

Caractérisation des sources sonores d'origine routière pour le milieu urbain

David GAULIN

Docteurant

Section Acoustique routière et urbaine

Michel BÉRENGIER

Directeur de recherche

Docteur en acoustique

Chef de la section Acoustique routière et urbaine

Division Gestion de l'entretien des routes

Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Centre de Nantes

RÉSUMÉ

Toutes les sources sonores de type routier ne pouvant être modélisées individuellement, un classement par famille est établi puis comparé à ceux déjà existants. Des résultats similaires sont obtenus. La modélisation en termes de source sonore ponctuelle équivalente est tout d'abord effectuée pour un véhicule léger circulant à des vitesses stabilisées supérieures ou égales à 80 km/h, pour lesquelles le bruit de contact pneumatique-chaussée est prédominant. Une méthode permettant de déterminer la hauteur de cette source ponctuelle omnidirectionnelle équivalente a été mise au point. La source a été identifiée proche du sol ce que confirme une étude réalisée à l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS). La puissance acoustique de cette source peut alors être calculée. Cette méthode est ensuite appliquée aux véhicules légers et cyclomoteurs à des vitesses dites urbaines, entre 30 et 70 km/h. Des lois de prévision des niveaux d'émission (puissance acoustique) par tiers d'octave sont déterminées, avec une excellente précision. Ces modèles de sources seront ensuite intégrés dans un logiciel de propagation du son en milieu urbain.

MOTS CLÉS : 15 - Zone urbaine - Route - Bruit - Contact (pneu route) - Son - Méthode - Mesure - Voiture particulière - Deux roues à moteur - Modèle mathématique - Vitesse - Logiciel - Propagation.

Introduction

Au cours des années passées, les problèmes d'acoustique et plus particulièrement d'ambiances sonores n'étaient pris en compte que de façon sommaire lors de la construction de nouveaux aménagements urbains. Aujourd'hui, les choses ont évolué à tel point que chaque grande municipalité aura l'obligation de dresser une carte sonore de son centre-ville.

Dans le but d'apporter des solutions à ces questions d'environnement sonore dans le cœur de nos agglomérations, le Pir-Villes a lancé en 1994 un programme de recherches intitulé « Vers un logiciel prédictif des ambiances sonores urbaines ». L'idée est aujourd'hui de pouvoir prédire pour mieux construire. À ce jour, ce projet comporte quatre volets :

- ❶ la propagation du son en milieu urbain sous forme de solution d'une équation de diffusion (Picaut, 1999) développée par J. Picaut au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, au Mans ;
- ❷ la modélisation de la morphologie du cadre bâti et son interaction sur la propagation sonore en site urbain (Woloszyn, 1998) étudiée par Ph. Woloszyn au sein du Centre d'Études et de recherches méthodologiques d'architecture de l'école d'architecture de Nantes (CERMA) et du LCPC ;
- ❸ les relations entre les aspects quantitatif et qualitatif des ambiances sonores urbaines explorées par M^{lle} M. Raimbault au CERMA et au LCPC ;
- ❹ la caractérisation et l'identification des sources sonores en milieu urbain.

Le dernier point fait l'objet du présent article.

La caractérisation et l'identification des sources sonores en site urbain s'articulent autour de deux axes majeurs : une approche qualitative faisant principalement appel à la statistique et une approche quantitative permettant d'identifier ces sources par des critères physiques.

Les sources sonores rencontrées dans nos villes peuvent être classées en :

- sources d'origine mécanique : voitures particulières, autobus, poids lourds, tramways, trains, etc. ;
- sources d'origine humaine : enfants dans une cour de récréation, piétons sur une place de marché, clients de bar ou de restaurant en terrasse, etc.

Nous ne nous intéresserons dans cet article qu'aux sources d'origine mécanique et plus particulièrement à celles de type routier. De nombreux travaux ont déjà été réalisés dans ce domaine. Cependant, comme nous le détaillerons plus loin, ils utilisent une approche radicalement différente de la nôtre et inadaptée à nos objectifs.

Des recherches sont actuellement engagées au sein des Laboratoires des Ponts et Chaussées, afin de déterminer le niveau sonore émis par les différentes classes de véhicules sur différents types de revêtements de chaussée. Ces études font l'hypothèse que, pour les vitesses considérées, seul le bruit de contact pneumatique-chaussée émerge. Ceci est en effet exact au-delà de 60 km/h pour les véhicules légers et 80 km/h pour les véhicules lourds. De plus, le milieu de propagation est considéré comme étant parfaitement libre (absence d'obstacle environnant).

En milieu urbain, ces deux hypothèses principales ne seront pas remplies du fait, d'une part, des faibles vitesses de circulation pour lesquelles les bruits d'origine moteur et d'échappement deviennent non négligeables et, d'autre part, du fait de la présence du bâti (diffraction, réflexion). Le travail consiste à étudier tout d'abord une adaptation de la procédure de mesure de façon à pouvoir qualifier, pour les types de trafics urbains représentatifs, la puissance acoustique de chaque type de sources en fonction du support sur lequel se déplacera cette source. La modélisation des véhicules en termes de source sonore équivalente ainsi que l'évolution fréquentielle de leur puissance acoustique sont indispensables, notamment pour l'approche propagative.

Afin de caractériser au mieux les sources sonores d'origine routière, il est indispensable de les recenser et, si possible, de les regrouper en différentes catégories. Ce travail a déjà été effec-

tué, notamment par le Centre d'études des transports urbains (CETUR), actuellement CERTU. Cette classification est-elle toujours valable ? C'est à cette question que nous tenterons de répondre dans la première partie de l'article.

Classement des sources sonores d'origine routière

Quelques rappels bibliographiques

De nombreux écrits font référence au classement des sources sonores d'origine routière. Parmi les plus importants, on peut citer le guide du bruit (Guide du bruit des transports terrestres, 1980), le modèle de prévision allemand RLS 90 (Hamet, 1996a) et le modèle américain FHWA TNM (Hamet, 1996b).

Selon le guide du bruit, les catégories de véhicules ayant une influence dans l'évaluation du bruit de trafic, seraient les suivantes :

- véhicules légers (véhicules de poids total en charge inférieur à 3,5 tonnes) ;
- véhicules lourds (véhicules de poids total en charge supérieur à 3,5 tonnes), en distinguant si possible les véhicules de poids total en charge compris entre 3,5 et 12 tonnes (poids lourd) de ceux possédant un poids total en charge supérieur à 12 tonnes (train routier) ;
- deux roues motorisés, en distinguant essentiellement trois catégories : les motocyclettes (cylindrée supérieure à 125 cm³), les vélomoteurs (cylindrée comprise entre 50 et 125 cm³) puis les cyclomoteurs (cylindrée inférieure à 50 cm³).

Les poids lourds (PL) et les trains routiers (TR) sont regroupés dans la même catégorie. À ce propos, un récent rapport de l'INRETS (Lelong, 1997) fait ressortir, dans ses premières conclusions, un écart très faible entre les poids lourds et les trains routiers. En effet, le test de sensibilité PL/TR y est de l'ordre du décibel.

Le modèle de prévision allemand RLS 90 (Hamet, 1996a) reste assez proche de la classification du guide du bruit. Il distingue deux classes de véhicules :

- ❶ les véhicules légers, dont le poids total en charge est inférieur à 2,8 tonnes ;
- ❷ les poids lourds, dont le poids total en charge est supérieur à 2,8 tonnes.

Par contre, le modèle américain FHWA TNM (Hamet, 1996b) sépare les véhicules en cinq catégories :

- ❶ véhicules légers : véhicules à deux essieux et quatre pneumatiques, en général de moins de 4.5 tonnes, conçus pour

transporter neuf passagers ou moins (automobiles) ou pour transporter des marchandises (utilitaires) ;

② poids lourds (*Medium trucks*) : véhicules de transport de marchandises à deux essieux et six pneumatiques, en général d'un poids total compris entre 4,5 et 12 tonnes ;

③ trains routiers (*Heavy trucks*) : véhicules de transport de marchandises à plus de deux essieux, en général d'un poids total supérieur à 12 tonnes ;

④ autobus : tout véhicule à deux ou trois essieux conçu pour transporter neuf passagers ou plus (pas d'indications de poids total) ;

⑤ motocycles : tout véhicule ayant deux ou trois pneumatiques dont le compartiment conducteur et/ou passager est à ciel ouvert.

On constate que seul ce dernier modèle sépare les poids lourds et les trains routiers, ce qui provient certainement du fait que les trains routiers rencontrés sur le continent américain présentent la caractéristique d'avoir leur pot d'échappement dirigé vers le haut. D'ailleurs, l'administration fédérale des routes des États-Unis (US Department of Transportation Federal Highway Administration) observe un écart de 4 dBA entre les catégories de véhicules lourds *Medium Trucks* et *Heavy Trucks*.

Mesures préliminaires

Les premières mesures ont été effectuées en janvier 1997 le long d'une route à deux voies d'une largeur totale de 7 m, recouverte d'un enrobé dense classique. Il s'agissait d'un enregistrement audio, en continu, avec un microphone placé près de la chaussée. Les données recueillies ont ensuite été triées suivant le sens de circulation.

Le but de ces mesures préliminaires était de parvenir à localiser et à extraire chacun des véhicules du signal global à partir d'un enregistrement où figure un ensemble complet de sources sonores, pour ensuite essayer de les regrouper par catégories.

Les résultats, basés sur une analyse non seulement en niveau global mais par bandes tiers d'octave, nous ont permis de distinguer deux grandes classes de véhicules (en omettant les deux roues) :

① les véhicules légers : voitures particulières et utilitaires ;

② les poids lourds et trains routiers.

Nous retrouvons donc la même classification que le guide du bruit (Guide du bruit des transports terrestres, 1980), établie il y a une vingtaine d'années. Ceci paraît logique du fait que l'ensemble des catégories de véhicules a, *a priori*, bénéficié d'une diminution générale du niveau d'émission sonore. Même si les niveaux absolus sont différents, l'écart entre les véhicules reste inchangé. Les utilitaires dont le poids total en charge est inférieur à 3,5 tonnes peuvent être regroupés avec les véhicules légers, comme le préconise le guide du bruit. En effet, leur niveau sonore est quasiment identique à celui des voitures particulières. Concernant les poids lourds et les trains routiers, nous n'avons pas trouvé une différence assez importante permettant de les dissocier. Ceci confirme également les études précédentes.

Premiers pas vers la modélisation des véhicules

Introduction

Après avoir vérifié la classification, il s'agit maintenant de modéliser ces véhicules en terme de source sonore équivalente, c'est-à-dire de déterminer un ensemble de paramètres, dont la hauteur de la source sonore équivalente et sa puissance acoustique. Ce concept de source équivalente ponctuelle et omnidirectionnelle sera discuté ci-après. Ces résultats constitueront les données d'entrée du modèle de propagation du son en milieu urbain développé par J. Picaut (1999). Des travaux ont cependant déjà été réalisés. Le Guide du bruit, par exemple, préconise une hauteur de 80 cm pour la source équivalente, hauteur qui paraît erronée aujourd'hui. En effet, depuis 1980, date à laquelle a été publié cet ouvrage, des progrès sensibles ont été réalisés sur l'acoustique du compartiment moteur. Ces derniers rendent le bruit de roulement prépondérant à partir de 50-60 km/h. Ceci conduit à imaginer une source sonore équivalente plus proche du sol.

Afin que cette caractérisation soit indépendante d'un site particulier, elle doit être réalisée en site ouvert et non en zone urbaine. En effet, les signaux reçus par les récepteurs seraient déjà convolués par l'ensemble des obstacles constituant la ville. Implantées telles quelles dans le modèle, les sources sonores verraient leur énergie acoustique influencée une seconde fois par le cadre bâti.

Différentes représentations des sources sonores (Favre, 1983)

Dans cette partie nous décrivons différents modèles rencontrés dans la littérature et permettant de représenter, de façon simple, les sources sonores que sont les véhicules. Dans un premier temps, le véhicule est modélisé par une source monopolaire (ponctuelle omnidirectionnelle), puis dipolaire dont l'axe est parallèle à celui de déplacement, et enfin dipolaire dont l'axe est perpendiculaire à celui de déplacement.

Les mesures sont effectuées au passage, à 7,5 m de l'axe de déplacement des véhicules. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau I.

TABLEAU I
Écarts entre les niveaux maximaux théoriques et mesurés au passage en fonction de la vitesse (dBA)

Source	Vitesse (m/s)		
	10	20	30
Monopole	< 0,1	0,2	0,3
Dipôle //	0,1	0,2	0,5
Dipôle ⊥	0,2	0,5	1,3

La comparaison des résultats expérimentaux avec les valeurs données par les trois modèles théoriques amène à la conclusion suivante : la source monopolaire fournit une représentation satisfaisante de la réalité.

Détermination des hauteurs de sources sonores équivalentes : Méthode de Glegg et Yoon (Glegg et Yoon, 1990a ; 1990b)

La validité du concept de source monopolaire étant maintenant acquise, il s'agit de déterminer la position de cette source ponctuelle.

La hauteur effective des sources de bruit d'un véhicule est un paramètre important pour la construction des écrans antibruit le long des autoroutes. Par exemple, si le bruit est principalement dû au contact pneumatique-chaussée, des écrans de faibles hauteurs seront nécessaires, contrairement au cas des poids lourds où le moteur et l'échappement constituent des sources importantes. La méthode FHWA pour les écrans acoustiques utilise une hauteur de source équivalente de 2,44 m pour les trains routiers (équivalent en hauteur) basée sur des résultats d'expériences du début des années 1970.

Les mesures de localisation des sources sonores sont effectuées à l'aide de différentes techniques. Les techniques décrites ici sont basées sur l'estimation de la densité interspectrale entre le signal mesuré au point de référence x_0 et un second point x_m (fig. 1).

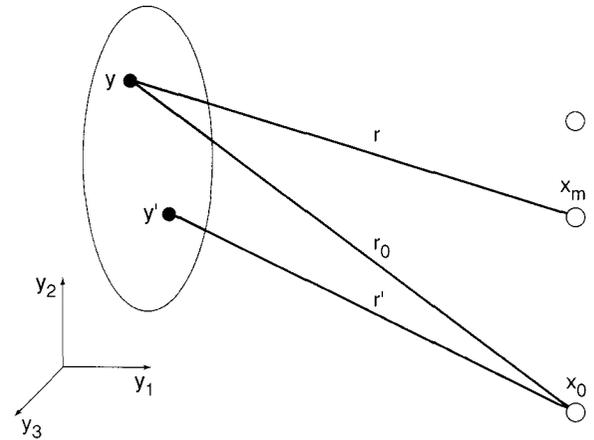


Fig. 1 - Système de coordonnées pour une distribution de source. y et y' sont les positions de source, x_0 et x_m les positions de mesure.

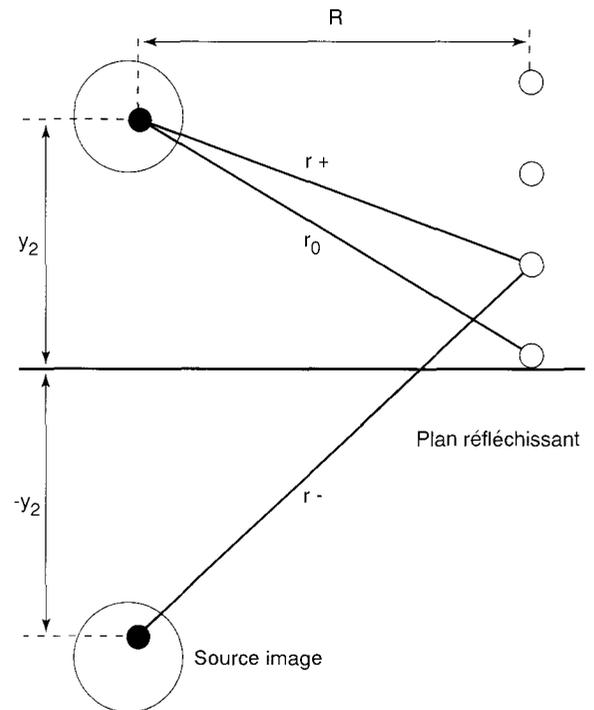


Fig. 2 - Schéma montrant les distances de propagation entre une source, son image et un réseau de microphones.

La hauteur de la source équivalente est définie comme étant la position où une source ponctuelle reproduit le même champ acoustique lointain qu'une distribution de sources, sur le plus grand angle solide possible (fig. 2) :

$$y_e = \left[1 / k(h_m / r) \right] \cos^{-1}(D_m) \quad (1)$$

avec :

k : nombre d'onde,

h_m : hauteur du microphone,

r : distance source-microphone ;

$$D_m = Rc \left[\frac{C_m G(y_0, x_0)}{C_0 G(y_0, x_m)} \right]$$

avec :

C_m : interspectre entre le microphone de référence situé en x_0 et le microphone situé en x_m ,

C_0 : autospectre du microphone de référence.

$$G(y, x_m) = (1 + Q) \left[\frac{e^{ik(r_+ - r_0)}}{r_+ r_0} + Q^* \frac{e^{ik(r_- - r_0)}}{r_- r_0} \right]$$

Q et Q^* étant respectivement le coefficient de réflexion complexe du sol et son conjugué.

En accord avec cette démarche théorique, une méthode de mesure a été développée en utilisant un réseau vertical de sept microphones. Cette méthode est relativement insensible à la directivité et aux déplacements horizontaux des sources par rapport à leur trajectoire initiale.

L'objectif est de mesurer des hauteurs de sources équivalentes pouvant atteindre 2,5 m et dans la gamme de fréquence 250 - 2 500 Hz et d'appliquer cette procédure à des véhicules circulant sur autoroute.

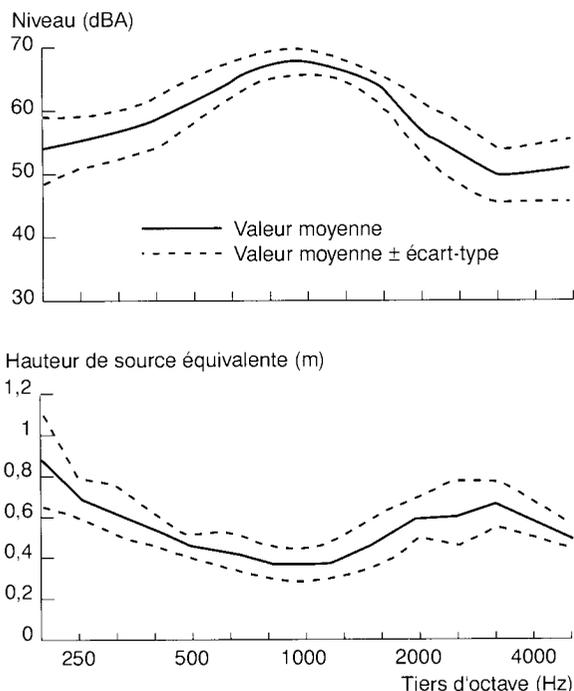


Fig. 3 - Hauteur de source équivalente pour vingt-cinq véhicules légers. — : valeur moyenne ; - - - : valeur moyenne ± écart-type (Glegg & Yoon, 1990b).

Les résultats moyens pour les véhicules légers sont présentés sur la figure 3. Bien que le graphique fasse apparaître une hauteur de source de 40 cm entre 500 et 1 000 Hz, due à la prédominance du bruit de contact pneumatique-chaussée dans cette gamme, les auteurs notent que la valeur réelle est probablement inférieure. Aux basses et hautes fréquences, la hauteur de source remonte aux environs de 60 cm.

L'objectif des auteurs de cette étude était de mesurer la hauteur de source équivalente de véhicules circulant sur autoroute dans le but d'optimiser les écrans antibruit. Il a été trouvé dans le cadre de cette étude : 1,2 m pour les trains routiers, 0,7 m pour les poids lourds et 0,6 m pour les véhicules légers. À noter que des résultats similaires ont été obtenus par Coulson (1996) avec la même technique.

Méthode LCPC de détermination de la hauteur de source sonore équivalente et de la puissance acoustique

De nombreuses mesures utilisent des antennes acoustiques. Notre démarche est cependant différente. Elle est fondée sur l'utilisation des phénomènes propagatifs entre deux microphones séparés de 5,5 m. À cet effet, nous employons le modèle de propagation PL_PROPATE développé au LCPC. Dans ce dernier, le revêtement est acoustiquement caractérisé à partir du modèle d'impédance de Delany et Bazley (1970) (Bérenghier et Hamet, 1997), qui présente l'avantage d'être simple et fiable sur l'ensemble de la gamme de fréquence utile (fig. 4). Comme nous l'avons vu précédemment, les véhicules sont modélisés par une source de type monopolaire. Les paramètres du modèle sont la hauteur de la source ponctuelle, l'impédance de surface de la couche de roulement et les conditions météorologiques. Pour chaque position de microphone, il nous fournit une atténuation par rapport au champ libre. Rasmussen (1982) utilise une démarche similaire pour déterminer l'atténuation excédentaire du bruit routier.

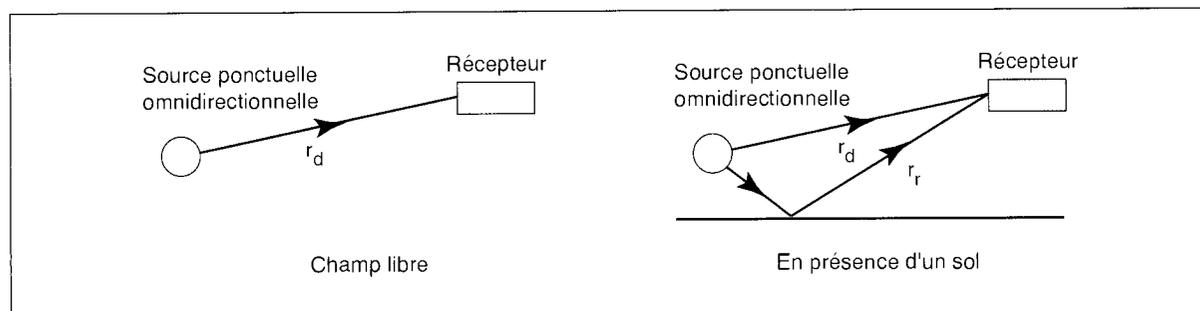


Fig. 4 - Schéma montrant les distances de propagation en champ libre et en présence d'un sol.

La pression en champ libre, au récepteur, est donnée par :

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{A_s}{4\pi r_d} e^{ikr_d}$$

avec A_s : amplitude de la source et $p_0 = 2.10^{-5}$ Pa.

En présence d'un sol, l'expression précédente devient :

$$\frac{p_r}{p_0} = \frac{A_s}{4\pi r_d} e^{ikr_d} + Q \frac{A_s}{4\pi r_r} e^{ikr_r}$$

avec $Q = |Q|e^{i\gamma}$: coefficient de réflexion du sol.

En effectuant le rapport des carrés des modules et avec $Q = 1$ (sol parfaitement réfléchissant), on obtient :

$$\left| \frac{p_r}{p_1} \right|^2 = 1 + \frac{r_d^2}{r_r^2} + \frac{2r_d}{r_r} \cos \left[\frac{2\pi f}{c} (r_r - r_d) \right]$$

avec :

f : fréquence considérée (Hz),

c : célérité du son (m/s).

D'où l'atténuation excédentaire (ΔL) donnée par le logiciel PL_PROPATE :

$$\Delta L = 10 \lg \left| \frac{p_r}{p_1} \right|^2 = 10 \lg \left\{ 1 + \frac{r_d^2}{r_r^2} + \frac{2r_d}{r_r} \cos \left[\frac{2\pi f}{c} (r_r - r_d) \right] \right\} \quad (2)$$

Ce résultat est obtenu pour une fréquence discrète. Après un calcul sur l'ensemble des fréquences, le spectre tiers d'octave est obtenu par recombinaison :

$\Delta L_1 = L_{\text{mesuré},1} - L_{\text{libre},1}$ pour le premier microphone,

$\Delta L_2 = L_{\text{mesuré},2} - L_{\text{libre},2}$ pour le second microphone.

où $L_{\text{mesuré}}$ est le niveau mesuré en présence d'un sol.

En considérant le véhicule comme une source ponctuelle omnidirectionnelle (monopole), nous pouvons écrire, en champ libre :

$$p_{\text{libre},1}^2 = \frac{W}{4\pi r_1^2} \rho_0 c \quad p_{\text{libre},2}^2 = \frac{W}{4\pi r_2^2} \rho_0 c$$

avec : ρ_0 et c , respectivement masse volumique et célérité du son dans l'air.

De plus : $p_0^2 = W_0 \cdot \rho_0 \cdot c$.

$$\text{Donc : } \frac{p_{\text{libre},1}^2}{p_0^2} = \frac{W}{W_0} \frac{1}{4\pi r_1^2} \quad \frac{p_{\text{libre},2}^2}{p_0^2} = \frac{W}{W_0} \frac{1}{4\pi r_2^2}$$

Si l'on tient compte de la dispersion géométrique et de l'absorption atmosphérique (α_{air}), les niveaux sonores en décibels sont :

$$L_{\text{libre},1} = L_w - 10 \lg 4\pi r_1^2 - \alpha_{\text{air},1}$$

$$L_{\text{libre},2} = L_w - 10 \lg 4\pi r_2^2 - \alpha_{\text{air},2}$$

Pour des distances inférieures ou égales à 15 m, l'absorption atmosphérique est faible. Elle est néanmoins prise en compte dans le modèle.

Le niveau de pression sonore au second microphone peut s'exprimer à partir du niveau de référence (obtenu au microphone 1) par la relation :

$$L_{\text{cat},2} = L_{\text{mesuré},1} + \Delta L_2 - \Delta L_1 + \alpha_{\text{air},1} - \alpha_{\text{air},2} - 20 \lg \frac{r_2}{r_1} \quad (3)$$

Un procédé de calage, dont la variable est la hauteur de source, est utilisé afin d'ajuster $L_{\text{cat},2}$ à la valeur réellement mesurée en ce point. On en déduit donc la hauteur de source optimale. Les spectres mesurés correspondent au niveau global maximum enregistré lors du passage du véhicule, c'est-à-dire au droit des microphones.

Dans le but de minimiser d'une part le nombre de paramètres et d'autre part les erreurs éventuelles, toutes les mesures sont effectuées au voisinage d'un sol parfaitement réfléchissant. Les microphones sont également placés au-dessus d'un sol réfléchissant. On évite ainsi les ruptures d'impédance. La largeur de la plateforme de mesure (chaussée et bordure) est de ce fait suffisante.

Pour vérifier la fiabilité de cette technique, et avant de l'employer pour les véhicules, nous l'avons appliquée à une source de bruit rose connue. Cette dernière, constituée d'un ventilateur de 30 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur, est assimilée à une source ponctuelle localisée au centre du ventilateur. Les mesures ont été effectuées sur la piste de référence du LCPC. Plusieurs configurations concernant la position de la source et des microphones ont été testées.

Les résultats de ces premiers tests sont résumés dans le tableau II.

Compte tenu des défauts de planéité de la surface de la chaussée, d'une part, et de l'incertitude liée à la position de la source acoustique équivalente, d'autre part, on peut considérer que l'estimation de cette hauteur pour les configurations choisies est satisfaisante.

Tout d'abord, nous nous intéressons au cas des véhicules légers. Les vitesses ont été volontairement choisies assez élevées par rapport à celles rencontrées en ville, pour privilégier le bruit de roulement.

Les essais ont été effectués sur la piste de référence du LCPC. Le dispositif (fig. 5), est constitué d'une Renault Clio 1,4 l essence et de deux microphones BK demi-pouce. Le véhicule effectue plusieurs passages à vitesse stabilisée : 80 et 100 km/h, devant les microphones. La position du microphone 2 a été imposée par la largeur maximale de la piste. Les spectres mesurés sont obtenus avec un analyseur Hewlett Packard 35665A : ce sont les spectres correspondant au niveau global maximum mesuré lors du passage du véhicule, c'est-à-dire au droit des

microphones. Tous les résultats sont issus d'un moyennage sur plusieurs passages. Les contraintes relatives à la position du véhicule sur la chaussée sont celles contenues dans la norme AFNOR S31-119 (1993), à savoir que le véhicule ne doit pas s'écarter de plus de 50 cm de l'axe médian de la voie d'essai.

Sur la figure 6 est présentée une comparaison mesure-calcul des spectres obtenus à 13 m, respectivement pour une hauteur de source de 20 cm et pour la hauteur de source optimale (5 cm).

TABLEAU II
Hauteurs de source équivalente calculées pour différentes configurations

	Centre du ventilateur à 18 cm du sol (hauteur du début du ventilateur : 9 cm)	Centre du ventilateur à 93 cm du sol (hauteur du début du ventilateur : 84 cm)
Microphone 1 à 7,5 m, 1,2 m Microphone 2 à 13 m, 1,2 m	11,5 cm	75 cm
Microphone 1 à 7,5 m, 1,2 m Microphone 2 à 3,75 m, 1,2 m	14 cm	78 cm
Microphone 1 à 7,5 m, 1,2 m Microphone 2 à 7,5 m, 0,5 m	14 cm	76 cm

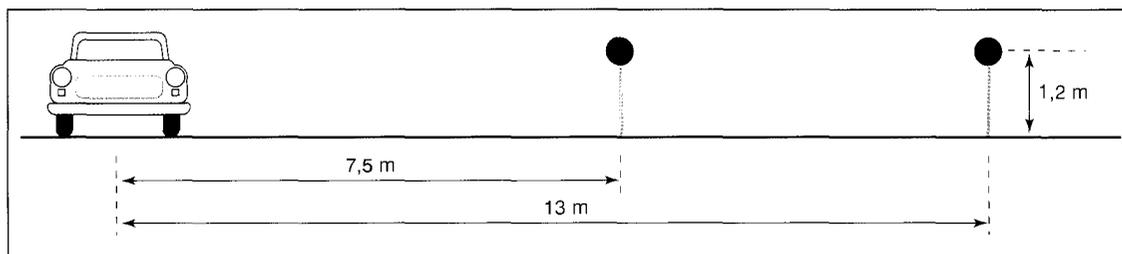


Fig. 5 - Schéma du dispositif.

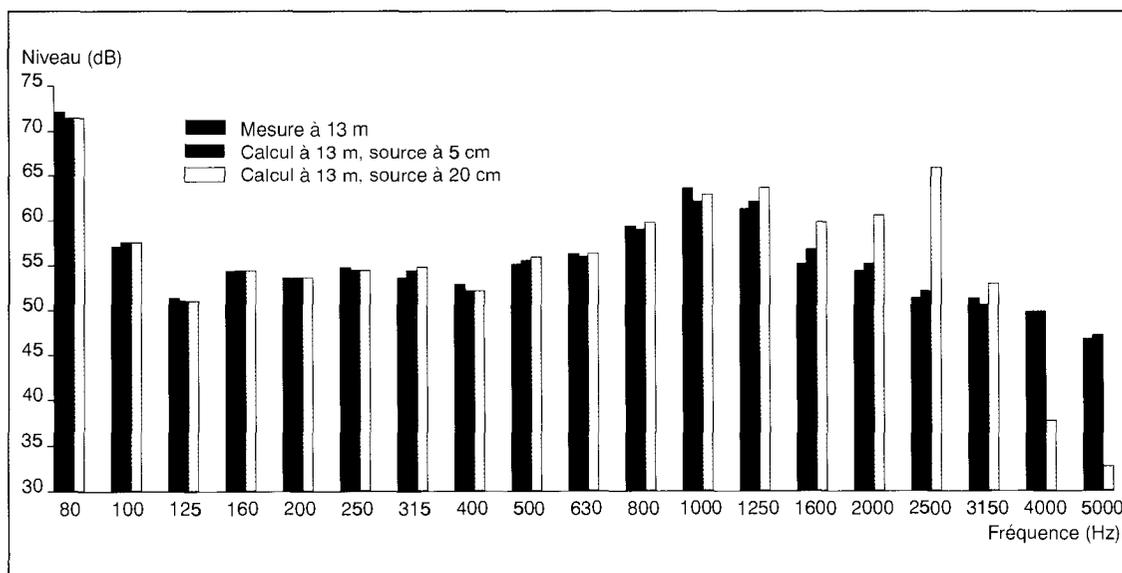


Fig. 6 - Comparaison entre la mesure et le calcul à 80 km/h pour une source située respectivement à 5 et 20 cm du sol.

Cette comparaison confirme que la source sonore équivalente est très proche du sol (quelques centimètres) ; ce qui n'est pas étonnant pour ces vitesses où le bruit de contact pneumatique-chaussée est prédominant. Les hauteurs calculées correspondent à peu près à la moitié de la largeur de la bande de roulement. L'erreur que l'on a constatée précédemment avec la source de bruit rose tend à diminuer lorsque la hauteur de source diminue. Dans notre cas (fig. 6), les hauteurs calculées sont très faibles. Ceci conduit à des interférences quasiment imperceptibles dans la gamme 80 Hz - 5 kHz. Par conséquent, une erreur de quelques centimètres sur la hauteur de source sera négligeable.

D'autres mesures effectuées sur site routier réel (revêtement parfaitement réfléchissant) ont fourni des hauteurs similaires.

Les mêmes mesures effectuées sur des trains routiers ayant des vitesses stabilisées situées entre 60 et 90 km/h ont donné des hauteurs de source identiques à celles trouvées pour les véhicules légers.

Connaissant la hauteur de la source sonore équivalente, il est maintenant possible d'obtenir le spectre de puissance :

$$L_W = L_{\text{mesuré},1} - \Delta L_1 + 10 \lg 4\pi r_1^2 + \alpha_{\text{air},1} \quad (4)$$

Afin de confirmer le bon ajustement trouvé sur les spectres, un calcul identique a été effectué sur les signatures temporelles. Les résultats sont présentés sur la figure 7.

De nouveau, on confirme une hauteur de source faible : la courbe obtenue avec une hauteur de 3 cm est quasiment confondue avec la mesure. Les écarts observés lorsque le véhicule s'éloigne des microphones sont probablement dus à des effets de directivité non pris en compte dans notre calcul. Ces phénomènes se produisent cependant aux fréquences élevées et pour des niveaux sonores assez faibles en regard du niveau global.

L'ensemble de ces résultats montre de façon indiscutable que la source sonore équivalente est située beaucoup plus proche du sol que les 20 cm usuels. Les travaux du LCPC sur la prévision des niveaux sonores (en termes de L_{eq}) à grande distance vont aussi dans le même sens. En effet, l'écart mesure-calcul de 3-4 dB à 100 m pour une hauteur de source de 20 cm, est réduit à environ 1 dB avec une hauteur de source de l'ordre de 5 cm (Bérenghier et al., 1998). Notons que la précision de la mesure est de l'ordre du décibel. Deux exemples figurent dans le tableau III.

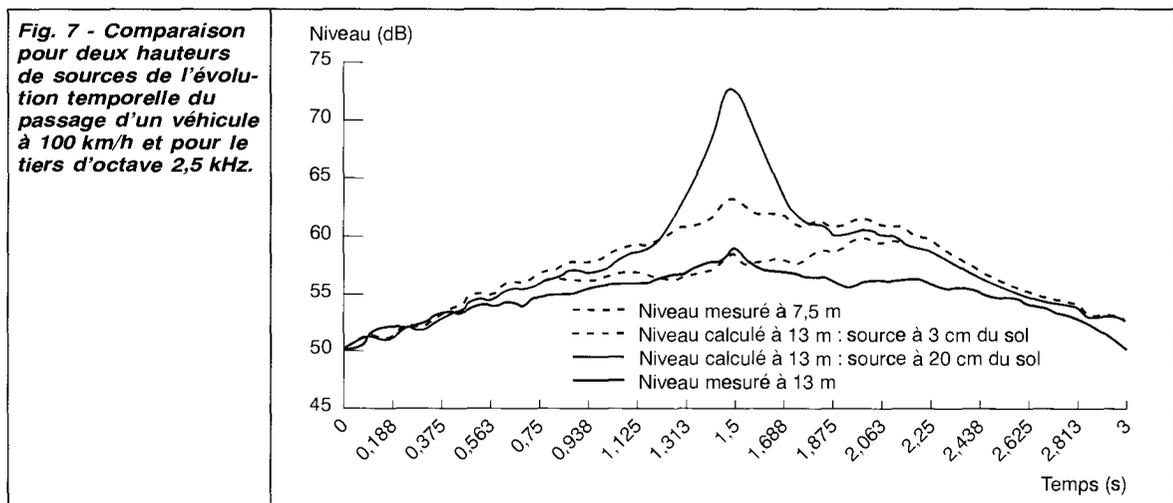


TABLEAU III
Comparaison des valeurs de LAeq calculées pour différentes hauteurs de source et mesurées

Distance à l'axe de la voie	Site n° 1			Site n° 2	
	30 m	60 m	120 m	30 m	100 m
Écart LAeq (1h) calculé (hauteur source de 20 cm) - LAeq(1h) mesuré (dBA)	+ 5,9	+4,9	+ 3,1	- 1	+ 4,2
Écart LAeq (1h) calculé (hauteur source de 3 cm) - LAeq (1h) mesuré (dBA)	- 0,2	- 1	- 1,8	- 0,7	+ 0,4

Dans le cadre d'une collaboration avec le LCPC, l'INRETS a conduit une étude relative à la détermination de la hauteur de source équivalente à partir d'une mesure utilisant une antenne de champ proche. Les résultats confirment, une nouvelle fois, une hauteur de source très faible (Hamet *et al.*, 1998).

Caractérisation acoustique des véhicules en condition urbaine

Dans les paragraphes précédents les vitesses considérées étaient supérieures à 80 km/h, afin de privilégier le bruit de contact pneumatique-chaussée. Dans ce qui suit, nous étudions les sources pour des véhicules circulant à des allures plus représentatives du milieu urbain, à savoir de 30 à 70 km/h.

Modèle de simulation du bruit rayonné par les véhicules (Oshino et Tachibana, 1993)

Le bruit rayonné par un véhicule est constitué de deux sources principales : bruit moteur-échappement et bruit de contact pneumatique-chaussée. Des essais ont été effectués sur trois types de véhicules : véhicule léger, poids lourd et train routier. Les deux sources de bruit précédemment citées ont été mesurées séparément dans diverses conditions ainsi que les paramètres des véhicules comme la vitesse, la vitesse de rotation du moteur et la charge de ce dernier. La puissance acoustique de chacune des sources peut donc être déterminée par régression :

$$\begin{aligned} L_{we} &= A_0 + A_1 S + A_2 L \\ L_{wt} &= B_0 + B_1 \lg(V) \end{aligned} \quad (5)$$

où L_{we} et L_{wt} sont respectivement la puissance acoustique pondérée A émise par le complexe moteur-échappement et celle émise par le contact pneumatique-chaussée ; S est la vitesse de rotation du moteur ; L est la charge moteur sous forme de pourcentage et V la vitesse du

véhicule. Les coefficients de régression sont récapitulés dans le tableau IV.

Méthode LCPC de détermination des hauteurs de source équivalente et des niveaux d'émission en conditions urbaines

Par souci de répétabilité, le dispositif de mesure utilisé pour différents modes de fonctionnement urbains est identique à celui précédemment décrit. Une question se pose toutefois : une vitesse plus faible a-t-elle une influence sur la hauteur de source ? Cette dernière est indispensable pour déterminer la puissance acoustique. Quel que soit le type de véhicule étudié (voiture, motocyclette, cyclomoteur), deux microphones sont nécessaires pour identifier cette hauteur de source équivalente.

Plusieurs modes de fonctionnement (vitesse, régime moteur, accélération) représentatifs du milieu urbain ont été choisis (fig. 8).

La comparaison mesure-calcul dans chacune des configurations étudiées donne des hauteurs de source comprises entre 1 et 3 cm et ce, aussi bien à vitesse stabilisée qu'en accélération ou en décélération. La hauteur de source est donc inchangée et ce, quels que soient la vitesse et le régime moteur du véhicule. Ceci confirme les essais précédents effectués à 80 et 100 km/h. Du fait de la carrosserie et des différents capitonnages qui tendent à diminuer les fuites acoustiques à travers le capot, l'énergie acoustique issue du moteur ne peut se propager que par le dessous du véhicule. Nous mesurons donc principalement la réflexion sur le sol. Ceci conduit de ce fait à une hauteur de source très faible.

La puissance acoustique de ce véhicule peut donc être déterminée comme précédemment (4).

La figure 9 réunit les puissances acoustiques du véhicule pour des accélérations maximales. On notera que les paramètres vitesse et régime moteur sont des paramètres instantanés déterminés au droit des microphones.

TABLEAU IV
Coefficients de régression (Oshino et Tachibana, 1993)

Type de véhicule	A ₀	A ₁	A ₂	B ₀	B ₁
Véhicule léger	78,0	0,0023	0,0055	24,9	38,7
Poids lourd	84,8	0,0042	0,0481	26,2	38,9
Train routier	87,7	0,0031	0,0925	31,6	38,1

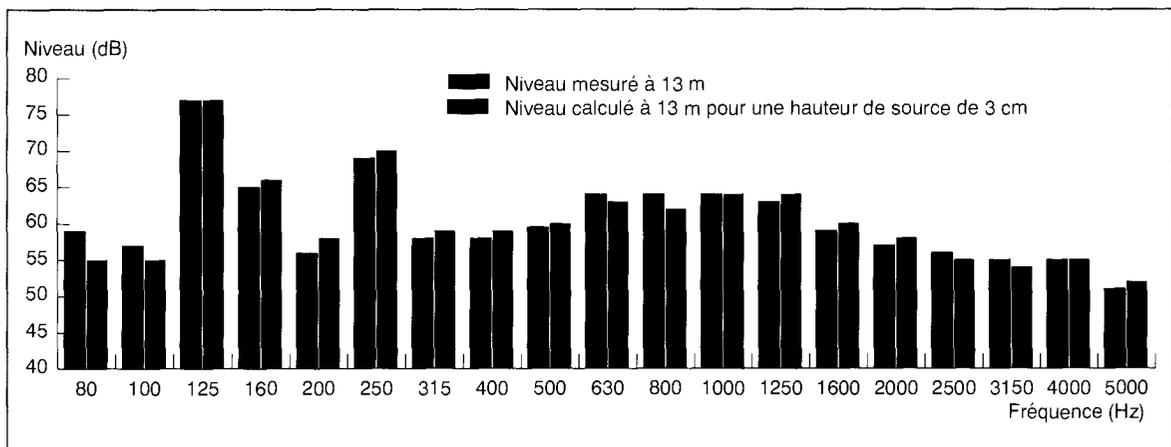


Fig. 8 - Comparaison entre niveau mesuré et niveau calculé pour un véhicule de type Renault Clio en accélération : 50 km/h, 2^{nde}, 3 700 tr/min.

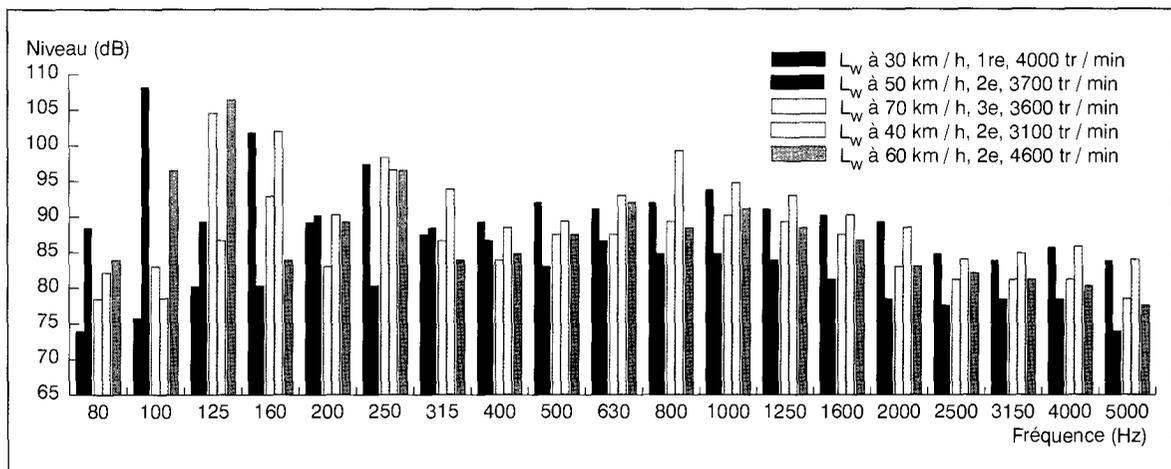


Fig. 9 - Spectres de puissance mesurés d'un véhicule de type Renault Clio en accélération.

Sur la quasi-totalité des tiers d'octave les niveaux sonores augmentent significativement avec le régime moteur, paramètre qui semble être le plus important pour ces vitesses. Les différences les plus marquées sont obtenues en basses fréquences, en dessous de 250 Hz.

Cette région est majoritairement influencée par l'effet du moteur. Cela se traduit par des raies très énergétiques, accompagnées de leurs harmoniques. Celles-ci se déplacent dans le spectre proportionnellement au régime moteur, comme cela se produit classiquement avec les machines tournantes. De plus, ces fréquences varient linéairement avec le nombre de cylindres. La position de la raie fondamentale est déterminée par la relation :

$$f(\text{Hz}) = \frac{r}{60} * \frac{n}{2} \quad (6)$$

où r est le régime moteur en tr/min et n le nombre de cylindres du véhicule considéré. Le facteur 2 est représentatif d'un moteur à quatre temps. En effet, le processus complet de combustion, pour

ce type de moteur, déclenche une explosion tous les 2 aller-retour du piston. Cette expression est également utilisée par Ng et al. (1998).

Malgré une résolution de mesure limitée au tiers d'octave, un très bon accord a été trouvé entre les raies calculées et celles mesurées. Pour vérifier de façon plus précise cet accord, une mesure en bandes fines serait indispensable.

Au-dessus de 250 Hz, les formes spectrales sont identiques quels que soient la vitesse et le régime moteur. Les spectres se déduisent les uns des autres par simple translation de niveau. La modélisation en sera de ce fait grandement simplifiée.

Dans la littérature (Oshino et Tachibana, 1993), les niveaux déterminés sont des niveaux globaux. Des niveaux tiers d'octave sont plus appropriés, notamment pour l'approche propagative. À partir de mesures où la vitesse, le régime moteur et l'accélération sont connus, il est possible de déterminer, par régression, les paramètres d'une loi de variation des niveaux sonores.

Plusieurs lois ont été examinées. La meilleure corrélation a été obtenue avec la loi de régression suivante :

$$L_w = 10 \lg [10^{(a_0 + a_1 S + a_2 A)/10} + 10^{(a_3 V)/10}] \quad (7)$$

où S est le régime moteur (tr/min), A l'accélération ($m.s^{-2}$), V la vitesse (km/h) et a_0, a_1, a_2, a_3 les coefficients de régression. On obtient donc quatre coefficients par tiers d'octave (tableau V).

La relation (7) est proche de l'expression (5). La seule différence réside dans le fait que le bruit de roulement et le bruit moteur-échappement ne sont pas identifiés séparément. L'expression de la puissance acoustique est donc unique, avec une seule constante a_0 . Dans cette approche, la charge moteur a été remplacée par l'accélération, paramètre semblable mais plus facilement mesurable. En effet, le pourcentage de charge moteur s'exprime en fonction des rapports de boîte de vitesse, de l'efficacité de la transmission, des coefficients de résistance au roulement et de résistance de l'air et du poids équivalent des parties du véhicule en rotation. Ce paramètre est donc impossible à mesurer avec les moyens dont nous disposons.

Les régressions ont été déterminées pour un échantillon d'environ 80 passages de la Renault Clio 1,4 l.

Les mesures ont été effectuées pour des vitesses comprises entre 30 et 80 km/h, des régimes moteur compris entre 2 300 et 4 600 tr/min et des accélérations allant de $-0,6$ à $+1,9 m.s^{-2}$. Les lois sont déterminées pour chaque tiers d'octave, à l'exception de ceux pour lesquels où apparaissent des raies moteur définies par la relation connue :

$$f(\text{Hz}) = \frac{S}{30} \quad (8)$$

Dans ce cas, on applique la régression uniquement sur les raies de fréquence représentatives du bruit moteur (fondamentale et harmoniques). Le paramètre vitesse, conformément à l'intui-

tion, n'a aucune influence, sauf pour les harmoniques où une légère dépendance apparaît.

Une comparaison mesure-calcul est représentée sur la figure 10.

Un bon accord général a été obtenu sur tout le spectre et pour tous les cas étudiés. Les imprécisions les plus importantes se situent en basse fréquence mais leur effet, déjà faible, devient négligeable lorsque le niveau global est exprimé avec la pondération A.

Le régime moteur est un paramètre très important dans la détermination des spectres des sources sonores de type routier. Pour l'ensemble de nos mesures, nous nous sommes fiés aux indications données par le compte-tours. Connaissant les caractéristiques mécaniques des véhicules (rapports de boîte), il est possible de déterminer des approximations de la relation vitesse-régime moteur. Ne possédant pas les caractéristiques de la Renault Clio, nous avons déterminé cette loi à partir des points expérimentaux recueillis lors des essais. C'est approximativement une loi linéaire du même type que celle déterminée dans la littérature par Oshino et Tachito (1993) :

$$s = \frac{C^{te}}{r} V \quad (9)$$

S est exprimé en tr/min, V en km/h, r est le rapport engagé (première, seconde, etc.) et $C^{te} \approx 154$ pour notre véhicule d'essai.

Dans l'hypothèse où nous connaissons les caractéristiques mécaniques des véhicules étudiés, il devient aisé de prévoir la vitesse de rotation du moteur pour une vitesse donnée. Les indications du compte-tours sont, par conséquent, superflues.

Cette modélisation est aussi applicable, moyennant quelques modifications, aux cyclomoteurs d'une cylindrée inférieure à 50 cm^3 , moyen de transport particulièrement répandu en ville. Ce paragraphe sera consacré à l'étude d'un cyclomoteur de type Peugeot 103 SP2 (fig. 11).

TABLEAU V
Quelques coefficients de régression a_0, a_1, a_2, a_3 calculés pour le véhicule de type Renault Clio

	a_0	a_1	a_2	a_3
315 Hz	75,5487	0,0011	4,3526	42,8996
1 000 Hz	64,0057	0,0054	3,8413	47,6009
2 000 Hz	57,1702	0,0064	1,8092	43,3546
5 000 Hz	52,8894	0,0061	2,3229	37,7349

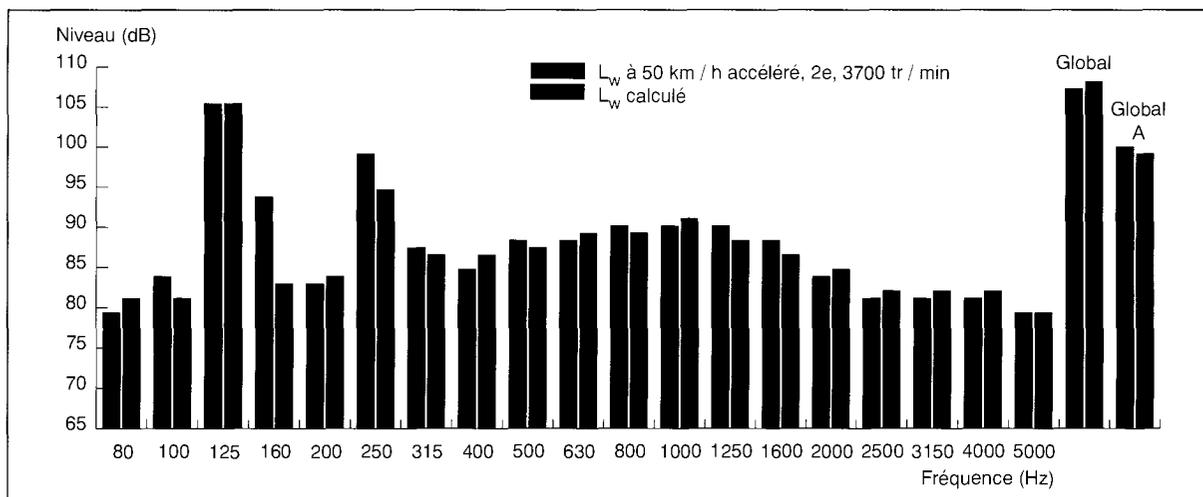


Fig. 10 - Comparaison entre les puissances acoustiques calculée et mesurée en régime accéléré à 50 km/h.

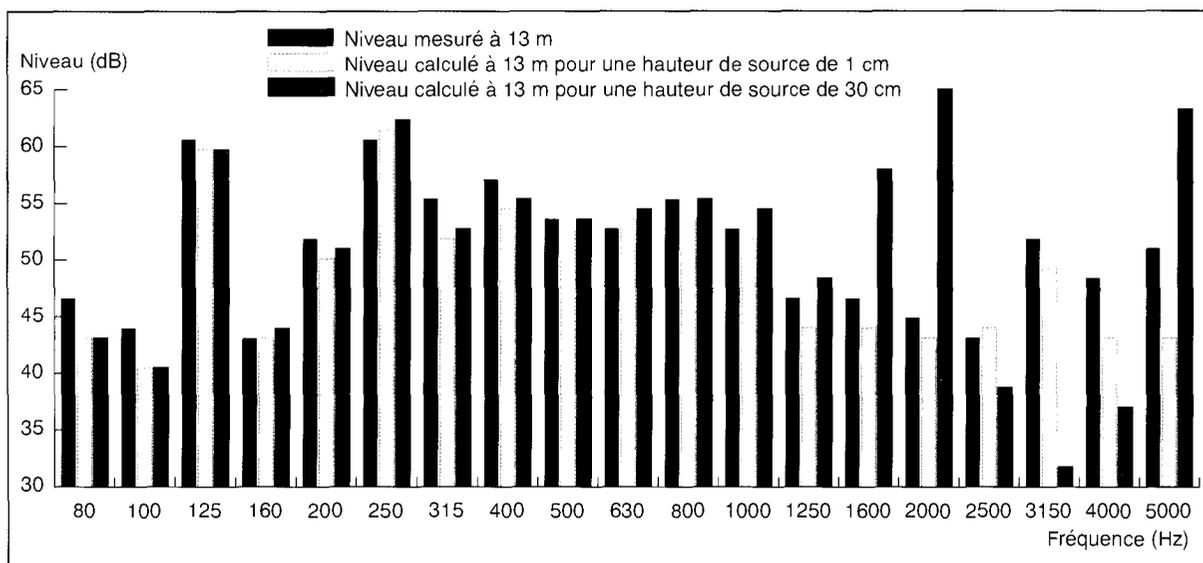


Fig. 11 - Comparaison entre niveau mesuré et niveau calculé pour un Peugeot 103 SP2 à l'arrêt : hauteurs source respectives de 30 et 1 cm.

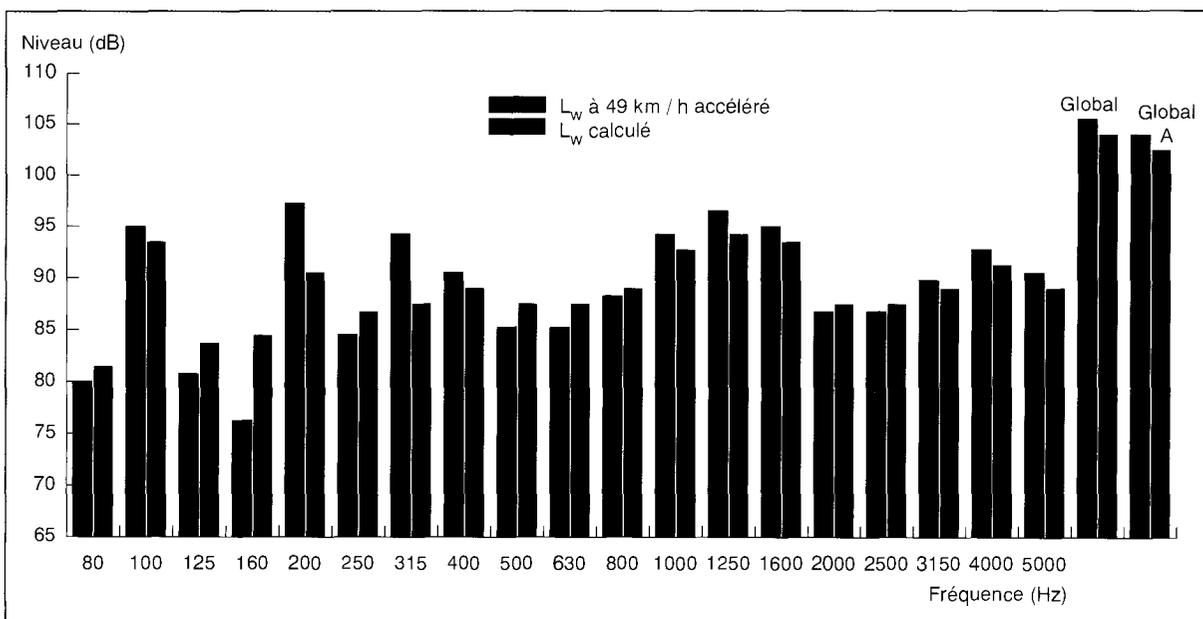


Fig. 12 - Comparaison entre les puissances acoustiques calculées et mesurées en régime accéléré à 49 km/h.

Nous nous sommes, dans un premier temps, placés à l'arrêt face aux microphones, afin d'estimer la position de la source sonore équivalente en l'absence de bruit de roulement.

On constate de nouveau, malgré quelques imprécisions, une hauteur de source ponctuelle très proche du sol, même avec un moteur situé à environ 30 cm de hauteur par rapport au sol. Cette hypothèse sera validée uniquement si les moteurs de cyclomoteurs présentent une directivité prononcée vers le bas. Nous retrouvons dans ce cas une hauteur mesurée correspondant à la réflexion sur le sol. Des essais complémentaires utilisant une technique d'intensimétrie sont en préparation afin de déterminer la validité d'une telle hypothèse. On notera que des résultats similaires ont été enregistrés sur les motocyclettes.

Contrairement au cas des véhicules légers ou des motocyclettes, les cyclomoteurs ne possèdent pas de compte-tours. Or, le régime moteur est un paramètre essentiel dans le modèle que nous développons. Afin de l'estimer, nous effectuons une procédure inverse à partir de la fréquence expérimentale de la raie et nous pouvons ainsi remonter au régime moteur. Rappelons que les cyclomoteurs possèdent des moteurs 2 temps monocylindres, pour lesquels il se produit une explosion à chaque aller-retour du piston. Dans ce cas, la loi de détermination des raies moteur peut s'écrire :

$$f(\text{Hz}) = \frac{S}{60} \quad (10)$$

Les raies moteur mesurées sont obtenues par tiers d'octave. En interpolant ces résultats il est possible de déterminer une loi linéaire vitesse-fréquence. En effet, pour un cyclomoteur, les caractéristiques mécaniques sont très difficiles, voire impossibles, à obtenir, en raison de son mode de fonctionnement avec variateur. Par conséquent, nous ne déterminons pas une loi régime moteur-fréquence mais nous conservons la loi vitesse-fréquence. Les cyclomoteurs ayant tous la même cylindrée et beaucoup de caractéristiques communes, cette loi devrait être valable pour la plupart d'entre eux. La suppression du paramètre régime moteur est rendue possible en raison de la dépendance quasi-linéaire de ce dernier par rapport à la vitesse et vice-versa.

Des résultats corrects ont été obtenus, malgré quelques écarts en basse fréquence (fig. 12).

Conclusion et perspectives

Une méthode d'estimation de la hauteur de source sonore équivalente a été mise au point. C'est une méthode simple car elle n'utilise que

deux microphones. Les diverses validations effectuées montrent sa fiabilité. Les hauteurs trouvées sont toujours très proches du sol, que ce soit en phase stabilisée, accélérée ou décélérée. Ceci s'explique bien dans le cas d'un véhicule léger, mais plus difficilement pour un cyclomoteur ou une motocyclette. Des essais complémentaires utilisant une technique intensimétrique sont prévus pour déterminer la directivité de telles sources.

La puissance acoustique par tiers d'octave a pu être modélisée par une loi simple, sur les véhicules légers dans un premier temps puis sur les cyclomoteurs et les motocyclettes. Une première validation de ces résultats (hauteur de source équivalente pour les véhicules légers) a été obtenue par une méthode d'antenne acoustique en champ proche développée à l'INRETS.

Lorsque les caractéristiques acoustiques des sources de type mécanique seront connues, il faudra par la suite effectuer une étude statistique, qui déterminera pour un ensemble de périodes représentatives qui seront à définir (jour-nuit, jours de semaine, week-end, périodes de vacances, saisons, etc.) le nombre et le pourcentage de présence de chacune d'elles. Afin d'affiner la caractérisation de ce type de sources, les critères d'émergence et de répétitivité pourront être également abordés.

Connaissant les modèles propagatifs en milieu urbain (Picaut, 1999), il sera possible par la suite, à partir de mesures réelles effectuées sur site, de remonter aux paramètres de source en utilisant des méthodes inverses. On pourra ainsi, à partir de ces deux approches (directe et inverse), simuler ces sources particulières par un jeu de sources élémentaires dont chacune aura des critères de rayonnement différents (tant en amplitude qu'en fréquence). Des mesures en chambre anéchoïque pourront permettre de valider les outils proposés.

Le site de mesure choisi se trouve sur la commune de Rezé, dans la proche banlieue nantaise. Celui-ci paraît idéal car, d'une part, il regroupe bon nombre de sources sonores mécaniques (voitures, autobus, tramways, trains) et, d'autre part, il fait l'objet d'un projet de transformation (actuellement à l'étude au sein des services techniques de la ville). Ainsi, au terme de cette étude, nous pourrions comparer les ambiances sonores calculées à partir des divers modèles (sources et propagation) à celles mesurées in situ avant et après réalisation des travaux d'aménagement.

- AFNOR (1993), *Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées*, **NF 531-119**.
- BÉRENGIER M., HAMET J.-F. (1997), Étude acoustique des milieux poreux ; application aux revêtements drainants, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **212**, novembre-décembre, pp. 65-74.
- BÉRENGIER M., HAMET J.-F., PICHAUD Y. (1998), Effects of the acoustical characteristics of road pavements on long range sound propagation, Proceedings of the 16th ICA/135th ASA-Seattle, *J. Acoust. Soc. Am.* **103(5)**, pt. 2, p. 2919.
- CETUR (1980), *Guide du bruit des transports terrestres, Préviation des niveaux sonores*, 317 pages.
- COULSON R. (1996), *Method for measuring vehicle noise source height and subsorce spectra*, Transportation Research Record 1559, pp. 8-13.
- DELANY M.E., BAZLEY E.N. (1970), Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Appl. Acoust.* **3**, pp. 105-116.
- FAVRE B.-M. (1983), Noise emission of road vehicles : evaluation of some simple models, *Journal of sound and vibration* **91(4)**, pp. 571-582.
- GLEGG S.A.L., YOON J.R. (1990a), Determination of noise source heights, Part I : the measurement of equivalent acoustic source height above a reflecting surface, *Journal of Sound and Vibration*, **143(1)**, pp. 19-37.
- GLEGG S.A.L., YOON J.R. (1990b), Determination of noise source heights, Part II : the measurement of the equivalent acoustic source height of highway vehicles, *Journal of Sound and Vibration* **143(1)**, pp. 39-50.
- HAMET J.-F. (1996a), *Bruit de trafic routier, Abaques d'émission du modèle de prévision allemand : RLS 90*, Rapport MMA 9609, 41 pages.
- HAMET J.-F. (1996b), *Bruit de trafic routier, Abaques d'émission du modèle de prévision américain : FHWA Traffic Noise Model*, Rapport MMA 9603, 33 pages.
- HAMET J.-F., PALLAS M.A., GAULIN D., BÉRENGIER M. (1998), Acoustic modeling of road vehicles for traffic noise prediction : determination of the sources heights, Proceedings of the 16th ICA/135th ASA-Seattle, *J. Acoust. Soc. Am.* **103(5)**, pt. 2, pp. 2919-2920.
- LELONG J. (1997), *Influence des véhicules lourds sur un bruit de trafic interurbain, Tests de sensibilité PL/TR, INRETS*, Rapport MMA 9701, 16 pages.
- NG W.T., YUEN M.M.F., TO W.M. (1998), Characterization of vehicle noise in Hong Kong, Proceedings of the 16th ICA/135th ASA-Seattle, *J. Acoust. Soc. Am.* **103(5)**, pt. 2, p. 3009.
- PICAUT J. (1999), Modélisation de la propagation du son en milieu urbain par un processus de diffusion, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **222**, juillet-août.
- OSHINO Y., TACHIBANA H. (1993), *Prediction of road traffic noise taking account of transient running conditions of vehicles*, Inter-noise 93, p. 629-632.
- RASMUSSEN K.B. (1982), Propagation of road traffic noise over level terrain, *Journal of Sound and Vibration* **82(1)**, pp. 51-61.
- WOLOSZYN Ph. (1998), *Caractérisation dimensionnelle de la diffusivité des formes architecturales urbaines*, Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 260 pages.

ABSTRACT

Characterization of the sources of road noise for urban areas

D. GAULIN, M. BÉRENGIER

As it is not possible to model all the sources of road noise individually, we have classified them according to type and compared our classification to existing ones. The results obtained were similar. Modelling in terms of an equivalent point source was firstly conducted for a light vehicle travelling at constant speeds of 80 km/h or above, for which tyre-road contact noise is predominant. A method was developed to determine the height of this equivalent omnidirectional point source. This was identified as being near the ground, which confirms the findings of a study conducted by INRETS (National Institute of Transport and Safety Research). It is then possible to calculate the acoustic power of the source. This method was then applied to light vehicles and mopeds travelling at what is termed urban speeds (between 30 and 70 km/h). Extremely precise formulae for forecasting emission levels (acoustic power) for each one-third of an octave have been developed. In the future these models of sources will be included in software that computes sound propagation in urban areas.