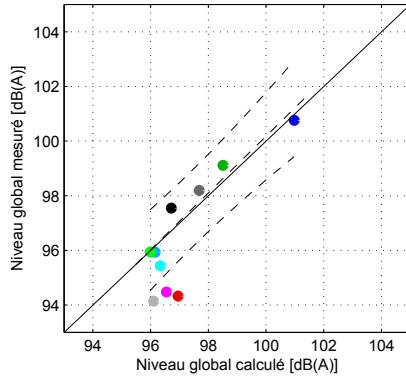


FIGURE 4 – Correspondance entre niveaux globaux de proximité en dB(A) calculés et mesurés pour $V = 90$ km/h.

3.2 Validation

Comme pour le bruit au passage, le modèle construit sur le premier jeu de données a été appliqué au deuxième jeu de données. S'agissant de niveaux de proximité, le biais potentiel dû à l'influence du bord de voie disparaît. La correspondance modèle/mesure est donnée Figure 5. On observe une dispersion relativement faible autour de la droite de régression calculée sur le jeu de validation en particulier pour les revêtements les plus bruyants. Par contre, le biais constaté entre les deux jeux de données subsiste.

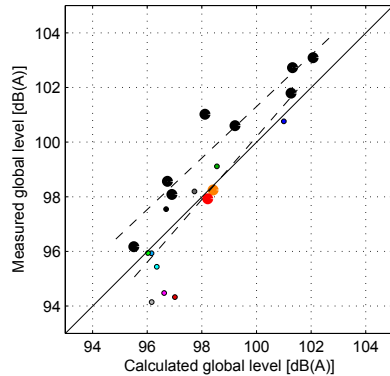


FIGURE 5 – Correspondance entre niveaux globaux de proximité prédits et mesurés (petits points : calage).
Points noirs : non poreux

4 Prise en compte d'un revêtement lisse

Les revêtements ayant servi à la construction du modèle HyRoNE sont des revêtements routiers classiques ou présentant des textures qui se rapprochent de celles de revêtements classiques. Des mesures de texture et de bruit ont également été effectuées sur une résine lisse qui fait partie des planches d'essai du LCPC. Ce type de revêtement est réputé faire émerger des phénomènes qui ne sont pas prédominants sur des revêtements classiques et qui ne sont pas pris en compte dans le modèle. Il s'agit en particulier du phénomène d'adhérence/glisserment affectant le domaine des hautes fréquences. Cependant sa prise en compte apporte des

éléments intéressants dans le domaine des basses et moyennes fréquences.

4.1 Mesures

Les propriétés optiques de cette résine lisse rendent la mesure de texture délicate. Seuls deux des douze profils de texture mesurés se sont révélés exploitables, les autres présentant un taux d'invalidités trop important. Les spectres de texture ont été évalués à partir de ces deux relevés. Il en résulte une erreur d'estimation sur les spectres tiers d'octave plus importante que pour les autres revêtements du jeu de données. La figure 6 permet d'apprécier les différences entre les revêtements du jeu de données utilisées pour la construction du modèle et la résine lisse.

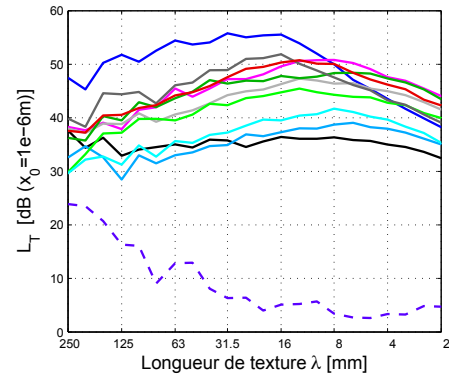


FIGURE 6 – Spectres de texture brute - Résine lisse en trait tireté violet

Les niveaux de bruit correspondants sont représentés Figure 7. Les niveaux mesurés sur la résine lisse sont les moins élevés jusqu'à 630 Hz et deviennent les plus élevés à partir de 1 kHz. Ils dépassent les niveaux des autres revêtements d'environ 5 dB entre 2 et 4 kHz, ceci étant attribué au phénomène d'adhérence/glisserment.

Le trait tireté vert représente le niveau de bruit d'origines aérodynamique et moteur à 90 km/h, déterminé par ailleurs. Ce niveau de bruit augmenté de 10 dB définit la limite d'usage de la méthode, au delà de laquelle le bruit de roulement n'est pas perturbé par des bruits parasites, ce qui est le cas ici à partir de 500 Hz.

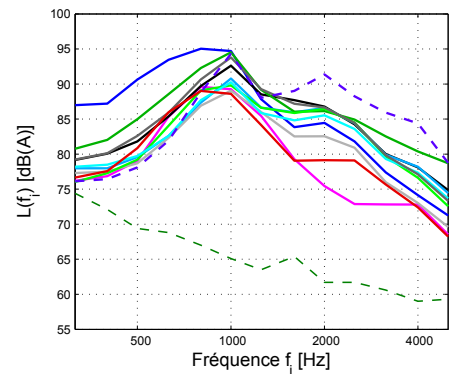


FIGURE 7 – Spectres de bruit - Résine lisse en trait tireté violet
Limite d'usage : trait tireté vert +10 dB

4.2 Relation Bruit de proximité/Texture en basses et moyennes fréquences

Un exemple d'évolution du niveau de bruit en tiers d'octave $L(f_i)$ en fonction du niveau de texture enveloppée $L_{Te}(V/f_i)$ intégrant la résine lisse est donnée Figure 8 ($f_i = 500$ Hz). La droite de régression calculée sur les revêtements non poreux sans prendre en compte la résine lisse est tracée en pointillés. Celle-ci est en fait la loi statistique $L(f_i) = a(f_i) + b(f_i) \cdot L_{Te}(V/f_i)$ identifiée précédemment (cf. § 3.1).

Pour étendre la validité du modèle au cas de la résine lisse, il est nécessaire d'introduire une autre contribution sonore, dont l'origine est discutée au § 4.4. On rajoute au niveau de bruit qui dépend linéairement du niveau de texture enveloppée une contribution constante, en supposant que ces deux sources sont incohérentes. Le niveau de bruit est exprimé sous la forme :

$$L(f_i) = 10 \log \left(10^{L_0(f_i)/10} + 10^{L_1(f_i)/10} \right), \quad (3)$$

avec $L_1(f_i) = a_1(f_i) + b_1(f_i) \cdot L_{Te}(V/f_i)$.

Sous cette hypothèse, l'identification des paramètres $L_0(f_i)$, $a_1(f_i)$ et $b_1(f_i)$ est effectuée en minimisant l'erreur modèle/mesure sur les revêtements non poreux. Les deux composantes obtenues sont représentées Figure 8 en traits tiretés noirs. L'évolution du niveau de bruit total en fonction du niveau de texture enveloppée est représentée par la courbe continue noire. L'erreur moyenne modèle/mesure ainsi obtenue s'avère être très faible.

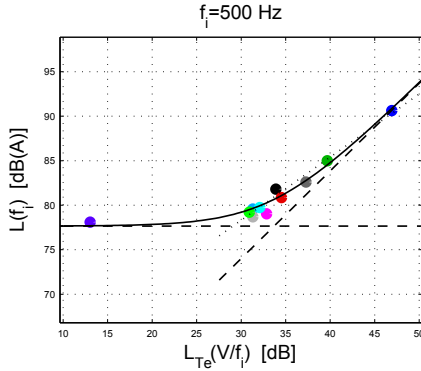


FIGURE 8 – Relation texture enveloppée/bruit à 500 Hz

Cette démarche permet d'identifier clairement les deux composantes de 315 Hz jusqu'à 800 Hz. Les coefficients directeurs $b_1(f_i)$ des lois statistiques ainsi identifiées, proches de 1, sont donnés Table 1 et comparés aux valeurs $b(f_i)$ déterminés par régression linéaire sur les revêtements imperméables sans prendre en compte la résine lisse (cf. § 3.1). Compte-tenu des différences entre les niveaux de texture de la résine lisse et des autres revêtements, les erreurs potentielles sur les niveaux de texture de celle-ci, dues au faible nombre de profils exploitables, n'ont pas d'influence sur les valeurs des paramètres identifiés.

L'identification des paramètres selon le modèle proposé devient délicate à plus hautes fréquences dans la mesure où le niveau de bruit de la résine lisse est l'un des plus élevés. A titre d'exemple, la Figure 9 représente

f_i [Hz]	$b(f_i)$	$b_1(f_i)$
315	0.54	0.92
400	0.55	0.82
500	0.71	0.97
630	0.77	1.15
800	0.59	1.07

TABLE 1 – Valeurs des coefficients directeurs identifiés entre niveaux de bruit de proximité et niveaux de texture enveloppée

l'évolution du niveau de bruit en fonction du niveau de texture pour $f_i = 1000$ Hz.

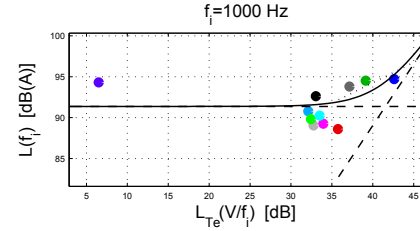


FIGURE 9 – Niveaux de bruit de proximité en fonction des niveaux de texture enveloppée pour $f_i = 1000$ Hz

4.3 Relation Bruit au passage/Texture en basses et moyennes fréquences

La même démarche est appliquée aux niveaux de bruit au passage. Comme on peut le voir sur la Figure 10, on obtient le même type de résultats. Les valeurs des coefficients identifiés sont données Table 2. On constate là encore des coefficients directeurs proches de 1.

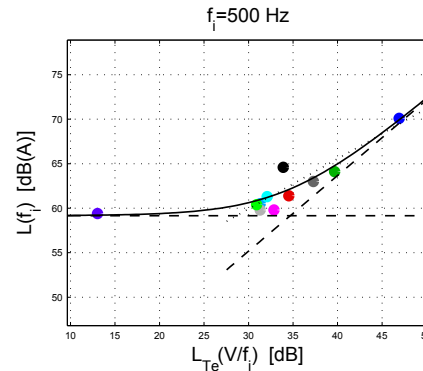


FIGURE 10 – Relation entre niveaux de texture enveloppée et bruit au passage bruit pour $f_i = 500$ Hz

4.4 Analyse

Les résultats intégrant la résine lisse font apparaître dans le domaine des basses et moyennes fréquences une contribution directement liée à la texture enveloppée du revêtement et une contribution indépendante de celle-ci. Cette contribution peut avoir plusieurs origines, liées ou non au contact pneumatique/chaussée :

- une source ne provenant pas du contact pneumatique/chaussée : bruit moteur, bruit aérodynamique,...

f_i [Hz]	$b(f_i)$	$b_1(f_i)$
315	0.55	0.88
400	0.43	0.75
500	0.57	0.85
630	0.64	0.99
800	0.59	1.09

TABLE 2 – Valeurs des coefficients directeurs identifiés entre niveaux de bruit au passage et niveaux de texture enveloppée

- une source provenant du contact pneumatique/chaussée mais liée aux motifs du pneumatique,
- une source liée aux mécanismes de pompage d’air.

Les fréquences d’excitation liées à la taille des motifs du pneumatique coïncident avec les fréquences où sont observés les maxima des niveaux de bruit tiers d’octave. La prise en compte des motifs du pneumatique pourrait permettre d’introduire sa contribution à un niveau de rugosité global (revêtement + pneumatique) pour évaluer les niveaux de la composante due à la vibration et au rayonnement de son enveloppe.

La prise en compte conjointe d’une contribution due au pompage d’air, fonction de la texture brute, et de la contribution due à la vibration du pneumatique, fonction de la texture enveloppée, pourrait ainsi permettre de dissocier les deux phénomènes sur le domaine de fréquence considéré.

5 Conclusion

Le modèle HyRoNE a pour objectif la prédiction du bruit de roulement à partir de la texture et des propriétés d’absorption acoustique du revêtement. Une première version pour la prédiction du bruit au passage a été construite ; de premiers éléments de validation encourageants ont été obtenus. Une deuxième version visant à prévoir les niveaux de bruit de proximité a été également construite pour les revêtements imperméables (non acoustiquement absorbants). L’introduction d’une résine lisse dans le jeu de données laisse entrevoir la possibilité d’affiner le modèle en considérant les contributions dues à la vibration de l’enveloppe du pneumatique et au pompage d’air sur des domaines de fréquences non plus disjoints mais se recouvrant.

Concernant les revêtements poreux, la quantification de l’influence de l’absorption sur l’effet dièdre pour évaluer les niveaux de bruit de proximité et au passage doit être affinées.

Remerciements

Ce travail a été financé par le Ministère de la Recherche, le Ministère de l’Environnement (projet Prédit "Texture&Bruit") ainsi que par L’ADEME (projet Deukrako P2RN). L’auteur remercie les partenaires impliqués dans ces projets en particulier le LCPC pour la fourniture des données expérimentales.

Références

- [1] "Prévision du bruit routier : 1- Calcul des émissions sonores dues au trafic routier", *Guide méthodologique*, SETRA (2009)
- [2] Doisy S., Lelong J., Hamet J.F., "New vehicle noise emission values to update the French 'Guide du Bruit'", *Actes Acoustics'08*, Paris, France (2008)
- [3] Descornet G., "Estimated Road Noisiness Level", *ISO/TC43/SC1/WG27*, document de travail
- [4] Domenichini L. et al., "Relationship between road surface characteristics and noise emission", *Actes 1st International Colloquium on Tyre Road Vehicle Interaction*, Rome, Italie (1999)
- [5] NF S 31 119-2 "Acoustique : Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées - Mesurages acoustiques au passage - Procédure 'Véhicules Maîtrisés'", *AFNOR*, (2002)
- [6] Klein P., Hamet J.F., Anfosso-Lédée F., "An envelopment procedure for tyre/road contact", *Actes SURF*, Toronto, Canada (2004)
- [7] Hamet J.F., "Modélisation acoustique d’un enrobé drainant. Prise en compte des phénomènes de thermoconductivité dans une nouvelle formulation phénoménologique", *Rapport INRETS n° 159* (1992)
- [8] Hamet J.F., Bérengier M., "Acoustic characteristics of porous pavements : a new phenomenological model", *Actes Internoise*, Louvain, Belgique (1993)
- [9] Beckenbauer T., Klein P., Hamet J.F., Kropp W., "Tyre/road noise prediction : A comparison between the SPERoN and HyRoNE models - Part 1", *Actes Acoustics'08*, Paris, France (2008)
- [10] Klein P., Beckenbauer T., Hamet J.F., Kropp W., "Tyre/road noise prediction : A comparison between the SPERoN and HyRoNE models - Part 1", *Actes Acoustics'08*, Paris, France (2008)
- [11] Anfosso-Lédée F., Pichaud Y., Le Fur J.F., "DEU-FRAKO project P2RN - Report on acoustic measurements performed on LCPC Test Track in Nantes", *Rapport technique*, LCPC (2007)
- [12] Anfosso-Lédée F., Pichaud Y., "Temperature effect on tyre/road noise", *Applied Acoustics*, Vol.68, p.1-16 (2007)
- [13] Anfosso-Lédée F., "The development of a new tire-road noise measurement device in France", *Actes SURF*, Toronto, Canada (2004)
- [14] Méthode d’essai des LPC n° 63, "Mesure en continu du bruit de contact pneumatique/chaussée", *Techniques et méthodes des LPC*, LCPC (2008)
- [15] XP S31-145-1 "Acoustique : Caractérisation in situ des performances acoustiques des revêtements de chaussées - Mesure du bruit de contact pneumatique/chaussée en continu. Partie 1 : mesure d’expertise", *Norme AFNOR*, (2007)
- [16] Duhamel D. et al., "Effect of absorbing grounds on acoustic radiation of tyres", *Actes Euronoise*, Tampere, Finland (2006)