

Caractérisation et identification des sources sonores en milieu urbain

Jean-Pierre Péneau, Philippe Woloszyn,

CERMA (UMR CNRS 1563),
11, rue Massenet,
44300 Nantes,
tél. : 02 40 16 01 37,
fax : 02 40 59 16 70

Michel Bérengier, David Gaulin,

Laboratoire centre des ponts et chaussées (LCPC),
Centre de Nantes, route de Bonaye,
BP 19,
44340 Bouguenais,
tél. : 02 40 84 59 03,
fax : 02 40 84 59 98,
e-mail : michel.berengier@lcpc.fr

La maîtrise du champ d'étude de l'acoustique urbaine passe à la fois par la conception d'outils d'analyse de l'environnement relevant de champs de compétences ouverts et variés, et par la construction de modèles cohérents représentatifs des méthodes interdisciplinaires d'investigation opératoire. C'est dans cette perspective que nous nous proposons d'exposer une méthode de caractérisation et d'identification des sources sonores en milieu urbain.

Dans un premier temps, nous exposons une méthode de décomposition structurelle d'un environnement sonore en objets sonores. Elle nous permet de quantifier l'influence de chacune des classes de sources sur la globalité de l'environnement.

Cette caractérisation quantitative des sources du paysage sonore urbain repose sur leur classification en termes de spectre et de puissance acoustique, en distinguant deux catégories : celles d'origine mécanique et celles d'origine humaine.

Toutes les sources sonores de type routier ne pouvant être modélisées, un classement est établi puis comparé à ceux déjà existants. La modélisation en terme de source sonore ponctuelle équivalente est dans un premier temps 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. Des valeurs faibles ont été relevées. Elles ont été confirmées dans le cadre d'une étude réalisée par l'INRETS (Institut national de recherches sur les transports et leur sécurité). La puissance acoustique de cette source peut maintenant 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 bonne précision.

Ces modèles de sources doivent être intégrés dans un logiciel de propagation du son en milieu urbain.

Dans le but d'apporter des solutions aux questions d'environnement sonore dans le cœur de nos agglomérations, le Pir-Villes a soutenu en 1994 une action de recherche intitulée "Vers un logiciel prédictif des ambiances sonores urbaines". Le projet comportait trois volets :

- La propagation du son en milieu urbain [1], LAUM (Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine, UMR CNRS 6613).
- La modélisation diffusive de la morphologie urbaine [2], CERMA (Centre d'études et de recherches méthodologiques d'architecture, UMR CNRS 1536), LCPC4 (Laboratoire central des ponts et chaussées, centre de Nantes).
- La caractérisation et l'identification des sources sonores en milieu urbain.

Ce dernier volet est également soutenu par le ministère de l'environnement. Il s'organise suivant deux modalités : une approche structurelle décomposant l'environnement sonore en objets quantifiables en terme d'émergence et une approche quantitative permettant d'identifier ces sources par des critères physiques.

Approche structurelle de l'environnement sonore

Environnement et paysage sonore

Le Paysage sonore, traduction impropre du vocable Soundscape, caractérise tout d'abord une attitude face au monde, celle d'une dimension oubliée de l'homme perdu dans son vertige technologique : l'écoute du monde [3].

A partir de celle-ci, une classification des qualités d'écoute des objets sonores de notre environnement distingue le paysage sonore "HI-FI" (Haute Fidélité) du paysage "Low-FI" (Basse Fidélité), caractérisant la "capacité d'un environnement sonore à nous restituer une image véhiculant un sens et une identité", ce que nous entendons ici par le terme de phonicité [4].

La phonicité, mesure de l'adéquation entre l'image sonore perçue et ce qu'elle évoque, décrit à la fois la qualité de l'identification par l'écoute de toutes les composantes d'un paysage sonore, et la capacité pour l'auditeur d'y trouver un sens, c'est-à-dire de reconnaître une organisation pertinente et naturelle de ses éléments constitutifs, en résumé, d'y identifier les objets sonores [5].

nettement des sources mécaniques : moyennes fréquences pour les pas (impacts de talons), moyennes et hautes fréquences avec, de surcroît, une forte harmonicité pour les voix et discussions.

Complexité et interdépendance des paramètres de la caractérisation acoustique du cadre bâti

La présence simultanée de plusieurs modes de filtrage des sources sonores implique une très grande variabilité de réaction de l'espace construit aux événements qui le sollicitent.

Ces modes dépendent à la fois de la composition spectrale et des régimes transitoires (dynamiques) induits par les sources en présence ; de plus, comme ces modes de propagation se recoupent fortement, des régimes que l'on pourrait qualifier d'interférentiels empêchent toute appréhension du phénomène par un modèle de comportement simple.

Ce recouvrement de la décroissance spectrale d'événements sonores similaires nous révèle un comportement spécifique du cadre bâti aux sources sonores excitatrices. Ceci nous confirme que les variables espace construit et sources sonores sont difficilement isolables dans l'étude du comportement acoustique du cadre bâti, du fait de la complexité des interactions en jeu.

De ce fait, les méthodes de simulation en acoustique virtuelle actuellement pratiquées en acoustique des salles sont invalides dans le cadre du tissu urbain des centre-ville : il semble en effet impossible de définir une fonction de transfert unique susceptible de constituer un modèle de comportement fiable pour toutes les sources sonores urbaines interagissant avec le bâti.

La méthodologie permettant d'appréhender la fonction de transfert du filtre de l'architecture urbaine doit nécessairement tenir compte de la complexité imbriquée de la morphologie du tissu et de la structuration multisource de l'environnement sonore.

L'observation, l'élémentarisation et la mesure de l'interaction des principales sources sonores en jeu dans l'environnement construit représentent donc les conditions préliminaires indispensables à la compréhension des phénomènes de propagation.

C'est cette mesure de l'impact acoustique des sources sonores comprise dans les champs dimensionnels de la perception de l'objet sonore que nous nous proposons de mettre au jour dans la suite de cette communication.

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

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

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux sources d'origine mécanique et plus particulièrement à celles de type routier.

Approche quantitative de l'environnement sonore

Classement des sources sonores d'origine routière

De nombreux écrits font référence au classement des sources sonores d'origine routière comme le guide du bruit [7].

Une première campagne de mesures a été effectuée en janvier 1997 afin de vérifier l'adéquation des véhicules actuels au modèle du Guide du bruit. Les résultats nous ont permis de distinguer 2 grandes classes de véhicules (en omettant les deux roues) :

- Les véhicules légers : voitures particulières et utilitaires,
- Les poids lourds et trains routiers.

Nous retrouvons la même classification que le Guide du bruit.

D'un point de vue spectral, la différence entre train routier et véhicule léger se fait nettement sentir en basse et moyenne fréquences. Les utilitaires quant à eux présentent un spectre similaire à celui des véhicules légers.

Premiers pas vers la modélisation des véhicules

Après avoir vérifié la classification, il s'agit maintenant de modéliser ces véhicules en terme de source sonore équivalente, c'est-à-dire déterminer un ensemble de paramètres, dont la hauteur de la source sonore équivalente et sa puissance. Ces résultats constitueront les données d'entrée du modèle de diffusion du son en milieu urbain développé par J. Picaut et P. Woloszyn.

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. Implantée telle quelle dans le modèle, cette énergie sonore issue de ces sources sonores serait influencée une seconde fois par le cadre bâti.

Différents modèles rencontrés dans la littérature [8] permettent de représenter, de façon simple, les sources sonores que sont les véhicules. La source monopolaire fournit une représentation satisfaisante de la réalité.

Détermination des hauteurs de sources sonores équivalentes [9, 10]

La validité du concept de source monopolaire étant maintenant acquise, il s'agit de déterminer la position de cette source ponctuelle. Sa hauteur 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. Une méthode de mesure a été développée en utilisant un réseau vertical de sept microphones. L'objectif est d'appliquer cette procédure à des véhicules circulant sur autoroute. Il a été trouvé dans le cadre de cette étude des hauteurs respectives de 1,2 m pour les trains routiers, 0,7 m pour les poids lourds et 0,6 m pour les véhicules légers.

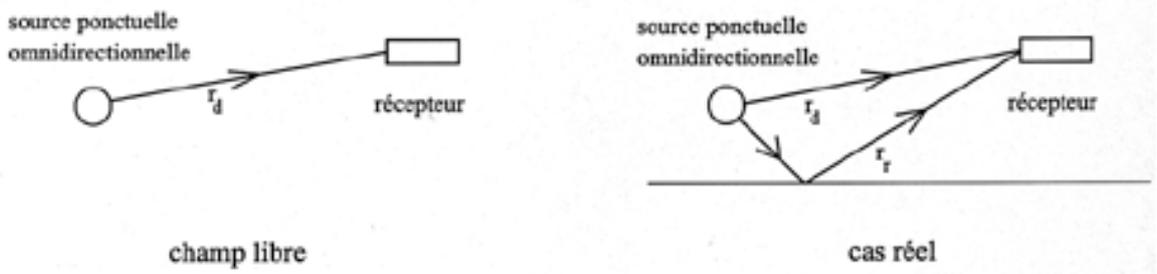


Fig. 2 : Schéma montrant les distances de propagation en champ libre et en présence d'un sol

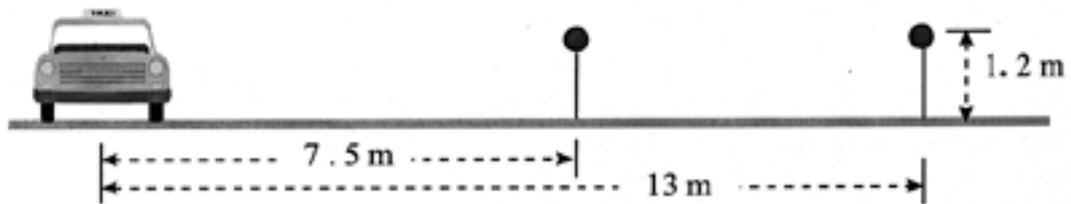


Fig. 3 : Schéma du dispositif

Méthode 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. A cet effet, nous employons le modèle de propagation " PL-PROPATE ". Les véhicules seront modélisés par une source de type monopolaire.

Afin 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. L'atténuation excédentaire est la suivante :

$$Att = 10 \text{Log} \left[\frac{p_r}{p_i} \right]^2 = 10 \text{Log} \left\{ 1 + \frac{r_d^2}{r_r^2} + \frac{2r_d}{r_r} \cos \left[\frac{2\pi f}{c} (r_r - r_d) \right] \right\} \quad (1)$$

avec p_i la pression acoustique en champ libre, p_r la pression en présence d'un sol, f la fréquence considérée (Hz) et c la célérité du son (m/s).

Pour vérifier la fiabilité de cette technique avant de l'appliquer aux véhicules, nous avons utilisé une source de bruit rose connue. L'estimation de cette hauteur pour les configurations choisies est satisfaisante.

Dans un premier temps, nous nous intéressons au cas des véhicules légers. Les vitesses ont été volontairement choisies assez élevées afin de privilégier le bruit de roulement. Les essais ont été effectués sur piste de référence comme illustré figure 3.

Sur la figure 4 est représentée une comparaison mesure-calcul des spectres de niveaux obtenus à 13 m pour la hauteur de source optimale (5 cm).

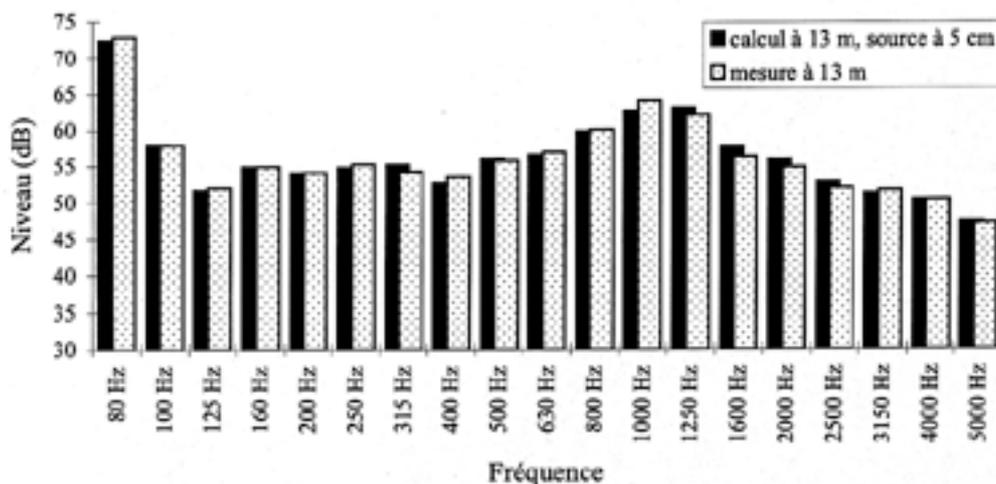


Fig. 4 : Comparaison entre le calcul et la mesure à 80km/h pour une source située à 5 cm du sol

Ces comparaisons confirment que les sources sonores équivalentes sont situées très près du sol ; ceci n'est pas étonnant pour ces vitesses où le bruit de contact pneumatique-chaussée est prédominant. Connaissant la hauteur de la source sonore équivalente, il est maintenant possible de calculer le spectre de puissance.

Caractérisation acoustique des véhicules en conditions urbaines

Dans les paragraphes précédents les vitesses considérées étaient relativement élevées afin de privilégier le bruit de roulement. Dans ce qui suit, nous étudions 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 [11]

Le bruit rayonné par un véhicule est constitué de deux sources principales : bruit moteur-échappement et bruit de contact pneumatique-chaussée. Les deux sources de bruit précédemment citées ont été mesurées séparément dans diverses conditions ainsi que les paramètres des véhicules. La puissance acoustique de chacune des sources peut donc être déterminée par régression :

$$L_{we} = A_0 + A_1 S + A_2 L \tag{2}$$

$$L_{wt} = B_0 + B_1 \text{Log}(V)$$

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.

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

Les hauteurs de source sonore équivalente calculées pour des modes de fonctionnement typiquement urbain sont inchangées. 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.

La région basses fréquences des spectres de puissance acoustique des véhicules est majoritairement influencée par l'effet moteur. Cela se traduit par des "raies" très énergétiques accompagnées de leurs harmoniques. La position de la raie fondamentale est déterminée par la relation :

$$f(\text{Hz}) = \frac{r}{60} \cdot \frac{n}{2} \tag{3}$$

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. Un très bon accord a été trouvé entre les raies calculées et celles mesurées.

A 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 par tiers d'octave. La meilleure corrélation a été obtenue avec la loi de régression suivante :

$$L_w = 10 \text{Log} \left(10^{(a_0 + a_1 S + a_2 A) / 10} + 10^{(a_3 \text{Log} V) / 10} \right) \tag{4}$$

où : S est le régime moteur (tr/mn), A l'accélération (m.s^{-2}), V la vitesse (km/h) et a_0, a_1, a_2, a_3 les coefficients de régression. Une comparaison mesure-calcul est représentée figure 5.

Un bon accord général a été obtenu sur tout le spectre et pour tous les cas étudiés.

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. On constate de nouveau, malgré quelques imprécisions, une hauteur de source ponctuelle très proche du sol. Cette hypothèse sera validée uniquement si les moteurs de cyclomoteurs présentent une directivité prononcée vers le bas. Des résultats corrects, à l'image de ceux obtenus pour les véhicules légers, ont été obtenus.

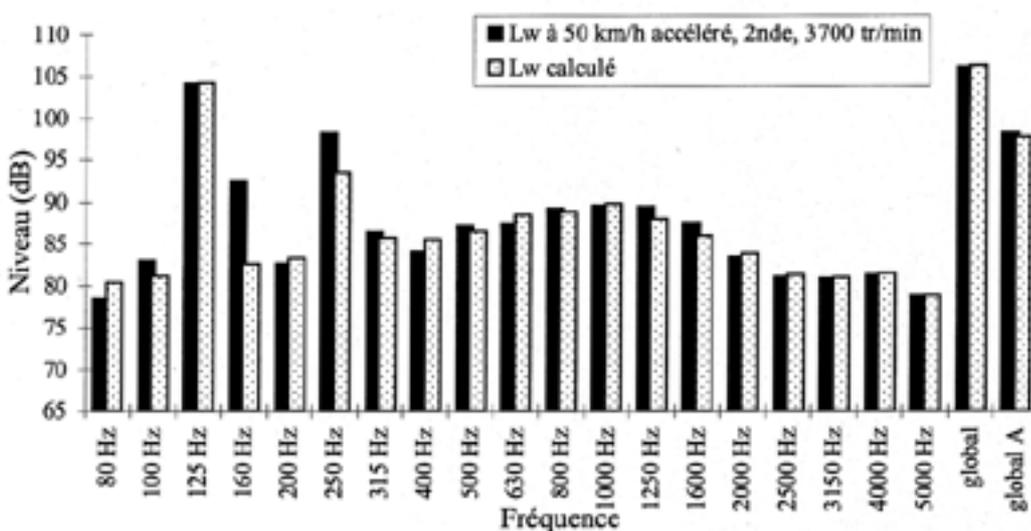


Fig. 5 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 50 km/h

Conclusion et perspectives

Les méthodologies structurales et quantitatives que nous venons d'aborder nous permettent d'appréhender la complexité imbriquée de la structuration objectuelle et de la composition multisource de l'environnement sonore en milieu urbain.

Une première approche structurale consistant à décomposer l'environnement sonore urbain en objets sonores a été explicitée. Elle permet de qualifier le "mixage" des sources sonores en termes d'émergence. L'analyse du mélange sonore obtenu montre une bonne reconnaissance des ensembles de sources ainsi identifiés.

Une méthode d'estimation quantitative de la hauteur de source sonore équivalente a ensuite été mise au point. 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 d'intensimétrie sont prévus pour déterminer la directivité de telles sources.

La puissance acoustique par tiers d'octave a pu être modélisée par une loi simple. 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.

Concernant les sources d'origine humaine, une première campagne de mesure réalisée dans une école a permis de dégager quelques enseignements concernant la simulation de groupes de personnes par un ensemble de sources ponctuelles. Une seconde campagne de mesure est prévue bientôt afin de valider cette hypothèse de modélisation.

Par la connaissance des modèles propagatifs en milieu urbain et de l'organisation morphologique des formes construites, il sera possible, 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 d'elles aura des critères de rayonnement différents.

Références bibliographiques

- [1] Picaut J., Modélisation des champs diffus par une équation de diffusion, Thèse de doctorat de l'Université du Maine, spécialité Acoustique, 125 pages, 1998.
- [2] Woloszyn P., Caractérisation dimensionnelle de la diffusivité des formes architecturales urbaines, Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 260 pages, 1998.
- [3] Schäffer R. M., Le paysage sonore, Ed. JC Lattès, 309 pages (éd. originale The tuning of the world, A. Knopf Inc. New York), 1981.
- [4] Moles A.A., Théorie structurale de la communication et société, Paris, Masson/CNET/ENST, 295 pages.
- [5] Schaeffer P., Traité des objets musicaux, Paris, Seuil, 710 pages, 1966.
- [6] Zwicker E., Feldkeller R., Psychoacoustique, Paris, Masson, 237 pages, 1981.
- [7] Woloszyn P., Environnement sonore urbain : aspects acoustiques et psychoacoustiques, in : 2e journée thématique du groupe Bruits, sons et vibrations, Aix-en Provence, novembre 1995.
- [8] Guide du bruit des transports terrestres. Préviation des niveaux sonores. CETUR, 317 pages, 1980.
- [9] Favre B., Noise emission of road vehicles : evaluation of some simple models, J. Acoust. Soc. Am. 91 (4), PP 571-582, 1983.
- [10] Glegg S. A. L., J. R. Young, 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, 1990.
- [11] Glegg S. A. L., J. R. Yoon, 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, 1990.
- [12] Oshino Y., Tachibana H., Prediction of road traffic noise taking account of transient running conditions of vehicles, Inter-noise 93, PP 629-632, 1993.
- Meriel B. et al., Blois : le bruit dans la ville, Rapports de recherche et note de synthèse des laboratoires des ponts et chaussées, Ministère de l'environnement et du cadre de vie, LPC Blois, 1980.