

Bruit des transports routiers et basses fréquences

Guillaume Dutilleux

Groupe Acoustique
ERA «Acoustique» IFSTTAR - PCI Acoustique
et Vibrations CETE de l'Est
CETE de l'Est
LRPC de Strasbourg
11, rue Jean Mentelin
BP 9
67035 Strasbourg CEDEX 2
E-mail : guillaume.dutilleux@developpement-durable.
gouv.fr

Résumé

Les transports terrestres sont la source de bruit dominante dans l'environnement extérieur. Le recours fréquent à la pondération A et la focalisation de la réglementation sur les octaves de fréquences médianes 125 à 4 000 Hz ne doivent pas faire oublier que les transports terrestres sont aussi sources de bruits aux fréquences inférieures et que ces fréquences n'en sont pas moins perceptibles, éventuellement par une autre voie que l'audition. Cet article passe en revue les connaissances concernant l'émission des véhicules routiers dans la gamme des « basses fréquences », qui est ici définie comme l'intervalle [1Hz, 150Hz], conformément au projet de norme AFNOR prNF S 31-135. Si deux voies de transmission jusqu'au récepteur sont possibles : la voie aérienne et la voie solidienne, seule la première est traitée. Les résultats présentés s'appuient à la fois sur la littérature et sur le redépouillement de mesures de bruit de roulement au passage à vitesse stabilisée. Ils distinguent la catégorie de véhicule (véhicule léger, train routier, 2-roues motorisé). Le cas des véhicules en stationnement moteur allumé est aussi abordé.

Abstract

Terrestrial transportation is the main source of noise in the environment. Even though A-weighting is widely used and the French regulations focus on octave bands ranging from 125 to 4000 Hz median frequencies, one must keep in mind that terrestrial transportation generates noise at lower frequencies and that these frequencies can be heard, potentially via extra-auditory perception. This paper reviews the available knowledge on the emission of road vehicles in the range of « low frequencies », i.e. as defined in the AFNOR draft prNF S31-135 standard. If two ways of transmission to the receiver are possible : the vibratory one and the acoustic one, only the latter is addressed. The results presented draw both from literature and from the reanalysis of stastical pass-by measurements. They distinguish the vehicle category (light vehicle, heavy vehicle, powered 2-wheeler). The case of vehicles with idling engine is also considered.



l'impact sanitaire du bruit des transports dans les grandes villes d'Europe occidentale a été chiffré récemment par l'OMS, à au moins 1 million d'années de vie en bonne santé (DALY) perdues par an [1]. Dans l'environnement, l'essentiel des nuisances sonores provient des transports terrestres et en particulier du trafic routier.

L'usage est de considérer que les nuisances sonores environnementales se situent dans les octaves de 125 à 4 000 Hz. La réglementation acoustique en vigueur ne s'aventure guère au-delà de ces fréquences. Le recours systématique à la pondération A dans le calcul des niveaux sonores conduit effectivement à ce que la contribution des fréquences inférieures soit négligeable en général.

Toutefois, plus d'un lecteur aura certainement en mémoire la sensation désagréable provoquée par un autobus qui stationne quelques instants dans une rue en U ou par le bourdonnement d'une pièce d'habitation lors du passage d'un poids lourd à proximité.

Le fait est que les basses fréquences produites dans l'environnement par les véhicules routiers ne sont pas toujours

négligeables et que le corps humain perçoit bel et bien ces fréquences. Enfin, lors des études d'impact d'infrastructures routières, il arrive qu'un tracé passe à proximité d'un équipement « sensible ». Il peut s'agir d'un laboratoire de recherche ou d'un site de production hébergeant des équipements qui nécessitent que le bruit ambiant reste au-dessous d'un certain seuil, y compris aux grandes longueurs d'onde. Le bon fonctionnement des équipements peut aussi être perturbé par des vibrations d'origine externe. Or les ondes acoustiques à basse fréquence sont susceptibles d'exciter les structures.

Cette contribution présente quelques aspects de l'émission acoustique des véhicules routiers à basse fréquence. Pour fixer les idées, la gamme qui s'étend de 1Hz à 150 Hz constitue le domaine des « basses fréquences » qui nous intéresse ici, conformément au projet de norme AFNOR prNF S31-135 « Acoustique – Basses fréquences – Méthode de mesure ». Les ondes acoustiques issues d'une transmission solidienne sortent du cadre de cet article qui se décompose en 3 parties.

La première vise au préalable à démontrer que les basses fréquences sont une catégorie acoustique pertinente, aussi bien sur le plan de la propagation des sons que de leur perception. La deuxième partie donne quelques indications concernant l'émission sonore des véhicules en stationnement moteur tournant. La troisième aborde le cas des véhicules en circulation.

Les basses fréquences, une catégorie spectrale pertinente

Aux limites de la perception des sons

Il est d'usage de considérer que l'oreille humaine ne perçoit pas les sons en dessous d'une fréquence voisine de 20 Hz. Pour les sons de fréquence inférieure, on parle généralement d'« infrasons ». La fréquence 20 Hz fixe d'ailleurs la limite supérieure des infrasons dans la norme ISO 7196 [2]. Il faut toutefois garder à l'esprit que cette limite est conventionnelle, comme celle de la bande passante d'un filtre. En dessous de 20 Hz, la sensibilité de l'oreille humaine décroît très rapidement à mesure que la fréquence diminue. Pour autant, la pente de cette décroissance n'est pas infinie, et il est établi scientifiquement que l'oreille humaine est capable de percevoir les sons dès quelques Hertz, si tant est que leur intensité soit suffisamment élevée, comme l'illustre la figure 1 [3].

Ainsi, la limite supérieure du domaine des infrasons se situerait-elle plutôt autour de 1 Hz. Certains auteurs considèrent que la limite de 20 Hz est celle de la perception de la hauteur des sons, plutôt que de la perception des sons « tout court » [4].

Conséquence de la pente très raide de ce qu'il faut peut-être appeler un « perceptogramme » plutôt qu'un audiogramme, les courbes d'iso-sonie sont très reserrées, si bien qu'une faible variation de niveau de pression à fréquence constante aboutit à une augmentation très importante de la sonie. Nous sommes loin de la règle des 10 dB d'augmentation du niveau sonore pour un doublement de la sonie. Autre particularité, la dispersion interindividuelle du perceptogramme dans les basses fréquences est beaucoup plus large qu'aux fréquences plus usuelles [5]. Ceci impose donc la prudence quand il s'agit de déterminer l'audibilité d'un son dans cette gamme.

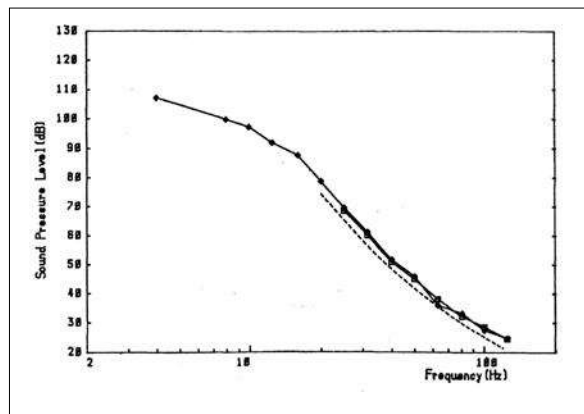


Fig. 1 : Seuil d'audition / perception pour les fréquences inférieures à 100 Hz [3]

D'autre part, il faut se garder de considérer l'oreille comme le seul mode de perception des sons. Pour des ondes aériennes de fréquence suffisamment basse, certains organes et parties du corps peuvent être mis en vibration, cette vibration étant répercutée ou non au cerveau par le système nerveux. Par exemple, la résonance de la cage thoracique pour des sons entretenus se manifeste entre 30 et 90 Hz environ chez l'adulte (Figure 2). Une étude britannique sur 61 sujets situe la médiane de cette résonance à 74 Hz chez les hommes et à 64 Hz chez les femmes [6]. Il est démontré que cette résonance est bien celle de la cage thoracique et non celle de l'air qui se trouve à l'intérieur.

Pour des compléments à propos des effets sur l'homme du bruit basse fréquence, le lecteur pourra consulter [5] et [6].

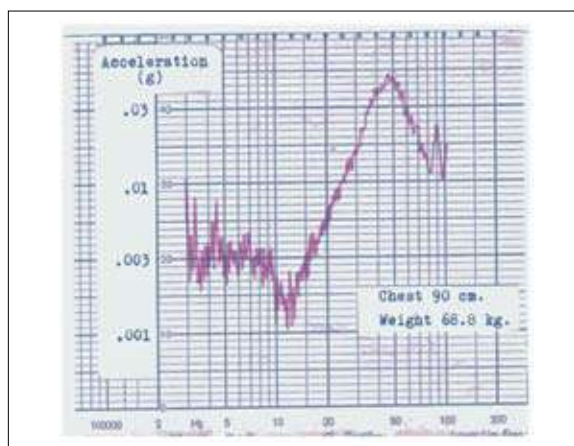


Fig. 2 : Résonance de la cage thoracique chez un sujet de sexe masculin [6]

Dans le cas du trafic routier, il est assez improbable que des fréquences inférieures à 20 Hz issues d'un véhicule soient effectivement perceptibles. Il suffit de comparer les spectres à l'audiogramme dans les basses fréquences pour s'en convaincre.

Des ondes aériennes que rien n'arrête ou presque

S'agissant de décrire les phénomènes propagatifs à basse fréquence, on peut dire que la propagation en milieu extérieur a les caractéristiques d'un filtre passe-bas. En d'autres termes, les ondes sont très peu atténuées par rapport à la situation de champ libre.

L'atténuation atmosphérique est inférieure à 1 dB/km, donc négligeable [7]. A ces fréquences, les sols de l'environnement sont en général assimilables à des surfaces rigides. Pour une source proche du sol la différence de marche est trop faible pour faire apparaître la moindre interférence. L'atténuation due au sol est donc voisine de -6 dB [8].

La transmission à l'intérieur des bâtiments a tendance à renforcer ce comportement passe-bas. Les enveloppes des bâtiments sont peu efficaces contre les basses fréquences [5,9]. Un recensement récent [10] des données disponibles sur plusieurs pays montre des isolements bruts qui évoluent en moyenne entre 10 et 20 dB quand la fréquence augmente de 10 Hz à 100 Hz comme l'illustre la figure 3.

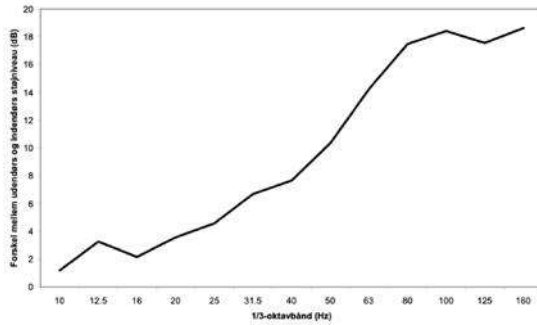


Fig. 3 : Spectre d'isolement brut (différence entre niveau sonore à l'extérieur et à l'intérieur) aux bruits aériens extérieurs de basse fréquence. La valeur est dépassée par 80 % des habitations danoises [11]

L'excitation se transmet préférentiellement aux vitrages et aux planchers légers, mais elle peut aussi faire vibrer des éléments du mobilier. Il est établi qu'une excitation purement aérienne suffit à mettre en vibration des vitrages. Pour les planchers, Leventhall observe des résonances dans les tiers d'octave 12,5 et 16 Hz, pour les vitrages, dans le tiers d'octave 50 Hz [9].

Bien que les amplitudes soient en général trop faibles pour endommager l'audition, ces manifestations sont souvent très gênantes pour les occupants des logements touchés, car les vibrations sont souvent associées à un endommagement et à la dépréciation des biens.

A la lumière de ces éléments, il est clair que les problèmes de nuisances dans les basses fréquences doivent être traités à la source et qu'il importe de mieux connaître l'émission des véhicules dans cette partie du spectre. Le chapitre suivant aborde cet aspect.

Emission sonore routière à basse fréquence

Les informations disponibles dans la littérature sont plutôt rares. La méthode en vigueur en France définit deux spectres constants normalisés de telle sorte que leur niveau global soit égal à 0 dB (A), selon que le trafic s'écoule sur un revêtement drainant ou non [12]. Dans les deux cas, la fréquence minimale couverte est le tiers d'octave 100 Hz. Ceci n'a rien d'étonnant puisque cette méthode s'appuie sur les résultats de mesurage de bruit de roulement au passage.

La seule référence trouvée qui fournisse des spectres jusqu'à des fréquences de l'ordre de 1 Hz est [9]. Toutefois, elle s'appuie pour l'essentiel sur des travaux qui remontent aux années 1970.

Le spectre de trafic routier défini dans la norme EN 1793-3 [13] «descend» jusqu'au tiers d'octave 50 Hz. Dans leur ouvrage sur le bruit de contact pneumatique/chaussée, Sandberg et Ejsmont affirment que ce spectre est censé représenter un trafic urbain autour de 50 km/h et que pour des vitesses plus élevées, il surestime largement les basses fréquences [14]. Dans la même référence, on trouve des spectres mesurés en 1982-84 et 1995-96 par l'institut suédois VTI, ainsi que des données japonaises, sans autre précision d'origine. Tous ces spectres «commencent» à 50 Hz. De nombreux autres spectres surgissent au fil des pages de [14], et il semble que l'ouvrage n'en fasse pas tout à fait la synthèse dans le sous-chapitre prévu à cet effet. En outre, certains graphiques de [14] sont trop peu lisibles pour être exploitables.

La référence [14] donne aussi une estimation de l'impact de l'humidité de la chaussée sur le niveau de bruit au passage. Alors que l'augmentation de niveau sonore est nette pour les fréquences supérieures à 1 kHz, il n'y a pas de différence significative entre la mesure sur chaussée sèche et celle sur chaussée mouillée dans le cas qui nous intéresse.

Le livrable 11 du projet européen IMAGINE formule un modèle pour les tiers d'octave 25 à 10 000 Hz [15]. Comme le modèle français, ce modèle distingue une composante roulement et une composante propulsion, à la différence près que ces composantes sont dépendantes du tiers d'octave considéré (figure 4). Pour quatre catégories de véhicules – véhicules légers, petits poids lourds, gros poids lourds, 2-roues motorisés -, il contient des graphiques représentant les spectres des quatre coefficients principaux qui donnent l'ordonnée à l'origine et la pente de chaque loi. Malheureusement, les graphiques en question ne sont pas gradués de façon absolue en ordonnée. La seule information disponible est que l'écart entre 2 graduations consécutives est de 5 dB. Pour les catégories véhicule léger et poids lourds, les spectres indiquent que le bruit moteur domine à basse fréquence. On peut s'interroger sur les fluctuations brutales qui apparaissent sur ces spectres. Il est vrai que l'étendue de la base expérimentale de ce modèle n'est pas connue.

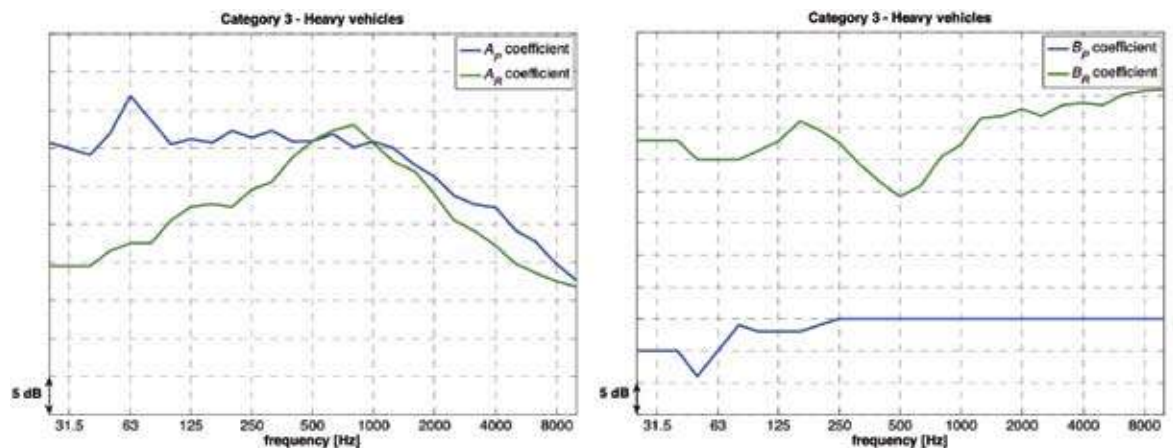


Fig. 4 : Coefficients du modèle IMAGINE pour les poids lourds, en valeurs relatives. $L_{wR}=A_R + B_R \log(v/v_{ref})$ et $L_{wP}=A_P + B_P \times (v-v_{ref})/v_{ref}$. P pour propulsion, R pour roulement [15]

Si les véhicules ne varient pas significativement d'un pays à l'autre en Europe occidentale, les formulations de revêtements de chaussée sont souvent spécifiques d'un pays. Aussi l'utilisation en France d'un spectre obtenu à l'étranger est problématique *a priori*. Il faut aussi prendre en compte l'évolution du parc de véhicules et des formulations de revêtements au fil du temps.

La suite de cet article présente quelques analyses à partir de campagnes de mesures réalisées par le LRPC de Strasbourg dans le cadre des programmes de recherche IFSTTAR «Prévoir le bruit en milieu urbain» (2006-2009) [16] et ECOSURF (2010-2013) ou d'actions pilotées par le SETRA. Quelle que soit la mesure présentée, le microphone est situé à 7,50 m de l'axe de circulation et 1,20 m de hauteur, conformément à la position conventionnelle de la mesure de bruit de roulement au passage. La chaîne de mesure utilisée est de classe 1.

Emission à l'arrêt moteur allumé

Le cas le plus simple est celui où le véhicule est à l'arrêt moteur allumé. Bien que cette condition permette une première estimation du spectre du bruit moteur, elle ne manque pas de se produire dans la vie réelle. Outre l'arrêt à un feu tricolore, on peut citer les cas d'une livraison, d'un stationnement temporaire, mais aussi de la fourniture d'énergie à un équipement auxiliaire du véhicule comme la climatisation de l'habitacle ou la réfrigération d'une cargaison.

Le spectre de bruit moteur a été mesuré ici pour une Renault Clio essence, pour le même véhicule en version Diesel, ainsi qu'un poids lourd Renault Kerax utilisé au LRPC de Strasbourg pour des essais de mécanique des sols. Il s'agit d'un véhicule de 19 tonnes à 4 roues motrices. Les résultats sont présentés à la figure 5. Pour un véhicule donné, on constate que le spectre présente des pics bien individualisés pour quelques tiers d'octave isolés.

Un examen du spectre en bandes fines montrerait des pics à des fréquences bien précises avec éventuellement des harmoniques. Pour un véhicule donné, la fréquence des pics évolue avec le régime moteur et la charge. On peut observer deux fréquences fondamentales. Pour un moteur à 4 temps, la première est déterminée par la période entre deux explosions en prenant en compte tous les cylindres, la seconde par la période entre 2 explosions du même cylindre. La formule suivante s'applique [9,17] :

$$F = (\text{régime moteur en tours/min}) \times (\text{nombre de cylindres pris en compte}) / 120 \text{ en (Hz)}$$

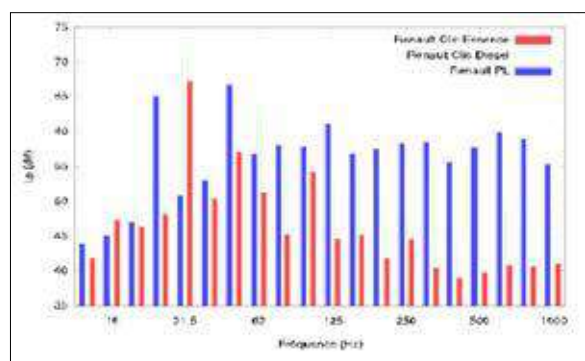


Fig. 5 : Spectre au point mort, moteur allumé pour 3 véhicules

Avec les véhicules étudiés ici, comme on peut s'y attendre, le premier pic apparaît pour le Kerax à une fréquence plus basse (25 Hz) que pour les véhicules légers étudiés (31,5 Hz). La différence de motorisation des deux véhicules légers étudiés est facile à distinguer sur la figure 5. Un véhicule à l'arrêt moteur tournant constitue donc une excitation entretenue à des fréquences bien précises susceptibles d'exciter la résonance d'une structure dans le voisinage.

Emission du trafic

Véhicule isolé

Cas des véhicules légers et poids lourds

Pour ces véhicules, bien que le spectre soit dominé par les fréquences voisines de 1 000 Hz, les fréquences inférieures ne sont pas totalement négligeables, comme l'illustre la figure 6 qui est issue d'une campagne de mesurage de bruit de roulement au passage réalisée en 2008 sur la RD 1083 dans la commune de Haguenau (67). La chaussée est revêtue d'un BBTM 0/10 (béton bitumineux très mince dont la granulométrie est comprise entre 0 et 10 mm). Le BBTM 0/10 est un revêtement fréquent sur les routes françaises.

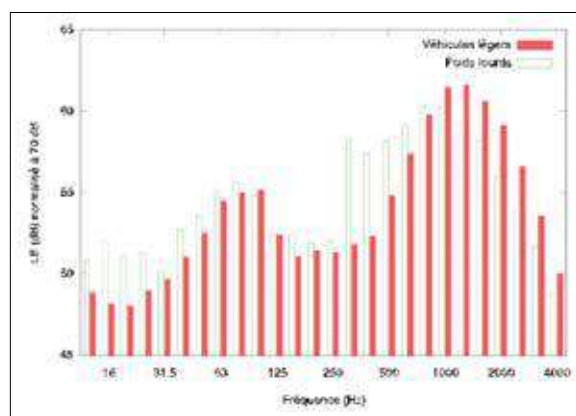


Fig. 6 : Spectre moyen des véhicules légers et poids lourds sur un revêtement BBTM 0/10 type 1. Le spectre est exprimé en niveau d'exposition

Il est logique que le spectre des poids lourds soit globalement décalé vers les basses fréquences par rapport à celui des véhicules légers. Les deux catégories de véhicules rayonnent de façon significative dans les basses fréquences et le spectre présente un maximum secondaire autour de 80 Hz. Ce maximum semble imputable au bruit moteur. Dans les basses fréquences, il est normal de ne pas retrouver des pics aussi marqués qu'à la figure 5, car la figure 6 est une moyenne sur au moins 50 véhicules par catégorie.

Cas des 2-roues motorisés

L'émission des 2-roues motorisés est essentiellement constituée de bruit moteur [15]. La figure 7 est issue d'une campagne réalisée en 2009 sur la route des crêtes, dans les Vosges [18], qui est très fréquentée par les motocyclettes de grosse cylindrée à la belle saison.

Cette figure a été calculée pour 10 passages entre 80 et 100 km/h. On peut constater que malgré la petite dimension des véhicules considérés, le spectre est centré sur 100 Hz et que les fréquences inférieures peuvent être très énergétiques. La dispersion du spectre est très importante d'un passage à l'autre. L'examen du spectre en bandes fines révèle le caractère tonal très marqué du bruit au passage dans les basses fréquences.

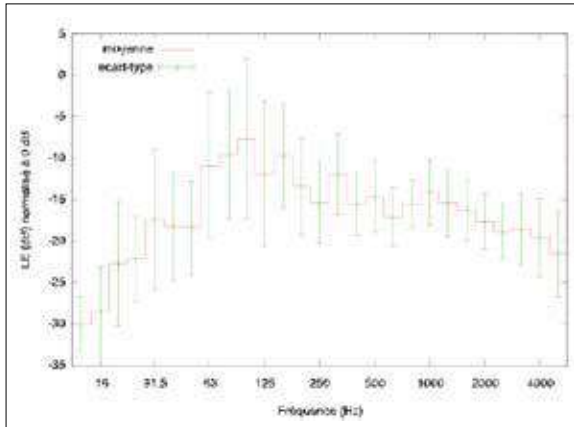


Fig. 7 : Spectre moyen de passages de motocyclettes normalisé à 0 dB pour des vitesses entre 80 et 100 km/h. Le spectre est exprimé en niveau d'exposition

Flot continu

Le spectre d'un flot continu est étudié à partir d'un enregistrement de 15 minutes le long du CD500 dans le Bas-Rhin réalisé en 2008. A l'endroit retenu, il s'agit d'une route à 2 x 2 voies revêtue d'un BBTM 0/10. Sur cette durée, 296 véhicules légers et 22 poids lourds – dont 7 % de poids lourds ont été pris en compte. La vitesse moyenne des véhicules était de 105 km/h.

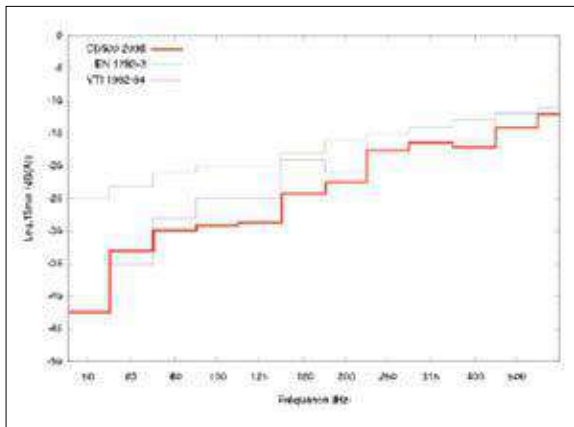


Fig. 8 : Comparaison des mesures de bruit routier en bordure du CD500 du spectre standard de trafic routier avec les données de [14]. Ici, les spectres sont normalisés à 0 dB (A) pour les tiers de 50 à 5 000 Hz

Le spectre mesuré sur le CD 500 (figure 8) est en accord avec les affirmations de [14] concernant la surestimation relative des basses fréquences par spectre standard et la surestimation dans les données VTI vieilles de plus de 25 ans.

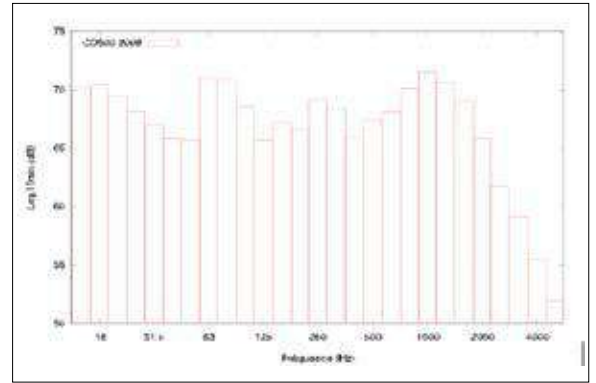


Fig. 9 : Spectre du bruit du trafic routier en bordure du CD500 en l'absence de pondération A

L'examen en l'absence de pondération A montre bien l'énergie contenue dans les basses fréquences (figure 9). Dans cette représentation, le spectre est relativement plat jusqu'à 1600 Hz.

Conclusion

S'agissant d'étudier l'impact acoustique des activités humaines, la gamme [1 Hz-100 Hz] mérite aussi d'être considérée, car elle présente plusieurs caractéristiques remarquables. La première est une très faible atténuation au cours de la propagation à l'extérieur, avec éventuellement une amplification à proximité du récepteur par la mise en résonance de la structure des bâtiments, ou l'excitation des modes propres des locaux. La seconde est que ces si ces fréquences sont à la limite du spectre auditif chez l'homme, elles n'en sont pas moins audibles sous certaines conditions, et la perception peut mobiliser d'autres organes que l'audition, comme la cage thoracique.

Il s'avère que les données sur l'émission sonore des véhicules routiers à basse fréquence sont rares dans la littérature, qu'elle soit scientifique ou méthodologique. Cet article a mis en évidence le caractère tonal du bruit des véhicules à l'arrêt moteur allumé. Il a aussi rappelé que l'énergie du trafic routier dans les basses fréquences est tout à fait significative, y compris pour les 2-roues.

Bien qu'il ne s'agisse que d'un travail préliminaire, espérons que cet article aura apporté quelques éléments concrets sur les sources routières. L'effet de la vitesse et de la formulation de revêtement de chaussée sur l'évolution du spectre à basse fréquence mériterait d'être étudié. Le cas des transports en commun routiers n'a malheureusement pas pu être abordé dans ces pages. De même, il serait très instructif de faire même exercice pour le bruit ferroviaire.

S'agissant plus largement de basses fréquences dans l'environnement, les regards se tournent aujourd'hui plutôt vers les aérogénérateurs qui sont supposés en produire beaucoup. Dans ce contexte, une meilleure connaissance générale de l'émission sonore à basse fréquence des inventions humaines permettrait de hiérarchiser l'émission des sources.

Parallèlement, la mesure de niveau sonore dans cette gamme de fréquence pose des problèmes particuliers, aussi bien pour suivre le fonctionnement d'une installation qui émet des basses fréquences dans l'environnement que pour instruire une plainte de riverain, notamment lorsque le mesurage est à effectuer dans un local, à cause de la faible densité modale dans cette partie du spectre. Sur ce sujet, un projet de norme portant la référence prNF S 31-135 est actuellement en cours de rédaction au sein d'un groupe de travail AFNOR commun aux commissions S30M et S30J.

Remerciements

L'auteur remercie Loïc Toussaint et Laurent Brendel, du Groupe Acoustique du LRPC de Strasbourg, pour la réalisation des mesures de bruits de véhicules en stationnement. Il remercie également les membres du groupe de travail AFNOR «basses fréquences» pour les discussions instructives sur le sujet.

Références bibliographiques

- [1] OMS Europe (2011), Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe, 128 p, http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf
- [2] ISO 7196 (1995), Acoustics – Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements, 6 p
- [3] Watanabe T. and Møller H. (1990), Hearing thresholds and equal loudness in free field at frequencies below 1 kHz, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 9(4):135-148, http://vbn.aau.dk/files/54564231/Watanabe_and_Moller_1990a.pdf.
- [4] DIN 45680 (2011), Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschmissionen (Mesurage et évaluation de bruits basse fréquence), projet de norme, août 2011, 25 p, en allemand.
- [5] Berglund B., Hassmén P., Soames Job R.F. (1996), Sources and effects of low-frequency noise, *Journal of the Acoustical Society of America* 99(5):2985-3002.
- [6] Leventhall B., Pelmear P., Benton S. (2003), A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects, DEFRA, 88 p, <http://archive.defra.gov.uk/environment/quality/noise/research/lowfrequency/documents/lowfreqnoise.pdf>
- [7] ISO 9613-1 (1993), Acoustique – Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre – Partie 1 : Calcul de l'absorption atmosphérique, 26 p
- [8] Embleton T. F. W. (1996), Tutorial on sound propagation outdoors, *Journal of the Acoustical Society of America* 100(1) :31-48
- [9] Nelson, P. (1987). *Transportation Noise Reference Book*. Butterworth-Heinemann, 520 p
- [10] Hoffmeyer D., Jakobsen J. (2010), Sound insulation of dwellings at low frequencies, 14th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibrations and its Control, Aalborg, Danemark, 9-11 juin 2010, 12 p
- [11] Plovsing B. (2011), Beregningsmetode for lavfrekvent støj fra vindmøller (Méthode de calcul du bruit basse fréquence engendré par les aérogénérateurs), 29 p, en danois, <http://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2011/06/978-87-92779-01-4.pdf>
- [12] Sêtra (2009), Prévission du bruit routier – Volume 1 : calcul des émissions sonores dues au trafic routier, <http://www.setra.equipement.gouv.fr/Prevision-du-bruit-routier.html>, 124 p, version anglaise http://www.setra/IMG/pdf/0924-1A_Road_noise_prediction_v1.pdf
- [13] EN 1793-3 (1997), Dispositifs de réduction du bruit du trafic routier - Méthode d'essai pour la détermination de la performance acoustique - Partie 3: Spectre sonore normalisé de la circulation
- [14] Sandberg U., Ejsmont J.A. (2002), *Tyre/road noise reference book*, Informex, 616 p
- [15] IMAGINE (2007), The emission model for European road traffic, Livrable 11 du projet IMAGINE, Ref IMA55TR-060821-MP10, 66 p, <http://db.mp.nl/publications/vvv/IMA55TR-060821-MP10%20-%20IMAGINE%20Deliverable%20D11.pdf>
- [16] Dutilleul G., Picaut J. (2010), Opération de recherche 11M061 (2006-2009) « Prévoir le bruit en milieu urbain », Synthèse des principaux résultats, 39p, http://media.lcpc.fr/ext/pdf/sem/2010_cloture_OR_11M061/Document_de_synthese_11M061.pdf
- [17] Sciabica J.F., Bezat M.C., Roussarie V., Kronland-Martinet R., Ystad S. (2010), Caractérisation des variations de timbre du bruit moteur dans l'habitacle d'une automobile par application d'un modèle auditif, *Congrès Français d'Acoustique 2010*, Lyon, <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/55/11/73/PDF/000549.pdf>
- [18] Toussaint L (2009), Caractérisation acoustique des deux-roues motorisés : mesures sur des véhicules de la circulation au Champ du Feu (67). Rapport d'étude, LRPC Strasbourg, opération de recherche LCPC 11M061, octobre 2009