

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Emission acoustique des deux-roues motorisés : motocyclettes

Hubert LEFEVRE^{1,4}, Loïc TOUSSAINT^{2,4}, Guillaume DUTILLEUX^{2,4}, Laurianne BARGUET³

¹ Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, 8-10 rue Palissy, F-63017 Clermont-Ferrand Cedex 2

² ERA32 « Acoustique » LCPC, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, 11 rue Jean Mentelin, F-67035 Strasbourg Cedex 2

³ 2 impasse du Meunier, 63430 Les Martres d'Artière, laurianne.barguet@hotmail.fr

⁴ {hubert.lefevre, loic.toussaint, guillaume.dutilleux}@developpement-durable.gouv.fr

Les deux-roues motorisés ont une place particulière dans le paysage sonore urbain: ils représentent une faible part de la circulation routière et du niveau sonore global engendré par une infrastructure mais suscitent de nombreuses plaintes. L'émission sonore de ces véhicules reste toutefois mal connue. Deux programmes de recherche LCPC permettent d'y voir plus clair. Dans ce cadre, les motocyclettes ont été étudiées à la fois à l'arrêt suivant la norme ISO 3744 pour différents régimes moteur, au passage sur piste avec quelques véhicules maîtrisés conformes à la réglementation et au passage sur route pour les véhicules du flot dans l'esprit de la norme ISO 11819-1. A basse fréquence, un deux-roues peut être approché par une source ponctuelle omnidirectionnelle. A allure stabilisée, une loi de la puissance acoustique en $a \cdot \log_{10}(v/v_{ref}) + b$, où v est la vitesse, s'applique bien à cette catégorie de véhicules. En allure accélérée, on constate que la pente de la puissance acoustique tend vers zéro. Les mesures sur route ouverte à vitesse stabilisée confirment la loi obtenue.

1 Introduction

L'ensemble du parc des deux-roues motorisés représentait moins de 7% du parc automobile selon une étude de 2005, 11 % du parc européen en 2004 [1]. Malgré cette faible part dans le trafic global, il est important d'étudier l'émission sonore de ces véhicules car ceux-ci arrivent régulièrement en tête des enquêtes d'opinion sur les nuisances sonores, et cela depuis plusieurs décennies [2].

La présente communication s'intéresse aux véhicules de grosse cylindrée. En 2007, les motocyclettes (véhicules de cylindrée supérieure à 49.9 cm³) représentaient 24 % des achats des deux-roues. 15 % étaient des motocyclettes de cylindrées supérieures à 625 cm³.

Le LCPC a intégré la problématique du bruit des deux-roues depuis le début des années 2000 dans le cadre de deux opérations de recherche. Les premiers travaux ont débuté par une étude du parc des deux-roues et un découpage en 8 catégories dépendant de la cylindrée, du nombre de cylindres et la présence ou non de carénage [3]. Ces dernières années, des expérimentations sur circuit avec des véhicules maîtrisés et des campagnes sur des véhicules du flot ont été réalisées. Les autres travaux publiés récemment sur la modélisation de 2-roues sont rares [4].

Cette communication est organisée en 3 parties. La première décrit les essais réalisés en statique et dynamique avec des véhicules maîtrisés. La deuxième en présente l'exploitation sous la forme d'une caractérisation détaillée pour un nombre restreint de véhicules. La troisième expose les mesures réalisées sur route avec des véhicules du flot dans le but d'évaluer la dispersion de l'émission sonore sur un grand nombre de véhicules. Une comparaison des lois d'émission pour les véhicules maîtrisés et les véhicules du flot est proposée.

2 Mesurages sur 2-roues maîtrisés

Une analyse du parc des deux-roues [3] a permis de distinguer 8 catégories dont 5 de motocyclettes indiquées en table 1. La définition de ces catégories s'est effectuée sur la base :

- des émissions sonores réglementaires,
- de la puissance administrative,
- des caractéristiques techniques
- et du pourcentage des ventes.

A partir de ces considérations, il a été choisi des motocyclettes représentatives de chaque catégorie. Ces motocyclettes ont été mesurées en statique pour connaître leur directivité horizontale et verticale et en dynamique pour connaître l'émission sonore au passage.

Catégorie	Caractéristiques
1	≥ 600 cm ³ , 4 cylindres en ligne, non carénée
2	≥ 600 cm ³ , carénée
3	≥ 500 cm ³ , 2 ou 4 cylindres en V, non carénée
4	≥ 125 cm ³ , 2 cylindres, non carénée
5	≥ 125 cm ³ , 1 cylindre, non carénée

Table 1 : catégories de motocyclettes identifiées dans [3].
Les scooters de 125 cm³ n'entrent pas dans les catégories 4 et 5.

2.1 Mesures en statique

Ces mesures se sont déroulées sur un parking suivant la norme NF EN ISO 3744. Un dispositif de mesure spécifique en demi-sphère a été créé (figure 1).

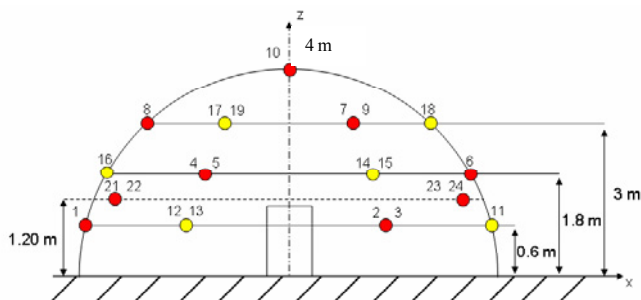


Figure 1 : répartition des microphones sur l'hémisphère

La structure tubulaire comporte 22 microphones répartis sur une demi-sphère de 4 m de rayon. Pour tenir compte des interférences dues à la réflexion sur le sol au niveau de chaque microphone, la mesure est corrigée par un coefficient d'environnement déterminé à l'aide d'un dodécaèdre représentant une source omnidirectionnelle.

Quatre motos des catégories indiquées en table 1 ont été testées dans le cadre de ces mesures en statique. La table 2 indique leurs caractéristiques.

Catégorie	Cylindrée	Nombre de cylindres	Nombre d'échappement
1	1200 cm ³	4 en ligne	1
2	800 cm ³	4 en V	2
4	850 cm ³	2 en ligne	2
5	644 cm ³	Monocylindre	2

Table 2 : Caractéristiques des 2-roues mesurés en statique

Les mesures se sont effectuées pendant une dizaine de secondes au ralenti et par pas de 1000 tours/minute jusqu'à 6000 trs/minute en prenant soin de la stabilité du régime moteur. Ce protocole de mesure est répété 3 fois pour chaque motocyclette. On obtient ainsi une puissance acoustique dépendant du régime moteur.

Pour les motos étudiées, la directivité horizontale est relativement omnidirectionnelle en basses fréquences jusqu'à 800 Hz. La directivité verticale se décompose en fréquences de la manière suivante :

- entre 100 et 250 Hz, la source sonore est proche du sol,
- entre 315 et 800 Hz la source sonore émet vers le haut,
- au-delà de 1000 Hz, la directivité est non homogène.

2.2 Mesures en dynamique

Les mesures se sont déroulés sur le circuit d'Issoire (63) sur une ligne droite d'environ 1000 m en terrain plat et dégagé. Les microphones étaient répartis sur une arche de 4 m de rayon permettant la mesure de la directivité verticale gauche et droite sur un même passage (figure 2).

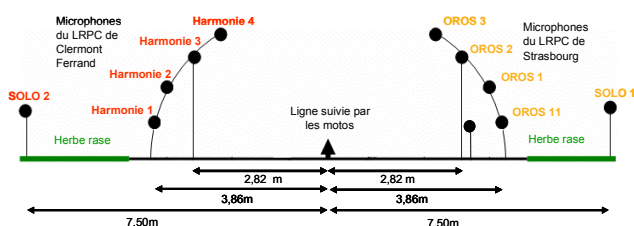


Figure 2 : Schéma d'implantation des microphones

Comme pour la mesure en statique, un dodécaèdre permettait de déterminer la correction à apporter au niveau de chaque microphone. Le protocole de mesure était basé sur le régime moteur (de 2000 à 6000 tours/minute) et le rapport de boîte (du 2^{ème} au 5^{ème} rapport) avec un cinémomètre en bord de piste pour relever la vitesse de passage.

Chaque moto effectuait un total de 36 passages en allure stabilisée et 16 passages en allure accélérée. Sur la totalité de l'expérimentation, il a été réalisé 260 passages de deux-roues avec une gamme de vitesse allant de 20 à 140 km/h.

Dans le cadre des essais en dynamique, cinq motos des catégories indiquées en table 1 ont été mesurées. La table 3 informe de leurs caractéristiques. Seules trois motos ayant participées aux mesures en statique ont pu être testées en dynamique.

Catégorie	Cylindrée	Nombre de cylindres	Nombre d'échappement
1	600 cm ³	4 en ligne	1
2	800 cm ³	4 en V	2
3	650 cm ³	2 en V	1
4	850 cm ³	2 en ligne	2
5	644 cm ³	Monocylindre	2

Table 3 : Caractéristiques des 2-roues mesurés à Issoire

Le dispositif de mesure de la figure 2 montre que les motos avec deux échappements n'ont pas de directivité verticale prononcée à gauche ou à droite, l'angle vertical de directivité est compris entre 30 et 45°. Les motos avec un seul pot d'échappement ont une directivité prononcée à gauche ou à droite toujours suivant le même angle vertical.

Les mesures à 7,5 m du passage montrent en utilisant la formule (1) de Favre [5] reliant le L_{Amax} et le L_{Aeq} que les motos avec deux échappements se comportent comme des monopoles alors que les motos avec un seul échappement se situent entre un comportement de monopole et un comportement de dipôle perpendiculaire.

$$L_{Aeq}(T) - L_{Amax} + 10 \log_{10}(V) = \delta L \quad (1)$$

Avec :

- T en secondes,
- V en m/s,
- δL dépendant de la distance, de T et de V suivant le type de source.

Le respect des consignes par les pilotes et les relevés des vitesses permet de connaître le régime moteur en fonction du rapport de boîte et de la vitesse. Les courbes obtenues permettent de définir le régime moteur et le rapport de boîte approprié pour une vitesse donnée (figure 3).

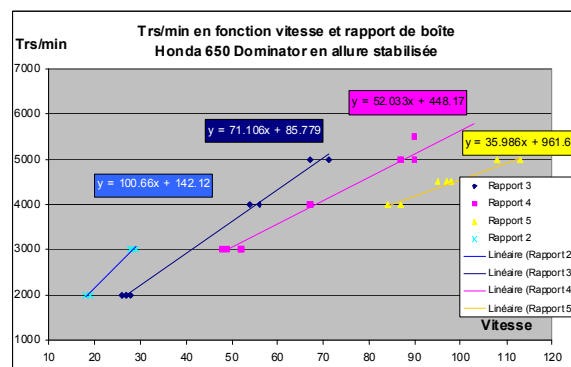


Figure 3 : Graphes des régimes moteur en fonction de la vitesse et du rapport de boîte de la moto catégorie 5

Ainsi, toutes motos confondues ayant une cylindrée comprise entre 600 et 850 cm³, on trouve :

- à 50 km/h, la moto est sur le 3^{ème} rapport de boîte avec un régime moteur de 3500 tours/minute
- à 90 km/h, la moto est sur le 5^{ème} rapport de boîte avec un régime moteur de 4500 tours/minute.

Tous ces paramètres relatifs aux conditions de mesure permettent d'envisager une modélisation de la puissance acoustique des deux-roues.

3 Modélisation

L'analyse a été réalisée à partir de la puissance acoustique calculée en chaque point de mesure selon l'équation (2).

$$Lw_A = L_{mesuré} - K_2 + 10 \log_{10} 2\pi r^2 \quad (2)$$

avec :

Lw_A : puissance acoustique en dB_A

K_2 : coefficient d'environnement en chaque point en dB_A

r : distance entre la moto et le point de mesure en mètres

Les variables influentes ont été déterminées à partir d'une analyse en composantes principales avec comme facteurs : le Lw_A , le régime moteur divisé par 1000, le logarithme décimal de la vitesse, l'allure et le sens de passage de la moto. Le tracé des valeurs propres permet de retenir 3 facteurs influents. La projection sur le premier plan factoriel permet de faire les remarques suivantes

- Lw_A est corrélé avec $\log_{10}(V)$ et le régime/1000,
- $\log_{10}(V)$ et régime/1000 sont fortement corrélés,
- $\log_{10}(V)$ et l'allure sont indépendants.

A partir de cette analyse en composantes principales [6] [7], on élabore un modèle en prenant en compte le Lw_A en fonction du $\log_{10}(V)$ et l'on sépare l'allure stabilisée de l'allure accélérée.

3.1 Modélisation en allure stabilisée

On trace le Lw_A en fonction du logarithme décimal de la vitesse pour l'ensemble des points de mesure (figure 4).

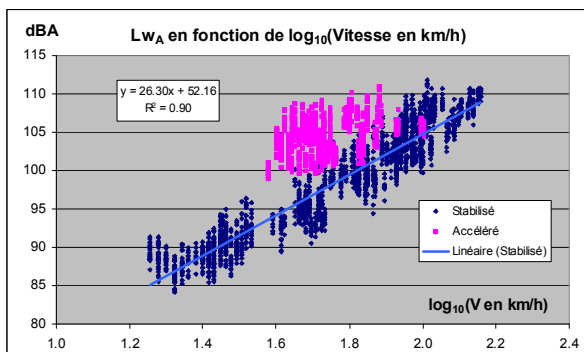


Figure 4 : Graphe de Lw_A en fonction de $\log_{10}(V)$

Pour chaque motocyclette, les régressions obtenues en logarithme décimal de la vitesse ont un coefficient de détermination $R^2 \geq 0,9$. En première approche, la pente et l'ordonnée à l'origine semblent varier en fonction du nombre de cylindres. Par ailleurs, il semble possible de faire une séparation entre les motos récentes avec pot catalytique

et celles plus anciennes avec un pot d'échappement normal. A partir de cette modélisation de l'ensemble des motos, on trace le diagramme des résidus en ajoutant une distinction suivant la cylindrée (figure 5).

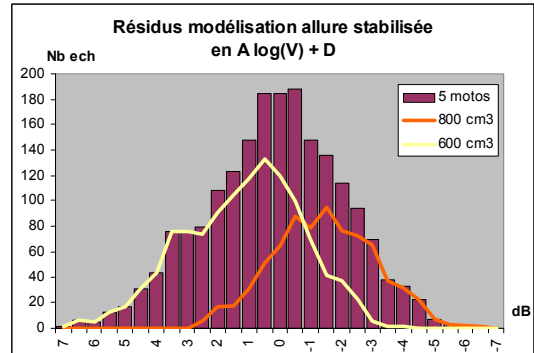


Figure 5 : Diagramme des résidus pour l'allure stabilisée

La courbe des résidus pour l'ensemble des motos est proche d'une gaussienne. La distinction suivant la cylindrée fait apparaître deux populations décalées d'environ 2 dB_A.

3.2 Modélisation en allure accélérée

Pour l'allure accélérée, on fait l'hypothèse que la puissance acoustique en allure accélérée est la somme de la modélisation de l'allure stabilisée et d'un écart entre l'allure accélérée et l'allure stabilisées. On obtient ainsi une modélisation de l'allure accélérée de la forme suivante (3).

$$Lw_A = A \log_{10}(V) + BxV + C \quad (3)$$

A partir de cette modélisation, on trace le diagramme des résidus en ajoutant la distinction suivant la cylindrée (figure 6). Suivant ce graphe, on distingue nettement les deux populations dépendant de la cylindrée.

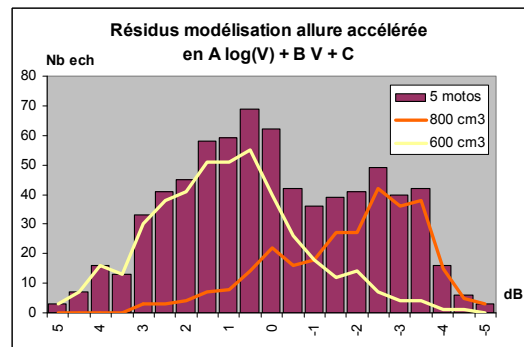


Figure 6 : Diagramme des résidus pour l'allure accélérée

La modélisation en allure accélérée est une première approche puisqu'il n'est pas tenu compte de la valeur numérique de l'accélération. Elle semble cependant suffisante pour délimiter un cadre aux études d'impact.

3.3 Abaques de puissance acoustique

Suite à l'expérimentation sur le circuit d'Issoire (63), il est possible de définir un abaque de puissance acoustique en regroupant les 5 catégories des motos étudiées. A titre de comparaison, on a calculé le niveau de puissance d'un VL et d'un PL sur un revêtement R2 âgé de 5 ans, que l'on peut

considérer comme un revêtement typique du réseau routier actuel sur le plan acoustique.[5].

Les deux-roues sont modélisés de la façon suivante :
 L_{WA} en allure accélérée= $26,3 \log_{10}(V) - 0,12 V + 65,9$
 L_{WA} à vitesse stabilisée= $26,3 \log_{10}(V) + 52,2$

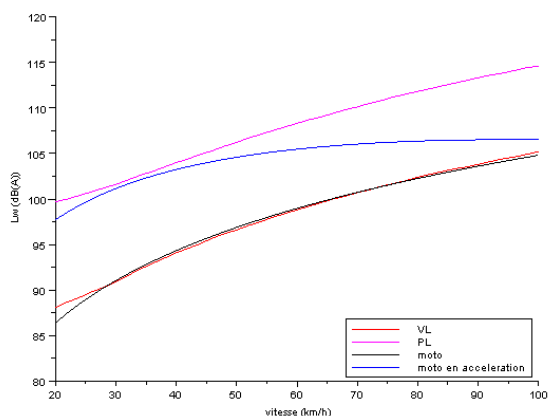


Figure 7 : Abaques des deux-roues en allure stabilisée et accélérée sur un revêtement R2 âgé de 5 ans.

Les abaques de la figure 7 montrent que la puissance acoustique d'une motocyclette en allure stabilisée est similaire à celle d'un VL moyen et inférieure à celle d'un PL. En allure accélérée, à basse vitesse, la puissance acoustique d'une motocyclette est proche de celle d'un PL moyen. Lorsque la vitesse augmente, le PL moyen devient significativement plus bruyant. Pour permettre un calcul prévisionnel en tiers d'octave, la table 4 indique les valeurs du spectre normalisé à 0 dB_A des deux-roues.

(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
2 roues	-24	-23	-22	-22	-22	-21	-18	-14	-12

(kHz)	0,8	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5
2 roues	-11	-11	-11	-11	-11	-10	-10	-10	-9

Table 4 : Répartition spectrale du bruit des deux-roues

4 Mesures sur véhicules du flot

4.1 Description des campagnes

Des mesures de bruit de roulement au passage de deux-roues de grosse cylindrée ont été réalisées sur la route des crêtes en Alsace [9], [10]. Le protocole de mesure s'inspire de la norme NF EN ISO 11819-1 [8] avec un microphone à 7,5 m de l'axe de la voie (sens 1 – côté droit des motos) et à une hauteur de 1,2 m. Un deuxième microphone (sens 2 – côté gauche des motos) est disposé à la même distance du sens de circulation opposé. Le profil en travers entre les deux sens de circulation est dénué de discontinuité d'impédance. En parallèle, la vitesse des véhicules est relevée à l'aide d'un cinémomètre. Pour chaque passage, on extrait le L_{AFmax} ainsi que la décomposition spectrale correspondante par tiers d'octave. Seuls les véhicules en allure stabilisée ont été retenus.

4.2 Résultats des mesurages

Pour chaque campagne de mesure et par sens de mesure, on identifie par régression un modèle de la forme $L_{AFmax} =$

$A \log_{10}(V/90) + B$, où V est la vitesse du véhicule en km/h. La figure 8 illustre les régressions obtenues. La table 5 indique les résultats L_{AFmax} pour chaque campagne de mesure pour les vitesses de 50 et 90 km/h et par sens de mesure.

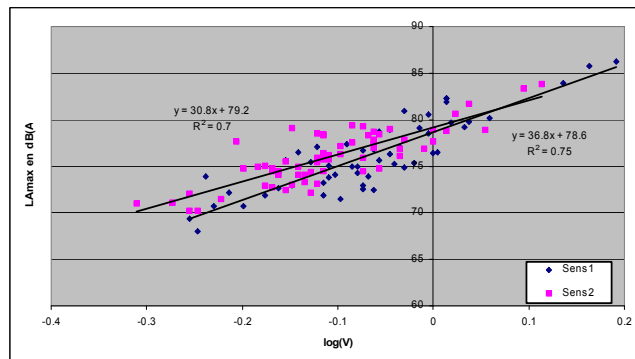


Figure 8 : Régressions pour les mesures du 31/08/2008.

Pour toutes les campagnes de mesure, la pente de la régression linéaire du sens 2 est toujours plus faible que celle du sens 1. Actuellement, il n'est pas possible d'expliquer la différence de comportement entre les deux sens. La totalité des campagnes correspond à 258 passages avec une vitesse moyenne des passages de 72 km/h. Les vitesses rencontrées représentaient une gamme de 44 à 140 km/h.

Date	Sens	L_{AFmax} (90 km/h)	L_{AFmax} (50 km/h)	Pente
29/06/08	1	79,3	70,4	34,8
31/08/08	1	78,7	69,3	36,8
30/08/09	1	78,8	68,2	41,4
29/06/08	2	78,5	71,6	27,1
31/08/08	2	79,2	71,3	30,8
30/08/09	2	79,6	72,6	27,5

Table 5 : Résultats des campagnes de mesures en niveau sonore global (dB(A)).

4.3 Comparaison avec la modélisation des véhicules maîtrisés

	Niveau de bruit global (dB(A))		
Vitesse	90 km/h	70 km/h	50 km/h
Route des crêtes (1)	79,0	75,4	70,6
5 motos sur piste (2)	78,0	75,1	71,3
Ecarts (1)-(2)	1,0	0,3	-0,7

Table 6 : Comparaison des lois obtenues sur piste avec 5 véhicules maîtrisés et sur la route des crêtes.

Le dépouillement des campagnes de mesure sur la route des crêtes n'a considéré que les passages de 2-roues à allure stabilisée. La comparaison avec le modèle issu des mesures sur piste nécessite de corriger les niveaux de bruit du modèle de 25,6 dB_A pour correspondre à l'éloignement de la mesure et tenir compte de la réflexion sur un sol réfléchissant. La comparaison est indiquée dans la table 6. La comparaison entre les modèles obtenus pour des véhicules maîtrisés et des véhicules du flot donne des écarts inférieurs ou égaux à 1 dB_A. Le plus faible écart correspond

à la vitesse moyenne relevée lors des expérimentations. Malgré des protocoles significativement différents, les deux modèles fournissent des résultats convergents.

5 Conclusion

Les motocyclettes représentent un faible pourcentage de la circulation routière, mais les enquêtes montrent qu'elles engendrent des nuisances importantes sur leur passage.

La présente recherche a permis de mieux cerner l'émission sonore des 2-roues de grosse cylindrée actuels, en s'appuyant sur l'analyse d'expérimentations en statique et dynamique sur piste avec des véhicules maîtrisés, ainsi que sur route, avec des véhicules du flot.

Les mesures en statique montrent un comportement monopolaire des deux-roues jusqu'à 800 Hz avec une directivité proche du sol jusqu'à 250 Hz et une directivité dirigée vers le haut entre 315 à 800 Hz.

Les mesures en dynamique sur piste indiquent que les moto avec deux échappements se comportent comme des monopoles, alors que les motos avec un seul échappement se situent entre un comportement de monopole et un comportement de dipôle perpendiculaire. La position de l'échappement est décelable avec une directivité verticale plus prononcée du côté de l'échappement dans un angle compris entre 30 et 45° par rapport à l'horizontale. L'analyse en composantes principales a permis de retenir le modèle de Favre comme modèle d'émission sonore. L'accélération est modélisée par un terme décroissant dépendant de la vitesse. Les cinq catégories de motocyclettes étudiées peuvent se regrouper en une seule et même catégorie bien que l'on puisse distinguer certains aspects comme la cylindrée et le nombre d'échappements.

A vitesse stabilisée, la modélisation réalisée sur des véhicules maîtrisés rejoint celle obtenue indépendamment sur des véhicules du flot dans des conditions conformes à la norme NF EN ISO 11819-1.

Parallèlement, des expérimentations similaires se sont déroulées sur des petites cylindrées. Un aperçu de celles-ci est donné dans [12]. Dans les mois à venir, un modèle général sera élaboré sur la base des différentes campagnes conduites dans le cadre de l'opération de recherche 11M061.

Remerciements

Cette recherche a été financée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées dans le cadre de l'opération de recherche 11M061 "Prévoir le bruit en milieu urbain" (2006-2009).

Références

- [1] ACEM, « Striving against traffic noise – How powered two-wheelers can contribute », juin 2004, 14p.
- [2] International Motorcycle Manufacturers Association (IMMA), « Motorcycle noise, the curious silence – a report by the motorcycle industry », Genève (CH), juin 1996, 32p.
- [3] Priolet G., "Analyse du parc des deux roues motorisés", *CETE de LYON – LRPC Clermont-Ferrand*, (2004).
- [4] Peeters B., « Noise measurements of powered two-wheelers », *IMAGINE report IMA52MO-05117-MP01*, Vught (NL), 18 mai 2005.
- [5] Favre B., "Méthode pour établir la relation entre le bruit mis par les véhicules routiers et l'impact de ce bruit sur les populations exposées", *Thèse de doctorat, Université Claude Bernard de Lyon I*, (1984).
- [6] Barguet L., "Caractérisation sonore d'un deux-roues motorisé", *Stage de licence professionnelle de mécanique spécialité Ingénierie Acoustique et Vibratoire, Université du Maine*, (2008).
- [7] Lefèvre H., "Sources sonores urbaines: Modélisation des deux-roues – Expérimentation 2008 ", *CETE de LYON – LRPC Clermont-Ferrand*, (2010).
- [8] "Prévision du bruit routier – Tome 1 : Calcul des émissions sonores dues au trafic routier", *SETRA* (2009).
- [9] Toussaint L., "Caractérisation acoustique des deux roues : mesures sur des véhicules de la circulation au Champ de Feu (67) ", *CETE de L'EST – LRPC Strasbourg*, (2008).
- [10] Toussaint L., "Caractérisation acoustique des deux roues : mesures sur des véhicules de la circulation au Champ de Feu (67) ", *CETE de L'EST – LRPC Strasbourg*, (2009).
- [11] "NF EN ISO11819-1 : Acoustique – Mesurage de l'influence des revêtements de chaussée sur le bruit émis par la circulation", *AFNOR*, (mars 2002).
- [12] Toussaint L., Dutilleux G, Lefèvre H., "Emission acoustique des deux-roues motorisés : cas des petites cylindrées", *CFA Lyon 2010*, (2010).