THÈSE de DOCTORAT de l'UNIVERSITÉ du MAINE

Spécialité
ACOUSTIQUE

présentée par
M. David GAULIN

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ du MAINE

Sujet de thèse

Caractérisation physique des sources sonores en milieu urbain

Soutenue le 28 mars 2000 devant le jury composé de :

M. Michel BÉRENGIER		Directeur de recherche, LCPC Nantes
M. Claude DÉPOLLIER	Directeur de thèse	Professeur, Université du Maine
M. Denis DUHAMEL	Rapporteur	Ingénieur des Ponts et Chausées, ENPC
M. Jean-François HAMET		Directeur de recherche, INRETS
M. Donatien LE HOUEDEC	Rapporteur	Professeur, Ecole Centrale de Nantes
M. Jean-Pierre PÉNEAU		Professeur, Ecole d'Architecture de Nantes

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE LE MANS
M000726

THÈSE de DOCTORAT de l'UNIVERSITÉ du MAINE

Spécialité
ACOUSTIQUE

présentée par
M. David GAULIN

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ du MAINE

Sujet de thèse

Caractérisation physique des sources sonores en milieu urbain

Soutenue le 28 mars 2000 devant le jury composé de :

M. Michel BÉRENGIER		Directeur de recherche, LCPC Nantes
M. Claude DÉPOLLIER	Directeur de thèse	Professeur, Université du Maine
M. Denis DUHAMEL	Rapporteur	Ingénieur des Ponts et Chausées, ENPC
M. Jean-François HAMET		Directeur de recherche, INRETS
M. Donatien LE HOUEDEC	Rapporteur	Professeur, Ecole Centrale de Nantes
M. Jean-Pierre PÉNEAU		Professeur, Ecole d'Architecture de Nantes

Je tiens à remercier tout particulièrement...

... Michel Bérengier, pour sa disponibilité, ses nombreux conseils et pour les heures passées à lire et corriger mes documents, rapports ainsi que ce manuscrit...,

... Claude Dépollier, mon directeur de thèse,

... Philippe L'Hermite, Yves Pichaud et Jean-François Le Fur, pour leur bonne humeur et leur aide lors des nombreuses campagnes de mesures...,

Ainsi que...

... Toute la section Acoustique, pour les bons moments que j'ai passés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées...,

... Le service Informatique, pour ses compétences...,

... Françoise pour ses relectures et ses commentaires...,

... Toute la joyeuse équipe de l'Acoustique du LRPC de Blois...,

... Jean-François Hamet, Joël Lelong et Marie-Agnès Pallas, mes collègues de l'INRETS,

... Et toutes les personnes internes ou externes au LCPC que j'ai pu côtoyer durant cette thèse...

Résumé

On assiste aujourd'hui à une demande croissante d'outils permettant la prévision des niveaux sonores lors de la construction de nouveaux aménagements urbains. De tels outils existent mais la prise en compte des phénomènes physiques, encore limitée, demande à être améliorée. C'est ce que nous tentons de faire dans le cadre de ce travail de thèse, pour lequel le caractère expérimental est omniprésent.

Toutes les sources sonores n'ayant pas les mêmes caractéristiques physiques, elles n'obéiront pas au même modèle. Elles sont donc séparées en deux catégories principales : les sources d'origine mécanique et celles d'origine humaine. Etant donné leur diversité, elles n'ont pu être modélisées individuellement. Il a fallu en conséquence établir un classement par "familles". C'est le cas particulier des sources d'origine mécanique qui ont été séparées en quatre catégories. Ce classement a fait l'objet d'une comparaison avec ceux déjà existants dans diverses méthodes nationales. 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 prépondérant. Une méthode permettant de déterminer la hauteur de cette source ponctuelle omnidirectionnelle équivalente a été mise au point, après validation pour une source test. La source a été identifiée proche du sol ce que confirme une étude réalisée à l'INRETS[1]. La puissance acoustique de cette source peut alors être déduite. Cette méthode est ensuite appliquée aux véhicules légers, cyclomoteurs et motocyclettes pour des conditions de circulation urbaine, entre 30 et 70 km/h. Des lois de prévision des niveaux d'émission par tiers d'octave sont déterminées, avec une excellente précision.
Concernant les sources d'origine humaine, encore très peu ou pas du tout étudiées, des campagnes de mesures ont permis la simulation de groupes d'individus par des sources ponctuelles de position et de puissance acoustique adéquates. Ces techniques ont été appliquées aux cours de récréation et à une place de marché.

Bien que d'autres types de sources restent encore à qualifier, ces modèles peuvent d'ores et déjà être intégrés dans un logiciel de propagation du son en milieu urbain.

[1] INRETS : Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité.

Abstract

Today, a growing request concerning tools for allowing sound level predictions during the construction of new urban infrastructures is observed. Some of them exist, but physical phenomena taken into account have to be still improved. This is the aim of these researches, widely based on experimental approach.

Due to their various physical characteristics, all the sound sources cannot be represented by the same theoretical model. They are splited in two groups : mechanical sources and human sources. In both group, each sound source cannot be individually modelled. That is why a classification is established. It is particularly the case for the mechanical sources which are distributed in four categories. This classification has been compared with those existing in some national methods. Similar results have been found.

In a first step, road vehicles circulating at steady speeds, upper than 80 km/h where tyre/road noise is dominant, are modelled by omnidirectional point sources, the equivalent source heights of which have to be determined. A method based on an inverse fitting procedure performed on experimental excess attenuation results between two receivers has been implemented. Before this, the procedure was validated using an artificial pink noise sound source located at various positions. The equivalent source has always been found very close to the pavement surface which is confirmed by a study from INRETS[1]. Sound power level can be obtained afterwards. This procedure has been applied to passenger cars, mopeds and motorcycles for urban traffic conditions including acceleration and deceleration phases. The speed ranges between 30 and 70 km/h. Sound power level predictions, for each third octave band, have been determined with a good accuracy.

Concerning human sources, for which research results are rare in existing literature, two experimental campaigns allowed to test a method simulating groups of people by several omnidirectional point sources, each of them with their adequate location and sound power level spectrum. This method has been applied to school playgrounds and to a market place.

Even if in the future, other types of sound sources have to be studied, these physical characteristics can already be introduced in the theoretical sound propagation model for urban areas.

[1] INRETS : Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité.

Table des matières

Table des matières I

Index des figures VI

Index des tableaux XIV

Table des symboles XV

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Identification des différents types de sources sonores rencontrés en milieu urbain 4

1.1. Introduction 4

1.2. Les sources sonores d'origine routière 4
1.2.1. Quelques rappels bibliographiques 4
1.2.2. Mesures préliminaires 7
1.2.3. Composition spectrale 12

1.3. Sources d'origine ferroviaire 14

1.4. Sources d'origine humaine 16

Chapitre 2 : Premiers pas vers la modélisation des véhicules 22

2.1. Introduction 22

2.2. Différentes représentations des sources sonores [Favre 1983] 23
2.2.1. Introduction 23
2.2.2. Hypothèses 23
2.2.3. Source monopolaire 24
2.2.3.1. Variations du niveau de pression acoustique instantanée 24
2.2.3.2. Energie équivalente sur la période $T = t_2 - t_1$ 24
2.2.3.3. Niveau de puissance acoustique 25

2.2.4. Source dipolaire 26
2.2.4.1. Variations du niveau de pression instantané 26
2.2.4.2. Energie équivalente sur la période $T = t_2 - t_1$ 27
2.2.4.2.1. Dipôle dans la direction du mouvement ($\beta = 0$) 27
2.2.4.2.2. Dipôle perpendiculaire à l'axe de déplacement ($\beta = \pi/2$) 27
2.2.4.3. Niveau de puissance acoustique 27
2.2.5. Application à un véhicule en mouvement 28
2.2.5.1. Relation entre le Leq_{t0} et les niveaux maximum 28
2.2.5.1.1. Source monopolaire 28
2.2.5.1.2. Dipôle dans la direction du mouvement ($\beta = 0$) 28
2.2.5.1.3. Dipôle perpendiculaire à l'axe de déplacement ($\beta = \pi/2$) 29
2.2.6. Comparaison avec les résultats expérimentaux 29
2.2.6.1. Relation entre les niveaux maximum théoriques et mesurés 29
2.2.6.2. Représentation de ΔL 29
2.2.6.3. Mesures effectuées sur 2000 véhicules 30
2.2.6.4. Mesures sur piste d'essai 31
2.2.6.5. Conclusion 32

2.3. Directivité des véhicules [Tachibana & Oshino 1992] 33

2.4. Détermination des hauteurs de sources sonores équivalentes 34
2.4.1. Mesure de la hauteur de source équivalente d'une distribution arbitraire de sources [Glegg & Yoon 1990-1] 35
2.4.1.1. Introduction 35
2.4.1.2. Définition de la "puissance" d'une source et du champ acoustique 35
2.4.1.3. Puissance acoustique d'une source ponctuelle équivalente 39
2.4.1.4. Mesure de la position de la source ponctuelle équivalente 42
2.4.1.4.1. Modélisation de la distribution de sources 42
2.4.1.4.2. Mesure de la hauteur de source équivalente 43
2.4.1.4.3. Type du réseau de microphones 44
2.4.1.5. Vérification expérimentale de la méthode de mesure 45
2.4.1.5.1. Procédure expérimentale 45
2.4.1.5.2. Résultats expérimentaux 46
2.3.1.5.2.1. Une seule source 46
2.4.1.5.2.2. Deux sources 46
2.4.1.6. Conclusion 47
2.4.2. Mesure de la hauteur de source équivalente pour des véhicules circulant sur autoroutes [Glegg & Yoon 1990-2] 48
2.4.2.1. Introduction 48
2.4.2.2. Procédure de mesure 48
2.4.2.3. Résultats expérimentaux 49
2.4.2.4. Conclusion 51
2.4.3. Méthode de mesure des hauteurs de sources d'un véhicule [Coulson 1996] 51
2.4.3.1. Introduction 51
2.4.3.2. Description du système d'acquisition 51
2.4.3.3. Evaluation des hauteurs de sources 53
2.4.3.4. Limitations du système 54
2.4.3.5. Données rassemblées 55
2.4.3.6. Conclusion 56

2.5. Méthode de détermination de la hauteur de source sonore équivalente et de la puissance acoustique par la technique propagative 56
2.5.1. Phénomènes de propagation acoustique – Phénomènes d'interférences [Piercy & al. 1977] [Embleton 1996] 56
2.5.2. Mesure de la hauteur de source équivalente 57

2.5.2.1. Méthode de mesure [Gaulin & Bérengier 1999] 57
2.5.2.2. Les véhicules légers 63
2.5.2.3. Les trains routiers 65
2.5.3. Puissance acoustique 66
2.5.3.1. Evolution des spectres en fonction de la vitesse des véhicules [Ogle & al. 1996] 66
2.5.3.2. Détermination de la puissance acoustique 67
2.5.4. Evolution temporelle 69
2.5.5. Prévision des niveaux sonores à grande distance 71
2.5.6. Véhicules en accélération 71

Chapitre 3 : Caractérisation acoustique des véhicules légers en conditions de circulation urbaine 74

3.1. Etat de l'art 74
3.1.1. Modèle de simulation du bruit rayonné par les véhicules [Oshino & Tachibana 1993] 74
3.1.2. Bruit émis par un véhicule en accélération [Favre 1978] 75
3.1.2.1. Véhicules légers 76
3.1.2.2. Poids lourds 77

3.2. Méthode de détermination de la hauteur de source sonore équivalente et de la puissance acoustique par la technique propagative et pour des conditions de circulation urbaine 78
3.2.1. Hauteur de la source sonore équivalente 79
3.2.2. Méthode développée à l'INRETS à partir d'une technique d'antenne 81
3.2.3. Identification de la puissance acoustique 86

3.3. Prévision des émissions sonores par bande de tiers d'octave 91
3.3.1. Un seul véhicule léger 91
3.3.2. Plusieurs véhicules légers 98
3.3.3. Comparaison avec les modèles d'Oshino & Tachibana et Favre 103
3.3.4. Evolution temporelle 104

3.4. Influence d'un rond-point 106
3.4.1. Bruit émis par des véhicules isolés au voisinage des carrefours giratoires [Lewis & James 1978] 106
3.4.2. Bruit d'origine routière à l'approche des intersections [Kokowski & Makarewicz 1997] 108
3.4.2.1. Introduction 108
3.4.2.2. Niveau d'exposition 108
3.4.2.3. Effet de sol 110
3.4.2.4. Vitesse stabilisée 113
3.4.2.5. Détermination de Lw_A et d_g 113
3.4.2.5.1. Méthode 1 113
3.4.2.5.2. Essai n°1 114
3.4.2.5.3. Méthode 2 115
3.4.2.6. Circulation avec arrêts 116
3.4.2.6.1. Portions à vitesse stabilisée 116
3.4.2.6.2. Décélération 117
3.4.2.6.3. Accélération 118
3.4.2.7. Détermination de ξ 120

3.4.2.7.1. Méthode 1 120
3.4.2.7.2. Essai n°2 121
3.4.2.7.3. Méthode 2 121
3.4.2.8. Effet de l'arrêt sur les niveaux sonores 122
3.4.2.8.1. Energie totale rayonnée 122
3.4.2.8.2. Zone d'influence 124
3.4.2.8.2.1. Niveau d'exposition L_{AE} 124
3.4.2.8.2.2. Niveau sonore moyen 128
3.4.3. Campagne de mesures en site réel : influence d'un rond-point 130

Chapitre 4 : Caractérisation acoustique des "deux roues" motorisés 134

4.1. Les cyclomoteurs 134
4.1.1. Hauteur de la source sonore équivalente 135
4.1.2. Détermination de la puissance acoustique 136
4.1.3. Evolution temporelle 142

4.2. Les motocyclettes 143
4.2.1. Hauteur de la source sonore équivalente 144
4.2.2. Puissance acoustique 145

Chapitre 5 : Les sources sonores d'origine humaine en milieu urbain 152

5.1. Introduction 152

5.2. Etude de cours de récréation 153
5.2.1. Premières expérimentations dans une école 153
5.2.1.1. Protocole et site de mesure 153
5.2.1.2. Premiers résultats 155
5.2.1.3. Modélisation : sources sonores fictives 158
5.2.2. Seconde campagne de mesures dans une école 165
5.2.2.1. Protocole et site de mesure 165
5.2.2.2. Premiers résultats 167
5.2.2.3. Modélisation : sources sonores fictives 169
5.2.3. Conclusions relatives aux mesures autour des cours de récréation d'écoles 170

5.3. Etude d'une place de marché 171

5.4. Conclusion 177

Conclusion générale et perspectives 178

Références bibliographiques 181

Annexe 1 : Rappels sur la pondération A 186

Annexe 2 : Phénomènes de propagation acoustique 188

A2.1. Dispersion géométrique [Gauvreau 1999] [Piercy & al. 1977] [Embleton 1996] 188

A2.2. Absorption atmosphérique [Gauvreau 1999] [Marsh 1982] [Bruneau 1983] [Bass & al. 1990, 1995-1996] [Embleton 1996] [International standard ISO 9613] 189

A2.3. Caractéristiques acoustiques liées à la présence du sol [Gauvreau 1999] 190
A2.3.1. Modèle de surface - Phénomène de réflexion 191
A2.3.1.1. Modèle de surface à réaction localisée 191
A2.3.1.2. Modèle de surface à réaction non localisée ou étendue 192
A2.3.1.3. Prise en compte de l'effet d'épaisseur 193

A2.4. Modèles d'impédance 194
A2.4.1. Modèle semi-empirique de Delany et Bazley [Delany & Bazley 1970] 194
A2.4.2. Autres modèles 195

Annexe 3 : Classification acoustiques des principaux revêtements routiers 196

Annexe 4 : Caractéristiques de l'appareillage de mesure utilisé 198

Annexe 5 : Spectres moyens de la parole 202

Index des figures

1.1 : Réglementation 70/157/EWG pour l'homologation acoustique des différentes catégories de véhicules. 6

1.2 : Schéma du dispositif de mesure. 8

1.3 : Evolution temporelle obtenue sur 3 minutes en termes de $LAeq_{125\ ms}$ (dBA). 8

1.4 : Principe de l'émergence au cours du passage d'un véhicule. 9

1.5 : Comparaison du spectre moyen d'une voiture particulière et d'un utilitaire. 12

1.6 : Comparaison du spectre moyen d'une voiture particulière et d'un poids lourd. 13

1.7 : Comparaison du spectre moyen d'un poids lourd et d'un train routier. 14

1.8 : Evolution temporelle d'un tramway et d'un train circulant respectivement à 50 et 90 km/h ($LAeq_{125ms}$). 15

1.9 : Comparaison Train-Tramway. 16

1.10 : Profils d'équilibre sonore à différents moments de la journée (matin, après-midi, soir) [Léobon 94]. 19

1.11 : Triangle d'équilibre sonore à différents moments de la journée (matin, après-midi, soir) et pour cinq lieux du quartier Graslin [Léobon 94]. 20

1.12 : Typologie des ambiances sonores du quartier Graslin les journées d'été [Léobon 94]. 21

2.1 : Géométrie : (a) de la source et du récepteur, (b) du modèle de directivité et de la position de l'axe de rayonnement maximum, (c) des trois modèles considérés [Favre 1983]. 24

2.2 : Source monopolaire : relation entre Lp_{max} (ou L_m) et Leq_T en fonction du paramètre d/v pour différentes valeurs de T (s) [Favre 1983]. 25

2.3 : Source dipolaire : variations du niveau de pression instantané en fonction du temps d/v pour diverses orientations du dipôle [Favre 1983]. 26

2.4 : Variations de ΔL en fonction de la vitesse pour le monopôle (o), le dipôle dans l'axe du mouvement (∞) et perpendiculaire à l'axe du mouvement (8). Valeurs avec correction (- - - -) et approximations (——) [Favre 1983]. 30

2.5 : Comparaison entre les valeurs de ΔL pour des véhicules dans le flot de la circulation et les valeurs données par les trois modèles. Voitures particulières (●), utilitaires (■) et trains routiers (□). (Monopôle (o), dipôle dans l'axe du mouvement (∞) et perpendiculaire à l'axe du mouvement (8)) [Favre 1983]. 31

2.6 : Comparaisons entre les valeurs ΔL mesurées et les valeurs données par les trois modèles. Moyenne des cinq véhicules en première (■), quatrième (●) et enfin moteur coupé (◆) (bruit de roulement). (Monopôle (o), dipôle dans l'axe du mouvement (∞) et perpendiculaire à l'axe du mouvement (8)) [Favre 1983]. 32

2.7 : Intensité acoustique dans le plan vertical (à gauche) et dans le plan horizontal (à droite) [Tachibana & Oshino 1992]. 34

2.8 : 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. 36

2.9 : Schéma montrant les distances de propagation entre une source, son image et un réseau de microphones. 38

2.10 : Schéma pour un dipôle aligné sur y_1. 40

2.11 : Erreur dans l'approximation de la source ponctuelle pour différentes distributions de sources en fonction de ky_eh_m/r [Glegg & Yoon 1990-1]. 42

2.12 : Mesure de la hauteur de source pour une distribution de 3 sources avec une paire de microphones en fonction de ky_eh_m/r [Glegg & Yoon 1990-1]. 44

2.13 : Les aires grisées représentent les hauteurs de sources équivalentes pouvant être mesurées en fonction de la fréquence en utilisant la condition $0.7 > D_m > 0.15$. Chaque zone représente un microphone [Glegg & Yoon 1990-1]. 45

2.14 : Hauteur équivalente mesurée pour un haut-parleur situé à 45 cm au-dessus du sol. (a) résultat en bandes fines ; (b) moyenné par tiers d'octave [Glegg & Yoon 1990-1]. 46

2.15 : Comparaison entre la hauteur de source mesurée (———) et calculée (– – – –) pour des sources à 15 et 84 cm au-dessus du sol [Glegg & Yoon 1990-1]. 47

2.16 : Niveau de pression acoustique (a) et hauteur de source équivalente (b) pour 36 trains routiers. ——— : valeur moyenne ; – – – – : valeur moyenne ± écart-type [Glegg & Yoon 1990-2]. 49

2.17 : Niveau de pression acoustique (a) et hauteur de source équivalente (b) pour 37 poids lourds. ——— : valeur moyenne ; – – – – : valeur moyenne ± écart-type [Glegg & Yoon 1990-2]. 50

2.18 : Niveau de pression acoustique (a) et hauteur de source équivalente (b) pour 25 véhicules légers. ——— : valeur moyenne ; – – – – : valeur moyenne ± écart-type [Glegg & Yoon 1990-2]. 50

2.19 : Equipement de mesure [Coulson 1996]. 52

2.20 : Site de mesure [Coulson 1996]. 52

2.21 : Hauteurs des sources équivalentes pouvant être mesurées en accord avec le critère 2.64, pour chaque paire de microphones [Coulson 1996]. 54

2.22 : Spectres de puissance et hauteurs de sources moyennés [Coulson 1996]. 55

2.23 : Distances de propagation en champ libre et en présence d'un sol. 58

2.24 : Ecran d'accueil du logiciel "PL_PROPATE". 59

2.25 : Spectre d'atténuation obtenu pour une source située à 10 cm du sol réfléchissant, un récepteur à une distance de 7.5 m et une hauteur de 1.2 m. 60

2.26 : Différentes configurations du ventilateur. (a) : posé sur le sol ; (b) : à une hauteur de 75 cm. 61

2.27 : Comparaison mesure-calcul pour une source située à 11.5 cm du sol et des microphones positionnés respectivement à (7.5 m, 1.2 m) et (13 m, 1.2 m). Le centre du ventilateur est situé à 18 cm du sol. 62

2.28 : Schéma du dispositif. 63

2.29 : Comparaison entre le calcul et la mesure à 80 km/h pour une source située à 5 cm puis 20 cm du sol. 64

2.30 : Comparaison entre le calcul et la mesure à 13 m, pour un train routier à une vitesse stabilisée de 75 km/h et pour une source située à 1 cm du sol. 65

2.31 : Comparaison, pour deux vitesses, du spectre moyen des voitures particulières [Ogle & al. 1996]. 66

2.32 : Spectres de puissance obtenus à partir des mesures de référence à 7.5 m, sur la piste de référence du LCPC. 67

2.33 : Spectres de puissance en pondération A (dBA) 68

2.34 : Comparaison pour 2 hauteurs de sources de l'évolution temporelle du passage d'un véhicule à 100 km/h et pour le tiers d'octave 1.25 kHz. 70

2.35 : Comparaison pour 2 hauteurs de sources de l'évolution temporelle du passage d'un véhicule à 100 km/h et pour le tiers d'octave 2.5 kHz. 70

2.36 : Comparaison véhicule en accélération - véhicule à vitesse stabilisée (100 km/h – 4ème rapport de boîte) 72

3.1 : Relations entre rapport de boîte, vitesse et accélération pour les véhicules légers [Favre 1978]. 76

3.2 : Relations entre rapport de boîte, vitesse et accélération pour les autobus [Favre 1978]. 77

3.3 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé pour une Renault Clio à vitesse stabilisée : 50 km/h, 3ème, 2550 tr/min. 80

3.4 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé pour une Renault Clio en accélération : 50 km/h, 2nde, 3700 tr/min. 80

3.5 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé pour une Renault Clio en décélération : 50 km/h, 3ème, 2550 tr/min. 81

3.6 : Antenne en champ proche utilisée à l'Inrets [Pallas 1998] 82

3.7 : Niveaux en sortie de l'antenne verticale (500 à 1000 Hz) pour 5 régimes moteur et 4 bandes tiers d'octave. Emission acoustique latérale. Antenne de 13 microphones, espacement 30 cm, inclinaison 55°. Distance véhicule-centre de l'antenne : 2.35 m. Béton bitumineux [Pallas 1998]. 83

3.8 : Niveaux en sortie de l'antenne verticale pour 5 régimes moteur et 4 bandes tiers d'octave. Emission acoustique latérale. Antenne de 15 microphones, espacement 15 cm, inclinaison 64°. Distance véhicule-centre de l'antenne : 1.71 m. Béton bitumineux [Pallas 1998]. 84

3.9 : Niveaux en sortie de l'antenne verticale, pour différentes distances de focalisation (4 bandes tiers d'octave) et esquisse des directions d'incidence principales (avec réflexion s'il y a lieu). Régime moteur 4010 tr/min. Emission acoustique latérale.

Antenne de 13 microphones, espacement 30 cm, inclinaison 55°. Distance véhicule-centre de l'antenne : 2.63 m. Béton bitumineux [Pallas 1998]. 85

3.10 : Spectres de puissance acoustique à vitesse stabilisée (Renault Clio). 86

3.11 : Spectres de puissance acoustique en accélération (Renault Clio). 87

3.12 : Spectres de puissance acoustique en décélération (Renault Clio). 87

3.13 : Spectres de puissance acoustique Renault Clio à 30 km/h. 89

3.14 : Spectres de puissance acoustique Renault Clio à 50 km/h. 90

3.15 : Spectres de puissance acoustique Renault Clio à 70 km/h. 90

3.16 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée pour une vitesse stabilisée de 30 km/h. 93

3.17 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée pour une vitesse stabilisée de 70 km/h. 93

3.18 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 30 km/h. 94

3.19 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 50 km/h. 94

3.20 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime décéléré à 30 km/h. 95

3.21 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime décéléré à 50 km/h. 95

3.22 : Détermination d'une loi classique vitesse-régime moteur pour la Renault Clio 1.4l. 98

3.23 : Clio de référence sur la piste d'essai du LCPC. 99

3.24 : Comparaison des niveaux sonores mesurés à 7.5 m pour divers revêtements routiers : 70 km/h à vitesse stabilisée. 100

3.25 : Comparaison des niveaux sonores mesurés à 7.5 m pour divers revêtements routiers : 35 km/h en accélération. 100

3.26 : Comparaison entre les niveaux mesurés pour la Renault Clio, les niveaux calculés à partir de coefficients déterminés pour ce véhicule (Lw calculé 1) et les niveaux calculés à partir de coefficients moyens (Lw calculé 2). Le cas considéré est un passage à la vitesse stabilisée de 50 km/h sur le troisième rapport. 102

3.27 : Comparaison entre le passage réel de la Renault Clio à 30 km/h en vitesse stabilisée et le passage calculé à partir des lois de régression de puissance acoustique. 104

3.28 : Comparaison entre le passage réel de deux véhicules légers à 70 km/h en vitesse stabilisée et le passage calculé à partir des lois de régression de puissance acoustique. 105

3.29 : Comparaison entre le passage réel du véhicule Renault Clio à 34 km/h en accélération et le passage calculé à partir des lois de régression de puissance acoustique. 105

3.30 : Comparaison entre le passage réel d'un véhicule léger (Renault Clio) à 64 km/h en accélération et le passage calculé à partir des lois de régression de puissance acoustique. 106

3.31 : Comparaison des résultats pour chacun des trois ronds-points. —— décélération ; – – – accélération ; ····· moyenne à vitesse stabilisée [Lewis & James 1978] 107

3.32 : Schéma de l'intersection. 109

3.33 : Plan vertical montrant la distance source-récepteur. 110

3.34 : Plan horizontal montrant la distance source-récepteur 110

3.35 : Atténuation excédentaire ΔL_A pour les distances critiques 20, 140 et 1000 m avec 6, 3 et 0 dBA d'atténuation par doublement de distance [Kokowski & Makarewicz 1997]. 111

3.36 : Plan horizontal, récepteur situé en O, véhicule circulant de x_1 à x_2. 112

3.37 : Variations de M en fonction de la distance relative D_0/d_g. 114

3.38 : Angles déterminant la position des portions d'accélération et de décélération 117

3.39 : Densité d'énergie rayonnée, $S_2(x)$, pour une faible ($-1 \leq \xi \leq 1$), moyenne ($1 < \xi < 2$) et forte ($\xi > 2$) accélération 119

3.40 : Le récepteur O ($x_0 = 0$) est placé en face du point de départ de l'accélération. 121

3.41 : Densité d'énergie rayonnée pour le type de circulation avec arrêt 122

3.42 : Densité d'énergie rayonnée pour le type de circulation à vitesse stabilisée. 123

3.43 : Différence des niveaux d'exposition, ΔL_{AE}, avec $d_g = 140$ m, $\xi = 1.5$, $l_1 = l_2 = 90$ m à des distances D = 7.5 m et D = 25 m de l'axe de la voie. 125

3.44 : Influence du paramètre d'accélération ξ. $d_g = 140$ m, $l_1 = l_2 = 90$m, D = 7.5 m. 125

3.45 : Influence du sol sur ΔL_{AE}. $l_1 = l_2 = 90$ m, D = 7.5 m, $\xi = 1.5$ pour un sol absorbant ($d_g = 20$ m) et réfléchisant ($d_g = 1000$ m). 126

3.46 : Zones d'accélération et de décélération pour une accélération normale ($\xi = 1.5$) et pour d_g=140 m, $l_1 = l_2 = 90$ m. 127

3.47 : Zones d'accélération et de décélération pour une forte accélération ($\xi = 4$) et pour d_g=140 m, $l_1 = l_2 = 90$ m. 127

3.48 : Différence entre les niveaux sonores moyens, ΔL_{AT}, avec $d_g = 140$ m, $l_1 = l_2 = 90$ m, $\xi = 4$, D = 7.5 m pour K = 0.2 et K = 0.8. 128

3.49 : Zone de décélération, $\Delta L_{AT} < -2$ dB, et zone d'accélération, $\Delta L_{AT} > 2$ dB pour un faible pourcentage de véhicules à vitesse stabilisée (k = 0.2) avec $d_g = 140$ m, $l_1 = l_2 = 90$ m, $\xi = 4$. 129

3.50 : Schéma du trajet emprunté par les véhicules. 130

3.51 : Vue du rond-point et du microphone n°3 au premier plan. 131

3.52 : Moyenne des vitesses (km/h) et des niveaux globaux A (dBA) associés pour des passages en 3ème 132

3.53 : Moyenne des vitesses (km/h) et des niveaux globaux A (dBA) associés pour des passages en 4ème (vitesse stabilisée) puis 3ème et 2nde (rond-point). 132

3.54 : Moyenne des vitesses (km/h) et des niveaux globaux (dBA) associés, avec la Renault Clio de référence et pour différents modes de conduite. 133

4.1 : Comparaison des niveaux sonores mesurés à 50 km/h entre un cyclomoteur et un véhicule léger sur un enrobé de type BBTM. 134

4.2 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé pour un Peugeot 103 SP2 à l'arrêt : hauteur source de 1 et 30 cm. 135

4.3 : Simulation du niveau mesuré à 7.5 m pour une source unique de bruit rose positionnée au sol et deux sources de bruit rose : l'une au sol et l'autre à une hauteur de 30 cm. 136

4.4 : Détermination d'une relation vitesse-fréquence. 137

4.5 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée pour une vitesse stabilisée de 20 km/h. 140

4.6 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée pour une vitesse stabilisée de 67 km/h. 140

4.7 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 21 km/h. 141

4.8 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 49 km/h. 141

4.9 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime décéléré à 29 km/h. 142

4.10 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime décéléré à 49 km/h. 142

4.11 : Comparaison entre le passage réel d'un cyclomoteur et le passage calculé à partir des lois de régression de puissance acoustique. 143

4.12 : Comparaison entre spectre issu d'un véhicule léger, d'une motocyclette et d'un cyclomoteur à une vitesse stabilisée de 70 km/h environ. 144

4.13 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé avec une hauteur source de 3 cm, pour la Suzuki 600 Bandit à l'arrêt, moteur tournant à 4500 tr/min. 145

4.14 : Spectres de puissance Suzuki 600 Bandit à vitesse stabilisée. 146

4.15 : Spectres de puissance Suzuki 600 Bandit en accélération. 146

4.16 : Spectres de puissance Suzuki 600 Bandit en décélération. 147

4.17 : Spectres de puissance Suzuki Bandit à 50 km/h. 148

4.18 : Spectres de puissance Suzuki Bandit à 70 km/h. 149

4.19 : Influence du seul paramètre accélération pour la Yamaha XV 750 à 70 km/h. 149

4.20 : Comparaison Suzuki 600 Bandit (quadri-cylindres)-Yamaha XV 750 (bi-cylindres) à 70 km/h. 150

5.1 : Plan de la cour de récréation, placement des microphones et des sources sonores fictives (numérotées de 1 à 10). 154

5.2 : Vue de la cour de récréation, prise entre les microphones n°2 et n°3. 155
5.3 : Evolution temporelle des $LAeq_{1s}$ au cours d'une récréation pour le microphone n°2. 156
5.4 : Comparaison des niveaux mesurés entre les différentes récréations pour le microphone n°2. 157
5.5 : Comparaison des niveaux mesurés entre les différentes récréations pour le microphone n°6. 157
5.6 : Spectres des niveaux de pression acoustique pour différents microphones. 158
5.7 : Comparaison entre un ensemble de 9 sources situées à une hauteur de 80 cm et deux sources équivalentes respectivement à 80 et 1 cm. 160
5.8 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°1. 161
5.9 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°3. 161
5.10 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°5. 162
5.11 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°6. 162
5.12 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°9. 163
5.13 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°6 avec la pondération A. 164
5.14 : Emplacement du microphone n°9. 164
5.15 : Puissance acoustique calculée pour un enfant. 165
5.16 : Plan de la cour de récréation, emplacement des microphones et des sources sonores fictives (numérotées de 1 à 13). 166
5.17 : Vue de la cour de récréation, prise derrière le microphone n°5. 167
5.18 : Comparaison des niveaux mesurés entre les différentes récréations pour le microphone n°2. 168
5.19 : Comparaison des niveaux mesurés entre les différentes récréations pour le microphone n°5. 168
5.20 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°1. 169
5.21 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°3. 170
5.22 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°5. 170
5.23 : Emplacement du microphone n°1. 172
5.24 : Emplacement du microphone n°2. 172
5.25 : Emplacement du microphone n°3. 173
5.26 : Emplacement du microphone n°5. 173
5.27 : Niveaux sonores moyens mesurés microphone n°1. 174
5.28 : Niveaux sonores mesurés microphone n°3. 174
5.29 : Niveaux sonores mesurés microphone n°5. 175

5.30 : Comparaison des niveaux mesurés sur le marché Zola et autour de l'école du Port au blé. 175

5.31 : Niveaux sonores moyens sur les deux jours, pour les différents microphones. 176

A2.1 : Courbes d'audibilité d'après Flechter et Munson. 186

A2.2 : Courbe de pondération A. 187

A2.1 : Modèle de surface à réaction localisée. 191

A2.2 : Modèle de surface à réaction étendue 192

A2.3 : Modèle à effet d'épaisseur. 193

A3.1 : Niveaux de pression sonore moyens pour les principaux revêtements routiers utilisés aujourd'hui. 196

A4.1 : Réponse en fréquence d'un microphone de type BK 4165 198

A4.2 : Test d'équilibre des deux voies d'acquisition de l'analyseur Hewlett Packard 199

A4.3 : Test d'équilibre des voies d'acquisition 1 et 3 de l'enregistreur numérique DAT Sony. 199

A4.4 : Réponse en fréquence de l'ensemble préamplificateur et enregistreur numérique pour la voie 1. 200

A4.5 : Réponse de l'ensemble préamplificateur et enregistreur numérique à un signal carré 200

A4.6 : Réponse de l'enregistreur numérique à un signal carré. 201

A5.1 : Spectre moyen de la parole pour un homme. Le niveau global moyen est de 65 dB [Kinsler & Frey 1962]. 202

A5.2 : Comparaison des spectres moyens de la parole chez un homme et chez une femme. O : homme ; Δ : femme ; ——— moyenne [Byrne & al. 1994] 203

Index des tableaux

1.1 : Niveaux globaux moyens (émergence à 3 dB) pour les deux sens de circulation et pour des vitesses stabilisées de l'ordre de 80 et 90 km/h. 10

1.2 : Niveaux globaux moyens équivalents (125 ms) pour des vitesses stabilisées de l'ordre de 60-70 km/h..... 11

1.3 : Liste des mots clefs, classés par source, relatifs à l'ensemble des objets élémentaires relevés dans le quartier Graslin [Léobon 94]. 18

2.1 : Différences entre les niveaux mesurés L_m^{Δ} et théoriques L_m (dBA) [Favre 1983]..... 29

2.2 : Hauteurs de sources équivalentes calculées pour différentes configurations..... 62

2.3 : Comparaison des hauteurs de sources et des niveaux de pression acoustique obtenus pour la Renault Clio sur deux sites différents. 64

2.4 : Puissances calculées pour la Renault Clio sur les deux sites précédents. 69

2.5 : Comparaison LAeq calculé (pour différentes hauteurs de sources) – LAeq mesuré. ... 71

3.1 : Coefficients de régression..... 75

3.2 : Valeurs des constantes donnant la puissance acoustique d'un véhicule léger en fonction des paramètres dynamiques V et A. 76

3.3 : Valeurs des constantes donnant la puissance acoustique d'un véhicule lourd (autobus) en fonction du paramètre dynamique V. 77

3.4 : Différents modes de fonctionnement étudiés pendant l'essai (Renault Clio)..... 79

3.5 : Raies moteur théoriques et mesurées (Renault Clio). 88

3.6 : Coefficients de régression a_0, a_1, a_2 et a_3 pour la Renault Clio 1.4l..... 96

3.7 : Coefficients de régression a_0, a_1, a_2 et a_3 pour les cinq véhicules..... 101

3.8 : Comparaison des trois modèles..... 103

4.1 : Raies moteur théoriques et mesurées. 138

4.2 : Coefficients de régression a_0, a_1, a_2 et a_3 pour le cyclomoteur Peugeot 103 SP2..... 139

4.3 : Raies moteur théoriques et mesurées (les erreurs sont en grisé). 148

A2.1 : Ordres de grandeur de σ..... 194

Table des symboles

A	Accélération ($m.s^{-2}$)
A	Constante de correction de vitesse (eq. 2.79)
A_0, A_1, A_2	Coefficients de régression associés à la source moteur-échappement (eq. 3.1)
a_0, a_1 et a_2	Coefficients de régression de la loi de puissance acoustique (eq. 3.6 et 4.2)
A_s	Amplitude de la source sonore (§ 2.5.2)
a_i, b_i, c_i	Constantes pour le rapport de boîte de vitesse i (eq. 3.3 et 3.4)
α	Angle formé par la normale à l'axe de circulation passant par le récepteur et la droite reliant le récepteur à l'abscisse de début de décélération (§ 3.4.2)
α_1	Angle formé par la normale à l'axe de circulation passant par le récepteur et la droite reliant le récepteur à l'abscisse du véhicule à l'instant t_1 (§ 2.2)
α_2	Angle formé par la normale à l'axe de circulation passant par le récepteur et la droite reliant le récepteur à l'abscisse du véhicule à l'instant t_2 (§ 2.2)
$\alpha_{1,2}$	Angle balayé par une source sonore en déplacement, vu du point de réception, entre deux instants t_1 et t_2 (§ 2.2)
α_{air}	Absorption atmosphérique (dB)
α'_{air}	Coefficient d'absorption atmosphérique (dB/m) (annexe 2)
B_0, B_1	Coefficients de régression associés à la source contact pneumatique-chaussée (eq. 3.2)
β	Angle formé par l'axe de rayonnement maximum d'un dipôle et celui de déplacement (§ 2.2)
	Angle formé par la normale à l'axe de circulation passant par le récepteur et celle reliant le récepteur à l'abscisse de fin d'accélération (§ 3.4.2)
c	Célérité du son dans un matériau (m/s) (annexe 2)
C_0	Autospectre du microphone de référence (§ 2.4)
c_0	Célérité du son dans l'air (m/s)
C_m	Interspectre entre le signal recueilli à un microphone de référence situé sur la surface en x_0 et le signal provenant d'un second microphone en x_m (§ 2.4)
constante(r_i)	Constante dépendant du rapport de boîte de vitesse engagé (i = 1,2,3,4,5 et 6) (eq. 3.8)
D	Distance minimale source-récepteur au passage d'un véhicule (§ 3.4.2)
d	Distance minimale source-récepteur au passage d'un véhicule (§ 2.2)
d	Distance horizontale source-récepteur (§ 3.4)
d_g	Distance critique (m) (§ 3.4.2)

ΔL_A	Atténuation excédentaire (§ 3.4.2)
Δt_i	Durée d'intégration prise en compte lors passage d'un véhicule (§ 1.2.2)
E	Exposition (§ 3.4.2)
$\tilde{E}$	Exposition à vitesse stabilisée (§ 3.4.2)
e	Densité d'énergie rayonnée (§ 3.4.2)
$\tilde{e}$	Densité d'énergie rayonnée à vitesse stabilisée (§ 3.4.2)
E_0	Exposition à vitesse stabilisée et en champ libre (§ 3.4.2)
f	Fréquence
$F(w)$	Fonction complexe qui traduit l'interaction des fronts d'onde sphérique avec le sol (annexe 2)
f_{rO}	Fréquence de relaxation de l'oxygène (annexe 2)
f_{rN}	Fréquence de relaxation de l'azote (annexe 2)
φ	Angle d'élévation (§ 2.2)
ϕ_1	Angle formé par la normale à l'axe de circulation passant par le récepteur et la droite reliant le récepteur à l'abscisse x_1 (§ 3.4.2)
ϕ_2	Angle formé par la normale à l'axe de circulation passant par le récepteur et la droite reliant le récepteur à l'abscisse x_2 (§ 3.4.2)
G	Fonction de Green (§ 2.4)
G_A	Terme de correction due à l'atténuation excédentaire (§ 3.4.2)
γ	Angle formé par la normale à l'axe de circulation passant par le récepteur et celle reliant le récepteur à l'abscisse x = 0 (§ 3.4.2)
h	Concentration molaire de vapeur d'eau en pourcentage (annexe 2)
h_m	Hauteur des microphones d'une antenne acoustique verticale (§ 2.4)
I	Intensité acoustique (W/m^2) (eq. 2.24)
K	Pourcentage de véhicules traversant une intersection à vitesse constante (§ 3.4.2)
k	Nombre d'onde dans un matériau (annexe 2)
k_0	Nombre d'onde dans l'air
k_d	Vecteur d'onde incident (annexe 2)
k_r	Vecteur d'onde réfléchi (annexe 2)
L	Pourcentage de charge moteur
l_1	Abscisse de début de décélération (§ 3.4.2)
l_2	Abscisse de fin d'accélération (§ 3.4.2)
L_{AE}	Niveau d'exposition (§ 3.4.2)
$\tilde{L}_{AE}$	Niveau d'exposition à vitesse stabilisée (§ 3.4.2)

$LAeq_{125ms}$	Niveau énergétique équivalent pondéré A (temps d'intégration de 125 ms)
L_{AT}	Niveau sonore moyen (§ 3.4.2)
$\tilde{L}_{AT}$	Niveau sonore moyen pour un trafic à vitesse constante (§ 3.4.2)
$L_{calculé}$	Niveau de pression sonore calculé (§ 2.5)
Leq	Niveau énergétique équivalent
Leq_{10}	Niveau énergétique équivalent (temps d'intégration de 10 s) (§ 2.2)
L_{libre}	Niveau de pression sonore en champ libre (§ 2.5)
L_m	Niveau maximum instantané (§ 2.2)
Lmax(i,f)	Niveau équivalent maximum (sur 125 ms) au passage d'un véhicule i et pour le tiers d'octave de fréquence centrale f (eq. 1.4)
$L_{mesuré}$	Niveau de pression sonore mesuré (§ 2.5)
Lm_i	Niveau énergétique moyen pour un véhicule i (temps d'intégration Δt_i) (eq. 1.1)
$L_{moyen}(f)$	Niveau équivalent pour une catégorie de véhicules et pour le tiers d'octave de fréquence centrale f (eq. 1.4)
$Lm_{particulier}$	Niveau moyen particulier d'une classe de véhicules (eq. 1.1)
$Lm_{partiel}$	Niveau moyen partiel d'une classe de véhicules (eq. 1.2 et 1.3)
Lp	Niveau de pression sonore
Lp_{max}	Niveau de pression sonore maximum au passage d'un véhicule (§ 2.2)
L_{TR}	Emission sonore unitaire d'un train routier (§ 1.2.1)
Lw	Niveau de puissance acoustique
$Lw_A(v_0)$	Niveau de puissance acoustique pondéré A à vitesse stabilisée
Lw_e	Puissance acoustique de la source moteur-échappement (eq. 3.1)
Lw_i	Puissance acoustique pour un rapport i (eq. 3.3 et 3.4)
Lw_t	Puissance acoustique de la source contact pneumatique-chaussée (eq. 3.2)
μ_i, μ_{ij}	"Moments" d'une distribution de sources sonores (§ 2.4)
N	Nombre de véhicules
n	Nombre de cylindres d'un moteur
p	Pression sonore
p_0	Pression sonore de référence ($p_0 = 2.10^{-5}$ Pa)
Pa	Pression atmosphérique ambiante (kPa) (annexe 2)
p_A^2	Pression sonore au carré pondérée A (§ 3.4.2)
p_t	Pression sonore en champ libre (§ 2.5.2)
p_{max}	Pression sonore maximum au passage d'un véhicule (§ 2.2)
Pr	Pression atmosphérique de référence (Pr = 101325 kPa) (annexe 2)

p_r	Pression sonore en présence d'un sol (§ 2.5.2)
Q	Coefficient de réflexion en ondes sphériques
$Q(\theta,\varphi)$	Directivité d'une source sonore en fonction des angles θ et φ (§ 2.2)
θ	Angle formé par l'axe de rayonnement maximum d'une source et la droite joignant cette source au récepteur (§ 2.2)
R	Distance séparant x_0 de y_0 (§ 2.4)
r	Distance source-récepteur
r_0	Distance entre la source et le microphone de référence situé en x_0 (§ 2.4)
r_d	Rayon direct (§ 2.5.2)
R_p	Coefficient de réflexion en ondes planes (annexe 2)
r_r	Rayon réfléchi (§ 2.5.2)
r_+	Rayon direct (§ 2.4)
r_-	Rayon réfléchi (§ 2.4)
ρ	Masse volumique d'un matériau (annexe 2)
ρ_0	Masse volumique de l'air
S	Régime moteur (tr/min)
	Densité d'énegie rayonnée : énergie rayonnée par la "route" par unité de longueur (§ 3.4.2)
S_0	Densité d'énergie rayonnée à vitesse stabilisée (§ 3.4.2)
S_1	Densité d'énergie rayonnée en décélération (§ 3.4.2)
S_2	Densité d'énergie rayonnée en accélération (§ 3.4.2)
σ	Résistance au passage de l'air (cgs Rayls/cm)
T	Durée d'enregistrement (§ 1.2.2)
	Période d'intégration (§ 2.2)
	Température ambiante (K) (annexe 2)
T_0	Température ambiante de référence (T_0 = 293.15 K) (annexe 2)
$\vec{U}$	Vitesse particulaire (eq. 2.24)
v	Vitesse d'un véhicule
v_0	Vitesse d'un véhicule en régime stabilisé (§ 3.4.2)
v_{ref}	Vitesse de référence d'un véhicule (eq. 2.79)
W	Puissance acoustique d'une source
w	Puissance d'une source par unité de volume (§ 2.4)
w	"Distance numérique" (annexe 2)
W_0	Puissance acoustique de référence ($W_0 = 10^{-12}$ W)
W_A	Puissance acoustique pondérée A (§ 3.4.2)

W_e	Puissance équivalente d'une source sonore (§ 2.4)
W_n	Puissance acoustique de la $n^{ième}$ source d'une distribution verticale de sources sonores (§ 2.4)
W_T	Puissance acoustique totale d'une source (§ 2.4)
ω	Pulsation
x_0	Position du point de référence (§ 2.4)
	Abscisse du récepteur (§ 3.4.2)
x_1, x_2	Abscisses du véhicule, respectivement aux instants t_1 et t_2 (§ 3.4.2)
x_m	Position du point de mesure (§ 2.4)
ξ	Paramètre d'accélération (§ 3.4.2)
y_0	Origine du système de coordonnées (§ 2.4)
y_e	Hauteur de la source sonore équivalente (§ 2.4)
y_n	Hauteur de la $n^{ième}$ source d'une distribution verticale de sources sonores (§ 2.4)
Z	Impédance acoustique d'un matériau
Z_0	Impédance acoustique de l'air

"Pour se défendre contre le bruit, il ne faut pas se boucher les oreilles, se plaindre ou fuir, mais commencer d'écouter"

Nicolas Frize compositeur

Extrait de la brochure du CIDB (Centre d'Information et de Documentation sur le Bruit) : le bruit aujourd'hui.

Introduction générale

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. Les choses ont évolué à tel point qu'il existe aujourd'hui, de la part des administrés, une forte demande concernant l'amélioration de l'environnement sonore, demande bien relayée par les médias. Pour répondre à ces attentes, des mesures importantes ont été prises. Citons par exemple l'obligation, pour chaque grande municipalité, de dresser une carte sonore de son centre-ville.

Dans le but d'apporter des solutions à ces questions d'environnement sonore dans le coeur de nos agglomérations, un programme de recherche a été lancé en 1994 dans le cadre de l'appel d'offres "Ville sensible" du Programme Inter-disciplinaire de Recherche sur la Ville (PIR-Villes) du CNRS. L'objectif était la définition des caractéristiques d'un logiciel de prédiction des ambiances sonores urbaines. La démarche entreprise consistait, en particulier, à développer de nouvelles méthodes pour :

- une représentation plus qualitative de l'environnement sonore,
- une opérationnalité capable de se traduire dans les stades initaux de la conception des projets,
- une possibilité de croisement des phénomènes sonores avec d'autres phénomènes physiques et climatiques,
- une sensibilité aux variations typologiques et morphologiques des différents tissus urbains.

Les équipes de la Fédération de recherche 73 "Physique et image de la ville" du CNRS se sont associées pour répondre favorablement à cet appel d'offre. Le projet "***Vers un logiciel prédictif des ambiances sonores urbaines***" regroupe les laboratoires du CERMA[1], du CRESSON[2], du LAUM[3] et du LCPC[4]. A ce jour, il comporte quatre parties :

- la propagation du son en milieu urbain (sous forme de solution d'une équation de diffusion) développée au LAUM [Picaut 1998], puis plus récemment au LCPC,
- la modélisation de la morphologie du cadre bâti et son interaction sur la propagation sonore en site urbain étudiée en collaboration entre le CERMA et le LCPC [Woloszyn 1998],
- les relations entre les aspects quantitatifs et qualitatifs des ambiances sonores urbaines explorées au CERMA et au LCPC dans le cadre d'un travail qui a débuté en Octobre 1998,

[1] Centre d'Etudes et de Recherches Méthodologiques d'Architecture, UMR CNRS 1513, Ecole d'Architecture de Nantes, Ministère de la culture.
[2] Centre de Recherche sur l'Espace Sonore et l'environnement urbain, UMR CNRS 1513, Grenoble
[3] Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, UMR CNRS 6613, Le Mans
[4] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

- **la caractérisation des sources sonores en milieu urbain**, autour desquelles s'inscrit le présent travail, qui de par les nombreuses campagnes de mesures réalisées, revêt un caractère fortement expérimental.

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 deux catégories principales :

- les sources d'origine "mécanique"[5] : voitures particulières, autobus, poids lourds, cyclomoteurs, tramways, trains, etc.,
- les sources d'origine "humaine" : enfants dans une cour de récréation, piétons sur une place de marché, clients de bar ou restaurant en terrasse, etc.

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux sources les plus fréquemment citées comme gênantes, c'est-à-dire les sources d'origine mécanique et plus particulièrement celles de type routier. De nombreux travaux ont déjà été réalisés dans ce domaine. Cependant, comme nous le détaillerons au cours de l'analyse bibliographique, ils utilisent une approche inadaptée à nos objectifs, notamment par l'absence d'informations spectrales, pourtant indispensables lorsque l'on souhaite ensuite intégrer dans les modèles l'aspect propagatif.

Dans le but de caractériser le plus simplement les sources sonores d'origine routière, il est, avant toute chose, indispensable de les recenser et si possible, de les regrouper en différentes catégories. Si l'on désire obtenir un logiciel prédictif simple à utiliser, il est en effet préférable de réunir les véhicules présentant des similitudes acoustiques. Ce travail a déjà été effectué, notamment par le CETUR (Centre d'Etudes des Transports URbains) lors de l'élaboration du Guide du bruit [CETUR 1980] qui constitue encore actuellement la référence pour la réalisation d'études d'impact. Cette classification est-elle toujours valable ? C'est à cette question que nous tenterons de répondre dans le premier chapitre en établissant un "classement" de différentes sources sonores d'origine routière. Ce premier chapitre a aussi pour objet de se familiariser avec les différentes méthodes d'acquisition et de traitement des données et de les optimiser. Un premier aperçu des sources d'origine ferroviaire et des sources d'origine humaine y sont également présentés.

Actuellement, des recherches sont engagées au sein du réseau technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées, dans le but de déterminer le niveau sonore émis par les différentes classes de véhicules sur les divers types de revêtements de chaussée. Ces études font deux hypothèses : tout d'abord, qu'aux vitesses considérées, seul le bruit de contact pneumatique/chaussée émerge, ce qui est vrai au-delà de 60 km/h pour les véhicules légers et 80 km/h pour les véhicules lourds, et enfin que le milieu de propagation est considéré comme parfaitement libre (absence d'obstacles environnants).
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, de la présence du bâti (diffraction, réflexion). Le travail de thèse consiste à étudier tout d'abord, une adaptation de la procédure de mesure de

[5] Par abus de langage, nous emploierons indifféremment, dans le reste du document, les termes sources d'origine mécanique ou sources mécaniques ; de même pour les sources d'origine humaine ou sources humaines.

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 terme de source sonore équivalente ainsi que l'évolution fréquentielle de cette puissance acoustique sont indispensables, notamment pour l'approche propagative. Ceci fait l'objet des deuxième et troisième chapitres pour les véhicules légers et du quatrième pour les motocyclettes et cyclomoteurs.

Même si elles sont encore peu influentes, les sources d'origine humaine prennent une importance croissante en milieu urbain, en raison de la volonté des pouvoirs publics d'écarter la circulation automobile des centres-villes et de favoriser l'extension des zones piétonnes et semi-piétonnes. Le chapitre 5 est consacré à l'étude d'un échantillon de ce "nouveau" type de sources sonores parmi lesquelles deux cours de récréation et une place de marché.

Chapitre 1 : Identification des différents types de sources sonores rencontrés en milieu urbain

1.1. Introduction

Comme déjà mentionné en introduction générale, les sources sonores peuvent être regroupées en deux catégories : les sources d'origine "mécanique" et celles d'origine "humaine". De par leurs caractéristiques, ces deux types de sources sont radicalement différentes. Alors que les sources mécaniques simulant le trafic routier peuvent être considérées comme "quasi-continues", les sources humaines apparaissent quant à elles en mode discontinu. La caractérisation sera donc différente, d'où cette première séparation en deux groupes. De façon identique, une voiture particulière n'aura pas le même "impact" acoustique qu'un poids lourd. Il est donc nécessaire de distinguer des sous-catégories à l'intérieur d'une même famille de sources sonores (mécanique ou humaine).
En revanche, il ne faut pas tomber dans l'excès inverse qui consisterait à définir un trop grand nombre de sous-catégories. Rappelons à cet effet, que le but de la caractérisation des sources sonores est, à terme, leur intégration dans un logiciel prédictif des ambiances sonores urbaines qui doit être un outil à la fois performant et simple d'accès. Un regroupement des sources présentant des similitudes acoustiques est indispensable. Ceci fait l'objet de ce premier chapitre qui tente non seulement d'établir un "classement" des sources sonores rencontrées en ville mais aussi de les présenter.

1.2. Les sources sonores d'origine routière

1.2.1. Quelques rappels bibliographiques

De nombreux écrits proposent un classement des sources sonores d'origine routière. Parmi ceux-ci, on peut citer entre autres le guide du bruit des transports terrestres [CETUR 1980], le modèle de prévision allemand des niveaux sonores (RLS 90)[1] [Hamet 1996-1] et le modèle américain FHWA TNM[2] [Hamet 1996-2].

[1] "Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen" – Edition 1990.
[2] "Federal Highway Administration's Traffic Noise Model"

Selon le guide du bruit, les catégories de véhicules à prendre en compte lors d'une étude de bruit, sont les suivantes :

- les véhicules légers (véhicules de Poids Total Autorisé en Charge (PTAC) inférieur à 3.5 tonnes),
- les véhicules lourds (véhicules de PTAC supérieur à 3.5 tonnes) en distinguant, lorsque cela est possible, les véhicules de PTAC compris entre 3.5 et 12 tonnes (Poids Lourds) de ceux possédant un PTAC supérieur à 12 tonnes (Trains Routiers),
- les "deux roues" motorisés en distinguant essentiellement trois catégories : les motocyclettes (cylindrée supérieure à 125 cm^3), les vélomoteurs (cylindrée comprise entre 50 et 125 cm^3) et les cyclomoteurs (cylindrée inférieure à 50 cm^3).

Le modèle de prévision allemand RLS 90 [Hamet 1996-1] reste assez proche de la classification du guide du bruit, sans tenir compte toutefois des deux roues. Il distingue deux classes de véhicules :

- les véhicules légers dont le PTAC est inférieur à 2.8 tonnes,
- les poids lourds dont le PTAC est supérieur à 2.8 tonnes.

En revanche, le modèle américain FHWA TNM [Hamet 1996-2] sépare les véhicules en cinq catégories :

- les 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),
- les 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,
- les trains routiers ("Heavy trucks") : véhicules de transport de marchandises à plus de deux essieux, en général d'un poids total supérieur à 12 tonnes,
- les autobus : tout véhicule à deux ou trois essieux conçu pour transporter neuf passagers ou plus (pas d'indications de poids total),
- les motocycles : tout véhicule ayant deux ou trois pneumatiques dont le compartiment conducteur et/ou passager est à ciel ouvert.

Il convient de noter que le "US Department of Transportation Federal Highway Administration" considère un écart de 4 dBA entre les catégories de véhicules lourds "Medium Trucks" (équivalent des PL) et "Heavy Trucks" (correspondant aux TR) [Hamet 1996-2]. En conséquence, ce dernier modèle sépare les poids lourds et les trains routiers. Ceci provient certainement de la particularité des trains routiers rencontrés sur le continent américain qui ont leur pot d'échappement dirigé vers le haut.

Dans les deux premiers modèles, aucune distinction n'est effectuée entre les poids lourds (PL) et les trains routiers (TR). A ce propos, un récent rapport de l'INRETS [Lelong 1997-1] fait ressortir, dans ses premières conclusions, un écart très faible entre ces deux sous-catégories lorsque ces véhicules circulent à vitesse stabilisée. En effet, le "test de sensibilité" PL/TR sur le bruit total émis par le trafic lourd est de l'ordre du décibel (pour un pourcentage de TR dans le trafic lourd, variant de 40 à 80% sur routes nationales et de 60 à 100% sur autoroutes). Notons que les poids lourds sont ici les véhicules dont le nombre d'essieux est inférieur à quatre et les trains routiers, les véhicules présentant quatre essieux ou plus. Ces résultats sont basés sur l'hypothèse suivante : l'émission d'un PL est inférieure de 3 dBA à celle d'un TR. Celle-ci peut être fondée sur les seuils d'homologation actuellement en vigueur au sein de la

CEE (réglementation 70/157/EWG). L'écart existant entre les niveaux maxima admissibles à l'homologation pour les TR (véhicules lourds dont la puissance nominale est supérieure à 150 kW) d'une part, et les PL dont la puissance nominale est comprise entre 75 et 150 kW d'autre part, est de 2 dBA. Cet écart est de 3 dBA si l'on considère les PL dont la puissance nominale n'excède pas 75 kW (figure 1.1).

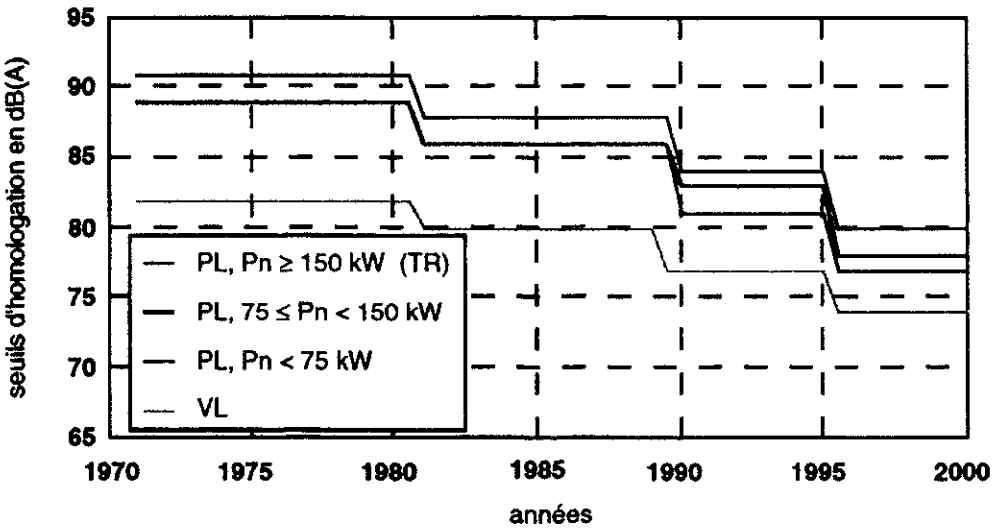

Figure 1.1 : Réglementation 70/157/EWG pour l'homologation acoustique des différentes catégories de véhicules.

Ce test de sensibilité correspond à la différence des niveaux mesurés pour un trafic, constitué de véhicules légers et de véhicules lourds, sans différenciation d'émission, et pour un trafic constitué également de véhicules légers et de véhicules lourds prenant en compte une distinction PL/TR.
Les hypothèses nécessaires à cette étude, notamment celles fixant le pourcentage de PL et TR dans le trafic total, sont proposées par le SETRA[3] [Lelong 1997-1].

Le précédent travail s'applique au bruit de trafic interurbain. Parallèlement, un second rapport publié par l'INRETS [Lelong 1997-2] relate les résultats d'une étude pour des conditions de trafic urbain. A cet effet, trois types d'infrastructures urbaines sont différenciées :

- les artères urbaines (vitesse de 50 km/h pour les véhicules légers et de 40 km/h pour les trains routiers, trafic de l'ordre de 18 000 véhicules/jour)
- les voies artérielles péri-urbaines (vitesse de 70 km/h pour les véhicules légers et de 50 km/h pour les trains routiers, trafic de l'ordre de 25 000 véhicules/jour)
- les voies rapides urbaines (vitesse de 100 km/h pour les véhicules légers et de 80 km/h pour les trains routiers, trafic de l'ordre de 100 000 véhicules/jour)

[3] SETRA : Services d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes.

Les véhicules lourds sont maintenant séparés en trois catégories :

- les véhicules lourds de "faible" PTAC (émission unitaire : L_{TR} - 6 dB)
- les véhicules lourds de PTAC "moyen" (émission unitaire : L_{TR} - 3 dB)
- les véhicules lourds de grande dimension et de "fort" PTAC (émission unitaire L_{TR})

En l'absence d'information sur les émissions acoustiques unitaires des différents PL, aucun seuil précis de PTAC n'est indiqué pour ces trois classes.

Les hypothèses donnant le trafic de chaque classe par rapport au trafic total sont proposées par le CERTU [Lelong 1997-2].

De cette seconde étude, il ressort un test de sensibilité PL/TR plus mitigé que précédemment. En effet, pour la plupart des cas envisagés il conserve une valeur proche de 1 dB à l'exception du cas des artères urbaines où l'on a souvent un faible pourcentage de TR au profit des véhicules lourds de faible PTAC. Dans ce dernier cas, le test de sensibilité peut dépasser 2 dB.

Au vu de ce qui précède, il ne semble donc pas primordial de séparer les poids lourds des trains routiers lorsque leur vitesse respective est stabilisée, à l'exception peut-être d'un cas. Après avoir déterminé les niveaux d'émission des trains routiers, une simple pondération de ces niveaux pourrait s'avérer suffisante pour les différentes classes de poids lourds sans introduire de gros écarts par rapport à la réalité.

1.2.2. Mesures préliminaires

Les premières mesures effectuées, dans le cadre de ce travail de thèse, l'ont été en Janvier 1997 sur une aire de repos longeant la route Nantes-Pornic. Il s'agit d'une route à deux voies d'une largeur totale de 7 mètres, recouverte d'un enrobé classique de type Béton Bitumineux Semi-Grenu[4] (BBSG). Le microphone de mesure était positionné à une hauteur de 1.2 m (figure 1.2). Un autre microphone relié à la seconde voie d'un enregistreur Nagra IV SJ était utilisé pour commenter les différents évènements sonores produits au passage des véhicules. L'acquisition et le dépouillement des données ont été effectués à l'aide d'une carte ARIA et de divers logiciels distribués par la société 01dB.

Les bruits de la circulation ont été enregistrés en continu pendant 30 minutes environ. Le trafic était fluide et la vitesse moyenne d'environ 90 km/h pour les véhicules légers et de 80 km/h pour les véhicules lourds. La figure 1.3 représente une partie de l'évolution temporelle obtenue sous forme de niveau énergétique équivalent $LAeq_{125\ ms}$ (dBA).

[4] On pourra se reporter à l'annexe 1 pour plus de détails.

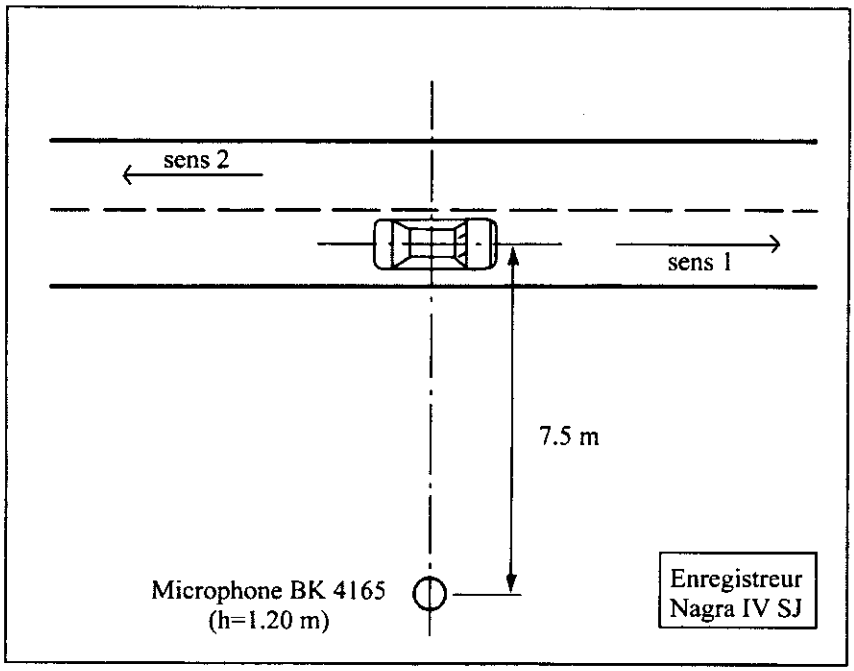

Figure 1.2 : Schéma du dispositif de mesure.

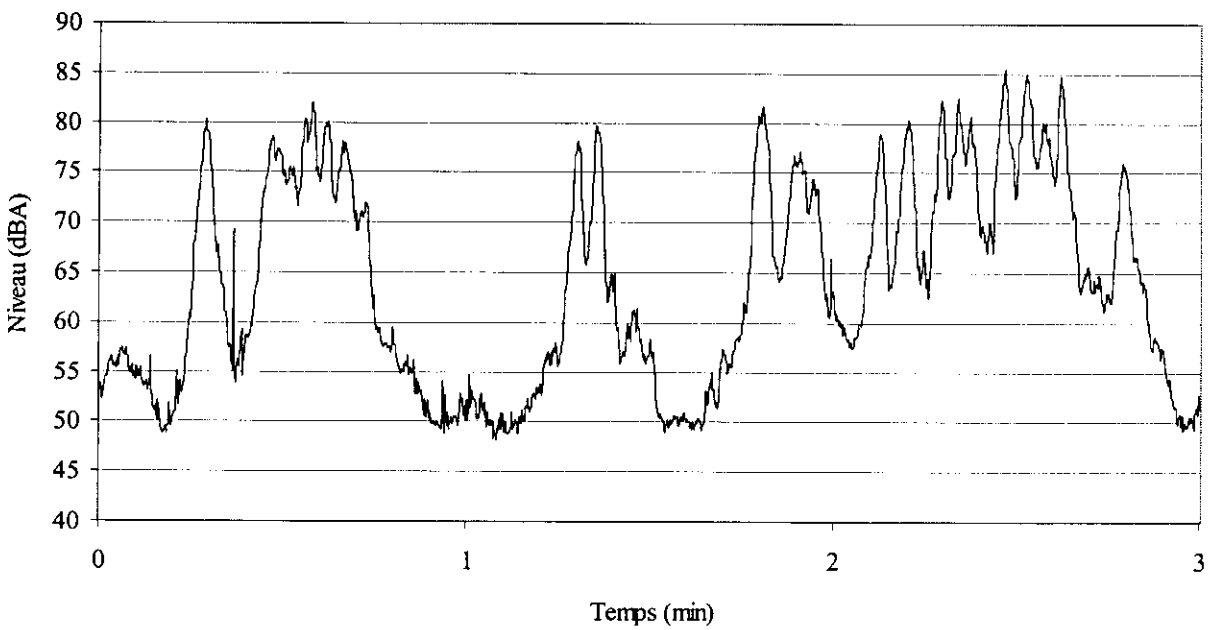

Figure 1.3 : Evolution temporelle obtenue sur 3 minutes en termes de $LAeq_{125\,ms}$ (dBA).

Le but de ces mesures préliminaires était de parvenir, à partir d'un enregistrement où figure un ensemble de sources sonores, à localiser et à extraire chacun des véhicules du signal global afin de les regrouper en différentes catégories.
Les données recueillies ont été par la suite triées en fonction du sens de circulation et du type de véhicules.

Nous avons distingué quatre classes de véhicules :

- les voitures particulières,
- les utilitaires (type Renault Trafic, Peugeot J5),
- les poids lourds,
- les trains routiers (véhicules à quatre essieux ou plus).

Pour examiner les données enregistrées, deux démarches ont été utilisées :

- la première consiste à prendre en compte la signature acoustique des véhicules présentant une émergence d'au moins 10 dBA. Il s'agit donc de véhicules "quasi isolés". Cette méthode rigoureuse a été écartée en raison du nombre insuffisant de véhicules sélectionnés. Cela rendait la statistique peu fiable,
- la seconde considère les véhicules présentant une émergence d'au moins 3 dBA. Cette dernière permet d'accroître considérablement le nombre d'évènements sonores.

Dans une première étape, il s'agit de calculer le niveau énergétique moyen, Lm_i, pour chaque véhicule i obtenu par intégration sur la durée Δt_i de passage du véhicule (figure 1.4). Notons que la durée Δt_i peut varier d'un véhicule à l'autre suivant la vitesse.

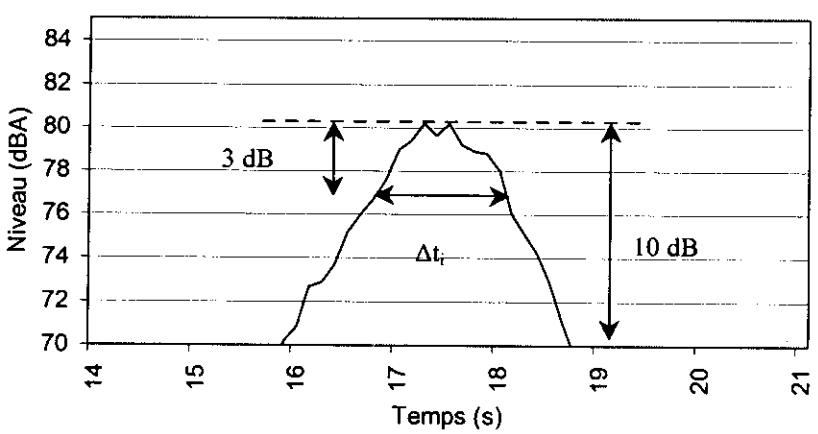

Figure 1.4 : Principe de l'émergence au cours du passage d'un véhicule.

Au cours d'une seconde étape, on calcule le "niveau moyen particulier" ($Lm_{particulier}$) puis le "niveau moyen partiel" ($Lm_{partiel}$), pour chaque catégorie de véhicules précédemment définie.

$Lm_{particulier}$ est obtenu sur la durée cumulée de passage, $\Sigma\Delta t_i$, d'une classe de véhicules :

$$Lm_{particulier} = 10\log_{10}\left[\frac{1}{\Sigma\Delta t_i}\sum\left(10^{Lm_i/10}.\Delta t_i\right)\right] \qquad 1.1$$

Le niveau moyen partiel est le niveau moyen particulier de chaque catégorie de véhicules ramené à la durée totale d'enregistrement, T :

$$Lm_{partiel} = 10\log_{10}\left[\frac{1}{T}10^{Lm_{particulier}/10}.\Sigma\Delta t_i\right] \qquad 1.2$$

soit :

$$Lm_{partiel} = 10\log_{10}\frac{\Sigma\Delta t_i}{T} + Lm_{particulier} \qquad 1.3$$

Comme mentionné précédemment, seule la méthode n'acceptant qu'une émergence de 3 dB a été conservée. En effet, dès qu'un axe routier devient très circulé, il s'avère difficile de satisfaire le critère de 10 dB. La méthode de l'émergence à 3 dB considère néanmoins la partie la plus énergétique du signal avec un nombre suffisant de véhicules comptabilisés. Les résultats obtenus sont réunis dans le tableau 1.1. Le sens 1 indique le sens de circulation le plus proche du microphone de mesure.

Tableau 1.1 : Niveaux globaux moyens (émergence à 3 dB) pour les deux sens de circulation et pour des vitesses stabilisées de l'ordre de 80 et 90 km/h.

	$Lm_{particulier}$ (dBA)	$Lm_{partiel}$ (dBA)
VP sens 1	79,0	67,0
VP sens 2	78,1	65,2
Utilitaires sens 1	80,2	58,0
Utilitaires sens 2	80,3	61,0
PL sens 1	85,4	59,6
PL sens 2	83,0	57,9
TR sens 2	84,0	57,3

A la lecture de ce tableau, on constate, d'une part, que les niveaux sonores atteints par les utilitaires sont supérieurs d'environ 1.5 dBA à ceux atteints par les voitures particulières, et d'autre part, que l'écart véhicules légers – poids lourds et véhicules légers – trains routiers dépasse respectivement 5 et 6 dB.
Le niveau moyen partiel met en relief, dans ce cas, l'impact des voitures particulières qui apportent la plus grosse contribution sur le LAeq global (72 dBA). Ceci s'explique par le faible pourcentage de véhicules lourds dans le trafic total (4%).

Les mesures précédemment décrites étaient représentatives de véhicules circulant à des vitesses moyennes comprises entre 80 km/h (poids lourds) et 90 km/h (véhicules légers). Cette classification est-elle toujours conservée en milieu urbain lorsque les véhicules circulent à des vitesses inférieures ? Afin de répondre à cette interrogation, une seconde série de mesures a donc été mise en place à partir d'une méthodologie légèrement différente. Le site est similaire au précédent : ouvert, plan et avec une chaussée revêtue d'un enrobé de même type. Comme nous le verrons, les vitesses sont plus faibles (typiques d'une zone limitée à 70 km/h) mais

restent encore assez élevées. Elles peuvent néanmoins se rencontrer sur les grandes artères urbaines ou en périphérie des villes. Malgré ces restrictions, nous avons choisi ce site car il permet de rassembler sur un même lieu, à des vitesses stabilisées faibles, un nombre suffisant de voitures particulières, utilitaires et véhicules lourds, isolés dans le trafic.

La méthode actuellement en vigueur dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées consiste à effectuer des acquisitions de 4 secondes à l'aide d'un logiciel développé spécialement par 01dB (dBLRS). Ce dernier calcule par la suite un spectre toutes les 125 ms sur 4 secondes (soit 32 spectres) et conserve le maximum par bandes tiers d'octave. Le spectre ainsi reconstitué est en réalité très proche du spectre du maximum (niveau global équivalent sur 125 ms). Dans le premier cas il s'agit du maximum des spectres (pour chaque bande) et dans le second du spectre du maximum.

Un niveau moyen est ensuite déduit sur l'ensemble N des véhicules d'une même catégorie et pour un tiers d'octave particulier (de fréquence centrale f) :

$$L_{moyen}(f) = 10\log_{10}\left[\frac{1}{N}\sum\left(10^{Lmax(i,f)/10}\right)\right] \qquad 1.4$$

où Lmax(i,f) est le niveau équivalent maximum (125 ms) pour le véhicule i et le tiers d'octave de fréquence centrale f.

Après sommation des différents $L_{moyen}(f)$ (18 tiers d'octave) et application de la pondération A, on obtient les niveaux globaux moyens détaillés dans le tableau suivant.

Tableau 1.2 : Niveaux globaux moyens équivalents (125 ms) pour des vitesses stabilisées de l'ordre de 60-70 km/h.

	Vitesse moyenne (km/h)	Niveau global moyen (dBA)
VP	73.6	80.1
Utilitaires	73	81.2
PL	61.2	83.3
TR	59.2	84.2

Les niveaux sonores atteints par les véhicules utilitaires sont supérieurs d'environ 1 dBA à ceux des voitures particulières, contre 1.5 dBA précédemment. Les poids lourds et les trains routiers sont encore très proches (environ 1 dBA). La différence avec les véhicules légers atteint respectivement 3 et 4 dBA (5 et 6 dBA auparavant). Il faut souligner que les véhicules lourds circulent environ 15 km/h moins vite que les véhicules légers.

Afin de vérifier l'indépendance des résultats vis-à-vis de la méthode choisie, nous avons appliqué la seconde démarche (maximum des spectres) au premier cas étudié (vitesses de l'ordre de 80-90 km/h). Les résultats sont quasiment identiques à ceux trouvés tableau 1.1.

Conclusion

Hormis les deux roues, ces résultats nous permettent donc de ne distinguer que deux grandes classes de véhicules indépendamment du type de vitesses extra-urbaines ou urbaines :

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

Nous retrouvons de ce fait la même classification que celle décrite dans le guide du bruit [CERTU 1980], établie il y a une vingtaine d'années. Ceci est a priori logique car l'ensemble des catégories de véhicules a bénéficié d'une diminution du niveau d'émission sonore. Même si les niveaux absolus sont différents, l'écart entre les véhicules reste quasiment inchangé. Les utilitaires, d'un poids total en charge inférieur à 3.5 tonnes, peuvent donc être regroupés avec les véhicules légers. En ce qui concerne les poids lourds et les trains routiers, la faible différence de niveau sonore entre les deux types de véhicules ne permet pas de les dissocier. Cette hypothèse se trouve renforcée compte tenu de la disparité du parc national des véhicules lourds.

1.2.3. Composition spectrale

Comme nous l'avons vu au paragraphe 1.1.1, les classements de véhicules proposés dans la littérature ne s'expriment qu'en termes de niveau global. Cette analyse n'est pas suffisante car, d'une part, deux sources peuvent avoir un spectre radicalement différent et présenter un niveau global identique, et d'autre part, l'atténuation sonore en distance est fonction de la fréquence. Si l'on souhaite faire intervenir l'aspect propagatif, une analyse spectrale est donc indispensable.
Les graphiques 1.5, 1.6 et 1.7 présentent une comparaison spectrale entre les diverses catégories de véhicules.

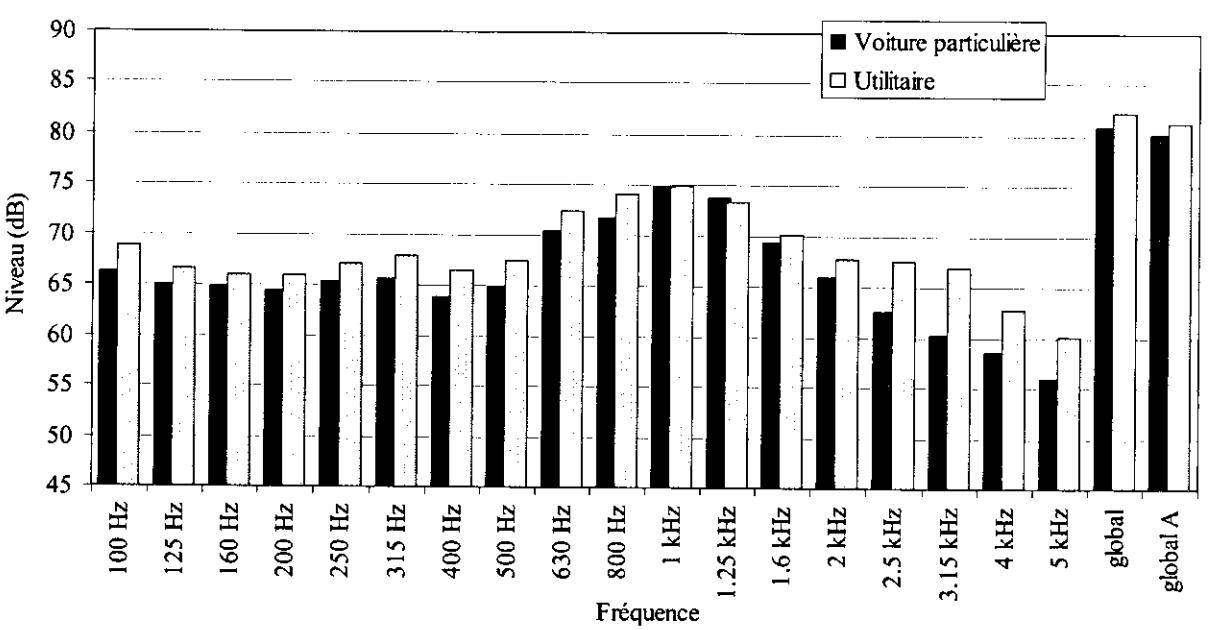

Figure 1.5 : Comparaison du spectre moyen d'une voiture particulière et d'un utilitaire.

Si les niveaux globaux représentatifs des utilitaires et des voitures particulières sont comparables (cf. tableau 1.1 et 1.2), les spectres sont eux aussi très ressemblants (cf. figure 1.5). En conséquence, les utilitaires peuvent logiquement être classés avec les voitures particulières. Ces deux classes forment la catégorie des véhicules légers.

Comme mentionné précédemment, les poids lourds présentent un niveau sonore global beaucoup plus important que les véhicules légers. Cette différence se fait tout naturellement ressentir sur la représentation spectrale et plus particulièrement en basse et haute fréquence (figure 1.6).

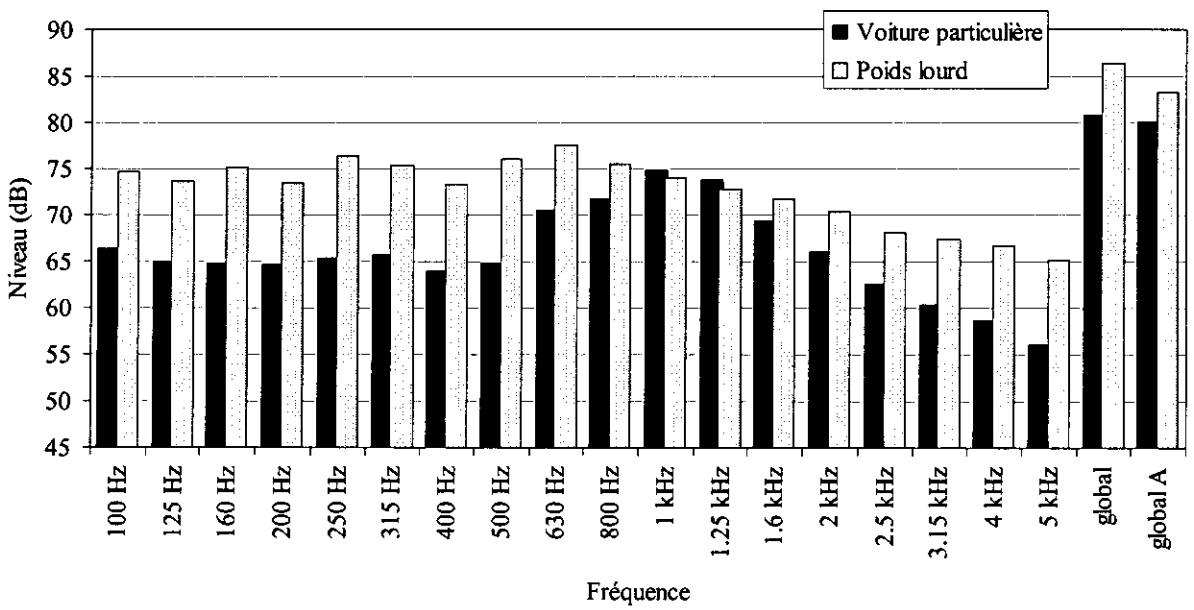

Figure 1.6 : Comparaison du spectre moyen d'une voiture particulière et d'un poids lourd.

En revanche, les poids lourds et les trains routiers, à l'image des voitures particulières et des utilitaires, présentent des spectres quasiment identiques (cf. figure 1.7).

L'étude spectrale confirme donc le classement précédemment établi en termes de niveaux globaux. Soit deux grandes classes de véhicules (si l'on omet les deux roues) :

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

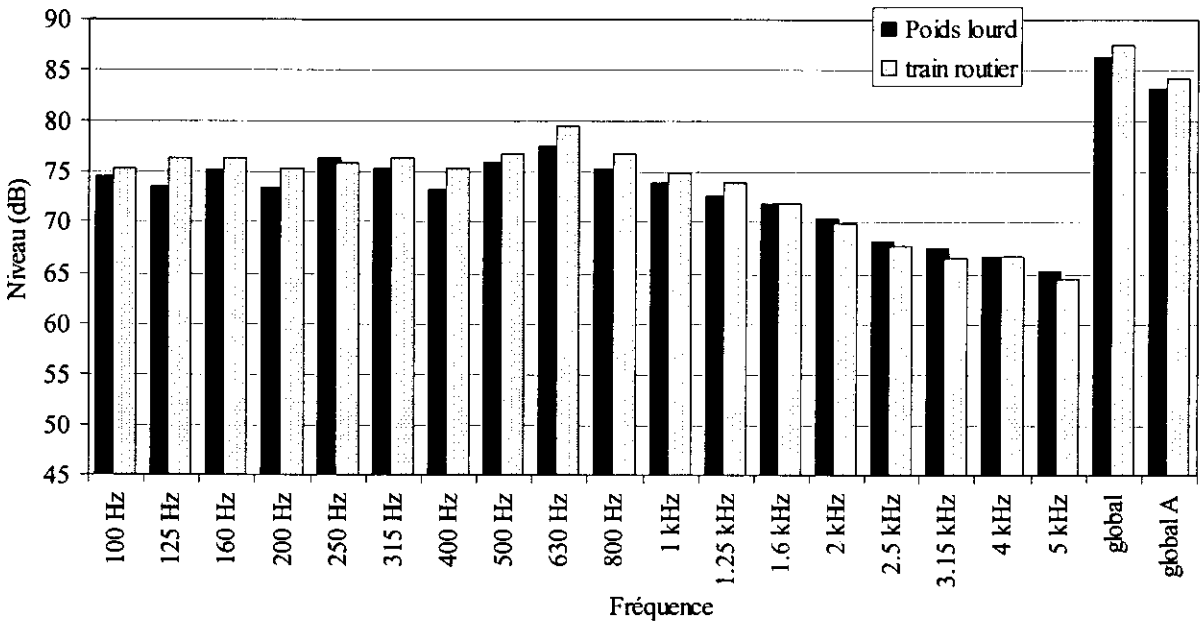

Figure 1.7 : Comparaison du spectre moyen d'un poids lourd et d'un train routier.

1.3. Sources d'origine ferroviaire

Les recherches engagées sur la problématique du bruit des transports ferroviaires étaient, jusqu'à présent, principalement focalisées sur les trains. L'INRETS[5], par exemple, y contribue depuis de nombreuses années. Un projet de coopération franco-allemande (DeuFraKo[6]) a réuni notamment l'INRETS et Metravib pour la France, IABG pour l'Allemagne. Les travaux concernaient les sources de bruit des transports guidés à grande vitesse. A cet effet, des techniques d'antennes [DeuFraKo 1994] ont été mises en œuvre.
Aujourd'hui, le renouveau du tramway dans des villes comme Nantes, Grenoble, Strasbourg et bientôt d'autres, pose de nouveaux problèmes. Le nombre de plaintes de riverains n'est pas négligeable. Les études et la recherche sur ce "nouveau" moyen de transport en commun commencent à émerger. Ce sont des sources sonores assez complexes car dépendantes de paramètres encore mal connus et inexistants dans le bruit de trafic routier. On peut citer par exemple le rayon de courbure de la voie ou les aiguillages qui induisent des crissements imprévisibles et fortement émergeants.

Dans ce paragraphe, nous donnons un aperçu des signatures temporelles et des spectres de ce type de sources à partir de deux exemples : une rame de tramway (celui de l'agglomération Nantaise) et un train (TER) circulant à des vitesses constantes, respectivement de 50 et 90 km/h, sur une voie rectiligne, sans aiguillages et sans circulation automobile proche.

[5] INRETS : Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité.
[6] Deutsch-Französische Kooperation

Voici l'évolution temporelle obtenue :

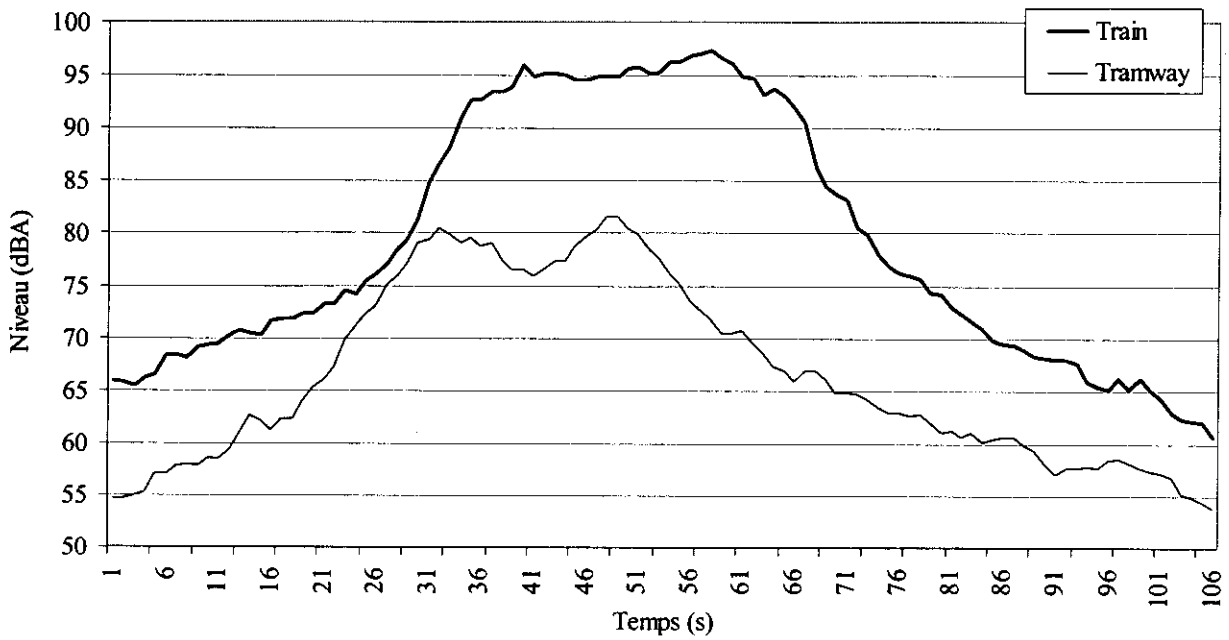

Figure 1.8 : Evolution temporelle d'un tramway et d'un train circulant respectivement à 50 et 90 km/h ($LAeq_{125ms}$).

La signature temporelle du tramway fait apparaître deux bosses. Ceci est caractéristique de ce type de tramways où seuls les bogies (parties assurant la liaison au sol) situés aux extrémités de la rame sont motorisés. Ceci produit un niveau sonore supérieur lorsqu'ils passent au droit du microphone. L'effet des autres bogies est indiscernable.
Le cas du train est un peu différent puisque l'on observe non plus des bosses mais un "plateau". Les bogies ne sont pas visibles même si l'on discerne une légère ondulation. L'augmentation du niveau aux environs de 4 et 6 secondes (cf. figure 1.8) est due au passage de la motrice au droit du microphone.
Le traitement fréquentiel effectué consiste en un moyennage énergétique sur 10 secondes et par tiers d'octave. Ce temps a été choisi afin de se rapprocher des conditions d'émergence en vigueur pour le bruit de type routier, à savoir 4 secondes.

Les spectres obtenus pour un train et un tramway sont représentés sur la figure 1.9.

En faisant abstraction de la différence d'amplitude liée en partie à l'effet de la vitesse, les spectres ne sont pas comparables, aussi bien entre eux qu'avec un spectre de bruit routier (cf. § 1.2). Pour le train, on constate un contenu énergétique prépondérant dans la région 400–1000 Hz et un spectre assez plat de part et d'autre tandis que pour le tramway, les niveaux les plus importants sont atteints autour de 250 Hz et de 1250 Hz. Les niveaux basses fréquences sont toutefois à relativiser compte-tenu de l'effet de la pondération A (-8.6 dB à 250 Hz) [7].

[7] Cf. annexe 1.

Etant étudiées par ailleurs, les sources de type ferroviaire ne seront plus abordées dans la suite du document.

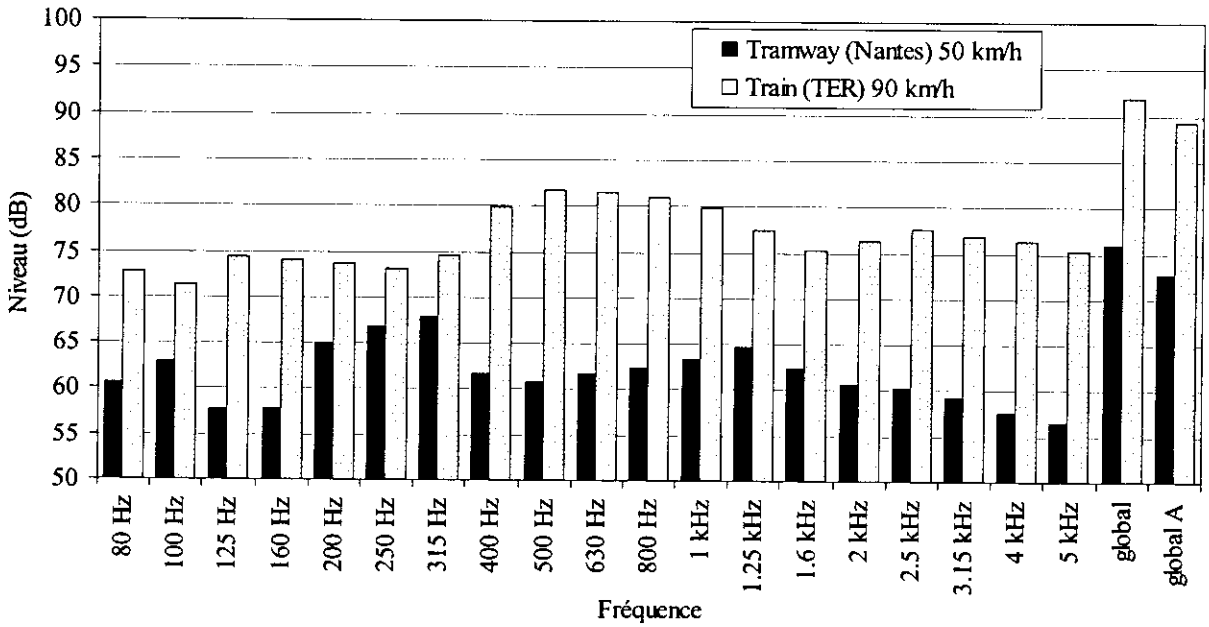

Figure 1.9 : Comparaison Train-Tramway.

1.4. Sources d'origine humaine

De par les nouvelles politiques d'aménagement des plans de circulation des centres-villes et plus particulièrement de leurs quartiers, là où l'activité humaine est la plus intense, les sources d'origine mécanique ne sont plus prépondérantes. Dans certains cas, elles peuvent même être masquées par les sources humaines. A titre d'exemple, le niveau sonore produit par 200 enfants dans une cour de récréation est bien supérieur au bruit de la circulation (cf. § 4.2). Ceci ne se retrouve pas systématiquement sur le niveau équivalent LAeq, car la durée est parfois plus faible. De plus, ces bruits peuvent être considérés bien souvent comme impulsifs alors que le bruit routier est un phénomène continu.
Parmi les rares études engagées en centre-ville et qui rendent compte de l'activité humaine, on peut citer les travaux d'Alain Léobon [Léobon & Sapaly 1994] et de Philippe Woloszyn [Woloszyn 1994] ou ceux du CRESSON avec les "parcours commentés" [PIR-Villes 1998]. Alain Léobon et son équipe[8] ont développé un logiciel, SACSSO[9], outil de traitement informatique des séquences sonores facilitant l'analyse de contenu des "promenades

[8] Groupe "Acoustique architecturale et urbaine", Laboratoire de mécanique physique, URA CNRS 879, Université de Paris IV.

[9] SACSSO : Système d'Analyse de Contenu de Séquences Sonores.

sonores"[10]. Il permet de travailler sur plusieurs bases de données sonores, d'en comparer les "profils d'équilibre" et de définir l'attribution des couleurs sonores par la méthode du "triangle d'équilibre sonore". Nous présentons ci-dessous quelques résultats de leur travail sur les ambiances sonores du quartier Graslin à Nantes. Bien entendu, cette étude englobe non seulement les sources de type humain mais aussi celles de type routier, qui sont souvent indissociables en centre-ville.

Six sources sonores qualitatives sont distinguées :

- source "bruit de fond" (BdF) : elle quantifie indirectement les notions de calme et de faux silence,
- source "activité mécanique" (AU) : elle comporte les bruits de moteur, de circulation automobile, les bruits de transports et les bruits de travaux,
- source "activité humaine" (AH) : elle englobe les bruits liés aux activités quotidiennes des individus, aux actes qui ne relèvent pas de la simple fonction de passage, aux loisirs, etc.,
- source "bruits d'animaux et de la nature" (BdN): peu nombreux en ville, ils caractérisent généralement les espaces paysagers,
- source "présence humaine" (PH): elle est relative aux indices de passages humains (pas, voix, etc.),
- source "langage et communication" (L) : elle rend compte des messages sonores très interpellants tels que les signaux sonores, les animations musicales, les conversations intelligibles, etc.

Le tableau 1.3 présente la liste des mots clefs, classés par source, relatifs à l'ensemble des objets élémentaires relevés dans le quartier Graslin.

Trois types d'objets élémentaires forment la trame des ambiances sonores urbaines : ceux qui désignent les bruits de moteurs, les pas et les voix des passants. A eux seuls, ils constituent les deux tiers des bruits présents en ville. Ils créent le fond sonore de l'environnement urbain.

A partir d'un tableau similaire au précédent, obtenu pour un point particulier du quartier Graslin, il est possible de tracer les "profils d'équilibre sonore" de ce point. Si l'on répète cette démarche trois fois (numérotées de 1 à 3), à différents moments de la journée (matin, après-midi, soir), on obtient la représentation de la figure 1.10.

Ces représentations permettent d'objectiver et de commenter l'évolution de l'ambiance sonore d'un même espace en fonction des heures de la journée et d'estimer comment telle ou telle source évolue dans le temps.

Les triangles d'équilibre sonore sont basés sur la réduction du nombre de sources significatives. Le cas le plus fréquent est la réduction aux trois sources suivantes :

- la source "activité mécanique" (AU),
- la source "animation" (A = AH+L),
- la source "présence" qui intègre les sources "présence humaine" et "bruit résiduel" (P = PH + BdF + BdN)

[10] Promenade à pied au cours de laquelle sont enregistrés, à l'aide d'un magnétophone portable, tous les bruits perçus pendant le trajet.

Cette réduction à trois sources élémentaires est adaptée à l'analyse de l'usage des espaces publics puisqu'elle mesure le rapport de force entre les indices sonores qui signent les fonctions de passage piéton, de passage de véhicules et les fonctions d'existence des espaces de loisirs et de vie commerciale.

Tableau 1.3 : Liste des mots clefs, classés par source, relatifs à l'ensemble des objets élémentaires relevés dans le quartier Graslin [Léobon 94].

MOTS CLEFS DU REPERTOIRE CLASSES PAR SOURCE	Fréquence d'apparition
Source P.H :Présence Humaine	
Pas	12,93%
Voix	10,81%
De nombreux pas	4,16%
Murmure	1,82%
Des Passants	1,79%
Rires	0,85%
Cris d'enfants	0,83%
Sifflements	0,55%
Voix des enfants qui jouent	0,53%
Toussotements	0,48%
Cris	0,31%
Bébé	0,09%
Source A.U : Circulation et Activité Mécanique	
Voitures	15,36%
Moteur	5,08%
Circulation	4,33%
Moto	3,22%
Portière	1,66%
Freins	1,31%
Camion	1,09%
Bus	0,79%
Klaxon	0,79%
Démarreur	0,61%
Tramway	0,50%
Travaux	0,37%
Crissements	0,35%
Pneumatiques	0,33%
Marteau	0,28%
Perceuse	0,15%
Avion	0,11%
Amortisseurs	0,04%
Eboueurs	0,04%
Embreyage	0,02%
Vélo	0,02%
Source BdF : Bruit de Fond	
Calme	6,37%
Période plus calme	2,71%
Bruit de Fond	2,12%
BdF urbain	1,25%
BdF Humain	0,96%
Très calme	0,79%

MOTS CLEFS DU REPERTOIRE CLASSES PAR SOURCE	Fréquence d'apparition
Source A.H : Activité Humaine	
Impact	2,73%
Couinement	0,70%
Porte	0,68%
Rumeur	0,66%
Tintement	0,63%
Bruits de Vaisselle	0,55%
Poussette	0,39%
Regard d'égout	0,35%
Cliquetis	0,33%
Extracteur d'air	0,33%
Cabine téléphonique	0,22%
Caisson	0,20%
Raclement	0,20%
Froissement	0,18%
Sonnerie	0,15%
Clefs	0,13%
Manège	0,11%
Escalier mécanique	0,09%
Les enfants jouent	0,09%
Grincement	0,07%
Balayeur	0,04%
Activité d'une poissonnerie	0,04%
Terrasse	0,04%
Volets	0,04%
Friterie	0,02%
Horodateur	0,02%
Source L: Communication et Langage	
Voix intelligible	1,93%
Musique	0,81%
Téléphone	0,07%
Sifflet	0,04%
Cloches	0,02%
Sirène	0,02%
Source BdN : Bruit de la nature	
Oiseaux	0,90%
Fontaine	0,70%
Aboiements	0,48%
Vent	0,18%
Pigeons	0,07%

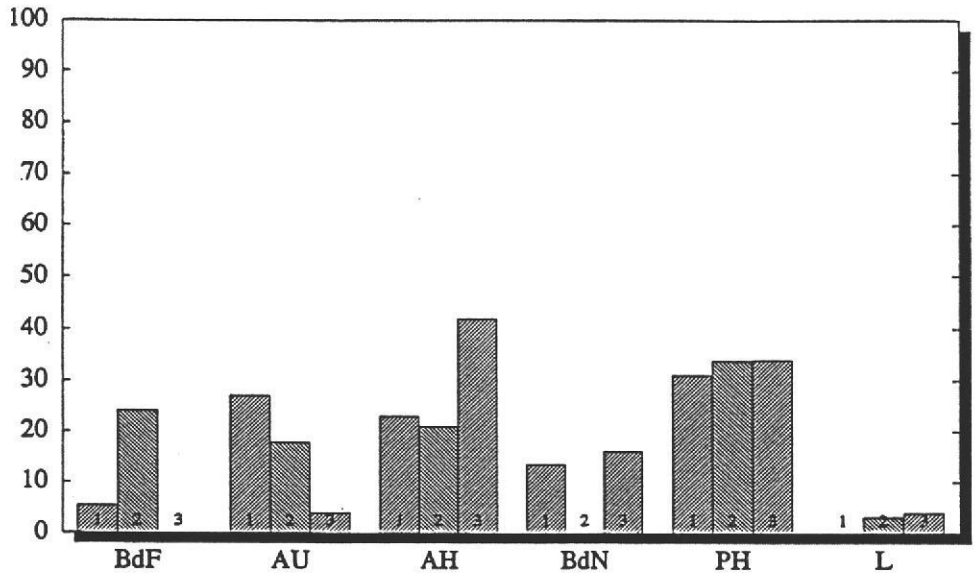

Figure 1.10 : Profils d'équilibre sonore à différents moments de la journée (matin, après-midi, soir) [Léobon 94].

L'ambiance sonore d'une séquence (qui a été traitée auparavant suivant les six sources élémentaires) sera donc ramenée à l'équilibre relatif de trois sources : P, A et AU. La répartition des objets élémentaires suivant ces trois sources (dont la somme des pourcentages respectifs est de 100%) peut se représenter par un point dans un triangle équilatéral dont chacun des côtés se rapporte à l'une de ces trois sources (figure 1.11).

En comparant la position, dans le triangle d'équilibre, des différents tripôles, nous pouvons visualiser très rapidement la diversité des ambiances sonores d'un quartier et en effectuer une typologie.

C'est sur la représentation du triangle d'équilibre que s'appuie la cartographie des ambiances sonores. Le triangle est divisé expérimentalement en neuf zones qui représentent chacune un équilibre sonore des trois sources (A, P, AU) suffisamment caractéristique et différencié pour permettre d'affirmer que l'ambiance sonore change de l'une à l'autre de ces zones de manière significative (bas de la figure 1.12). Plusieurs cartes des ambiances sonores du quartier Graslin ont donc ainsi été tracées (figure 1.12).

La méthode développée est intéressante car elle intègre dans son analyse les sources humaines. Cependant, on peut s'interroger sur sa robustesse. Il existe en effet des problèmes de reproductibilité ou de répétabilité, tant pour un même utilisateur qui tente l'expérience à deux reprises sur un même échantillon de séquences sonores, que pour deux utilisateurs distincts pratiquant la même analyse indépendamment l'un de l'autre. De plus, la durée des échantillons (3 minutes) n'est pas forcément représentative du lieu étudié. Enfin, les descripteurs sonores (cf. tableau 1.3) peuvent sembler d'une trop grande finesse dans le cadre d'une analyse physique, objectif de ce travail de thèse. Cette méthode semblerait, à notre avis, plus adaptée à une étude sociologique sur les centres-villes.

De gauche à droite :

Δ La place du Bon Pasteur : Pas N°23
Δ Gétry-Rameau-Suffren : Pas N°11
Δ La Place du Commerce Pas N° 20
Δ La rue Crébillon : Pas N°13
Δ La Place Graslin : Pas N°9

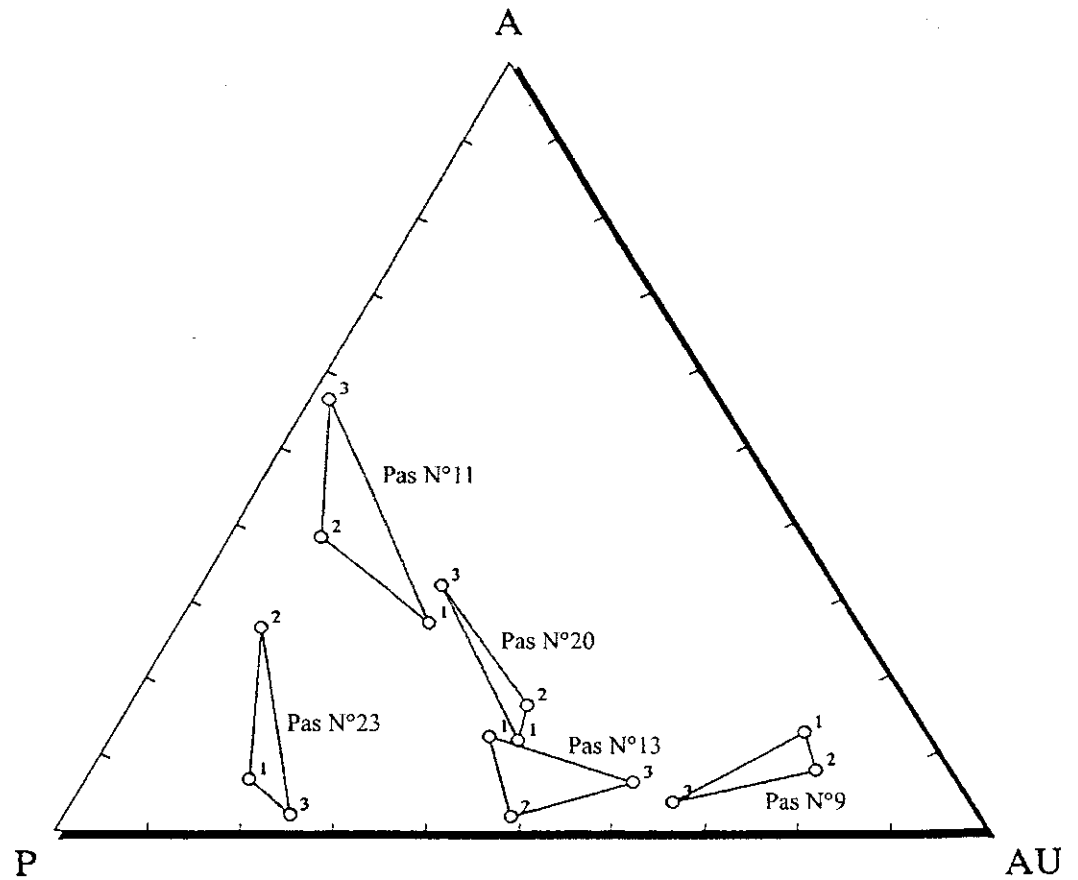

Figure 1.11 : Triangle d'équilibre sonore à différents moments de la journée (matin, après-midi, soir) et pour cinq lieux du quartier Graslin [Léobon 94].

Ce premier chapitre a eu pour objet de balayer de façon exhaustive les différentes sources présentes en milieu urbain, qu'il serait bon de modéliser dans le but de les introduire dans le modèle prévisionnel des ambiances sonores en milieu urbain, basé sur la théorie de la diffusion [Picaut 1998]. Comme nous l'avons mentionné, les sources de type ferroviaire ne seront plus abordées dans la suite. De ce fait, nous nous concentrerons dans un premier temps sur l'étude des sources de type routier (chapitres 2, 3 et 4), puis sur quelques cas de sources humaines réunissant à la fois les sources définies comme "présence humaine", "activité humaine" et "communication et langage" (chapitre 5).

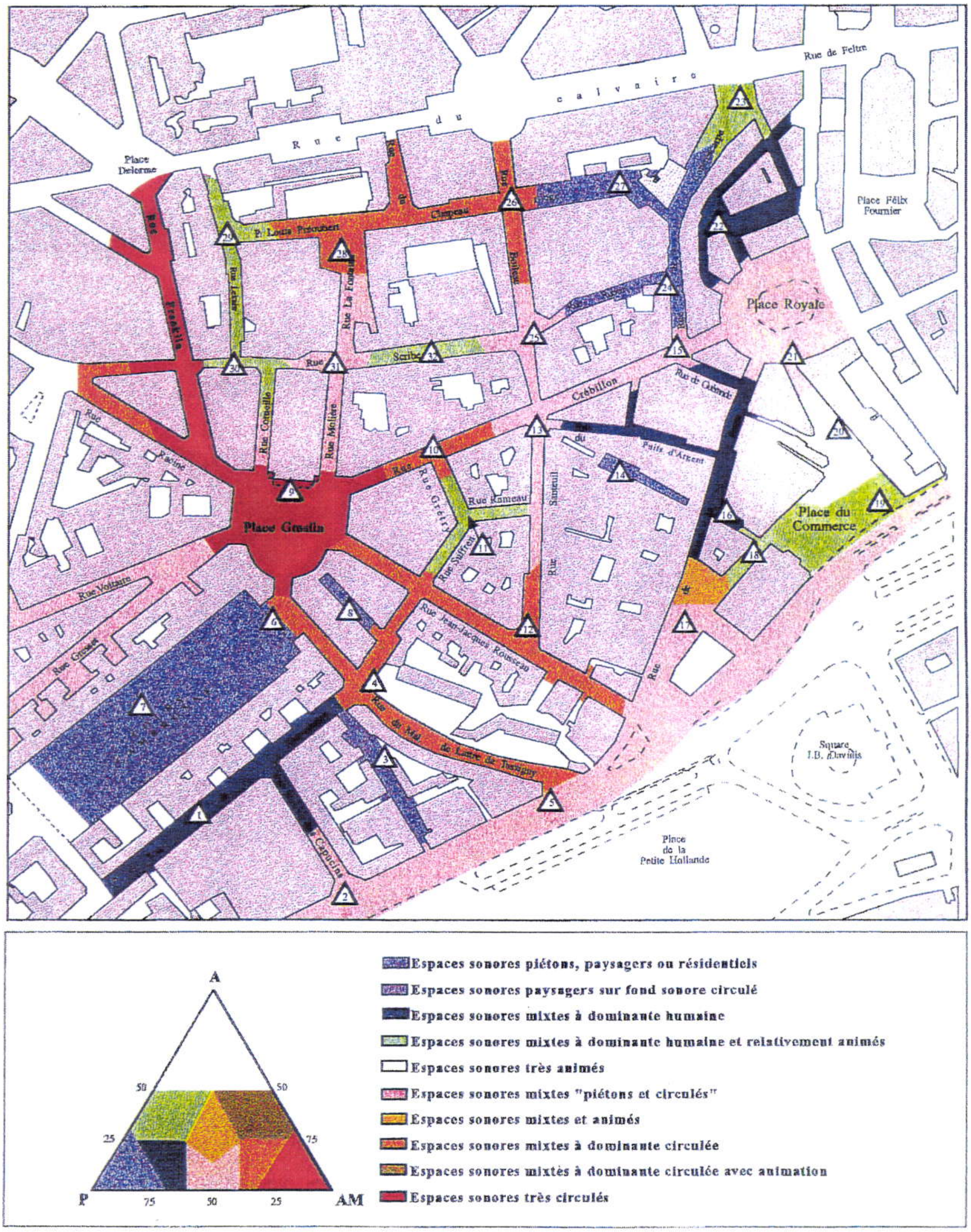

Figure 1.12 : Typologie des ambiances sonores du quartier Graslin les journées d'été [Léobon 94].

Chapitre 2 : Premiers pas vers la modélisation des véhicules

2.1. Introduction

Faisant suite à un premier chapitre consacré en partie au classement des véhicules, qui a montré une certaine continuité par rapports aux résultats recensés dans le Guide du bruit [CETUR 1980], nous nous pencherons au cours de ce second chapitre sur la caractérisation physique de ces véhicules, et plus particulièrement sur la détermination d'un ensemble de paramètres qui constitueront par la suite les données d'entrée du modèle de propagation du son en milieu urbain, modèle développé par J. Picaut [Picaut 1998], qui se poursuit actuellement dans le cadre d'une nouvelle thèse dont l'objet est la généralisation du modèle de diffusion.
Des travaux ont cependant déjà été réalisés. Le guide du bruit, la circulaire Allemande RLS 90 et le FHWA TNM Américain contiennent en effet des modèles d'émission sonore des véhicules. Si l'on considère le Guide du bruit (référence française actuelle), on peut relever de nombreux inconvénients : outre l'aspect simplifié de certaines corrections, cet ouvrage est basé sur des mesures datant du milieu des années 1970. Depuis lors, des progrès considérables ont été réalisés sur l'acoustique des véhicules (cf. homologation des différentes catégories de véhicules figure 1.1). Ceci laisse supposer que les niveaux d'émission sonore mentionnés dans ce document sont sûrement surestimés. De plus, la plupart de ces publications ne se réfère qu'à des niveaux acoustiques globaux qui sont inadaptés lorsque l'on souhaite prendre en compte l'aspect propagatif. Enfin, à cette époque, on ne considérait qu'un seul revêtement routier de référence, ce qui n'est plus acceptable aujourd'hui avec l'apparition sur le marché de nouvelles générations de revêtements de chaussée peu bruyants [Delanne 1989] [Bérengier & Hamet 1999].
Afin que cette caractérisation soit parfaitement indépendante d'un site particulier, il est indispensable de la réaliser en site ouvert et non en zone urbaine. En effet, les signaux reçus par les récepteurs seraient déjà convolués par l'ensemble des obstacles que constituent la ville. Implantés tels quels dans le modèle, le cadre bâti serait pris en compte une seconde fois.

Pour cette caractérisation, nous ferons appel au concept de source sonore équivalente comme cela est le cas dans de nombreux travaux sur la modélisation de l'émission sonore des véhicules. A titre d'exemple pour la source sonore ponctuelle équivalente, le Guide du bruit préconise une hauteur de 80 cm, hauteur qui paraît trop élevée aujourd'hui. En effet, depuis 1980, date à laquelle a été publié cet ouvrage, les progrès réalisés sur l'acoustique du compartiment moteur ont conduit à faire émerger le bruit de roulement à partir de 50-60 km/h. En conséquence, il est concevable d'imaginer une source sonore équivalente plus proche de la surface de la chaussée.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons au cas des véhicules légers, type de véhicule le plus répandu, principalement en milieu urbain. Afin de privilégier le bruit de roulement, nous

avons choisi, en premier lieu, des vitesses assez élevées par rapport à celles rencontrées en milieu urbain. En effet, à des vitesses inférieures à 50-60 km/h, les autres sources que sont le moteur, l'échappement, etc. ne peuvent plus être occultées.

Après une analyse bibliographique des différentes représentations possibles des sources sonores (§ 2.2 et § 2.3), nous examinerons succinctement les travaux déjà réalisés sur la caractérisation des véhicules en termes de source sonore équivalente (§ 2.4), puis nous exposerons la méthode que nous avons développée (§ 2.5).

2.2. Différentes représentations des sources sonores [Favre 1983]

2.2.1. Introduction

Dans cette partie nous décrivons différents modèles rencontrés dans la littérature et permettant de représenter, de façon simple, les véhicules sous forme de sources sonores équivalentes.

Trois grands types de modèles seront présentés. Le véhicule sera modélisé tout d'abord par une source monopolaire, puis dipolaire avec l'axe du dipôle parallèle à celui de déplacement, et enfin dipolaire avec l'axe du dipôle perpendiculaire à celui de déplacement.

2.2.2. Hypothèses

Les modèles proposés supposent les hypothèses suivantes :

- il n'est pas tenu compte du temps de propagation entre la source et le récepteur et, par voie de conséquence, de l'effet Doppler,
- seule l'atténuation géométrique est prise en compte,
- il n'existe aucune interférence entre le rayon direct et le rayon réfléchi (c'est une hypothèse très restrictive).

Dans ces conditions, le niveau de pression mesuré à la distance r, pour une source ponctuelle au sol émettant dans un demi-espace, peut s'écrire ($Q(\theta,\varphi)$ représente la directivité de la source et W(t) sa puissance) :

$$p^2(t) = \frac{Q(\theta,\varphi)W(t)\rho_0 c_0}{2\pi r^2(t)} \qquad 2.1$$

que l'on transforme sous forme logarithmique plus connue :

$$Lp = Lw + 10\log_{10}Q(\theta,\varphi) - 10\log_{10}2\pi r^2(t) \qquad 2.2$$

La géométrie du principe est présentée en figure 2.1.

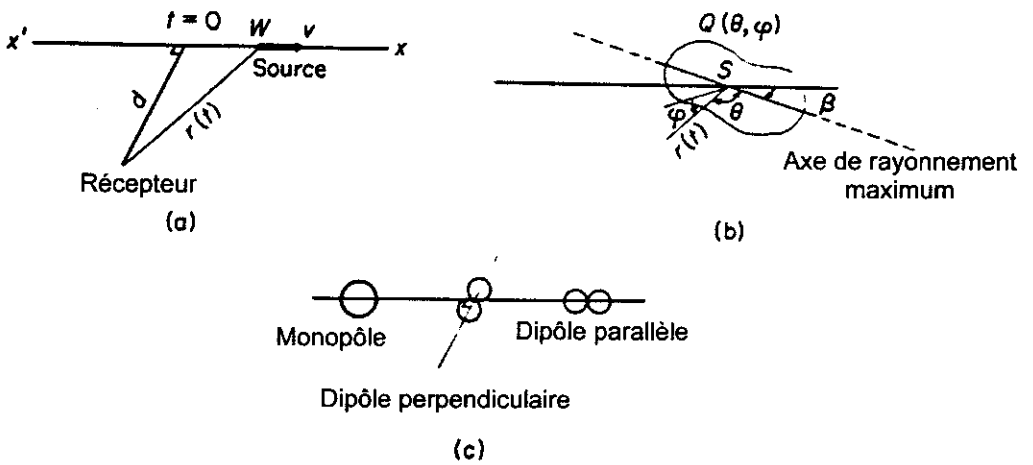

Figure 2.1 : Géométrie : (a) de la source et du récepteur, (b) du modèle de directivité et de la position de l'axe de rayonnement maximum, (c) des trois modèles considérés [Favre 1983].

2.2.3. Source monopolaire

2.2.3.1. Variations du niveau de pression acoustique instantanée

Dans le cas d'une source monopolaire, la pression acoustique instantanée peut être exprimée en fonction de la pression acoustique maximum p_{max} au passage du véhicule :

$$p^2(t) = p_{max}^2 \frac{d^2}{r^2(t)} = p_{max}^2 \frac{d^2}{v^2 t^2 + d^2} \qquad 2.3$$

On en déduit :

$$Lp = Lp_{max} - 10\log_{10}\left\{1 + (vt/d)^2\right\} \qquad 2.4$$

2.2.3.2. Energie équivalente sur la période $T = t_2 - t_1$

L'énergie équivalente sur la période $T = t_2 - t_1$ peut s'écrire :

$$\left[\bar{p}^2\right]_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} p^2(t)dt = \frac{1}{T} p_{max}^2 \frac{d}{v}\left[\tan^{-1}\frac{vt}{d}\right]_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{T} p_{max}^2 \frac{d}{v}\alpha_{1,2} \qquad 2.5$$

Soit sous forme logarithmique :

$$[Leq]_{t_1}^{t_2} = Lp_{max} + 10\log_{10}(d\alpha_{1,2}/vT) \qquad 2.6$$

où : $\alpha_{1,2}$ est l'angle balayé par la source, vu du point de réception, entre les instants t_1 et t_2. $\alpha_{1,2} = \alpha_2 - \alpha_1$ et $\alpha_i = \tan^{-1}(vt_i/d)$. La relation entre Leq_T et Lp_{max} est représentée sur la figure 2.2 en fonction de d/v et pour différentes valeurs de T. Dans le cas particulier où T = 1 h, on obtient : $Leq_{1h} = Lp_{max} + 10\log_{10}(d/v) - 30$.

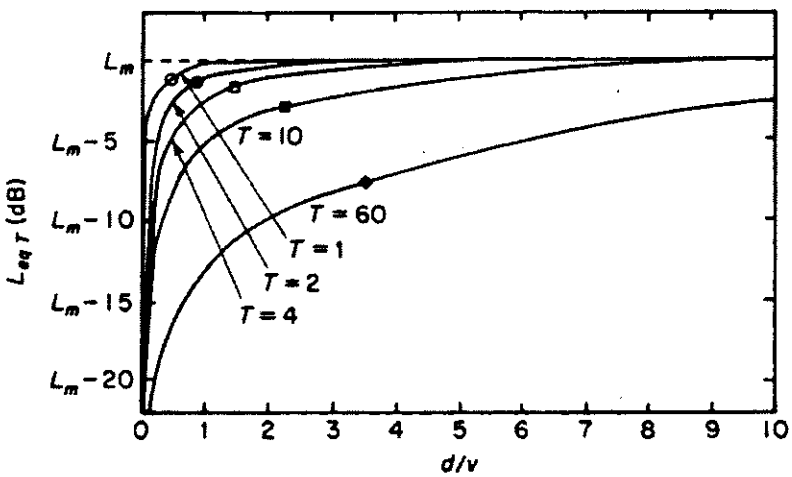

Figure 2.2 : Source monopolaire : relation entre Lp_{max} (ou L_m) et Leq_T en fonction du paramètre d/v pour différentes valeurs de T (s) [Favre 1983].

2.2.3.3. Niveau de puissance acoustique

A l'aide des équations 2.2 puis 2.6, il vient ($Q(\theta,\varphi) = 1$ pour une source monopolaire) :

$$Lp_{max} = Lw - 10\log_{10}(2\pi d^2) \qquad 2.7$$

et :

$$[Leq]_{t_1}^{t_2} = Lw - 10\log_{10}(dv) - 10\log_{10}T + 10\log_{10}(\alpha_{1,2}/2\pi) \qquad 2.8$$

Dans le cas particulier où T = 1 h : $Leq_{1h} = Lw - 10\log_{10}(dv) - 38$

2.2.4. Source dipolaire

2.2.4.1. Variations du niveau de pression instantané

Pour un dipôle, la variation de la pression instantanée est donnée par :

$$p^2(t) = p_{max}^2 \cos^2\theta \frac{d^2}{r^2(t)} = p_{max}^2 \cos^2\theta \frac{d^2}{(v^2t^2 + d^2)} \qquad 2.9$$

où p_{max} est la pression maximum sur l'axe du dipôle, à la distance d de la source. Ce terme correspond à la pression maximum reçue par le récepteur lors du passage du dipôle, seulement si ce dernier est orienté perpendiculairement à l'axe de déplacement. L'angle θ représente l'angle entre l'axe du dipôle et la droite joignant la source au récepteur. Il est relié à l'angle d'inclinaison β entre l'axe du dipôle et celui de déplacement par : $\theta(t) = \sin^{-1}\{d/r(t)\} - \beta$ (cf. figure 2.1(b) pour la géométrie).

On peut en déduire :

$$Lp = Lp_{max} + 20\log_{10}\cos\left[\sin^{-1}\frac{1}{\sqrt{(vt/d)^2 + 1}} - \beta\right] - 10\log_{10}\left[1 + \left(\frac{vt}{d}\right)^2\right] \qquad 2.10$$

Les variations de Lp(t) en fonction du paramètre d/v sont reproduites figure 2.3. La signature du monopôle est l'enveloppe des signatures des dipôles pour différentes valeurs de β.

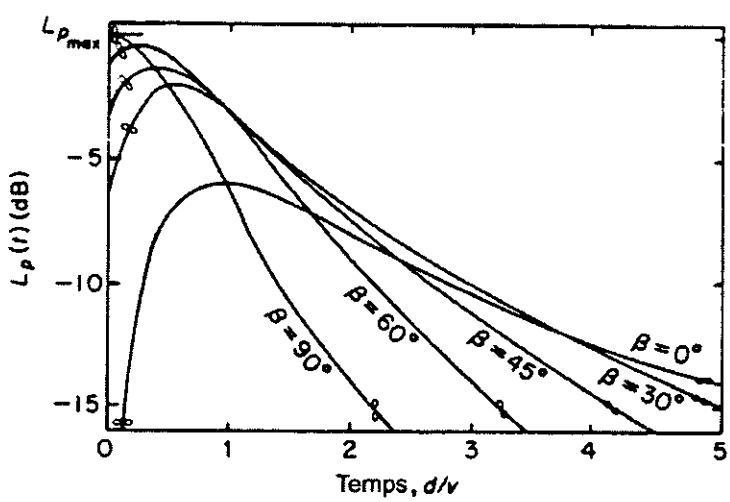

Figure 2.3 : Source dipolaire : variations du niveau de pression instantané en fonction du temps d/v pour diverses orientations du dipôle [Favre 1983].

2.2.4.2. Energie équivalente sur la période $T = t_2 - t_1$

2.2.4.2.1. Dipôle dans la direction du mouvement ($\beta = 0$)

Dans ce cas, $\cos^2\theta(t) = v^2t^2/r^2(t)$ et l'on obtient, en supposant une période T symétrique par rapport à $t = 0$ ($t_1 = -t_2$) :

$$Leq_T = Lp_{max} + 10\log_{10}\frac{\tau}{T} + 10\log_{10}\left[\tan^{-1}\frac{T}{2\tau} - \frac{2\tau T}{4\tau^2 + T^2}\right] \qquad 2.11$$

où : $\tau = d/v$

Le niveau maximum instantané L_m est obtenu lorsque $dLp(t) = 0$ soit $t = \pm d/v$. Dans ces conditions :

$$L_m = Lp_{max} - 6dB \qquad 2.12$$

2.2.4.2.2. Dipôle perpendiculaire à l'axe de déplacement ($\beta = \pi/2$)

Dans ce cas $\cos^2\theta(t) = d^2/r^2(t)$ et l'on obtient ($t_1 = -t_2$) :

$$Leq_T = Lp_{max} + 10\log_{10}\frac{\tau}{T} + 10\log_{10}\left[\tan^{-1}\frac{T}{2\tau} + \frac{2\tau T}{4\tau^2 + T^2}\right] \qquad 2.13$$

Le niveau maximum instantané L_m est obtenu lorsque $dL_p(t) = 0$ soit $t = 0$. Dans ces conditions :

$$L_m = Lp_{max} \qquad 2.14$$

2.2.4.3. Niveau de puissance acoustique

la puissance acoustique est donnée par l'expression :

$$W = \int_S \frac{p_{max}^2}{\rho_0 c_0}(\cos^2\theta)(\cos^2\phi)r^2(\cos\phi)d\theta d\phi \qquad 2.15$$

Dans le cas d'un demi-espace, on obtient : $W = \left(p_{max}^2/\rho_0 c_0\right)\left(2\pi r^2/3\right)$.

A une distance d sur l'axe du dipôle $Lp_{max} = Lw - 10\log_{10}(2\pi d^2/3)$. Pour un dipôle parallèle à la direction de déplacement, on arrive à (eq. 2.12) :

$$L_m = Lw - 10\log_{10}(2\pi d^2/3) - 6 \qquad 2.16$$

Pour un dipôle perpendiculaire à la direction de déplacement, on obtient (eq. 2.14) :

$$L_m = Lw - 10\log_{10}(2\pi d^2/3) \qquad 2.17$$

2.2.5. Application à un véhicule en mouvement

2.2.5.1. Relation entre le Leq_{10} et les niveaux maximum

Des expériences récentes, concernant les durées à prendre en compte pour le calcul du Leq au passage d'un véhicule, ont conduit à l'adoption d'une période de 10 s (avec d = 7.5 m). Les relations entre L_m et Leq_{10} pour le monopôle et les deux sources dipolaires vont maintenant être considérées.

2.2.5.1.1. Source monopolaire

La relation entre L_m et Leq_{10} (cf. eq. 2.6) pour un monopôle peut s'exprimer en fonction de la vitesse du véhicule par la relation (d = 7.5 m et $\alpha_{1,2} = \pi$) :

$$Leq_{10} - L_m + 10\log_{10} v = 3.5 \qquad \text{avec v en m/s} \qquad 2.18$$

ou :

$$Leq_{10} - L_m + 10\log_{10} v = 9 \qquad \text{avec v en km/h} \qquad 2.19$$

2.2.5.1.2. Dipôle dans la direction du mouvement ($\beta = 0$)

Pour un dipôle aligné sur la direction de déplacement, il existe deux maxima de L_m qui apparaissent à $t = \pm 7.5/v$. Leur valeur vaut $Lp_{max} - 6$ dB.

La relation entre Leq_{10} et L_m (cf. eq. 2.11, 2.12) ne peut pas s'exprimer simplement en fonction de la vitesse v (en km/h). Toutefois, pour les vitesses extrêmes de 20 et 110 km/h, on obtient respectivement :

$$Leq_{10} - L_m + 10\log_{10} v = 6.5 \qquad \text{pour } v \approx 20 \text{ km/h} \qquad 2.19$$

$$Leq_{10} - L_m + 10\log_{10} v = 9.5 \qquad \text{pour } v \approx 110 \text{ km/h} \qquad 2.20$$

2.2.5.1.3. Dipôle perpendiculaire à l'axe de déplacement ($\beta = \pi/2$)

Pour un dipôle perpendiculaire à l'axe de déplacement (eq. 2.13, 2.14), une relation simple peut être établie avec une erreur très faible (v en km/h) :

$$Leq_{10} - L_m + 10\text{Log}\, v = 3.5 \qquad 2.21$$

2.2.6. Comparaison avec les résultats expérimentaux

2.2.6.1. Relation entre les niveaux maximum théoriques et mesurés

Les mesures sont effectuées au passage des véhicules, à 7.5 m de l'axe de déplacement. Les niveaux sont obtenus en dBA avec un temps d'intégration de 125 ms. Les valeurs mesurées L_m^{Δ} et théoriques L_m sont comparées tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Différences entre les niveaux mesurés L_m^{Δ} et théoriques L_m (dBA) [Favre 1983].

Vitesse	10 m/s	20 m/s	30 m/s
Monopôle	< 0.1 dBA	0.2 dBA	0.3 dBA
Dipôle //	0.1 dBA	0.2 dBA	0.5 dBA
Dipôle ⊥	0.2 dBA	0.5 dBA	1.3 dBA

Si tous les écarts restent faibles, généralement inférieurs à 1 dB, on constate que les meilleurs résultats sont obtenus pour le monopôle.

A l'aide des équations 2.19, 2.20 et 2.21, on définit la différence :

$$\Delta L = Leq_{10} - (L_m + 10\log_{10} v) \qquad 2.22$$

à laquelle nous nous intéressons dans le prochain paragraphe.

2.2.6.2. Représentation de ΔL

Les variations de ΔL en fonction de la vitesse (avec ou sans correction), pour les trois modèles, figurent sur le graphique 2.4.

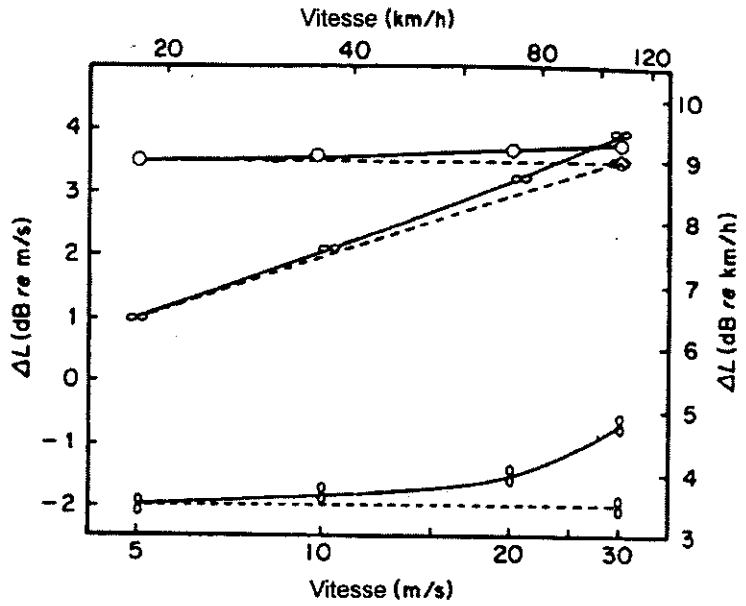

Figure 2.4 : Variations de ΔL en fonction de la vitesse pour le monopôle (o), le dipôle dans l'axe du mouvement (∞) et perpendiculaire à l'axe du mouvement (8). Valeurs avec correction (- - - -) et approximations (——) [Favre 1983].

2.2.6.3. Mesures effectuées sur 2000 véhicules

Ces mesures concernent un échantillon de véhicules légers, d'utilitaires et de trains routiers représentant au total plus de 2000 véhicules.

Les résultats de ces essais sont présentés sur la figure 2.5.

Il apparaît que ΔL augmente légèrement avec la vitesse dans chacun des cas. Les pentes des courbes mesurées sont plus importantes que celles obtenues avec le monopôle mais moins prononcées que dans le cas du dipôle colinéaire à l'axe du mouvement.

Les valeurs de ΔL sont proches de celles obtenues avec le dipôle dans l'axe de déplacement mais pas très éloignées de celles du monopôle.

En revanche, on peut observer que le dipôle perpendiculaire à l'axe de déplacement n'est pas approprié pour la modélisation de véhicules, ce qui est conforme à l'intuition.

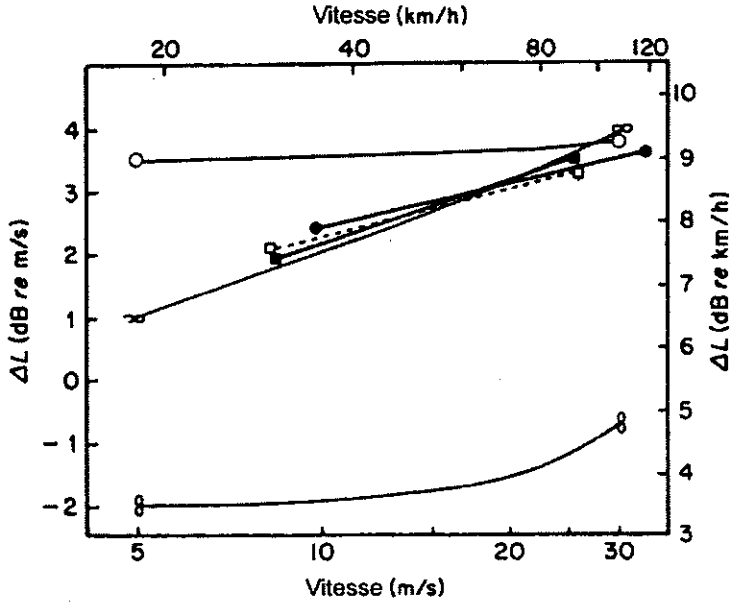

Figure 2.5 : Comparaison entre les valeurs de ΔL pour des véhicules dans le flot de la circulation et les valeurs données par les trois modèles. Voitures particulières (●), utilitaires (■) et trains routiers (□). (Monopôle (o), dipôle dans l'axe du mouvement (∞) et perpendiculaire à l'axe du mouvement (8)) [Favre 1983].

2.2.6.4. Mesures sur piste d'essai

Ces essais ont été effectués avec cinq véhicules pour lesquels les conducteurs devaient maintenir une vitesse constante au cours du passage devant le microphone de mesure et balayer toute la gamme de vitesse pour les différents rapports de boîte de vitesse.

La figure 2.6 récapitule les résultats obtenus.

Une tendance identique a été observée pour tous les véhicules, à savoir une augmentation de ΔL en fonction de $\log_{10}v$. La pente est plus prononcée sur les premiers rapports. Ceci est comparable à ce que l'on obtient avec le dipôle dans l'axe du mouvement. Toutefois, sur les derniers rapports ou bien en situation moteur coupé, la pente s'affaiblit et l'on se rapproche de la source monopolaire. Il apparaît donc que le bruit de type mécanique est assez directif dans le sens où il est rayonné suivant l'axe longitudinal du véhicule, c'est-à-dire suivant la ligne ventilateur-moteur-échappement. Cette directivité devient moins évidente au fur et à mesure que la vitesse du véhicule augmente. Ce phénomène dû à l'apparition de sources liées au bruit de roulement est tout particulièrement mis en évidence lorsque le moteur est coupé.

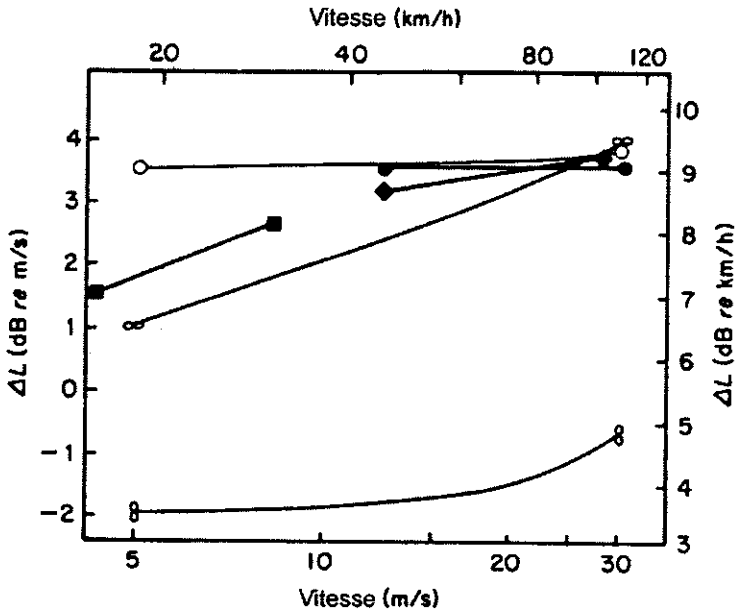

Figure 2.6 : Comparaisons entre les valeurs ΔL mesurées et les valeurs données par les trois modèles. Moyenne des cinq véhicules en première (■), quatrième (●) et enfin moteur coupé (◆) (bruit de roulement). (Monopôle (o), dipôle dans l'axe du mouvement (∞) et perpendiculaire à l'axe du mouvement (8)) [Favre 1983].

2.2.6.5. Conclusion

La comparaison des résultats expérimentaux avec les valeurs données par les trois modèles théoriques amène à la conclusion suivante : l'émission sonore des véhicules ne peut pas être modélisée correctement par un dipôle perpendiculaire à la direction du mouvement.

Aux vitesses faibles (en dessous de 30 km/h), l'émission apparaît comme plus importante dans l'axe de déplacement, phénomène dû à la prédominance du bruit de type mécanique. A des vitesses plus élevées (au-dessus de 30-40 km/h), la source monopolaire fournit une représentation plus en rapport avec la réalité. Ceci s'explique par l'importance croissante du bruit de roulement.
Toutes ces mesures démontrent la validité de la source monopolaire ainsi que de la source dipolaire colinéaire à l'axe de déplacement. L'utilisation de l'un ou l'autre de ces modèles conduit à des estimations semblables, de l'ordre du dBA, alors que le dipôle perpendiculaire fait apparaître une erreur de 6 dBA.

Par définition le dipôle présente deux lobes de directivité. S'il est orienté perpendiculairement à l'axe de déplacement alors l'émission sonore maximum est obtenue au droit du récepteur (cf. § 2.2.4.2.2). Par contre, s'il est orienté parallèlement à l'axe de déplacement alors on obtient deux maxima en $t = \pm d/v$ (cf. § 2.2.4.2.1) et, théoriquement, un niveau d'émission nul à $t = 0$. Ceci n'est physiquement pas acceptable et nous conforte dans le choix du monopôle qui ne présente pas ce type de problème.

2.3. Directivité des véhicules [Tachibana & Oshino 1992]

Afin de mettre en évidence le phénomène de directivité, Tachibana et Oshino ont réalisé une série de mesures "au passage" avec un véhicule léger, une motocyclette et un poids lourd. Deux cellules photoélectriques, disposées de part et d'autre du point de mesure, déclenchent puis arrêtent l'acquisition. Les niveaux acoustiques sont obtenus à partir d'une sonde intensimétrique tridimensionnelle constituée de six microphones. Elle est positionnée à 3.3 m de l'axe de la chaussée et peut être déplacée de 16 cm à 2.10 m de hauteur. Les signaux sont envoyés à trois analyseurs temps réel et stockés par intervalles de 30 ms. Les mesures sont effectuées à des vitesses maximales de 60 km/h sur les rapports de boîte optimaux.

Rappelons brièvement le principe de la mesure intensimétrique. Deux microphones appariés (trois paires de deux microphones appariés dans le cas présent : une par direction), très proches l'un de l'autre, fournissent deux valeurs voisines de la pression acoustique p. La vitesse particulaire $\vec{U}$ est déterminée à partir du gradient de pression acoustique par la relation :

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \overrightarrow{\text{grad}\, p} \qquad 2.23$$

L'intensité acoustique est ensuite obtenue à l'aide de l'expression :

$$I = p\,\vec{U} \qquad 2.24$$

Les figures ci-dessous représentent une comparaison entre les vecteurs intensité mesurés et calculés, respectivement sur l'axe vertical et horizontal.

Pour le cas vertical, un écart assez réduit est obtenu pour tous les véhicules. Par contre sur l'axe horizontal, le poids lourd ne peut être modélisé correctement par un monopôle. Deux monopôles, l'un près du moteur et l'autre près de l'essieu arrière, au sol, seraient plus réalistes.

A l'image de l'analyse de Favre (cf. § 2.2), cette étude a permis de mettre en avant le bon comportement général de la source monopolaire sauf pour les véhicules lourds. Il est donc possible de représenter un véhicule léger ou une motocyclette par un monopôle sans introduire une erreur importante.

Même si elle peut paraître intéressante dans certains cas, cette technique présente un défaut majeur. Elle ne donne des résultats fiables que si la phase de l'onde acoustique est constante entre les deux microphones appariés. Ceci est rarement le cas en milieu extérieur, et tout particulièrement lors du passage d'un véhicule près de la sonde intensimétrique. Nous n'utiliserons donc pas cette méthode dans le cadre de ce travail.

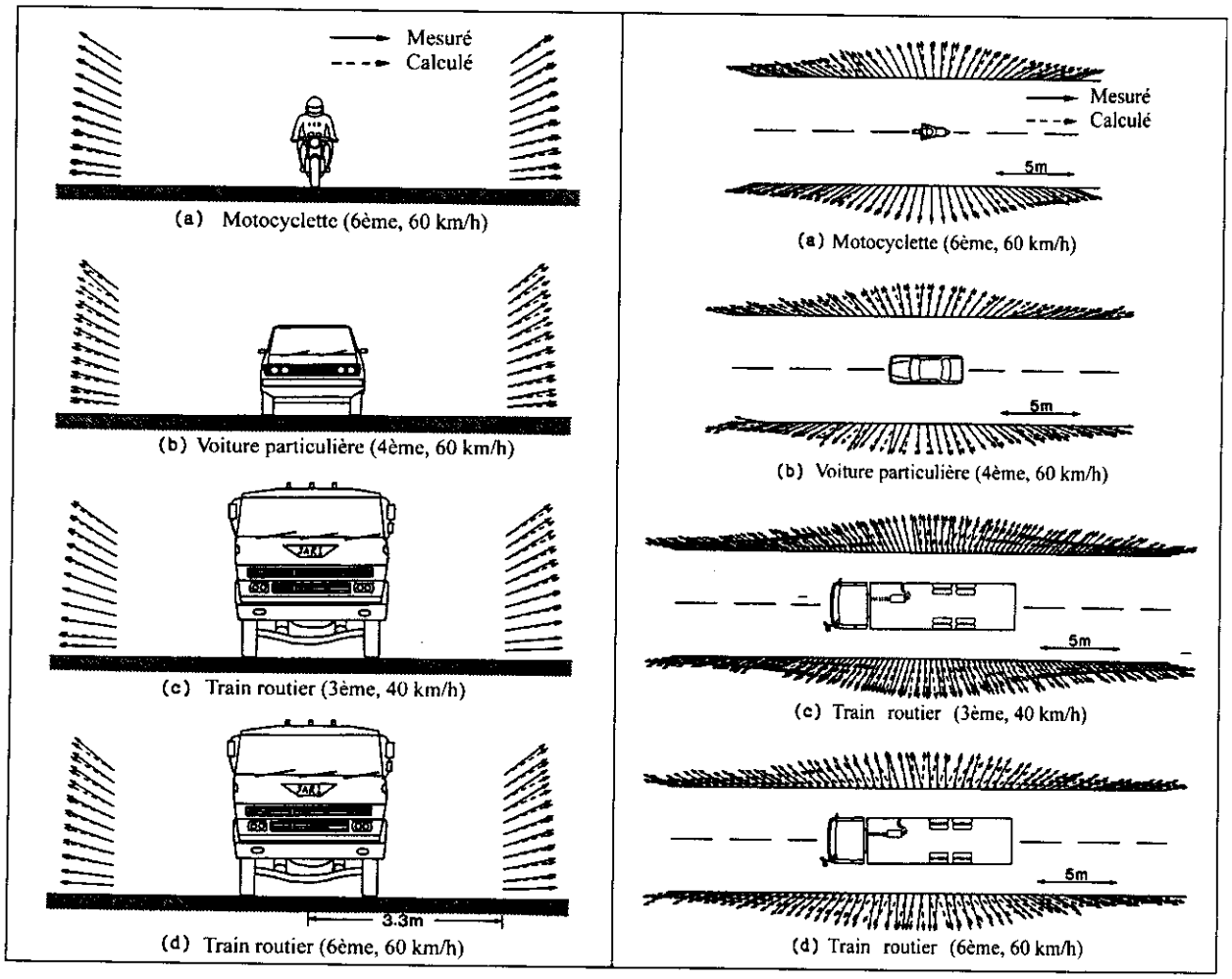

Figure 2.7 : Intensité acoustique dans le plan vertical (à gauche) et dans le plan horizontal (à droite) [Tachibana & Oshino 1992].

2.4. Détermination des hauteurs de sources sonores équivalentes

La modélisation des véhicules à l'aide d'une source omnidirectionelle unique (monopôle) étant maintenant acquise, mis-à-part pour les véhicules lourds, il s'agit maintenant de déterminer la hauteur de cette source équivalente, paramètre important, vis-à-vis notamment de l'aspect propagatif. La première partie de cette étude bibliographique, théorique, concerne la hauteur de la source ponctuelle équivalente d'une distribution arbitraire de sources, les deuxième et troisième parties sont plus directement appliquées aux véhicules.

2.4.1. Mesure de la hauteur de source équivalente d'une distribution arbitraire de sources [Glegg & Yoon 1990-1]

2.4.1.1. Introduction

Les mesures de localisation des sources sonores sont effectuées à l'aide de différentes techniques. En acoustique sous-marine, le sonar est utilisé pour localiser les sous-marins et des méthodes similaires sont employées en imagerie ultrasonore. Pour les applications concernant le contrôle du bruit, les techniques de localisation des sources sont relativement récentes et limitées à quelques applications spécifiques. Des réseaux de microphones sont utilisés pour déterminer les sources de bruit les plus importantes sur des moteurs d'avions [Fisher & al. 1977] [Billingsley & Kinns 1976] [Glegg 1982], et plus récemment sur des rotors d'hélicoptères [Brooks & al. 1987]. D'autres applications concernent, par exemple, l'évaluation des sources de bruit sur des sites industriels et sur des poids lourds à l'arrêt.

Dans les premières applications de contrôle du bruit [Fisher & al. 1977] [Billingsley & Kinns 1976], un réseau de microphones était placé à proximité des sources en utilisant la technique standard des faisceaux (lobs de directivité). Ces méthodes sont cependant limitées par la résolution [Fisher & al. 1977] et plus particulièrement lorsque la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que la distance séparant deux sources. Typiquement, les mesures en dessous de 500 Hz ne sont pas d'une grande utilité car il est impossible d'identifier la contribution de chacune des sources. De même, il est impossible de séparer, aux basses fréquences, la source de son image. Cette dernière étant localisée sous la surface, la distribution des sources mesurée présente un pic à mi-chemin entre la source et son image qui est interprété comme la surface du sol. Le résultat, bien évidemment erroné, suggère que la source soit située au sol. Pour surmonter ces problèmes de résolution, des méthodes spéciales, applicables aux basses fréquences, ont été développées.

2.4.1.2. Définition de la "puissance" d'une source et du champ acoustique

Pour une distribution arbitraire de sources situées en champ libre, la pression acoustique p(x,t) est définie à partir de la "puissance" d'une source par unité de volume w(y,t), par l'intégrale sur le volume :

$$p(x,t) = \int_V w(y, t - r/c_0)dV/r \qquad \text{où } r = |x-y| \qquad 2.25$$

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 (figure 2.8).

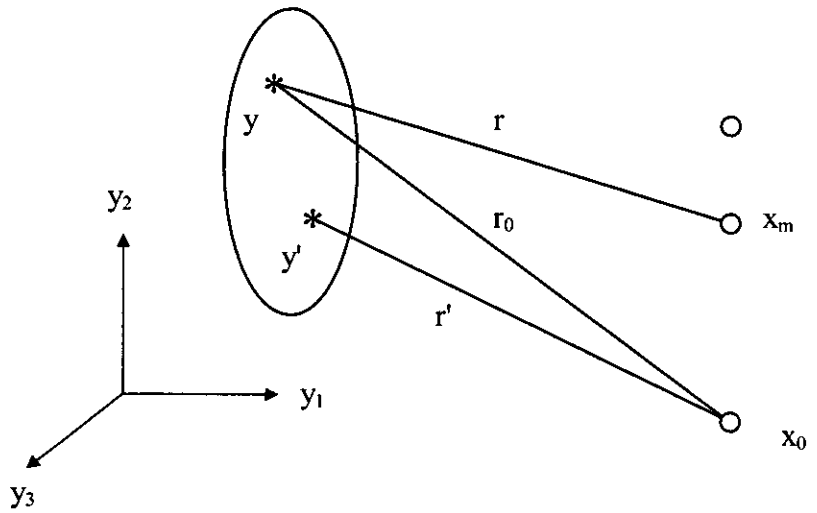

Figure 2.8 : Système de coordonnées pour une distribution de source. y et y' sont les positions de source, x_0 et x_m les positions de mesure.

La densité interspectrale est définie ainsi :

$$C_m = (\pi / T)Ex\left[\tilde{p}_T(x_0,\omega)\tilde{p}_T^*(x_m,\omega)\right] \qquad 2.26$$

où : Ex désigne l'espérance mathématique et :

$$\tilde{p}_T(x,\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-T}^{T} p(x,t)e^{-i\omega t}dt \qquad 2.27$$

Ceci peut aussi être défini différemment, par l'utilisation de la fonction :

$$C_m = \int_V \int_{V'} W(y,y',\omega)e^{ik(r-r')}\frac{dydy'}{rr'} \qquad 2.28$$

où : $r = |x_m - y|$, $r' = |x_0 - y'|$ et :

$$W(y,y',\omega) = \frac{\pi}{T}Ex\left[\tilde{W}_T(y',\omega)\tilde{W}_T^*(y,\omega)\right] \qquad 2.29$$

avec :

$$\tilde{W}_T(y,\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-T-r/c_0}^{T-r/c_0} w(y,\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \qquad 2.30$$

Si l'on pose $\xi = y'-y$ et $r_0 = |x_0-y|$, on obtient :

$$\boxed{C_m = \int_V W_e(y,\omega)\frac{e^{ik_0(r-r_0)}}{rr_0}dy} \qquad 2.31$$

où : $$W_e(y,\omega) = \int_{V'}\frac{r_0}{r'}W(y,\xi,\omega)e^{-ik_0(r'-r_0)}d\xi \qquad 2.32$$

$W_e(y,\omega)$ dépend seulement de y et l'intégrale tient compte de tous les effets d'interaction entre la source située en y et les autres sources de la distribution. En conséquence, r' et r_0 ne dépendant que de x_0, la fonction $W_e(y,\omega)$ est définie comme étant la puissance équivalente de la source située en y et observée au point de référence x_0.

Lorsque les sources sont placées au-dessus d'un sol parfaitement réfléchissant, la géométrie se complique (figure 2.9). Dans ce cas, le champ acoustique obtenu est la somme de la distribution de sources et de son image. Les variations de la pression acoustique sont données par :

$$p(x,t) = \int_{V_+} w(y_+, t-r_+/c_0)dy_+ + \int_{V_-} w(y_-, t-r_-/c_0)dy_- \qquad 2.33$$

où le signe + se rapporte à la distribution de sources au-dessus de la surface et le signe - à son image sous la surface. La symétrie du problème nous conduit à :

$$\tilde{p}_T(x,\omega) = \int_{V_+}\tilde{W}_T(y,\omega)\left[\frac{e^{-ik_0r_+}}{r_+} + \frac{e^{ik_0r_-}}{r_-}\right]dy \qquad 2.34$$

Par conséquent, la densité interspectrale entre le signal recueilli à un microphone de référence situé sur la surface en x_0 et le signal provenant d'un second microphone en x_m est donnée par :

$$C_m = 2\int_V\int_{V'}W(y,y',\omega)\left[\frac{e^{ik_0r_+}}{r_+} + \frac{e^{ik_0r_-}}{r_-}\right]\frac{e^{-ikr'}}{r'}dydy' \qquad 2.35$$

$$\boxed{C_m = 2\int_V W_e(y,\omega)\left[\frac{e^{ik_0(r_+-r_0)}}{r_+r_0} + \frac{e^{ik_0(r_--r_0)}}{r_-r_0}\right]dy} \qquad 2.36$$

avec $W_e(y,\omega)$ défini plus haut.

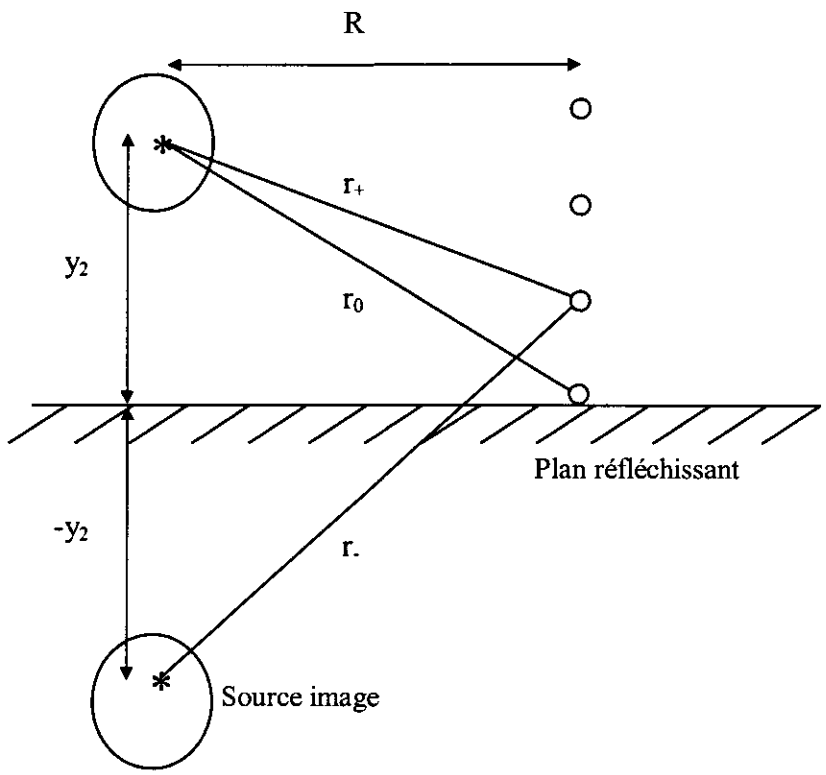

Figure 2.9 : Schéma montrant les distances de propagation entre une source, son image et un réseau de microphones.

Lorsque le sol a un coefficient de réflexion complexe Q, on obtient :

$$C_m = (1+Q)\int_V W_e(y,\omega)\left[\frac{e^{ik_0(r_+-r_0)}}{r_+ r_0} + Q^* \frac{e^{ik_0(r_--r_0)}}{r_- r_0}\right]dy \qquad 2.37$$

On remarque que les équations 2.31, 2.36 et 2.37 sont de la même forme. L'interspectre peut donc s'écrire sous la forme générale :

$$C_m = \int_V W_e(y,\omega)G(y,x_m)dy \qquad 2.38$$

En champ libre, par exemple, nous avons :

$$G(y,x_m) = \exp[ik_0(r-r_0)]/rr_0 \qquad 2.39$$

Pour des sources placées au-dessus d'un sol de coefficient de réflexion Q et pour un microphone de référence situé sur la surface, nous obtenons :

$$G(y,x_m)=(1+Q)\left[\frac{e^{ik_0(r_+-r_0)}}{r_+r_0}+Q^*\frac{e^{ik_0(r_--r_0)}}{r_-r_0}\right] \qquad 2.40$$

La distribution de sources équivalentes est donc la même quel que soit le cas considéré et les effets de propagation sont entièrement pris en compte par la fonction de Green $G(y,x_m)$.

2.4.1.3. Puissance acoustique d'une source ponctuelle équivalente

La densité interspectrale peut être redéfinie en développant G(y,x) en séries de Taylor par rapport à l'origine y_0 du système de coordonnées. Il est pratique d'introduire une notation tensorielle pour laquelle $y = (y_1,y_2,y_3)$.

On obtient :

$$C_m=G(y_0,x_m)\int_V W_e(y,\omega)dy+\frac{\partial G}{\partial y_i}(y_0,x_m)\int_V y_i W_e(y,\omega)dy+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 G(y_0,x_m)}{\partial y_i\partial y_j}\int_V y_i y_j W_e(y,\omega)dy+... \qquad 2.41$$

Ceci peut être réécrit à l'aide de la puissance totale de la source :

$$W_T=\int_V W_e(y,\omega)dy \qquad 2.42$$

et des expressions :

$$\mu_i=\int_V y_i W_e(y,\omega)dy/Q_T \qquad \mu_{ij}=\int_V y_i y_j W_e(y,\omega)dy/W_T \qquad 2.43$$

Alors :

$$C_m=W_T\left[G(y_0,x_m)+\mu_i\frac{\partial G}{\partial y_i}(y_0,x_m)+\frac{1}{2}\mu_{ij}\frac{\partial^2 G}{\partial y_i\partial y_j}(y_0,x_m)+...\right] \qquad 2.44$$

Dans le cas du champ libre, les dérivées de la fonction $G(y_0,x_m)$ sont données en champ lointain par :

$$\partial^n G/\partial y_i\partial y_j...=(-ik_0)^n\alpha_i\alpha_j...G(y_0,x_m) \qquad 2.45$$

où α_i représente le vecteur $\alpha = [(x_m/r) - (x_0/r_0)]$.

Il vient :

$$C_m=W_T G(y_0,x_m)\left[1-ik_0\alpha_i\mu_i-\frac{1}{2}k_0^2\alpha_i\alpha_j\mu_{ij}+...\right] \qquad 2.46$$

Les moments de la distribution de sources μ_i, μ_{ij}, etc., sont associés uniquement au point équivalent des sources en y_0. Une distribution de sources donnée a mathématiquement une infinité de représentations, du point équivalent au multipôle. Chacune a un moment multipolaire différent (i.e. y_0 différent) mais possède un unique champ lointain.

Le concept de position d'une source ponctuelle équivalente peut maintenant être introduit. Cette position est déterminée comme étant la position d'une source ponctuelle avec une puissance W_T qui donne le meilleur ajustement de l'équation 2.46 sur une grande étendue du champ acoustique. Si ce point est défini par y_0+z alors l'estimation de C_m est donnée par :

$$\overline{C}_m = W_T G(y_0 + z, x_m) \qquad 2.47$$

En champ libre, $G(y_0+z,x_m)$ peut être développé en séries de Taylor comme pour l'équation 2.46 et donne :

$$\overline{C}_m = W_T G(y_0, x_m)\left[1 - ik\alpha_i z_i - \frac{1}{2}k^2\alpha_i z_i \alpha_j z_j + \ldots\right] \qquad 2.48$$

En comparant à l'équation 2.46 on remarque que, pour de faibles valeurs de $k\alpha_i z_i$, le meilleur ajustement apparaît pour $z_i = Re(\mu_i)$.

Dans le but de déterminer la hauteur de la source équivalente, étudions maintenant, le cas d'une distribution de sources au-dessus d'un sol de coefficient de réflexion Q. La densité interspectrale est mesurée à l'aide d'un réseau vertical de microphones avec la référence au sol (figure 2.10) et à une distance R de l'origine du système de coordonnées y_0, soit $x_m = (R,h_m,0)$ et $x_0 = (R,0,0)$.

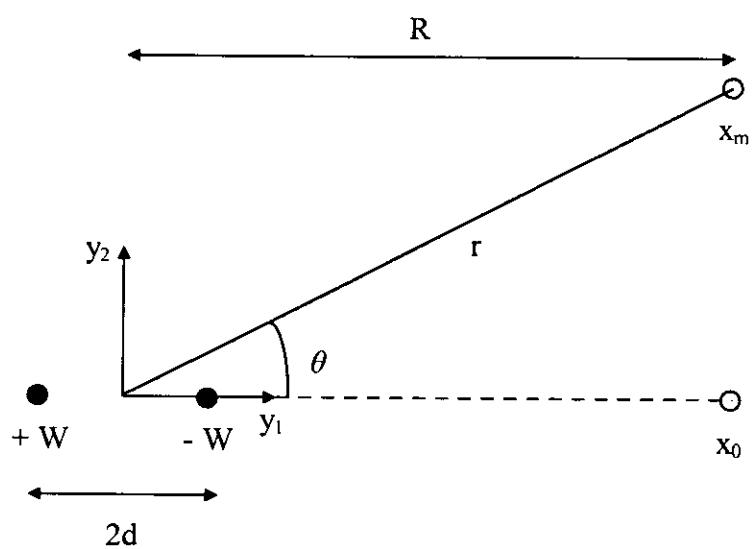

Figure 2.10 : Schéma pour un dipôle aligné sur y_1.

En champ lointain ($k_0R >> 1$), les dérivées de la fonction 2.40 peuvent être définies et l'interspectre calculé en utilisant l'équation 2.44 :

$$C_m = W_T G(y_0, x_m)\left\{1+\frac{1}{2}ik_0\mu_1(h_m/r)^2 - ik_0\mu_2(h_m/r)\left[(1-Q^*)/(1+Q^*)\right] - \frac{1}{2}k_0^2\mu_{22}(h_m/r)^2 + ...\right\}$$

2.49

Comme précédemment, la position optimale pour une source ponctuelle est celle qui permet d'obtenir la meilleure estimation du champ acoustique. Ceci est obtenu à l'aide de l'équation 2.48 pour une source de puissance W_T située en z :

$$\overline{C}_m = W_T G(y_0, x_m)\left\{1+\frac{1}{2}ik_0 z_1(h_m/r)^2 - ik_0 z_2(h_m/r)\left[(1-Q^*)/(1+Q^*)\right] - \frac{1}{2}k_0^2 z_2{}^2(h_m/r)^2 + ...\right\}$$

2.50

Le choix correct de valeurs pour $z = (z_1,z_2,z_3)$ est ici plus compliqué que dans le cas du champ libre. On peut choisir $z_1 = Re(\mu_1)$ pour égaler le second terme et, évidemment, $z_3 = 0$. Cependant, le choix de z_2 dépend du coefficient de réflexion du sol. S'il s'agit d'un sol parfaitement réfléchissant, alors $Q^* = 1$ et le troisième terme vaut 0. La valeur optimale pour z_2 sera donc :

$$z_2 = y_e = \sqrt{Re(\mu_{22})} \qquad 2.51$$

Si chaque source a une puissance W_n et se trouve située en $y = (s_n,y_n,w_n)$, alors l'équation 2.36 donne, en champ lointain (avec $\mu_1 = i/k$ dans le cas de la figure 10) :

$$C_m = G(y_0, x_m)\sum_n W_n e^{-ik_0 s_n\{(R/r)-1\}}\cos(k_0 y_n h_m/r) \qquad 2.52$$

Ceci est modélisé par une source ponctuelle située en $z_1 = 0$ et $z_2 = y_e$ définie par l'équation 2.51. Le champ acoustique est donné par :

$$\overline{C}_m = G(y_0, x_m)W_T\cos(k_0 y_e h_m/r) \qquad 2.53$$

Les auteurs montrent que l'erreur de l'approximation par une source ponctuelle est faible pourvu que :

$$k_0 y_e h_m/r < 0.4\pi \qquad 2.54$$

On peut donc en conclure que l'approximation de la source ponctuelle est raisonnable en dessous de cette limite. La figure 2.11 compare les différences 2.52 et 2.53 pour une distribution verticale de sources, avec chacune la puissance W_n, en utilisant un générateur de nombres aléatoires.

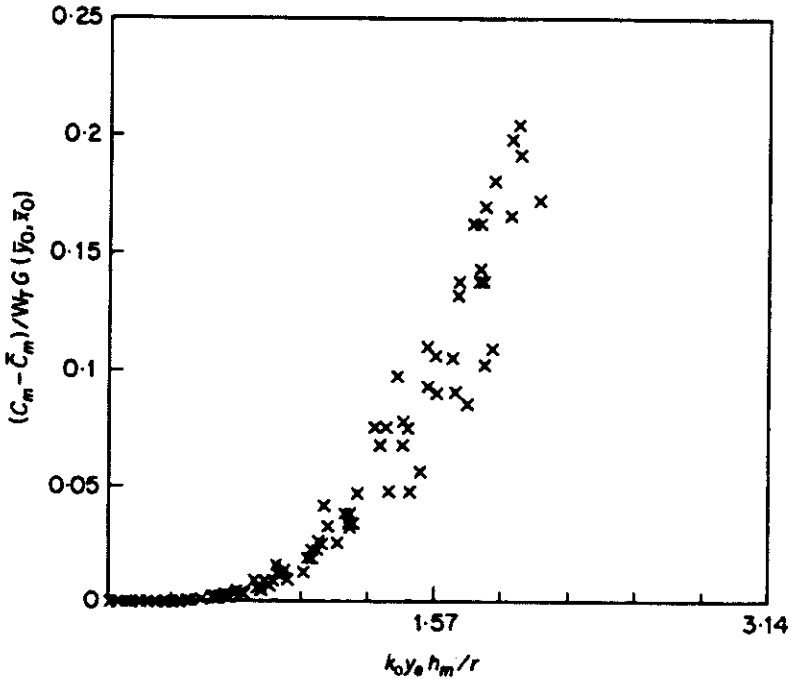

Figure 2.11 : Erreur dans l'approximation de la source ponctuelle pour différentes distributions de sources en fonction de ky_eh_m/r [Glegg & Yoon 1990-1].

Dans ce paragraphe, nous avons vu comment une distribution arbitraire de sources positionnées au-dessus d'une surface pouvait être modélisée par une source ponctuelle équivalente $(0,y_e,0)$ en vérifiant la condition 2.54. Naturellement, si la distribution de sources est directive ou si la surface n'est pas parfaitement réfléchissante ou si la distribution de sources effectue un déplacement significatif de sa position d'origine, alors le modèle de source ponctuelle est moins précis, mais reste toutefois acceptable.

2.4.1.4. Mesure de la position de la source ponctuelle équivalente

2.4.1.4.1. Modélisation de la distribution de sources

Dans le paragraphe précédent, il a été montré comment une source ponctuelle pouvait modéliser une ligne source verticale au-dessus d'un plan réfléchissant. La hauteur de la source ponctuelle est donc une mesure valable d'estimation de la hauteur de source équivalente. Cependant, pour mesurer la hauteur de la source équivalente, les effets de trois facteurs doivent être éliminés :

- directivité de la source : si elle reste faible, il n'y aura pas une grande influence sur la position apparente de la source.

- coefficient de réflexion du sol : L'effet de celui-ci apparaît dans le troisième terme du développement en séries de l'équation 2.49. Si la surface est quasiment réfléchissante ($Q \cong 1$), alors ce terme sera petit.
- distribution horizontale des sources : le déplacement des sources par rapport à l'origine aura un effet négligeable dans presque tous les cas y compris en basse fréquence.

En considérant une source ponctuelle omnidirectionnelle à une hauteur y_e au-dessus d'un plan réfléchissant, il est possible de fournir un modèle permettant de mesurer la hauteur de la source équivalente avec un minimum d'erreur :

$$D_m = \mathrm{Re}\left[\frac{C_m G(y_0, x_0)}{C_0 G(y_0, x_m)}\right] = \cos(k_0 y_e h_m / r) \qquad 2.55$$

Comme on l'a vu dans le paragraphe précédent, c'est un modèle satisfaisant pour déterminer la source équivalente d'une distribution arbitraire de sources quand y_e est définie par $\sqrt{\mathrm{Re}(\mu_{22})}$.

2.4.1.4.2. Mesure de la hauteur de source équivalente

L'équation 2.55 est une description adéquate, en champ lointain, d'une distribution de sources mesurée à l'aide d'un réseau vertical de microphones (cf. figure 2.9). La hauteur de source équivalente est obtenue par :

$$y_e = \left(\frac{r}{k_0 h_m}\right)\cos^{-1}(D_m) \qquad 2.56$$

Cela donne une mesure absolue de la hauteur de source à partir des mesures de la densité interspectrale entre un microphone sur le sol et un microphone à la hauteur x_m. Ceci est limité en hautes fréquences par l'équation 2.54 et en basses fréquences par le rapport signal sur bruit. Les auteurs montrent que les limites à l'intérieur desquelles les données sont considérées comme valides pour la mesure de la hauteur de source sont :

$$0.7 > D_m > 0.3 \qquad 2.57$$

Pour illustrer cette méthode, est représentée sur la figure 2.12 une simulation numérique de mesure de la hauteur de source dans laquelle l'équation 2.56 est utilisée pour trois sources non corrélées, d'égales puissances à des hauteurs de 0.5 m, 1 m, 1.5 m au-dessus d'une surface avec un coefficient de réflexion $|Q| = 0.8$. Une erreur aléatoire, générée par les équations 2.38 et 2.40, avec un écart-type de 0.1, a été ajoutée aux données.

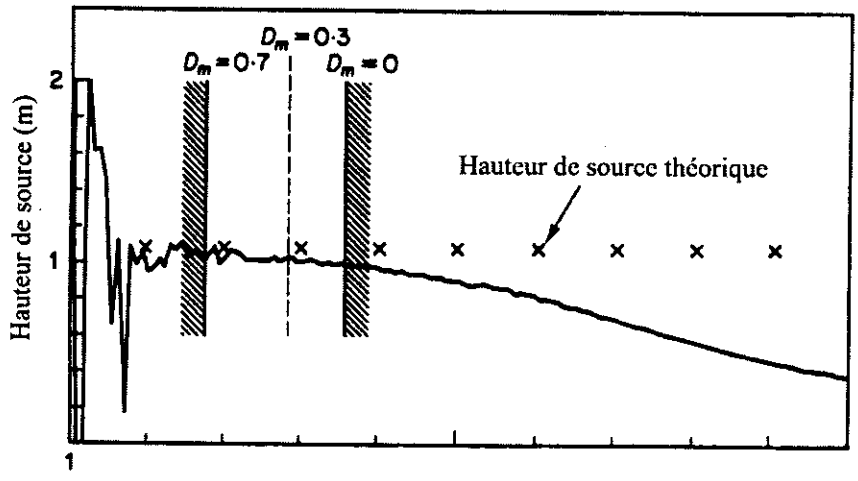

Figure 2.12 : Mesure de la hauteur de source pour une distribution de 3 sources avec une paire de microphones en fonction de ky_eh_m/r [Glegg & Yoon 1990-1].

Aux basses fréquences, en dessous des limites spécifiées par 2.57, la mesure est très bruitée avec de grandes erreurs. Aux fréquences correspondantes à la condition 2.57 des résultats précis sont obtenus. La limite inférieure $D_m = 0.3$ peut être étendue vers les hautes fréquences ($D_m = 0$) sans accroissement important de l'erreur. Cependant, aux très hautes fréquences la méthode sous-estime la hauteur de source. Ce résultat est typique de toutes les simulations numériques considérées et indépendant de la distribution de sources. On retient finalement :

$$0.7 > D_m > 0.15 \qquad 2.58$$

En conclusion, il a été montré qu'une bonne estimation de la hauteur de source est obtenue à l'aide de l'équation 2.56 et de la condition 2.58.

2.4.1.4.3. Type du réseau de microphones

Le but de ces expérimentations est de mesurer des hauteurs de sources pouvant atteindre 2.5 m sur une gamme de fréquences allant de 200 à 5000 Hz avec un réseau limité à sept microphones. Avec l'équation 2.55, la condition 2.58 devient :

$$0.25\pi < k_0 y_e h_m/r < 0.45\pi \qquad 2.59$$

En conséquence, aucun microphone situé à h_m ne peut être utilisé pour mesurer une hauteur de source située à y_e sur une gamme de fréquence où la limite supérieure est à peu près le double de la limite inférieure. Pour couvrir la plus grande partie du spectre, h_m/r doit satisfaire la séquence géométrique : $h_m/r = 2(h_{m-1}/r)$.

Il a été choisi h_m = (0.02,0.07,0.12,0.2,0.4,0.8,1.6) (dimensions en mètres), à une distance de 7.5 m des sources. Idéalement les trois premiers microphones auraient dû être placés 0.02 m plus bas, ce qui n'était pas possible pour des raisons d'encombrement.

La figure 2.13 représente les hauteurs de sources ainsi que la gamme de fréquence pouvant être mesurées avec la configuration choisie : microphones situés à des hauteurs h_m = (0.02,0.07,0.12,0.2,0.4,0.8,1.6) (dimensions en mètres) et à une distance de 7.5 m des sources. On note que pour des hauteurs de sources inférieures à 2.5 m, la gamme de 250 à 3000 Hz est couverte. On peut, bien entendu, obtenir des résultats à des fréquences supérieures et inférieures si la gamme des hauteurs est limitée. Les quelques "drop-out" visibles sont dus au fait que les microphones supérieurs ne couvrent pas tout à fait les limites spécifiées par la relation 2.59.

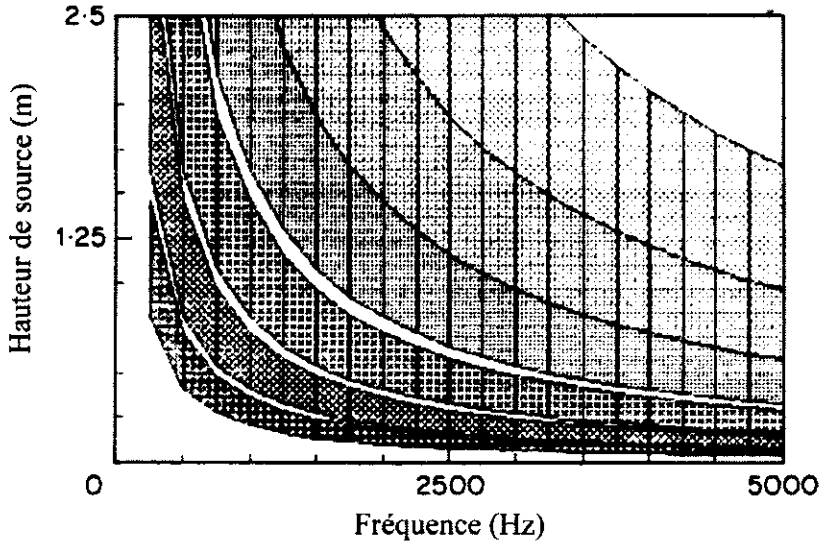

Figure 2.13 : Les aires grisées représentent les hauteurs de sources équivalentes pouvant être mesurées en fonction de la fréquence en utilisant la condition $0.7 > D_m > 0.15$. Chaque zone représente un microphone [Glegg & Yoon 1990-1].

2.4.1.5. Vérification expérimentale de la méthode de mesure

2.4.1.5.1. Procédure expérimentale

Les tests ont été effectués à l'aide de sept microphones positionnés aux hauteurs indiquées dans le paragraphe précédent. Un ou deux haut-parleurs, de 20 cm de diamètre, placés à différentes hauteurs ont été utilisés. La source nominale a été définie comme étant le centre du haut-parleur. Chaque haut-parleur est alimenté par un générateur de bruit blanc. Les mesures ont été effectuées sur des surfaces réfléchissantes en béton de ciment.

2.4.1.5.2. Résultats expérimentaux

2.4.1.5.2.1. Une seule source

Des mesures ont été effectuées avec un seul haut-parleur positionné à des hauteurs différentes : 15 cm, 45 cm, 84 cm, 124 cm et 163 cm au-dessus du sol. La figure 2.14 montre un résultat typique obtenu. On constate que dans la gamme 500-3400 Hz, la source sonore est précisément localisée à 45 cm :

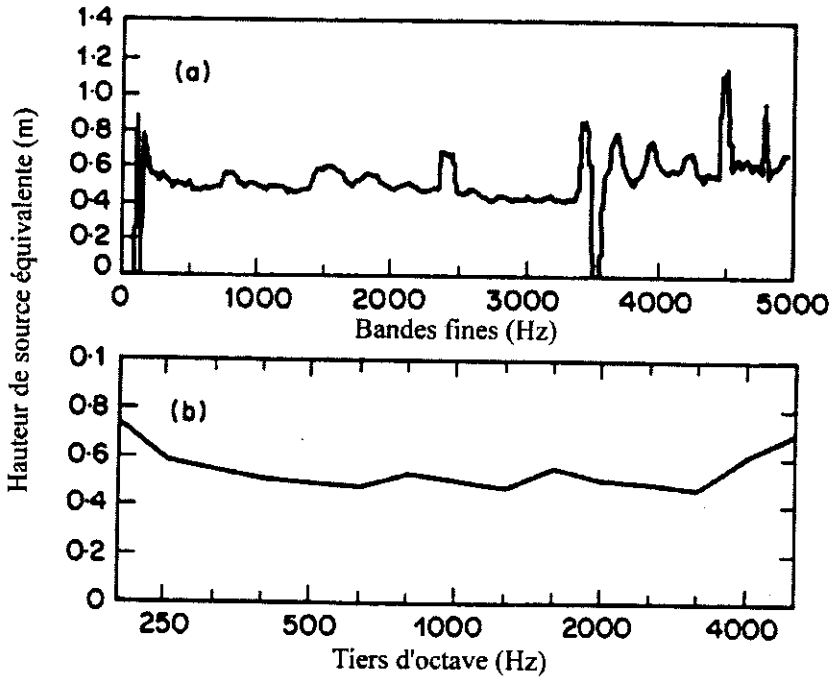

Figure 2.14 : Hauteur équivalente mesurée pour un haut-parleur situé à 45 cm au-dessus du sol. (a) résultat en bandes fines ; (b) moyenné par tiers d'octave [Glegg & Yoon 1990-1].

En dessous de 500 Hz, la hauteur de source est surestimée. D'ailleurs la figure 2.13 nous montre que cette bande est en dehors de la zone d'applicabilité. L'instabilité autour de 3500 Hz est due au passage d'un microphone à l'autre avec un bref "drop-out" et un rapport signal sur bruit faible. Ceci a déjà été remarqué figure 2.13. Dans les bandes 4000 et 5000 Hz on obtient une surestimation de la hauteur de source, mais l'erreur reste inférieure à 20 cm.

2.4.1.5.2.2. Deux sources

Les deux haut-parleurs ont été positionnés respectivement à une hauteur de 15 et 84 cm. La figure 2.15 représente les résultats obtenus.

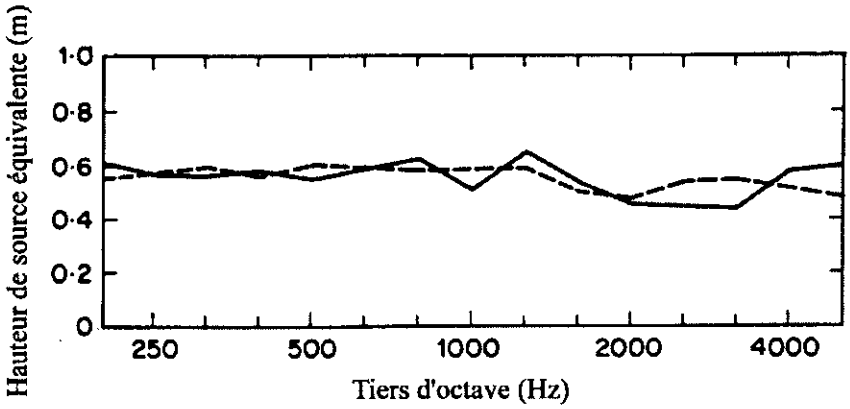

Figure 2.15 : Comparaison entre la hauteur de source mesurée (——) et calculée (– – – –) pour des sources à 15 et 84 cm au-dessus du sol [Glegg & Yoon 1990-1].

On constate que les résultats obtenus pour deux sources sont en accord avec le modèle de la source ponctuelle équivalente. Même si les sources sont éloignées, la hauteur de source mesurée est proche de la valeur calculée sur une large gamme de fréquence.
La hauteur calculée n'est pas constante sur toute la bande de fréquence comme on pouvait l'imaginer. Les auteurs ne donnent aucune explication mais on peut penser que cela provient des caractéristiques des deux haut-parleurs utilisés (réponse en fréquence notamment) qui ne sont pas rigoureusement identiques. Il s'ensuit une légère prépondérance de l'un ou l'autre des haut-parleurs suivant la gamme de fréquence, donc une variation de la hauteur de la source équivalente.

2.4.1.6. Conclusion

L'objectif de ce travail était de développer une méthode permettant de mesurer la hauteur de la source ponctuelle équivalente pour une distribution arbitraire de sources. Avant de considérer la méthode de mesure, il était nécessaire de s'attacher à la validité du concept de source ponctuelle équivalente. Il a été défini comme étant le lieu où une source ponctuelle omnidirectionnelle donne le meilleur ajustement du champ acoustique dans une région donnée. Il a été montré que si la source n'est pas trop directive et qu'il n'y a pas un grand changement de phase à la réflexion, alors le modèle de source ponctuelle peut être utilisé dans la région du champ acoustique où $k_0 y_e h_m / r < 0.4\pi$. Des concepts de ce type ont été utilisés par Kinns pour des sources en champ libre.
Une méthode de mesure a ensuite 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 position initiale. La plus grande erreur est le changement de phase à la réflexion, mais en pratique un grand changement de phase est très peu probable sur des interfaces air/béton. Les limitations théoriques de l'antenne de mesure sont obtenues pour les sources basses (< 0.5 m) en dessous de 500 Hz et pour les sources hautes (≈ 2 m) au-dessus de 4000 Hz. Les mesures ont confirmé ces limitations. Elles ont montré que les hauteurs des sources équivalentes pouvaient être mesurées avec une précision de ± 20 cm. Cette précision n'est pas suffisante dans notre cas d'étude. En effet, si l'estimation

de la hauteur de la source sonore équivalente est incorrecte, des écarts importants apparaissent en haute fréquence (cf. § 2.5.2.2). Ces écarts ont une influence non négligeable, notamment sur les mesures à grandes distances (cf. § 2.5.5). Nous reviendrons sur la précision obtenue par les auteurs de cet article dans le paragraphe 2.4.3.6.
Les mesures en tiers d'octave ont fait apparaître un avantage certain par rapport à celles en bandes fines. L'antenne utilisée peut être améliorée en augmentant le nombre de microphones ou en diminuant la gamme de fréquence, donc en rapprochant les microphones.

Ce travail a conduit au développement d'une technique de mesure de hauteurs de sources équivalentes applicable à des sources situées à une hauteur pouvant atteindre 2.5 m dans la gamme de fréquence 250-2500 Hz. L'objectif de cette technique est de mesurer la hauteur de source de véhicules circulant sur autoroutes.

2.4.2. Mesure de la hauteur de source équivalente pour des véhicules circulant sur autoroutes [Glegg & Yoon 1990-2]

2.4.2.1. Introduction

La hauteur effective des sources de bruit d'un véhicule est un paramètre important pour le dimensionnement des écrans antibruit le long des autoroutes. Dans le cas où le bruit est principalement dû au contact pneumatique-chaussée, des écrans de faibles hauteurs sont suffisants. Si l'on considère le cas des poids lourds pour lesquels le moteur et l'échappement constituent des sources importantes, les écrans doivent être plus élevés. A titre d'exemple, la méthode FHWA pour les écrans acoustiques utilise une hauteur de source équivalente de 2.44 m pour les trains routiers (échappement dirigé vers le haut) basée sur des résultats d'expériences du début des années 70. Dans ce même document, il n'est pas spécifié de mode d'application ni de type de chaussées particulier. La hauteur n'est pas non plus exprimée en fonction de la fréquence. Il était donc nécessaire d'obtenir de nouvelles informations.

2.4.2.2. Procédure de mesure

La hauteur du point source équivalent, y_e, de véhicules circulant sur autoroutes est mesurée en utilisant la méthode décrite précédemment [Glegg & Yoon 1990-1] où $y_e = \sqrt{\mu_{22}}$. Cette technique donne le lieu géométrique où un point source fournit le meilleur ajustement de la densité interspectrale mesurée en champ lointain à l'aide d'un réseau vertical de microphones. Le réseau utilise sept microphones positionnés à des hauteurs de 0.02, 0.07, 0.12, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 m au-dessus du sol et à une distance de 7.5 m de l'axe des véhicules.
Pour appliquer cette méthode à des véhicules mobiles, il est nécessaire de corriger l'amplification et la variation de fréquence Doppler [Glegg 1987], [Glegg & Mouches 1988]. Dans notre cas, ces corrections ne sont pas nécessaires car le signal n'est pris en compte que sur ± 2.5 m de part et d'autre des microphones. La correction de l'amplitude est alors inférieure à 0.75 dB et la variation de fréquence Doppler inférieure à 2 %. De même la directivité horizontale de la source a peu d'effets.

Les mesures ont été effectuées avec 36 trains routiers, 37 poids lourds et 25 véhicules légers.

2.4.2.3. Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus sur les trains routiers sont rassemblés sur la figure 2.16.

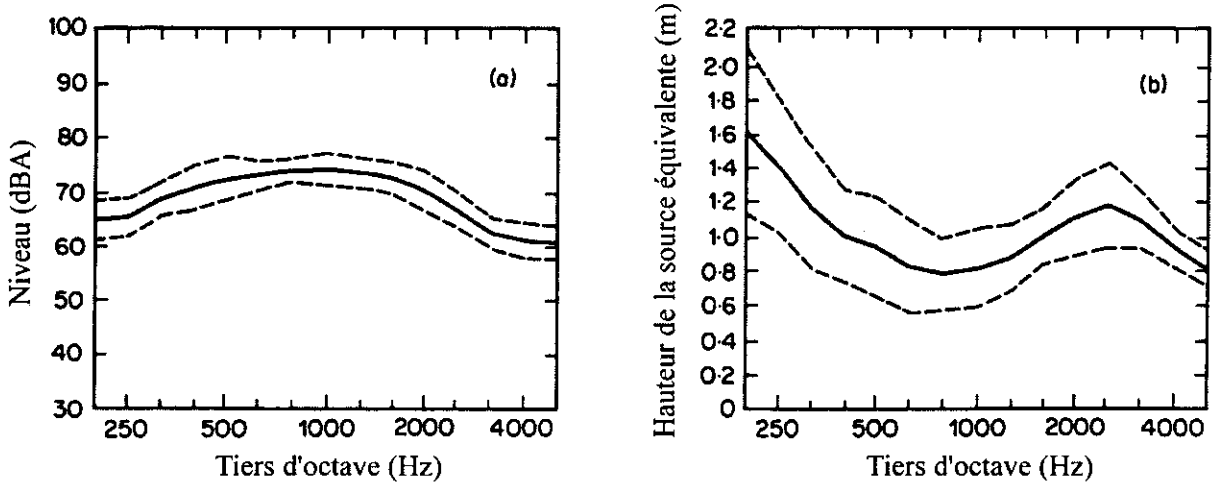

Figure 2.16 : Niveau de pression acoustique (a) et hauteur de source équivalente (b) pour 36 trains routiers. ——— : valeur moyenne ; – – – – : valeur moyenne ± écart-type [Glegg & Yoon 1990-2].

Il apparaît qu'en basse fréquence la source équivalente est très haute (1.6 m). Elle décroît dans la bande 630-1000 Hz (0.8 m), puis remonte ensuite pour atteindre 1.2 m à 2500 Hz. Les basses fréquences sur un train routier sont normalement associées au bruit moteur, et sont émises par la structure de caisse et le tuyau d'échappement, typiquement situés au-dessus d'un mètre du sol. Ceci est en accord avec la figure 2.16 dans la gamme 200-400 Hz. Dans la bande 500-1000 Hz, le bruit de contact pneumatique-chaussée est important, d'où une hauteur de source minimale. Toutefois, ce bruit de contact n'est pas nécessairement dominant et l'énergie se trouve répartie entre le bruit moteur et le contact pneumatique-chaussée. La hauteur de source équivalente est donc plus faible dans cette gamme de fréquence mais toujours supérieure à 0.8 m. Aux fréquences élevées, le bruit de contact devient moins important et la source remonte à une hauteur qui correspond à celle du moteur. Les résultats au-dessus de 2500 Hz doivent être interprétés avec précautions [Glegg & Yoon 1990-1], mais suggèrent que la hauteur plus faible de la source équivalente est peut-être due à l'accroissement du bruit de transmission.

Ces résultats sont des valeurs moyennes et ne tiennent pas compte des spécificités de chaque véhicule. L'écart-type pour les hauteurs de sources mesurées est d'environ 40 cm en basse fréquence et se réduit à 10 cm aux fréquences élevées.

En ce qui concerne les poids lourds (figure 2.17), la hauteur moyenne pour la source équivalente est d'environ 70 cm et reste toujours inférieure, quelle que soit la fréquence, à celle obtenue pour les trains routiers. Ce type de véhicule n'a pas, contrairement aux trains routiers,

un tuyau d'échappement dirigé vers le haut. La remontée importante de la hauteur de source en basse fréquence que l'on a constatée précédemment n'apparaît donc pas.

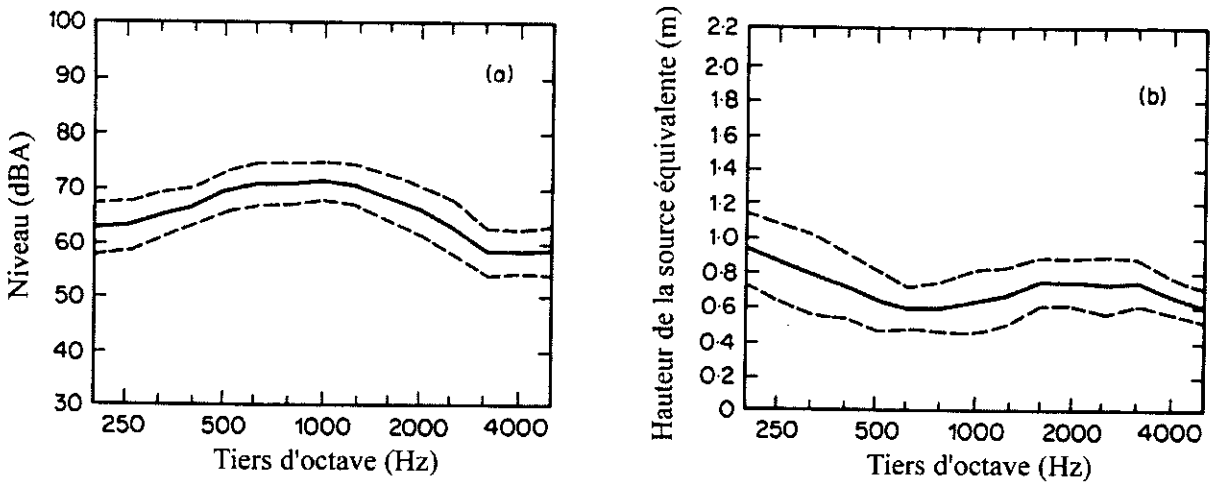

Figure 2.17 : Niveau de pression acoustique (a) et hauteur de source équivalente (b) pour 37 poids lourds. ——— : valeur moyenne ; – – – : valeur moyenne ± écart-type [Glegg & Yoon 1990-2].

Les résultats moyens pour les véhicules légers sont présentés figure 2.18. Bien que le graphique fasse apparaître une hauteur de source de 40 cm entre 500 et 1000 Hz, la valeur actuelle est probablement inférieure de l'aveu même des auteurs. Aux basses et hautes fréquences, la hauteur de source remonte aux environs de 60 cm.

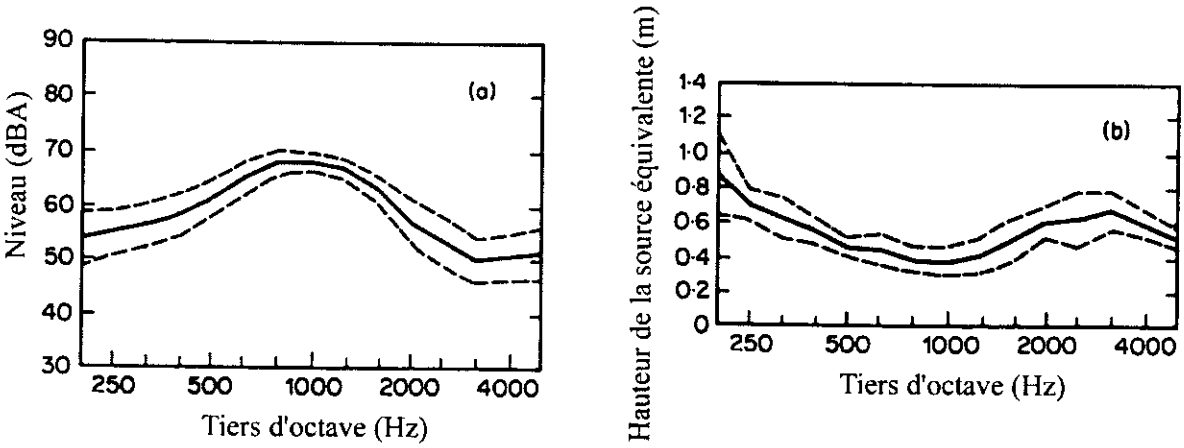

Figure 2.18 : Niveau de pression acoustique (a) et hauteur de source équivalente (b) pour 25 véhicules légers. ——— : valeur moyenne ; – – – : valeur moyenne ± écart-type [Glegg & Yoon 1990-2].

2.4.2.4. Conclusion

Le but de cette étude était de mesurer la hauteur de source équivalente de véhicules circulant sur autoroute dans le but d'optimiser la hauteur des écrans antibruit. Les hauteurs moyennes obtenues sont respectivement de 1.2 m pour les trains routiers, 0.7 m pour les poids lourds et 0.6 m pour les véhicules légers. Il apparaît, pour tous les types de véhicules, une diminution de la hauteur de source dans la bande 500-1000 Hz due à la prédominance du bruit de contact pneumatique-chaussée dans cette gamme.
Les auteurs Américains se réfèrent à la méthode utilisée par le FHWA. Cette dernière suppose des hauteurs de sources de 2.44 m pour les trains routiers, 0.7 m pour les poids lourds et 0 m pour les véhicules légers. On constate que les valeurs sont très différentes pour les trains routiers et les véhicules légers. Compte tenu de la précision de la méthode décrite ici (cf. figure 2.16), ce résultat n'est pas surprenant.

2.4.3. Méthode de mesure des hauteurs de sources d'un véhicule [Coulson 1996]

2.4.3.1. Introduction

Le logiciel de prévision du bruit de trafic routier [STAMINA 1983] utilisé aux Etats-Unis jusqu'en 1995, ne tient compte que des niveaux globaux d'émission sonore pondérés A sans aucune information sur les spectres ainsi que sur la hauteur des sources fictives (sources d'un véhicule représentées généralement par deux sources fictives). En revanche, STAMINA prend en compte une hauteur de source "effective" pour un type de véhicule donné. Ces sources sont indépendantes de la vitesse, de la rampe, du type de revêtement, de l'accélération du véhicule et bien sûr de la fréquence. Pour affiner les prévisions de bruit de trafic, il est nécessaire d'étudier les hauteurs de sources et les spectres des sources fictives de tous les types de véhicules, en fonction des paramètres cités précédemment.

La méthode consistant à remplacer le véhicule par une source ponctuelle équivalente a été étudiée par Glegg et Yoon [Glegg & Yoon 1990-1] [Glegg & Yoon 1990-2] : une technique permettant de mesurer la hauteur de cette source ponctuelle a été développée et testée sur une centaine de véhicules.

Pour décrire précisément les spécificités des types de revêtements routiers et de véhicules, la nouvelle base de données doit contenir plus de mille passages de véhicules.

2.4.3.2. Description du système d'acquisition

Le système de mesure est décrit sur les figures 2.19 et 2.20.

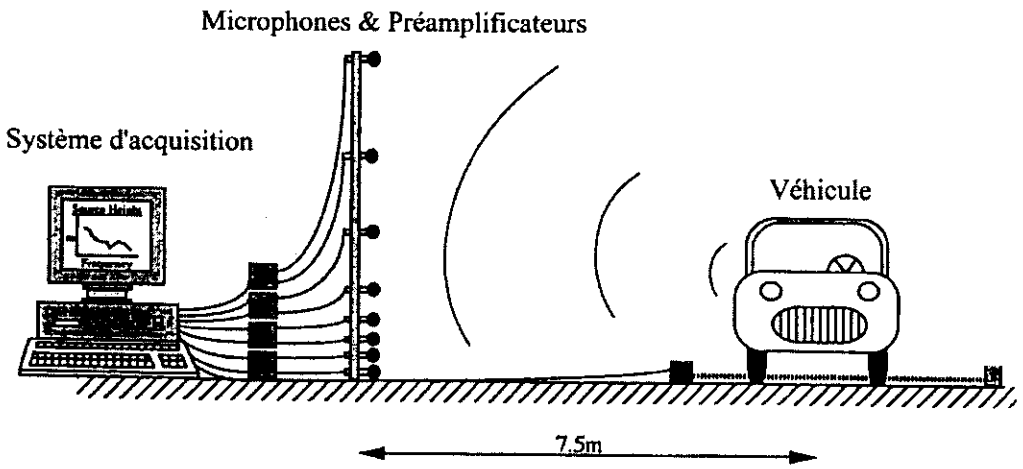

Figure 2.19 : Equipement de mesure [Coulson 1996].

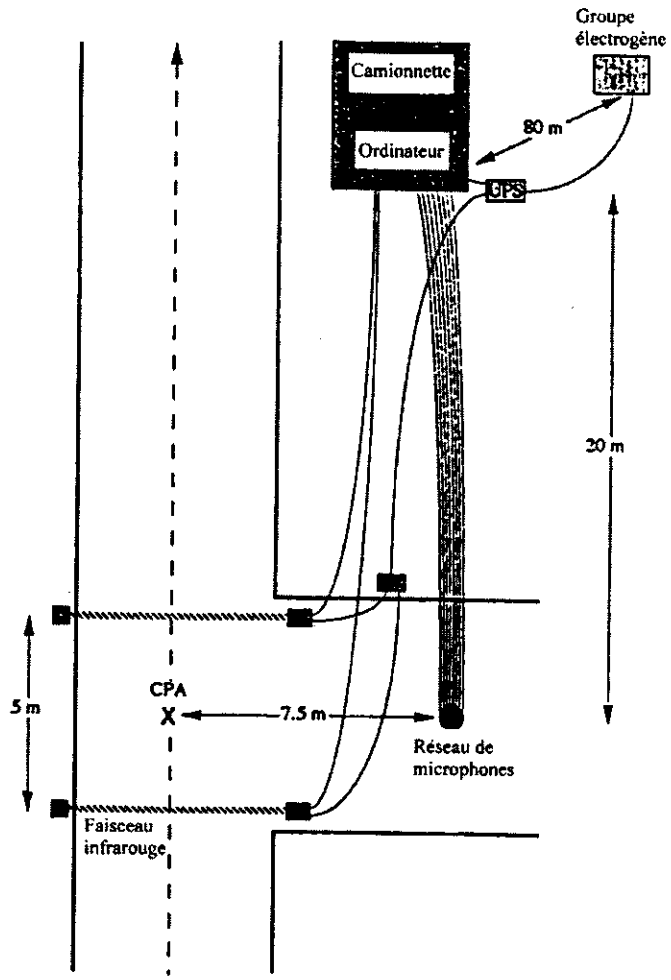

Figure 2.20 : Site de mesure [Coulson 1996].

2.4.3.3. Evaluation des hauteurs de sources

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. Le logiciel utilisé résout l'équation (2.56) introduite par Glegg et Young [Glegg & Yoon 1990-1]. Cette équation permet de calculer la hauteur de source équivalente (cf. § 2.4.1.4.2) :

$$y_e = \left(\frac{r}{k_0 h_m} \right) \cos^{-1}(D_m) \qquad 2.60$$

où : k_0 est le nombre d'onde,
h_m est la hauteur du microphone,
r est la distance du microphone à l'axe du véhicule ;

et :

$$D_m = \mathrm{Re}\left[\frac{C_m G(y_0, x_0)}{C_0 G(y_0, x_m)} \right] \qquad 2.61$$

où : C_m est l'interspectre entre le signal recueilli au microphone de référence situé en x_0 et celui provenant du microphone situé en x_m,
C_0 est l'autospectre du microphone de référence.

De plus :

$$G(y, x_m) = (1+Q)\left[\frac{e^{ik_0(r_+ - r_0)}}{r_+ r_0} + Q^* \frac{e^{ik_0(r_- - r_0)}}{r_- r_0} \right] \qquad 2.62$$

L'analyse fait apparaître une erreur inférieure à ± 15 % dans l'estimation de la hauteur de source si D_m satisfait le critère :

$$0.15 < D_m < 0.7 \qquad 2.63$$

Ce critère est utilisé pour déterminer la paire de microphones qui va servir au calcul de la hauteur de source, pour une fréquence particulière.

La gamme de fréquence correspondant à la relation 2.63 peut être étendue, sans effets significatifs sur la mesure de la hauteur de source (à l'exception de quelques petits "drop-out" pour certaines fréquences), en abaissant la limite inférieure du critère :

$$0 < D_m < 0.7 \qquad 2.64$$

La figure 2.21 illustre les hauteurs de sources pouvant être mesurées en accord avec ce nouveau critère.

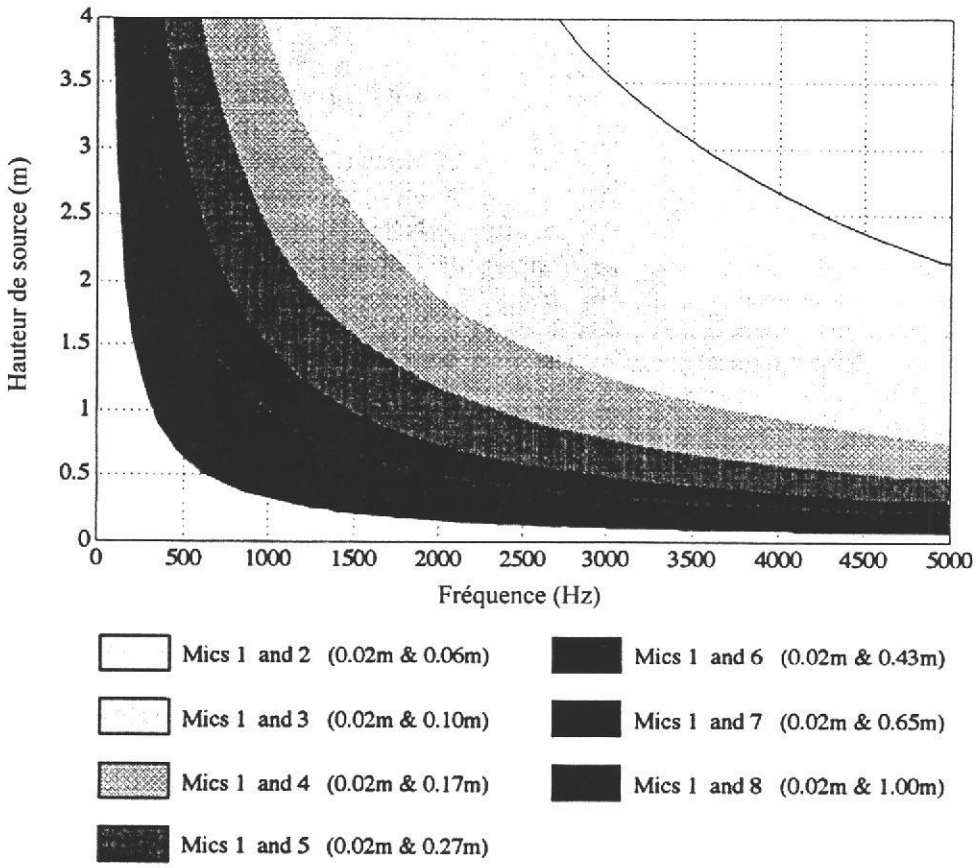

Figure 2.21 : Hauteurs des sources équivalentes pouvant être mesurées en accord avec le critère 2.64, pour chaque paire de microphones [Coulson 1996].

2.4.3.4. Limitations du système

En l'absence de bruit extérieur, cette méthode est capable de mesurer des hauteurs de sources, à une fréquence quelconque, avec une seule paire de microphones. En réalité, elle est limitée par le rapport signal sur bruit. Les signaux bruités provenant des microphones introduisent des erreurs dans les courbes D_m dont la conséquence est de limiter les régions de précision des mesures pour chaque paire de microphones. Les hauteurs de sources inférieures à 1.5 m en dessous de 500 Hz ne peuvent pas être mesurées avec précision. De même au-dessus de 2.5 kHz, des problèmes sont apparus. Ces derniers sont certainement dus, en partie, à des phénomènes de turbulence lors du passage des véhicules ou à un rapport signal sur bruit faible (interférences destructives entre le rayon direct et le rayon réfléchi).

L'approximation de champ lointain serait plus précise si l'on pouvait éloigner le réseau de microphones. Ceci est en pratique impossible car cette mesure nécessite d'avoir un sol homogène et parfaitement réfléchissant, ce qui est très difficile à réaliser lors de situations réelles.

2.4.3.5. Données rassemblées

Plus de mille véhicules ont, à ce jour, été enregistrés sur une douzaine de sites en Floride. cinq catégories ont été distinguées :

- les véhicules légers,
- les poids lourds,
- les trains routiers (trois essieux ou plus),
- les motocyclettes,
- les autobus (deux ou trois essieux).

Plusieurs types de revêtements ont également été considérés. Un exemple de résultats obtenus est représenté figure 2.22. Les spectres et les hauteurs représentés sont issus d'un moyennage effectué pour chaque catégorie de véhicules.

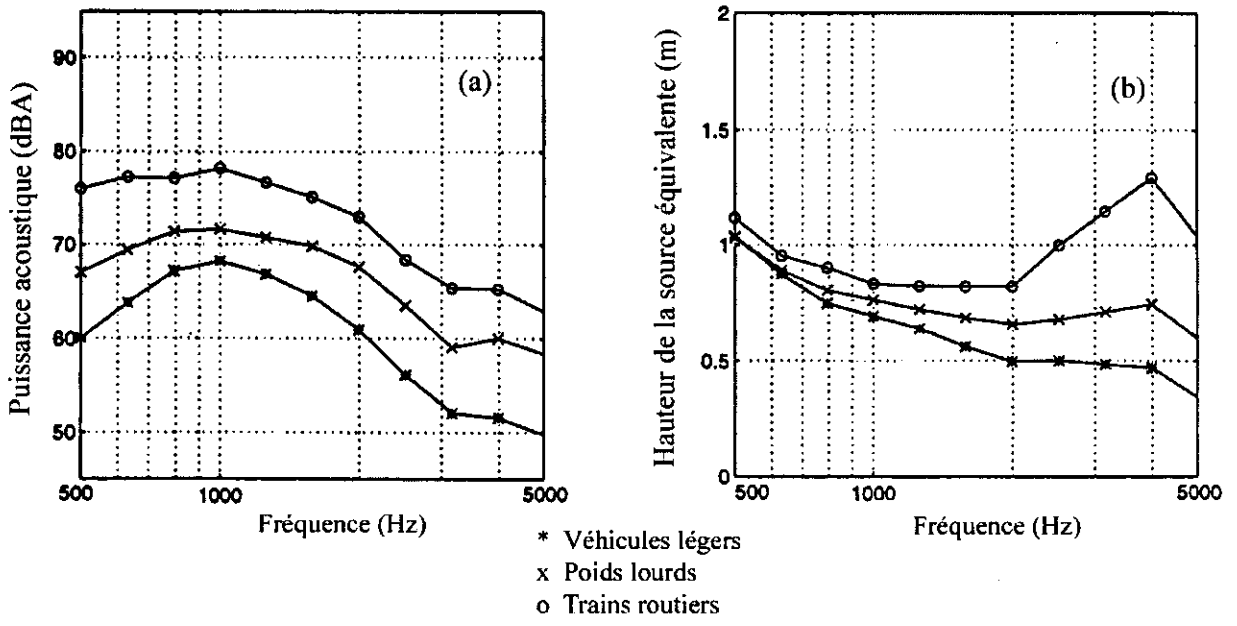

Figure 2.22 : Spectres de puissance et hauteurs de sources moyennés [Coulson 1996].

Alors qu'en basse fréquence, les hauteurs de sources sont assez proches d'un type de véhicule à l'autre, les écarts augmentent nettement à partir de 1 kHz.
Les hauteurs, élevées à 500 Hz, deviennent plus faibles, puis se stabilisent ou remontent à partir de 2 kHz. Ce phénomène peut être attribué à la prépondérance de la source de contact pneumatique-chaussée dans les moyennes fréquences.

2.4.3.6. Conclusion

La rapidité de montage et d'acquisition de ce dispositif permet de constituer une importante base de données en un minimum de temps. De plus amples investigations sur les limitations de ce système seraient nécessaires pour augmenter la fiabilité des résultats dans certaines fréquences.
Plus généralement, les méthodes de mesure présentées dans les paragraphes précédents souffrent d'une précision un peu faible. La hauteur de la source sonore équivalente est estimée à ± 20 cm dans le meilleur des cas et peut atteindre ± 50 cm en basse fréquence (cf. figure 2.16). Comme nous l'avons déjà mentionné à plusieurs reprises, cette précision est insuffisante. La prévision des niveaux sonores à grande distance (cf. § 2.5.5) montre qu'une erreur de 15 à 20 cm sur une hauteur de source équivalente proche du sol entraîne une erreur sur la prévision des niveaux sonores d'au moins 3–4 dBA. Cette erreur peut avoir un impact économique énorme si l'on considère qu'elle est équivalente à ajouter (ou enlever) une hauteur d'un mètre sur un écran acoustique.

2.5. Méthode de détermination de la hauteur de source sonore équivalente et de la puissance acoustique par la technique propagative

Comme nous venons de le voir au cours des paragraphes précédents, la majeure partie des travaux traitant de la caractérisation acoustique des véhicules est basée sur le concept de source équivalente ponctuelle et omnidirectionelle.
De façon identique aux études citées dans cet aperçu bibliographique, nous considérerons qu'il est possible de modéliser un véhicule à partir d'une source de type monopolaire. Toutefois notre démarche sera différente puisque nous n'utiliserons pas une technique basée sur les antennes acoustiques, que nous avons jugée trop imprécise (cf. § 2.4.3.6) et trop lourde à mettre en œuvre, mais nous utiliserons plutôt une méthode fondée sur les phénomènes propagatifs entre une source sonore, le véhicule et deux microphones. Cette méthode fait principalement appel à l'ajustement des positions des minima de pression acoustique produits par les phénomènes interférentiels. A cet effet, nous utilisons un logiciel de propagation développé au LCPC, "PL_PROPATE" [Bérengier & Hamet 1997]. Dans ce dernier, le sol est acoustiquement caractérisé par son impédance de surface obtenue à partir de modèles couramment utilisés par la communauté scientifique. Citons par exemple celui de Delany et Bazley [Delany & Bazley 1970] pour les revêtements routiers non poreux et celui de Hamet et Bérengier [Hamet & Bérengier 1993] pour les revêtements poreux (cf. annexe 2).

2.5.1. Phénomènes de propagation acoustique – Phénomènes d'interférences [Piercy & al. 1977] [Embleton 1996]

Certains mécanismes de la propagation acoustique sont toujours présents quelque soit le cas d'étude. Ces concepts fondamentaux sont la dispersion géométrique et l'absorption atmosphérique. De plus, les caractéristiques des sols influent de façon importante sur la

propagation de l'onde acoustique produite par le véhicule. L'ensemble de ces phénomènes est plus amplement détaillé dans l'annexe 2.
Les propriétés acoustiques du sol succinctement présentées dans l'annexe 2 jouent un rôle prépondérant dans la détermination de la structure et de la nature du champ sonore au voisinage du sol. Ce champ résulte en effet de la combinaison des ondes directe et réfléchie par le sol, dont le principal effet est l'apparition de phénomènes d'interférence. Lorsque la surface est acoustiquement rigide, les phénomènes interférentiels sont accentués : c'est le cas des revêtements routiers classiques ou du béton de ciment. Ce cas extrême se traduit par un comportement asymptotique tel que : $Z/Z_0 \to \infty$ et par conséquent $R_p \to 1$. Il n'y a donc pas de changement de phase à la réflexion, et les effets observés sont entièrement dus à la différence de longueur de trajet acoustique rayon direct – rayon réfléchi entre la source et le récepteur. Ainsi, quand la source (ou le récepteur) est localisée très près de la surface, aucune figure d'interférence n'apparaît sur toute l'étendue du spectre concerné [80–5000 Hz]. Dès que la source (ou le récepteur) s'éloigne du sol, le trajet du rayon réfléchi devient plus long que celui du rayon direct ; cette différence de longueur du chemin acoustique engendre une différence de phase entre les deux champs qui s'additionnent de manière cohérente (pour les distances qui nous intéressent, la turbulence n'est pas prise en compte). A certaines fréquences, lorsque la différence de longueur est multiple d'une demi longueur d'onde, la différence de phase est alors de π . On observe alors des interférences destructives (ou creux d'interférences) très marquées.

2.5.2. Mesure de la hauteur de source équivalente

2.5.2.1. Méthode de mesure [Gaulin & Bérengier 1999]

Nous avons utilisé à cet effet le logiciel "PL_PROPATE". Ce dernier a été développé au LCPC dans le cadre d'un thème de recherche [Bérengier 1996]. Il est réalisé sous HPbasic. Il permet de calculer l'atténuation excédentaire ou "effet de sol"[1], en bandes fines ou par bandes de fréquence, résultant de la propagation d'une onde sonore entre une source et un récepteur. Il nous fournit la "différence" entre le cas réel, c'est-à-dire en présence d'un sol homogène, et le champ libre (figure 2.23). Plusieurs modèles d'impédance sont intégrés dont celui de Delany et Bazley que nous utiliserons. Ce dernier présente l'avantage d'être simple et fiable sur l'ensemble de la gamme de fréquences utile. Rasmussen [Rasmussen 1982-1] utilise une démarche similaire pour déterminer l'atténuation excédentaire[2] du bruit de trafic routier.

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

$$\frac{p_l}{p_0} = \frac{A_s}{4\pi r_d} e^{ik_0 r_d} \qquad 2.65$$

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

[1] Terme qui désigne l'atténuation relative, par rapport au champ libre, de l'onde sonore entre une source et un récepteur.
[2] Atténuation excédentaire : expression désignant la combinaison de l'effet de sol et de l'absorption atmosphérique.

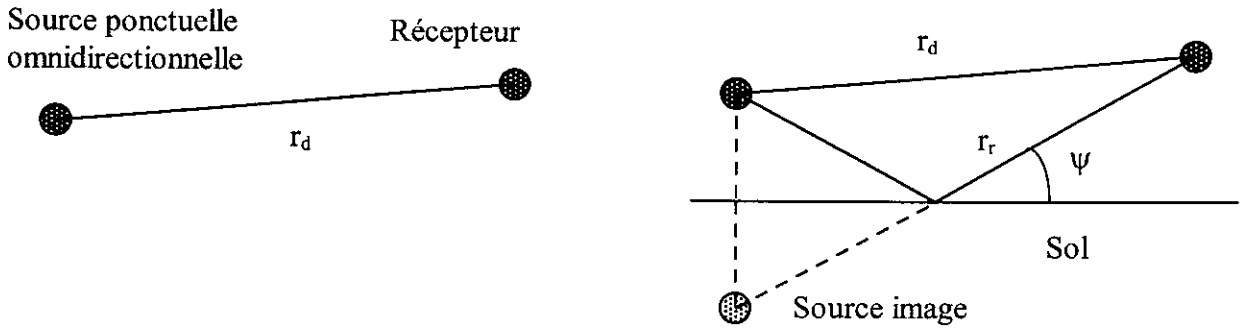

Figure 2.23 : Distances de propagation en champ libre et en présence d'un sol.

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

$$\frac{p_r}{p_0} = \frac{A_s}{4\pi r_d} e^{ik_0 r_d} + Q \frac{A_s}{4\pi r_r} e^{ik_0 r_r} \quad . \qquad 2.66$$

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

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

$$\left|\frac{p_r}{p_l}\right|^2 = 1 + \frac{r_d^2}{r_r^2} + \frac{2r_d}{r_r} \cos\left[\frac{2\pi f}{c_0}(r_r - r_d)\right] \qquad 2.67$$

avec f : fréquence considérée (Hz),
c_0 : célérité du son (m/s) dans l'air.

D'où l'atténuation relative ΔL donnée par le logiciel dans le cas d'un sol parfaitement réfléchissant :

$$\boxed{\Delta L = 10\log_{10}\left|\frac{p_r}{p_l}\right|^2 = 10\log_{10}\left\{1 + \frac{r_d^2}{r_r^2} + \frac{2r_d}{r_r} \cos\left[\frac{2\pi f}{c_0}(r_r - r_d)\right]\right\}} \qquad 2.68$$

Le résultat précédent est obtenu pour une fréquence discrète. Après un calcul sur l'ensemble des fréquences, le spectre tiers d'octave est obtenu par recomposition. Dans le cadre de nos mesures, nous avons choisi un sol parfaitement réfléchissant.

Les effets atmosphériques comme la turbulence et le gradient de vitesse du son sont négligeables pour les distances considérées. Ils ne seront donc pas pris en compte.

La figure suivante représente une copie de l'écran d'accueil du logiciel.

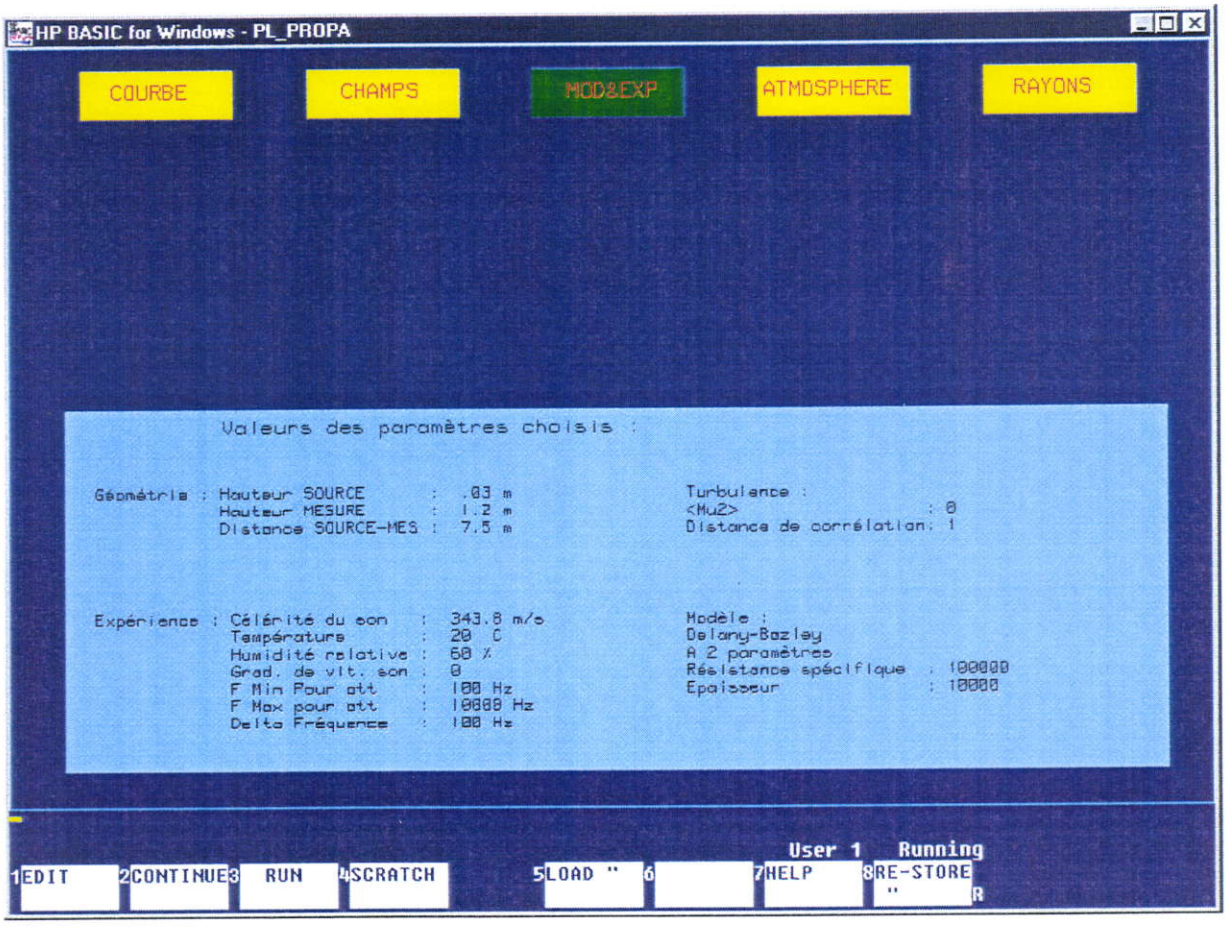

Figure 2.24 : Ecran d'accueil du logiciel "PL_PROPATE".

Les paramètres du logiciel sont les suivants :

- positions relatives de la source et du récepteur (hauteur et distances),
- impédance du sol (Résistance spécifique σ = 100000 c.g.s. Rayls/cm (cf. annexe 2) et épaisseur = 10000 m dans le cas d'un sol infini et parfaitement réfléchissant),
- conditions météorologiques : température et humidité (paramètres de turbulence et gradient de vitesse du son inutiles dans notre cas).

A titre d'exemple, la figure 2.25 montre l'atténuation relative obtenue pour une source située à 10 cm du sol, un récepteur à une distance de 7.5 m et une hauteur de 1.2 m, pour un sol parfaitement réfléchissant.

On obtient, pour chaque tiers d'octave, l'atténuation par rapport au champ libre :

$$\Delta L_1 = L_{mesuré,1} - L_{libre,1} \quad \text{pour le premier microphone,}$$
$$\Delta L_2 = L_{mesuré,2} - L_{libre,2} \quad \text{pour le second microphone.} \qquad 2.69$$

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

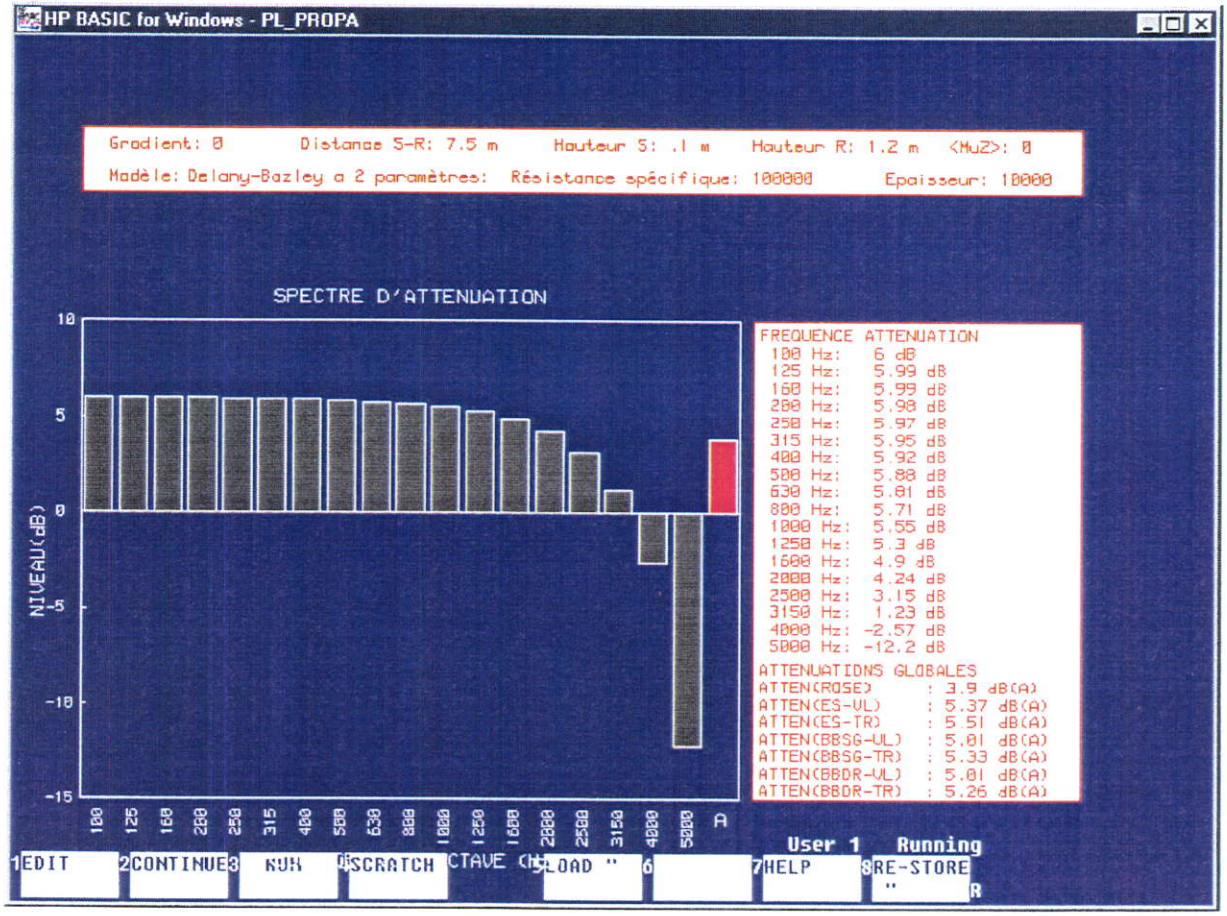

Figure 2.25 : Spectre d'atténuation obtenu pour une source située à 10 cm du sol réfléchissant, un récepteur à une distance de 7.5 m et une hauteur de 1.2 m.

Si nous considérons le véhicule comme une source ponctuelle omnidirectionnelle (monopôle) de puissance W, nous pouvons écrire, en champ libre :

$$p^2_{libre,1} = \frac{W}{4\pi r_1^2}\rho_0 c_0 \qquad \text{et:} \qquad p^2_{libre,2} = \frac{W}{4\pi r_2^2}\rho_0 c_0 \qquad 2.70$$

avec : ρ_0 et c_0, respectivement masse volumique et célérité du son dans l'air.

De plus : $$p_0^2 = W_0.\rho_0.c_0 \qquad 2.71$$

Donc : $$\frac{p^2_{libre,1}}{p_0^2} = \frac{W}{W_0}\frac{1}{4\pi r_1^2} \qquad \text{et :} \qquad \frac{p^2_{libre,2}}{p_0^2} = \frac{W}{W_0}\frac{1}{4\pi r_2^2} \qquad 2.72$$

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

$$L_{libre,1} = Lw - 10\log_{10}4\pi r_1^2 - \alpha_{air,1}$$
$$L_{libre,2} = Lw - 10\log_{10}4\pi r_2^2 - \alpha_{air,2} \qquad 2.73$$

Pour des distances inférieures à 15 m, l'absorption atmosphérique est très faible (de 0.5 à 1dB à 5000Hz pour 15 m suivant la température). 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 (cf. eq. 2.69 et 2.73 en remplaçant $L_{mesuré,2}$ par $L_{calculé,2}$) :

$$L_{calculé,2} = L_{mesuré,1} + \Delta L_2 - \Delta L_1 + \alpha_{air,1} - \alpha_{air,2} - 20\log_{10}\frac{r_2}{r_1} \qquad 2.74$$

Un procédé de calage, dont la variable est la hauteur de source, est utilisé afin d'ajuster $L_{calculé,2}$ 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 deux microphones sont également positionnés au-dessus du même type de sol, ceci pour éviter les ruptures d'impédance. La plate-forme de mesure (chaussée et bordure) doit, de ce fait, être suffisamment large.

Afin de vérifier le domaine de validité de cette technique, la méthode a été appliquée avec une source de bruit rose de position connue. Cette dernière, constituée d'un ventilateur de 30 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur, est assimilée à une source ponctuelle que l'on estime être située au voisinage du centre du ventilateur (figure 2.26). Les mesures ont été effectuées sur la piste d'essai du LCPC sur un enrobé réfléchissant de type Béton Bitumineux Très Mince (cf. annexe 3). Plusieurs configurations de sources et de microphones ont été testées.

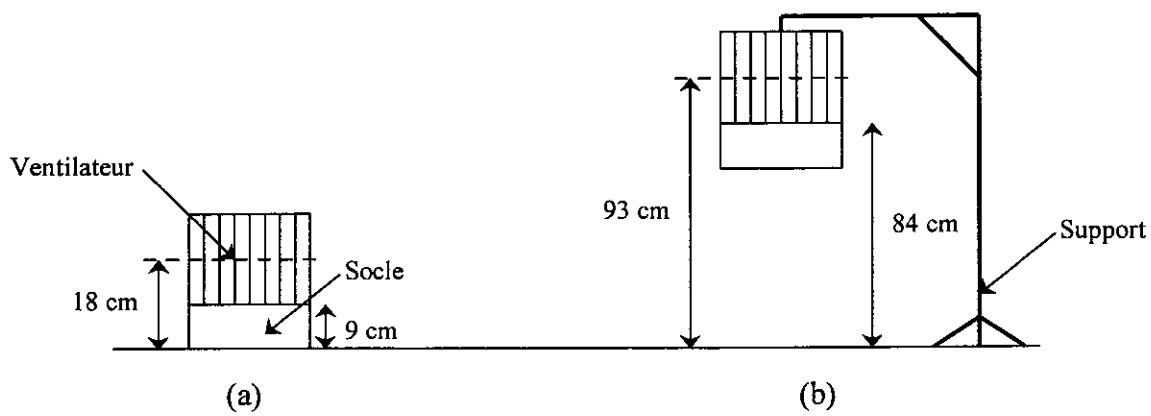

Figure 2.26 : Différentes configurations du ventilateur. (a) : posé sur le sol ; (b) : à une hauteur de 75 cm.

La figure 2.27 reproduit un exemple de résultat.

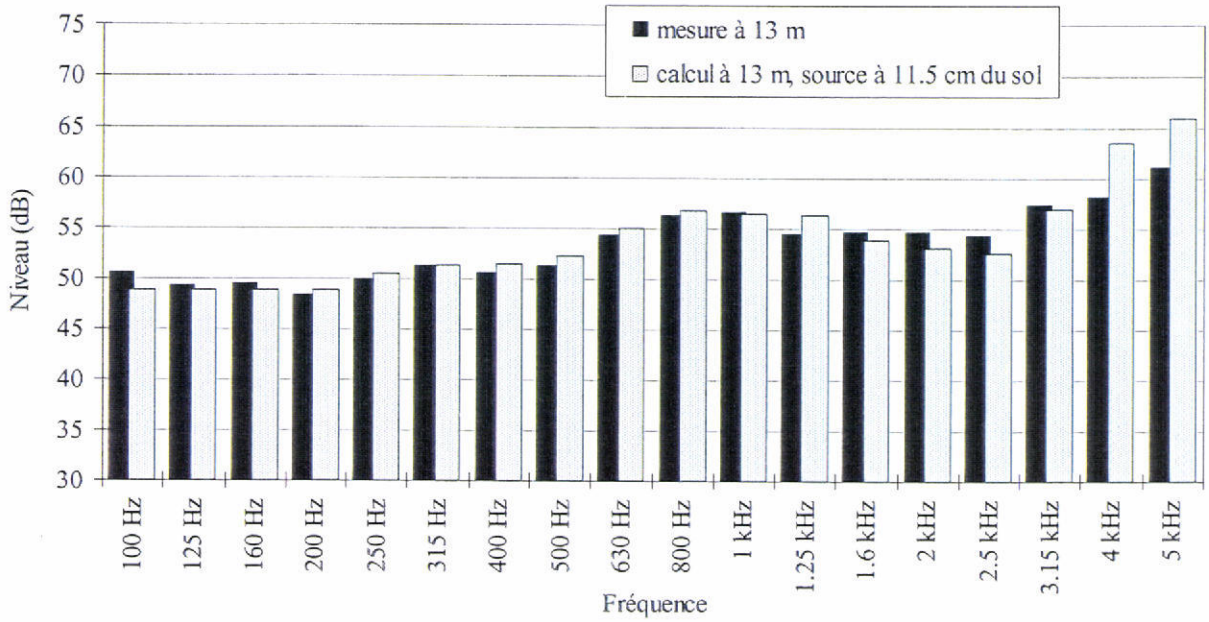

Figure 2.27 : Comparaison mesure-calcul pour une source située à 11.5 cm du sol et des microphones positionnés respectivement à (7.5 m, 1.2 m) et (13 m, 1.2 m). Le centre du ventilateur est situé à 18 cm du sol.

L'écart entre la mesure et le calcul est minimal pour une hauteur source optimale de 11.5 cm. Même si quelques imprécisions apparaissent aux fréquences élevées, l'accord reste acceptable. Les résultats de ces premiers tests sont résumés dans le tableau ci-dessous. Les cas (a) et (b) sont relatifs aux positions de la source représentées figure 2.26.

Tableau 2.2 : Hauteurs de sources équivalentes calculées pour différentes configurations.

	Cas (a)	Cas (b)
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

Compte tenu du dévers de la chaussée d'une part et de l'incertitude liée à la position de la source sonore équivalente d'autre part, on peut considérer que l'estimation de cette hauteur est satisfaisante. En effet, la source de bruit rose ne peut pas être, d'un point de vue acoustique, assimilée exactement à une source ponctuelle idéale située au centre du ventilateur, mais plutôt

à un ensemble de sources positionnées à différentes hauteurs. Il en résulte une modification de la position et de l'amplitude des interférences, par rapport au cas idéal de la source ponctuelle, qui a tendance à abaisser la hauteur de source calculée.
Les hauteurs trouvées pour les trois configurations sont relativement proches. Cette méthode de mesure semble a priori fiable et indépendante de la position des microphones. Nous avons donc choisi de l'appliquer aux véhicules.

2.5.2.2. Les véhicules légers

Les essais ont été effectués sur la piste de référence du LCPC. Le dispositif est constitué de deux microphones Bruel&Kjaer demi-pouce (figure 2.28) reliés à un ensemble DAT et préamplificateur (cf. annexe 4). Le véhicule, une Renault Clio 1.4l à motorisation essence, effectue plusieurs passages à vitesse stabilisée : 80 et 100 km/h. La vitesse est déterminée au droit des microphones à l'aide d'une borne cinémométrique placée près de la voie de circulation. La position du microphone 2 a été imposée par la largeur maximale de la piste. Les spectres mesurés sont obtenus au moyen d'un analyseur Hewlett Packard 35665A : ils sont issus du niveau global maximum mesuré lors du passage des véhicules, c'est-à-dire au droit des microphones. Le temps d'intégration est de 62.5 ms.

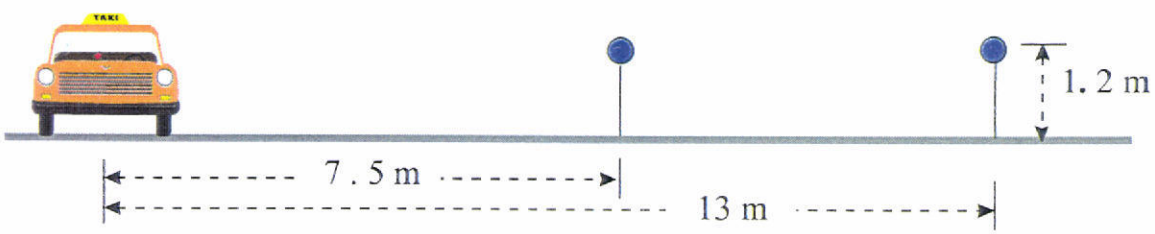

Figure 2.28 : Schéma du dispositif.

Sur la figure 2.29 est représentée une comparaison mesure-calcul, à 80 km/h, des spectres obtenus à 13 m, pour une hauteur de source de 20 cm et pour la hauteur de source optimale.

Cette comparaison confirme l'hypothèse suivant laquelle les sources sonores équivalentes sont situées très près du sol. Ceci semble logique si l'on considère des vitesses où le bruit de contact pneumatique-chaussée est prédominant. Les hauteurs calculées correspondent à peu près à la moitié du flanc du pneumatique. 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. Les écarts visibles apparaissent seulement en haute fréquence. En basse fréquence la hauteur de la source sonore équivalente importe peu. Il est donc inutile pour nos applications de considérer des hauteurs de sources variables en fonction de la fréquence, comme nous l'avons vu précédemment avec Glegg et Yoon [Glegg & Yoon 1990-2] (cf. § 2.4.2.3) et Coulson [Coulson 1996] (cf. § 2.4.3.5).

Les hauteurs trouvées sont nettement inférieures à celles déterminées par Glegg et Yoon, Coulson ou même dans le Guide du bruit [Gaulin & al. 1999]. Seule la méthode utilisée par le FHWA fournit des hauteurs proches du sol [Glegg & Yoon 1990-2].

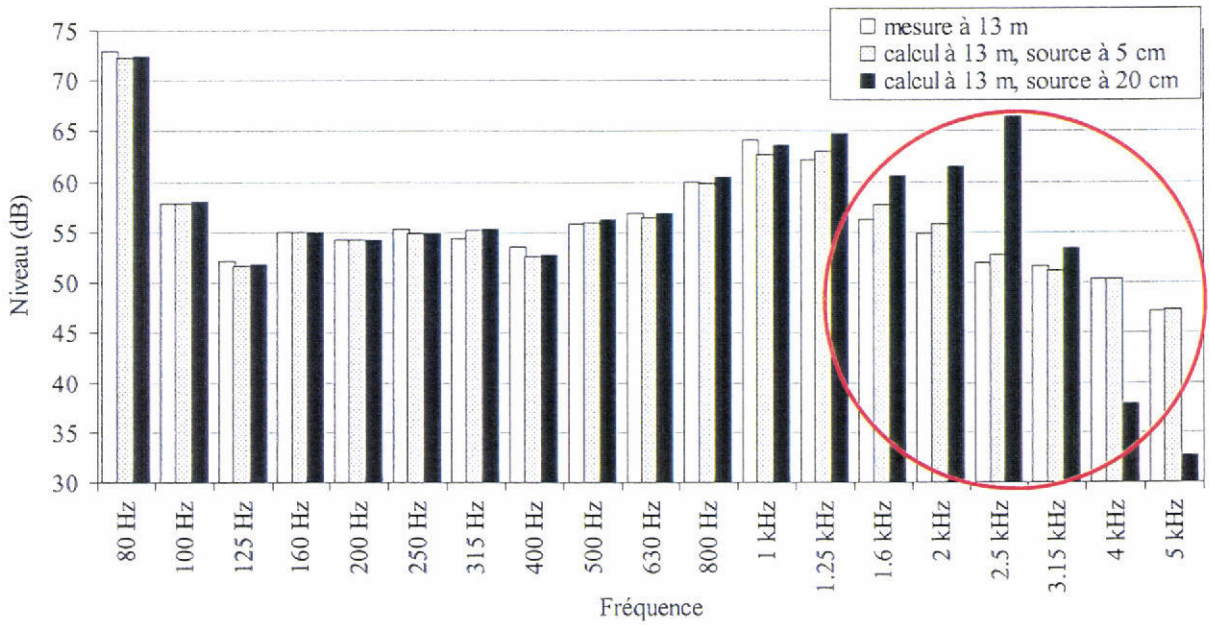

Figure 2.29 : Comparaison entre le calcul et la mesure à 80 km/h pour une source située à 5 cm puis 20 cm du sol.

D'autres mesures ont été effectuées sur site routier réel. Elles sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.3 : Comparaison des hauteurs de sources et des niveaux de pression acoustique obtenus pour la Renault Clio sur deux sites différents.

	80 km/h			100 km/h		
	Hauteur de la source équivalente (cm)	Niveau calculé au second micro (dB)	Niveau mesuré au second micro (dB)	Hauteur de la source équivalente (cm)	Niveau calculé au second micro (dB)	Niveau mesuré au second micro (dB)
Piste (BBTM)	5	74.2	74.6	3	76.9	76.8
Geneston (BBSG)	4	73.8	75.3	1	76.8	76.8

Le tableau 2.3 montre que les hauteurs de sources obtenues sont pratiquement les mêmes d'un site de mesure à l'autre. Ceci est a priori logique car il s'agit de deux enrobés acoustiquement équivalents (réfléchissants) (cf. annexe 3). Les hauteurs sont un peu plus faibles à 100 km/h. Ceci s'explique par l'augmentation de la vitesse qui, d'une part, tend à masquer un peu plus les sources moteur-échappement, déjà négligeables à 80 km/h, au profit du contact pneumatique-chaussée et d'autre part, influe sur la dimension de la surface de contact (dans le sens de la diminution).
Les niveaux globaux calculés sont très proches des niveaux mesurés et quasi-identiques d'un site à l'autre. Ce sont en effet des revêtements acoustiquement proches (cf. annexe 3).

2.5.2.3. Les trains routiers

Pour des problèmes de logistique, il est plus difficile d'appliquer cette méthode aux véhicules lourds. D'une part, la piste de référence du LCPC n'est pas prévue pour des véhicules d'un tel poids et d'un tel gabarit, et d'autre part, nous n'en n'avions pas directement à notre disposition. Des mesures sur des trains routiers ayant des vitesses stabilisées comprises entre 60 et 90 km/h ont malgré tout pu être effectuées, sur site routier réel, sur une chaussée revêtue d'un enrobé fermé de type BBSG (cf. annexe 3). Même si ces mesures n'ont pu être aussi complètes que pour les véhicules légers, des hauteurs de sources identiques ont toutefois été relevées (figure 2.30).

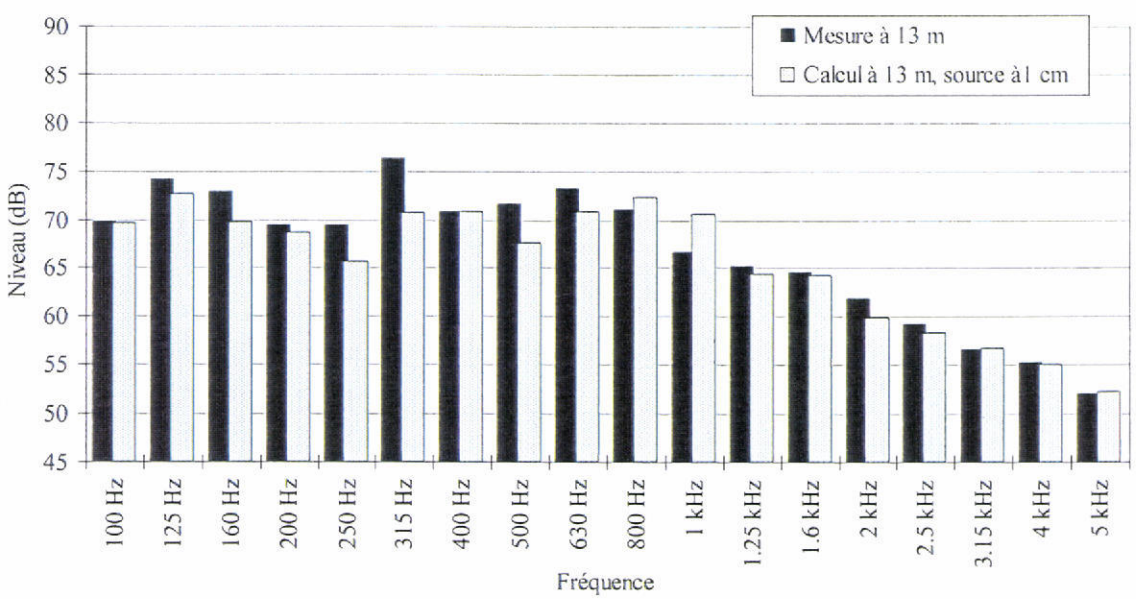

Figure 2.30 : Comparaison entre le calcul et la mesure à 13 m, pour un train routier à une vitesse stabilisée de 75 km/h et pour une source située à 1 cm du sol.

Des études plus approfondies seraient nécessaires pour confirmer et commenter les résultats de la figure ci-dessus. Une des hypothèses que l'on peut avancer est le cumul d'une multitude de sources incohérentes positionnées à différentes hauteurs : bruit de contact pneumatique chaussée, diverses pièces liées au moteur, échappement, etc. A chaque microphone, il en résulte un effet de masque des figures d'interférences (normalement dues aux réflexions sur le sol), qui conduit à une source sonore équivalente acoustiquement proche du sol (cf. § 4.1.1).

2.5.3. Puissance acoustique

La détermination de la hauteur de la source sonore équivalente permet d'en déduire les spectres de puisance acoustique (cf. eq. 2.78). Ces spectres seront différents en fonction de la vitesse, du type de véhicule ou du mode de conduite. Peut-on toutefois dégager certaines constantes afin de simplifier ensuite les modèles ? Le prochain paragraphe fournit quelques éléments de réponse. Ceux-ci seront complétés tout au long de ce chapitre et du chapitre suivant.

2.5.3.1. Evolution des spectres en fonction de la vitesse des véhicules [Ogle & al. 1996]

Cette étude avait pour objectif de déterminer l'évolution du spectre de différents véhicules en fonction de la vitesse. Elle a été réalisée en 1991 sur quatre sites en Floride. Les spectres tiers d'octave enregistrés sont issus du maximum du $LAeq_{125ms}$ mesuré au passage. Ce sont des niveaux de pression. Cependant, une simple translation de niveau permet, comme nous le verrons plus loin, d'obtenir le niveau de puissance acoustique. La forme des spectres reste donc la même.
Les résultats ont conduit à la conclusion suivante : le domaine fréquentiel prépondérant pour le bruit des voitures particulières (en incluant la pondération A) reste relativement proche de 1000 Hz sur la gamme de vitesses mesurées (entre 80 et 110 km/h). Pour les poids lourds et les trains routiers, en dépit d'une plus grande diversité des résultats, la fréquence dominante reste également proche de 1000 Hz. Cette fréquence peut être considérée comme une constante pour toutes les classes de véhicules.
Nous remarquons également une augmentation plus importante, avec la vitesse, des niveaux sonores dans les hautes fréquences. Globalement, l'énergie sonore se déplace vers le haut du spectre lorsque la vitesse augmente, comme le confirme la figure 2.31.

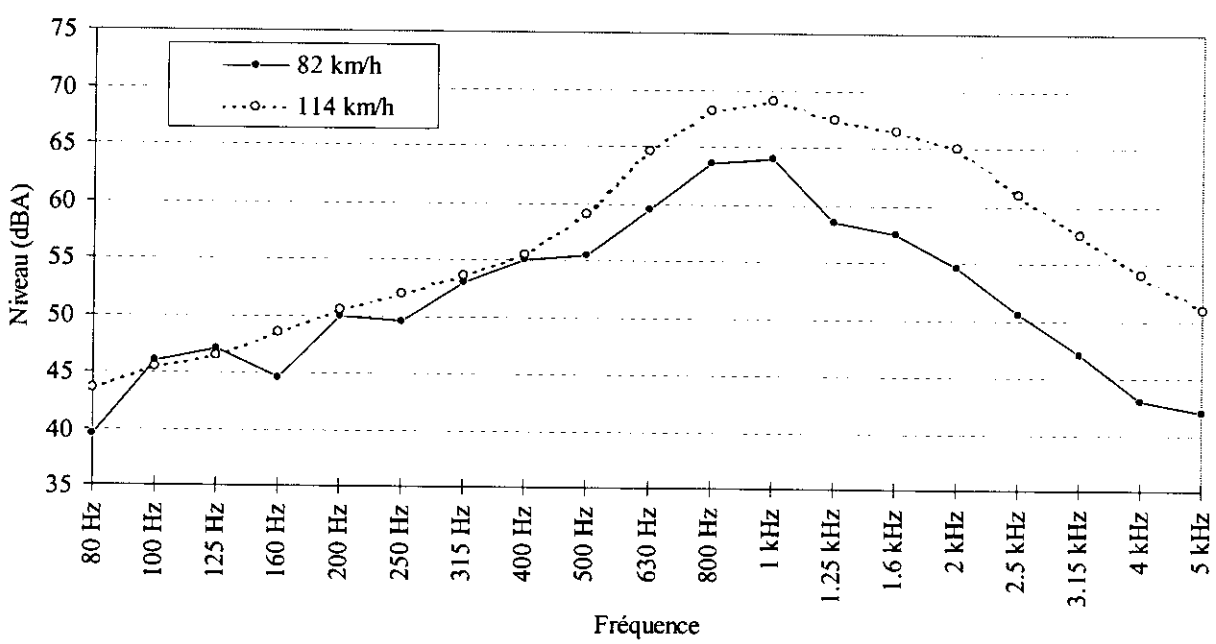

Figure 2.31 : Comparaison, pour deux vitesses, du spectre moyen des voitures particulières [Ogle & al. 1996].

2.5.3.2. Détermination de la puissance acoustique

Connaissant la hauteur de la source sonore équivalente déterminée précédemment, il est possible de remonter au spectre de puissance. En reprenant les notations du paragraphe 2.5.2.1, nous obtenons :

$$\Delta L_1 = L_{mesuré,1} - L_{libre,1} \qquad 2.75$$

Et :

$$L_{libre,1} = Lw - 10\log_{10}4\pi r_1^2 - \alpha_{air,1} \qquad 2.76$$

D'où :

$$Lw = L_{libre,1} + 10\log_{10}4\pi r_1^2 + \alpha_{air,1} \qquad 2.77$$

$$\boxed{Lw = L_{mesuré,1} - \Delta L_1 + 10\log_{10}4\pi r_1^2 + \alpha_{air}} \qquad 2.78$$

La figure 2.32 décrit les niveaux de puissance acoustique mesurés à des vitesses de 80 et 100 km/h, pour les hauteurs de sources optimales et pour le véhicule léger utilisé précédemment :

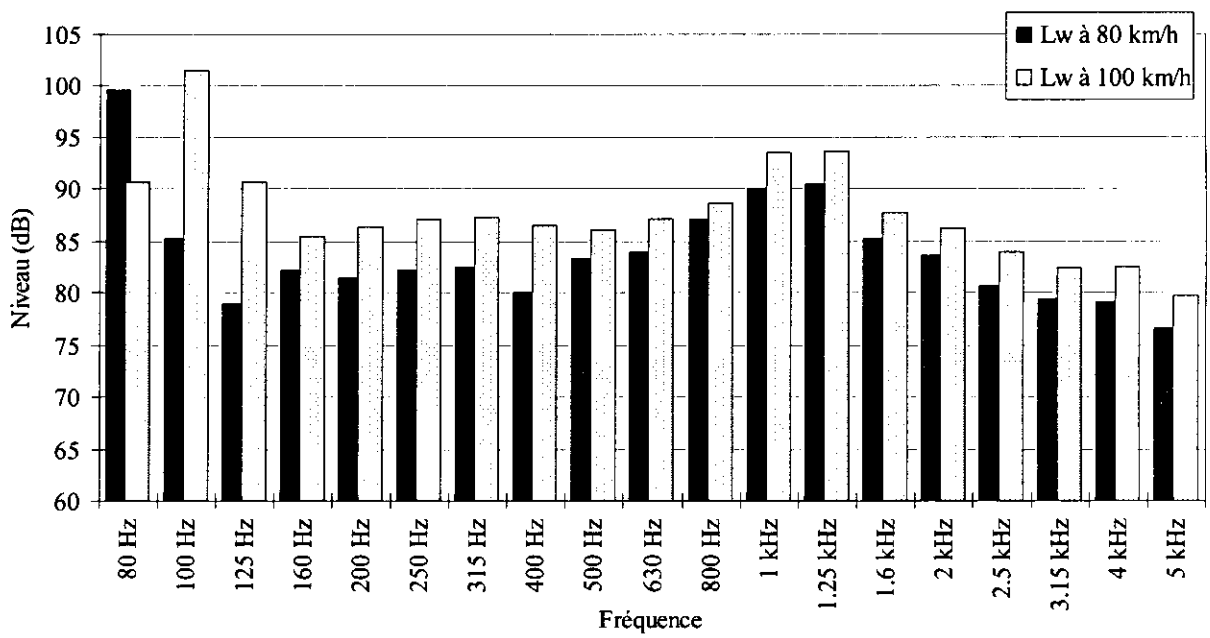

Figure 2.32 : Spectres de puissance obtenus à partir des mesures de référence à 7.5 m, sur la piste de référence du LCPC.

L'écart observé dans les deux premiers tiers d'octave provient de la différence de vitesse de rotation du moteur entre 80 et à 100 km/h. Au delà de 125 Hz, les courbes sont semblables hormis un écart constant de 3-4 dB. Si l'on reproduit le même graphe avec la pondération A,

on constate une diminution de l'importance des pics à 80 et 100 Hz vis à vis du reste du spectre (figure 2.33).

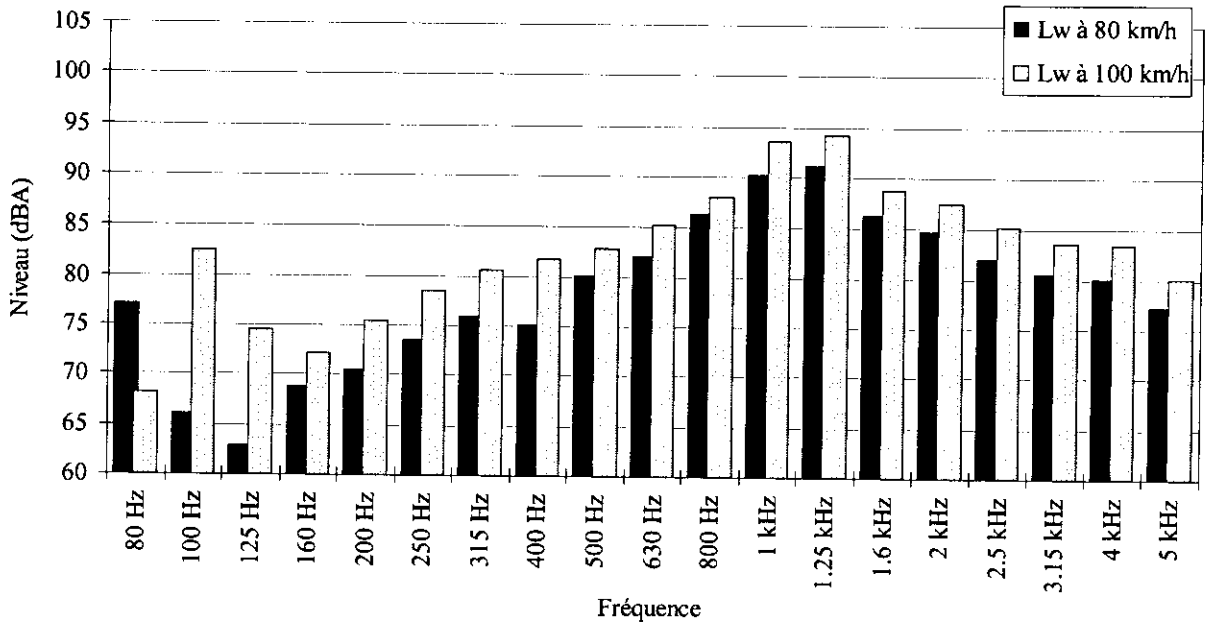

Figure 2.33 : Spectres de puissance en pondération A (dBA).

Les premiers tiers d'octave ont une contribution négligeable sur le niveau global pondéré A. Les spectres à 80 et 100 km/h sont, de ce fait, pratiquement identiques à un écart de 3-4 dB près, écart sensiblement constant sur toute la gamme de fréquence. Dans un article récent [Bérengier & Hamet 1999], la correction de vitesse pour les véhicules légers est :

$$A \log_{10} \frac{v}{v_{ref}} \qquad \text{avec } A \cong 30\text{-}35 \qquad 2.79$$

Ce qui donne dans ce cas précis un écart d'environ 3 à 3.5 dB.

Les niveaux maxima sont dans les deux cas situés à 1 et 1.25 kHz. La position de ces maxima semble donc indépendante de la vitesse, particularité déjà mise en évidence par quelques auteurs comme Barti [Barti 1997]. Le phénomène remarqué par Ogle [Ogle & al 1996] (à savoir une évolution du spectre vers les hautes fréquences avec la vitesse) est ici imperceptible.

Les puissances calculées à partir des mesures sur les différents sites sont regroupées dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Puissances calculées pour la Renault Clio sur les deux sites précédents.

	80 km/h		100 km/h	
	Hauteur de la source équivalente (cm)	Lw calculé à partir de la mesure à 7.5 m (dB)	Hauteur de la source équivalente (cm)	Lw calculé à partir de la mesure à 7.5 m (dB)
Piste (BBTM)	5	101.6	3	104.3
Geneston (BBSG)	4	101.2	1	104.2

Les niveaux de puissance acoustique sont très proches les uns des autres. Nous avons déjà constaté ce phénomène avec les niveaux de pression. Pour des sources proches du sol (environ 5 cm) et pour les distances considérées, les interférences sont peu marquées dans la gamme 80 Hz – 5 kHz et concentrées sur les fréquences les plus élevées. Les spectres d'atténuation sont donc quasiment plats. De plus, les niveaux sonores décroissent assez sensiblement au-dessus de 1.25 kHz. L'influence des interférences est, par conséquent, encore réduite si l'on considère les niveaux globaux.
La puissance acoustique présente donc un spectre quasi-identique à celui des niveaux de pression à 7.5 m mais décalé de +22.5 dB environ (amplification de +6 dB due à la présence du sol réfléchissant, atténuation géométrique $-10\log_{10}4\pi(7.5)^2 = -28.5$ dB et absorption atmosphérique négligeable).

2.5.4. Evolution temporelle

Afin de confirmer le bon ajustement des hauteurs de sources constaté sur les spectres, une approche identique a été utilisée sur les signatures temporelles, c'est-à-dire sur le suivi des niveaux de pression acoustique pendant toute la durée du passage du véhicule. Nous allons donc comparer l'évolution temporelle calculée lors du passage du véhicule avec celle effectivement mesurée.

En déterminant, comme précédemment, les atténuations entre les deux microphones, il est possible de reconstituer, à partir du niveau mesuré au premier récepteur (7.5 m de l'axe de la chaussée) et pour un tiers d'octave particulier, l'évolution temporelle au second récepteur (13 m de l'axe de la chaussée). A chaque instant, on tient compte dans le calcul de l'évolution de la position du véhicule par rapport aux microphones. Nous comparons, sur le graphique suivant, la signature calculée au second récepteur, celle effectivement mesurée et celle obtenue à partir d'une hauteur de source de 20 cm, pour les tiers d'octave 1.25 (maximum d'énergie) et 2.5 kHz.

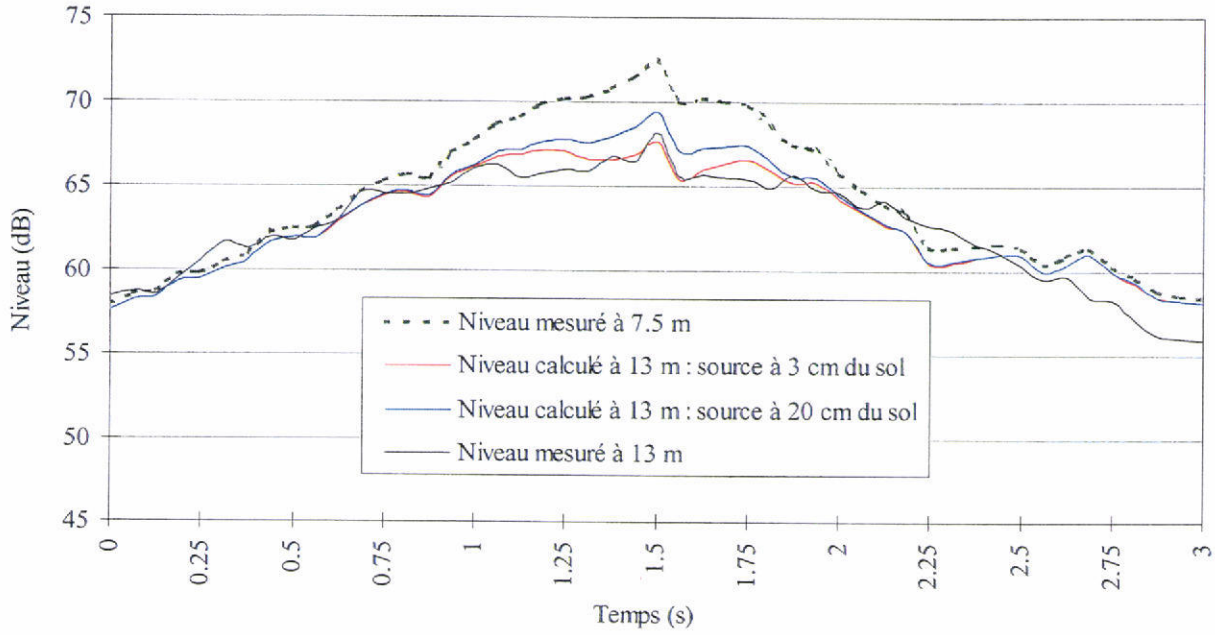

Figure 2.34 : Comparaison pour 2 hauteurs de sources de l'évolution temporelle du passage d'un véhicule à 100 km/h et pour le tiers d'octave 1.25 kHz.

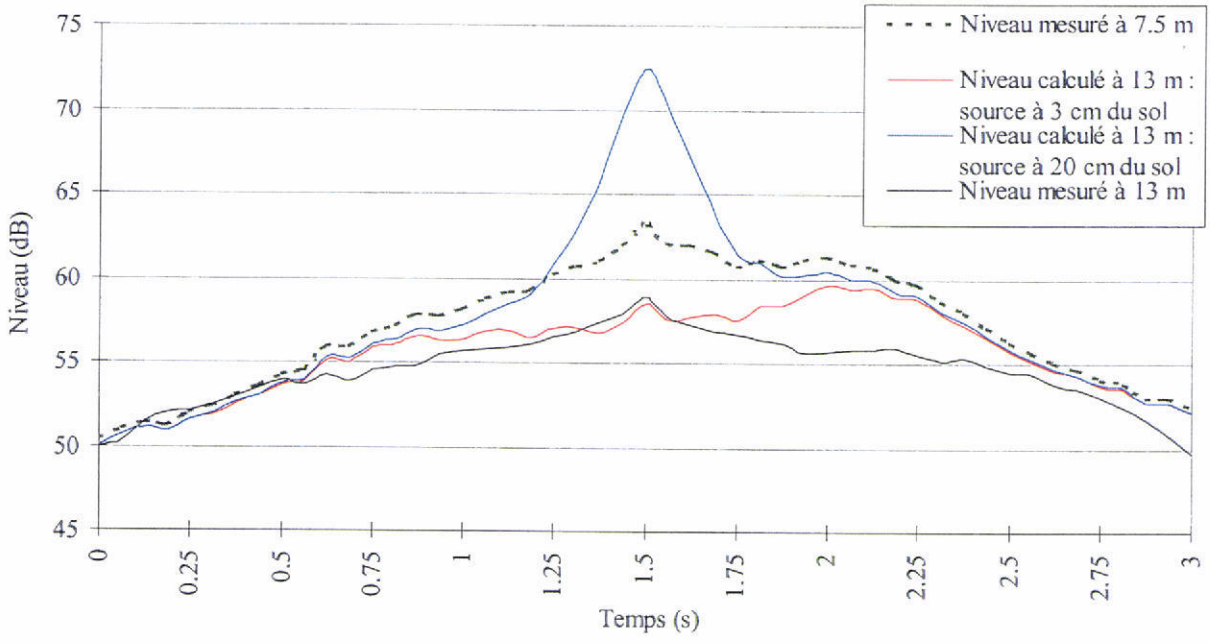

Figure 2.35 : Comparaison pour 2 hauteurs de sources de l'évolution temporelle du passage d'un véhicule à 100 km/h et pour le tiers d'octave 2.5 kHz.

Les deux dernières figures confirment de nouveau l'hypothèse d'une hauteur de source faible : la courbe obtenue avec une hauteur de 3 cm est très proche de celle mesurée. Elle s'écarte toutefois de la courbe expérimentale lorsque le véhicule s'éloigne des microphones (tiers d'octave 2.5 kHz). Les écarts observés sont probablement dus à des effets de directivité. Nous

avons en effet considéré le véhicule comme une source ponctuelle omnidirectionnelle. Ces phénomènes se produisent cependant aux fréquences élevées et pour des niveaux assez faibles en regard du niveau global (phénomène impercetible à 1.25 kHz).
Nous avons fait le choix de ne pas présenter de résultat pour un tiers d'octave dans le domaine des basses fréquences car, dans cette région, il n'y a aucun écart entre des hauteurs de sources de 3 et 20 cm (cf. figure 2.29).

2.5.5. Prévision des niveaux sonores à grande distance

L'ensemble des résultats précédents 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 LAeq) à grande distance vont aussi dans le sens d'un abaissement de la hauteur de source. En effet, l'écart mesure-calcul, de 3-4 dB à 100 m obtenu lors d'une simulation avec une hauteur source de 20 cm, est réduit à environ 1 dB lorsque la hauteur de source est inférieure à 5 cm [Bérengier & al. 1998]. Notons que la précision de la mesure est de l'ordre du décibel. Deux exemples figurent dans le tableau suivant :

Tableau 2.5 : Comparaison LAeq calculé (pour différentes hauteurs de sources) – LAeq mesuré.

	Site n° 1			Site n° 2	
Distance à l'axe de la voie	30 m	60 m	120 m	30 m	100 m
LAeq(1h) mesuré	65.8	63.4	57.5	64.0	56.6
Ecart LAeq(1h) calculé – LAeq(1h) mesuré (hauteur source de 20 cm)	+5.9	+4.9	+3.1	-1	+4.2
Ecart LAeq(1h) calculé – LAeq(1h) mesuré (hauteur source de 3 cm)	-0.2	-1	-1.8	-0.7	-0.4

2.5.6. Véhicules en accélération

Dans l'ensemble des cas considérés jusqu'à présent dans notre étude, les véhicules circulaient à vitesse stabilisée. En milieu urbain, les accélérations et les décélérations sont nombreuses et font partie du mode de fonctionnement normal des véhicules. Afin d'en visualiser les effets,

nous avons, en première approche, comparé le spectre obtenu pour un véhicule léger en forte accélération, à celui obtenu avec le même véhicule circulant à vitesse 80 et 100 km/h). Ces mesures ont été effectuées sur le site de Geneston (44). Comme pour l'ensemble de l'étude, il s'agit d'un moyennage sur plusieurs passages.

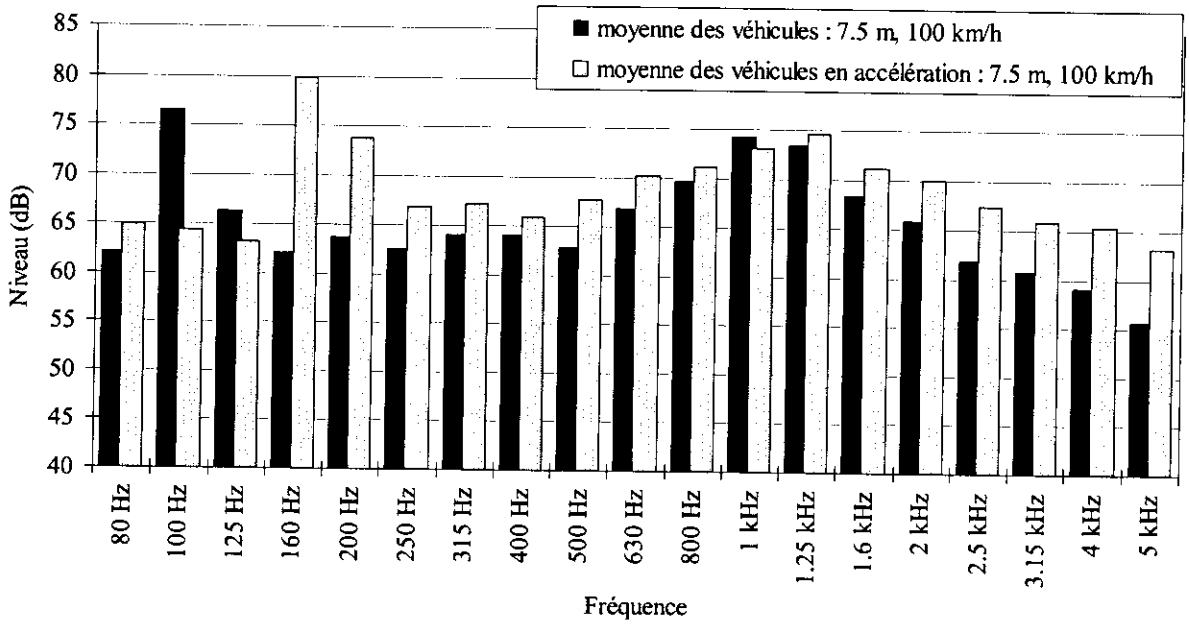

Figure 2.36 : Comparaison véhicule en accélération - véhicule à vitesse stabilisée (100 km/h – 4ème rapport de boîte).

On observe sur la figure 2.36 le déplacement de la position du pic, situé à 100 Hz à vitesse stabilisée, vers les tiers d'octave 160 et 200 Hz (nous en détaillerons les raisons au chapitre suivant). Le niveau de pression acoustique a augmenté sur tout le spectre mis à part autour de 1 kHz, ce qui peut s'expliquer par la prépondérance encore plus grande du bruit de contact pneumatique-chaussée dans cette gamme. Il est vrai aussi que l'accélération d'un véhicule est beaucoup plus faible à 100 km/h (4ème rapport de boîte) que pour des vitesses moindres. Ceci explique aussi l'influence peu importante de l'accélération à cette vitesse. Nous verrons dans le prochain chapitre qu'il en est tout autrement pour des vitesses faibles.

La comparaison mesure-calcul pour ce véhicule en accélération (Renault Clio 1.4l) et pour la hauteur de source optimale est représentée figure 2.37.

On constate que la hauteur de source est identique à celle trouvée pour un véhicule circulant à vitesse stabilisée (cf. tableau 2.4). L'accélération ne semble donc avoir aucun effet sur la hauteur de la source, tout au moins aux vitesses considérées. Il est nécessaire de s'en assurer pour des allures plus représentatives du milieu urbain. Ceci est un des objectifs du chapitre suivant.

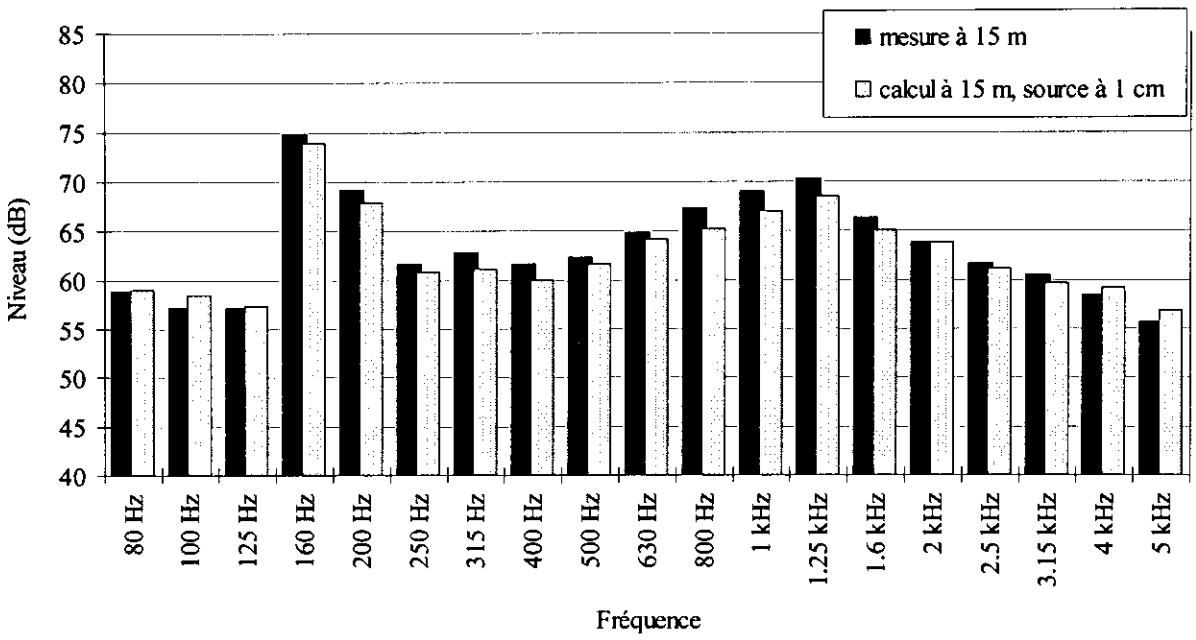

Figure 38 : Comparaison mesure - calcul d'un véhicule léger en accélération pour une hauteur de source de 1 cm.

Chapitre 3 : Caractérisation acoustique des véhicules légers en conditions de circulation urbaine

Dans le but de valider la méthode de détermination de la hauteur de source équivalente, nous avons fait le choix au cours du chapitre précédent de favoriser la source de bruit contact pneumatique–chaussée et en conséquence de travailler à des vitesses supérieures ou égales à 80 km/h. Afin de valider la méthode pour des conditions urbaines, nous avons sélectionné des allures plus représentatives comprises entre 30 et 70 km/h.
Dans un premier temps, nous recenserons les études déjà effectuées à de telles vitesses. En effet, de nombreux auteurs se sont intéressés aux véhicules en situation urbaine et à la variation du niveau sonore au voisinage des intersections [Oshino & Tachibana 1993], [Favre 1978], [Lewis & James 1978], [Kokowski & Makarewicz 1997], [Hunt & Samuels 1992], [Radosz & al. 1992] [Nijs 1989], [Jones & al. 1981], [Gilbert 1977]. Cependant, toutes ces études considèrent des niveaux sonores globaux et beaucoup ne tiennent compte que d'indices particuliers (Leq, L_{50}, L_{10}, etc.) inadaptés à notre étude. Les approches les plus intéressantes semblent être celles d'Oshino et Tachibana [Oshino & Tachibana 1993] (cf. § 3.1.1), de Favre [Favre 1978] (cf. § 3.1.2), Lewis et James [Lewis & James 1978] (cf. § 3.4.1) ainsi que Kokowski et Makarewicz [Kokowski & Makarewicz 1997] (cf. § 3.4.2).
Dans un second temps, nous exposerons les travaux réalisés dans le cadre de la thèse, à savoir la mesure de la hauteur de la source sonore équivalente à faible vitesse assortie d'un modèle de prévision de la puissance acoustique.

3.1. Etat de l'art

3.1.1. Modèle de simulation du bruit rayonné par les véhicules [Oshino & 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. Ces mesures ont été assorties de l'identification des paramètres dynamiques 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 alors être déterminée par régression. On obtient :

$$Lw_e = A_0 + A_1 S + A_2 L \qquad 3.1$$

$$Lw_t = B_0 + B_1 \log_{10}(v) \qquad 3.2$$

où Lw_e et Lw_t sont respectivement la puissance acoustique pondérée A émise par l'ensemble moteur-échappement et celle émise par le contact pneumatique-chaussée. S est la vitesse de rotation du moteur, L la charge moteur sous forme de pourcentage et v, la vitesse du véhicule. 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 de roulement et de résistance de l'air et du poids équivalent des parties du véhicule en rotation.

Les coefficients de régression sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.1 : Coefficients de régression.

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

Cette méthode est intéressante dans la mesure où elle s'attache à déterminer séparément les niveaux de puissance acoustique issus, d'une part, du contact pneumatique-chaussée et d'autre part, de l'ensemble moteur-échappement. La méthode que nous développons (cf. § 3.3.1) est basée sur celle présentée ici, sans pour autant la reprendre intégralement ; cela pour deux raisons principales :

- premièrement, la mesure séparée du bruit de contact pneumatique-chaussée et du bruit moteur-échappement est plus délicate qu'une mesure classique,
- deuxièmement, la méthode d'Oshino et Tachibana ne tient compte que des niveaux globaux.

La méthode développée au paragraphe 3.3.1 s'appuie sur des niveaux de puissance acoustique par bandes de tiers d'octave, indispensables pour prendre en compte l'aspect propagatif, tout en mesurant simultanément l'ensemble des sources sonores précédemment citées.

3.1.2. Bruit émis par un véhicule en accélération [Favre 1978]

La méthode de prévision des émissions sonores développée par Favre [Favre 1978] est fondée sur des lois similaires à celles d'Oshino et Tachibana, à quelques nuances près, dont la principale est le remplacement du paramètre charge moteur par le paramètre accélération. Chaque véhicule est considéré comme une source ponctuelle omnidirectionnelle. Deux classes de véhicules sont considérées : les véhicules légers et les poids lourds.

Le niveau de bruit émis par un véhicule dépend de sa classification, de sa vitesse et de l'accélération produite par son moteur.

3.1.2.1. Véhicules légers

Pour les véhicules légers, le niveau de bruit est fonction du rapport de boîte de vitesse engagé et, pour ce rapport, fonction de la vitesse du véhicule et de son accélération. La figure 3.1 donne les relations entre la vitesse, l'accélération et le rapport de boîte de vitesse considérés dans cette étude. Ces relations semblent être des approximations acceptables de la réalité.

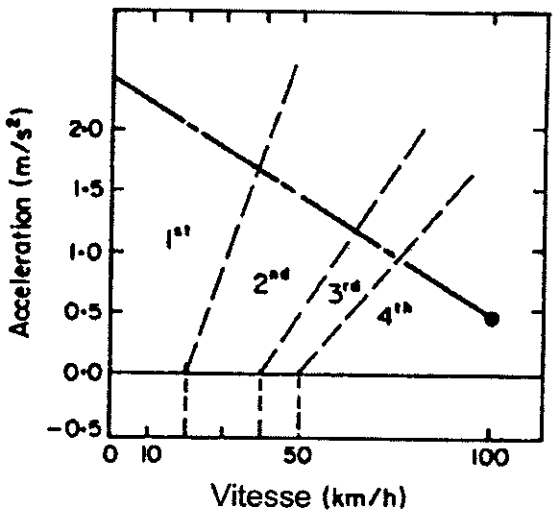

Figure 3.1 : Relations entre rapport de boîte, vitesse et accélération pour les véhicules légers [Favre 1978].

Le niveau de puissance acoustique pondéré A, pour le rapport de boîte de vitesse i, est donné par la relation :

$$Lw_i = a_i \log_{10} v + b_i A \log_{10} v + c_i A + d_i \qquad 3.3$$

où : v est la vitesse instantanée en km/h, A l'accélération instantanée en $m.s^{-2}$, a_i, b_i, c_i et d_i des constantes pour le rapport de boîte i.

Les valeurs de ces constantes sont récapitulées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Valeurs des constantes donnant la puissance acoustique d'un véhicule léger en fonction des paramètres dynamiques V et A.

Rapport de boîte	a	b	c	d
1	53	-2.5	18	25
2	53	-10	6.5	14
3	47	-7.0	14	19
4	40	-3.0	7.0	27

3.1.2.2. Poids lourds

La détermination de la puissance acoustique instantanée des véhicules lourds est plus difficile. En effet, il existe d'importantes variations entre les différents poids lourds comme le nombre d'essieux, la puissance du moteur, etc. C'est pourquoi, les seuls véhicules lourds considérés ici sont les autobus. On détermine, de la même manière que pour les véhicules légers, les relations entre rapports de boîte de vitesse, vitesse et charge moteur (figure 3.2).

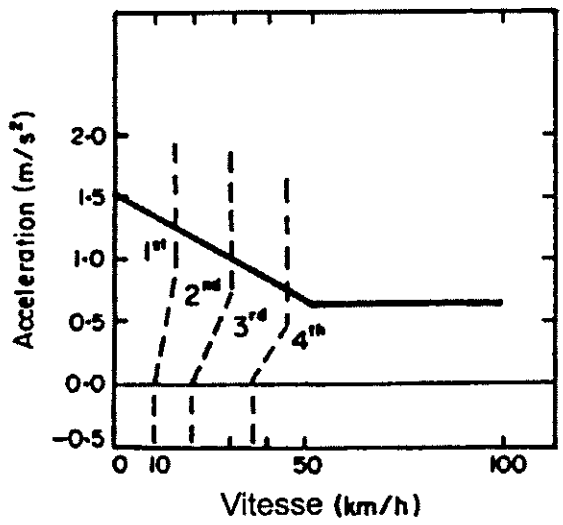

Figure 3.2 : Relations entre rapport de boîte, vitesse et accélération pour les autobus [Favre 1978].

Pour un rapport de boîte donné, la puissance acoustique instantanée Lw_i est supposée indépendante de la charge du moteur (diesel) et fonction seulement de la vitesse de rotation S de ce dernier. On obtient :

$$Lw_i = a_i \log_{10} v + b_i \qquad 3.4$$

où : v est la vitesse instantanée du véhicule, a_i et b_i des constantes (tableau 3.3) pour le rapport i.

Tableau 3.3 : Valeurs des constantes donnant la puissance acoustique d'un véhicule lourd (autobus) en fonction du paramètre dynamique V.

Rapport de boîte	a	b
1	30	68
2	30	64
3	30	60
4	30	56

La puissance acoustique ainsi calculée semble, d'après les mesures en circulation urbaine, être correcte à ± 3 dBA.
Cependant, il n'a pas été établi avec certitude que ces résultats soient applicables à d'autres véhicules lourds que les autobus.

A la différence de l'étude d'Oshino et Tachibana (cf. § 3.1.1), cette méthode s'appuie sur une mesure simultanée des sources sonores principales que sont le contact pneumatique-chaussée et l'ensemble moteur-échappement. Le principal inconvénient de cette méthode est encore l'absence de prise en compte de l'effet spectral. Cet aspect est intégré à la méthode que nous développons (cf. § 3.3.1).

Il est difficile d'établir une comparaison entre les méthodes développées par Favre d'une part, et Oshino et Tachibana d'autre part. Elles se basent en effet sur des paramètres différents (charge moteur dans un cas et accélération dans l'autre) et sur des mesures réalisées à des époques différentes (quinze années les séparent) et dans des pays différents, sur des revêtements routiers que l'on ne connaît pas. Au paragraphe 3.3.3, nous essaierons néanmoins de les comparer à la méthode que nous avons développée (cf. § 3.3.1).

3.2. Méthode de détermination de la hauteur de source sonore équivalente et de la puissance acoustique par la technique propagative et pour des conditions de circulation urbaine

Au chapitre précédent les vitesses considérées lors de nos essais étaient relativement élevées (80 et 100 km/h), ceci afin de privilégier le bruit de contact pneumatique-chaussée et occulter les autres sources de bruit. 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. Nous nous inspirons de quelques éléments que nous venons de présenter. L'inconvénient majeur des travaux précédents (cf. § 3.1.1 et 3.1.2) est la prise en compte de niveaux globaux indaptés si l'on souhaite intégrer l'aspect propagatif, c'est-à-dire le calcul des niveaux sonores à différentes distances.

Dans le cadre de l'étude relative aux différents modes de fonctionnement urbains, le dispositif de mesure est identique à celui décrit au chapitre précédent. Dans un premier temps, par souci de répétabilité, le véhicule et le revêtement (BBTM de la piste de référence du LCPC) sont similaires à ceux des essais antérieurs. Le mode opératoire et le traitement des résultats restent quant à eux identiques tout au long des diverses campagnes de mesures :

- tous les résultats sont issus d'un moyennage sur plusieurs passages,
- les spectres correspondent au niveau global maximum mesuré lors du passage des véhicules, c'est-à-dire au droit des microphones avec un temps d'intégration de 62.5 ms.

Une question se pose : une vitesse plus faible a-t-elle une influence sur la hauteur de source ? Cette dernière est indispensable pour déterminer la puissance acoustique. Nous étudions dans

ce chapitre et le suivant plusieurs types de véhicule : quelques voitures particulières (au nombre de 5), puis deux motocyclettes et enfin un cyclomoteur.

Nous nous intéressons dans un premier temps à un seul véhicule : la Renault Clio 1.4l utilisée au cours des essais relatés au chapitre précédent.

Plusieurs modes de conduite représentatifs du milieu urbain ont été choisis, avec des vitesses comprises entre 30 et 80 km/h pour des régimes moteur allant de 2300 à 4600 tr/min. Ces conditions sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.4 : Différents modes de fonctionnement étudiés pendant l'essai (Renault Clio).

	Vitesse stabilisée 1 (rapport de boîte, régime moteur)	Vitesse stabilisée 2 (rapport de boîte, régime moteur)	Accélération (rapport de boîte, régime moteur)	Décélération (rapport de boîte, régime moteur)
30 km/h	2nde, 2300 tr/min	1ère, 4000 tr/min	1ère, 4000 tr/min	2nde, 2300 tr/min
40 km/h	2nde, 3100 tr/min	—	2nde, 3100 tr/min	2nde, 3100 tr/min
50 km/h	3ème, 2550 tr/min	2nde, 3700 tr/min	2nde, 3700 tr/min	3ème, 2550 tr/min
60 km/h	3ème, 3100 tr/min	—	2nde, 4600 tr/min	3ème, 3100 tr/min
70 km/h	4ème, 2650 tr/min	3ème, 3600 tr/min	3ème, 3600 tr/min	4ème, 2650 tr/min
80 km/h	4ème, 3100 tr/min	—	—	—

3.2.1. Hauteur de la source sonore équivalente

A l'aide des expressions déterminées au chapitre précédent (§ 2.5.2.1), nous avons pu, de façon identique, déterminer les hauteurs de sources sonores équivalentes pour des allures typiquement urbaines. Une illustration des résultats obtenus, au travers de la comparaison mesure-calcul des spectres de pression acoustique, est fournie sur les figures suivantes.

Cette comparaison mesure-calcul pour chacune des configurations explicitées dans le tableau 3.4, donne des hauteurs de sources comprises entre 1 et 3 cm pour l'ensemble des cas étudiés, aussi bien à vitesse stabilisée qu'en accélération ou en décélération. La hauteur de source reste donc inchangée quelle que soit la vitesse et le régime moteur du véhicule. Ceci confirme les essais précédents effectués à 80 et 100 km/h. Compte tenu des effets 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. Ceci confirme une fois encore les travaux japonais [Tachibana & Oshino 1992], [Oshino & al. 1999] et ceux de l'INRETS que nous détaillons au paragraphe suivant.

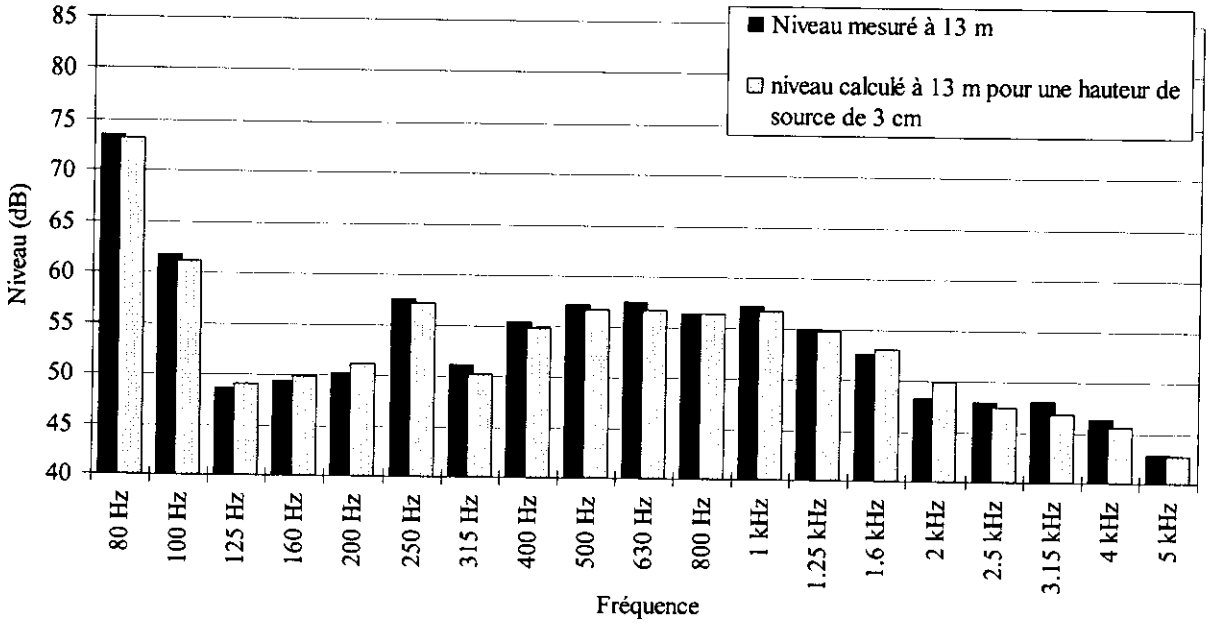

Figure 3.3 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé pour une Renault Clio à vitesse stabilisée : 50 km/h, 3ème, 2550 tr/min.

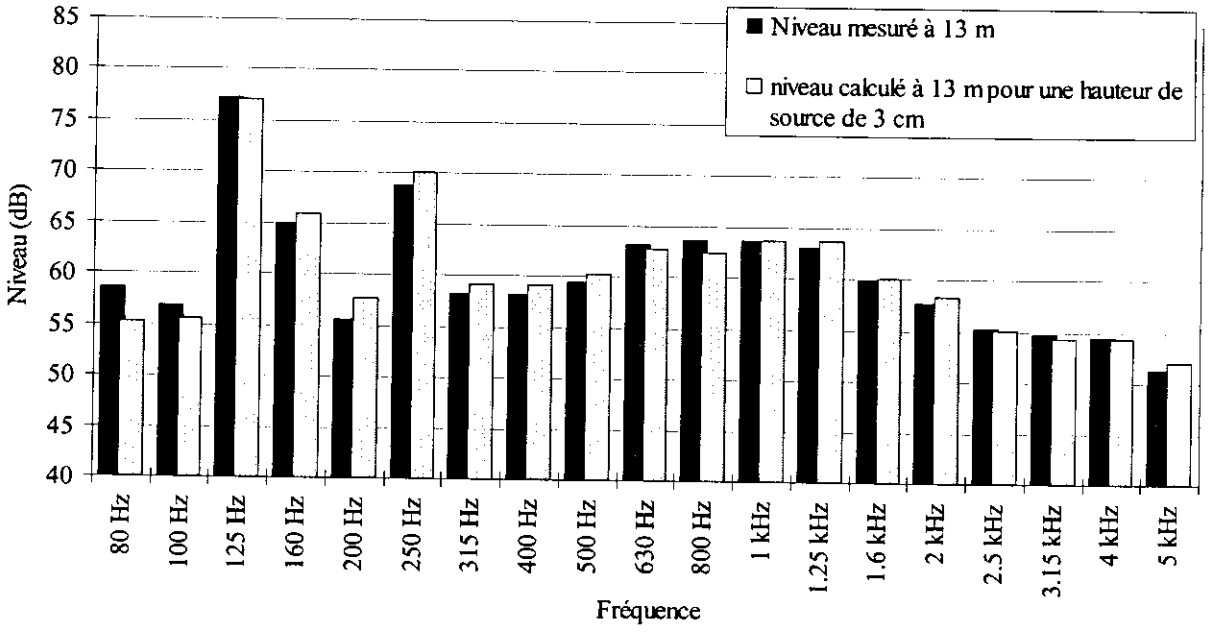

Figure 3.4 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé pour une Renault Clio en accélération : 50 km/h, 2nde, 3700 tr/min.

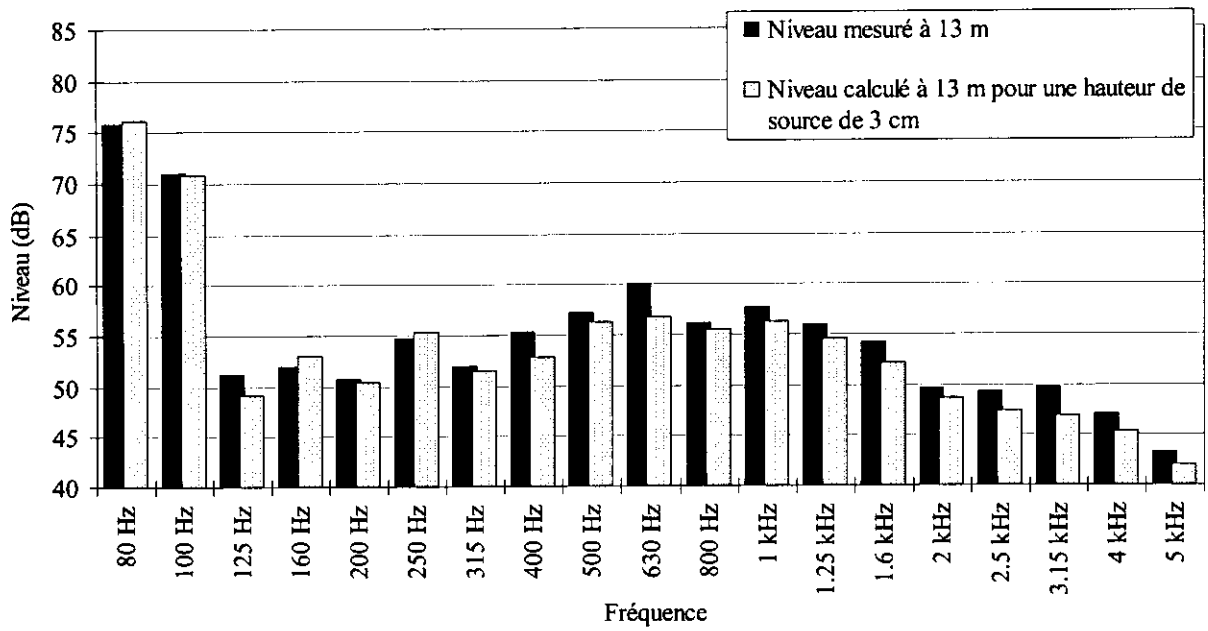

Figure 3.5 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé pour une Renault Clio en décélération : 50 km/h, 3ème, 2550 tr/min.

3.2.2. Méthode développée à l'INRETS à partir d'une technique d'antenne

Impliqué depuis longtemps dans la problématique du bruit des transports terrestres, l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité) a conduit une étude dans le but de déterminer la hauteur de source équivalente d'un véhicule léger, à partir de mesures utilisant une antenne de champ proche. Cette étude peut être également utilisée pour valider nos résultats. L'antenne peut être positionnée verticalement (figure 3.6) ou horizontalement.

Ceci permet de discerner, excepté dans le domaine des basses fréquences, les différentes sources de bruit d'un véhicule avec une bonne résolution. La précision de cette méthode est dépendante de nombreux paramètres comme la fréquence, l'inclinaison de l'antenne, l'espacement et le nombre de ses microphones. A titre d'exemple, pour une source située en face de l'antenne verticale (angle de focalisation nul), la résolution est d'environ 40 cm à 1000 Hz avec une antenne composée de 15 microphones espacés de 15 cm chacun et pour une distance source-antenne de 2.5 m. Cette résolution descend aux environs de 20 cm à 2000 Hz.

Cette étude confirme l'hypothèse suivant laquelle les principales sources sonores sont localisées très près du sol et ceci, même lorsque le véhicule est à l'arrêt [Pallas 1997], [Pallas 1998], [Hamet & al. 1998].

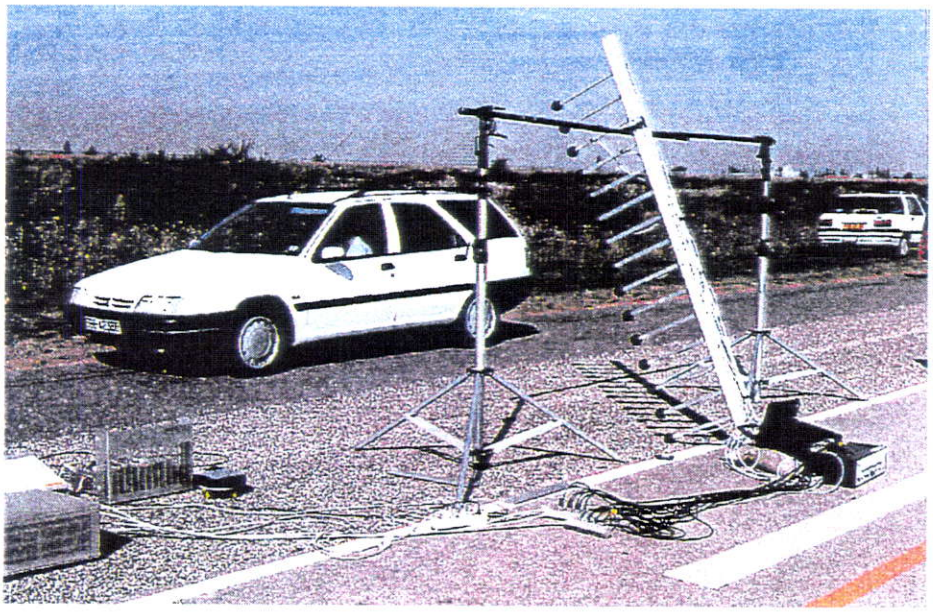

Figure 3.6 : Antenne en champ proche utilisée à l'Inrets [Pallas 1998].

Ces phénomènes sont représentés sur les figures 3.7 à 3.9 lorsque le véhicule léger à l'arrêt, est positionné de telle façon que ses roues avant soient face au centre de l'antenne. La figure 3.7 est relative aux basses fréquences (500–1000 Hz) alors que la suivante concerne des fréquences plus élevées (1000–2000 Hz).

Sur ces figures, on observe généralement une seule source, relativement étendue jusqu'à 1000 Hz (figure 3.7), qui se rétrécit au fur et à mesure que la fréquence augmente (figure 3.8). Une seconde source est parfois visible (figure 3.7, bande 500 Hz) mais avec une amplitude plus faible d'environ 7 dB par rapport à la source principale. Quoi qu'il en soit, le niveau maximum se trouve quasi systématiquement à la hauteur 0 m : il s'agit d'une source située sous le véhicule. Cette source sonore est "vue" par l'antenne après réflexion sur le sol, ce que confirme la figure 3.9. Sur cette dernière, sont représentés les rayons de propagation correspondant aux deux sources observées, avec le cas échéant la réflexion sur le sol : la première source est située sous le véhicule et la seconde correspond probablement à l'espace situé entre la roue et la carrosserie. L'hypothèse que nous avancions précédemment quant à l'émission acoustique du moteur vers le sol semble donc justifiée.

Ces résultats confirment les conclusions observées en utilisant l'atténuation entre deux microphones, à savoir une source sonore équivalente très proche du sol, même lorsque le véhicule est à l'arrêt.

Cette technique permet, certes, de déterminer les différentes sources sonores d'un véhicule, mais sa mise en œuvre, assez lourde, nécessite des moyens très importants et la précision est rarement inférieure à 20 cm.

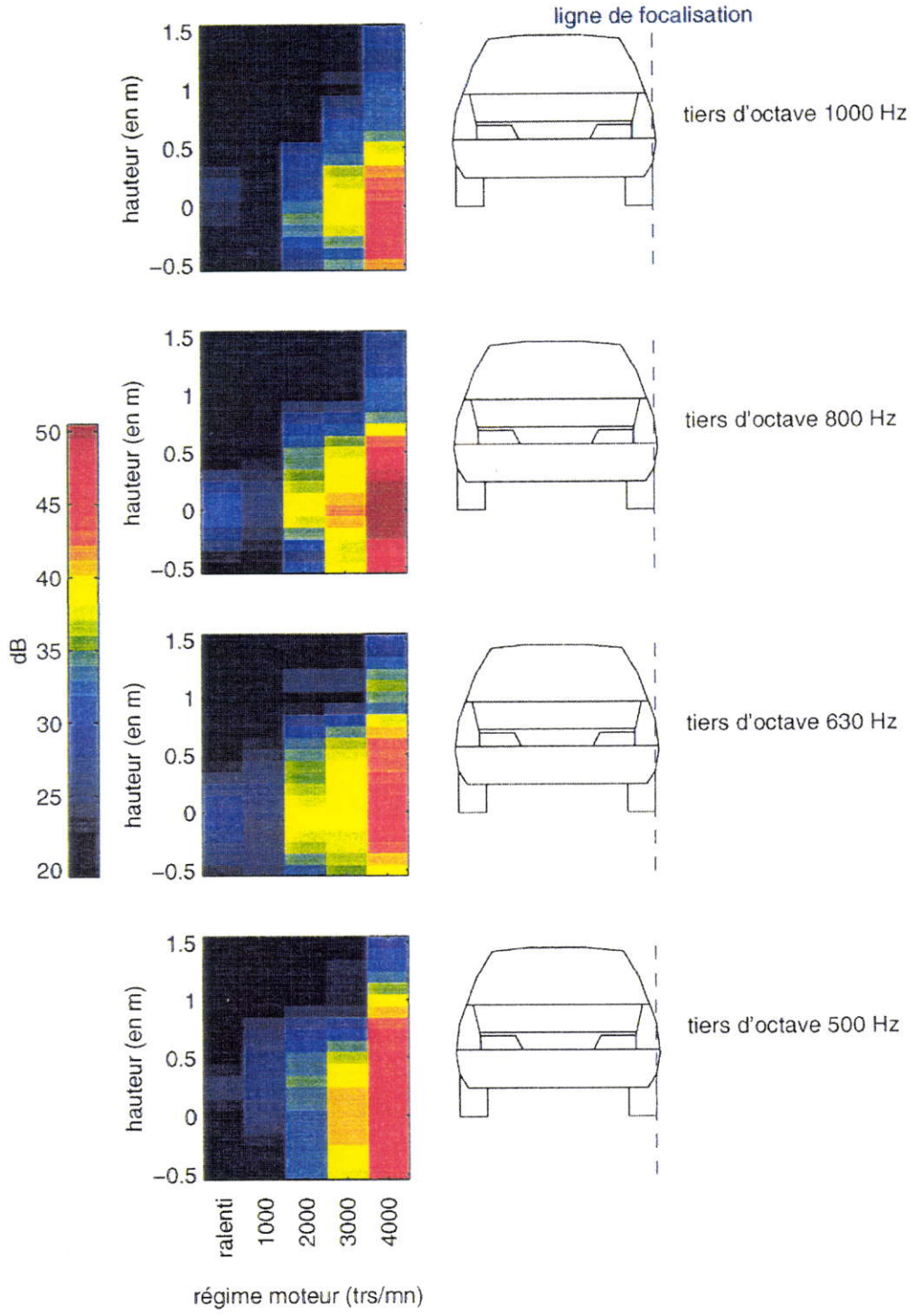

Figure 3.7 : Niveaux en sortie de l'antenne verticale (500 à 1000 Hz) pour 5 régimes moteur et 4 bandes tiers d'octave. Emission acoustique latérale. Antenne de 13 microphones, espacement 30 cm, inclinaison 55°. Distance véhicule-centre de l'antenne : 2.35 m. Béton bitumineux [Pallas 1998].

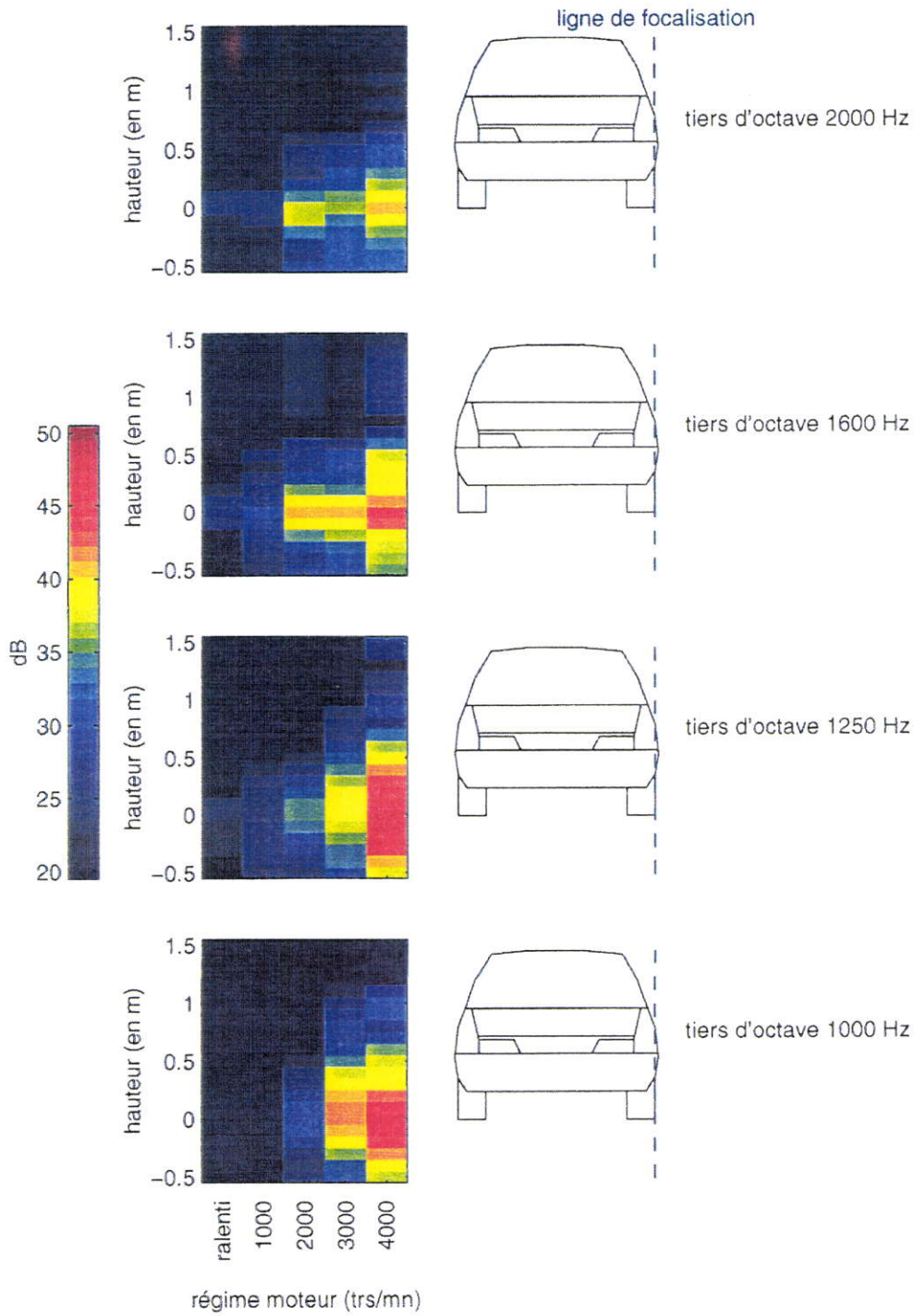

Figure 3.8 : Niveaux en sortie de l'antenne verticale pour 5 régimes moteur et 4 bandes tiers d'octave. Emission acoustique latérale. Antenne de 15 microphones, espacement 15 cm, inclinaison 64°. Distance véhicule-centre de l'antenne : 1.71 m. Béton bitumineux [Pallas 1998].

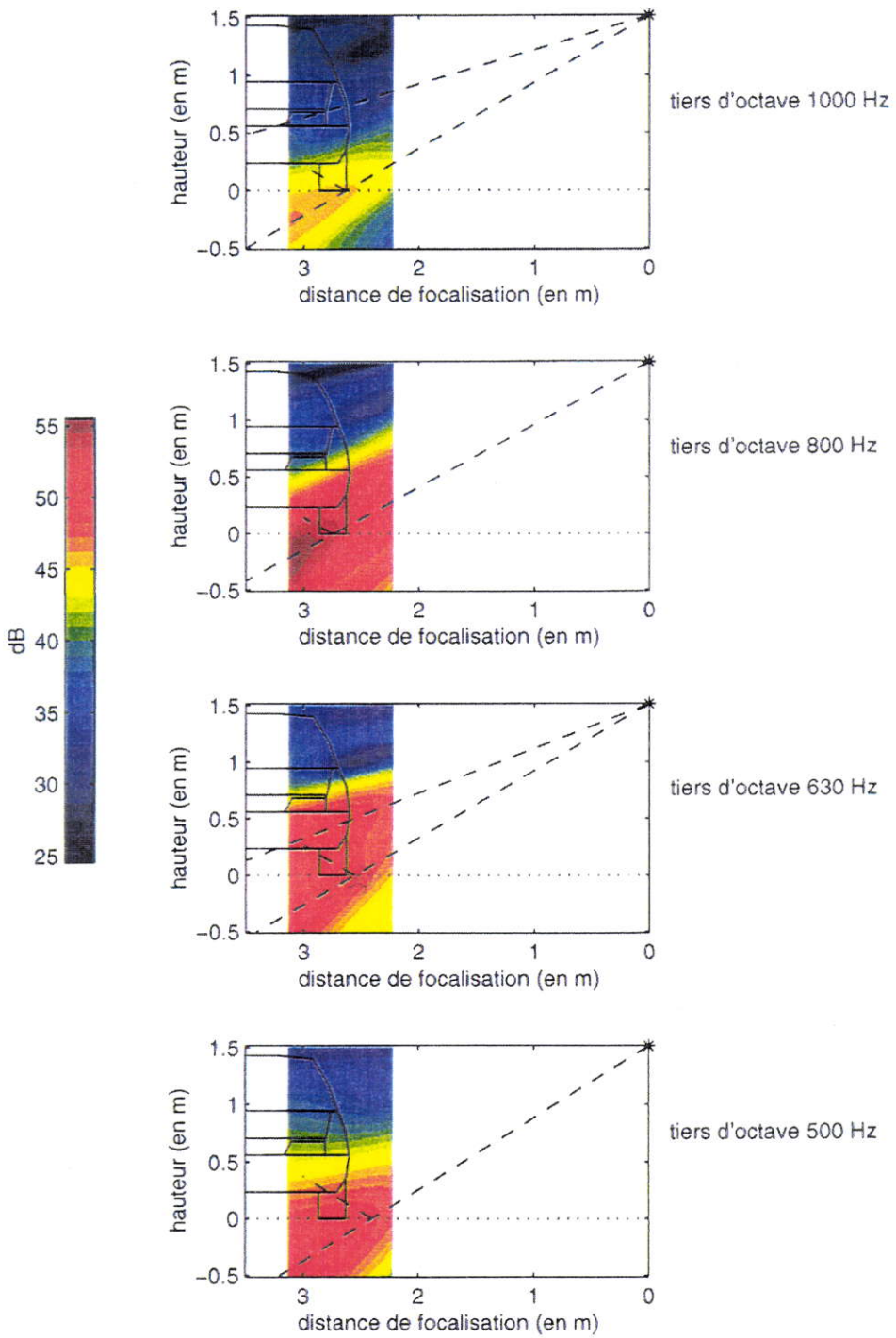

Figure 3.9 : Niveaux en sortie de l'antenne verticale, pour différentes distances de focalisation (4 bandes tiers d'octave) et esquisse des directions d'incidence principales (avec réflexion s'il y a lieu). Régime moteur 4010 tr/min. Emission acoustique latérale. Antenne de 13 microphones, espacement 30 cm, inclinaison 55°. Distance véhicule-centre de l'antenne : 2.63 m. Béton bitumineux [Pallas 1998].

3.2.3. Identification de la puissance acoustique

Connaissant la hauteur de source sonore équivalente du véhicule de type Renault Clio 1.4l (cf. § 3.2.1), la puissance acoustique peut être déterminée comme nous l'avons fait au chapitre 2 (cf. § 2.5.3.2).

Afin de suivre l'évolution de Lw en fonction du régime moteur, nous avons représenté sur les figures 3.10, 3.11 et 3.12, les puissances acoustiques du véhicule pour des conditions de vitesse stabilisée, d'accélération et de décélération. Nous notons que les paramètres vitesse et régime moteur, dans le cas de l'accélération et de la décélération, sont des paramètres instantanés déterminés au droit des microphones.

A partir de ces divers tracés nous remarquons les premiers éléments suivants :

- à vitesse stabilisée et, dans une moindre mesure, en décélération, les niveaux sonores augmentent régulièrement avec la vitesse, sur la quasi-totalité des tiers d'octave,
- en accélération, la vitesse importe peu et le régime moteur est le facteur prépondérant,
- les différences les plus marquées sont obtenues en basses fréquences, en dessous de 250 Hz.

Cette gamme de fréquence est majoritairement influencée par l'effet moteur. Cela se traduit par des "raies" très énergétiques accompagnées de leurs premiers harmoniques. Celles-ci se déplacent dans le spectre proportionnellement au régime moteur comme cela se produit classiquement pour les machines tournantes. De plus, ces fréquences varient linéairement avec le nombre de cylindres.

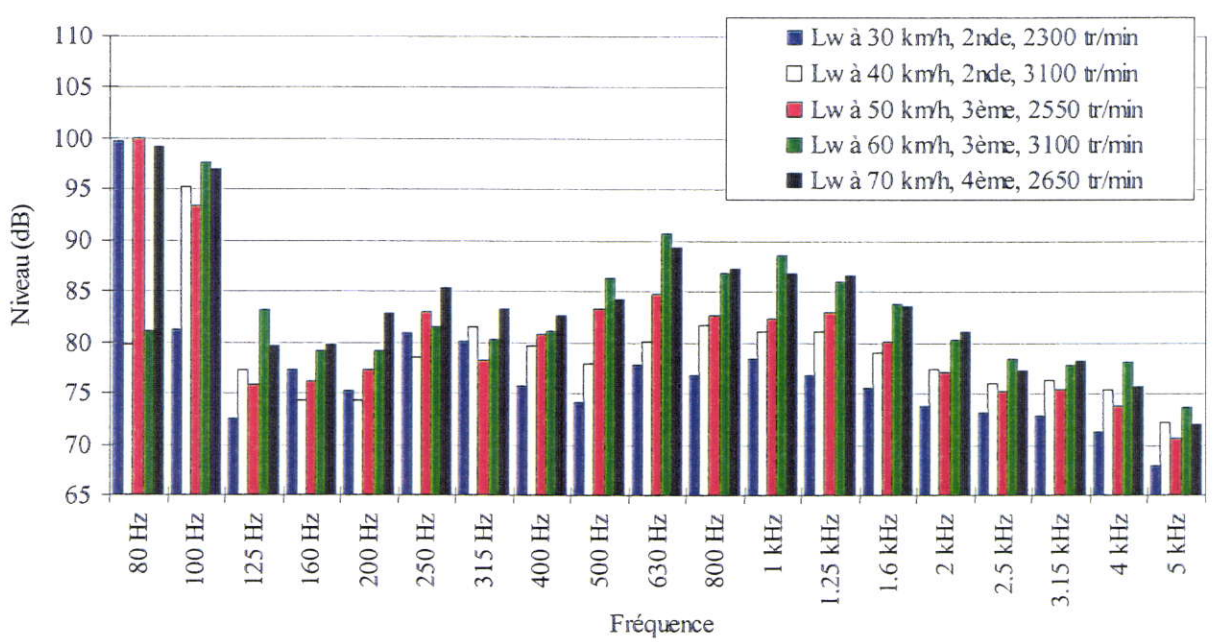

Figure 3.10 : Spectres de puissance acoustique à vitesse stabilisée (Renault Clio).

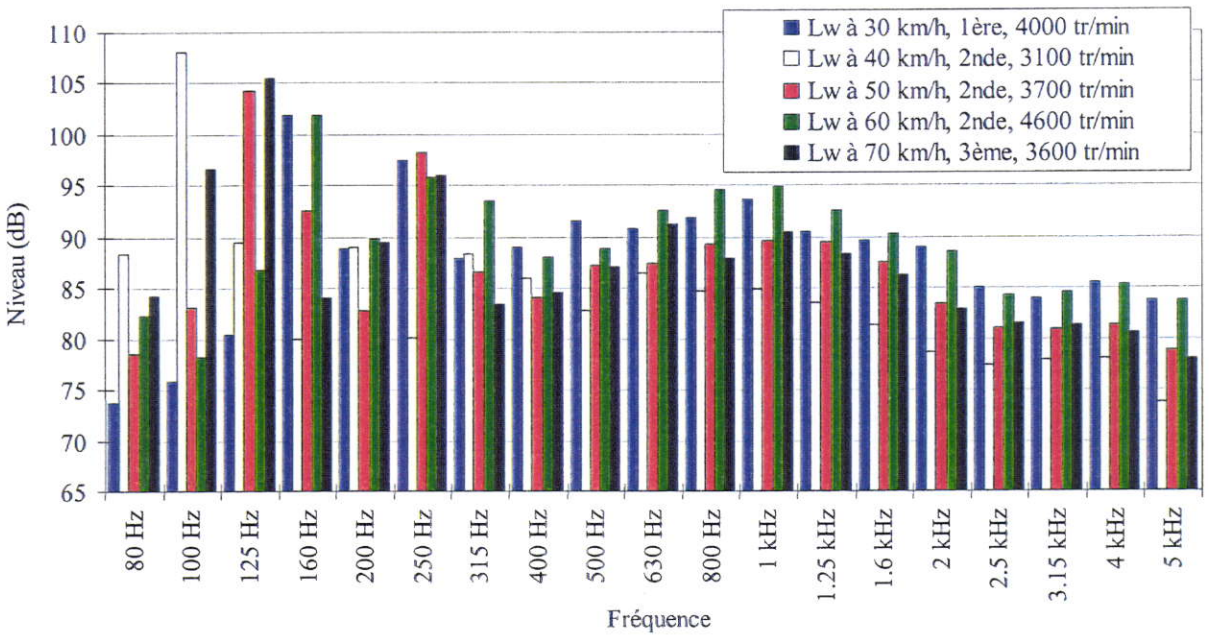

Figure 3.11 : Spectres de puissance acoustique en accélération (Renault Clio).

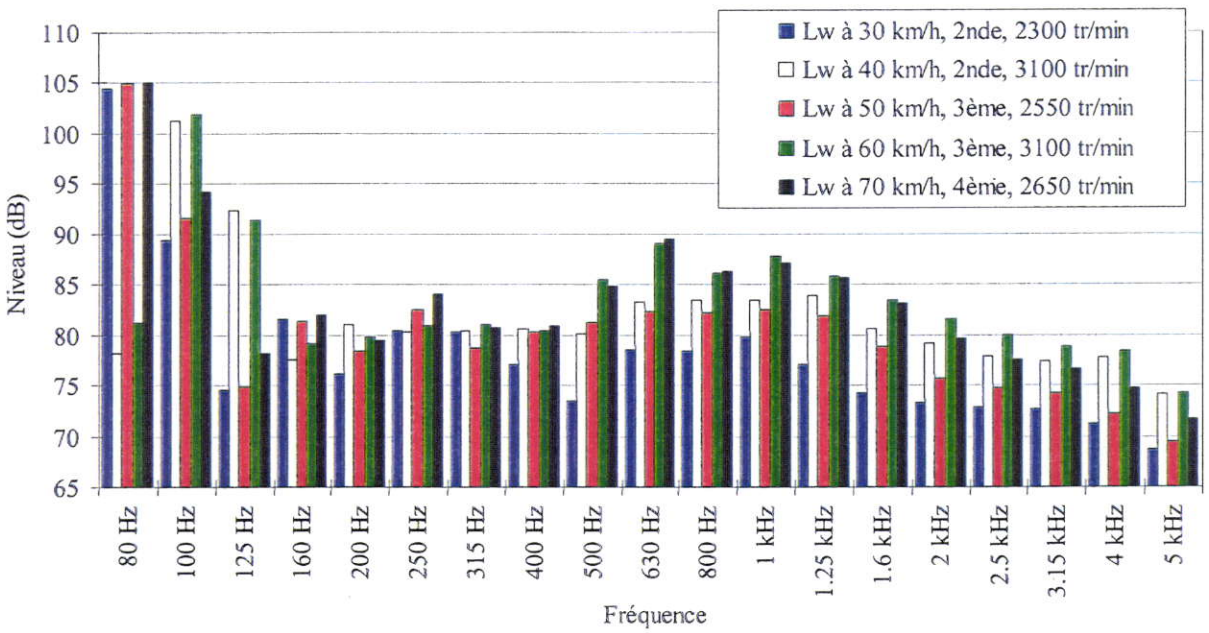

Figure 3.12 : Spectres de puissance acoustique en décélération (Renault Clio).

La position de la raie fondamentale est déterminée par la relation :

$$f(Hz) = \frac{S}{60} * \frac{n}{2} \qquad 3.5$$

où : S est le régime moteur en tr/min et n le nombre de cylindres du véhicule considéré (4 le plus souvent pour un véhicule léger).

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, classique, est également utilisée par Ng & al. [Ng & al. 1998] et se retrouve dans des articles de vulgarisation sur les sources sonores de type mécanique [Moto technologie 1999].

Avec la relation précédente, on peut déterminer les raies théoriques pour tous les cas mentionnés dans le tableau 3.4. Nous obtenons le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Raies moteur théoriques et mesurées (Renault Clio).

	Vitesse stabilisée 1		Vitesse stabilisée 2		Accélération		Décélération	
	Raie calculée (Hz)	Raie mesurée (tiers d'octave)	Raie calculée (Hz)	Raie mesurée (tiers d'octave)	Raie calculée (Hz)	Raie mesurée (tiers d'octave)	Raie calculée (Hz)	Raie mesurée (tiers d'octave)
30 km/h	77 (80)[1]	80	133 (125)	125	133 (125)	160	77 (80)	80
40 km/h	103 (100)	100	—	—	103 (100)	100	103 (100)	100
50 km/h	85 (80)	80	123 (125)	125	123 (125)	125	85 (80)	80
60 km/h	103 (100)	100	—	—	153 (160)	160	103 (100)	100
70 km/h	88 (80)	80-100	120 (125)	125	120 (125)	125	88 (80)	80
80 km/h	103 (100)	100	—	—	—	—	—	—

Si l'on prend par exemple le cas à 50 km/h en accélération (3700 tr/min), on obtient : $f = \frac{3700}{60} * \frac{4}{2} = 123\text{Hz}$, raie que l'on constate sur la figure 3.11 dans le tiers d'octave 125 Hz ainsi que son harmonique d'ordre 1 à 250 Hz. Il existe cependant des déviations, notamment lorsqu'une raie calculée se trouve à la limite de deux bandes de tiers d'octave. La mesure peut parfois basculer dans le tiers d'octave voisin. Il en est de même en accélération, où la vitesse et, par voie de conséquence, le régime moteur varient assez rapidement autour du point de mesure.

Néanmoins, malgré une résolution de mesure limitée au tiers d'octave, un très bon accord a été trouvé entre les raies calculées et mesurées. Afin de vérifier plus précisément ce bon accord, une mesure en bandes fines serait indispensable.

Si l'on examine les spectres à vitesse stabilisée (cf. figure 3.10), on constate d'une part, que la puissance acoustique est principalement affectée par le paramètre vitesse et d'autre part, que les raies moteur apparaissent dans les tiers d'octave 80 et 100 Hz, ce qui correspond à un régime compris entre 2200 et 3300 tr/min, régime usuel en phase stabilisée.

[1] Entre parenthèses, figurent les tiers d'octave auxquels appartiennent les raies calculées.

Dans le cas de l'accélération (cf. figure 3.11), les raies fondamentales et leurs harmoniques sont plus "aigus" du fait d'une augmentation du régime moteur. Ce dernier est le facteur prépondérant pour les niveaux sonores relevés. On remarque en effet que les puissances acoustiques les plus élévées sont obtenues pour 60 km/h (4600 tr/min) puis dans l'ordre décroissant 30 km/h (4000 tr/min), 50 et 70 km/h à égalité (régimes moteurs très proches : 3700 et 3600 tr/min) et enfin 40 km/h (3100 tr/min).

La décélération en revanche (cf. figure 3.12), est une combinaison des deux phénomènes précédents, à savoir une prépondérance de la vitesse avec toutefois une influence non négligeable du régime moteur. Le niveau obtenu à 60 km/h (3100 tr/min) est aussi élevé que celui à 70 km/h (2650 tr/min), de même pour 40 (3100 tr/min) et 50 km/h (2550 tr/min). Globalement, le niveau augmente avec la vitesse.

Au-dessus de 250 Hz, les spectres obtenus sont identiques quelle que soit la vitesse, les uns se déduisant des autres par simple translation de niveau. La modélisation en sera de ce fait grandement simplifiée.

Comparons maintenant les spectres obtenus pour une vitesse donnée (figures 3.13, 3.14 et 3.15). Afin d'évaluer l'influence du paramètre charge moteur, la seconde mesure à vitesse stabilisée a été effectuée avec un régime moteur identique à celui utilisé en accélération (vitesse et rapport de boîte égaux). Nous verrons dans un prochain paragraphe que charge moteur (utilisée par Oshino et Tachibana) (cf. § 3.1.1) et accélération (utilisée par Favre) (cf. § 3.1.2) sont, moyennant certaines conditions, étroitement liées. Nous emploierons indifféremment les deux expressions.

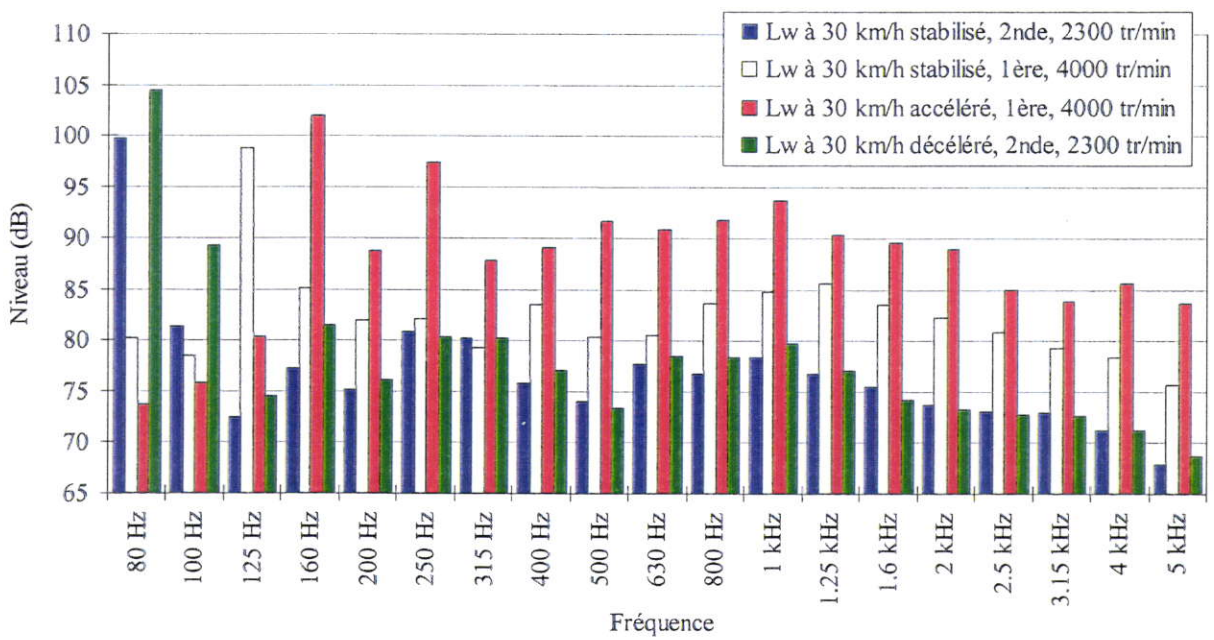

Figure 3.13 : Spectres de puissance acoustique Renault Clio à 30 km/h.

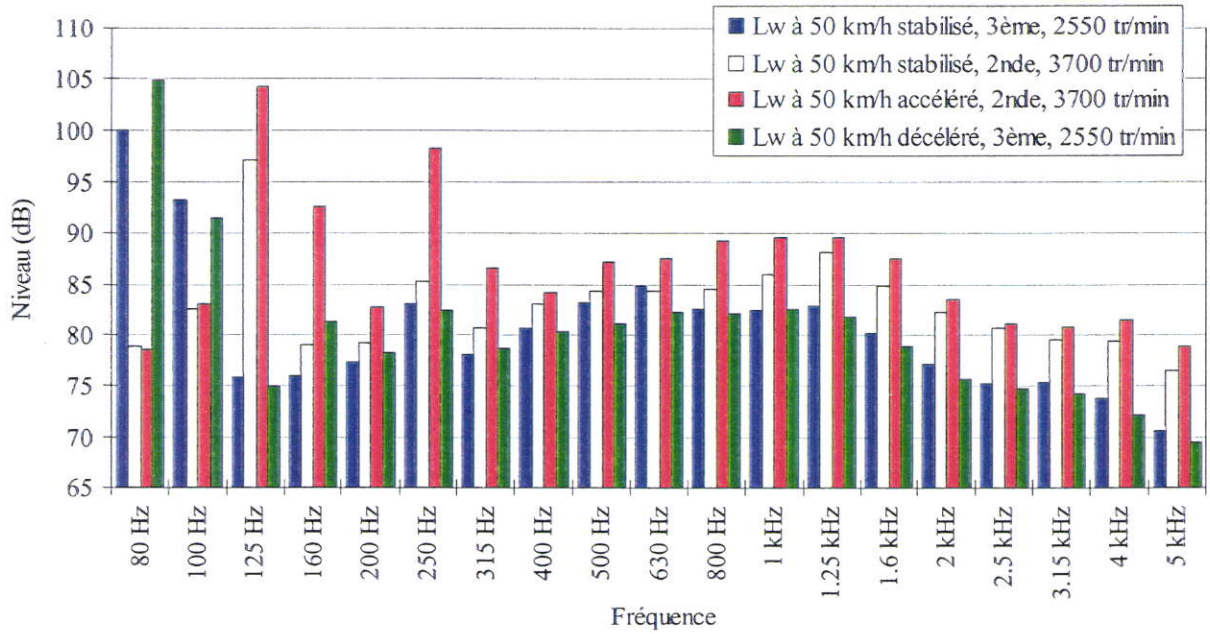

Figure 3.14 : Spectres de puissance acoustique Renault Clio à 50 km/h.

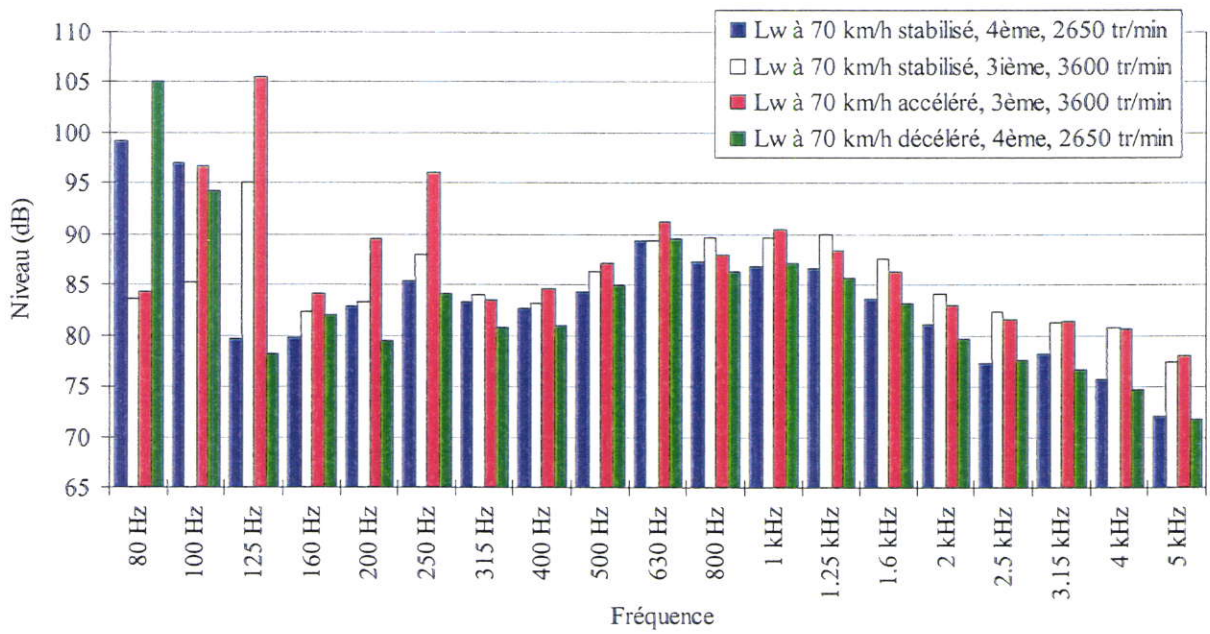

Figure 3.15 : Spectres de puissance acoustique Renault Clio à 70 km/h.

Sur ces figures, nous observons que l'écart entre accélération et vitesse stabilisée pour un même régime et rapport de boîte est pratiquement constant sur tout le spectre, excepté en basse fréquence (raie moteur et harmonique). Cet écart s'affaiblit lorsque la vitesse augmente pour devenir pratiquement nul à 70 km/h.

Les niveaux sonores obtenus en régime de décélération sont très proches de ceux obtenus à vitesse stabilisée (même régime et rapport de boîte) quoique légèrement supérieurs. Ceci peut paraître à première vue assez surprenant, mais pourrait toutefois s'expliquer par le phénomène de "frein moteur".

Plus généralement, les écarts entre les différents modes de fonctionnement, très importants à 30 km/h, deviennent faibles à 70 km/h. En effet, plus la vitesse augmente plus l'influence du bruit de contact pneumatique-chaussée devient importante et moins les effets dus au régime moteur et à la charge de ce dernier se font sentir.

De ces résultats, on peut conclure en première approche que l'allure des spectres de puissance acoustique est quasiment invariable quels que soient la vitesse, le régime moteur et l'accélération, excepté bien sûr en basse fréquence.

3.3. Prévision des émissions sonores par bande de tiers d'octave

3.3.1. Un seul véhicule léger

Comme nous avons pu le remarquer au cours de l'analyse bibliographique [Oshino & Tachibana 1993] [Favre 1978] (cf. § 3.1.1 et 3.1.2), les niveaux sonores déterminés sont des niveaux globaux. Dans le cadre d'une approche propagative, des niveaux par bande de tiers d'octave sont indispensables. Ceci fait l'objet de l'étude détaillée ci-après.
A partir de mesures où la vitesse, le régime moteur et l'accélération sont connus, il est possible de déterminer, par régression[2], les paramètres d'une loi de variation des niveaux sonores. Plusieurs lois ont été examinées, inspirées de celles des paragraphes 3.1.1 et 3.1.2. La meilleure corrélation a été obtenue avec la loi de régression suivante :

$$Lw = 10\log_{10}\left(10^{(a_0+a_1S+a_2A)/10} + 10^{(a_3\log_{10}v)/10}\right) \qquad 3.6$$

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. On obtient donc quatre coefficients par tiers d'octave.

La relation 3.6 est proche des expressions 3.1 et 3.2 du paragraphe 3.1.1. La seule différence provient du fait que le bruit de roulement et le bruit moteur-échappement ne sont pas mesurés séparément. Nous exprimons donc la puissance acoustique totale avec une seule constante a_0 au lieu de deux. Nous séparons néanmoins l'effet moteur-échappement (1er terme) de l'effet bruit de roulement (second terme) dans la mise en équation (eq. 3.6). Ce dernier est exprimé en $\log_{10}V$ comme habituellement (cf. eq. 2.79, 3.2, 3.3 et 3.4). Réunir les contributions moteur-échappement et bruit de roulement n'aurait aucun sens physique. Imaginons par exemple un

[2] Nous utilisons le logiciel Matlab et plus précisément le toolbox "Optimization", lequel contient l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Cet algorithme permet de déterminer les paramètres de régression d'une loi quelconque et d'apprécier la validité de cette loi.

régime moteur important et une faible vitesse : logiquement la partie moteur-échappement est prépondérante et la vitesse n'a aucune influence. Si maintenant la vitesse augmente, l'effet de la vitesse ne sera guère plus important ($\log_{10}v$) alors que dans l'expression 3.6 son influence va rapidement devenir très forte. C'est également ce que l'on constate dans la réalité.

Au paragraphe 3.1.1, 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 pénétration dans 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. Cependant pour des vitesses dites urbaines et en l'absence de rampe[3], on imagine bien qu'une augmentation de la charge moteur entraîne une accélération du véhicule et vice-versa. Dans ces conditions charge moteur et accélération sont étroitement liées. C'est pourquoi, dans notre approche la charge moteur a été remplacée par l'accélération, paramètre tout aussi sensé d'un point de vue physique et plus facilement mesurable. Ce paramètre accélération est d'ailleurs également utilisé par Favre dans son modèle (cf. § 3.1.2).

Dans notre étude, les régressions ont été déterminées à partir d'un échantillon composé d'environ 80 passages de la Renault Clio 1.4l sur la piste de référence du LCPC (enrobé de type BBTM). Les domaines de variation des paramètres vitesse, régime moteur et accélération sont délibérément grands afin d'obtenir des résultats fiables sur une large plage d'utilisation des véhicules. Au cours des mesures, nous avons balayé une gamme de vitesses comprise entre 30 et 80 km/h, des régimes moteur entre 2300 et 4600 tr/min et des accélérations allant de -0.6 à +1.9 $m.s^{-2}$. La caractérisation acoustique s'en trouvera bien meilleure, tout particulièrement en milieu urbain, là où de fortes accélérations et des régimes moteur élevés sont fréquents.

Les lois sont déterminées pour chaque tiers d'octave à l'exception de ceux pour lesquels apparaissent des raies moteur définies par la relation connue :

$$f(Hz) = \frac{S}{30} \qquad 3.7$$

Dans ce cas, la loi 3.6, appliquée à la raie fondamentale, permet d'obtenir les amplitudes de cette raie. En résumé, la régression ne se rapporte plus à un tiers d'octave donné mais à la raie fondamentale quelle que soit sa fréquence. On procède de même pour les harmoniques de rang 1 et 2 (double et triple de la fréquence fondamentale). Le paramètre vitesse, conformément à l'intuition, n'a ici aucune influence sauf pour les harmoniques où une légère dépendance apparaît.

On obtient donc quatre coefficients de régression par tiers d'octave (multiplié par 19 tiers d'octave) auxquels il faut ajouter quatre autres coefficients pour chaque raie (fondamentale, harmoniques d'ordre 1 et d'ordre 2). On peut éventuellement faire figurer ceux obtenus pour le niveau global et le niveau global A. Ces derniers ne sont toutefois pas indispensables puisqu'une sommation sur l'ensemble des tiers d'octave nous fournit, à de faibles écarts près, des niveaux identiques.

[3] Rampe : terme qui désigne l'élévation longitudinale d'une chaussée. Elle s'exprime en %.

Des comparaisons mesure-calcul sont représentées figure 3.16 et suivantes pour les trois modes : vitesse stabilisée, accélération et décélération.

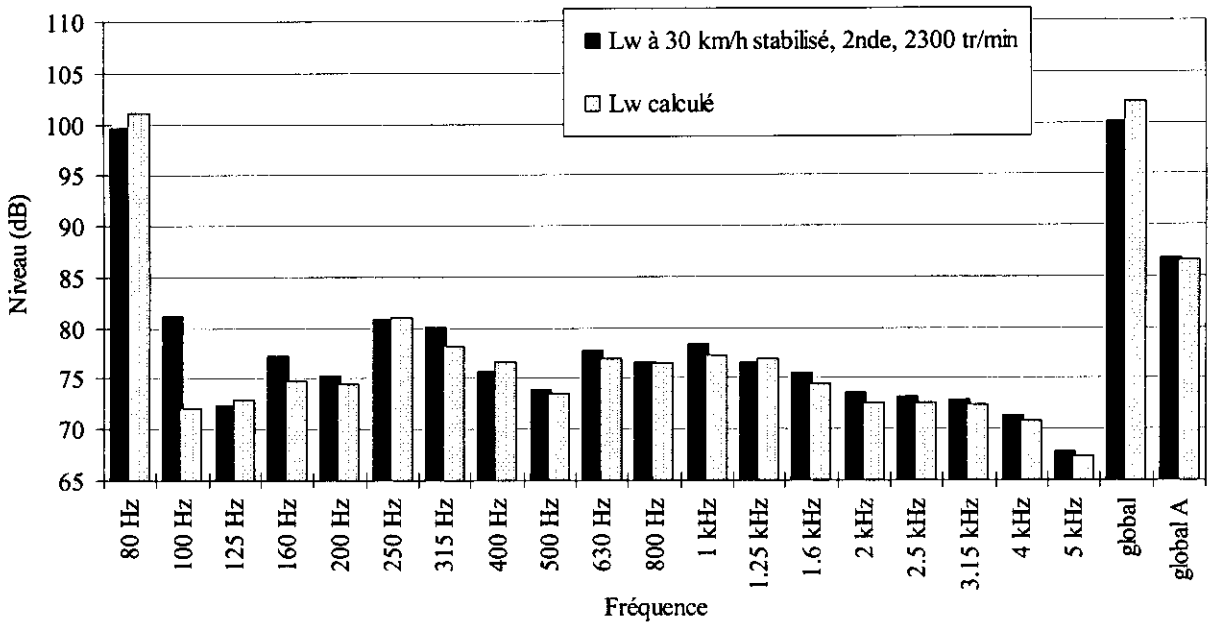

Figure 3.16 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée pour une vitesse stabilisée de 30 km/h.

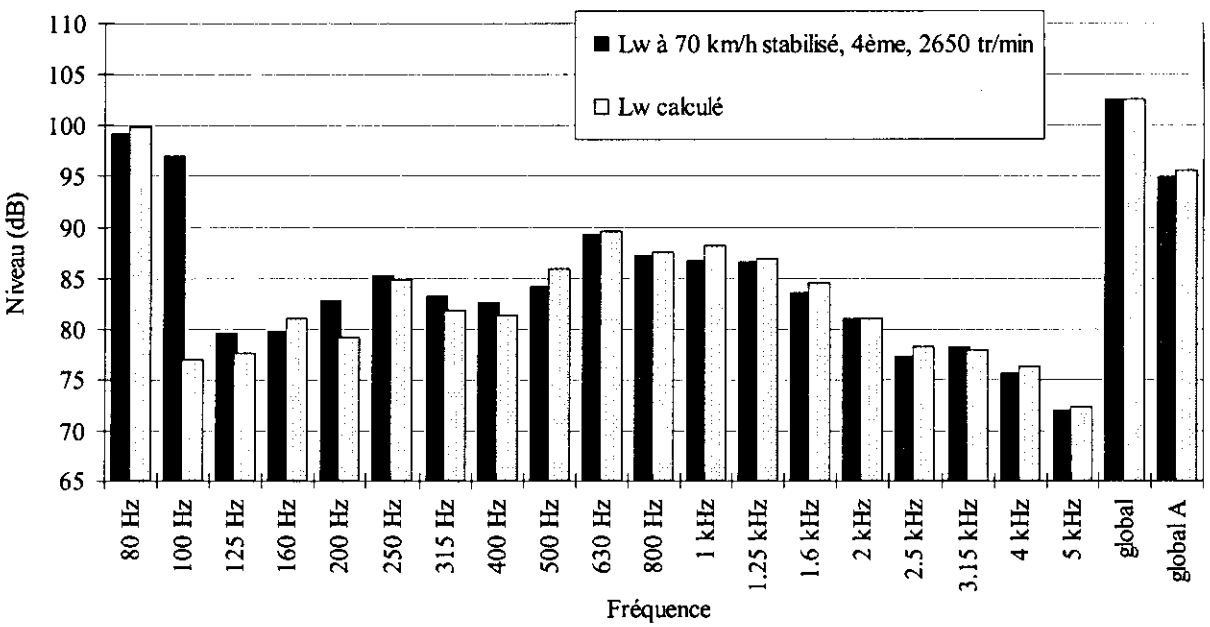

Figure 3.17 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée pour une vitesse stabilisée de 70 km/h.

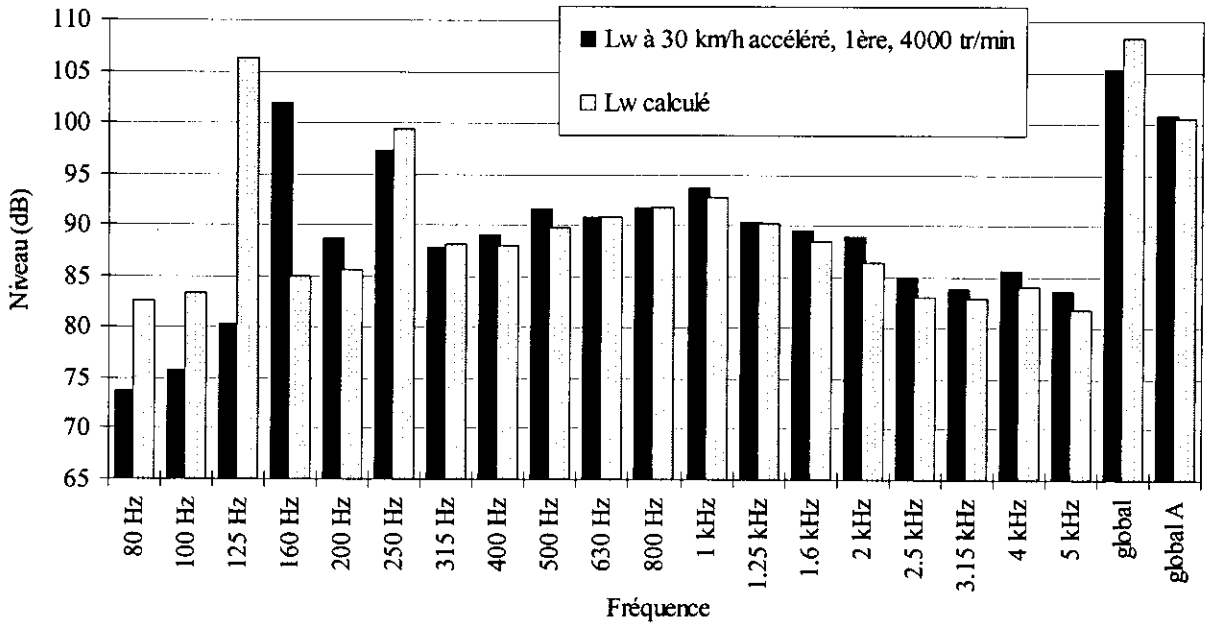

Figure 3.18 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 30 km/h.

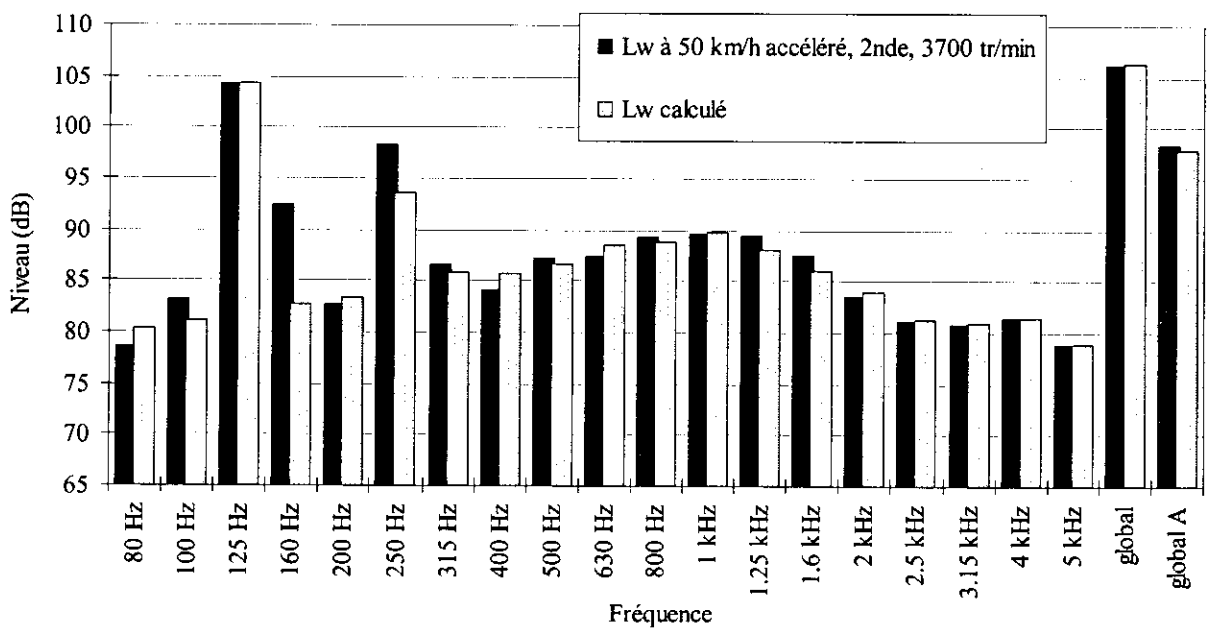

Figure 3.19 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 50 km/h.

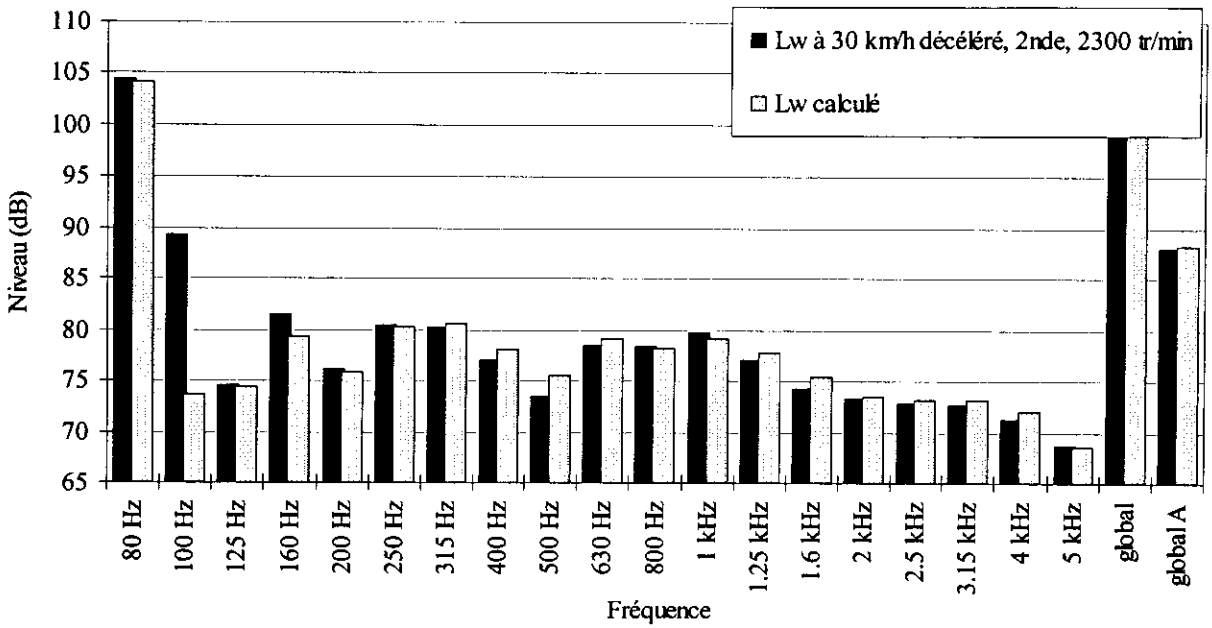

Figure 3.20 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime décéléré à 30 km/h.

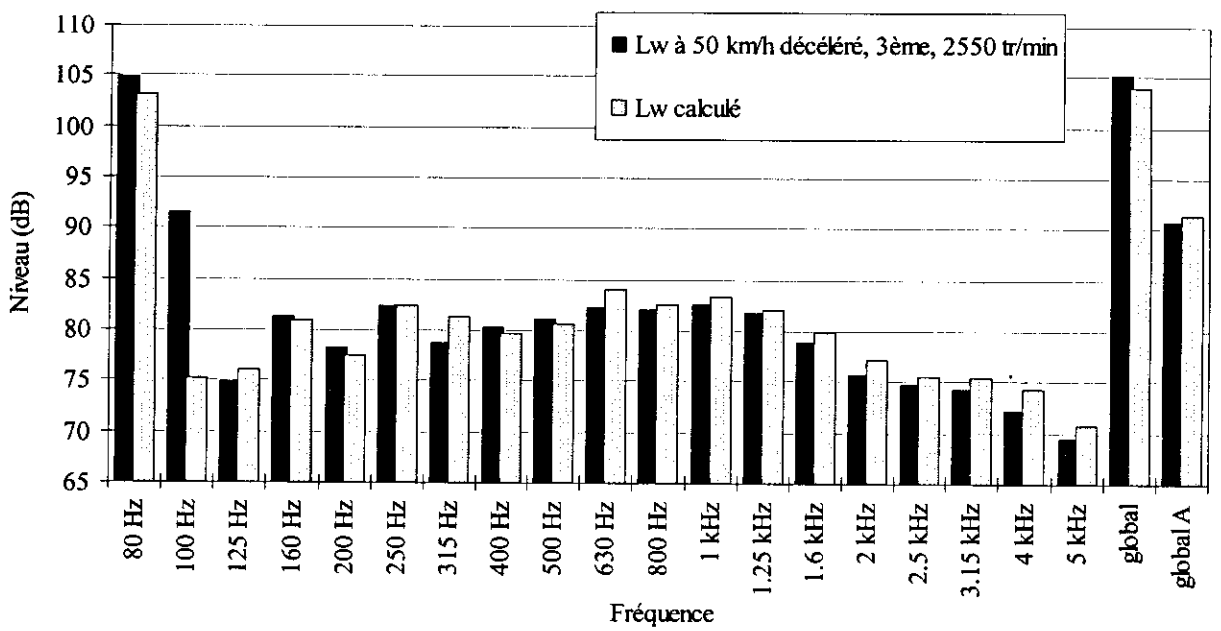

Figure 3.21 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime décéléré à 50 km/h.

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. Celles-ci se réduiront lorsque nous appliquerons ensuite la pondération A. En particulier, comme par exemple sur la figure 3.18, la raie moteur calculée peut être décalée d'un tiers d'octave par rapport à la raie mesurée.

L'énergie concentrée dans une bande de fréquence peut être à la limite de deux tiers d'octave et basculer de l'un vers l'autre. Ceci semble également se produire sur la figure 3.17 où une partie de l'énergie se reporte sur le tiers d'octave supérieur, mais à un degrés moindre, et sans pour cela affecter le niveau global ou le niveau global pondéré A.

En phase d'accélération (cf. figures 3.18 et 3.19), les harmoniques de rang 1 sont très prononcés. Par contre, les harmoniques de rang 2 sont indétectables. En effet, la fréquence de cette raie est assez élevée et se trouve noyée dans le bruit de roulement. En mode de décélération par exemple, cette raie est parfaitement visible (cf. figure 3.21) car située plus bas en fréquence dans une zone où le bruit de roulement n'est pas encore très important. Au-dessus de 250 Hz, les harmoniques de rang 2 deviennent invisibles. Ils ne seront donc pas pris en compte.

Le tableau 3.6 récapitule les coefficients de régression a_0, a_1, a_2 et a_3, définis suivant la relation 3.6, pour le cas de la Renault Clio 1.4l circulant sur un enrobé de type BBTM. Ces divers coefficients sont utilisés pour le calcul des niveaux de puissance acoustique représentés sur les figures 3.16 à 3.21.

Tableau 3.6 : Coefficients de régression a_0, a_1, a_2 et a_3 pour la Renault Clio 1.4l.

	a_0	a_1	a_2	a_3
315 Hz	75.5487	0.0011	4.3526	42.8996
400 Hz	67.7886	0.0037	2.6992	42.7448
500 Hz	59.9846	0.0052	4.7350	46.4283
630 Hz	67.9467	0.0032	5.3007	48.4683
800 Hz	62.8618	0.0054	3.7805	47.2569
1000 Hz	64.0057	0.0054	3.8413	47.6009
1250 Hz	61.5838	0.0063	1.6869	46.8169
1600 Hz	58.6019	0.0065	2.0869	45.4617
2000 Hz	57.1702	0.0064	1.8092	43.3546
2500 Hz	60.1965	0.0052	0.9944	41.3282
3150 Hz	61.1494	0.0047	1.4352	41.1045
4000 Hz	57.4772	0.0057	2.0448	40.0908
5000 Hz	52.8894	0.0061	2.3229	37.7349
Global	105.4258	-0.0018	5.2661	52.0564
Global A	75.2257	0.0048	3.2213	51.3087

Pour les tiers d'octave inférieurs à 315 Hz, prendre le niveau calculé à 400 Hz et enlever 1.5 dB pour le tiers d'octave 250 Hz puis 0.75 dB/tiers d'octave sauf pour les tiers d'octave incluant les fréquences de la raie moteur f = S/30 et de ses harmoniques de rang 1 et 2, pourvu que ces derniers (harmoniques de rang 2) soient inférieurs à 283 Hz (limite du tiers d'octave 315 Hz).

Pour la raie moteur (fondamentale) : $a_0 = 108.3847$; $a_1 = -0.032$; $a_2 = 5.5782$; $a_3 = 1$

Pour l'harmonique de rang 1 : $a_0 = 62.8669$; $a_1 = 0.050$; $a_2 = 8.6335$; $a_3 = 43.0096$

Pour l'harmonique de rang 2 : $a_0 = 64.7286$; $a_1 = 0.071$; $a_2 = -1.3674$; $a_3 = 43.1286$

Les coefficients du tableau 3.6 utilisés ensuite dans la relation 3.6 donnent une précision moyenne de ± 1.3 dB pour les tiers d'octave basses fréquences et de ± 0.9 dB pour les hautes fréquences.

En dessous de 315 Hz, il est impossible de déduire des coefficients satisfaisants. L'erreur commise est trop importante. Mises à part les raies moteur, cette région présente souvent des similitudes d'un cas à l'autre. Une approximation linéaire entre 80 et 250 Hz semble être la solution la plus juste. On peut donc calculer les niveaux dans ces bandes par la règle énoncée dans le tableau 3.6. De toute façon, avec la pondération A, les niveaux mis en jeu sont négligeables en regard des autres bandes de fréquence.

Si l'on s'attarde sur l'expression du niveau global, on remarque que a_1 est négatif. Ceci est dû à la diminution du niveau de la raie moteur lorsque le régime augmente au profit des harmoniques[4]. Ce phénomène est, bien entendu, observé expérimentalement. Cette raie étant basse fréquence, cette constatation n'apparaît plus avec la pondération A (global A), comme on peut s'en apercevoir dans le tableau 3.6.

Comme le paramètre vitesse n'a aucune influence sur la raie moteur (fondamentale), la valeur de a_3 n'a aucun sens physique : $a_3 = 1$.

Ces résultats confirment que le régime moteur est un paramètre très important dans la détermination des spectres des sources sonores de type routier. Connaissant les caractéristiques mécaniques des véhicules (rapports de boîte de vitesse), il est possible de déterminer une relation précise entre la vitesse et le régime moteur pour chaque rapport de boîte. Ne possédant pas les caractéristiques de la Renault Clio, nous avons déterminé cette loi à partir de points expérimentaux recueillis lors des essais, en se fiant aux indications données par le compte-tours. C'est une loi linéaire, bien connue dans le monde de l'automobile, du même type que celle déterminée par Oshino & Tachibana [Oshino & Tachibana 1993] :

$$S = \text{constante}(r_i).v \qquad 3.8$$

Le régime moteur S est exprimé en tr/min, la vitesse v en km/h et constante(r_i) est une constante dépendant du rapport engagé (i = 1,2,3,4,5 et 6).

La figure 3.22 montre un bon accord entre les points expérimentaux et la loi précédente.

Si 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 et un simple radar suffit. Les caractéristiques mécaniques (rapports de transmission) peuvent être obtenues auprès des constructeurs ou dans les revues techniques spécialisées.

Pour cette raison, nous concentrerons nos efforts, à l'avenir, pour identifier avec la plus grande précision la vitesse des véhicules à partir d'un système de mesure constitué de cellules

[4] Le coefficient a_1 pour la fréquence fondamentale est négatif. Ceux obtenus pour les harmoniques d'ordre 1 et 2 sont par contre positifs. La raie fondamentale étant très énergétique, une variation même sensible de son niveau a une conséquence immédiate sur le niveau global.

photoélectriques. Ce système, acquis très récemment, permet aussi la mesure précise de l'accélération au point désiré (le plus souvent en face du microphone de mesure).

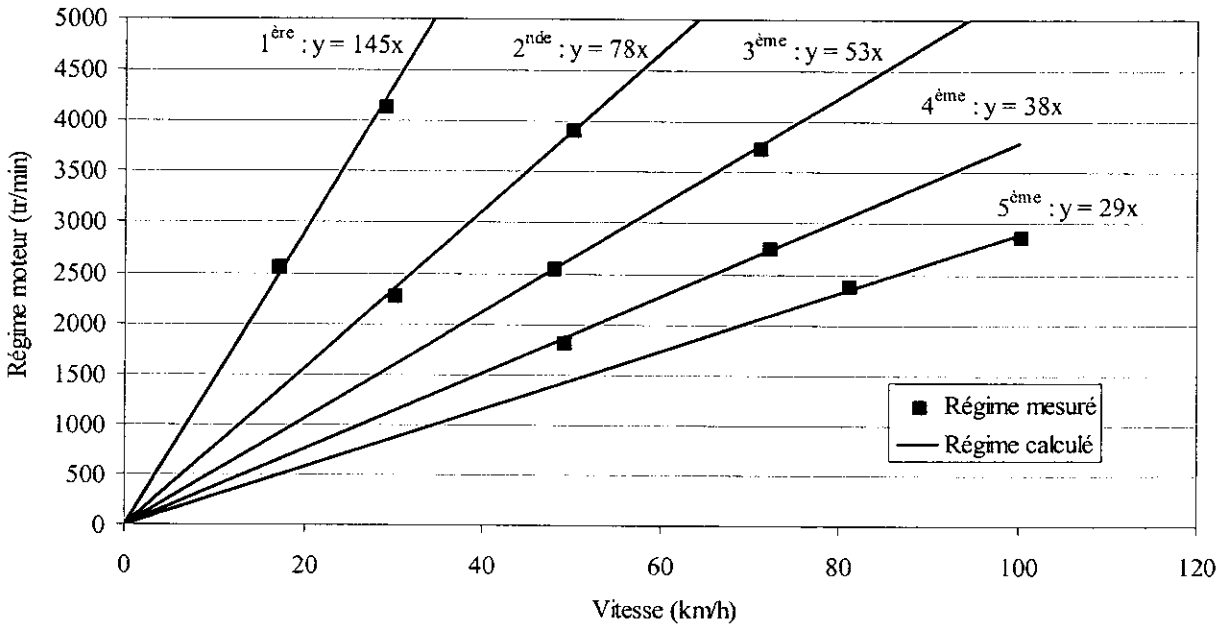

Figure 3.22 : Détermination d'une loi classique vitesse-régime moteur pour la Renault Clio 1.4l.

3.3.2. Plusieurs véhicules légers

Les coefficients de régression précédents étaient déterminés pour un seul véhicule et un seul revêtement routier. Dans un but statistique, une autre campagne de mesures a été réalisée en mai 1999 sur la piste de référence du LCPC, en collaboration avec le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois (figure 3.23). Elle reprend les caractéristiques de la précédente mais cette fois-ci avec plusieurs revêtements et cinq véhicules légers différents à motorisation essence (dont quatre fournis par le LRPC de Blois) :

- 2 Renault Clio (celle du LCPC utilisée habituellement et lb 68[5]),
- 1 Peugeot 106 (lb 32),
- 2 Peugeot 405 (lb 80 et lb 1).

Les cylindrées moteur de ces véhicules se répartissent dans la gamme 1.1 l – 1.6 l. Les rapports de boîte de vitesse étant disparates, on obtient des régimes moteurs différents d'un véhicule à l'autre et ce pour une même vitesse. Les données à partir desquelles sont calculées les régressions tiennent compte des spécificités de chaque véhicule.

[5] Les références lb xx désignent les véhicules du Laboratoire de Blois. Ces désignations seront utilisées par la suite pour différencier les véhicules.

Figure 3.23 : Clio de référence sur la piste d'essai du LCPC.

Les essais ont été réalisés sur trois revêtements différents (cf. annexe 3) :

- BBSG (Béton Bitumineux Semi-Grenu),
- ES (Enduit Superficiel),
- BBDr (Béton Bitumineux Drainant).

Le but de la présente étude est, d'une part, d'évaluer les écarts lorsqu'une moyenne est effectuée sur plusieurs véhicules et d'autre part, de tester l'influence du revêtement.

Rappelons que les essais précédents ont été réalisés sur un BBTM (Béton Bitumineux Très Mince). A l'exception du BBDr, tous les revêtements cités sont des revêtements fermés, c'est-à-dire parfaitement réfléchissant du point de vue acoustique. De plus, les BBTM et BBSG sont les revêtements les plus fréquemment rencontrés en zone urbaine. Rappelons également que les BBDr ne sont quasiment plus utilisés en milieu urbain car ils se colmatent très rapidement à faible vitesse et de ce fait, perdent rapidement une grande partie de leur efficacité. Les figures 3.24 et 3.25 présentent une comparaison entre les niveaux de puissance acoustique relevés (dans les mêmes conditions) pour chaque revêtement.

On constate sans surprise sur la figure 3.24, que l'Enduit Superficiel est de loin le plus bruyant des quatre revêtements, que le BBDr est le plus silencieux[6] et enfin, que le BBSG et le BBTM sont intermédiaires mais assez proches l'un de l'autre (cf. annexe 3). Signalons que dans ce cas, pour les vitesses considérées, le bruit de contact pneumatique-chaussée est prédominant. Observons le même graphique à faible vitesse et en accélération (figure 3.25), c'est-à-dire lorsque le bruit de roulement est faible par rapport à la source moteur-échappement.

[6] Surtout à partir de 630 Hz, phénomène bien connu [Delanne 1989]. D'où l'impression auditive particulière, lorsque l'on roule sur ce type de revêtement, d'une ambiance sonore plus "grave" qu'à l'habitude.

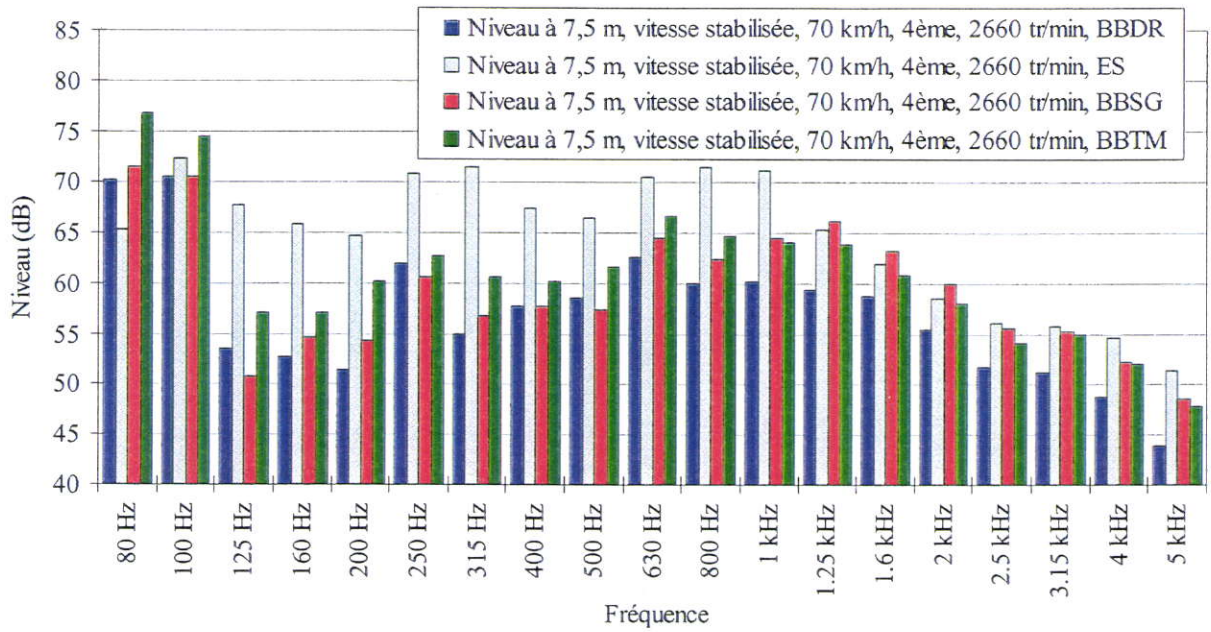

Figure 3.24 : Comparaison des niveaux sonores mesurés à 7.5 m pour divers revêtements routiers : 70 km/h à vitesse stabilisée.

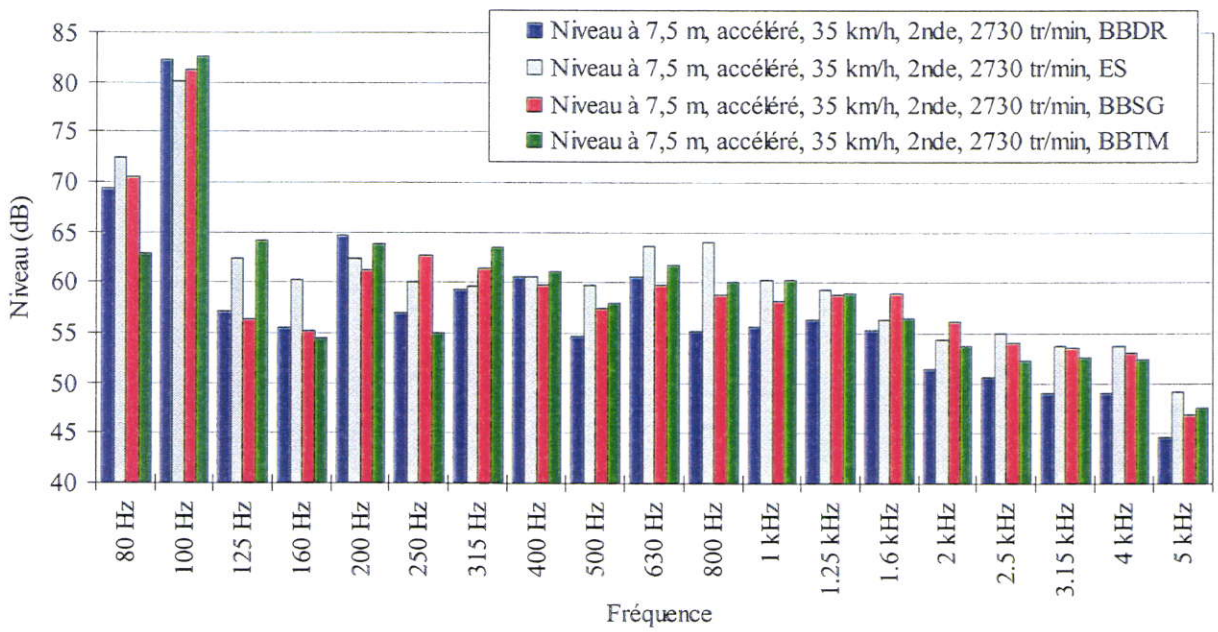

Figure 3.25 : Comparaison des niveaux sonores mesurés à 7.5 m pour divers revêtements routiers : 35 km/h en accélération.

Les remarques précédentes restent valables à ceci près : les niveaux de bruit sur l'ES sont comparables à ceux obtenus pour les revêtements BBSG et BBTM. En effet, le bruit de roulement, très important à 70 km/h en vitesse stabilisée est moindre à 35 km/h en accélération : le bruit moteur-échappement domine. Par contre le BBDr reste le plus

performant. En effet, c'est un revêtement poreux, et par conséquent, il est capable d'absorber tout autant le bruit de roulement que les bruits moteur-échappement qui, comme on l'a vu (cf. § 3.2.1 et 3.2.2), tendent à se propager principalement par le dessous du véhicule.

Le tableau suivant récapitule les coefficients de régression obtenus pour le BBSG-BBTM[7] et pour les cinq véhicules mentionnés plus haut.

Tableau 3.7 : Coefficients de régression a_0, a_1, a_2 et a_3 pour les cinq véhicules.

	a_0	a_1	a_2	a_3
315 Hz	68.3760	0.0029	4.4591	43.3745
400 Hz	65.0447	0.0041	3.4741	41.9785
500 Hz	62.1210	0.0046	3.6734	44.6290
630 Hz	63.3706	0.0047	4.1660	45.5063
800 Hz	63.3247	0.0048	3.3881	45.8745
1000 Hz	62.2972	0.0053	2.9068	47.4161
1250 Hz	63.8874	0.0050	2.2761	47.3202
1600 Hz	61.8406	0.0054	2.2307	46.4572
2000 Hz	60.4954	0.0054	2.3154	44.6243
2500 Hz	61.1959	0.0051	1.2568	42.4741
3150 Hz	61.9833	0.0049	1.2799	41.7073
4000 Hz	60.9331	0.0048	1.8620	41.3906
5000 Hz	55.7456	0.0053	2.1482	40.2267
Global	89.7215	0.0021	5.2917	52.9178
Global A	75.7489	0.0044	3.0400	51.1472
Pour les tiers d'octave inférieurs à 315 Hz, prendre le niveau calculé à 400 Hz et enlever 1.5 dB pour le tiers d'octave 250 Hz puis 0.75 dB/tiers d'octave sauf pour les tiers d'octave incluant les fréquences de la raie moteur f = S/30 et de ses harmoniques de rang 1 et 2, pourvu que ces derniers (harmoniques de rang 2) soient inférieurs à 283 Hz (limite du tiers d'octave 315 Hz).				
Pour la raie moteur (fondamentale) : $a_0 = 93.4612$; $a_1 = 0.0002$; a_2 5.7753=; $a_3 = 50.3549$				
Pour l'harmonique de rang 1 : $a_0 = 64.3274$; $a_1 = 0.0044$; $a_2 = 8.6633$; $a_3 = 44.1470$				
Pour l'harmonique de rang 2 : $a_0 = 64.4632$; $a_1 = 0.0061$; $a_2 = 2.8935$; $a_3 = 43.0850$				

Les coefficients du tableau ci-dessus utilisés ensuite dans la relation 3.6 donnent une précision moyenne de ± 2.8 dB pour les tiers d'octave basses fréquences et de ± 1.6 dB pour les hautes fréquences.

[7] L'écart très faible obtenu entre les deux revêtements, du même ordre de grandeur que celui de l'annexe 3, n'a pas permis de les séparer. C'est pourquoi les coefficients de régression figurant tableau 7 sont calculés comme s'il s'agissait d'un seul et même revêtement.

A la lecture de ce tableau, on constate que les coefficients pour l'ensemble des cinq véhicules sont assez proches de ceux déterminés pour un seul véhicule léger, ce qui peut sembler a priori surprenant de par le simple fait que certains véhicules sont plus bruyants que d'autres. Une explication possible est la suivante : si ces véhicules, à vitesse stabilisée par exemple, ne présentent pas les mêmes niveaux d'émission, cela provient du fait que les régimes moteurs sont différents car les rapports de transmission sont également différents. En revanche, les coefficients de régression peuvent être proches.

A titre de comparaison, nous montrons sur la figure 3.26 les niveaux mesurés pour la Renault Clio 1.4l, les niveaux calculés avec les coefficients extraits du tableau 3.6 (Lw calculé 1) et ceux calculés à l'aide des coefficients du tableau 3.7 (Lw calculé 2).

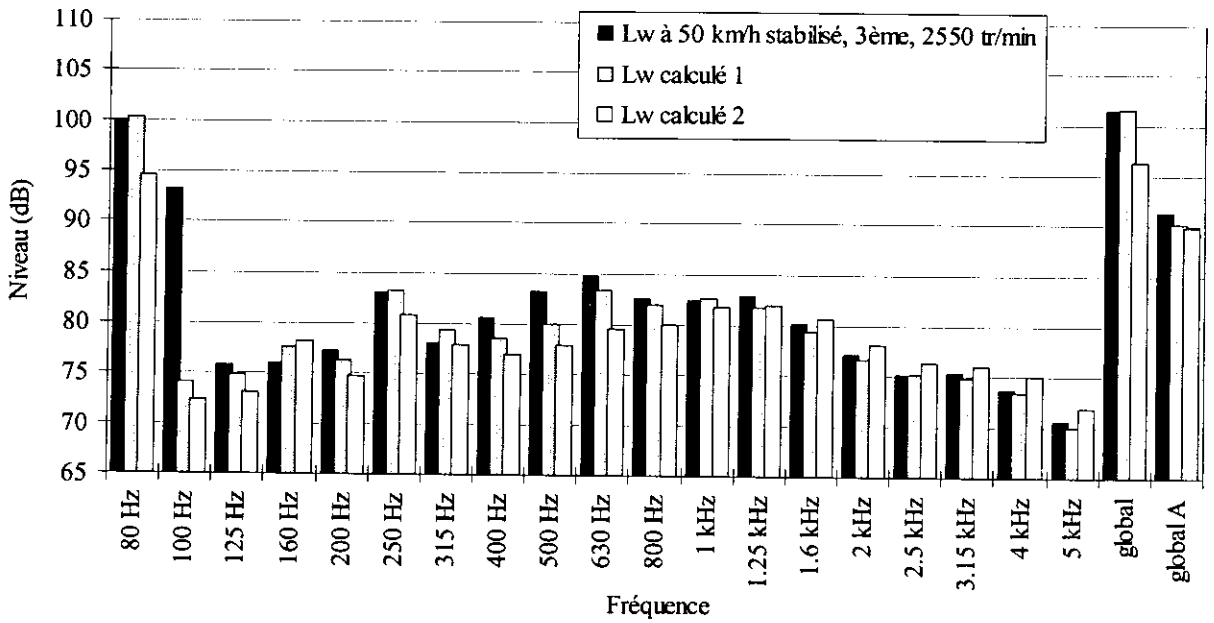

Figure 3.26 : Comparaison entre les niveaux mesurés pour la Renault Clio, les niveaux calculés à partir de coefficients déterminés pour ce véhicule (Lw calculé 1) et les niveaux calculés à partir de coefficients moyens (Lw calculé 2). Le cas considéré est un passage à la vitesse stabilisée de 50 km/h sur le troisième rapport.

Nous constatons les phénomènes suivants : sachant que les coefficients du tableau 3.6 sont déterminés pour le seul véhicule Renault Clio 1.4l. il est logique que Lw calculé 1 soit plus précis. Néanmoins, avec des coefficients moyens pour cinq véhicules essence, l'ajustement avec la mesure reste correct. Le seul bémol est la raie fondamentale (bande 80 Hz) incorrectement modélisée dans ce cas précis, ce qui n'est pas systématique. Dans la bande 100 Hz, on constate le phénomène mis en avant dans le paragraphe précédent, c'est-à-dire un transfert d'énergie important sur la bande tiers d'octave voisine.

3.3.3. Comparaison avec les modèles d'Oshino & Tachibana et Favre

Même si, comme nous l'avons mentionné au paragraphe 3.1.2.2, il est difficile de comparer notre modèle à celui d'Oshino et Tachibana (cf. § 3.1.1) d'une part, et de Favre (cf. § 3.1.2) d'autre part, nous avons réuni dans le tableau suivant quelques cas prévus par les différents modèles, en régime stabilisé et fortement accéléré (valeurs maximales d'accélération relevées lors de nos essais).

Tableau 3.8 : Comparaison des trois modèles.

	Puissance acoustique (dBA) : modèle d'Oshino et Tachibana	Puissance acoustique (dBA) : modèle de Favre	Puissance acoustique (dBA) : modèle développé dans le cadre de ce travail
30 km/h stabilisé, 2nde, 2190 tr/min	85.6	92.3	85.8
30 km/h stabilisé, 1ère, 4050 tr/min	88.5	103.3	93.6
30 km/h accéléré, 1ère, 4050 tr/min	88.9	131.9	99.7
50 km/h stabilisé, 3ème, 2550 tr/min	91.5	98.9	89.9
50 km/h stabilisé, 2nde, 3650 tr/min	92.0	104.0	93.0
50 km/h accéléré, 2nde, 3650 tr/min	92.2	87.3	97.1
70 km/h stabilisé, 4ème, 2660 tr/min	96.6	100.8	95.2
70 km/h stabilisé, 3ème, 3570 tr/min	96.7	105.7	96.2
70 km/h accéléré, 3ème, 3570 tr/min	96.8	107	97.8

A la lecture de ce tableau, on constate que les valeurs obtenues avec le modèle que nous développons sont généralement comprises entre celles des deux autres modèles, tout en étant plus proche des valeurs d'Oshino et Tachibana. Les résultats de Favre dans certains cas paraissent bien élevés. On peut se poser des questions quant à leur validité aux basses vitesses et notamment en mode accéléré. De même, les écarts très faibles relevés, pour une vitesse donnée, entre les différents modes de conduite pour le modèle d'Oshino et Tachibana sont peu réalistes. A 30 km/h, on relève par exemple un écart de 3.3 dBA entre les modes de conduite extrêmes alors que notre modèle prévoit 13.9 dBA. Une idée des écarts expérimentaux nous est fournie par la figure 3.13.

3.3.4. Evolution temporelle

Au cours des paragraphes précédents, nous avons vu qu'il était possible de calculer les spectres de puissance acoustique d'un véhicule à partir de lois de régression. Les spectres déterminés précédemment sont des spectres instantanés c'est-à-dire lorsque la vitesse, le régime moteur et l'accélération sont figés. Qu'en est-il pour le passage complet d'un véhicule ? A partir des lois de régression trouvées, nous avons reconstitué le passage du véhicule Renault Clio 1.4l à 30 km/h en vitesse stabilisée puis à 30 km/h en accélération (vitesse au droit du microphone). Pour un cas (figure 3.28), nous avons également considéré le passage d'un second véhicule (Peugeot 405 lb80).
A vitesse stabilisée, la puissance acoustique est identique tout au long du passage ce qui n'est plus le cas en accélération. Il est nécessaire, dans un premier temps, de recalculer à chaque instant la vitesse puis le régime moteur (relation régime moteur-vitesse) et enfin la puissance acoustique. L'accélération est supposée constante. En calculant les diverses atténuations (géométriques et atmosphériques), il est ensuite possible de recomposer à chaque instant les niveaux mesurés au récepteur.
Des comparaisons mesure-calcul, où sont mentionnés à la fois les niveaux en dB lin et les niveaux pondérés A, sont présentées sur les figures 3.27 et 3.28.

Les niveaux globaux calculés et mesurés coïncident assez bien sur toute la durée du passage. A 70 km/h l'erreur commise est très faible. Ceci confirme les études relatées dans l'étude bibliographique (cf. § 2.2) [Favre 1983], à savoir une représentation fidèle du monopôle au fur et à mesure que la vitesse augmente (au-dessus de 30 km/h). On constate toutefois des niveaux mesurés un peu plus élevés que ceux calculés en raison de la vitesse qui elle-même est légèrement plus élevée.

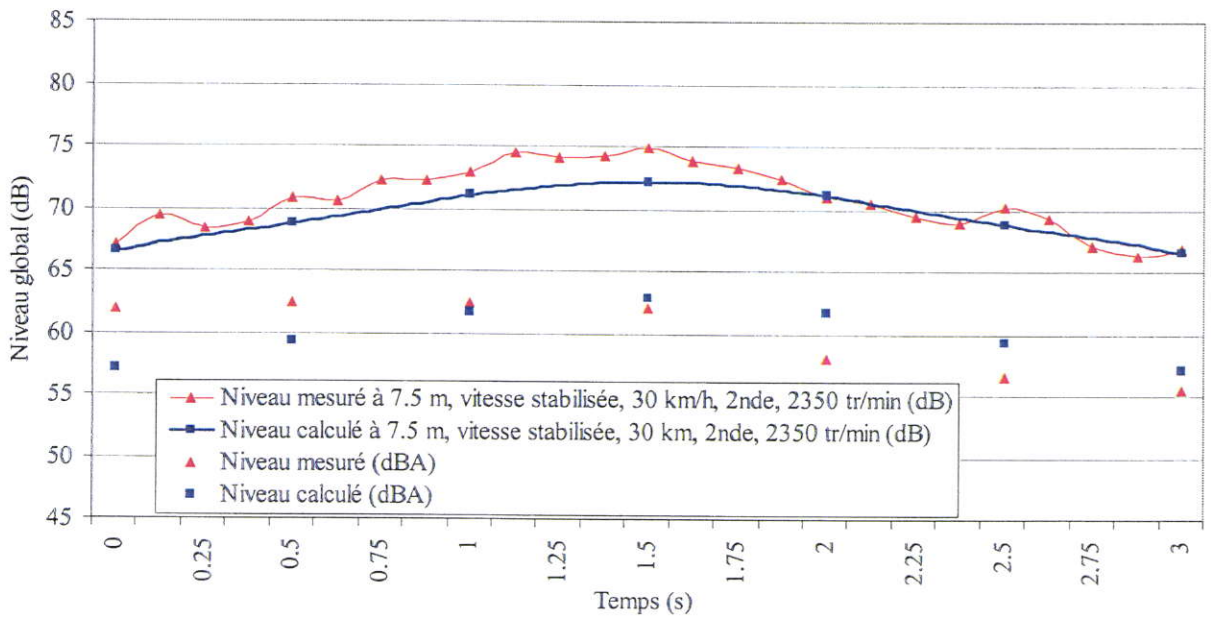

Figure 3.27 : Comparaison entre le passage réel de la Renault Clio à 30 km/h en vitesse stabilisée et le passage calculé à partir des lois de régression de puissance acoustique.

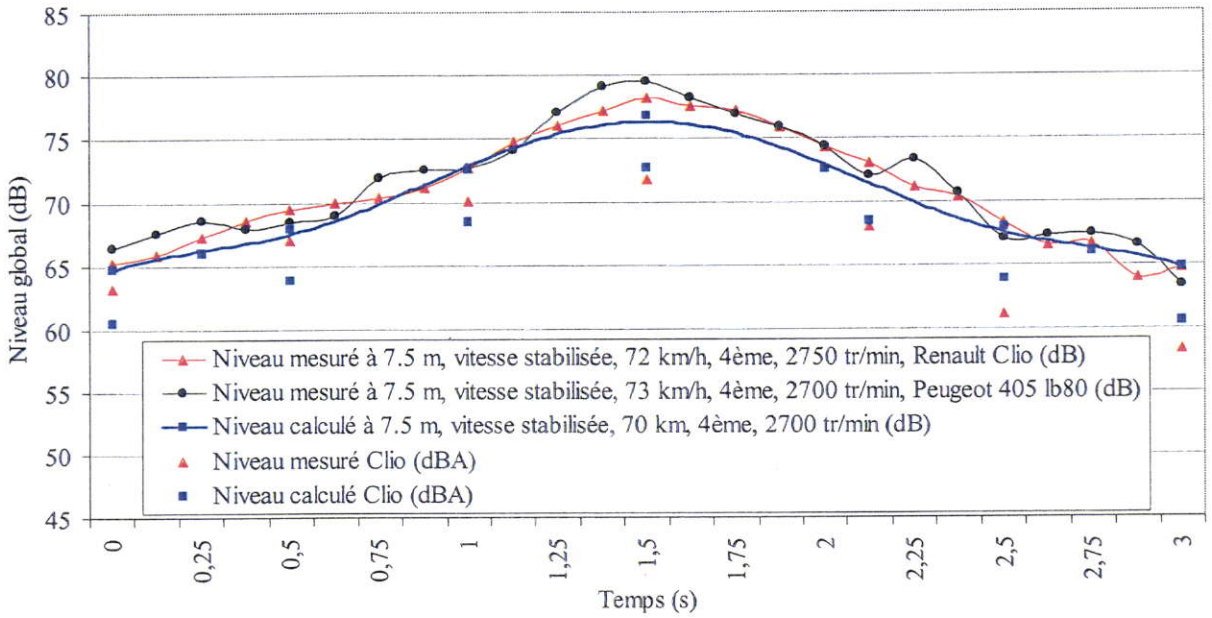

Figure 3.28 : Comparaison entre le passage réel de deux véhicules légers à 70 km/h en vitesse stabilisée et le passage calculé à partir des lois de régression de puissance acoustique.

Deux exemples avec des accélérations respectives de 1.6 et 1.4 $m.s^{-2}$, supposées constantes, sont maintenant considérés.

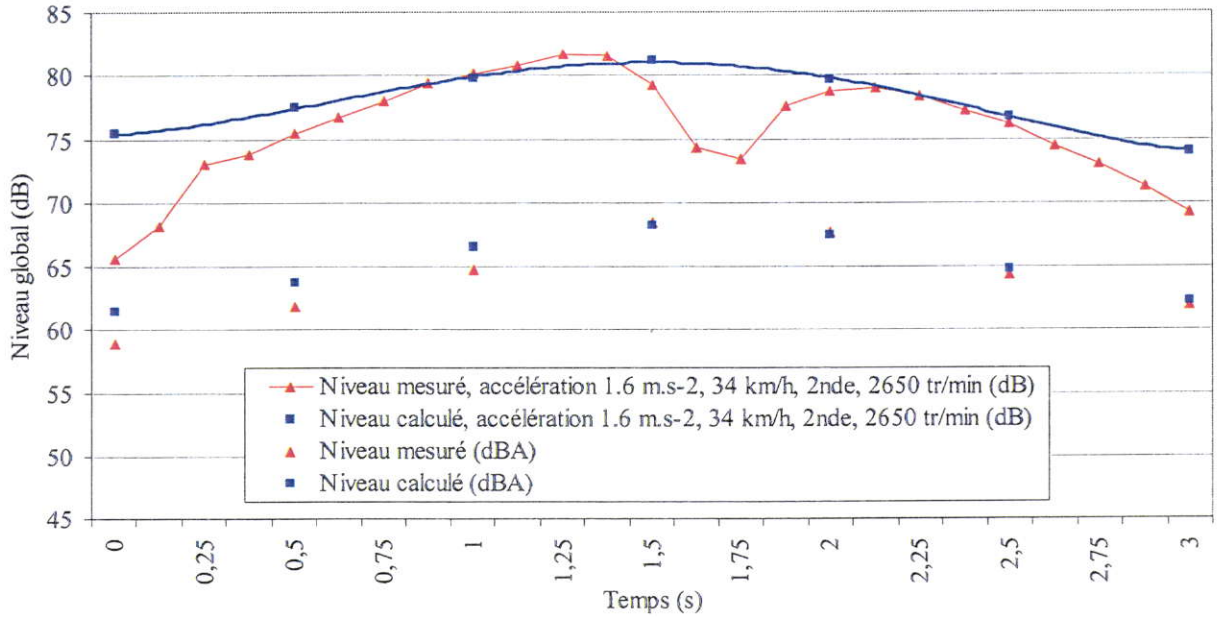

Figure 3.29 : Comparaison entre le passage réel du véhicule Renault Clio à 34 km/h en accélération et le passage calculé à partir des lois de régression de puissance acoustique.

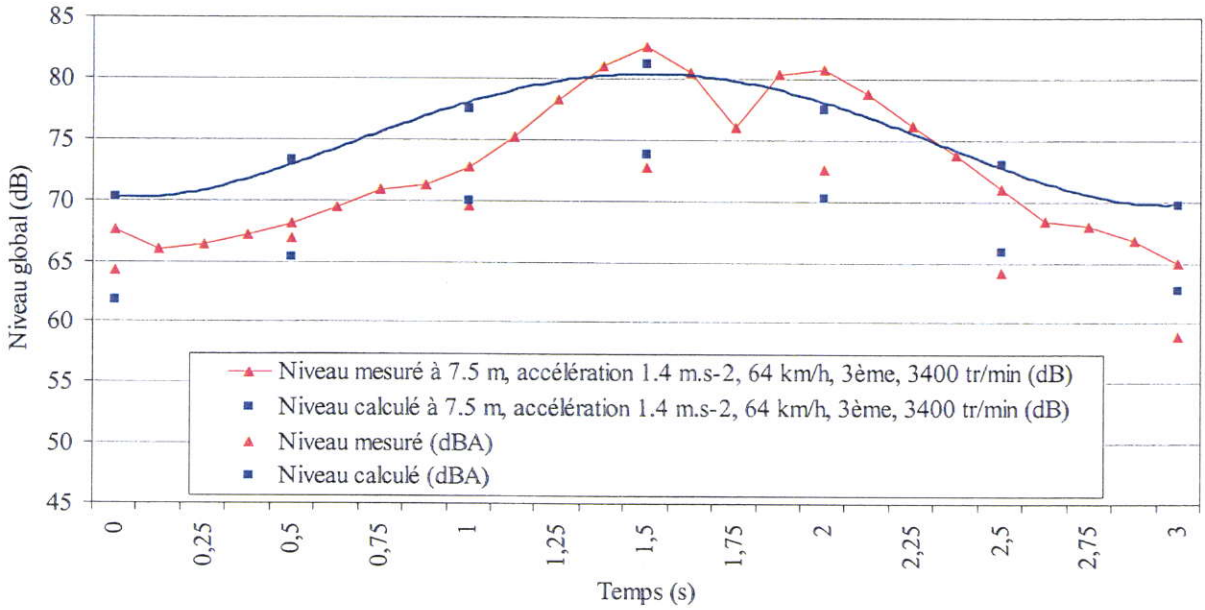

Figure 3.30 : Comparaison entre le passage réel d'un véhicule léger (Renault Clio) à 64 km/h en accélération et le passage calculé à partir des lois de régression de puissance acoustique.

Un bon ajustement général est constaté, surtout avec la pondération A où les points sont pratiquement confondus. Juste après le passage du véhicule au droit du récepteur, on observe dans les deux cas une baisse momentanée du niveau. Cette "zone d'ombre" provient sans doute de la présence d'un expérimentateur près de la borne de mesure de la vitesse[8].

En résumé, si l'on est capable d'évaluer les caractéristiques dynamiques du véhicule, il est possible d'estimer les niveaux de pression sonore en un point quelconque.

3.4. Influence d'un rond-point

3.4.1. Bruit émis par des véhicules isolés au voisinage des carrefours giratoires [Lewis & James 1978]

Les émissions sonores des véhicules à vitesse constante sont maintenant bien connues. Les relations établies entre niveau de bruit et vitesse peuvent directement être appliquées à la modélisation d'un trafic de type fluide et à vitesse constante. En régime accéléré ou décéléré, les connaissances sont plus limitées. Dans ce paragraphe sont reportées les mesures de 6471 véhicules en décélération puis accélération au voisinage de ronds-points. Deux catégories sont

[8] La borne est placée après le microphone, en raison de son angle de visée, afin d'obtenir la vitesse au droit de celui-ci. C'est pourquoi la zone d'ombre est légèrement décalée.

distinguées : les véhicules légers (moins de 1525kg) et lourds (plus de 1525kg). Les véhicules doivent être isolés pour que la mesure soit validée.
Trois sites ont été choisis. Les voies d'approche des carrefours giratoires ont une vitesse limitée respectivement à 112 km/h, 80 km/h et 96 km/h.

Les niveaux sonores indiqués sont des niveaux pondérés A.

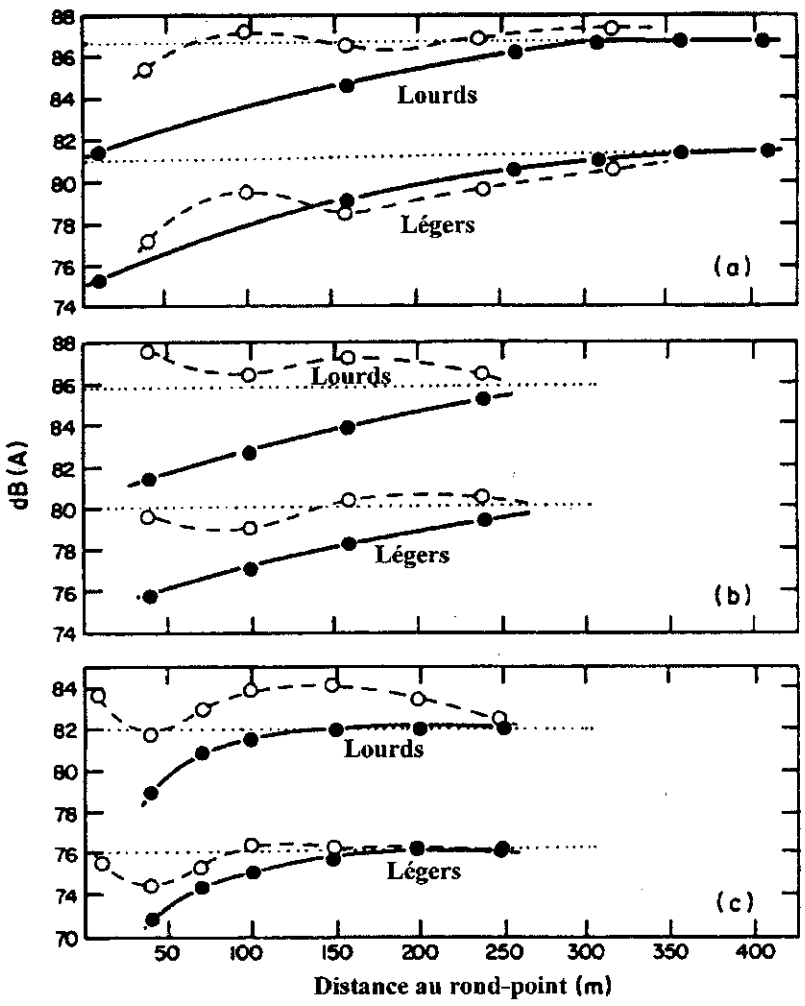

Figure 3.31 : Comparaison des résultats pour chacun des trois ronds-points.
—— décélération ; – – – accélération ; ····· moyenne à vitesse stabilisée
[Lewis & James 1978].

Plusieurs phénomènes apparaissent sur la figure 3.31 :

- la phase de décélération est assez ressemblante d'un rond-point à l'autre, tant pour les véhicules légers que les véhicules lourds,
- en accélération, les écarts entre les trois configurations sont plus prononcés, notamment pour les véhicules légers. On peut en effet obtenir, soit une diminution des niveaux sonores par rapport au cas à vitesse stabilisée (a), soit un "mixage" entre augmentation et diminution (b), (c),

- pour les véhicules lourds en phase d'accélération, on obtient le plus souvent une augmentation des niveaux sonores.

Toutes ces remarques amènent à la conclusion suivante : l'influence du rond-point sur les niveaux sonores dépend fortement de la configuration de celui-ci ainsi que de la cinématique et de la dynamique du véhicule (cf. § 3.4.2.8.2.2).

3.4.2. Bruit d'origine routière à l'approche des intersections [Kokowski & Makarewicz 1997]

3.4.2.1. Introduction

Cette étude est basée sur le concept de densité d'énergie rayonnée. Nous utiliserons le niveau sonore moyen L_{AT} et calculerons la différence entre le niveau sonore issu de véhicules ayant subi un arrêt et le niveau sonore issu de véhicules circulant à vitesse constante (§ 3.4.2.4). Dans cette étude, l'effet de sol est pris en compte en utilisant un paramètre que les auteurs détermine à partir de mesures (§ 3.4.2.5). En calculant l'énergie totale rayonnée nous pourrons aussi déterminer l'impact de l'intersection sur l'accroissement ou la diminution du niveau de pression sonore (§ 3.4.2.8).

Le modèle de prévision des niveaux sonores au voisinage des intersections est basé sur les hypothèses suivantes :

- tous les véhicules appartenant à la même catégorie sont supposés s'arrêter au même endroit et avoir le même mode de fonctionnement;
- l'émission sonore durant l'accélération et la décélération est décrite en termes de densité d'énergie rayonnée comme une fonction linéaire de la position du véhicule. L'accélération est quantifiée par le paramètre mesurable ξ. Des mesures préliminaires ont permis d'identifier le domaine de validité de cette méthode de prévision des niveaux sonores. Elle peut être utilisée pour des distances inférieures à 200 m du point d'arrêt des véhicules.

3.4.2.2. Niveau d'exposition

Lorsque le bruit de trafic consiste en un nombre d'événements similaires, qui sont produits par des véhicules appartenant à la même catégorie et ayant le même mode de fonctionnement, alors :

$$L_{AT} = L_{AE} + 10\log_{10}\{Nt_0/T\} \qquad 3.9$$

où $t_0 = 1$ s et N est le nombre d'événements pendant la période T. Le niveau d'exposition, L_{AE}, caractérise un seul événement :

$$L_{AE} = 10\log_{10}\{E/p_0^2 t_0\} \qquad 3.10$$

où $p_0 = 2.10^{-5}$ Pa. L'exposition, E, peut être calculée en intégrant le carré de la pression sonore pondérée A.

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} p_A^2(t)dt \qquad 3.11$$

Dans cette étude, nous considérons un seul sens de circulation avec 2 voies, sur lequel, dans un premier temps, un véhicule se déplace à vitesse constante v_0 (figure 3.32).

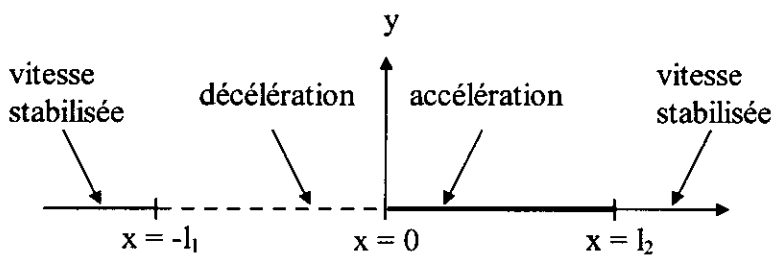

Figure 3.32 : Schéma de l'intersection.

Le point d'arrêt est le point d'abscisse x = 0. De x = -∞ à x = - l_1, les véhicules se déplacent à vitesse stabilisée, V_0. En x = - l_1, la décélération commence. En x = 0, l'accélération débute pour aboutir de nouveau, à x = l_2, à la vitesse stabilisée V_0. Si une partie des véhicules, KN ($0 \le K \le 1$), traverse l'intersection à vitesse constante et les autres, (1-K)N, sont stoppés, alors le niveau sonore moyen est donné par :

$$L_{AT} = \tilde{L}_{AT} + \Delta L_{AT} \qquad 3.12$$

où :

$$\tilde{L}_{AT} = \tilde{L}_{AE} + 10\log_{10}\{Nt_0/T\} \qquad 3.13$$

correspond au niveau sonore moyen pour un trafic à vitesse constante,

et :

$$L_{AT} = 10\log_{10}\{K + (1-K)E/\tilde{E}\} \qquad 3.14$$

On note que pour K = 1 (feu toujours vert), $\Delta L_{AT} = 0$.

Les expositions E et $\tilde{E}$ correspondent à la contribution d'un véhicule : E pour le mode avec arrêt et $\tilde{E}$ pour les conditions de vitesse stabilisée. Pour estimer la valeur de ΔL_{AT}, E et $\tilde{E}$ doivent être calculées. La connaissance de $p_A(t)$ est donc indispensable.

3.4.2.3. Effet de sol

Au-dessus d'une surface ne présentant aucun obstacle, l'atténuation sonore est affectée par :
- l'effet de sol,
- la diffusion due à la turbulence,
- l'absorption par l'air,
- la réfraction.

Près de la source, en dessous de 200 m, l'effet de sol est le facteur le plus important. Lorsque la rampe de la route est nulle et la hauteur du récepteur H_0 faible devant la distance D (figure 3.33), la pression sonore pondérée A d'une source ponctuelle omnidirectionnelle peut être définie par :

$$p_A^2 \approx \frac{W_A \rho_0 c_0}{4\pi d^2} G_A(d) \qquad 3.15$$

où W_A est la puissance acoustique pondérée A, $\rho_0 c_0$ l'impédance de l'air et :

$$d = \left[(x - x_0)^2 + D^2 \right]^{1/2} \qquad 3.16$$

est la distance horizontale entre la source S(x,0) et le récepteur $O(x_0,D)$ (figure 3.34).

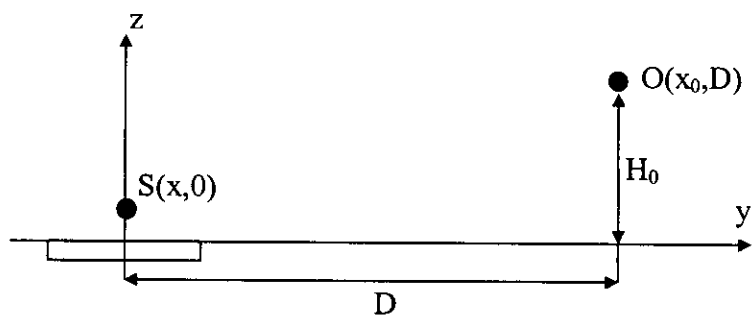

Figure 3.33 : Plan vertical montrant la distance source-récepteur.

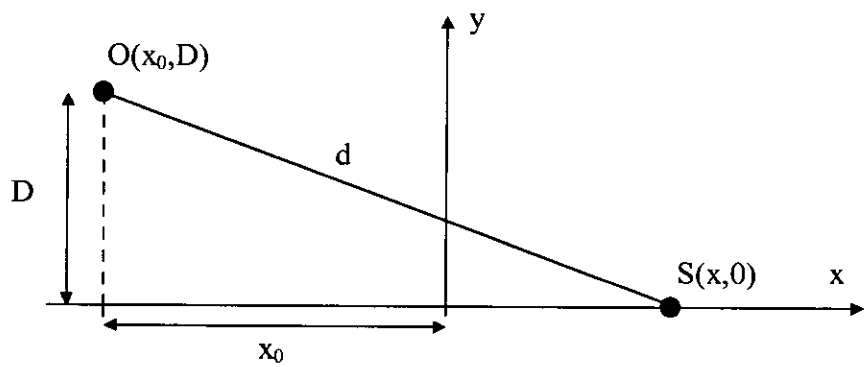

Figure 3.34 : Plan horizontal montrant la distance source-récepteur.

En utilisant la définition du niveau de pression sonore, on obtient l'atténuation excédentaire :

$$\Delta L_A = 10\log_{10} G_A(d) \qquad 3.17$$

Ici, ΔL_A peut être vue comme la mesure de l'influence du sol sur le niveau sonore issu de la source ponctuelle omnidirectionnelle. La solution exacte de ce problème est connue sous le nom de formule de Weyl-Van der Pol [Piercy & al. 1977] [Attenborough 1988]. Son approximation en champ lointain conduit à :

$$\Delta L_A \rightarrow -20\log_{10}\{d/d_0\} \qquad \text{pour } d \rightarrow \infty \qquad 3.18$$

où $d_0 = 1$ m.

Cette approximation n'est plus valable en champ proche car le véhicule ne peut plus être considéré comme une source ponctuelle infiniment petite. Il a été montré [Yamamoto K. & Yamashita 1987] :

$$\Delta L_A \rightarrow 3 \text{ dBA} \qquad \text{pour } d \rightarrow 0 \qquad 3.19$$

Les deux "conditions aux limites" précédentes sont satisfaites si l'on écrit :

$$\Delta L_A = 3 - 10\log_{10}\left\{1 + d^2/d_g^2\right\} \qquad 3.20$$

où d_g est la "distance critique". C'est en fait la distance à parcourir pour obtenir une atténuation donnée. Plus d_g sera faible, plus l'atténuation sera forte et plus le sol sera absorbant.

La figure 3.35 représente ΔL_A pour une source ponctuelle en fonction de la distance d et pour plusieurs valeurs de d_g. On note que pour $d_g = 1000$ m, au lieu d'une atténuation, on obtient une amplification : $\Delta L_A = 3$ dBA. Cette amplification résulte de réflexions sur un sol complètement réfléchissant. Pour $d_g = 140$ m et $d_g = 20$ m on obtient respectivement 3 et 6 dBA d'atténuation par doublement de distance.

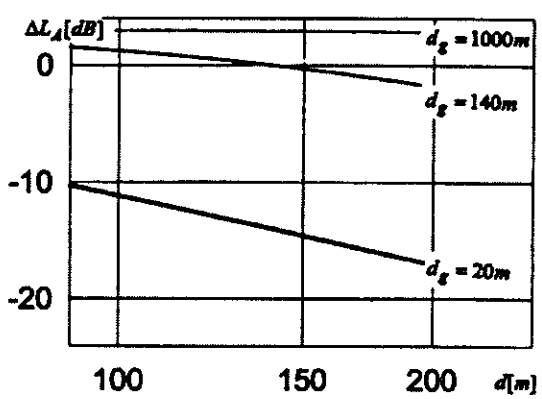

Figure 3.35 : Atténuation excédentaire ΔL_A pour les distances critiques 20, 140 et 1000 m avec 6, 3 et 0 dBA d'atténuation par doublement de distance [Kokowski & Makarewicz 1997].

Nous verrons au paragraphe 3.4.2.5 comment déterminer d_g.

En utlisant les équations 3.15 et 3.20, on obtient :

$$p_A^2 = \frac{W_A \rho_0 c_0}{4\pi d^2} \frac{2}{1 + d^2/d_g^2} \qquad 3.21$$

Lorsqu'un véhicule circule à vitesse stabilisée, les variations de $p_A^2(t)$ sont uniquement dues à l'évolution de la distance d au cours du temps. Dans le cas d'une circulation avec arrêts, en supplément de la variation de d, W_A évolue lui aussi dans le temps. La contribution du bruit provenant du segment de route (x_1,x_2) peut être calculée à l'aide de l'intégrale (eq. 3.11 et 3.21) :

$$E(x_1, x_2) = \frac{\rho_0 c_0}{2\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{W_A dx}{d^2 v[1 + (d/d_g)^2]} \qquad 3.22$$

où v (m/s) est la vitesse du véhicule au point x. En changeant la variable d'intégration (figure 3.36) :

$$x = x_0 + D\tan\phi \qquad 3.23$$

On obtient finalement (eq. 3.16, 3.22 et 3.23) :

$$E(x_1, x_2) = \frac{\rho_0 c_0}{2\pi D} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{W_A d\phi}{v[1 + (D/d_g \cos\phi)^2]} \qquad 3.24$$

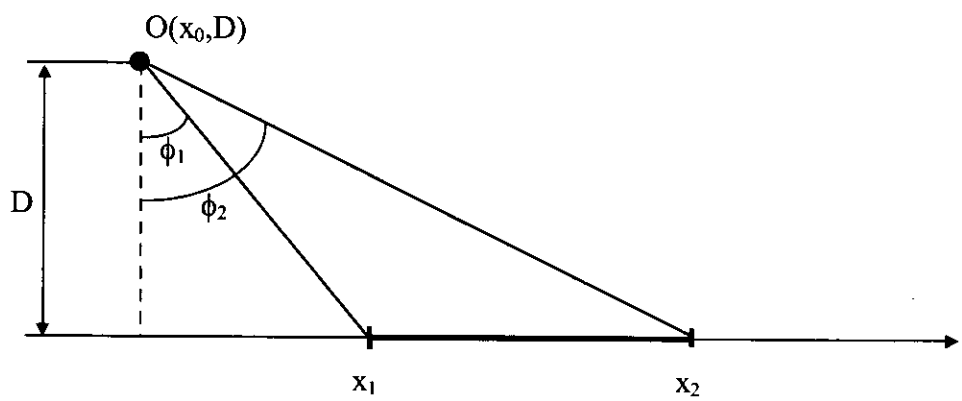

Figure 3.36 : Plan horizontal, récepteur situé en O, véhicule circulant de x_1 à x_2.

Etudions maintenant les deux types de circulation considérés : vitesse stabilisée et régime accéléré-décéléré.

3.4.2.4. Vitesse stabilisée

Si nous considérons une circulation à vitesse stabilisée, les véhicules roulent à la vitesse v_0 de $x = -\infty$ à $x = +\infty$ sans s'arrêter en $x = 0$ (feu toujours vert). Dans ces conditions, la puissance $W_A(v_0)$ reste constante et il est possible de réécrire l'intégrale 3.24 sous la forme :

$$\tilde{E} = E_0 \tilde{F}(-\pi/2, \pi/2) \qquad 3.25$$

où :

$$E_0 = \frac{W_A(v_0)\rho_0 c_0}{4 v_0 D} \qquad 3.26$$

est l'exposition à vitesse stabilisée et en champ libre et :

$$\tilde{F}(-\pi/2, \pi/2) = 2\left[1 - \frac{D}{\sqrt{D^2 + d_g^2}}\right] \qquad 3.27$$

détermine l'atténuation excédentaire.

En utilisant la définition 3.10, on obtient le niveau d'exposition à vitesse stabilisée :

$$\tilde{L}_{AE} = Lw_A(v_0) + 10\log_{10}\left\{\frac{d_0^2}{2D_0 v_0 t_0}\left[1 - \frac{D}{\sqrt{D^2 + d_g^2}}\right]\right\} \qquad 3.28$$

où $Lw_A(v_0)$ est le niveau de puissance acoustique à vitesse stabilisée.

Nous allons maintenant nous intéresser à la détermination de Lw_A et d_g.

3.4.2.5. Détermination de Lw_A et d_g

3.4.2.5.1. Méthode 1

Pour estimer la distance critique d_g, on effectue des mesures simultanées de $\tilde{L}_{AE}(D_0)$ et de $\tilde{L}_{AE}(2D_0)$ et l'on détermine la fonction M :

$$M(D_0 / d_g) = \tilde{L}_{AE}(D_0) - \tilde{L}_{AE}(2D_0) - 3\text{dB} \qquad 3.29$$

A partir de l'équation 3.28 il est possible d'obtenir une prévision du niveau d'exposition à vitesse stabilisée pour deux distances, D_0 et $2D_0$ et donc de tracer la fonction M en fonction de D_0/d_g (figure 3.37).

$$M(D_0/d_g) = 10\log_{10}\left\{1-\frac{D_0/d_g}{\sqrt{1+(D_0/d_g)^2}}\right\} - 10\log_{10}\left\{1-\frac{2D_0/d_g}{\sqrt{1+4(D_0/d_g)^2}}\right\} \qquad 3.30$$

Les mesures fournissent le membre de droite de l'équation 3.29. D_0/d_g peut donc être obtenu par lecture directe sur la figure.

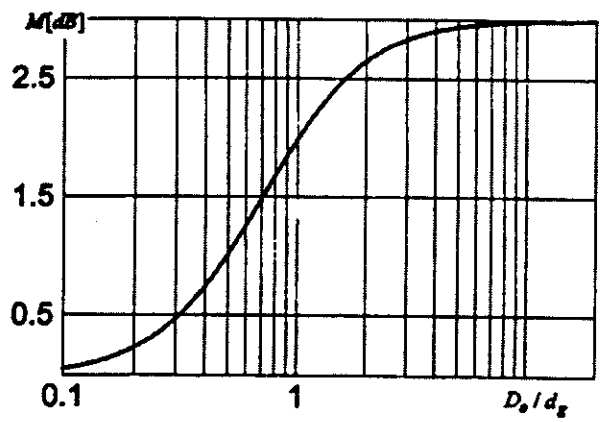

Figure 3.37 : Variations de M en fonction de la distance relative D_0/d_g.

3.4.2.5.2. Essai n°1

Deux mesures simultanées de $\tilde{L}_{AE}$ à des distances D_0 = 7.5 m et $2D_0$ = 15 m ont été effectuées. Les microphones étaient positionnés à une hauteur H_0 = 1.2 m au-dessus d'un sol à faible impédance. Les essais ont porté sur 43 véhicules légers ayant une vitesse moyenne de v_0 = 55 km/h (5 passages par véhicule). Les valeurs moyennes sur ces 215 mesures ont fourni les résultats suivants :

$$\tilde{L}_{AE}(7.5) = 75.4\text{dB}, \qquad \tilde{L}_{AE}(15) = 71.4\text{dB}$$

Donc : $M(D_0/d_g)$ = 1 dBA et d_g = 15 m.

A l'aide de l'équation 3.28, on en déduit : $Lw_A(v_0)$ = 101.6 dBA.

3.4.2.5.3. Méthode 2

Cette partie concerne toujours la détermination de Lw_A et de d_g, mais à partir des niveaux sonores moyens à vitesse stabilisée, $\tilde{L}_{AT}(D_0)$ et $\tilde{L}_{AT}(2D_0)$. En effet, la méthode 1 ne peut s'appliquer que pour un véhicule. D étant la distance du récepteur à l'axe de la voie, on obtient à l'aide des équations 3.9, 3.10, 3.25, 3.26 et 3.27 et pour une catégorie i de véhicules :

$$\tilde{L}_{AT}^{(i)} = \tilde{L}_{AE}^{(i)} + 10\log_{10}\{N_i t_0/T\} \qquad 3.31$$

où :

$$\tilde{L}_{AE}^{(i)} = 10\log_{10}\left\{\frac{W_A^{(i)}\rho_0 c}{2Dv_0 t_0 p_0^2}\left[1-\frac{D}{\sqrt{D^2+d_g^2}}\right]\right\} \qquad 3.32$$

La somme logarithmique

$$\tilde{L}_{AT} = 10\log_{10}\left(\sum 10^{L_{AT}^{(i)}/10}\right) \qquad 3.33$$

donne le niveau sonore moyen à vitesse stabilisée pour tous les véhicules passant devant le récepteur pendant la période T. Pour deux catégories de véhicules, nous obtenons :

$$\tilde{L}_{AT} = 10\log_{10}\left\{N_1\frac{W_A^{(1)}}{W_0}+N_2\frac{W_A^{(2)}}{W_0}\right\}+10\log_{10}\left\{\frac{d_0^2}{2Dv_0T}\left[1-\frac{D}{\sqrt{D^2+d_0^2}}\right]\right\} \qquad 3.34$$

où $P_0 = 10^{-12}$ W et $d_0 = 1$ m. En effectuant des mesures simultanées de $\tilde{L}_{AT}(D_0)$ et $\tilde{L}_{AT}(2D_0)$, on retrouve l'équation 3.29. On en déduit d_g (Voir essai n°1). Pour déterminer $Lw_A^{(1)}$ et $Lw_A^{(2)}$, la mesure de $\tilde{L}'_{AT}$ pour N'_1 véhicules de la catégorie 1 et pour N'_2 véhicules de la catégorie 2 est nécessaire. Connaissant $\tilde{L}_{AT}(D_0)$ et $\tilde{L}'_{AT}(D_0)$, on obtient :

$$\begin{aligned} N_1W_A^{(1)} + N_2W_A^{(2)} &= W_0 10^{[\tilde{L}_{AT}-\delta L_{AT}]/10} \\ N'_1W_A^{(1)} + N'_2W_A^{(2)} &= W_0 10^{[\tilde{L}'_{AT}-\delta L_{AT}]/10} \end{aligned} \qquad 3.35$$

où :

$$L_{AT} = 10\log_{10}\left\{\frac{d_0^2}{2D_0v_0T}\left[1-\frac{D_0}{\sqrt{D_0{}^2+d^2{}_g}}\right]\right\} \qquad 3.36$$

En mesurant, par exemple, le niveau sonore moyen, sur 1 h, du trafic à vitesse stabilisée et connaissant N_1, N_2, N'_1, N'_2 il devient possible de déterminer $W_A^{(1)}$, $W_A^{(2)}$ et par conséquent $Lw_A^{(1)}$ et $Lw_A^{(2)}$. Pour minimiser les erreurs, le nombre total de véhicules, N, doit être important (plusieurs centaines).

Dans le prochain paragraphe, nous déterminerons le terme correctif ΔL_{AT} (cf. eq. 3.12 et 3.14) qui tient compte de l'arrêt des véhicules.

3.4.2.6. Circulation avec arrêts

3.4.2.6.1. Portions à vitesse stabilisée

Comme indiqué sur la figure 3.32, un véhicule circule à la vitesse stabilisée V_0 sur deux portions : $(-\infty,-l_1)$ et $(l_2,+\infty)$. En $x = -l_1$ la décélération commence, puis le véhicule accélère en $x = 0$ pour arriver à la vitesse stabilisée V_0 en $x = l_2$. L'exposition calculée au récepteur $O(x_0,D)$ peut donc être décomposée en cinq parties :

$$E(x_0,D) = E(-\infty,-l_1) + E(-l_1,0) + E(0,0) + E(0,l_2) + E(l_2,+\infty) \qquad 3.37$$

On supposera par la suite que le bruit au ralenti E(0,0) est négligeable.

En introduisant les angles de la figure 3.7, on obtient la contribution des deux portions à vitesse stabilisée :

$$\begin{aligned} E(-\infty,-l_1) &= E_0 F(-\pi/2,-\alpha) \\ E(l_2,+\infty) &= E_0 F(\beta,\pi/2) \end{aligned} \qquad 3.38$$

où E_0 est l'exposition à vitesse stabilisée en champ libre et :

$$F(-\pi/2,-\alpha) = 1 - \frac{2}{\pi}\arctan\frac{l_1 + x_0}{D} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + d_g^2}}\left[1 - \frac{2}{\pi}\arctan\frac{l_1 + x_0}{\sqrt{D^2 + d_g^2}}\right]$$

$$F(\beta,\pi/2) = 1 - \frac{2}{\pi}\arctan\frac{l_2 - x_0}{D} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + d_g^2}}\left[1 - \frac{2}{\pi}\arctan\frac{l_2 - x_0}{\sqrt{D^2 + d_g^2}}\right] \qquad 3.39$$

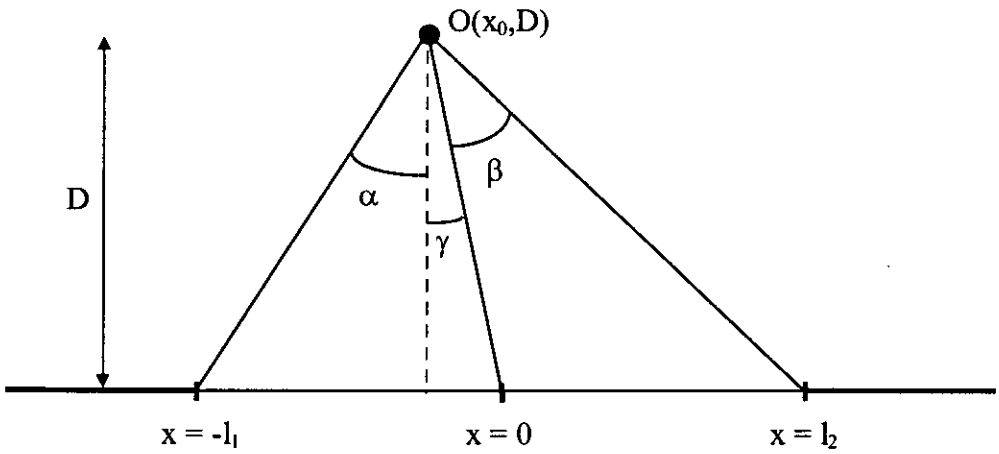

Figure 3.38 : Angles déterminant la position des portions d'accélération et de décélération.

3.4.2.6.2. Décélération

Le modèle à vitesse stabilisée est relativement simple car la puissance W_A et la vitesse v_0 restent constantes, de même que leur rapport :

$$S_0 = \frac{W_A(v_0)}{v_0} \qquad (J.m^{-1}) \qquad 3.40$$

où S_0 est la densité d'énergie rayonnée.

Lors de la phase de décélération, la puissance W_A ainsi que la vitesse varient. On introduit donc S(x) qui est fonction de la position du véhicule x :

$$S_1(x) = \frac{W_A(x)}{v(x)} \qquad 3.41$$

Les conditions limites :

$$S_1(-l_1) = S_0$$

et : $\qquad 3.42$

$$S_1(0) \approx 0$$

nous amènent, en supposant une décroissance linéaire de S(x), à :

$$S_1(x) = -S_0 x/l_1, \qquad -l_1 < x < 0 \qquad 3.43$$

L'exposition E en mode décéléré peut donc s'écrire (eq 3.23, 3.24, 3.40 et 3.43) :

$$E(-l_1,0) = E_0 F(-\alpha,\gamma) \qquad 3.44$$

avec E_0 définie équation 3.26 et :

$$F(-\alpha,\gamma) = -\frac{2}{\pi l_1}\int_{-} \frac{x_0 + D\tan\phi}{1+(D/d_g\cos\phi)^2}\,d\phi \qquad 3.45$$

représente l'influence de la décélération et du sol. On obtient :

$$F(-\alpha,\gamma) = \frac{2x_0}{\pi l_1}\left\{\arctan\frac{x_0}{D} - \arctan\frac{x_0+l_1}{D} + \frac{D}{\sqrt{D^2+d_g^2}}\left[\arctan\frac{l_1+x_0}{\sqrt{D^2+d_g^2}} - \arctan\frac{x_0}{\sqrt{D^2+d_g^2}}\right]\right\}$$
$$-\frac{D}{\pi l_1}\ln\left\{\frac{(l_1-x_0)^2+D^2+d_g^2}{x_0^2+D^2+d_g^2}\,\frac{x_0^2+D^2}{(l_1+x_0)^2+D^2}\right\} \qquad 3.46$$

3.4.2.6.3. Accélération

Pendant l'accélération $(0,l_2)$, la densité d'énergie rayonnée n'est pas uniforme. On écrit :

$$S_2(x) = \frac{W_A(x)}{v(x)} \qquad 3.47$$

De plus :

$$S_2(l_2) = S_0 \qquad 3.48$$

Généralement, en x = 0, une rapide augmentation du régime moteur entraîne une forte hausse de $W_A(0)$. Comme la vitesse est encore relativement faible, on peut s'attendre à :

$$S_2(0) > S_0 \qquad 3.49$$

En supposant, comme dans le cas de la décélération, que S_2 est linéaire, on obtient :

$$S_2(x) = S_0\left[1+\xi(1-x/l_2)\right], \qquad 0 < x < l_2 \qquad 3.50$$

La longueur l_2 est fonction du paramètre ξ. La condition 3.49 est vérifiée lorsque ξ est positif. Cependant, on ne peut pas exclure le cas d'une faible accélération où $S_2(0) < S_0$. Ceci est en accord avec l'équation 3.50 lorsque ξ est négatif.
La figure 3.39 montre l'allure de $S_2(x)$ pour une faible ($-1 \le \xi \le 1$), moyenne ($1 < \xi < 2$) et forte ($\xi \ge 2$) accélération. Dans le cas le plus favorable, $\xi = -1$, la densité d'énergie rayonnée $S_2(x)$ croît linéairement de 0 (x = 0) à S_0 (x = l_2).
Comme pour $Lw_A(V_0)$ et d_g, le paramètre d'accélération ξ est ajusté empiriquement.

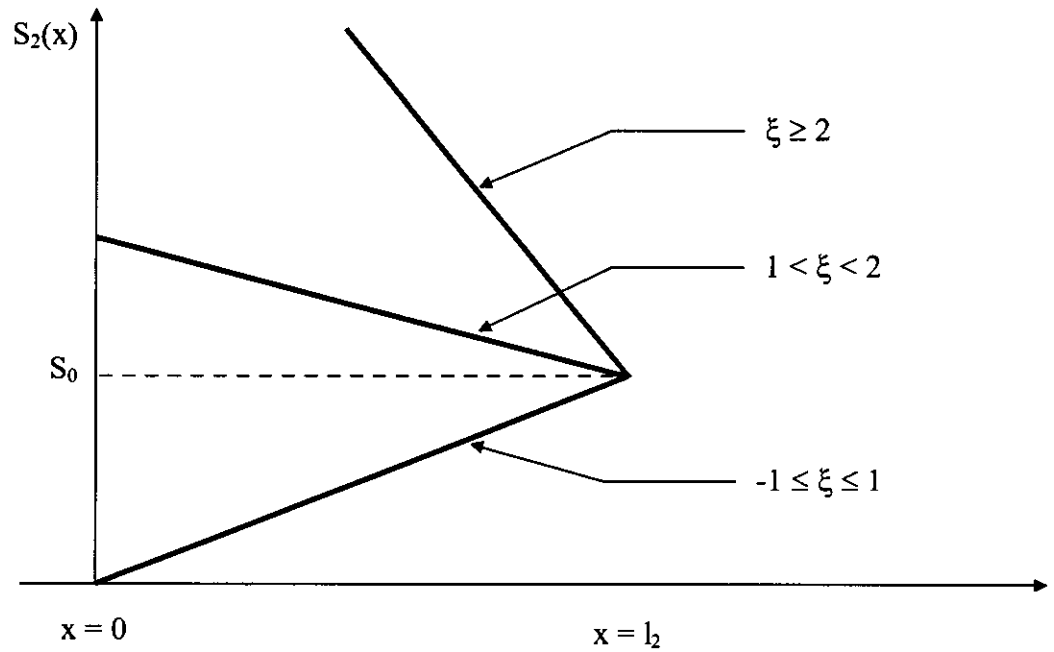

Figure 3.39 : Densité d'énergie rayonnée, $S_2(x)$, pour une faible ($-1 \leq \xi \leq 1$), moyenne ($1 < \xi < 2$) et forte ($\xi > 2$) accélération.

De façon identique à la démarche conduite pour la décélération, on peut écrire :

$$E_A(0,l_2) = E_0 F(\gamma,\beta) \qquad 3.51$$

où E_0 quantifie le bruit à vitesse stabilisée, en champ libre et :

$$F(\gamma,\beta) = \frac{2}{\pi}\int_{\gamma}^{\beta} \frac{1+ (l_2 - x_0 - D\tan\phi)/l_2}{1+\left(D/d_g\cos\phi\right)^2} d\phi \qquad 3.52$$

tient compte de l'accélération du véhicule et de l'effet de sol. Après quelques calculs, il vient :

$$F(\gamma,\beta) = F_1(\gamma,\beta) + \xi F_2(\gamma,\beta) \qquad 3.53$$

où :

$$F_1(\gamma,\beta) = \frac{2}{\pi}\left\{\arctan\frac{l_2 - x_0}{D} + \arctan\frac{x_0}{D} - \frac{D}{\sqrt{D^2+d_g^2}}\left[\arctan\frac{l_2 - x_0}{\sqrt{D^2+d_g^2}} + \arctan\frac{x_0}{\sqrt{D^2+d_g^2}}\right]\right\} \qquad 3.54$$

$$F_2(\gamma,\beta) = \left(1 - \frac{x_0}{l_2}\right)F_1(\gamma,\beta) + \frac{D}{\pi l_2}\ln\left\{\frac{(l_2 - x_0)^2 + D^2 + d_g^2}{x_0^2 + D^2 + d_g^2}\cdot\frac{x_0^2 + D^2}{(l_2 - x_0)^2 + D^2}\right\} \qquad 3.55$$

On note que sur un sol complètement réfléchissant ($d_g \rightarrow \infty$), les équations 3.54 et 3.55 se simplifient :

$$F_1(\gamma,\beta) = \frac{2}{\pi}\left\{\arctan\frac{l_2 - x_0}{D} + \arctan\frac{x_0}{D}\right\} \qquad 3.56$$

$$F_2(\gamma,\beta) = \frac{2}{\pi}\left(1 - \frac{x_0}{l_2}\right)\left\{\arctan\frac{l_2 - x_0}{D} + \arctan\frac{x_0}{D}\right\} + \frac{D}{\pi l_2}\ln\left\{\frac{x_0^2 + D^2}{(l_2 - x_0)^2 + D^2}\right\} \qquad 3.57$$

3.4.2.7. Détermination de ξ

3.4.2.7.1. Méthode 1

On suppose que $L^*_{AE}(0,l_2)$ est une mesure du niveau d'exposition lors d'une accélération pour un récepteur positionné en x = x_0 = 0 (figure 3.40). En combinant les équations 3.10, 3.26, 3.51 et 3.53 à 3.55, on obtient :

$$L^*_{AE}(0,l_2) = Lw_A(v_0) + 10\log_{10}\left\{\frac{d_0^2}{4Dv_0t_0}[F_1 + F_2]\right\} \qquad 3.58$$

où :

$$F_1(0,D,l_2) = \frac{2}{\pi}\left\{\arctan\frac{l_2}{D} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + d_g^2}}\arctan\frac{l_2}{\sqrt{D^2 + d_g^2}}\right\} \qquad 3.59$$

$$F_2(0,D,l_2) = F_1(0,D,l_2) + \frac{D}{\pi l_2}\ln\left\{\frac{l_2^2 + D^2 + d_g^2}{D^2 + d_g^2}\frac{D^2}{l_2^2 + D^2}\right\} \qquad 3.60$$

Il est maintenant possible de déterminer ξ par la relation suivante :

$$\xi = \frac{4Dv_0t_0}{d_0^2F_2(0,D,l_2)}10^{\left[L^*_{AE} - Lw_A(v_0)\right]/10} - \frac{F_1(0,D,l_2)}{F_2(0,D,l_2)} \qquad 3.61$$

où : d_0 = 1 m et t_0 = 1 s.

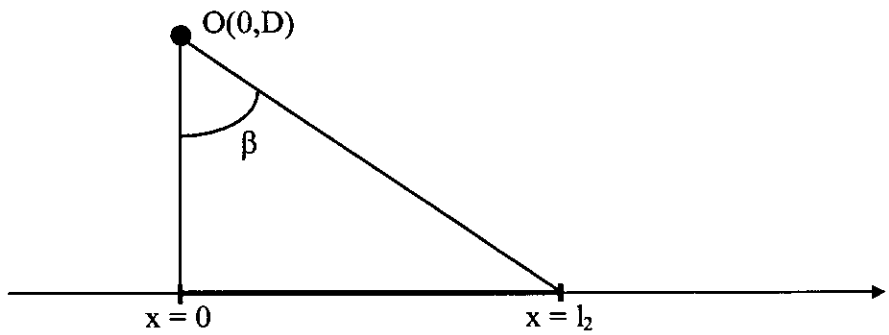

Figure 3.40 : Le récepteur O ($x_0 = 0$) est placé en face du point de départ de l'accélération.

3.4.2.7.2. Essai n°2

Les mêmes véhicules que ceux de l'essai n°1, sur le même site, ont été utilisés pour la détermination de ξ. Chaque véhicule commence à accélérer en x = 0 et effectue 5 passages. Le microphone est positionné en x = 0, à une distance D = 7.5 m de l'axe de la voie et à une hauteur H_0 = 1.2 m au-dessus d'un sol très absorbant (d_g = 0). La distance d'accélération est l_2 = 90 m. Le moyennage issu des 215 mesures est : L^*_{AE} = 75.9 dBA. Par conséquent : F_1 = 0.55 et F_2 = 0.51. Avec la puissance trouvée précédemment (§ 3.4.2.5.2), $Lw_A(v_0)$ = 101.6 dBA, on obtient : ξ = 1.3.

3.4.2.7.3. Méthode 2

La méthode 1 requiert des conditions spéciales : le niveau d'exposition, L^*_{AE}, doit être mesuré lorsqu'un seul véhicule accélère. Pour être plus réaliste, imaginons que l'on mesure le niveau sonore moyen, L^*_{AT}, provenant de plusieurs véhicules appartenant à la même catégorie. Si, pendant la durée T de mesure, KN véhicules passent à vitesse stabilisée et (1-K)N s'arrêtent au feu rouge alors (eq. 3.10 et 3.12) :

$$L^*_{AT} = 10\log_{10}\left\{\frac{K\tilde{E}}{p_0^2 t_0} + \frac{(1-K)E}{p_0^2 t_0}\right\} + 10\mathrm{Log}\left\{\frac{Nt_0}{T}\right\} \qquad 3.62$$

où $\tilde{E}$ représente le niveau d'exposition à vitesse stabilisée et en champ libre et :

$$E = E_0\left[F(-\pi/2, -\alpha) + F(-\alpha, \gamma) + F_1(\gamma, \beta) + \xi F_2(\gamma, \beta) + F(\beta, \pi/2)\right] \qquad 3.63$$

le niveau d'exposition, pour la circulation avec arrêts, d'un véhicule.

Le paramètre d'accélération est obtenu à l'aide de la relation :

$$\xi = \frac{A - B}{F_2(\gamma, \beta)} \qquad 3.64$$

où :

$$A = \frac{4Dv_0T}{(1-K)Nd_0^2} 10^{\left[L^*_{AE} - Lw_A(v_0)\right]/10} \qquad 3.65$$

$$B = \frac{K}{1-K}\tilde{F}(-\pi/2, \pi/2) + F(-\pi/2, -\alpha) + F_1(\gamma, \beta) + F(\beta, \pi/2) \qquad 3.66$$

Ces expressions sont utilisables pour NK ≥ 1, c'est-à-dire lorsqu'un véhicule au moins, s'arrête pendant le temps T de mesure.

3.4.2.8. Effet de l'arrêt sur les niveaux sonores

3.4.2.8.1. Energie totale rayonnée

La variation de l'énergie totale rayonnée est un paramètre important lorsque l'on compare les effets globaux de tel ou tel plan de circulation sur le niveau de bruit.

La figure 3.41 reproduit un exemple de variations de S(x).

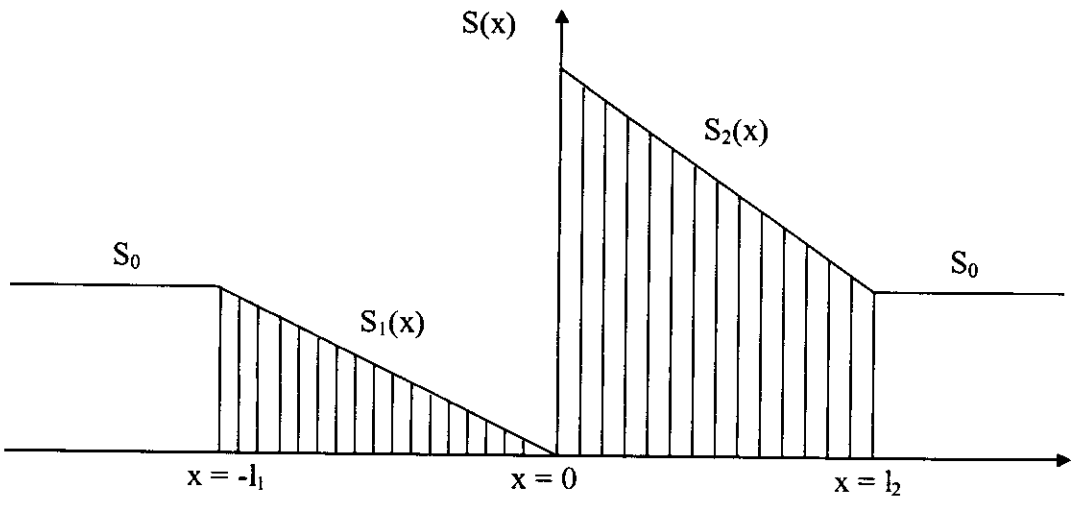

Figure 3.41 : Densité d'énergie rayonnée pour le type de circulation avec arrêt.

S(x) représente la densité d'énergie rayonnée (énergie rayonnée par la "route" par unité de longueur). L'intégrale :

$$e = \int_{-l_1}^{l_2} S(x)dx \qquad 3.67$$

représente donc l'énergie totale rayonnée par la portion $(-l_1,l_2)$. On en déduit (eq. 3.43, 3.50 et 3.67) :

$$e = S_0\left[\frac{l_1}{2} + l_2 + \xi\frac{l_2}{2}\right] \qquad 3.68$$

La valeur de e est représentée figure 3.41 par l'aire hachurée. Lorsque le véhicule ne subit pas d'arrêt, la valeur de $\tilde{e}$ pour la portion de route $(-l_1,l_2)$ est représentée par l'aire du rectangle de la figure 3.42.

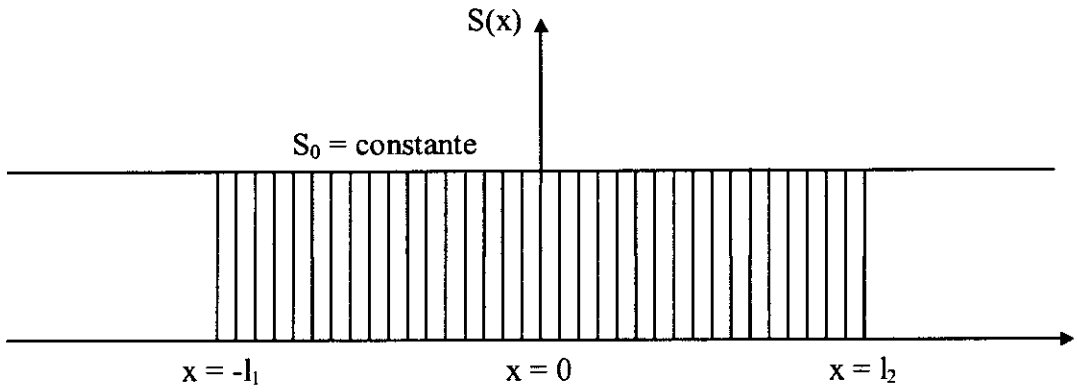

Figure 3.42 : Densité d'énergie rayonnée pour le type de circulation à vitesse stabilisée.

On obtient :

$$\tilde{e} = S_0[l_1 + l_2] \qquad 3.69$$

Si $e > \tilde{e}$, on peut affirmer que l'arrêt du véhicule augmente le niveau de bruit. Les équations 3.68 et 3.69, pour un seul passage, conduisent à :

$$\xi\frac{l_2}{l_1} > 1 \qquad 3.70$$

Les distances l_1 et l_2 dépendent de la vitesse V_0. Si cette dernière est relativement faible, $l_1 \approx l_2$. Par conséquent, l'augmentation ou l'affaiblissement du niveau de bruit dépend de la valeur du paramètre d'accélération ξ. Pour une accélération usuelle $(1 < \xi < 2)$ et forte $(\xi \geq 2)$, le bruit issu de l'arrêt est supérieur au bruit à vitesse stabilisée. Au contraire, pour une faible accélération $(-1 \leq \xi \leq 1)$ on a : $e < \tilde{e}$, soit :

$$\xi\frac{l_2}{l_1} < 1 \qquad 3.71$$

Les inégalités 3.70 et 3.71 ne sont pas les seuls critères d'augmentation du bruit. L'idée de zone d'influence est plus illustrative.

3.4.2.8.2. Zone d'influence

3.4.2.8.2.1.Niveau d'exposition L_{AE}

A l'aide de l'expression 3.10 et de celle obtenue à vitesse stabilisée le rapport des expositions $E / \tilde{E}$ s'écrit :

$$E / \tilde{E} = 10^{\Delta L_{AE}/10} \qquad 3.72$$

Pour laquelle la différence :

$$\Delta L_{AE}(x_0, D) = L_{AE}(x_0, D) - \tilde{L}_{AE}(D) \qquad 3.73$$

sera examinée plus loin.

L'expression du niveau d'exposition à vitesse stabilisée, $\tilde{L}_{AE}$, est déjà connue (eq. 3.28). Pour le mode avec arrêt, on obtient (eq. 3.10, 3.13, 3.25, 3.53 et 3.63) :

$$L_{AE} = Lw_A(v_0) + 10\log_{10}\left\{\frac{d_0^2}{4Dv_0t_0}\left[F(-\pi/2,-\alpha) + F(-\alpha,\gamma) + F(\gamma,\beta) + F(\beta,\pi/2)\right]\right\} \qquad 3.74$$

Finalement :

$$L_{AE}(x_0, D) = 10\log_{10}\left\{\frac{F(-\pi/2,-\alpha) + F(-\alpha,\gamma) + F(\gamma,\beta) + F(\beta,\pi/2)}{\tilde{F}(-\pi/2,\pi/2)}\right\} \qquad 3.75$$

La différence ΔL_{AE}, en fonction de x_0, est représentée sur la figure 3.43 pour deux valeurs de D.

Il est à noter que ΔL_{AE} s'affaiblit avec la distance. On constate que, conformément à l'intuition, $\Delta L_{AE} < 0$ pendant la phase de décélération et $\Delta L_{AE} > 0$ pendant l'accélération ($\xi = 1.5$). L'allure de ΔL_{AE} est fortement corrélée à celle de S(x) et dépend du paramètre d'accélération ξ (figure 3.44).

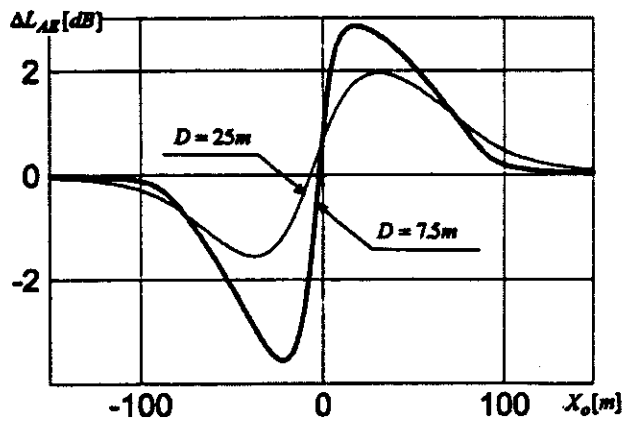

Figure 3.43 : Différence des niveaux d'exposition, ΔL_{AE}, avec $d_g = 140$ m, $\xi = 1.5$, $l_1 = l_2 = 90$ m à des distances D = 7.5 m et D = 25 m de l'axe de la voie.

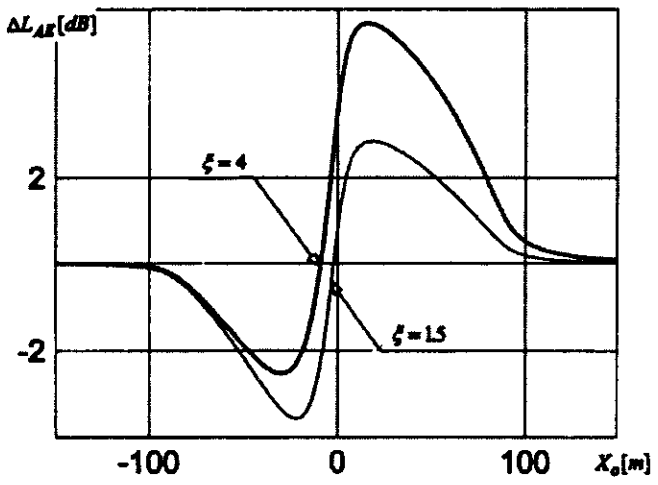

Figure 3.44 : Influence du paramètre d'accélération ξ, $d_g = 140$ m, $l_1 = l_2 = 90$m, D = 7.5 m.

La figure 3.45 montre que les caractéristiques du sol n'ont pas une grande importance. On peut dire que l'influence de l'arrêt sur le bruit de trafic est indépendante des caractéristiques du sol.

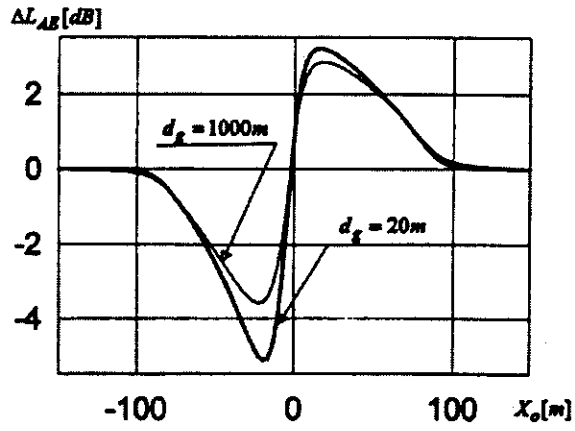

Figure 3.45 : Influence du sol sur ΔL_{AE}. $l_1 = l_2 = 90$ m, D = 7.5 m, $\xi = 1.5$ pour un sol absorbant ($d_g = 20$ m) et réfléchisant ($d_g = 1000$ m).

Par la suite, on ne s'intéressera pas à l'influence de l'arrêt lorsque la valeur absolue de ΔL_{AE} sera inférieure à 2 dB.

Les points du plan (x,y) qui satisfont l'équation :

$$\left|\Delta L_{AE}(x_0, D)\right| = 2\text{dB} \qquad 3.76$$

définissent la bordure de la zone d'influence.

L'équation :

$$\Delta L_{AE}(x_0, D) = -2\text{dB} \qquad 3.77$$

définit la zone de décélération et :

$$\Delta L_{AE}(x_0, D) = 2\text{dB} \qquad 3.78$$

celle d'accélération.

La figure 3.46 représente les deux zones sur un sol herbeux ($d_g = 140$ m) pour une accélération normale ($\xi = 1.5$) et pour $l_1 = l_2 = 90$ m. On note que l'aire de la zone d'accélération est peu supérieure à l'aire de décélération. Ceci est en accord avec la condition 3.70 : pour $l_1 = l_2$, on peut dire que $\xi = 1.5$ est un peu plus grand que 1.

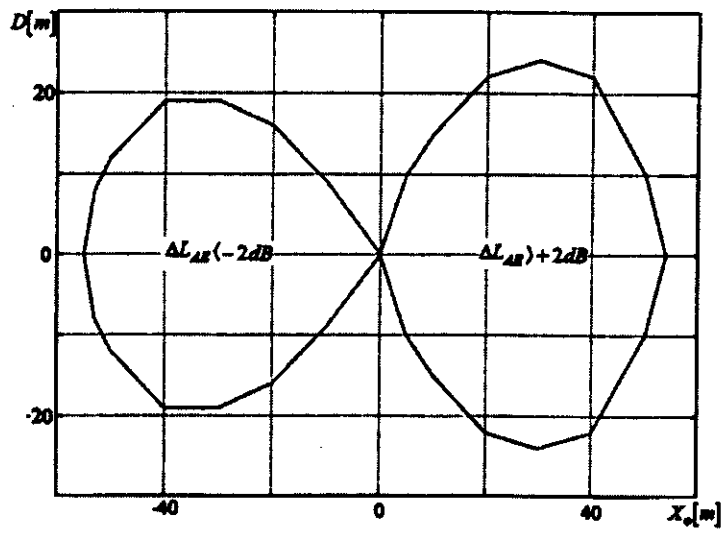

Figure 3.46 : Zones d'accélération et de décélération pour une accélération normale ($\xi = 1.5$) et pour d_g=140 m, $l_1 = l_2 = 90$ m.

La situation change radicalement lorsque l'accélération est très forte : $\xi = 4$. La zone d'accélération est alors 15 fois plus grande que la zone de décélération. Sans aucun doute, on peut affirmer que, pour $\xi = 4$, l'arrêt augmente le niveau de bruit (figure 3.47).

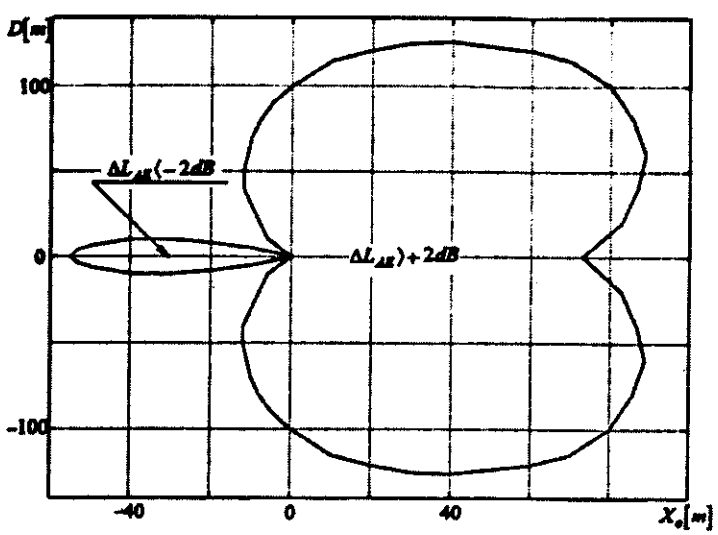

Figure 3.47 : Zones d'accélération et de décélération pour une forte accélération ($\xi = 4$) et pour d_g=140 m, $l_1 = l_2 = 90$ m.

L'idée de zone d'influence est fondée sur l'hypothèse d'une mesure de bruit par le niveau d'exposition, L_{AE}. Ceci est correct lorsque le trafic est si faible que chaque véhicule arrive isolé devant le microphone. Lorsque plusieurs véhicules se présentent en même temps, il convient d'utiliser le niveau sonore moyen, L_{AT}.

3.4.2.8.2.2.Niveau sonore moyen

Comme pour les niveaux d'exposition (eq. 3.73), on introduit la différence entre le niveau sonore moyen pour un trafic avec arrêt, L_{AT}, et le niveau sonore moyen pour un trafic à vitesse constante, $\widetilde{L}_{AT}$:

$$\Delta L_{AT}(x_0, D) = L_{AT}(x_0, D) - \widetilde{L}_{AT}(D) \qquad 3.79$$

En utilisant les équations 3.14 et 3.72, on obtient :

$$L_{AT} = 10\log_{10}\left\{K + (1-K)10^{\Delta L_{AE}/10}\right\} \qquad 3.80$$

Si, pendant la période T, tous les véhicules s'arrêtent (K = 0) en x = 0, alors :

$$\Delta L_{AT}(x_0, D) = \Delta L_{AE}(x_0, D) \qquad 3.81$$

Ceci est vrai lorsque le trafic n'est pas congestionné.

Dans ces conditions, les conclusions relatives à l'effet de la distance D (figure 3.43), de l'accélération ξ (figure 3.44) et du sol (figure 3.45) restent valables. En particulier, pour K = 0, Les figures 3.46 et 3.47 montrent les zones de décélération et d'accélération dont les bordures sont définies par $|\Delta L_{AT}| = 2\text{dB}$.

Si l'on suppose maintenant que KN véhicules passent à vitesse stabilisée, l'augmentation de K aplanit les variations de $\Delta L_{AT}(x_0)$ (figure 3.48). On peut dire que pour K > 0.8, l'effet de l'arrêt peut être négligé et le modèle à vitesse stabilisée peut être appliqué.

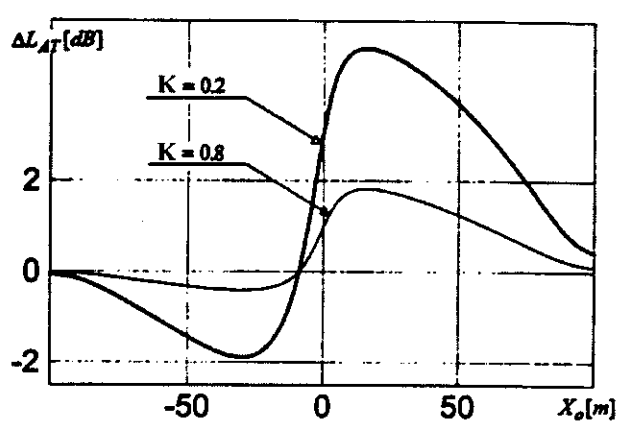

Figure 3.48 : Différence entre les niveaux sonores moyens, ΔL_{AT}, avec d_g = 140 m, $l_1 = l_2$ = 90 m, ξ = 4, D = 7.5 m pour K = 0.2 et K = 0.8.

Intéressons-nous maintenant aux zones d'influence pour un pourcentage quelconque de véhicules passant à vitesse stabilisée. les bordures des zones sont définies par :

$$\left|\Delta L_{AT}(x_0, D)\right| = 2\text{dB} \qquad 3.82$$

La figure 3.49 montre les bordures des zones d'influence.

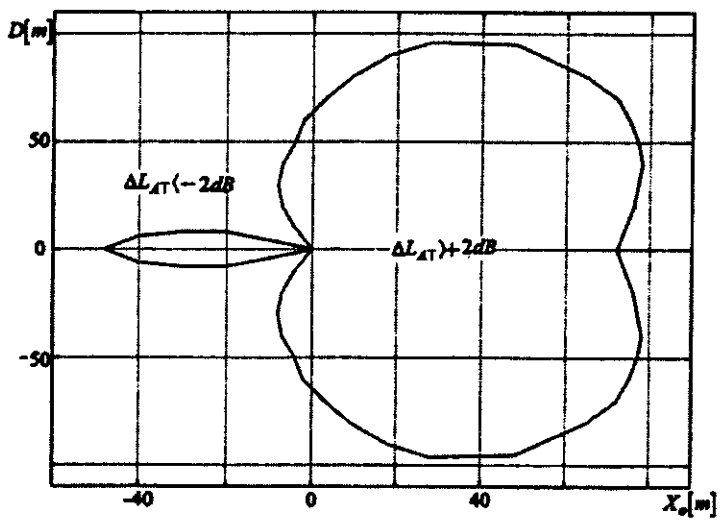

Figure 3.49 : Zone de décélération, $\Delta L_{AT} < -2$ dB, et zone d'accélération, $\Delta L_{AT} > 2$ dB pour un faible pourcentage de véhicules à vitesse stabilisée ($k = 0.2$) avec $d_g = 140$ m, $l_1 = l_2 = 90$ m, $\xi = 4$.

Pour K = 0, l'égalité 3.81 est vérifiée. Les figures 3.47 et 3.49 peuvent donc servir à déterminer la dépendance du pourcentage de véhicules à vitesse stabilisée, K, sur l'aire des zones d'influence. L'augmentation de K a pour effet de réduire l'aire de la zone d'accélération. La réduction de la zone de décélération est moins évidente.
Lorsque la zone d'accélération est plus grande que celle de décélération, l'arrêt des (1-K)N véhicules provoque une augmentation des niveaux de bruit.

Malgré certaines approximations discutables comme la décroissance linéaire de la quantité S(x) en fonction de x (v tend vers 0 en décélération contrairement à W_A), l'étude de Kokowski et Makarewicz amène à la conclusion suivante : que l'on utilise le niveau d'exposition L_{AE} ou le niveau sonore moyen L_{AT}, l'augmentation totale du niveau de bruit est fonction de la cinématique de l'arrêt (l_1, l_2) et de sa dynamique (ξ), ce que nous avions déjà remarqué au paragraphe § 3.4.1 [Lewis & Jones 1978]. Les paramètres dynamiques sont justement abordés ci-dessous.

3.4.3. Campagne de mesures en site réel : influence d'un rond-point

En Mai 1999, a été réalisée, sur l'île Beaulieu (Boulevard Barthou) à Nantes (site routier réel), une campagne de mesures visant à étudier l'impact d'un rond-point en site urbain, sur le comportement des véhicules et par voie de conséquence sur les niveaux sonores. Le site choisi était "ouvert" afin d'exclure l'influence éventuelle de bâtiments. Ces mesures ont été réalisées en collaboration avec le LRPC Blois et la Ville de Nantes. A cette occasion, nous disposions de sept véhicules à motorisation essence dont cinq issus de la campagne de mesures précédente (cf. § 3.3.2) :

- 2 Renault Clio (celle du LCPC utilisée habituellement et lb 68),
- 1 Peugeot 106 (lb 32),
- 2 Peugeot 405 (lb 80 et lb 1),
- 2 Renault Supercinq (Ville de Nantes). Ces deux véhicules ne sont pas présents pour la totalité des essais.

Les véhicules arrivent lancés devant un premier microphone situé à 80 m en amont du rond-point, commencent à décélérer (deuxième microphone à 45 m puis troisième à 30 m), amorcent le rond-point (quatrième microphone à 0 m) et enfin réaccélèrent (cinquième microphone à 30 m). Le schéma 3.50 et la photographie 3.51 résument le trajet d'un véhicule.

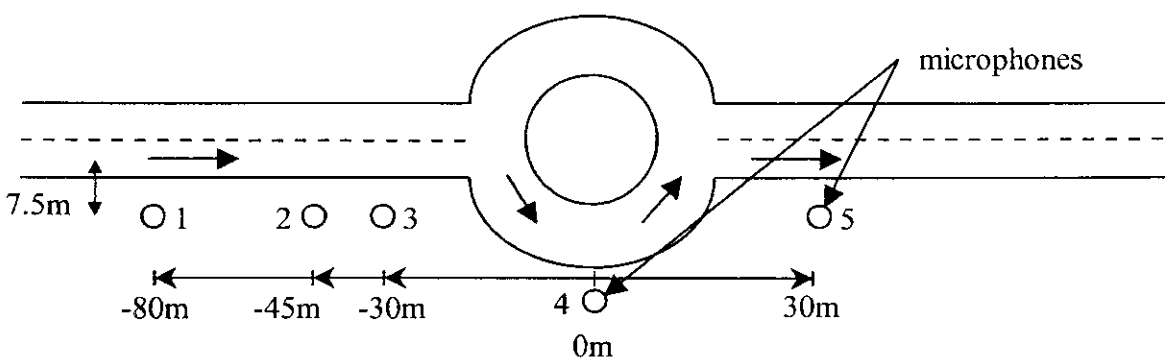

Figure 3.50 : Schéma du trajet emprunté par les véhicules.

Afin d'assurer un minimum de reproductibilité des essais, les conducteurs des différents véhicules doivent respecter quelques règles de conduite :

- passer devant le premier microphone à la vitesse stabilisée indiquée et avec le bon rapport de boîte de vitesse,
- éviter de changer de rapport devant un microphone pour ne pas introduire de phénomènes particuliers impossibles à caractériser dans l'état actuel du modèle,
- négocier le rond-point sur le rapport de boîte indiqué (pas de contrainte de vitesse : libre appréciation du conducteur pour une conduite normale).

Les véhicules ont effectué environ 25 passages chacun, à des vitesses de passage comprises entre 40 et 65 km/h au droit du premier microphone (vitesse stabilisée) et entre 30 et 65 km/h

sur tout le parcours, pour des rapports de boîte oscillants entre la seconde et la quatrième. Il est important de noter que quelques passages ont été effectués à vitesse stabilisée afin de vérifier l'invariance des niveaux sonores sur la totalité du parcours. Chaque configuration est répétée cinq fois.

Figure 3.51 : Vue du rond-point et du microphone n°3 au premier plan.

Les figures 3.52 et 3.53 représentent les niveaux sonores globaux pondérés A (en haut) mesurés et la vitesse associée (en bas) pour chaque microphone. Nous avons choisi de ne pas évoquer les niveaux sonores globaux lin car les résultats obtenus sont peu homogènes, en raison de leur dépendance importante vis à vis de la raie moteur. L'amplitude de cette dernière est en effet sujette à de grandes variations dues aux "micro-accélérations" ou "micro-décélérations" inévitables mais sans conséquence en niveau global pondéré A (fréquence de 100 Hz environ).

Les niveaux globaux pondérés A ont tendance à diminuer à l'approche du rond-point puis à augmenter fortement à sa sortie et dépasser les niveaux obtenus en phase stabilisée.

Les écarts de niveau constatés entre les différents véhicules proviennent pour une part de la différence de vitesse entre ces mêmes véhicules. En effet, on remarque une très bonne corrélation entre vitesse et niveau sonore comme par exemple sur la figure 3.52 où le véhicule le plus rapide est le plus bruyant et inversement pour le plus lent. En niveau global linéaire les résultats sont moins homogènes.

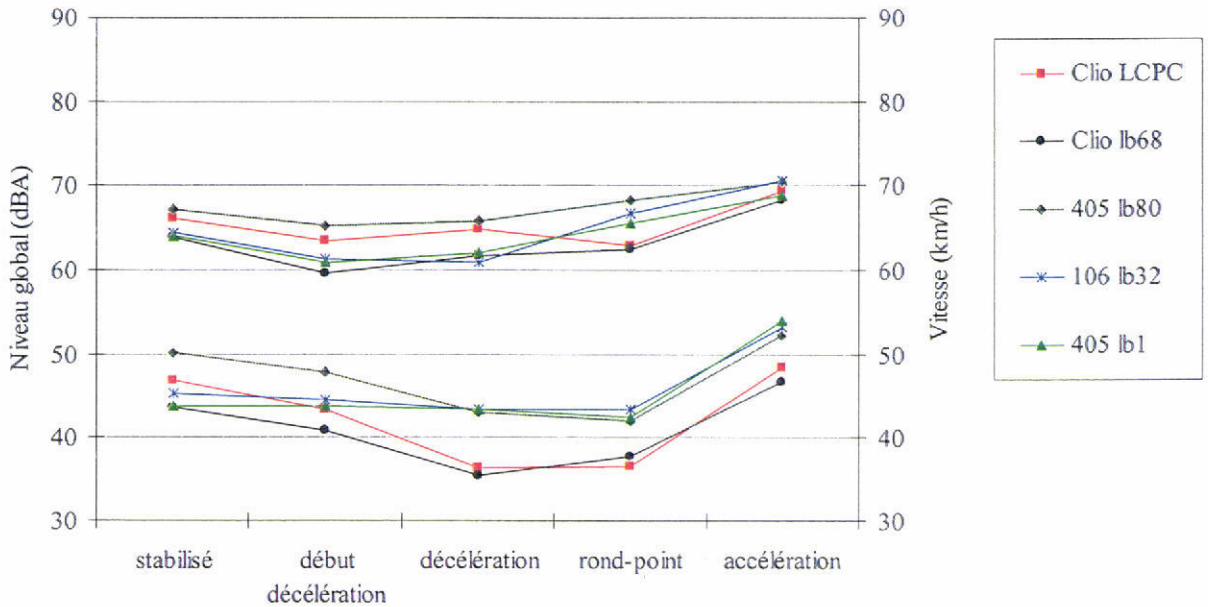

Figure 3.52 : Moyenne des vitesses (km/h) et des niveaux globaux A (dBA) associés pour des passages en 3ème.

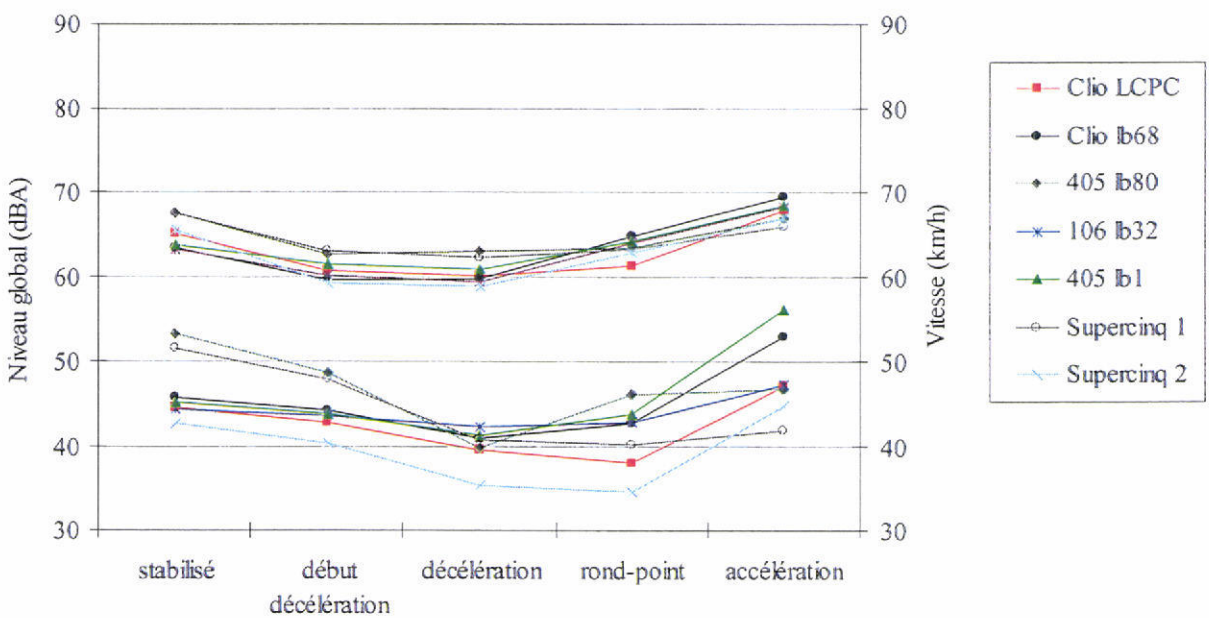

Figure 3.53 : Moyenne des vitesses (km/h) et des niveaux globaux A (dBA) associés pour des passages en 4ème (vitesse stabilisée) puis 3ème et 2nde (rond-point).

Comparons maintenant les résultats pour différents modes de conduite d'un même véhicule : la Renault Clio 1.4l de référence. Les vitesses mentionnées dans la légende sont les vitesses stabilisées relevées au droit du microphone n°1.

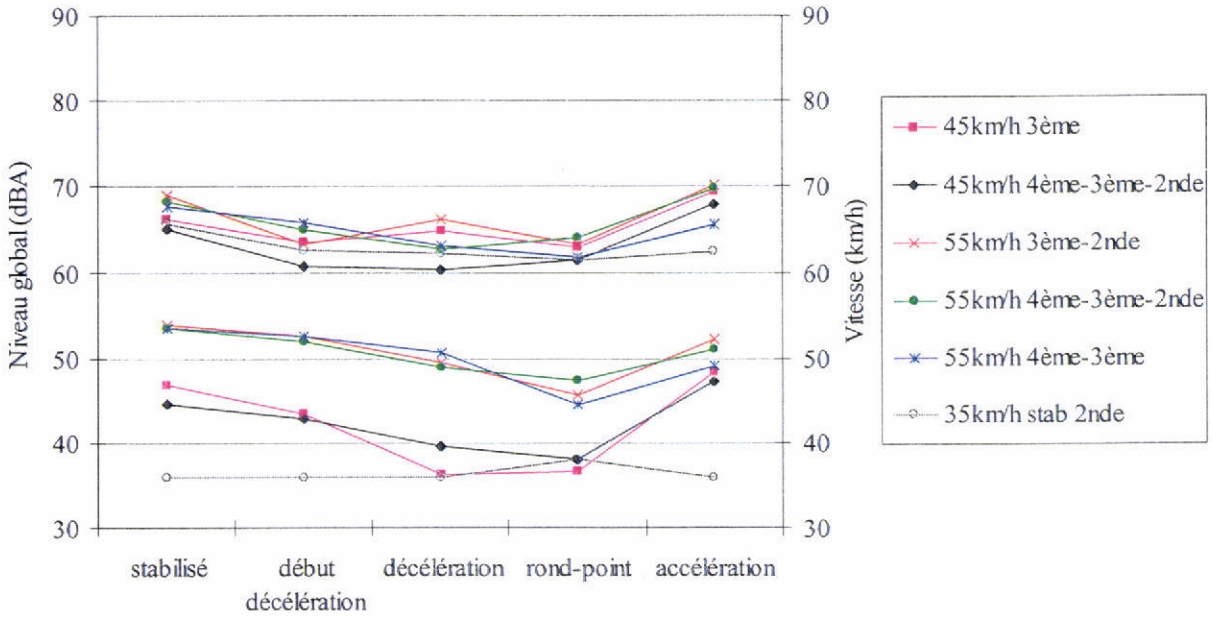

Figure 3.54 : Moyenne des vitesses (km/h) et des niveaux globaux (dBA) associés, avec la Renault Clio de référence et pour différents modes de conduite.

Si l'on exclut les niveaux mesurés à vitesse stabilisée (à titre de comparaison) les écarts entre les modes de conduite extrêmes restent modérés : de 2.5 dB au niveau du rond-point à 5.5 dB en décélération. Les plus grands écarts en décélération proviennent certainement d'éventuels rétrogradages qui pourtant devaient être évités à proximité des microphones.

Tous les cas présentés ci-dessus correspondent à de fortes accélérations, à l'image des simulations réalisées par Kokowski et Makarewicz [Kokowski & Makarewicz 1997] (figure 3.47). Cependant, l'augmentation des niveaux sonores en accélération est peu importante. Une diminution peut même être envisageable, en sortie de rond-point, dans le cas d'une accélération faible. On retrouve, une fois encore, les conclusions de Kokowski et Makarewicz [Kokowski & Makarewicz 1997] (cf. § 3.4.2.8.2.2), c'est-à-dire une dépendance importante des niveaux sonores en fonction de la cinématique et de la dynamique du véhicule à l'approche du rond-point.

Pour permettre de relier les niveaux mesurés à des niveaux calculés (relation 3.6), il serait nécessaire d'obtenir à chaque point de mesure l'accélération des véhicules, ce que nous n'avons pu faire jusqu'à présent sur site routier réel. Comme nous l'avons déjà mentionné au paragraphe 3.3.1, un nouveau système d'acquisition constitué de cellules photoélectriques permettra, dans un proche avenir, de remédier à ce problème et donc d'estimer par le calcul les niveaux sonores à l'approche de rond-points.

Chapitre 4 : Caractérisation acoustique des "deux-roues" motorisés

4.1. Les cyclomoteurs

En milieu urbain, la voiture particulière n'est pas le mode de transport unique. Les cyclomoteurs d'une cylindrée inférieure à 50 cm^3 sont aussi un moyen de transport particulièrement répandu dans nos agglomérations. Ce sont souvent des engins bruyants utilisés principalement par les jeunes jusqu'à des heures tardives et qui, par conséquent, sont très gênants pour les riverains. De plus, le contenu fréquentiel présente quelques spécificités par rapport à celui d'un véhicule léger comme le montre la figure 4.1. Outre une différence importante de niveau à vitesse équivalente (10 dBA) le spectre est beaucoup plus étendu et l'énergie encore importante à 5 kHz. Cependant, même s'ils n'apparaissent pas ici, les tiers d'octave 6.3 et 8 kHz voient une décroissance rapide des niveaux sonores. C'est pourquoi, pour des problèmes pratiques, nous limiterons notre analyse à la bande de tiers d'octave 5 kHz. Ce paragraphe sera plus particulièrement consacré à l'étude d'un cyclomoteur de type Peugeot 103 SP2. Du fait d'un nombre limité de constructeurs et, par conséquent, de modèles, les cyclomoteurs en circulation ont beaucoup de caractéristiques communes comme la cylindrée ou la vitesse maximale. Cette étude est donc généralisable à la plupart des cyclomoteurs.

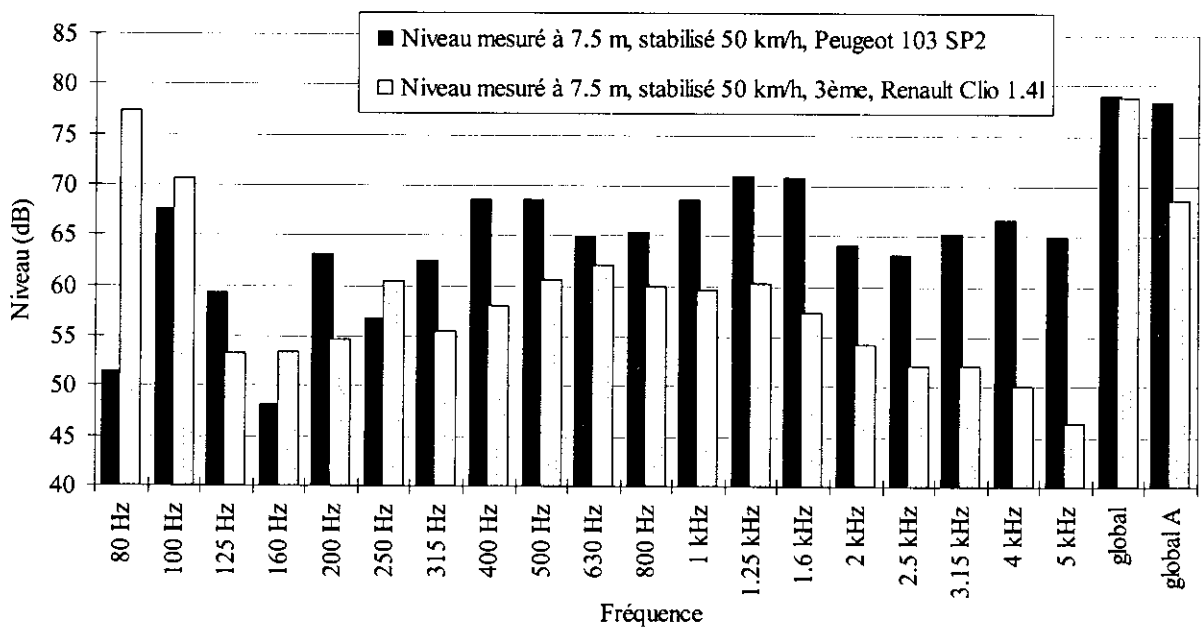

Figure 4.1 : Comparaison des niveaux sonores mesurés à 50 km/h entre un cyclomoteur et un véhicule léger sur un enrobé de type BBTM.

4.1.1. Hauteur de la source sonore équivalente

Nous utilisons la méthode d'identification de la hauteur de source sonore équivalente mise en place pour les véhicules légers. Pour ces derniers, la source sonore équivalente était située très proche du sol quel que soit le mode de conduite, même à l'arrêt. Nous nous sommes donc placés à l'arrêt face aux microphones afin d'estimer la hauteur de la source sonore équivalente qui, en l'absence de bruit de roulement[1], devrait selon toute logique se situer autour de 30 cm[2].

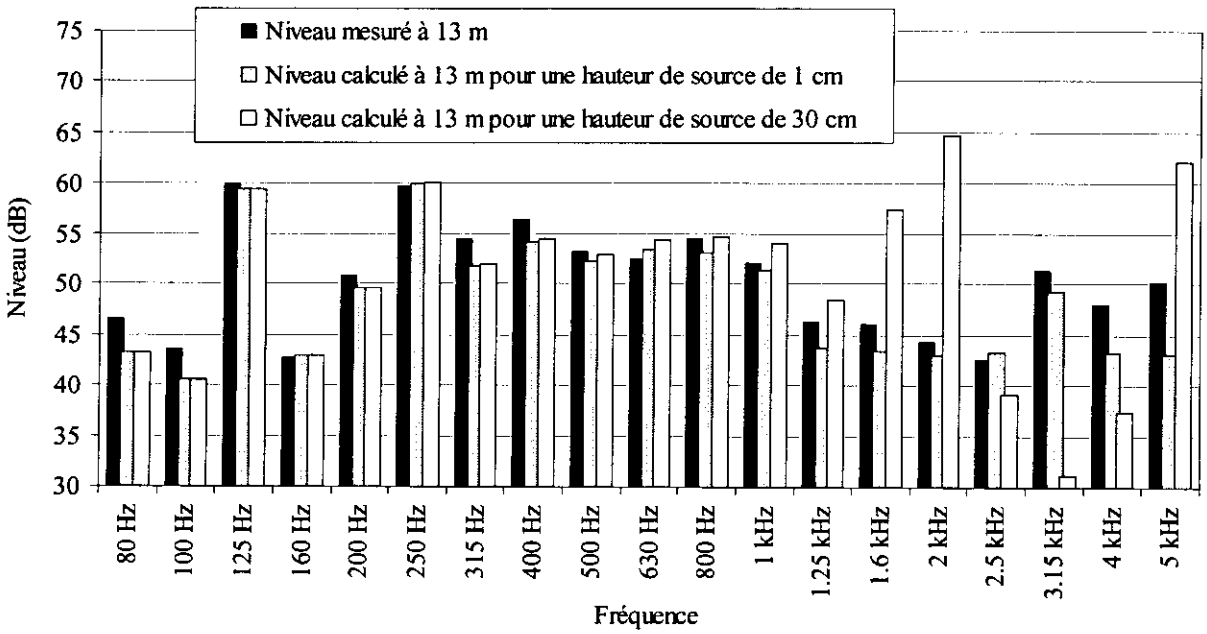

Figure 4.2 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé pour un Peugeot 103 SP2 à l'arrêt : hauteur source de 1 et 30 cm.

De nouveau, on constate, malgré des imprécisions aux fréquences élevées plus prononcées que pour les véhicules légers, une hauteur de source ponctuelle équivalente très proche du sol. Ceci surprend mais peut s'expliquer si l'on fait l'hypothèse que les moteurs des 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 d'intensimétrie permettraient de déterminer la validité d'une telle hypothèse.

Une autre hypothèse, encore plus probable, est le nivellement des niveaux sonores dans chaque bande de tiers d'octave lors du cumul énergétique d'un ensemble de sources sonores incohérentes entre elles (bruit de roulement, moteur englobant une multitude de sources sonores, échappement, etc.). Dans le cas où le véhicule est en mouvement, des simulations à l'aide de deux sources de bruit rose fictives ont été réalisées : la première positionnée au sol et la seconde à une hauteur de 30 cm. Si les deux sources possèdent la même puissance acoustique alors les écarts avec le cas d'une seule source au sol sont assez réduits (figure 4.3) :

[1] Le bruit de roulement demeure toutefois plus faible que pour un véhicule léger du fait d'une aire de contact pneumatique-chaussée moins importante.

[2] Hauteur moyenne du bloc moteur et du pot d'échappement.

au maximum de 3 dB à 2 et 5 kHz. Si l'on ajoute le fait que l'ensemble moteur-échappement n'est pas tout à fait une source ponctuelle, les niveaux sont encore nivelés. Les interférences ont donc quasiment disparues et l'ensemble des sources sonores considérées est bien modélisé par une source équivalente proche du sol.

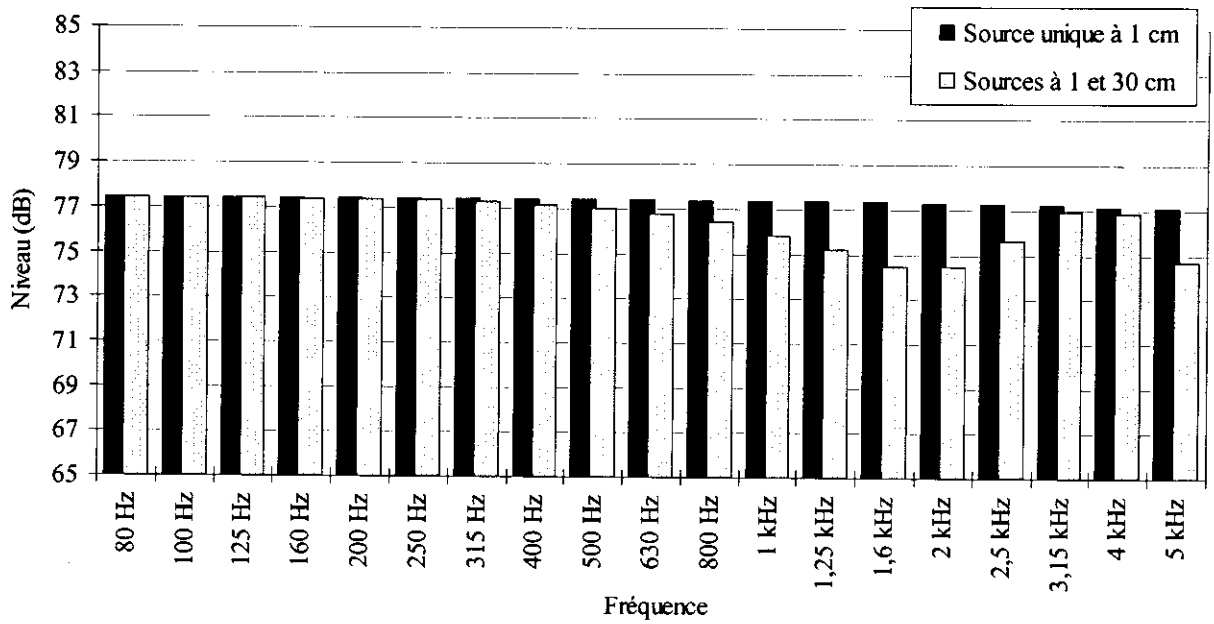

Figure 4.3 : Simulation du niveau mesuré à 7.5 m pour une source unique de bruit rose positionnée au sol et deux sources de bruit rose : l'une au sol et l'autre à une hauteur de 30 cm.

4.1.2. Détermination de la puissance acoustique

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 qui consiste, à partir de la fréquence expérimentale de la raie, à remonter à la valeur du régime moteur. Le passage de l'un à l'autre est fiable, comme nous l'avons vu pour les véhicules légers (cf. figure 3.22). Rappelons que les cyclomoteurs possèdent des moteurs 2 temps monocylindres pour lesquels il ne se produit qu'une explosion à chaque aller-retour du piston. Dans ce cas, la loi de détermination des raies moteur peut s'écrire :

$$f(Hz) = \frac{S}{60} \qquad 4.1$$

La résolution des raies moteur mesurées est limitée au tiers d'octave. En interpolant ces résultats il est possible de déterminer une loi linéaire vitesse-fréquence tout à fait valable comme constaté sur la figure 4.4 et dans le tableau 4.1 où les erreurs (en grisé) sont souvent dues à des raies en limite de tiers d'octave. Pour un cyclomoteur, les caractéristiques

mécaniques nécessaires pour notre étude sont très difficiles voir impossibles à obtenir, en raison de l'absence de boîte de vitesse remplacée par un variateur. Par conséquent, nous ne déterminons pas une loi régime moteur – fréquence, qui serait inutile, mais nous conservons la loi vitesse-fréquence. La suppression du paramètre régime moteur est rendue possible grâce à la dépendance linéaire de ce dernier par rapport à la vitesse et vice-versa. Par ailleurs, les lois de puissance acoustique déterminées en incluant le régime moteur n'ont pas donné de meilleurs résultats.

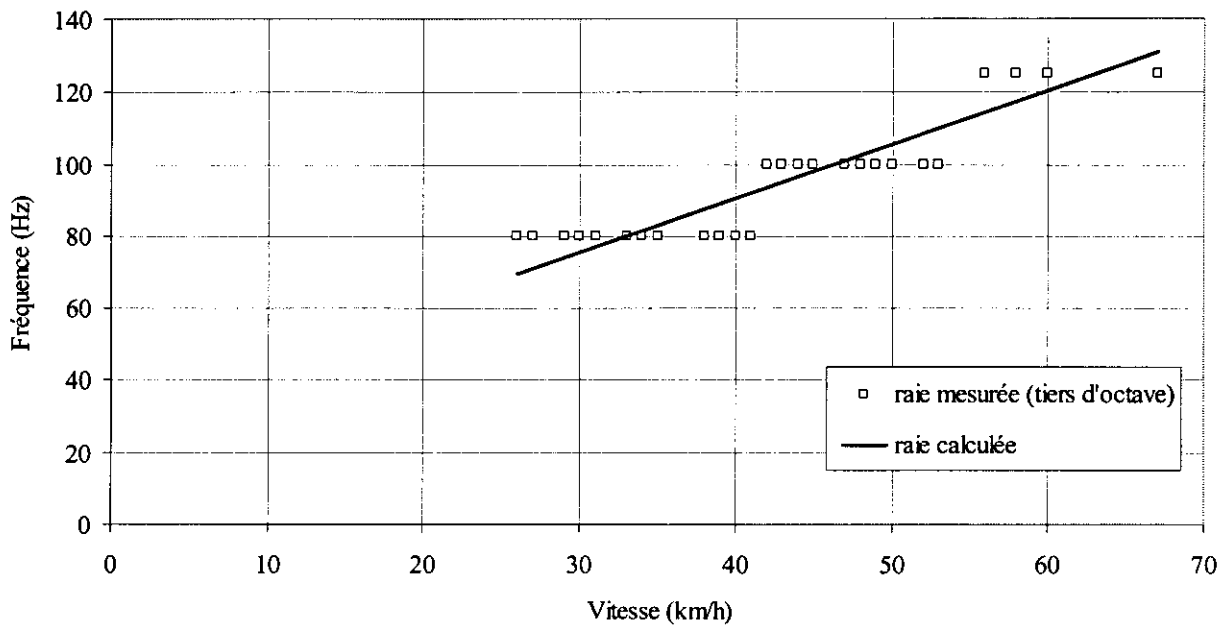

Figure 4.4 : Détermination d'une relation vitesse-fréquence.

Une fois les différentes raies connues, il est aisé de déterminer des lois d'évolution des niveaux sonores par tiers d'octave, similaires à celles du paragraphe 3.3.1 établies pour les véhicules légers. La différence avec la loi obtenue pour les véhicules légers ou les motocyclettes est la suppression du paramètre a_1. En effet, comme nous l'avons dit plus haut, le paramètre régime moteur est linéairement dépendant de la vitesse. Par conséquent, il peut être écarté sans introduire une erreur importante[3] et la relation 3.6 devient :

$$L_w = 10\log_{10}\left(10^{(a_0+a_2A)/10} + 10^{(a_3\log_{10}v)/10}\right) \qquad 4.2$$

Le tableau 4.2 récapitule les coefficients de régression a_0, a_2 et a_3 obtenus pour le cyclomoteur.

[3] Si l'on désire conserver une précision optimale, on utilisera la loi 3.6, la relation 4.2 donnant des résultats approchés à ± 0.5 dB près.

Tableau 4.1 : Raies moteur théoriques et mesurées.

			Vitesse stabilisée[4]		Accélération[3]		Décélération[3]	
Vitesse (km/h)	Raie calculée[5] (Hz)	Harmonique calculé[4] (Hz)	Raie mesurée	Harmonique mesuré (Hz)	Raie mesurée (Hz)	Harmonique mesuré (Hz)	Raie mesurée (Hz)	Harmonique mesuré (Hz)
17	56 (50)	112 (100)	< 80	100	—	—	—	—
19	59 (63)	118 (125)	< 80	100	80	160	—	—
20	60.5 (63)	121 (125)	< 80	100	—	—	—	—
21	62 (63)	124 (125)	—	—	80	160	—	—
22	63.5 (63)	127 (125)	—	—	80	160	—	—
23	65 (63)	130 (125)	< 80	125	—	—	—	—
24	66.5 (63)	133 (125)	< 80	125	—	—	—	—
26	69.5 (63)	139 (125)	< 80	125	—	—	—	—
27	71 (80)	142 (160)	80	160	80	160	—	—
29	74 (80)	148 (160)	—	—	80	160	80	160
30	75.5 (80)	151 (160)	80	125	—	—	80	160
31	77 (80)	154 (160)	80	125	—	—	80	160
33	80 (80)	160 (160)	80	160	—	—	—	—
34	81.5 (80)	163 (160)	80	125	—	—	—	—
35	83 (80)	166 (160)	80	125	—	—	—	—
38	87.5 (80)	175 (160)	80	160	—	—	—	—
39	89 (80)	178 (160)	80	160	100	200	80	160
40	90.5 (100)	181 (200)	80	160	100	200	—	—
41	92 (100)	184 (200)	—	—	—	—	80	160
42	93.5 (100)	187 (200)	100	200	—	—	—	—
43	95 (100)	190 (200)	100	200	—	—	—	—
44	96.5 (100)	193 (200)	100	200	—	—	—	—
45	98 (100)	196 (200)	100	200	—	—	—	—
47	101 (100)	202 (200)	100	200	—	—	100	200
48	102.5 (100)	205 (200)	—	—	100	200	—	—
49	104 (100)	208 (200)	—	—	100	200	100	200
50	105.5 (100)	211 (200)	—	—	100	200	—	—
52	108.5 (100)	217 (200)	100	200	—	—	—	—
53	110 (100)	220 (200)	100	200	—	—	—	—
56	114.5 (125)	229 (250)	125	250	—	—	—	—
58	117.5 (125)	235 (250)	125	250	—	—	—	—
60	120.5 (125)	241 (250)	125	250	—	—	—	—
67	131 (125)	262 (250)	125	250	—	—	—	—

[4] La résolution de la mesure étant limité au tiers d'octave, seules les bandes de fréquence sont mentionnées. Les cases grisées correspondent aux erreurs de prévision (décalage d'un tiers d'octave).
[5] Entre parenthèses figurent les tiers d'octave auxquels appartiennent ces raies.

Tableau 4.2 : Coefficients de régression a_0, a_1, a_2 et a_3 pour le cyclomoteur Peugeot 103 SP2.

	a_0	a_2	a_3
400 Hz	83.2371	6.0913	49.4723
500 Hz	81.1872	6.0078	49.6282
630 Hz	78.4236	4.7832	50.6902
800 Hz	78.9798	6.2340	51.2333
1000 Hz	83.4616	6.2143	53.0787
1250 Hz	87.3478	2.5531	53.8966
1600 Hz	84.1158	1.9345	54.0673
2000 Hz	76.8225	5.9753	50.6001
2500 Hz	75.6937	5.2464	50.5202
3150 Hz	76.8705	4.1376	52.1115
4000 Hz	77.2567	6.7091	52.8027
5000 Hz	76.7199	6.3307	51.6906
Global	95.4614	5.9653	59.1021
Global A	93.4229	4.3292	58.7869
Pour les tiers d'octave inférieurs à 400 Hz, prendre le niveau calculé à 400 Hz et enlever 1 dB/tiers d'octave sauf pour les tiers d'octave englobant les fréquences de la raie moteur f = S/60 et de son harmonique de rang 1.			
Pour la raie moteur (fondamentale) : $a_0 = 85.7592$; $a_2 = 10.6539$; $a_3 = 52.5797$			
Pour l'harmonique de rang 1 : $a_0 = 80.2443$; $a_2 = 16.5597$; $a_3 = 50.7461$			

Deux phénomènes constatés sur le véhicule léger sont ici imperceptibles. Tout d'abord, l'harmonique 2 est invisible (cf. figures 4.5 à 4.10). Nous n'en tiendrons donc pas compte. Deuxièmement, aucun coefficient, que ce soit pour le niveau global ou les raies moteur et leur harmonique, n'est de signe négatif. L'amplitude de ces raies augmente donc constamment avec le régime moteur (cf § 3.2.1.4).

Dans le cadre de notre campagne d'essais, une cinquantaine de mesures a été effectuée pour des vitesses allant de 17 à 67 km/h et pour des régimes stabilisés, accélérés et décélérés. Les figures 4.5 à 4.10 témoignent du bon accord obtenu avec des écarts mesure-calcul ne dépassant pas 2 dBA en niveau global. Les écarts sont également modérés sur l'ensemble des bandes tiers d'octave, sauf peut-être en basse fréquence, mais sans incidence car mettant en jeu des niveaux sonores faibles.

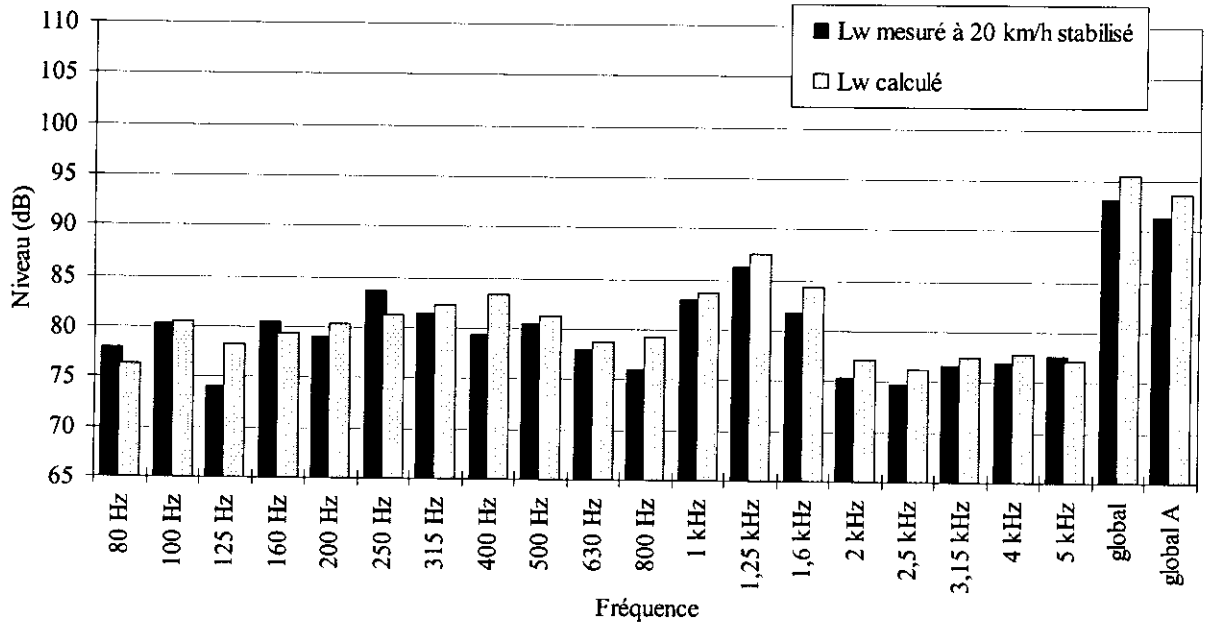

Figure 4.5 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée pour une vitesse stabilisée de 20 km/h.

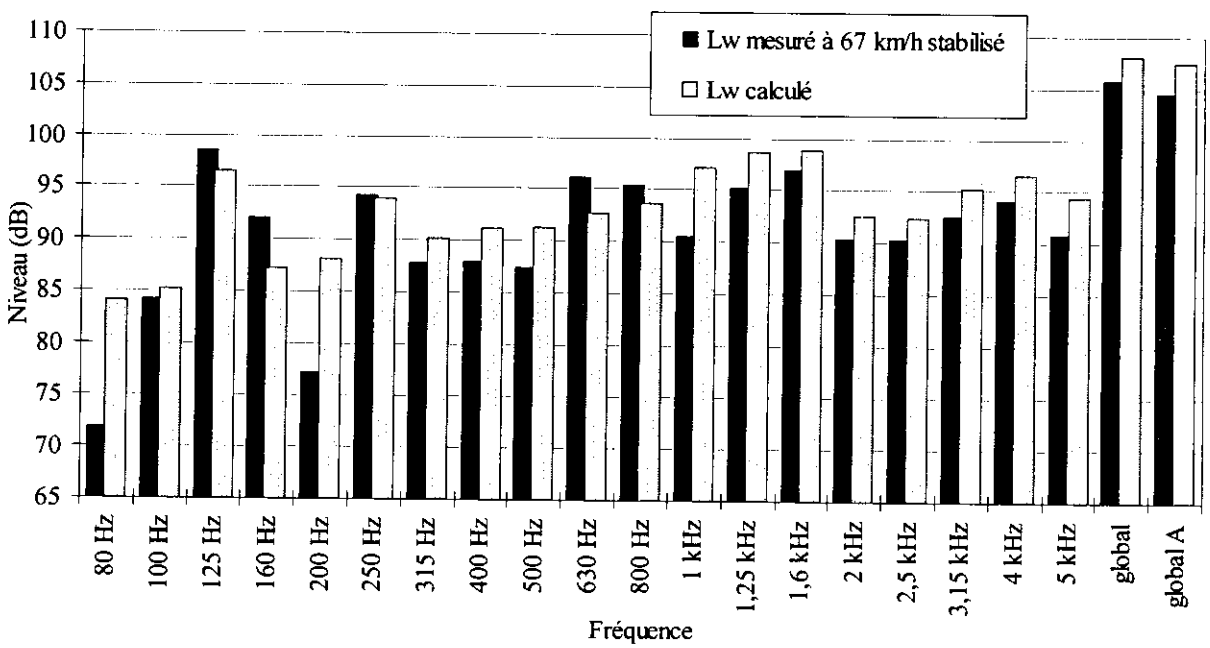

Figure 4.6 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée pour une vitesse stabilisée de 67 km/h.

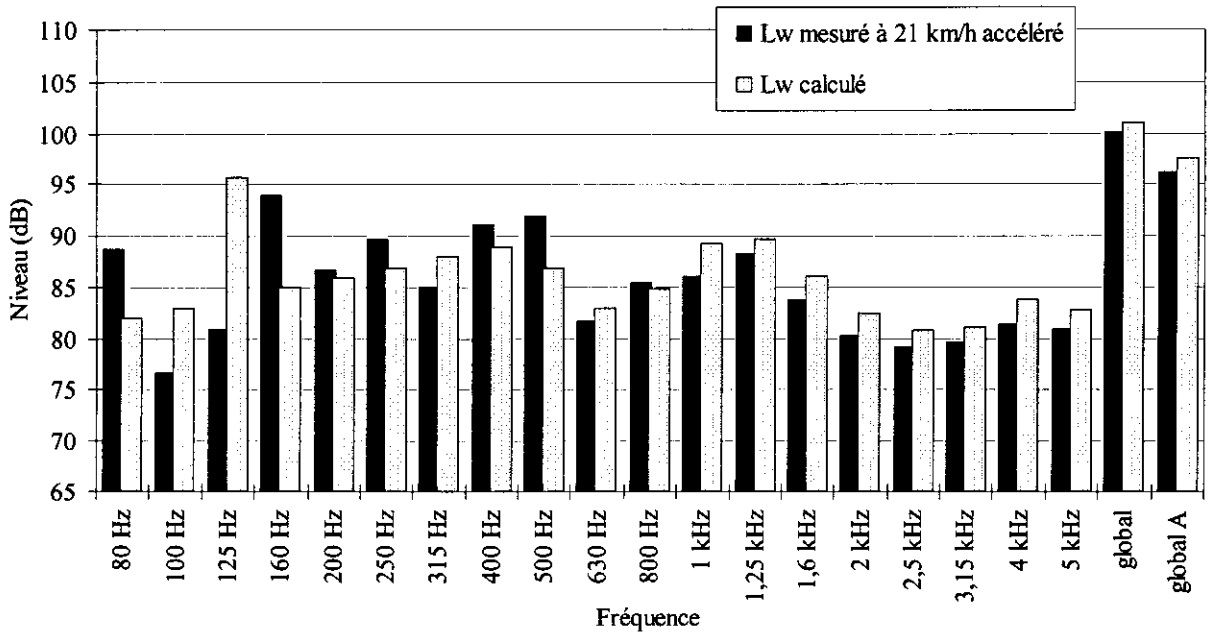

Figure 4.7 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 21 km/h.

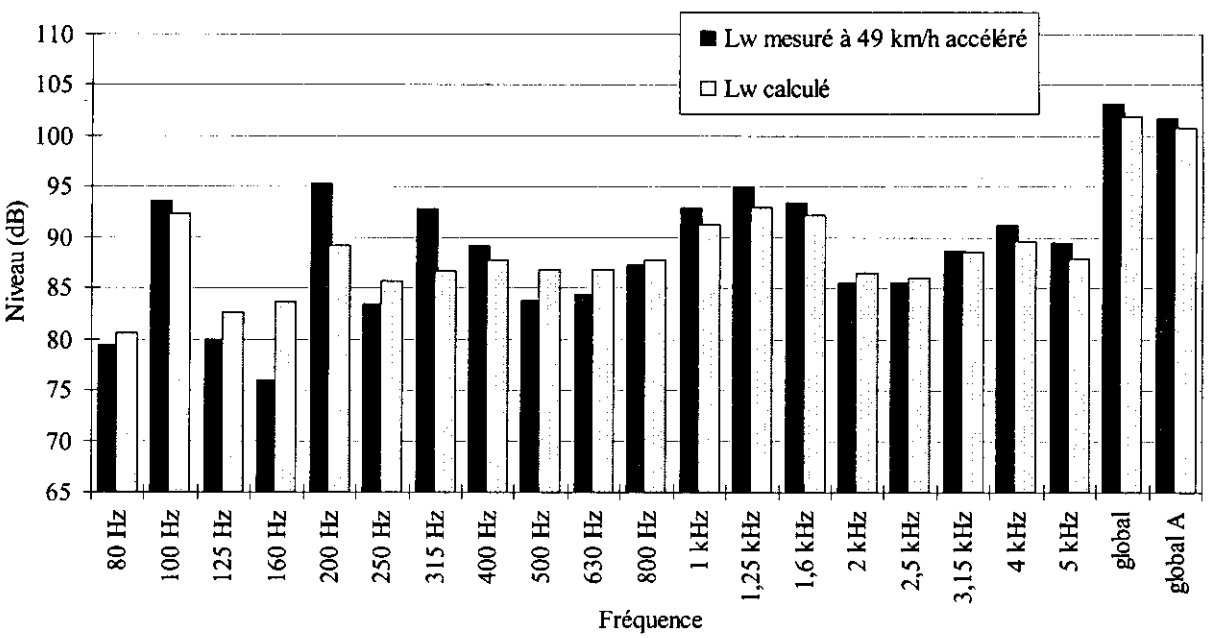

Figure 4.8 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 49 km/h.

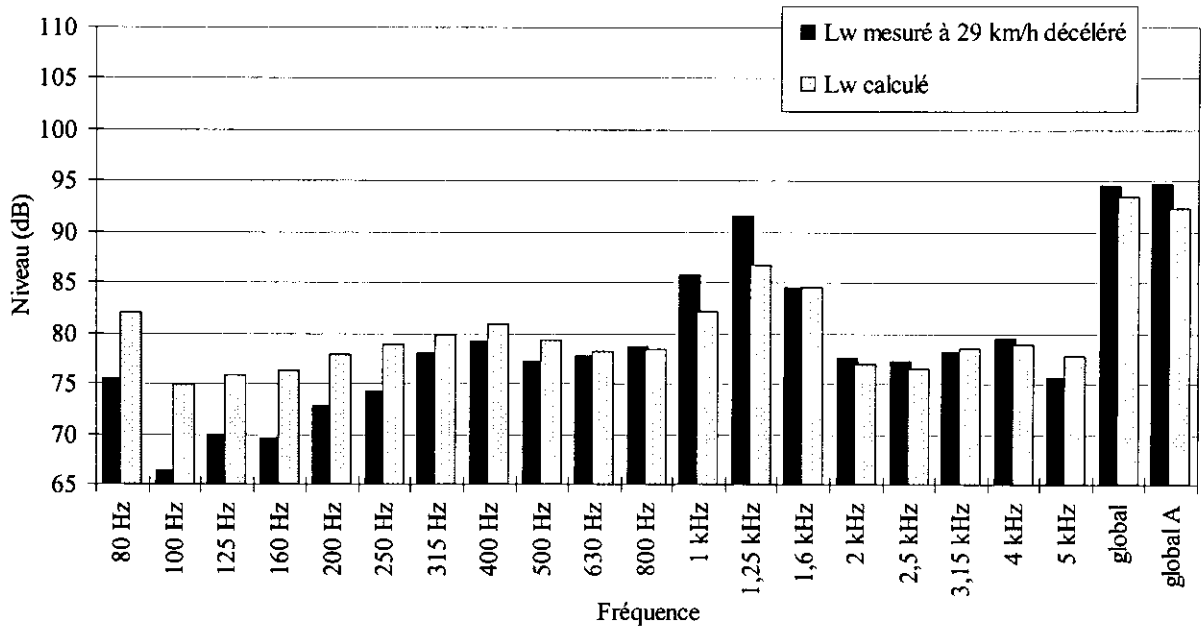

Figure 4.9 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime décéléré à 29 km/h.

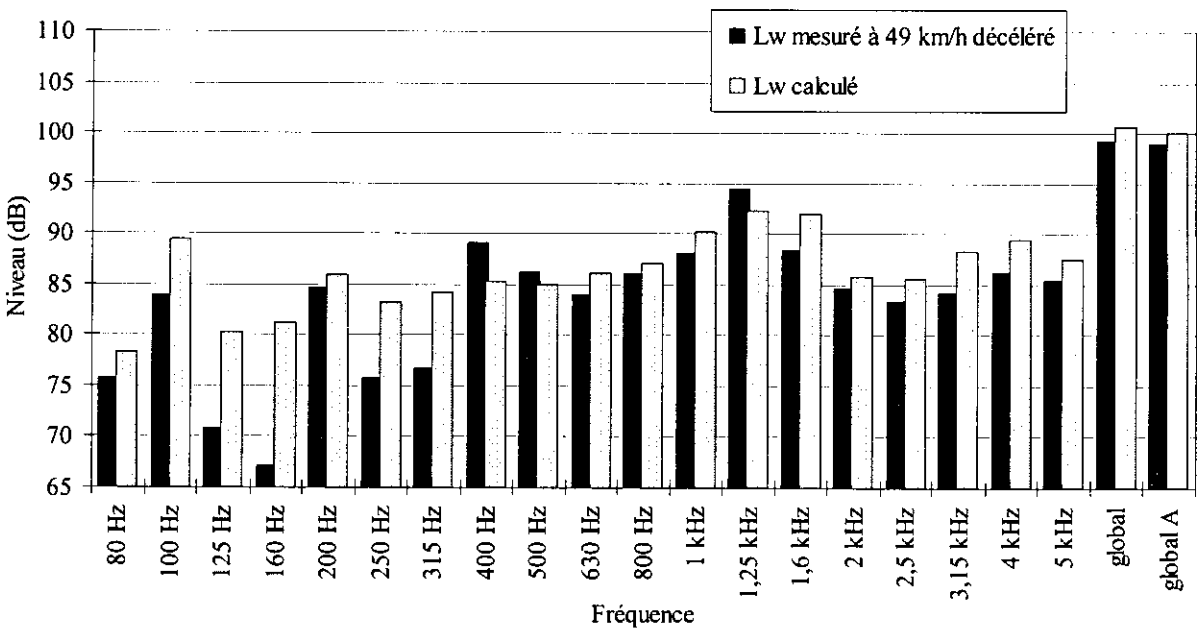

Figure 4.10 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime décéléré à 49 km/h.

4.1.3. Evolution temporelle

Avec une procédure identique à celle utilisée pour les véhicules légers (Renault Clio 1.4l par exemple), nous avons reconstitué le passage du cyclomoteur (Peugeot 103 SP2) à 40 km/h en

vitesse stabilisée et en mode accéléré (vitesse au droit du microphone). A vitesse stabilisée la puissance acoustique est constante tout au long du passage. Par contre, en accélération, il faut dans un premier temps recalculer la vitesse puis la puissance acoustique à chaque instant. L'accélération est supposée constante. En tenant compte des diverses atténuations (géométriques et atmosphériques), il est ensuite possible de recomposer à chaque instant les niveaux mesurés au récepteur. Les comparaisons mesure-calcul sont présentées sur la figure suivante.

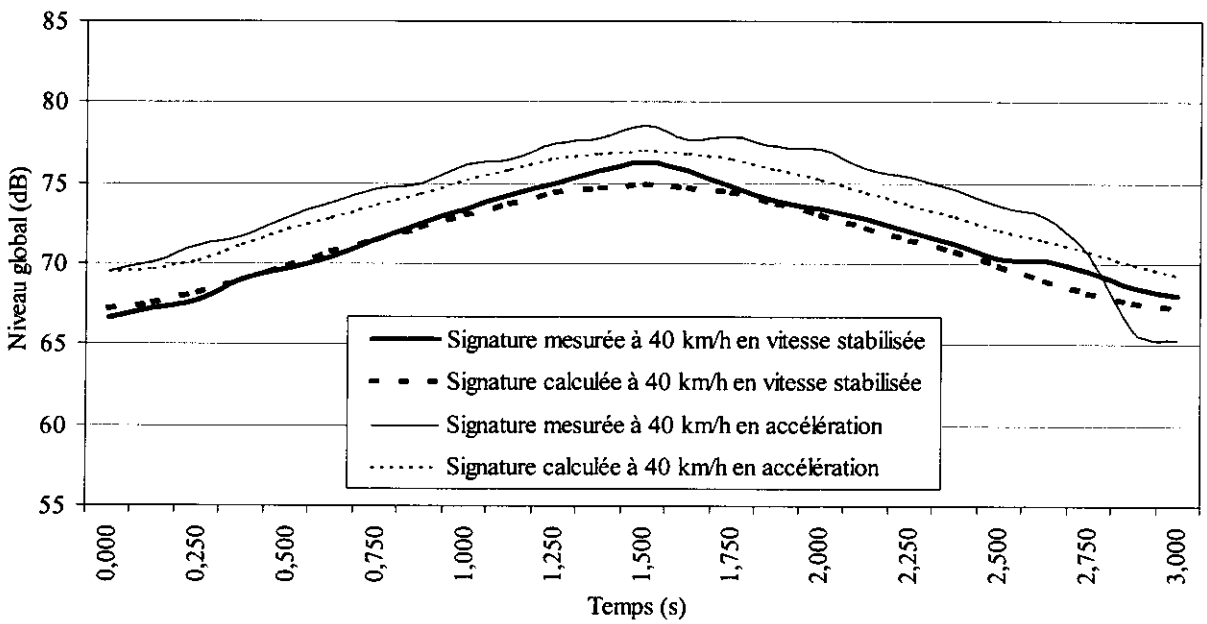

Figure 4.11 : Comparaison entre le passage réel d'un cyclomoteur et le passage calculé à partir des lois de régression de puissance acoustique.

En accélération, une erreur assez importante apparaît en fin de passage. Celle-ci est probablement due à l'arrêt de la phase d'accélération au profit d'une phase de décélération qui intervient très tôt après le passage au droit du microphone. Ceci peut expliquer les niveaux plus faibles. Si l'on fait abstraction de ces phénomènes particuliers, un bon accord est généralement obtenu.

Cette étude montre qu'il est possible de prévoir, à chaque instant, les niveaux reçus par un récepteur quelconque, lors du passage d'un cyclomoteur.

4.2. Les motocyclettes

A l'image des cyclomoteurs, les motocyclettes sont souvent synonymes de gêne pour les riverains. La caractérisation de ce type d'engins est certainement la plus délicate par rapport aux véhicules légers et cyclomoteurs. La difficulté réside notamment dans l'hétérogénéité des

caractéristiques du parc en circulation : la cylindrée (varie dans un rapport de 1 à 10), le nombre de cylindres (généralement deux ou quatre) ou les modifications dont sont friands les possesseurs de tels engins. Le cheminement précédent (hauteur de la source sonore équivalente puis détermination de la puissance acoustique), maintenant bien connu, a été repris pour les motocyclettes. Deux types ont été étudié : une Suzuki Bandit 600 cm^3 quatre cylindres et une Yamaha XV 750 cm^3 bi-cylindres. La figure 4.12 compare les spectres respectifs d'un véhicule léger (Renault Clio 1.4l), d'un cyclomoteur (Peugeot 103 SP2) et d'une motocyclette (Yamaha XV 750) dans des conditions normales d'utilisation.

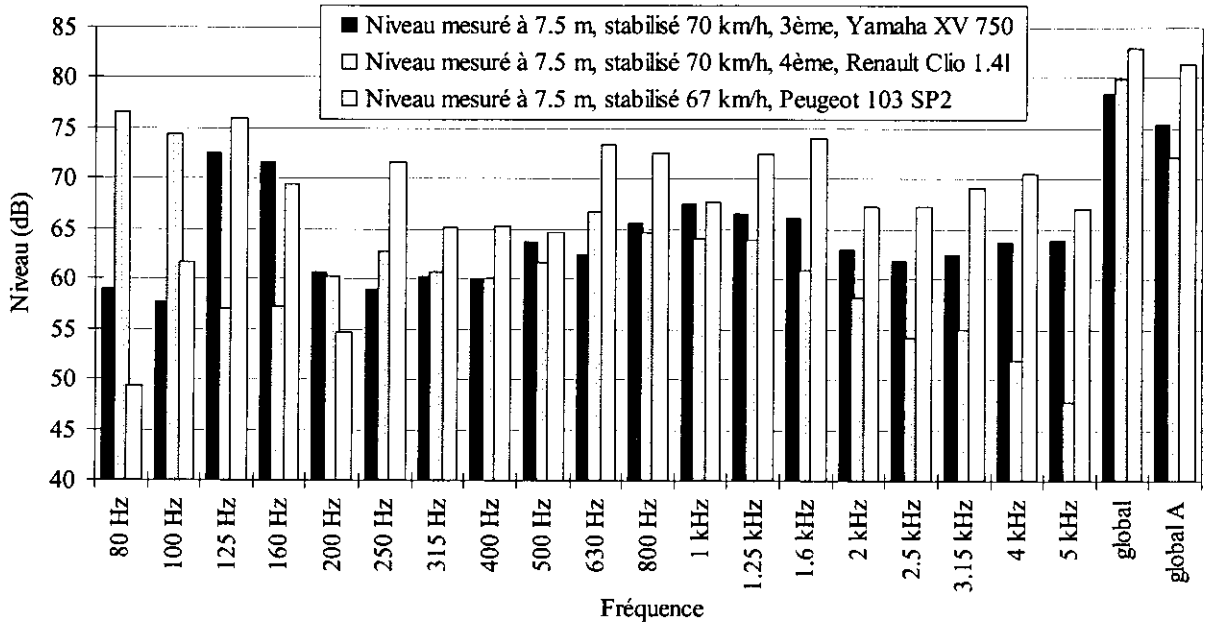

Figure 4.12 : Comparaison entre spectre issu d'un véhicule léger, d'une motocyclette et d'un cyclomoteur à une vitesse stabilisée de 70 km/h environ.

Comme pour les cyclomoteurs, on constate qu'une énergie importante est encore présente dans les fréquences les plus élevées[6] même si elle s'atténue très rapidement au delà de 5 kHz.

De façon identique aux autres types de sources, l'évaluation de la hauteur de la source sonore équivalente, est de nouveau le point de départ de la modélisation.

4.2.1. Hauteur de la source sonore équivalente

Compte tenu des résultats obtenus jusqu'à présent, et notamment pour les cyclomoteurs, nous nous sommes placés directement à l'arrêt, cas le plus défavorable, afin de déterminer la hauteur de la source sonore équivalente (figure 4.13).

[6] Conforme à l'intuition : une motocyclette qui accélère émet souvent des sons aigus, stridents.

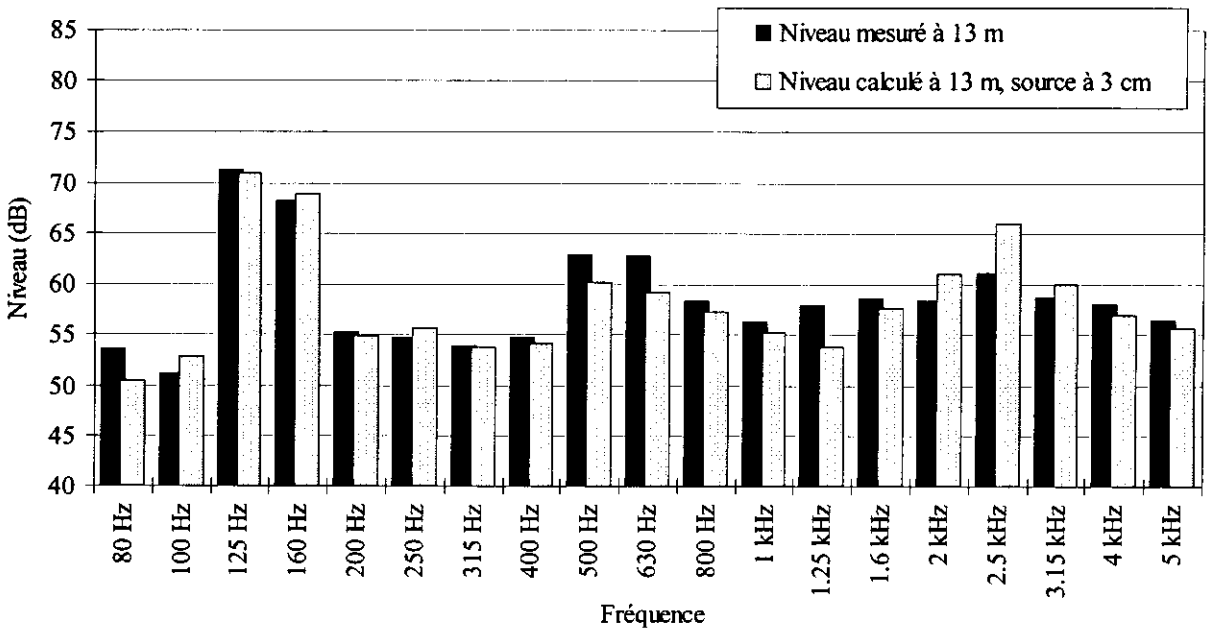

Figure 4.13 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé avec une hauteur source de 3 cm, pour la Suzuki 600 Bandit à l'arrêt, moteur tournant à 4500 tr/min.

On constate une fois encore une hauteur de source équivalente très proche du sol, le moteur se situant ici à une hauteur d'environ 50 cm. Ceci nous amène aux hypothèses déjà formulées pour les cyclomoteurs, c'est-à-dire, d'une part, une directivité prononcée vers le sol, non prise en compte avec une source ponctuelle omnidirectionnelle et, d'autre part, une disparition des interférences sur les spectres, due à la sommation énergétique de la contribution de différentes sources sonores élémentaires.

4.2.2. Puissance acoustique

La puissance acoustique est déterminée à partir des niveaux sonores mesurés à 7.5 m et des relations définies au chapitre 2 (§ 2.5.3.2), de la même façon que pour les véhicules légers et les cyclomoteurs. Les figures 4.14, 4.15 et 4.16 en montrent quelques exemples, respectivement à vitesse stabilisée, en accélération et en décélération.

D'un premier abord, on constate que les spectres d'une motocyclette sont beaucoup plus plats que ceux obtenus avec les véhicules légers, abstraction faite des raies moteur. On observe une décroissance des niveaux beaucoup moins sensible dans les derniers tiers d'octave, sans conséquence vis-à-vis du niveau global comme nous l'avons dit précédemment.

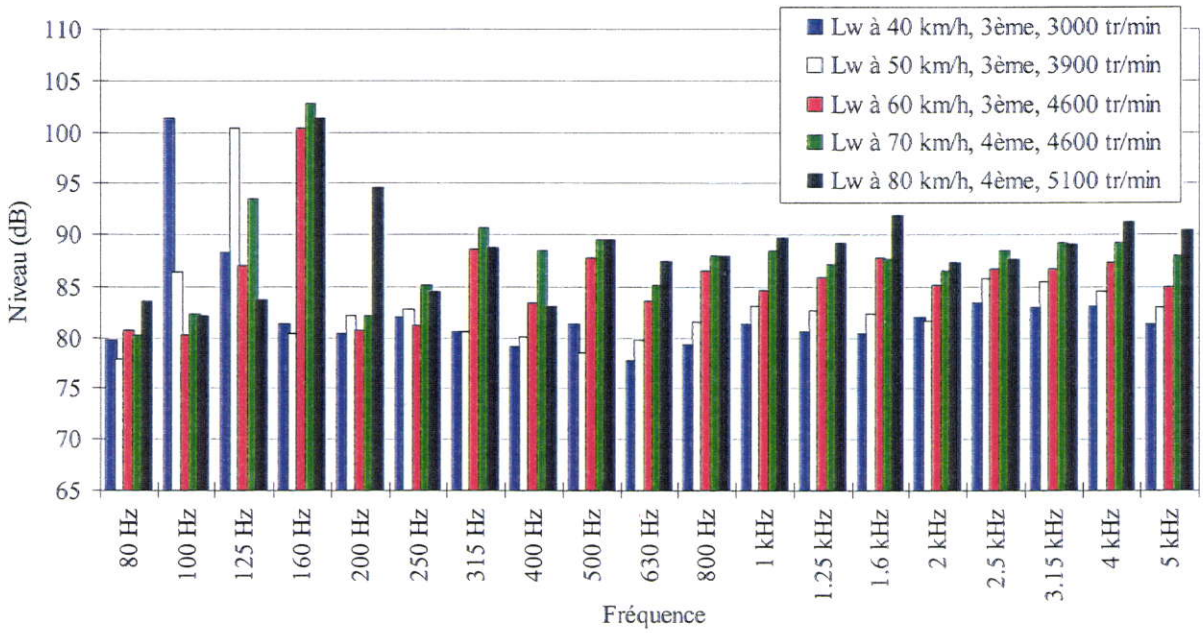

Figure 4.14 : Spectres de puissance Suzuki 600 Bandit à vitesse stabilisée.

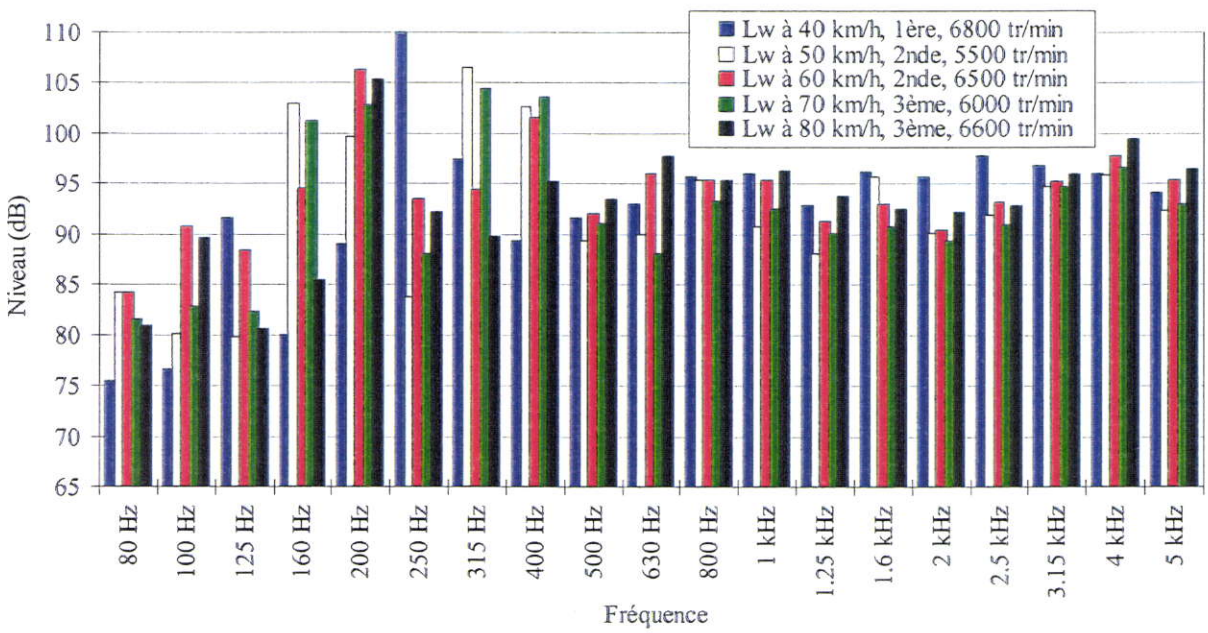

Figure 4.15 : Spectres de puissance Suzuki 600 Bandit en accélération.

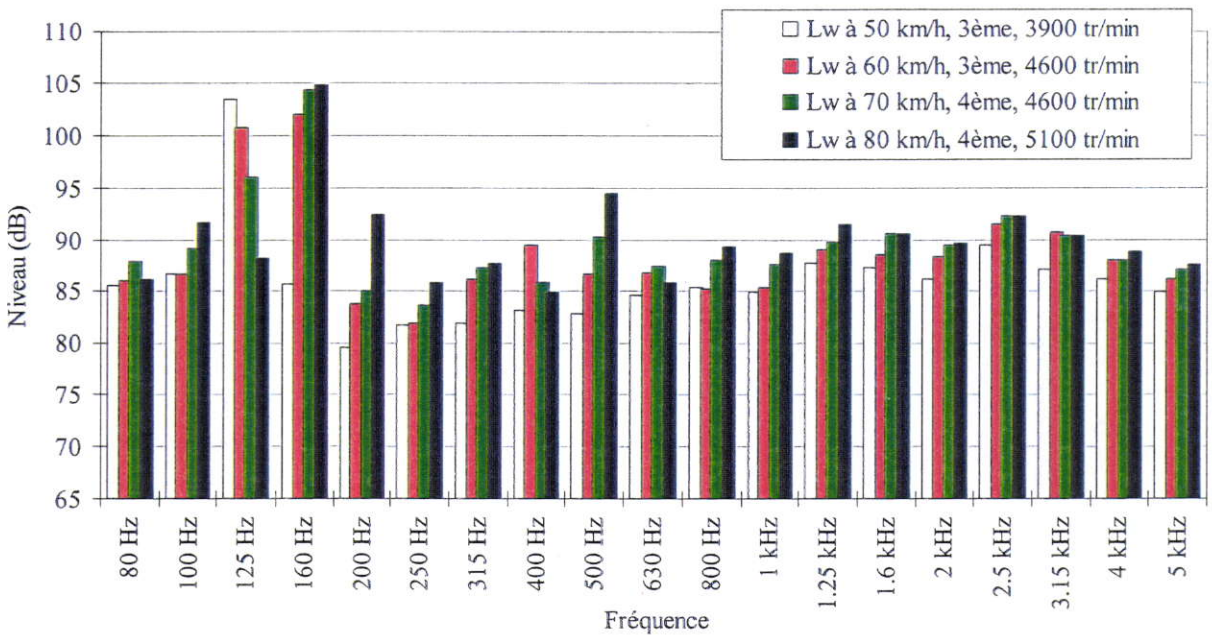

Figure 4.16 : Spectres de puissance Suzuki 600 Bandit en décélération.

A vitesse stabilisée (cf. figure 4.14), le niveau augmente de façon quasiment constante avec la vitesse sur chacun des tiers d'octave au-dessus de 200 Hz.

Sur la figure 4.15, le facteur prépondérant est le régime moteur. En effet, les niveaux les plus forts sont obtenus pour 40, 60 et 80 km/h (régimes moteur très proches : respectivement 6800, 6500 et 6600 tr/min) puis 50 et 70 km/h (6000 et 5500 tr/min).

Le cas de la décélération (figure 4.16) est un peu particulier puisque, pour les essais réalisés, les régimes moteur augmentent toujours avec la vitesse. On obtient donc une prépondérance du facteur vitesse. Comme constaté avec la Renault Clio, on peut penser que l'influence du régime moteur n'est pas négligeable.

Concernant la variation des niveaux d'émission sonore en fonction de la vitesse, du régime moteur et de l'accélération, il existe donc de grandes similitudes entre un véhicule léger et une motocyclette.

On peut noter toutefois que les raies moteur sont des éléments importants dans le spectre de puissance des motocyclettes. Elles peuvent en effet varier sur une gamme de fréquences très importante (de 30 à 400 Hz environ), du fait de la coexistence sur le marché de modèles bi et quadri-cylindres[7], et d'une plage de régimes moteur très étendue[8]. Les raies fondamentales, répertoriées dans le tableau 4.3, peuvent être déduites du régime moteur à l'aide de la relation 3.79 [Moto technologie 1999].

[7] Rappelons que la fréquence de ces raies est directement proportionnelle au nombre de cylindres.
[8] Il n'est pas rare aujourd'hui de rencontrer des modèles japonais pouvant dépasser 12000 tr/min.

Tableau 4.3 : Raies moteur théoriques et mesurées (les erreurs sont en grisé).

		Vitesse stabilisée		Accélération		Décélération	
		Raie calculée (Hz)	Raie mesurée (Tiers d'octave)	Raie calculée (Hz)	Raie mesurée (Tiers d'octave)	Raie calculée (Hz)	Raie mesurée (Tiers d'octave)
Suzuki 600 Bandit	40 km/h	100 (100)	100	227 (250)	250	—	—
	50 km/h	130 (125)	125	183 (200)	160-200	130 (125)	125
	60 km/h	153 (160)	160	217 (200)	200	153 (160)	125-160
	70 km/h	153 (160)	160	200 (200)	160-200	153 (160)	160
	80 km/h	170 (160)	160	220 (200)	200	170 (160)	160
Yamaha XV 750	70 km/h	57 (63)	< 80	90 (100)	80-100	—	—
	70 km/h	67 (63)	< 80	—	—	—	—
	70 km/h	90 (100)	80	—	—	—	—

On constate un bon accord entre les raies calculées et mesurées malgré quelques écarts inévitables. En accélération notamment, des niveaux équivalents peuvent être obtenus dans deux tiers d'octave consécutifs, empêchant de détecter la raie moteur avec précision. Ces écarts sont, d'une part, dus à la grande rapidité d'évolution du régime moteur dans ces conditions donc à la difficulté de relier vitesse, régime moteur et acquisition des données acoustiques, et d'autre part, à la précision du compte-tours[9].

Intéressons-nous maintenant aux spectres obtenus pour une vitesse donnée.

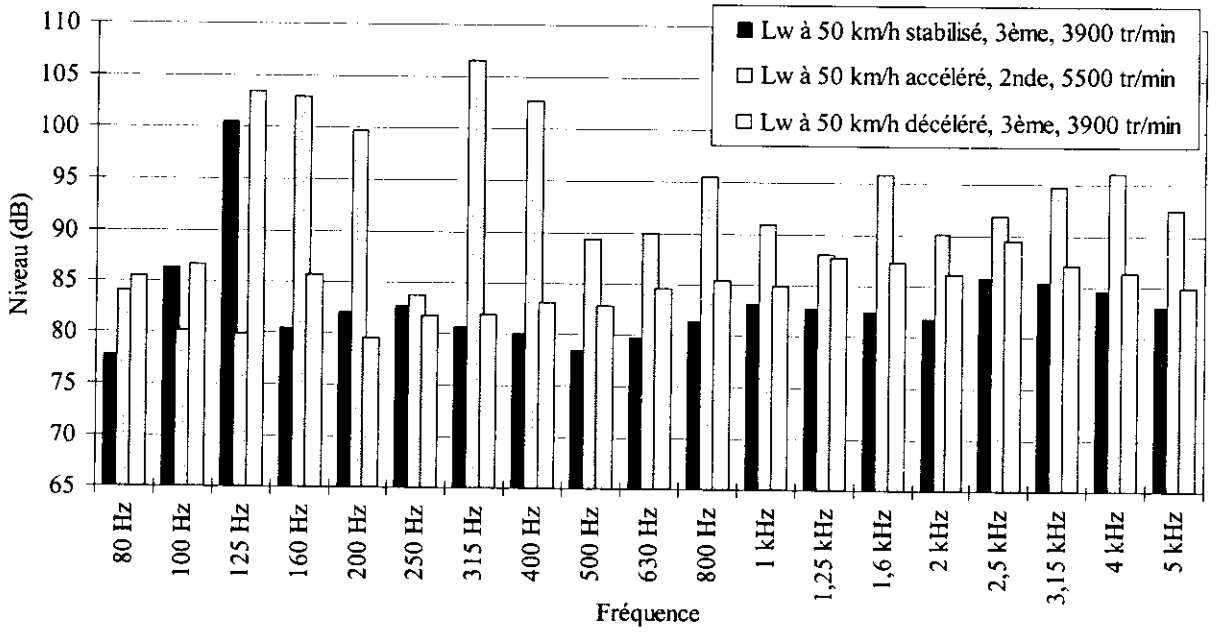

Figure 4.17 : Spectres de puissance Suzuki Bandit à 50 km/h.

[9] Rappelons que les indications de régimes moteurs nous sont fournies, aussi bien pour les véhicules légers que pour les motocyclettes, par le compte-tours.

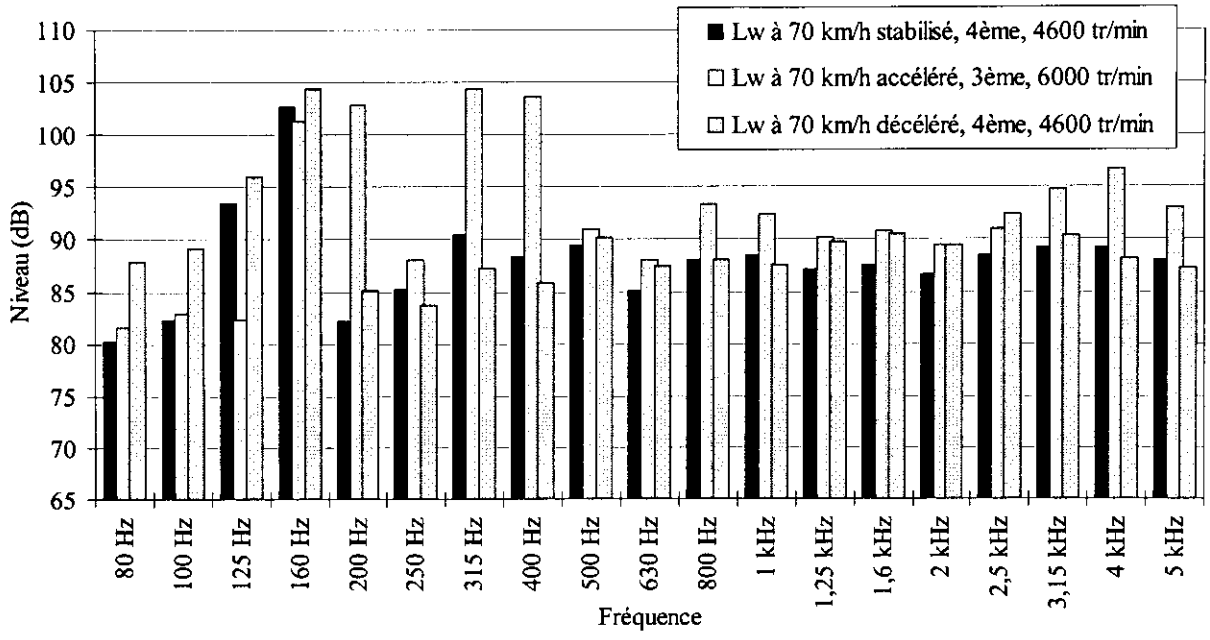

Figure 4.18 : Spectres de puissance Suzuki Bandit à 70 km/h.

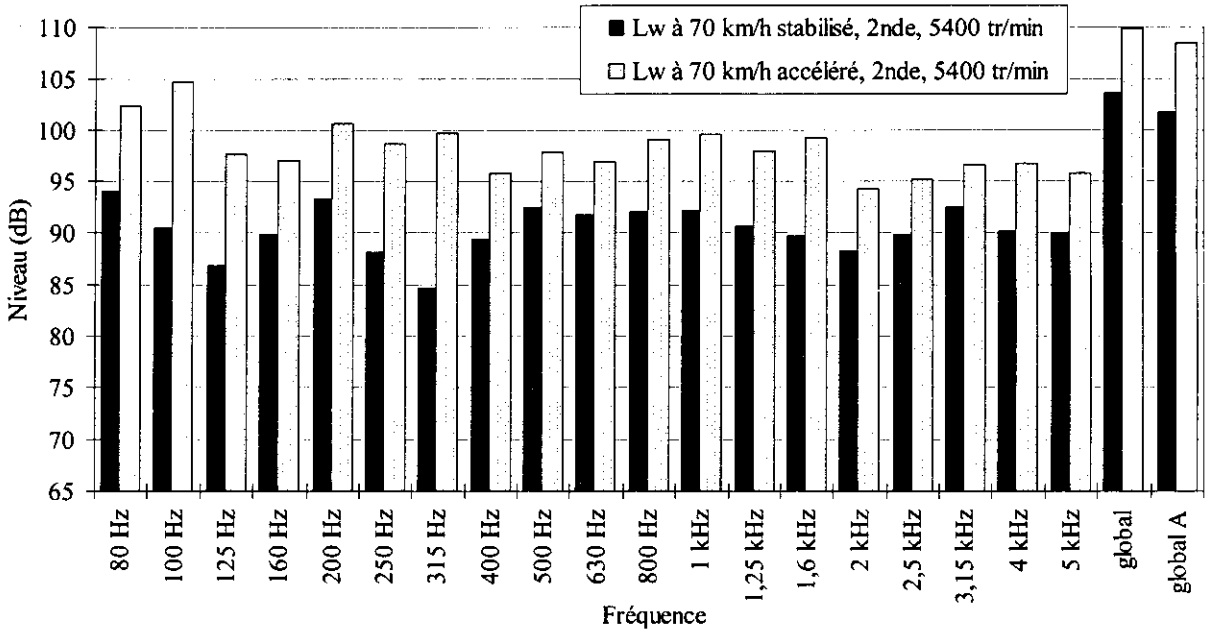

Figure 4.19 : Influence du seul paramètre accélération pour la Yamaha XV 750 à 70 km/h.

Comme pour les véhicules légers, nous nous apercevons sur les figures 4.17 à 4.19 que les spectres déterminés pour différents modes de fonctionnement (vitesse stabilisée, accélération ou décélération) sont quasiment identiques dans leur forme, seul le niveau varie d'un cas à l'autre. L'influence du paramètre accélération (ou charge moteur) est parfaitement régulière sur la plus grande partie du spectre (cf. figure 4.19). On peut aussi noter que l'effet de l'accélération s'affaiblit avec la vitesse (cf. figures 4.17 et 4.18). Lors des phases de

décélération, les niveaux restent toujours légèrement supérieurs à ceux obtenus à vitesse stabilisée, ce qui avait déjà été constaté pour les véhicules légers et interprété comme la conséquence du frein moteur.

Comme nous l'avons fait remarquer, le parc de motocyclettes en circulation est très hétérogène. Pour s'en rendre compte nous avons réuni sur le même graphique les deux motocyclettes à notre disposition dans des conditions normales d'utilisation.

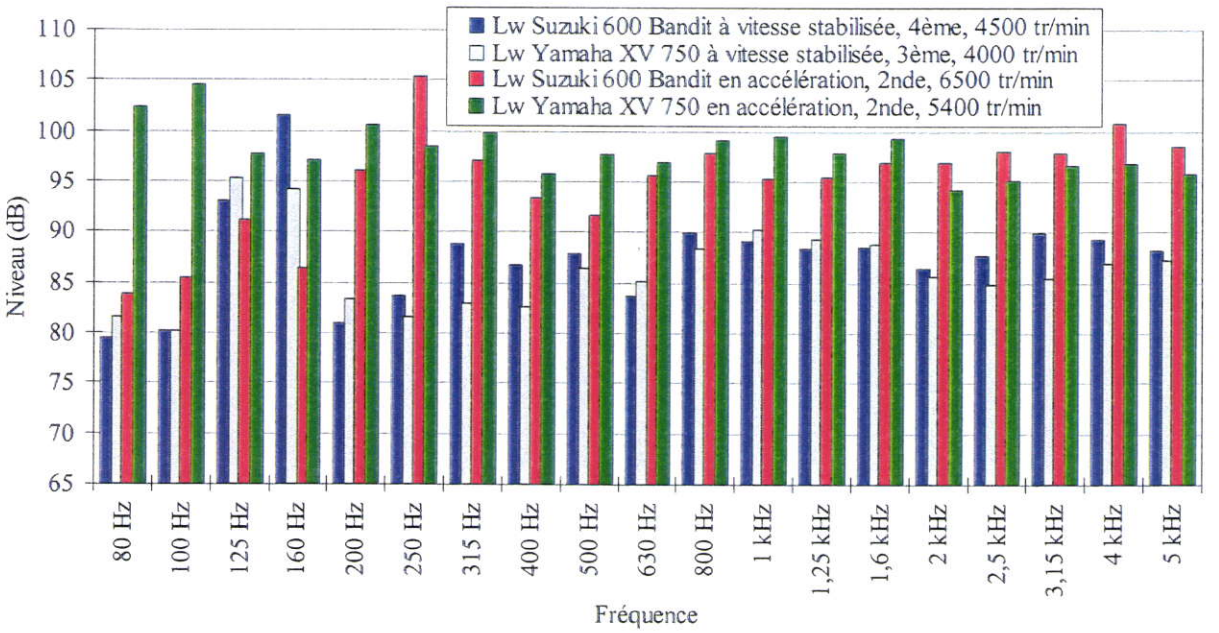

Figure 4.20 : Comparaison Suzuki 600 Bandit (quadri-cylindres)-Yamaha XV 750 (bi-cylindres) à 70 km/h.

Les écarts entre les deux motocyclettes sont moins prononcés que l'on aurait pu l'imaginer. Ils restent principalement limités à la région basses fréquences, zone où se manifestent les raies moteur (fondamentale et harmonique de rang 1). Cependant, cette zone est plus large que pour les véhicules légers et les écarts prennent de l'importance vis à vis de la perception auditive[10].

Comme nous venons de le voir, le comportement de ce type de sources présente de nombreuses similitudes avec celui des véhicules légers. La détermination des lois de puissance acoustique doit donc être réalisable à l'aide de l'expression 3.6. Nous nous heurtons cependant à quelques problèmes. Le premier est qu'en raison des capacités d'accélération importantes de ces engins, tous les paramètres dynamiques varient très rapidement; d'où, avec notre système actuel, des imprécisions sur la vitesse, le régime moteur et l'accélération. On peut estimer ces erreurs respectives à ± 2 km/h, ± 50 tr/min et ± 0.2 $m.s^{-2}$. Ensuite, le nombre de configurations testées (une quinzaine environ avec trois passages pour chaque cas) est certainement insuffisant. La tentative de détermination des coefficients de régression s'est donc révélée infructueuse. Ces derniers, même s'ils semblent corrects pour certains tiers d'octave,

[10] La pondération A atténue par exemple la fréquence centrale 100 Hz de 19,1 dB alors qu'à 400 Hz l'atténuation n'est plus que de 3.2 dB (cf. annexe 1).

présentent des invraisemblances pour d'autres. L'acquisition en cours d'un nouveau matériel autorisant la mesure précise de la vitesse et de l'accélération (cellules photoélectriques), à l'endroit désiré, ainsi qu'un nombre de configurations plus important, devraient permettre d'améliorer les résultats. Les coefficients de régression pourront alors être déterminés.

Chapitre 5 : Les sources sonores d'origine humaine en milieu urbain

5.1. Introduction

Les sources de bruit des transports constituent actuellement la nuisance sonore principale, tant en milieu urbain que périurbain. Cela se retrouve dans le contenu de ce document, qui accorde une grande part à ce type de sources.
Compte tenu des diverses actions engagées par les pouvoirs publics tendant à diminuer la concentration des véhicules dans les centres-villes et à favoriser l'extension des zones piétonnes ou semi-piétonnes, les ***sources sonores d'origine "humaine"*** prennent cependant une ampleur croissante. Dans certains cas même, elles peuvent être prépondérantes.
Ces sources sont complexes et fortement non-stationnaires. Cela nécessite une approche en deux étapes. D'une part, une approche du type "classification qualitative" suivant qu'elles apparaissent en mode continu, périodique ou parfaitement aléatoire et d'autre part, une approche quantitative. Cette dernière devrait permettre d'affecter à chacun de ces types de source des indicateurs physiques que nous pourrons introduire par la suite dans les modèles propagatifs. Nous nous intéressons tout d'abord aux sources "continues"[1]. Elles sont liées à la concentration de personnes dans un même lieu. Citons par exemple des enfants jouant dans la cour de récréation d'une école ou encore des passants sur une place de marché. Inversement, une source de type "aléatoire" pourrait être représentée par exemple, par des personnes isolées à la sortie d'un bar ou d'une discothèque.

Dès lors que l'on souhaite s'intéresser aux phénomènes physiques, la littérature relative aux sources sonores d'origine humaine n'est pas très abondante. Au cours de notre recherche aucun article d'intérêt majeur n'a pu être dégagé. D'un point de vue plus général, il existe cependant quelques méthodes de classification qui englobe les sources humaines. Rappelons les travaux de Léobon [Léobon & Sapaly 1994] (cf. § 1.4) ou ceux du Cresson [PIR-Villes 1998] qui malheureusement, sont difficilement exploitables dans le cadre de notre étude. Des méthodes d'analyse temps-fréquence permettent bien d'étudier des mécanismes particuliers comme l'analyse de la parole, mais de manière très fine et non dans sa globalité [Flandrin & Sessarego 1990]. Nous avons d'ailleurs remarqué, dans la littérature, que les sources humaines sont souvent réduites à l'unique étude de la parole dans le sens le plus restrictif du terme. Malheureusement, cette approche est inexploitable dans le cadre de la mise au point d'un logiciel de prédiction des ambiances sonores urbaines. En effet, nous recherchons plutôt une méthode capable de distinguer les spécificités de ce type de sources sans tomber dans l'excès

[1] Ou périodique suivant l'échelle de temps que l'on se donne. Des enfants jouent dans une cour de récréation pendant une demi-heure environ ; on peut considérer cela comme une source continue par rapport à des bruits qui ne durent que quelques secondes. De plus, ces enfants jouent tous les jours aux mêmes heures, c'est donc également une source périodique.

inverse qui consisterait à ne considérer que des situations trop particulières. Cette caractérisation doit donc tenir compte de cas typiques ou "moyens", car l'implantation de ce type de sources dans le logiciel de propagation du son en milieu urbain ne peut s'effectuer qu'à partir de paramètres moyens.
En conséquence, nous avons retenu une caractérisation quelque peu similaire à celle déjà utilisée pour les sources de bruit des transports, à savoir un ensemble de sources ponctuelles omnidirectionnelles correctement positionnées dans l'espace. Les niveaux de pression sonore seront pris en compte par l'intermédiaire de spectres tiers d'octave moyens. Cette notion de moyennage est rendu possible grâce à l'hypothèse de sources quasi-continues pour lesquelles l'évolution temporelle est peu importante.
Dans notre étude, nous avons concentré nos efforts sur deux typologies de sources. Dans cette optique, nous avons étudié deux cours de récréation d'écoles primaires et une place de marché. Il est à noter que pour des situations de sites non parfaitement libres ou ouverts[2], il est tenu compte, dans la méthodologie de calcul, de la présence des façades des bâtiments. Ceci permet d'obtenir à terme, une caractérisation à la fois plus fine et indépendante de tout effet induit par la présence d'obstacles.

5.2. Etude de cours de récréation

5.2.1. Premières expérimentations dans une école

Afin de mieux cerner le comportement de ce type de source, une première série de mesures a été effectuée en juin 1998 dans une école primaire, "La Houssais", à Rezé dans la banlieue nantaise.

5.2.1.1. Protocole et site de mesure

Le site était constitué d'un bâtiment rectiligne d'une hauteur R+2, à l'intérieur duquel se trouvaient les salles de classes, et d'une cour de récréation présentant une ouverture sur un parc (figures 5.1 et 5.2).

Ces essais ont consisté à positionner neuf microphones de mesure en divers endroits du site : huit autour de la cour de récréation et un dernier au premier étage du bâtiment. Ce dispositif nous a permis d'enregistrer pendant chaque récréation le bruit des enfants jouant dans la cour. Afin d'une part, de ne pas les perturber et d'autre part, d'éviter une modification de leur comportement, les microphones étaient dissimulés dans les arbustes bordant la cour, à l'exception du neuvième placé en façade à hauteur du premier étage, qui était visible mais inaccessible. De ce fait, mis à part quelques cas particuliers, les enfants n'ont pas été influencés par la présence des microphones.

[2] Cas des cours de récréation avec la présence d'une façade.

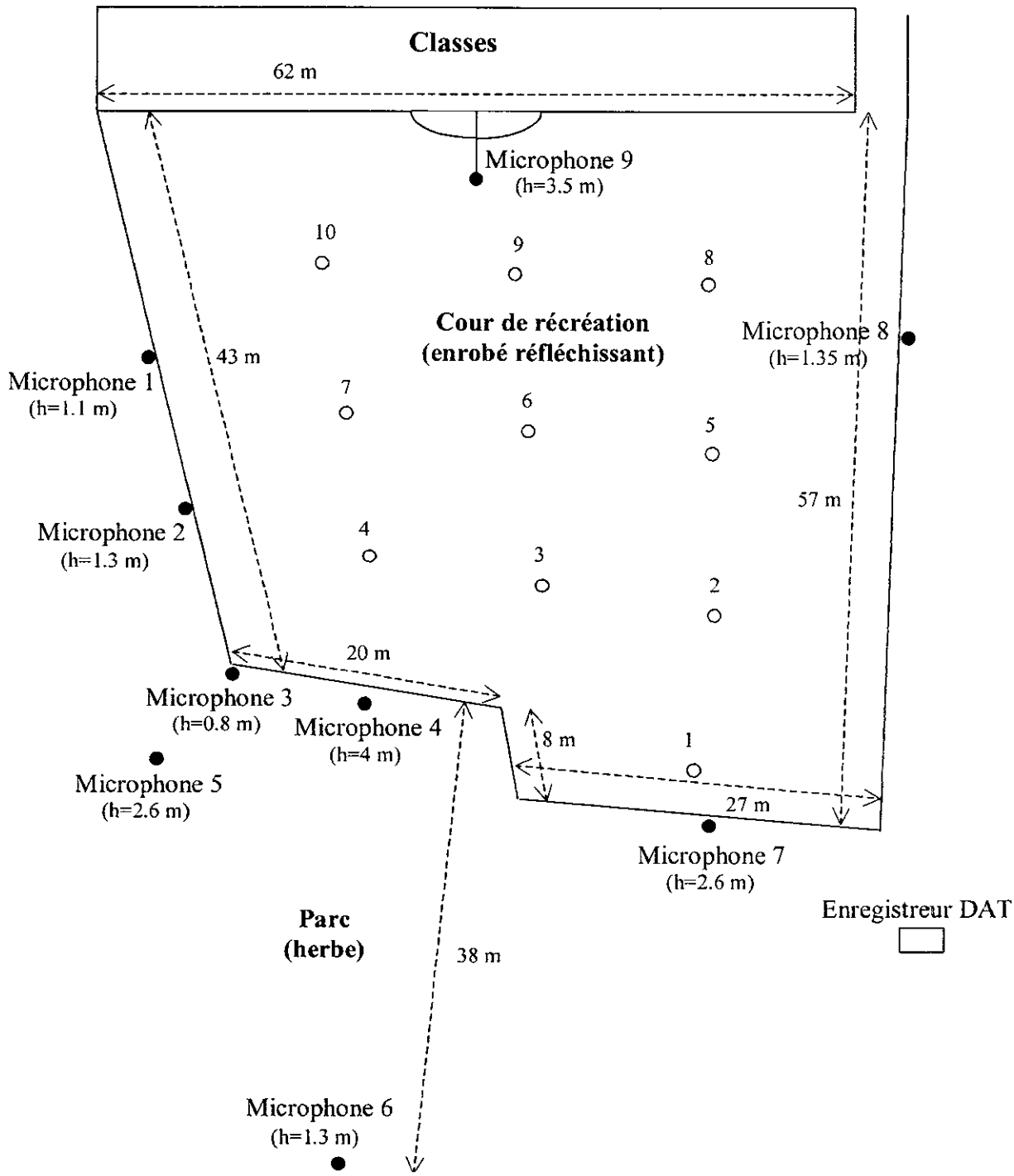

Figure 5.1 : Plan de la cour de récréation, placement des microphones et des sources sonores fictives (numérotées de 1 à 10).

De part la configuration du site et la localisation de l'avenue la plus proche située à une centaine de mètres, le bruit de la circulation automobile était très inférieur au niveau sonore produit par les enfants. De ce fait, il ne perturbait pas les mesures à l'exception peut-être du microphone n°6, en raison d'un rapport signal/bruit moins favorable, notamment aux basses fréquences (cf. § 5.2.1.3).

En résumé, les bruits provenant de la cour de récréation émergeaient très nettement des autres sources.

Afin d'en étudier la reproductibilité, ces mesures ont été répétées quatre fois sur deux jours[3]. En effet, pour obtenir des données fiables il était important d'examiner les similitudes et les éventuelles différences des signaux acoustiques issus de plusieurs périodes de récréations.

Figure 5.2 : Vue de la cour de récréation, prise entre les microphones n°2 et n°3.

5.2.1.2. Premiers résultats

Le premier traitement des données acoustiques consiste à déterminer, pour chaque microphone, le niveau énergétique moyen pondéré A (LAeq) sur toute la période de la récréation (environ 35 minutes), à partir d'un échantillonnage en durées élémentaires d'une seconde. La figure 5.3 représente l'évolution temporelle des $LAeq_{1s}$ lors d'une des récréations.

Sur cette figure, on observe rapidement qu'après une période transitoire, correspondant à la sortie progressive des enfants dans la cour, le niveau se stabilise autour de 73 dBA. Les pics très courts que l'on observe sont dus à la présence de certains enfants à proximité directe du microphone. Les saturations qui en résultent sont éliminées lors du traitement.

[3] Avec environ 35 minutes d'enregistrement à chaque récréation, soit au total plus de deux heures de bande par microphone.

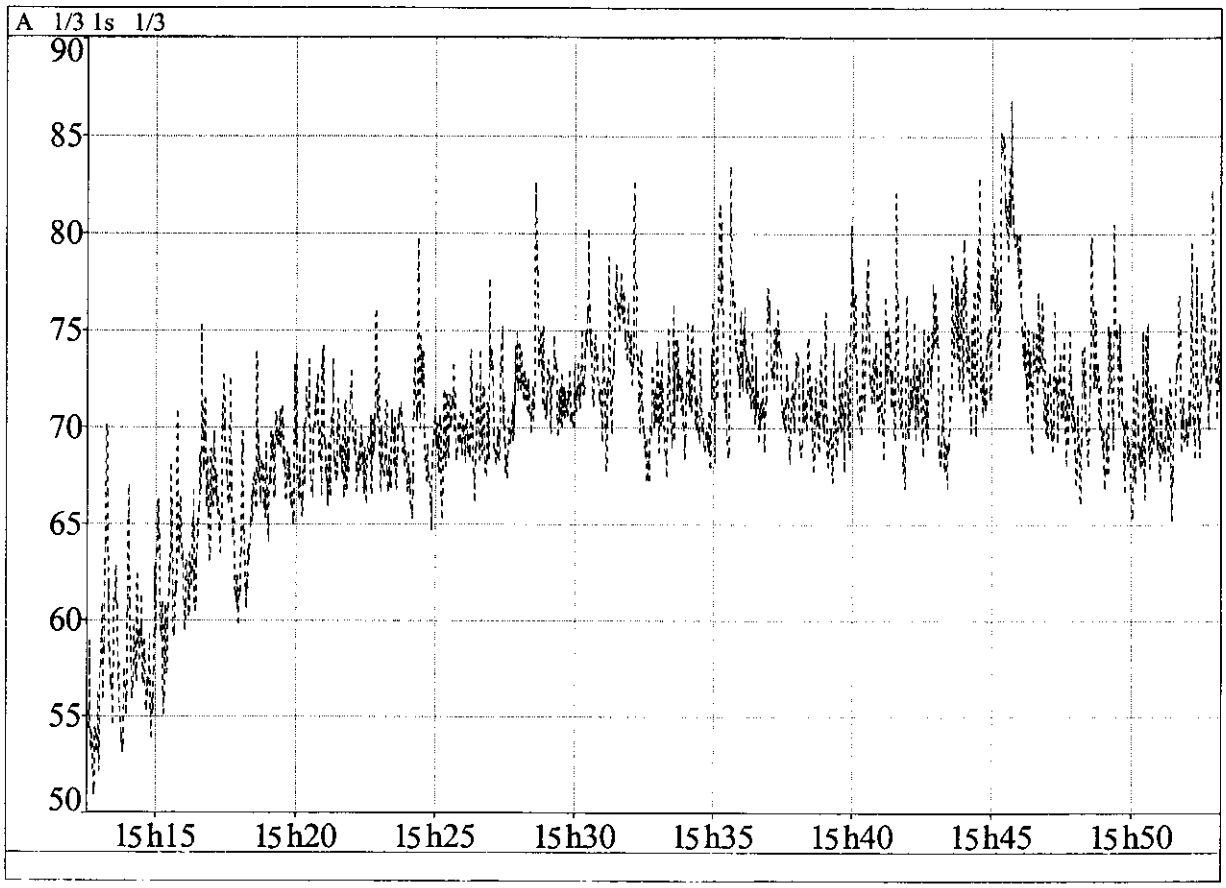

Figure 5.3 : Evolution temporelle des $LAeq_{1s}$ au cours d'une récréation pour le microphone n°2.

Sur les figures 5.4 et 5.5 sont représentées des comparaisons des niveaux équivalents mesurés entre les diverses récréations, pour deux microphones. Il est à noter que le nombre d'enfants présents dans la cour est relativement constant d'une récréation à l'autre : entre 200 et 220.

Malgré quelques légères variations, on constate sur ces graphiques que les écarts entre les différentes récréations sont très peu marqués : en moyenne 1 ou 2 dB sur tout le spectre et moins de 1.5 dB sur le niveau global ou global pondéré A. Les déviations constatées ont néanmoins plusieurs explications :

- de légères variations du nombre d'enfants présents dans la cour lors des diverses récréations.
- un comportement différent des enfants suivant la période de la journée.
- des conditions de mesures légèrement différentes entre les enregistrements.

Si l'on admet, de plus, que l'erreur entre deux mesures dans des conditions identiques peut atteindre 1 dB, nous pouvons conclure que la reproductibilité obtenue est très satisfaisante.

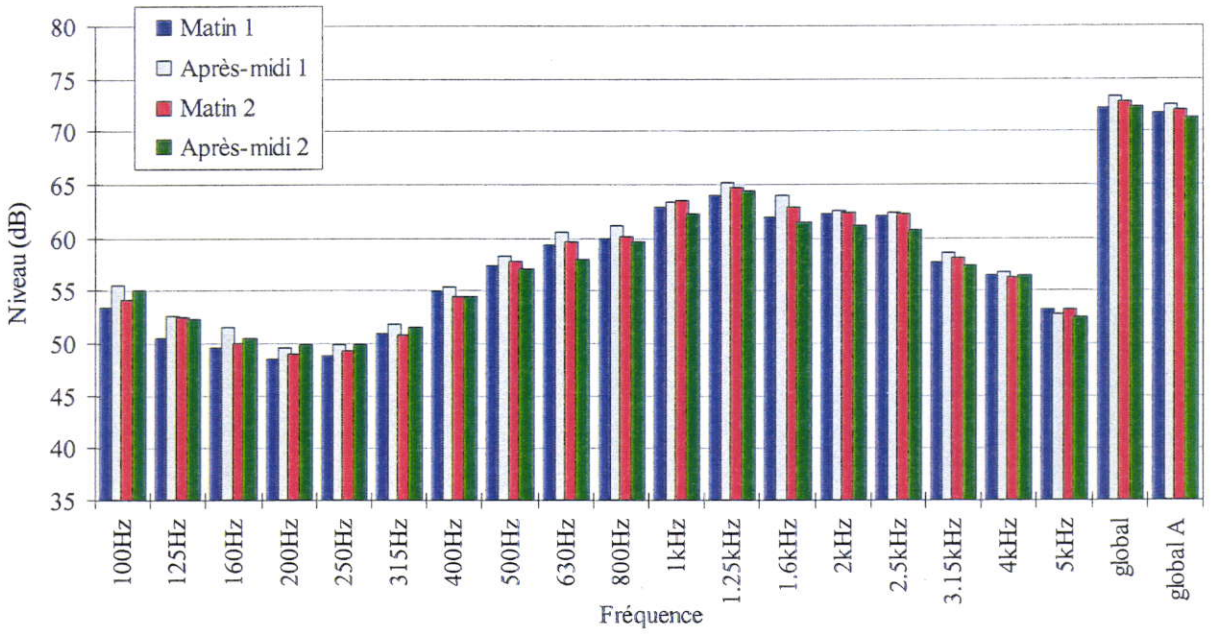

Figure 5.4 : Comparaison des niveaux mesurés entre les différentes récréations pour le microphone n°2.

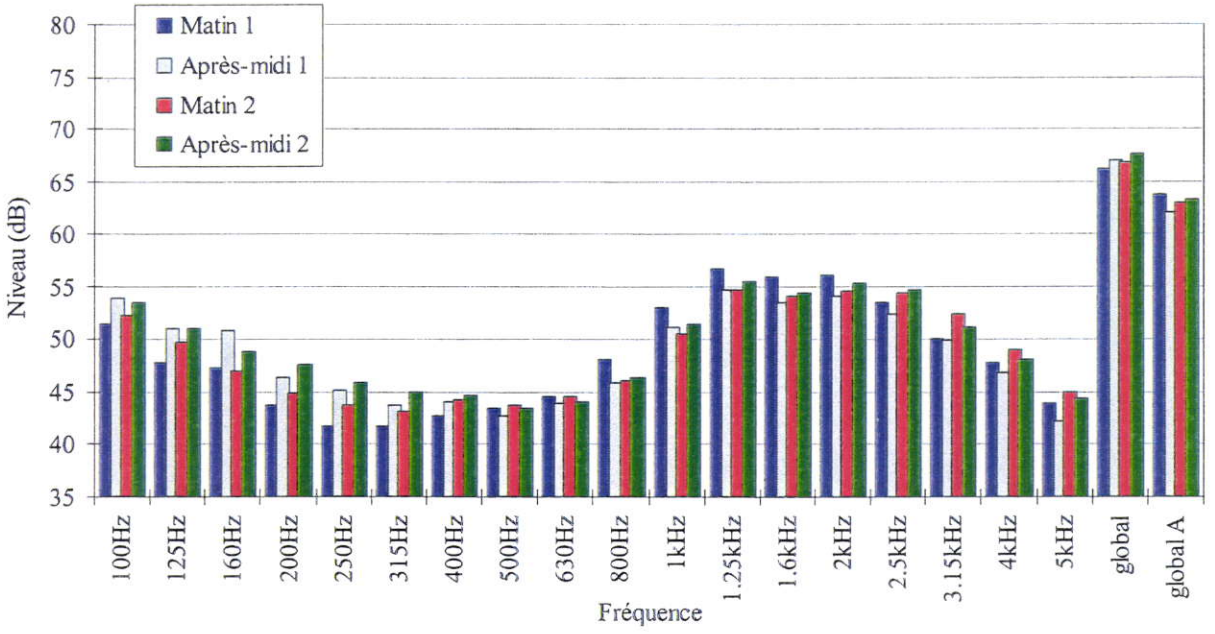

Figure 5.5 : Comparaison des niveaux mesurés entre les différentes récréations pour le microphone n°6.

Si, dans une seconde étape, nous comparons entre eux les spectres issus de différents microphones (figure 5.6), nous observons tout d'abord une forme spectrale identique pour les microphones n°1 et n°2.

Le comportement différent du spectre sonore issu du microphone n°6 a plusieurs explications :

- la diminution du niveau sonore dans la zone comprise entre les tiers d'octaves 500 Hz et 1 kHz, est typique d'un effet de sol (herbe) important,
- en basse fréquence, le rapport signal/bruit est faible, conséquence d'un éloignement important de la cour et d'un rapprochement de la voie de circulation,

Si l'on exclut ces phénomènes particuliers, seule une différence globale de niveau permet de différencier les spectres issus des différents microphones. Cette dernière remarque reste valable pour l'ensemble des spectres, même si, pour une question de clarté, ils ne sont pas tous représentés sur la figure 5.6. La caractérisation de ce type de source s'avère ainsi facilitée.

La partie la plus énergétique du spectre se trouve répartie autour de 1 kHz, ce qui est logique compte-tenu de l'émergence des voix[4] des enfants.

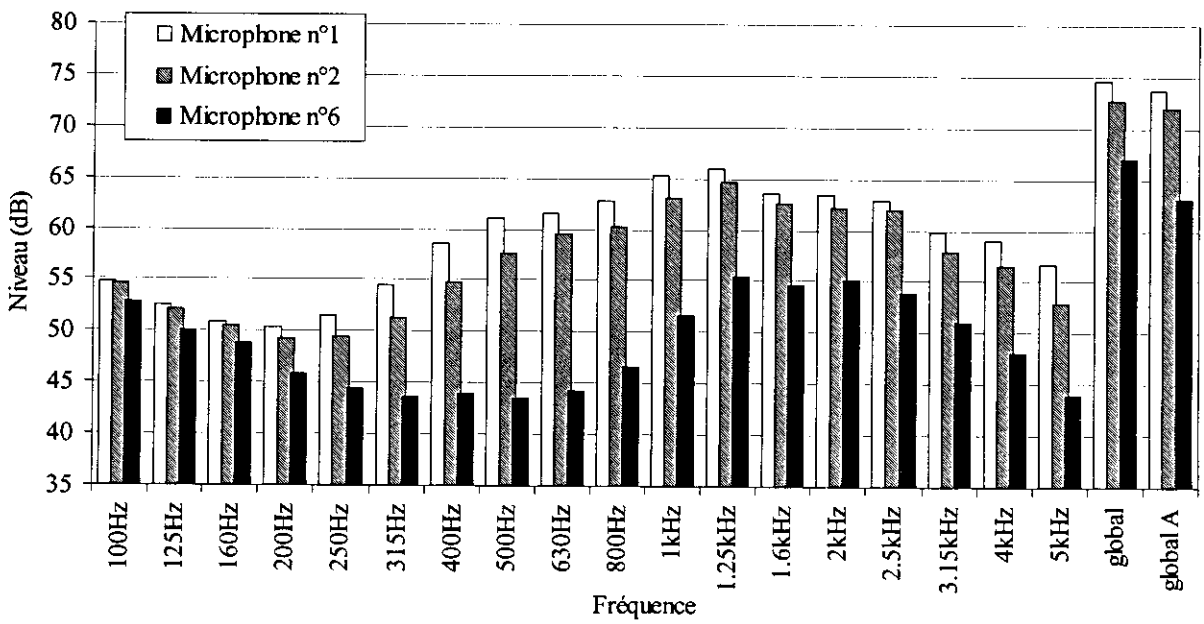

Figure 5.6 : Spectres des niveaux de pression acoustique pour différents microphones.

5.2.1.3. Modélisation : sources sonores fictives

Les dimensions réelles de la cour de récréation ainsi que les positions des microphones ont été mesurées lors des essais. Par la suite, nous avons reproduit la configuration des lieux à l'échelle et placé un ensemble de sources sonores fictives, ponctuelles, omnidirectionnelles[5] et incohérentes entre elles (numérotées de 1 à 10), chacune simulant un groupe d'enfants (cf. figure 5.1). Ces sources ne sont pas réparties au hasard. Elles sont issues du repérage des

[4] Si l'on avait affaire à des adultes, le maximum d'énergie serait plutôt atteint autour de 500 Hz (cf Annexe 5).
[5] Statistiquement on peut considérer qu'il n'y a pas de direction d'émission privilégiée puisque les enfants sont toujours en mouvement.

endroits préférés des enfants à l'intérieur de la cour. Les enfants se groupant aléatoirement dans la cour, on obtient la répartition des sources sonores fictives représentée sur la figure 5.1.

Afin d'identifier les caractéristiques acoustiques de chaque groupe d'enfants, nous avons adopté une technique similaire à celle utilisée pour les sources de type routier. Le problème est toutefois légèrement plus complexe puisque nous devons faire intervenir les ruptures d'impédance du sol (entre le revêtement de la cour réfléchissant et les sols environnants absorbants) ainsi que les réflexions spéculaires sur les façades du bâtiment.
Dans un premier temps, nous remontons à la puissance acoustique de la source n°1 en supposant que seule cette source intervient dans les signaux recueillis au microphone n°7. Ceci est vrai en première approche puisque la distance les séparant est très faible (cf. figure 5.1). Cette puissance acoustique étant déterminée, elle est ensuite affectée à chacune des neuf autres sources fictives. Le niveau obtenu à chaque microphone est alors recalculé en sommant l'énergie apportée par toutes les sources fictives. L'atténuation source-récepteur est calculée à l'aide d'un logiciel de propagation[6] [Rasmussen 1982-2]. Les réflexions sur le bâtiment sont prises en compte si nécessaire. En effet, si elles peuvent être considérées comme négligeables pour des configurations source-microphone éloignées du bâtiment (par exemple source n°1 et microphone n°7), elles deviennent importantes pour des configurations source-microphone proches de la façade (par exemple source n°9 et microphone n°9).

La puissance acoustique déterminée à partir du signal recueilli au microphone n°7, est ensuite ajustée afin de minimiser les écarts mesure-calcul des niveaux de pression sonore pour chaque microphone et pour chaque tiers d'octave.

Comme nous l'avons fait pour les sources de type routier, il était nécessaire, pour l'ensemble des calculs, de définir une hauteur équivalente pour chacune des sources sonores fictives. Nous avons choisi une hauteur comprise entre 0.8 et 1 m, en rapport avec la taille des enfants. Cette hauteur n'a cependant qu'une influence limitée sur le résultat final. En effet, des simulations réalisées en sommant l'énergie apportée par l'ensemble des sources (situées à des distances différentes) ont montré que les interférences géométriques se trouvent masquées.

Une illustration de ce phénomène est représentée sur la figure 5.7, pour laquelle neuf sources sonores ponctuelles incohérentes, positionnées à une hauteur de 80 cm, sont réparties autour d'un cercle. Le niveau obtenu à un récepteur quelconque est calculé par sommation de la contribution de chacune des neuf sources. Cet ensemble de sources est ensuite remplacé par une source unique située au barycentre des neuf sources précédentes (centre du cercle), d'abord à une hauteur de 80 cm puis 1cm.

[6] Ce logiciel, développé au LCPC, à partir de la théorie développée par Rasmussen [Rasmussen 1982-2], prend en compte la rupture d'impédance qui résulte de la présence de deux types de sols sur le trajet source-récepteur. Il nous fournit l'atténuation excédentaire ou effet de sol (différence par rapport au champ libre).

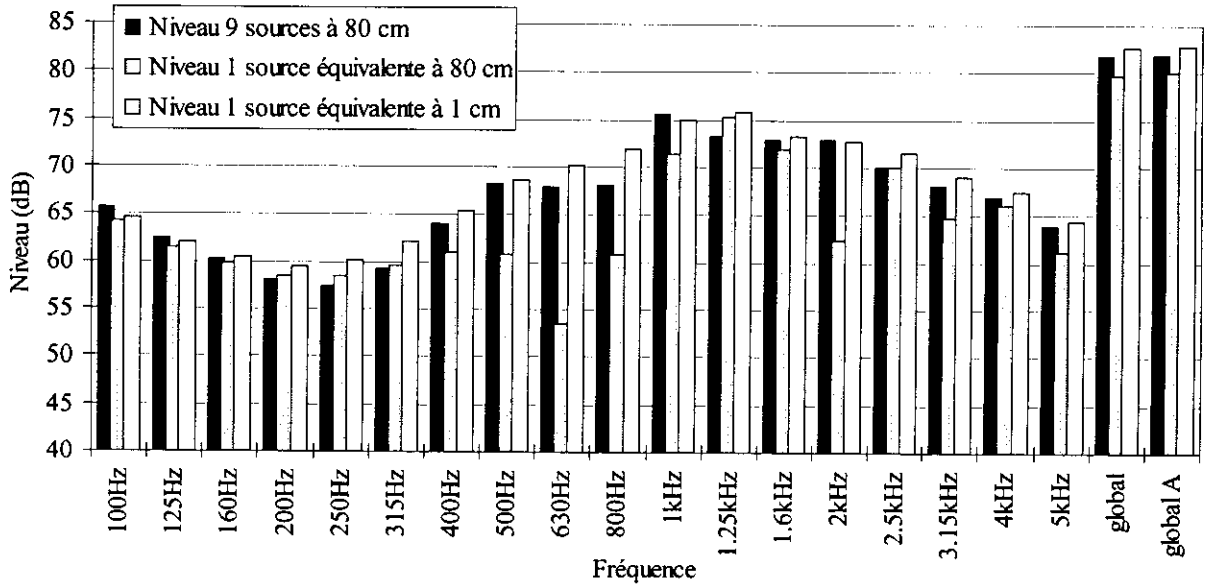

Figure 5.7 : Comparaison entre un ensemble de 9 sources situées à une hauteur de 80 cm et deux sources équivalentes respectivement à 80 et 1 cm.

Sur cette figure, on remarque que la source équivalente proche du sol reproduit plus fidèlement le cas réel qu'une seule source positionnée à 80 cm de hauteur, au barycentre géométrique des neuf sources. Ceci peut sembler paradoxal mais s'explique par le fait que les trajets acoustiques sont différents pour chacune des neuf sources. En sommant la contribution de chacune de ces neuf sources, les interférences géométriques s'en trouvent éliminées. Les interférences qui résultent d'une source unique positionnée près du sol sont également invisibles dans la gamme 100 Hz – 5 kHz. Il s'ensuit que cette source reproduit plus fidèlement le cas réel. Tout ceci est vrai lorsque la distance source-récepteur est de l'ordre de grandeur des dimensions du cercle. Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque la distance source-récepteur est infinie devant les dimensions du cercle, la source équivalente positionnée à une hauteur de 80 cm sera plus fidèle.
En conclusion, la hauteur de la source sonore, équivalente à un ensemble de sources situées à des distances très différentes du récepteur, aura peu d'influence sur les résultats puisqu'après sommation, ces sources seront acoustiquement vues comme proches du sol.

Si l'on considère que chaque source fictive représente 20 enfants (200/10) très proches les uns des autres vis-à-vis de la distance au microphone, on peut assimiler chaque source fictive à une source ponctuelle située à 1 m de hauteur.

Des comparaisons entre le signal mesuré et calculé pour les microphones n°1, n°3, n°5, n°6 et n°9 sont représentées figure 5.8 à 5.12. A chaque récepteur une sommation énergétique est effectuée sur les signaux issus des 10 sources fictives en tenant compte des réflexions sur le bâtiment.

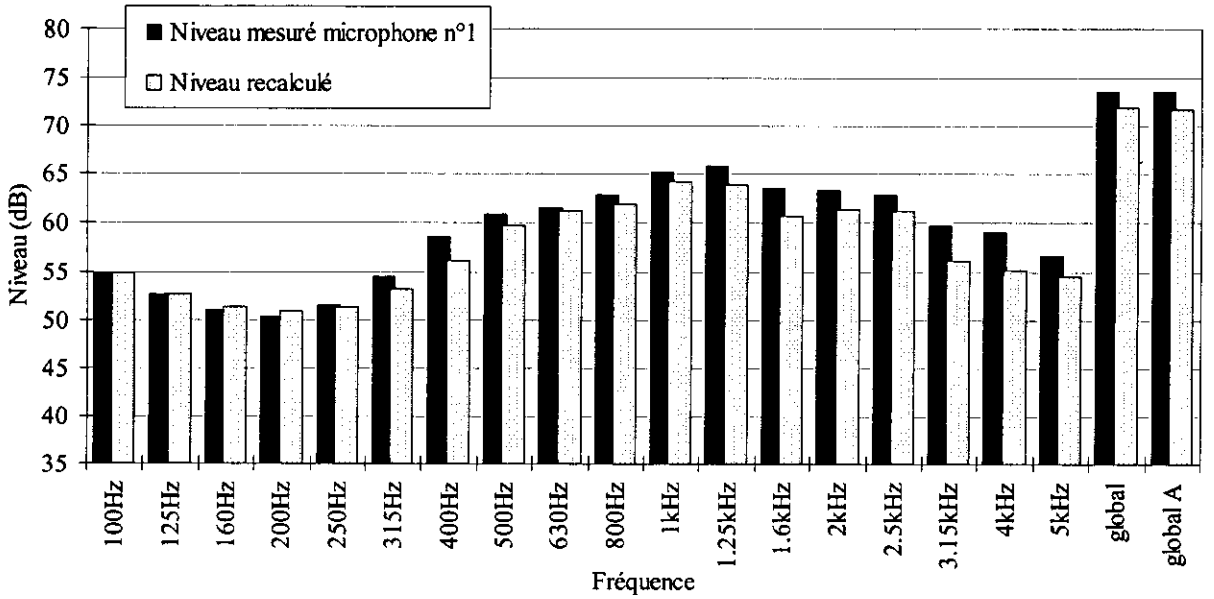

Figure 5.8 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°1.

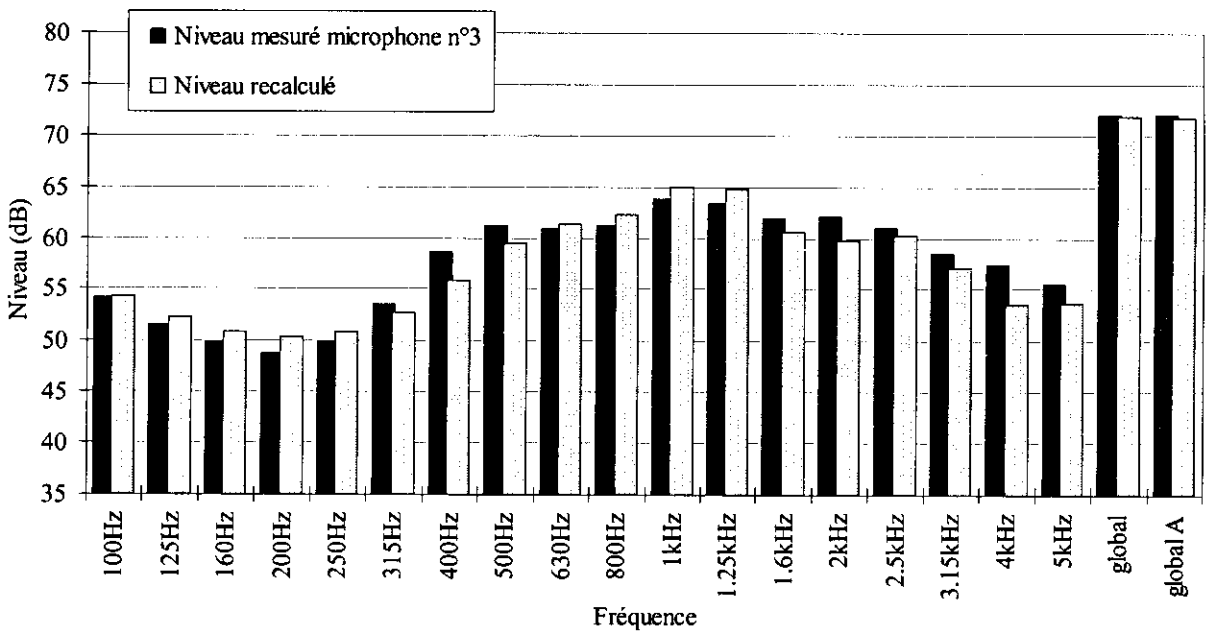

Figure 5.9 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°3.

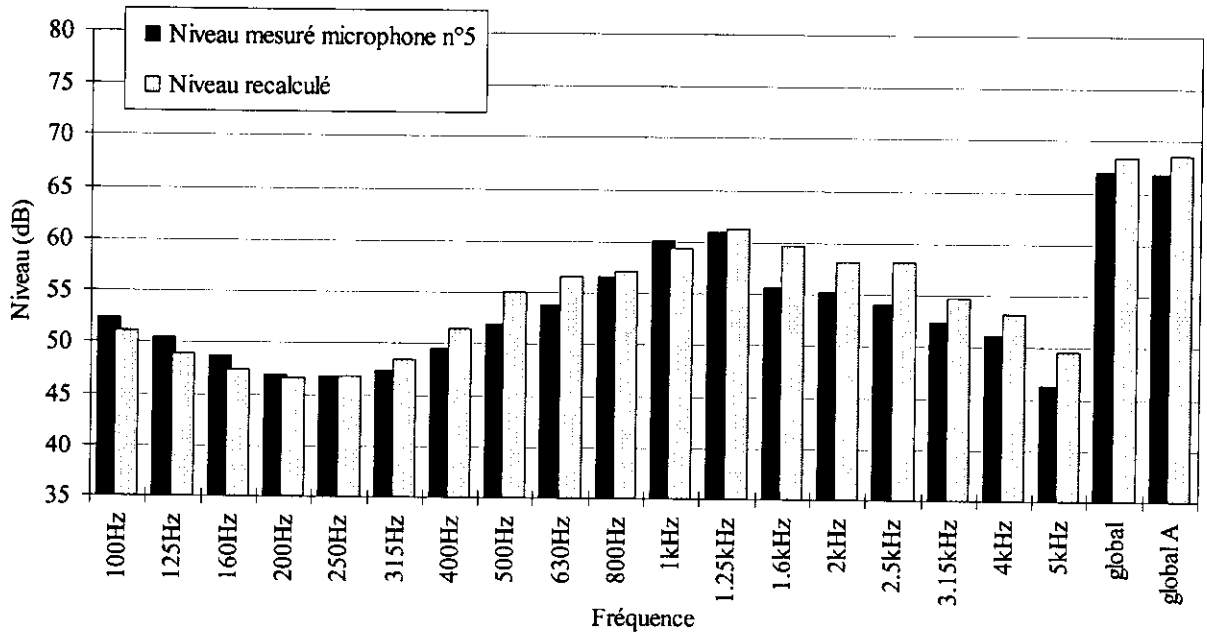

Figure 5.10 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°5.

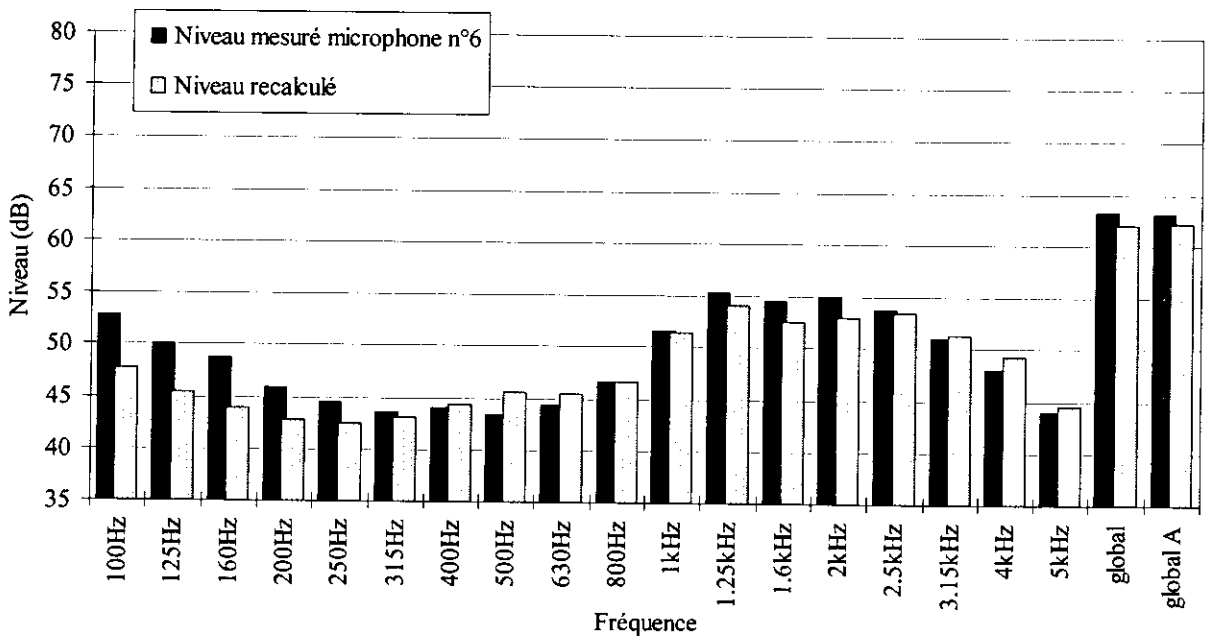

Figure 5.11 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°6.

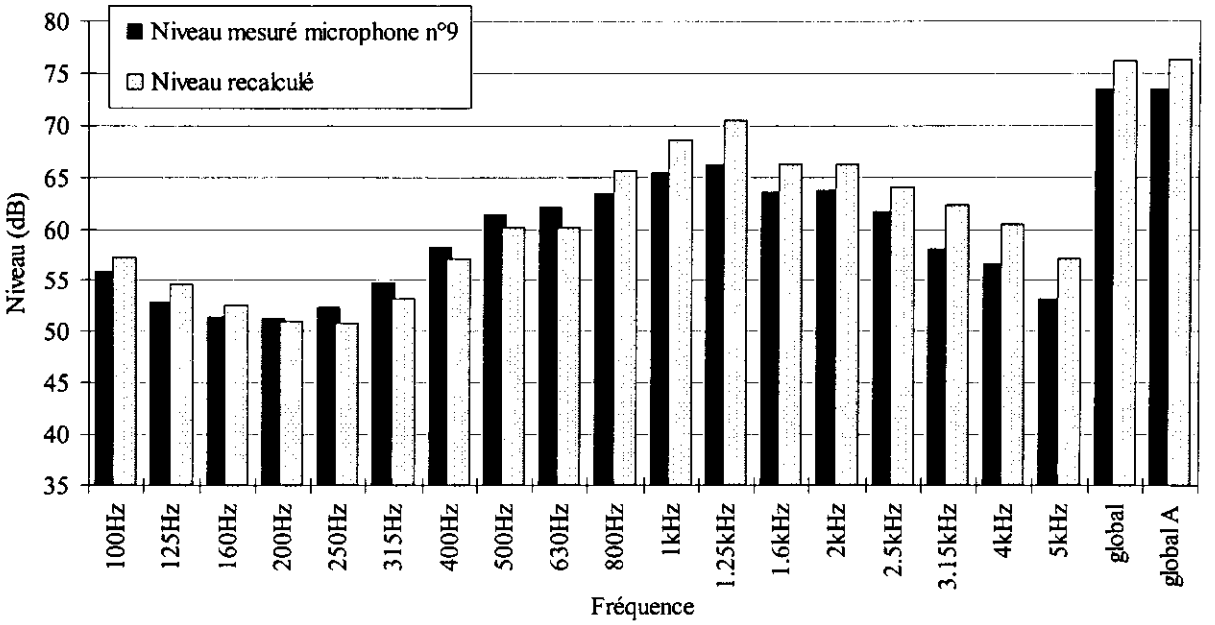

Figure 5.12 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°9.

Pour les microphones n°1 et n°3, l'ajustement entre la mesure et le calcul est très bon sur tout le spectre. En niveau global pondéré A, l'écart ne dépasse pas 2 dBA. Ces microphones sont en effet positionnés idéalement : juste autour de la cour à la limite de la surface réfléchissante.

En revanche, on peut observer quelques écarts aux microphones n°5, n°6 et n°9 et qui peuvent s'expliquer par des effets non pris en compte dans le modèle :

- le microphone n°5 était situé sur une branche d'arbre (dimensions comparables à la longueur d'onde du signal en haute fréquence) que nous avons ignorée dans les calculs,
- le microphone n°6 était, pour sa part, positionné à plus de 60 m du centre de la cour de récréation, d'où un rapport signal/bruit moins favorable compte-tenu notamment de l'émergence de la circulation routière avoisinante dans les premiers tiers d'octave. Ceci n'est en aucun cas gênant car, d'une part, ces phénomènes ne se produisent pas dans une gamme de fréquence prépondérante pour la voix et que d'autre part, l'application de la pondération A réduit fortement l'influence de ces bandes de tiers d'octave sur le niveau global (figure 5.13). Notons toutefois que l'effet de sol mis en évidence précédemment (cf. figure 5.6) est bien pris en compte par le modèle propagatif utilisé,
- enfin, le bâtiment, sur lequel nous avions fixé le microphone n°9 (au premier étage, à 5 m en avant de la façade), possède une "casquette" de 2.5 m par rapport à l'aplomb du bâtiment (figure 5.14). Celle-ci n'a pas été prise en compte dans nos calculs. Il en résulte un effet de masque, bien visible sur la figure 5.12 à partir de 800 Hz.

Toutes ces remarques justifient les écarts rencontrés en termes spectral. Malgré cela, l'ajustement, en termes de niveau global, est presque aussi bon que pour les microphones n°1 et n°3 puisqu'il ne dépasse pas 2.5 dBA.

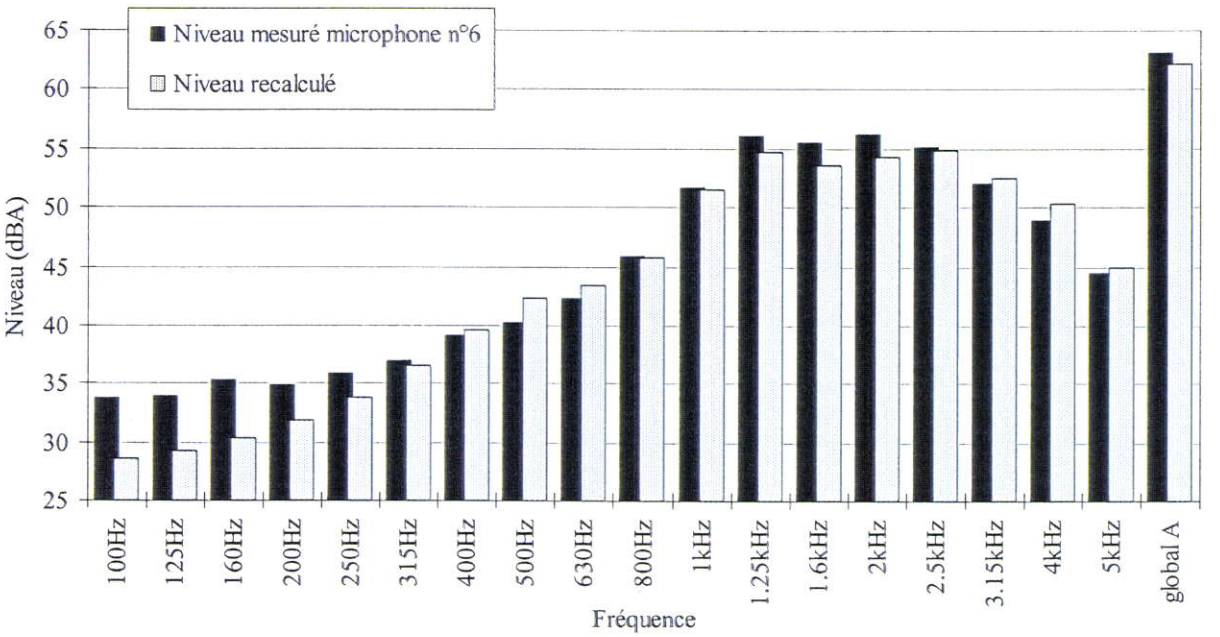

Figure 5.13 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°6 avec la pondération A.

Figure 5.14 : Emplacement du microphone n°9.

Connaissant les spectres de pression acoustique, précédemment déterminés, le spectre de puissance acoustique d'une source fictive, représentatif d'un groupe de 20 enfants a pu être calculé. A partir de ce dernier, nous en avons déduit le spectre moyen unitaire pour un seul enfant.

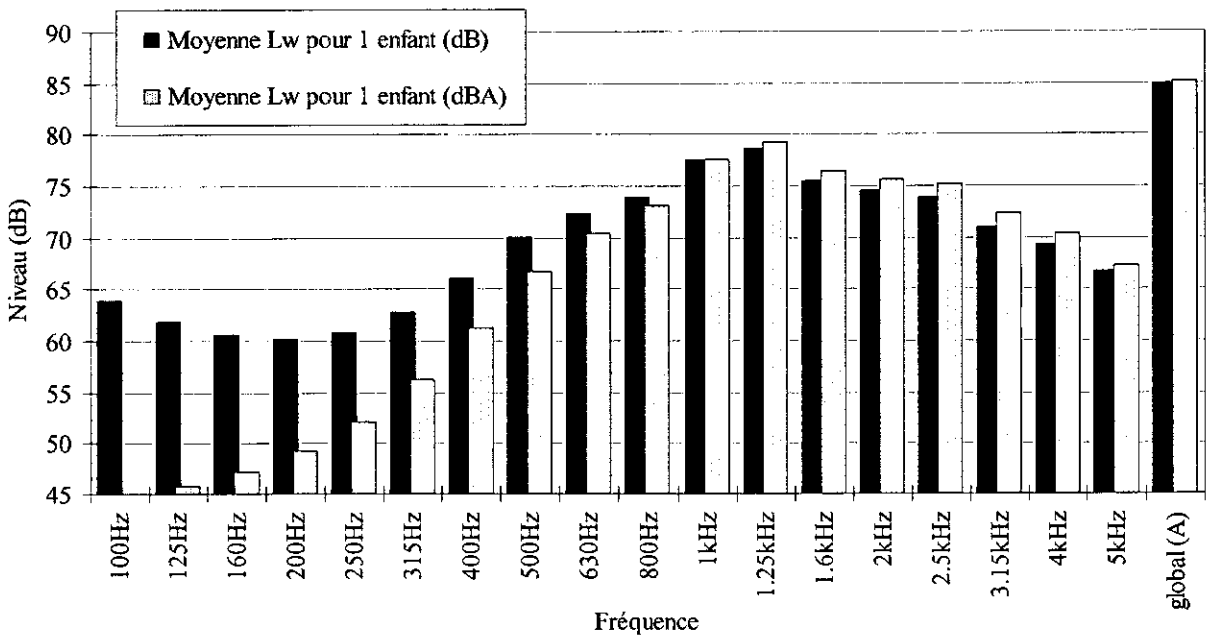

Figure 5.15 : Puissance acoustique calculée pour un enfant.

Bien entendu, cette puissance acoustique, définie pour un seul enfant, n'est réaliste que si elle est appliquée à un nombre suffisant d'enfants.
Si par ailleurs, on souhaite connaître le niveau de bruit produit par les enfants d'une autre école, il suffit d'effectuer une sommation énergétique, à partir de ce spectre, pour le nombre d'enfants désiré. Au cours du paragraphe suivant, nous procéderons à la vérification de cette hypothèse.

5.2.2. Seconde campagne de mesures dans une école

Afin de compléter et éventuellement modifier les résultats obtenus lors de la première série de mesures effectuée en juin 1998 dans l'école primaire "La Houssais" à Rezé, une seconde campagne de mesures a été organisée en juin 1999, dans une autre école primaire de Rezé, l'école du "Port au blé".

Nous avons repris pour cela une procédure d'analyse identique à celle utilisée pour la première école.

5.2.2.1. Protocole et site de mesure

Le site est un peu différent du précédent : le bâtiment principal se trouve de plain-pied et n'est pas rectiligne. Il existe cependant bon nombre de similitudes avec l'école de La Houssais : la cour de récréation, revêtue d'un enrobé réfléchissant, débouche sur une aire de jeux en herbe

(figures 5.16 et 5.17). De plus, la circulation automobile reste à l'écart et ne perturbe pas les mesures.

Par rapport au protocole utilisé lors de la campagne de mesures à l'école de la Houssais, la seule différence est relative au nombre de microphones réduit à cinq dans la seconde expérimentation. Trois sont placés autour de la cour de récréation et les deux derniers un peu plus à l'écart (équivalents du microphone n°6 de l'école précédente). Dans l'ensemble, les enfants n'ont pas été attiré par la présence des microphones.

Afin d'en étudier la reproductibilité, ces mesures ont également duré deux jours.

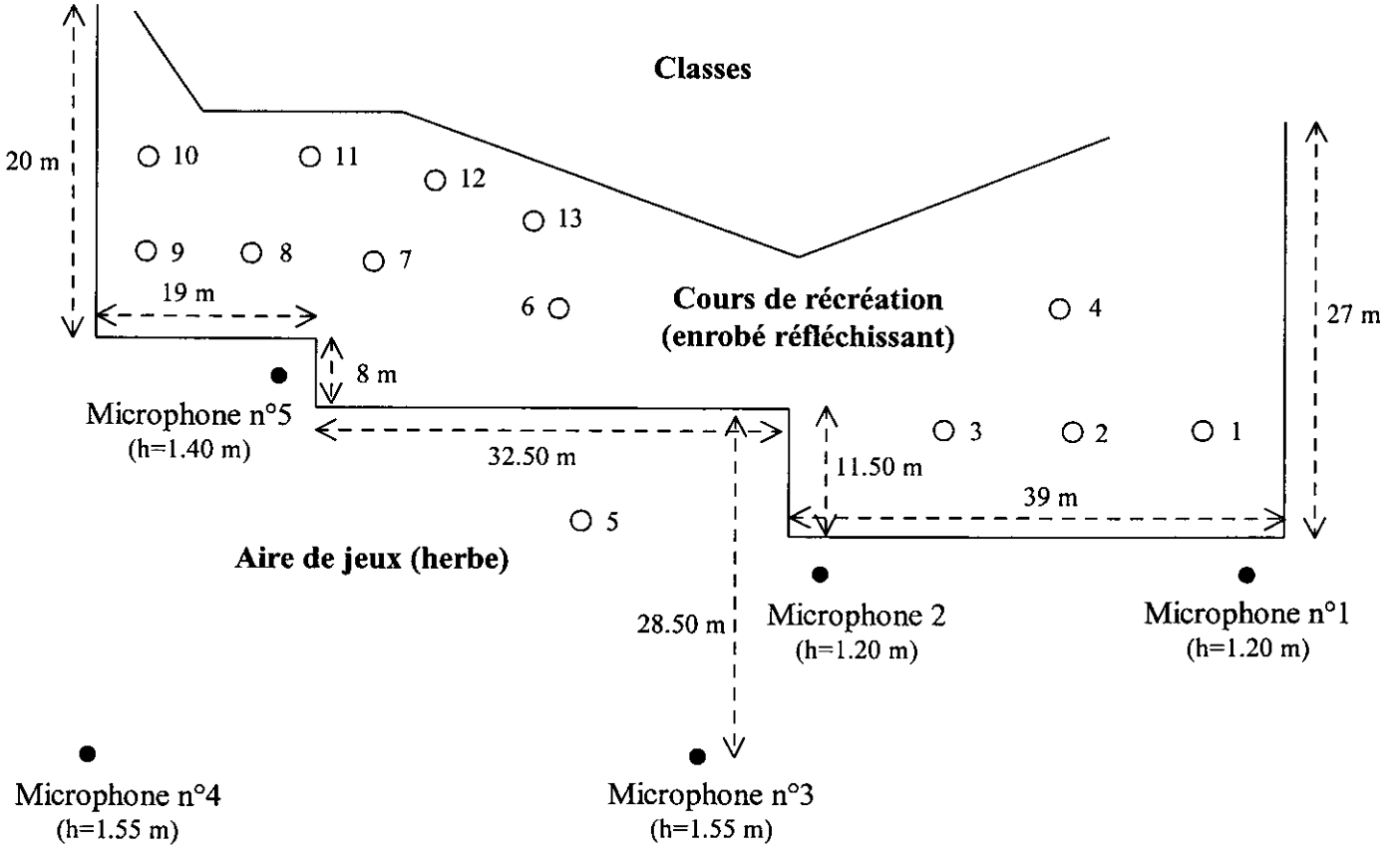

Figure 5.16 : Plan de la cour de récréation, emplacement des microphones et des sources sonores fictives (numérotées de 1 à 13).

Figure 5.17 : Vue de la cour de récréation, prise derrière le microphone n°5.

5.2.2.2. Premiers résultats

Si le protocole de mesure est similaire à la première expérimentation, le traitement des données l'est aussi. Dans un premier temps, il consiste à déterminer, pour chaque microphone, le niveau énergétique moyen pondéré A (LAeq) sur toute la période de la récréation (environ 35 minutes), à partir d'un échantillonnage en durées élémentaires d'une seconde. L'évolution temporelle est tout à fait similaire à ce que l'on a obtenu à la Houssais.

Sur les figures 5.18 et 5.19 sont représentées des comparaisons des niveaux équivalents mesurés entre les diverses récréations, pour les microphones n°2 et n°5. Notons toutefois que le nombre d'enfants présents dans la cour variait selon les récréations entre 160 et 180.

Par rapport à l'école de la Houssais, on peut remarquer en première approche un écart des niveaux de pression sonore plus important entre les récréations, et ceci quel que soit le microphone. Cet écart atteint quasiment 5 dB sur la figure 5.18, aussi bien en niveau global pondéré A, que sur toute l'étendue du spectre. Ceci s'explique parfaitement par une sensible augmentation du nombre d'enfants le deuxième jour.

En revanche, comme constaté à la Houssais, les spectres issus des différents microphones présentent la même allure. A première vue, seule une différence globale de niveau sonore permet de différencier la figure 5.18 de la figure 5.19.

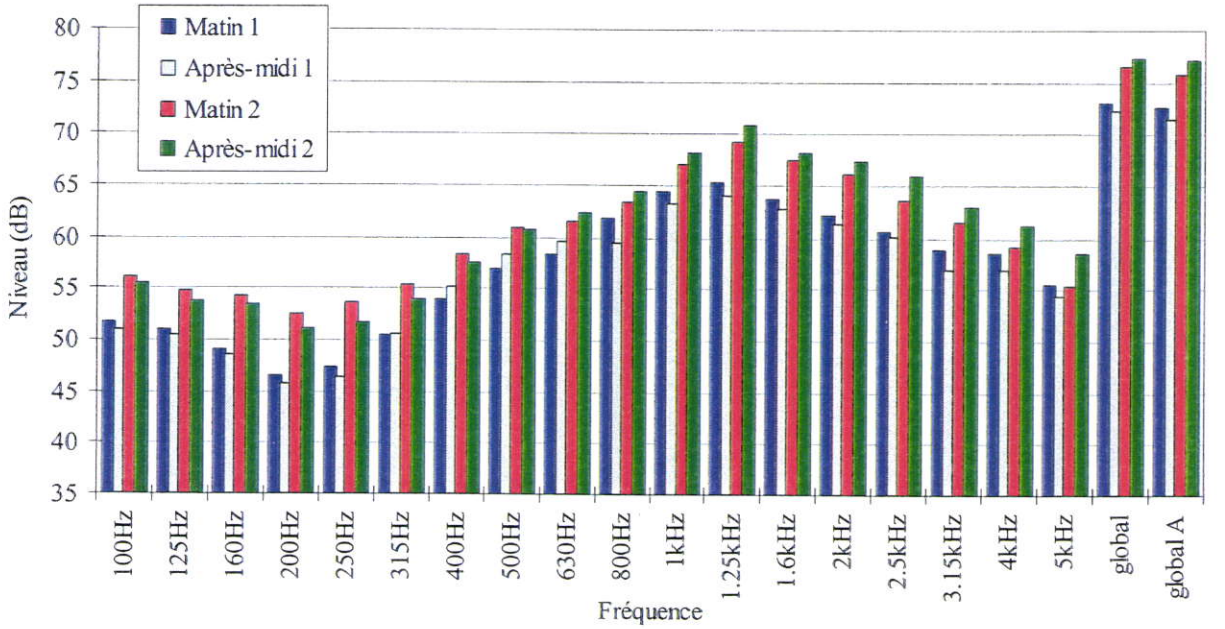

Figure 5.18 : Comparaison des niveaux mesurés entre les différentes récréations pour le microphone n°2.

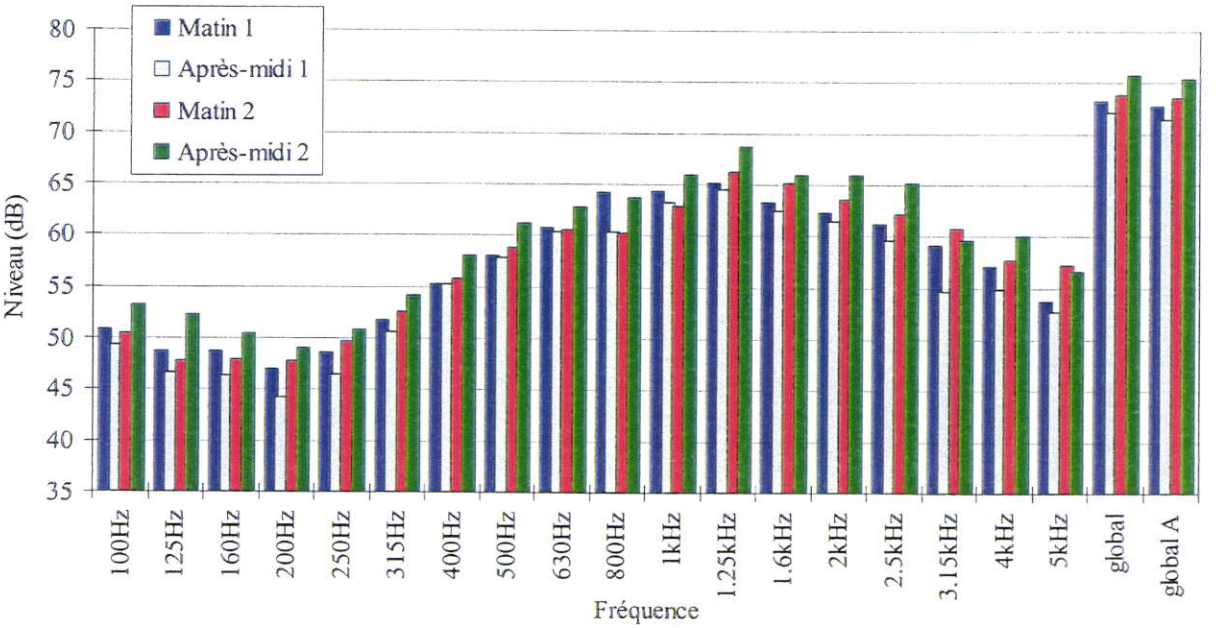

Figure 5.19 : Comparaison des niveaux mesurés entre les différentes récréations pour le microphone n°5.

5.2.2.3. Modélisation : sources sonores fictives

Le principe de base est le même qu'à l'école de la Houssais : 13 sources fictives de 13[7] enfants sont positionnées dans la cour en tenant compte des endroits privilégiés des élèves. Au paragraphe 5.2.1.3, un spectre élémentaire de puissance acoustique pour un enfant a été déterminé. A partir de ce spectre, nous effectuons un calcul des niveaux de pression acoustique pour chaque microphone que nous comparons ensuite aux niveaux mesurés (figures 5.20, 5.21 et 5.22). A chaque récepteur une sommation énergétique est effectuée sur les signaux issus des 13 sources fictives. Les ruptures d'impédance ainsi que les réflexions spéculaires sur le bâtiment sont prises en compte si nécessaire.

Les niveaux recalculés coïncident assez bien avec les mesures, d'autant plus si l'on considère que le spectre de référence est issu des mesures effectuées dans une autre école, donc avec d'autres enfants. L'erreur moyenne commise, en niveau global pondéré A, se situe entre 1.5 et 3 dBA. Ces écarts peuvent avoir plusieurs origines :

- la répartition du nombre des enfants en 13 sources sonores fictives (13 par source) est approximative,
- la position de ces sources peut, elle aussi, être approximative. Il est en effet impossible de compter les enfants et les situer précisément tant ils sont turbulents,
- le nombre d'élèves varie d'une récréation à l'autre. Les spectres présentés sont des moyennes pour les quatre récréations.
- la répartition des enfants suivant leur âge n'est pas forcément la même dans les deux écoles étudiées et, par voie de conséquence, le spectre moyen de la voix peut y être légèrement différent.

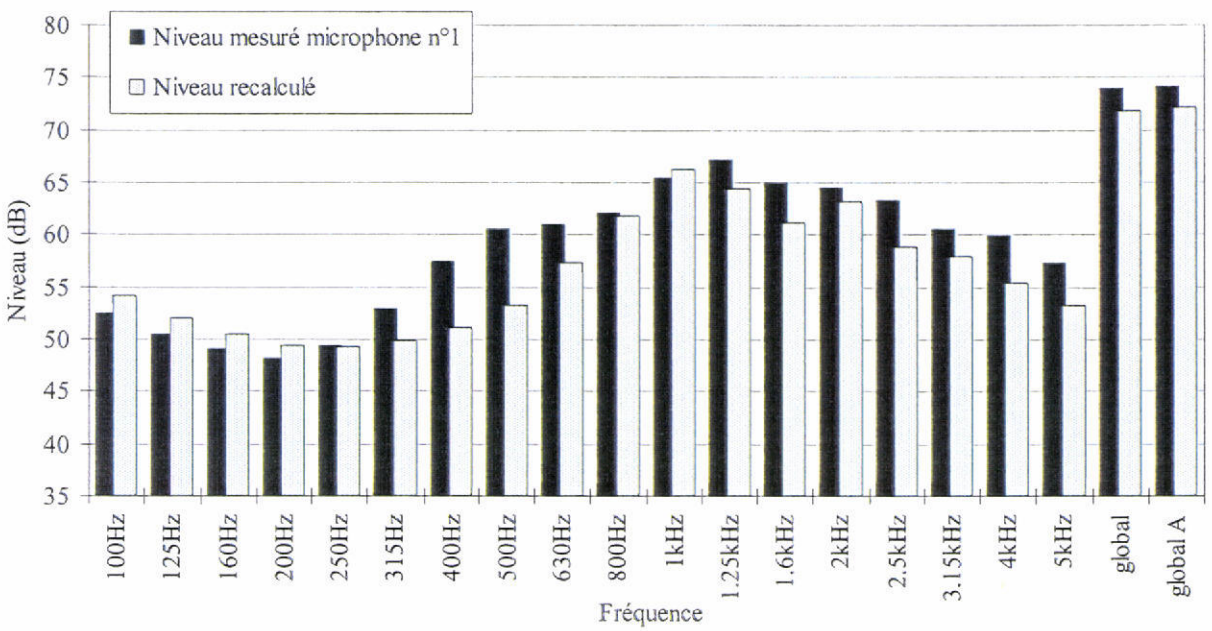

Figure 5.20 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°1.

[7] Les sources fictives sont ici constituées de 13 enfants alors qu'à l'école de la Houssais elles étaient constituées de 20 enfants. Ceci s'explique par la densité beaucoup plus importante des élèves dans la cour de récréation.

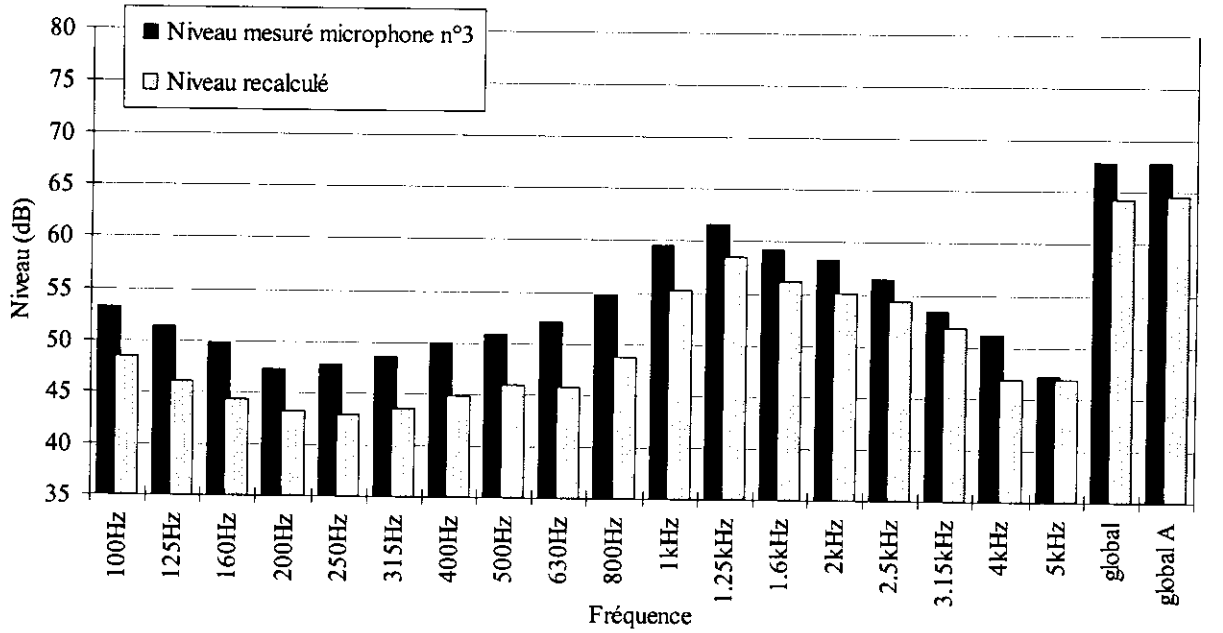

Figure 5.21 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°3.

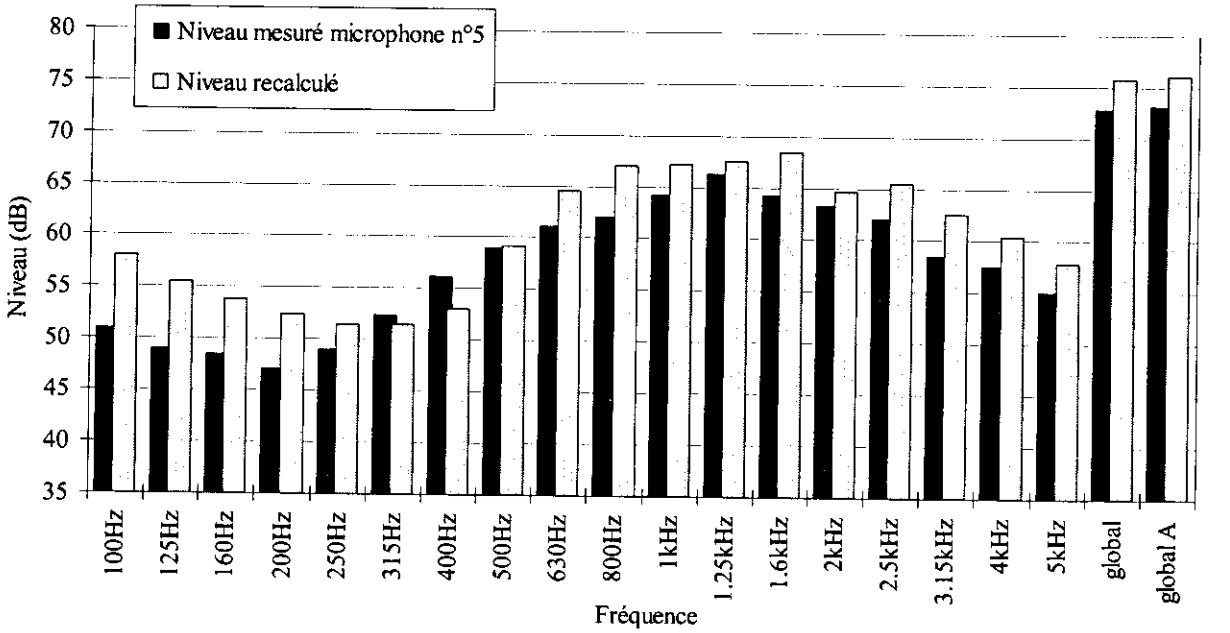

Figure 5.22 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone n°5.

5.2.3. Conclusions relatives aux mesures autour des cours de récréation d'écoles

Bien que limitées, ces deux séries d'expérience nous permettent néanmoins d'apporter quelques conclusions. Une bonne reproductibilité a été obtenue sur les deux journées de chaque campagne de mesures et pour chacun des points d'enregistrements. Notons toutefois que les écarts sont légèrement plus importants dans le cas de la seconde école : jusqu'à 5 dBA

entre les diverses récréations, contre 1.5 dBA maximum pour la première école.
L'équilibre spectral est systématiquement respecté quel que soit le moment et l'emplacement du point de mesure. La seule différence constatée entre les points de mesure s'exprime en terme de niveau sonore global, résultat d'une distance de propagation différente.

La caractérisation de ce type de source s'avère ainsi facilitée. La cour de récréation peut être simulée par un ensemble de sources ponctuelles, de puissances acoustiques identiques, chacune désignant un groupe d'enfants. Une bonne adéquation, entre mesures et calculs des niveaux sonores pour chaque récepteur, est obtenue. L'écart entre la prévision et la mesure est en moyenne de 2 dBA.

Bien qu'il était possible d'en douter au départ de cette étude expérimentale, la seconde campagne de mesures a confirmé le spectre moyen d'un enfant jouant dans une cour de récréation.

5.3. Etude d'une place de marché

L'objectif de l'étude des sources sonores est de présenter un "catalogue" des grandes catégories de sources et notamment de celles qui ont une influence sur le paysage sonore urbain. Les essais réalisés autour d'une cour de récréation peuvent donc être étendues à d'autres lieux typiques comme par exemple une place de marché. La Place Zola à Nantes a été choisie et l'étude a été effectuée en Juin 1999. Cette analyse présente des similitudes avec celle des cours de récréation :

- ce sont généralement des lieux "ouverts", assez bruyants, où sont regroupés un certain nombre de personnes,
- la voie humaine est la principale source de bruit.

Il existe néanmoins des divergences :

- les personnes rencontrées sur les places de marché sont plutôt des adultes et leur voix n'a pas les mêmes caractéristiques que celle d'enfants (cf. annexe 5).
- leur nombre est impossible à déterminer contrairement au cas d'une cour de récréation.

Nous ne pouvons donc pas faire une analyse aussi complète que pour les écoles. En effet, effectuer une cartographie moyenne de la concentration humaine sur une place de marché demanderait des moyens plus conséquents impossible à réunir lors de l'expérimentation.
La procédure de mesure se rapproche de celle mise en place pour les cours de récréation des deux écoles. Elle a consisté à placer cinq microphones judicieusement répartis en différents endroits du site du marché, le long des allées. Comme précédemment, afin de tester la reproductibilité des données acoustiques enregistrées, deux jours de mesures ont été nécessaires. Les conditions de mesure étaient, bien entendu, strictement identiques d'un jour sur l'autre.
Les photos suivantes montrent les positions de quelques-uns des microphones au voisinage de divers étalages.

Figure 5.23 : Emplacement du microphone n°1.

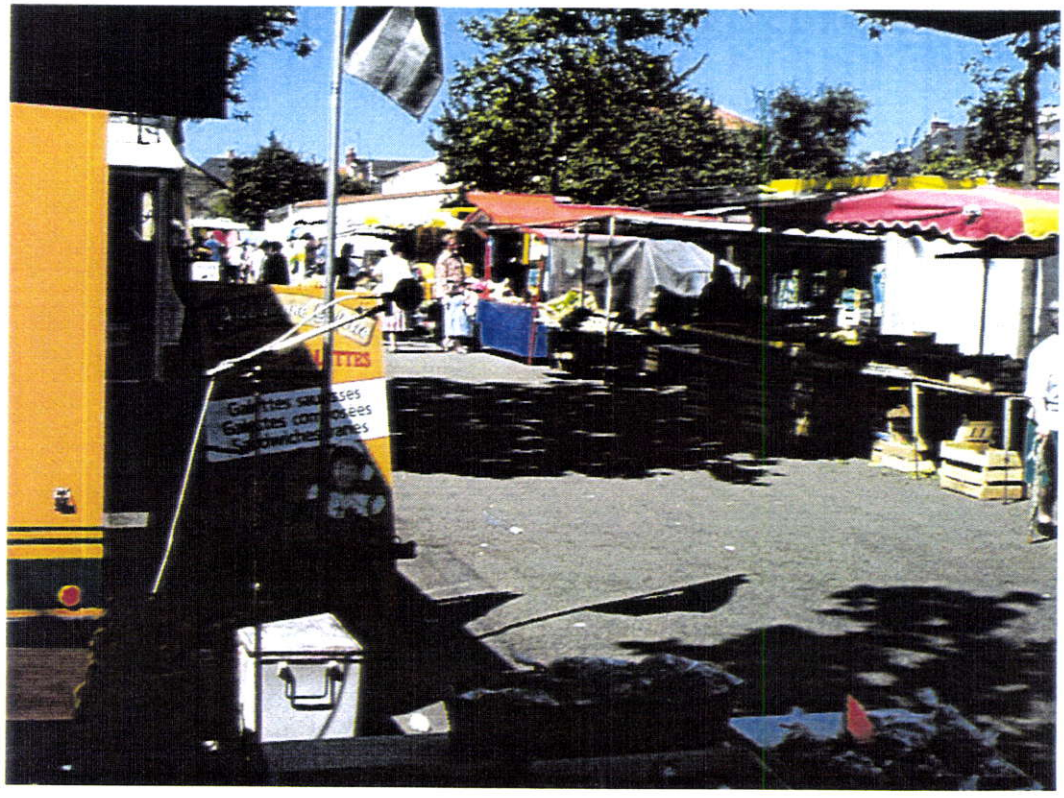

Figure 5.24 : Emplacement du microphone n°2.

Figure 5.25 : Emplacement du microphone n°3.

Figure 5.26 : Emplacement du microphone n°5.

La procédure de dépouillement des enregistrements est aussi la même que celle utilisée pour les cours de récréation. Nous avons recueilli les niveaux énergétiques moyens sur une période d'environ 1h20 (limite de notre bande DAT) (cf. annexe 4), avec des échantillons d'une durée élémentaire d'une seconde.

Ci-dessous, sont présentées des comparaisons des niveaux moyens mesurés.

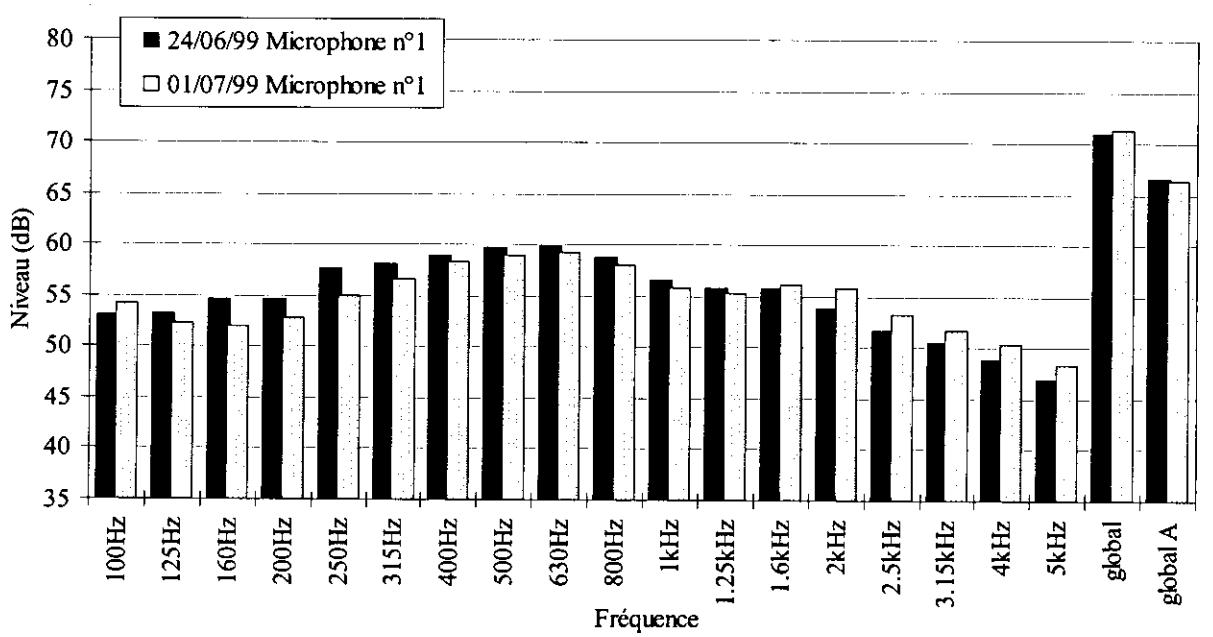

Figure 5.27 : Niveaux sonores moyens mesurés microphone n°1.

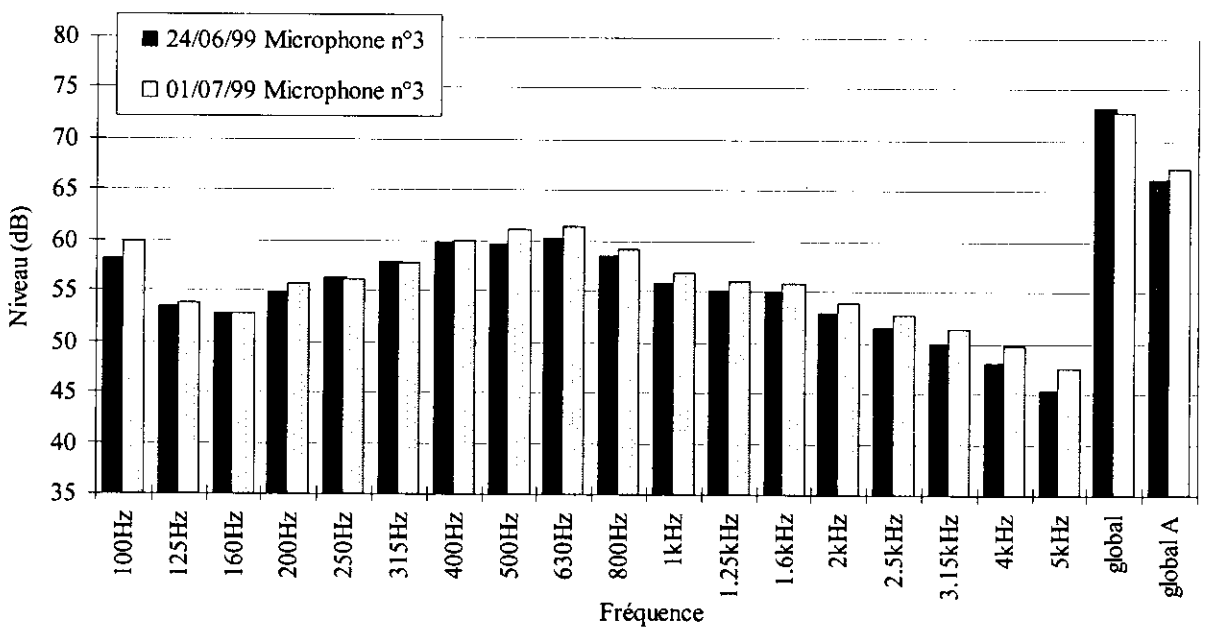

Figure 5.28 : Niveaux sonores mesurés microphone n°3.

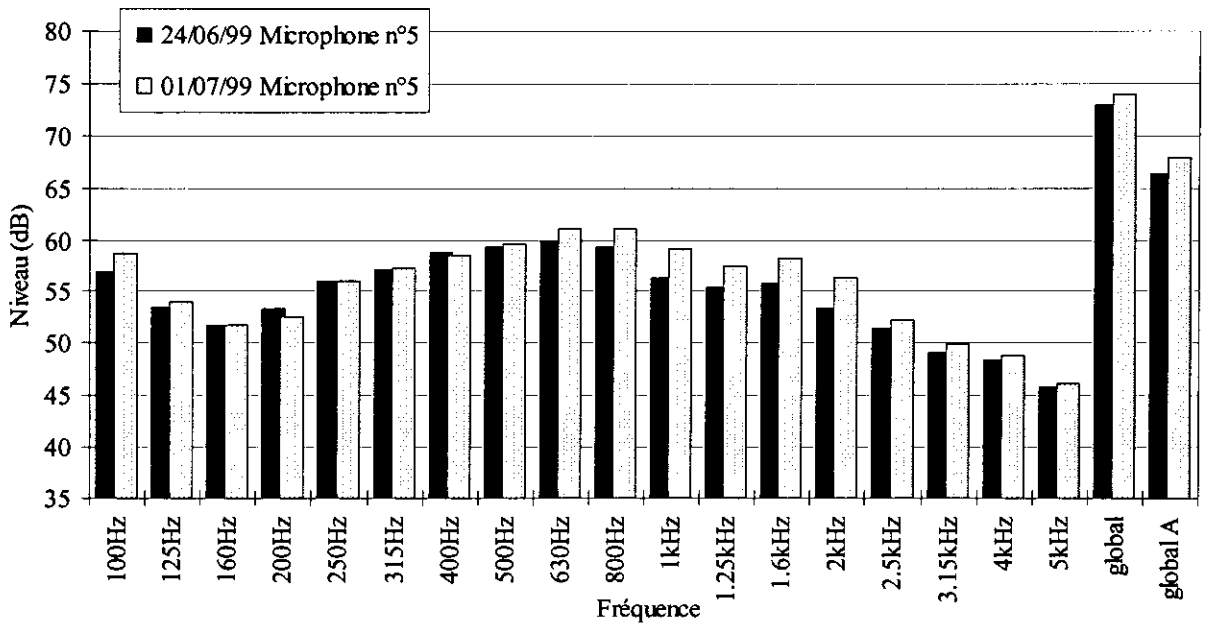

Figure 5.29 : Niveaux sonores mesurés microphone n°5.

Comme nous l'avions déjà constaté au voisinage des cours de récréation d'écoles, les niveaux sonores par bande de tiers d'octave sont constants d'un jour à l'autre : les écarts en termes de niveau global se situent aux environs de 1 dBA. Ce phénomène est intéressant car il signifie que d'une semaine à l'autre la même activité humaine se retrouve être acoustiquement identique en un endroit donné.
Afin de visualiser la différence entre les spectres relevés pour les deux types de situations étudiés (cour de récréation et place de marché), nous avons tracé, à titre indicatif, les évolutions spectrales obtenus à l'école du Port au blé et sur le marché (figure 5.30).

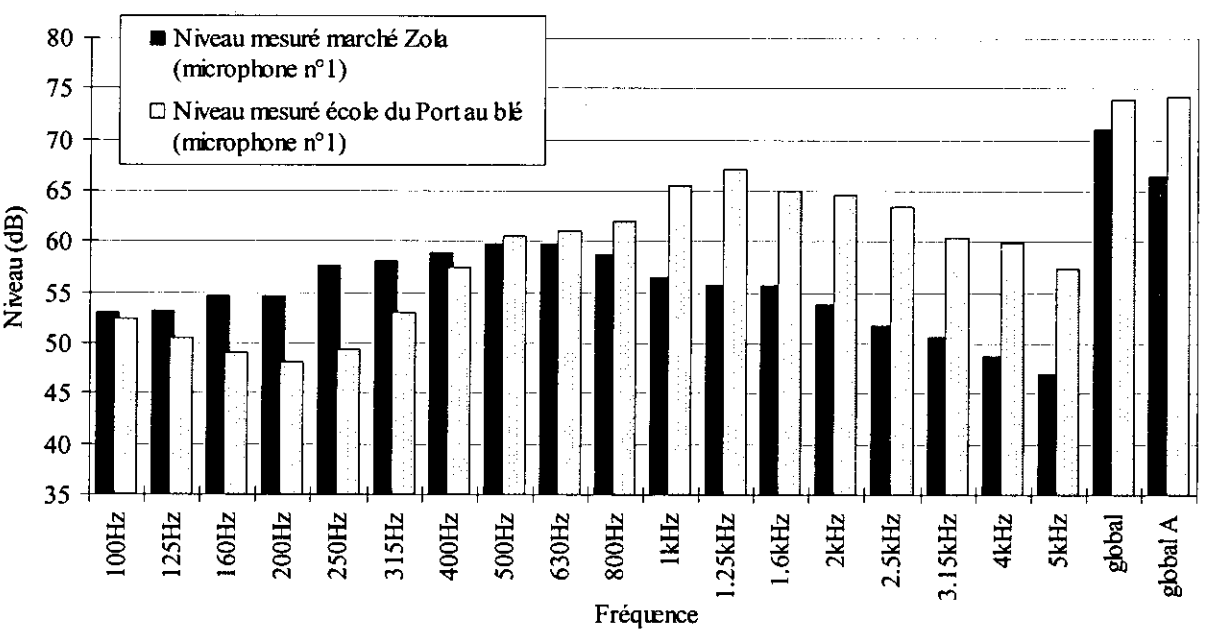

Figure 5.30 : Comparaison des niveaux mesurés sur le marché Zola et autour de l'école du Port au blé.

Les spectres sont quelque peu différents l'un de l'autre mais conformes à l'intuition : les niveaux sont plus élevés dans le cas de la cour de récréation, tout particulièrement avec la pondération A (d'environ 8 dBA), et les maxima se situent dans des fréquences plus "aigues". Ils sont obtenus pour 500 à 630 Hz environ sur la place de marché alors que pour les cours de récréation, il s'agit plutôt de 1250 Hz. Rappelons que le spectre de la voix humaine pour des adultes présente un maximum autour de 500 Hz (cf. annexe 5), ce qui est en parfait accord avec les résultats de la place de marché.

Comparons maintenant les niveaux moyens issus des différents récepteurs.

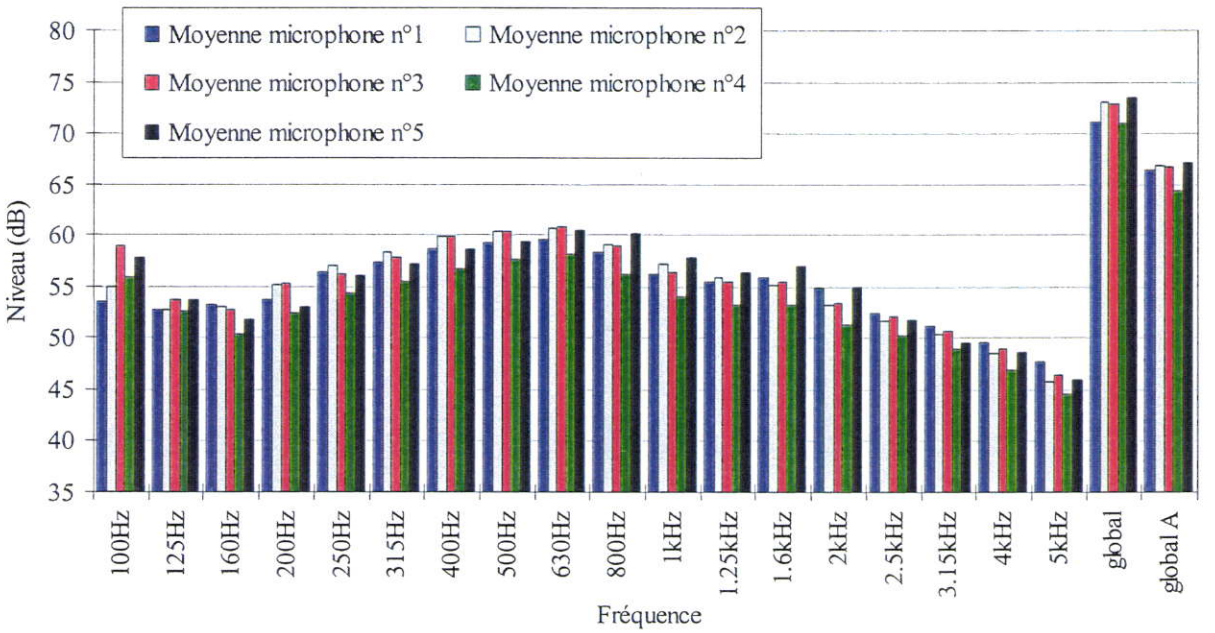

Figure 5.31 : Niveaux sonores moyens sur les deux jours, pour les différents microphones.

Les différences entre les microphones sont très réduites contrairement aux cas des écoles où, selon la répartition spatiale des enfants, des écarts plus importants apparaissaient (cf. figure 5.6). Les niveaux plus homogènes s'expliquent ici par le positionnement des microphones, répartis à l'intérieur du marché. Il semble que les allées soient statistiquement autant circulées les unes que les autres. A la périphérie, les niveaux sont sûrement moindres.
On simulera donc le marché par un ensemble de sources ponctuelles, en supposant une répartition spatiale uniforme ou aléatoire des piétons. Etant dans l'impossibilité de compter le nombre exact de personnes circulant dans les allées, si nous désirons comparer l'émission sonore de divers marchés, nous proposons d'utiliser le spectre de puissance recueilli sur un marché (référence) et de pondérer ces niveaux par le rapport des superficies de chaque implantation. Ce critère devrait être un bon indicateur général de la concentration humaine.

5.4. Conclusion

Les sources sonores humaines sont des sources plus complexes que celles de type routier. Leur étude est nouvelle et, à notre connaissance, inédite, tout particulièrement en termes d'indicateurs physiques globaux.
La définition de paramètres physiques n'est pas chose aisée, ceci nous conduit à choisir une représentation en termes de sources ponctuelles équivalentes.
Deux types de sources humaines ont été étudiées au travers de trois exemples : tout d'abord deux cours de récréation, où un spectre de puissance acoustique unitaire moyen a pu être déterminé, dans un premier temps, à l'école de La Houssais, puis validé, dans un second temps, à l'école du Port au blé. Ce spectre de référence pourra ensuite être utilisé pour d'autres écoles avec comme seule contrainte de connaître le nombre d'enfants présents dans la cour et éventuellement leur distribution spatiale approximative.
Ces derniers critères sont justement problématiques lors de l'étude du second type de sources humaines : une place de marché. Il est, en effet, impossible de déterminer précisément le nombre de passants présents dans les allées ainsi que leur répartition moyenne. Un spectre de puissance acoustique moyen a, malgré tout, pu être calculé. Il sera ensuite employé lors de l'étude d'autres places de marché, grâce à une pondération des niveaux sonores en fonction de la superficie et de l'implantation du marché, ainsi que des indications fournies par les services techniques des villes concernées.

Cette démarche prometteuse sur un premier échantillonnage restreint demande à être poursuivie afin d'asseoir définitivement la méthode pour un ensemble de situations de même type ou de type statistiquement proche comme par exemple des rues piétonnes ou des parcs de loisirs. Ceci fera l'objet d'études complémentaires dans un proche avenir, études qui seront conduites par le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées.

Conclusion générale et perspectives

Les objectifs de ce travail à forte dominante expérimentale étaient la détermination de paramètres physiques des différentes sources sonores présentes en milieu urbain. Ces sources ont été séparées en deux types : celles ***d'origine "routière"*** et celles ***d'origine "humaine"***.

Concernant les ***sources d'origine "routière"***, partie la plus développée du travail, une méthode d'estimation de la hauteur de source sonore équivalente a été mise au point, basée sur les lois de propagation acoustique entre deux récepteurs. Sa mise en œuvre est simple car elle ne fait intervenir que deux microphones et une procédure de calage sur un fichier de données expérimentales. Les diverses validations effectuées, ainsi que le travail de l'INRETS avec une antenne de champ proche confirment le bien-fondé de cette démarche. 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 dépourvus de carénage. Des essais complémentaires d'intensimétrie permettraient de déterminer la directivité des sources mises en jeu (a priori, en partie responsable du phénomène constaté). Une autre explication pourrait être la disparition des interférences lors du cumul de l'énergie issue des différentes sources sonores (incohérentes entre elles) présentes sur un cyclomoteur ou une motocyclette.

La puissance acoustique par bandes de tiers d'octave a pu être aussi modélisée par une loi simple, pour les véhicules légers dans un premier temps, puis pour un cyclomoteur. Comme nous l'avons vu, le cas des motocyclettes est plus complexe. Il semble néanmoins possible de parvenir rapidement à des résultats cohérents, moyennant une campagne de mesures plus complète. Que ce soit à vitesse stabilisée, en accélération ou en décélération il nous est aujourd'hui possible d'obtenir une estimation assez précise des niveaux d'émission moyens d'un ensemble de véhicules légers ou d'un cyclomoteur. L'évolution temporelle, au cours du passage devant un récepteur quelconque, peut également être déterminée. Ces calculs, pour l'instant manuels, pourront, dans un proche avenir, être automatisés. Il est à noter cependant que toutes ces lois sont applicables de façon identique en dehors du milieu urbain, et ceci jusqu'à des vitesses de 100 km/h.

Dans ce travail centré principalement sur les véhicules de petit gabarit, les véhicules lourds n'ont été que succinctement abordés. L'étude de ces véhicules demande à être complétée. En effet, les quelques renseignements obtenus concernant la hauteur de source équivalente des trains routiers sont insuffisants. La modélisation de la puissance acoustique par une loi du même type que celle utilisée pour les véhicules légers ou les cyclomoteurs semble possible mais doit être confirmée par des essais complémentaires déjà programmés au laboratoire.
Enfin, les premiers résultats obtenus pour un cyclomoteur, bien qu'encourageants, demandent à être validés sur d'autre engins.

Concernant les ***sources d'origine "humaine"***, deux campagnes de mesures dans des écoles primaires ont permis d'obtenir des résultats intéressants. Chaque cour de récréation a pu être modélisée par un ensemble de sources ponctuelles judicieusement disposées. La seconde série de mesures a permis ensuite de valider le spectre sonore moyen obtenu lors de la première série de mesures, ce qui nous autorise à considérer ce spectre comme un spectre de référence, représentatif d'une cour de récréation.
Afin de confirmer les résultats obtenus sur les premiers sites, des mesures complémentaires ont été récemment effectuées au voisinage d'une troisième école, dans la ville de Blois. Après exploitation, elles devraient permettre une ultime validation du spectre de puissance acoustique unitaire moyen d'une cour de récréation.

La méthode développée dans ce cadre n'est pas exclusive. Elle peut être adaptée à d'autres lieux typiques de nos centres-villes comme par exemple une place de marché. Ceci a fait l'objet de l'autre volet de l'étude.
Les premiers résultats acquis sont très homogènes. La difficulté majeure concerne la détermination d'un des paramètres les plus importants du modèle : le nombre (ou la concentration) des individus présents sur les lieux. Lorsque ce nombre n'est pas aisément identifiable, ce qui est le cas pour une place de marché, nous proposons qu'il soit estimé par le biais d'un critère particulier lié au rapport des superficies respectives ou à la situation géographique des implantations. Les renseignements fournis par les services techniques des villes concernées pourraient compléter les descriptions qualitative et quantitative des sites, nécessaires à une bonne prévision.

D'autres sites comme une rue piétonne, une place ou un parc de loisirs pourraient également faire l'objet d'études similaires.

Les paramètres de ces sources ainsi obtenues seront ensuite introduits dans le modèle de propagation du son en milieu urbain [Picaut 1998] afin de calculer, par exemple, l'impact acoustique de celles-ci. Dans un premier temps, nous pourrons étudier la répartition des niveaux sonores lors du passage d'un véhicule dans une rue en U. De même, connaissant les lois d'évolution dynamique du trafic à l'approche d'un rond-point, il sera possible, dans un second temps, de prévoir, par exemple, l'impact d'un tel aménagement sur l'environnement sonore.

Enfin, cette méthodologie rendra possible la réalisation de certaines études statistiques qui détermineront pour un ensemble de périodes représentatives à définir (jour-nuit, jours de semaine, week-end, périodes de vacances, saisons...) le nombre et le pourcentage de présence de chacune de ces sources afin d'appliquer les modèles à des situations "moyennes".

L'étude des sources sonores a été développée dans le cadre du projet "*Vers un logiciel prédictif des ambiances sonores urbaines*" et verra sa première application lors de l'étude d'un site test dans lequel s'intègre notamment la seconde école étudiée. Le choix de ce site se justifie doublement : d'une part, il regroupe l'ensemble des différentes sources sonores que l'on peut rencontrer en milieu urbain (voitures, autobus, tramways, trains, école, place de marché) 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, les ambiances sonores calculées à partir des divers modèles (sources et propagation) pourront être comparées à celles mesurées in situ avant et après réalisation des travaux d'aménagement.

Des mesures sur maquette en chambre semi-anéchoïque pourront également permettre de valider les outils proposés.

Dans cette étude, les aspects perceptifs ont été volontairement délaissés. Ils sont cependant nécessaires si l'on souhaite intégrer l'ensemble de ces résultats à un simulateur des ambiances sonores urbaines. Cette approche est actuellement abordée dans le cadre d'un travail qui a débuté en octobre 1998, et dont l'objectif majeur est de relier les aspects perceptifs aux aspects physiques.

Le travail réalisé au cours de cette thèse représente une première étape dans le long périple de l'étude des sources sonores en milieu urbain : les diverses méthodes et techniques développées seront amenées en effet à évoluer de façon permanente, évolution qui devra sans cesse s'adapter aux contraintes de la transformation et de la croissance de nos centres urbains.

Références bibliographiques

Allard J. F. 1993. Propagation of sound in porous media : modelling sound absorbing materials, Elsevier Applied Science, 284 pages.

Attenborough K. 1983. Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular media, J. Acoust. Soc. Am. 73(3), 233-238.

Attenborough K. 1993. Models for the acoustical properties of air-saturated granular media, Acta Acustica 1, 213-226.

Attenborough K. 1988. Review of ground effects on outdoor sound propagation from continous broadband sources, Appl. Acoust. 24, 289-319.

Barti R. 1997. Tyre noise particularities, Proceedings of Inter-Noise 97, 203-206.

Bass H. E., Sutherland L. C. & Zuckerwar A. J. 1990. Atmospheric absorption of sound : update, J. Acoust. Soc. Am. 88(4), 2019-2021.

Bass H. E., Sutherland L. C., Zuckerwar A. J., Blackstock D. T. & Hester D. M. 1995-1996. Atmospheric absorption of sound : further developments, J. Acoust. Soc. Am. 97(1), 680-683; Erratum : atmospheric absorption of sound : further developments, J. Acoust. Soc. Am. 99(2), 1259.

Bérengier M. 1996. Approche probabiliste sur la propagation du bruit en milieu extérieur – Thème de recherche EGU 03 : Synthèse finale, Rapport LCPC, Pôle Environnement et Génie Urbain, 66 pages

Bérengier M. & Hamet J. F. 1997. Etude acoustique des milieux poreux, Application aux revêtements drainants, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées 212, 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, 2919.

Bérengier M. & Hamet J. F. 1999. Acoustical classification of road pavements : ranking differences due to distance from the road, International Journal of Vehicle Design-Heavy Vehicles Systems, vol. 6, n° 1-4.

Billingsley J. & Kinns R. 1976. The acoustic telescope, Journal of Sound and Vibration 48(4), 485-510.

Brooks T. F., Marcolini M. A. & Pope D. S. 1987. A directionnal array approach for the measurement of rotor noise source distributions with controlled spatial resolution, Journal of Sound and Vibration 112(1), 192-197.

Bruneau M. 1983. Introduction aux théories de l'acoustique, Université du Maine - Le Mans.

Byrne D., Dillon H., Tran K., Arlinger S., Wilbraham K., Cox R., Hagerman B., Hetu R., Kei J., Lui C., Kiessling J., M. Nasser Kotby, Nasser H. A. Nasser, Wafaa A. H. El Kholy, Nakanishi Y., Oyer H., Powell R., Stephens D., Meredith R., Sirimanna T., Tavartkiladze G., Frolenkov I. G., Westerman S. & Ludvigsen C. 1994. An international comparison of long-term average speech spectra, J. Acoust. Soc. Am. 96(4), 2108-2120.

CETUR 1980. Guide du bruit des transports terrestres, Prévision des niveaux sonores, 317 pages.

Chessel C. I. 1977. Propagation of noise along a finite impedance boundary, J. Acoust. Soc. Am. 62(4), 825-834.

Coulson R. 1996. Method for measuring vehicle noise source height and subsource spectra, Transportation Research Record 1559, 8-13.

Delanne Y. 1989. Les enrobés drainants : analyse de leurs propriétés vis à vis du bruit de roulement et de l'adhérence des pneumatiques des véhicules de tourisme. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 162, 33-43.

Delany M. E. & Bazley E. N. 1970. Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Appl. Acoust. 3, 105-116.

DeuFraKo 1994. Sources de bruits des transports à grande vitesse, Projet de coopération, Rapport final, Annexe K, 210 pages.

Dulau B., Doisy S., Haettel J. P. 1999. Mesures "au passage" du bruit de contact pneumatique-chaussée. Méthodologie, application à l'évaluation des performances acoustiques des revêtements routiers. A paraître dans le Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées.

Embleton T. F. W., Piercy J. E. & Daigle G. A. 1983. Effective flow resistivity of ground surface determined by acoustical measurements, J. Acoust. Soc. Am. 74(4), 1239-1244.

Embleton T. F. W. 1996. Tutorial on sound propagation outdoors. J. Acoust. Soc. Am. 100(1), 31-48.

Favre B. 1978. Noise at the approach to traffic lights : result of a simulation programme, Journal of Sound and Vibration 58(4), 563-578.

Favre B. 1983. Noise emission of road vehicles : Evaluation of some simple models, Journal of Sound and Vibration 91(4), 571-582.

Fisher M. J., Harper-Bourne M. & Glegg S. A. L. 1977. Jet engine noise source location : The polar correlation technique, Journal of Sound and Vibration 51(1), 23-54.

Flandrin P. & Sessarego J. P. 1990. Méthodes temps-fréquence en acoustique, Colloque de Physique, Colloque C2, Supplément au n°2, Tome 51, 707-716.

Gaulin D., Bérengier M. & Depollier C. 1999. Models for acoustic sources in urban areas, 137th regular meeting of the Acoustical Society of America and 2nd convention of the European Acoustic Association, March 14-19 1999, Berlin.

Gaulin D. & Bérengier M. 1999. Caractérisation des sources sonores d'origine routière pour le milieu urbain, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées 222, 71-84.

Gauvreau B. 1999. Influence des conditions micrométéorologiques sur l'efficacité des écrans acoustiques, Thèse de doctorat de l'Université du Maine, Spécialité Acoustique, 178 pages.

Gilbert D. 1977. Noise from road traffic (interrupted flow), Journal of Sound and Vibration 51(2), 171-181.

Glegg S. A. L. 1982. The accuracy of source distributions measured by using polar correlations, Journal of Sound and Vibration 80(1), 31-40.

Glegg S. A. L. & Yoon J. R. 1987. The de-Dopplerization of acoustic signals, Journal of Sound and Vibration 116(2), 384-387.

Glegg S. A. L. & Mouches J. M. 1988. The application of digital filters to the de-Dopplerization of acoustic signals, J. Acoust. Soc. Am. 84, S1 pp13.

Glegg S. A. L. & Yoon J. R. 1990-1. 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), 19-37.

Glegg S. A. L. & Yoon J. R. 1990-2. 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), 39-50.

Hamet J. F. & Bérengier M. 1993. Acoustical characteristics of porous pavements : A new phenomenological model, Proceedings of Inter-Noise 93, 641-646.

Hamet J. F. 1996-1. Bruit de trafic routier, Abaques d'émission du modèle de prévision allemand : RLS 90, Rapport MMA 9609, 41 pages.

Hamet J. F. 1996-2. 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, 2919-2920.

Hunt M. & Samuels S. 1992. Prediction of traffic noise at signalized intersections : The Australasian experience, Inter-noise 92, 805-810.

International standard ISO 9613-1 : 1993(E). Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 1 : Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.

Jones R. R. K., Hothersall D. C. & Salter R. J. 1981. Techniques for the investigation of road traffic noise in regions of restricted flow by the use of digital computer simulation methods, Journal of Sound and Vibration 75(3), 307-322.

Kinsler E. L. & Frey R. A. 1962. Fundamentals of acoustics (second edition), John Wiley & Sons, Inc., 524 pages.

Kokowski P. & Makarewicz R. 1997. Interrupted traffic noise, J. Acoust. Soc. Am. 101(1), 360-371.

Lelong J. 1997-1. Influence des véhicules lourds sur un bruit de trafic interurbain, Tests de sensibilité PL/TR. INRETS, Rapport MMA 9701, 16 pages.

Lelong J. 1997-2. Influence des véhicules lourds sur un bruit de trafic urbain. Tests de sensibilité PL/TR, INRETS, Rapport MMA 9703, 20 pages.

Léobon A. & Sapaly J. 1994. Identité sonore et qualité de vie en centre-ville, Les ambiances sonores du quartier Graslin (Nantes), rapport de recherche, 125 pages.

Léobon A. 1994. Identité sonore et qualité de vie en centre-ville, Figures et illustrations du rapport, rapport de recherche, 51 pages.

Lewis P. T. & James A. 1978. On the noise emitted by single vehicles at roundabouts, Journal of Sound and Vibration 58(2), 293-299.

Marsh K. J. 1982. The concawe model for calculation the propagation of noise from open-air industrial plants, Appl. Acoust. 15, 411-428.

Moto technologie 1999. Musique ou bruit, 1ère partie, n°26, 54-59. 2ème partie, n°27, 60-65.

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, 3009.

Nijs L. 1989. The increase and decrease of traffic noise levels at intersections mesuread with a moving microphone, Journal of Sound and Vibration 131(1), 127-141.

Ogle T. W. A., Wayson R. L. & Lindeman W. 1996. Effect of vehicle speed on sound frequency spectra, Transportation Research Record 1559, 14-25.

Oshino Y. & Tachibana H. 1993. Prediction of road traffic noise taking account of transient running conditions of vehicles, Inter-noise 93, 629-632.

Oshino Y., Mikami T., Ohnishi H. & Tachibana H. 1999. Investigation into road noise reduction by drainage asphalt pavement, J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 20, 1, 75-84.

Pallas M. A. 1997. Localisation des sources acoustiques d'un véhicule léger : Mesures et options de traitement, Rapport MMA 9706-a, 40 pages. Annexes du rapport, Rapport MMA 9706-b, 57 pages.

Pallas M. A. 1998. Antenne microphonique : Localisation des sources d'origine mécanique d'un véhicule léger, Tome 1, Rapport LTE 9810, 29 pages. Tome 2 : Annexe, 54 pages.

Picaut J. 1998. Modélisation des champs diffus par une équation de diffusion : Application à l'acoustique des salles et à l'acoustique urbaine, Thèse de doctorat de l'Université du Maine. Spécialité Acoustique, 125 pages.

Piercy J. E., Embleton T. F. W. & Sutherland L. C. 1977. Review of noise propagation in the atmosphere, J. Acoust. Soc. Am. 61(6), 1403-1418.

PIR-Villes 1998. Vers un logiciel prédictif des ambiances sonores urbaines, CNRS, Fédération de recherche 73 "Physique et image de la Ville", "Action ville sensible", 81-101.

Radosz S., Tracz M. & Bohatkiewicz J. 1992. Prediction of traffic noise at signalized intersection using computer simulation method, Inter-noise 92, 811-816.

Rasmussen K. B. 1982-1. Propagation of road traffic noise over level terrain, Journal of Sound and Vibration 82(1), 51-61.

Rasmussen K. B. 1982-2. A note on the calculation of sound propagation over impedance jumps and screens, Journal of Sound and Vibration 84(4), 598-602.

STAMINA 1983. User's manual : Noise barrier cost reduction procedure, STAMINA 2.0 and OPTIMA. FHWA, U.S. Department of Transportation.

Tachibana H. & Oshino Y. 1992. Sound intensity radiation patterns of actally running automobiles, Inter-noise 92, 849-852.

Woloszyn Ph. 1994. Etude du paramétrage d'un filtre acoustique du centre-ville Nantais, détermination paramétrique des facteurs d'influence multisources de la perception du son en milieu urbain, Rapport de stage de DEA, 150 pages.

Woloszyn Ph. 1998. Caractérisation dimensionnelle de la diffusivité des formes architecturales urbaines, Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 260 pages.

Yamamoto K. & Yamashita M. 1987. A simple model for estimating excess attenuation of road traffic noise, J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 8, 13-22.

Annexe 1 : Rappels sur la pondération A

Le niveau de pression acoustique est défini par la relation :

$$Lp = 10\log_{10}\left(\frac{p^2}{p_0}\right) \qquad \text{A1.1}$$

Où p représente la valeur efficace de la pression et $p_0 = 2.10^{-5}$ Pa. p_0 est la pression acoustique efficace, définie au sens statistique comme la pression acoustique à 1000 Hz où l'homme commence à entendre. Ceci définit le 0 dB. Mais l'oreille humaine n'a pas la même perception des sons. Elle atténue plus les basses fréquences que les hautes. Nous sommes en présence d'un filtre "moyen" physiologique, non linéaire.

Si l'on se donne, par exemple, un niveau de 40 dB à 1000 Hz et que l'on demande à une personne d'abord de mémoriser cette sensation, puis en se plaçant à une autre fréquence, d'indiquer à quel niveau il éprouve la même sensation, nous devons atteindre 62 dB à 100 Hz ! On obtient ainsi les courbes de Flechter et Munson qui représentent une moyenne obtenue sur un grand nombre d'individus (figure A1.1).

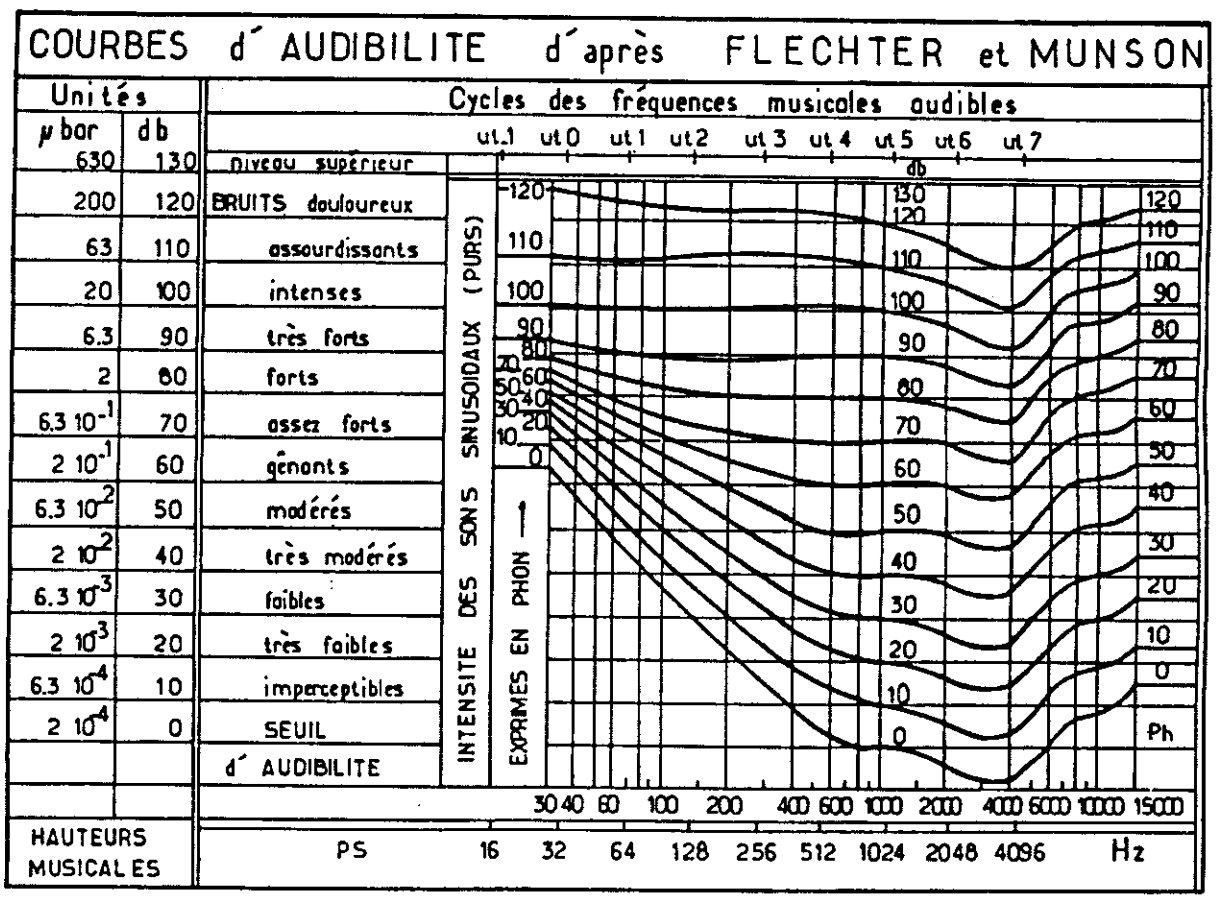

Figure A2.1 : Courbes d'audibilité d'après Flechter et Munson.

De ces courbes, on a pu en déduire un filtre de pondération A qui est communément utilisé pour tenir compte de la perception de l'oreille humaine (figure A1.2).

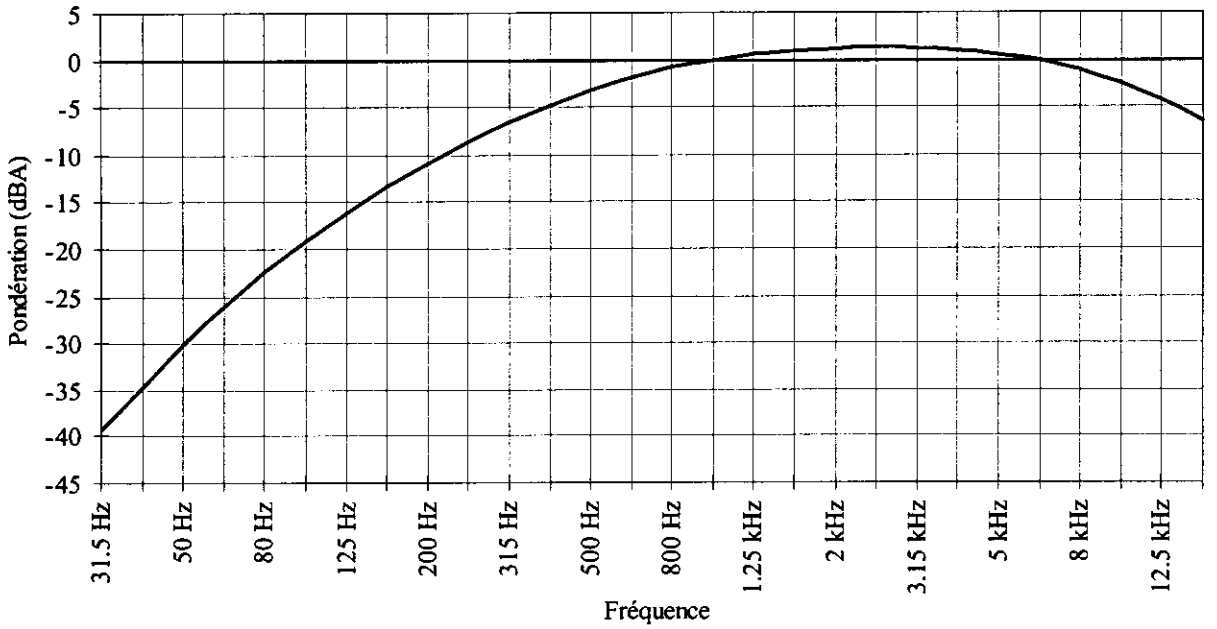

Figure A2.2 : Courbe de pondération A.

Annexe 2 : Phénomènes de propagation acoustique

La méthode utilisée dans le présent document, pour déterminer la hauteur de la source sonore équivalente, est basée sur les mécanismes de la propagation acoustique. Ces concepts fondamentaux sont la dispersion géométrique et l'absorption atmosphérique. De plus, lorsque la propagation s'effectue au voisinage d'un sol, ses caractéristiques influencent de façon importante la propagation de l'onde acoustique produite par le véhicule. Nous détaillons ici l'ensemble de ces phénomènes.

A2.1. Dispersion géométrique [Gauvreau 1999] [Piercy & al. 1977] [Embleton 1996]

Si nous supposons une source statique placée en S et un récepteur placé en M avec une distance fixe SM = r, les solutions les plus connues de l'équation de Helmholtz en champ libre sont :

- les ondes planes telles que celles qui se propagent dans les conduits :

$$p(M,t) = A \exp(j\vec{k}_0.\vec{r}) \exp(-j\omega t) \qquad \text{A2.1}$$

- les ondes cylindriques telles que celles émises en champ libre par une source linéaire :

$$p(M,t) = A\frac{j}{4}H_0^{(1)}(k_0 r)\ \exp(-j\omega t) \qquad \text{A2.2}$$

où $H_0^{(1)}$ est la fonction de Hankel de 1ère espèce et d'ordre 0, dont l'expression asymptotique pour la propagation à longue distance ($k_0 r >> 1$) conduit à :

$$p(M,t) = A\sqrt{\frac{j}{8kr}}\exp(jk_0 r)\exp(-j\omega t) \qquad \text{A2.3}$$

- les ondes sphériques telles que celles émises par une source ponctuelle :

$$p(M,t) = \frac{A}{4\pi r}\exp(jk_0 r)\exp(-jwt) \qquad \text{A2.4}$$

La dispersion (ou divergence) géométrique concerne les ondes non planes, pour lesquelles l'amplitude n'est pas constante dans l'espace. Pour une source ponctuelle cohérente, la dispersion géométrique prévoit une atténuation du niveau sonore de 6 dB par doublement de distance pour une source ponctuelle (dispersion sphérique ou tridimensionnelle) et pour une source linéaire, une atténuation de 3 dB (dispersion cylindrique ou bidimensionnelle). Si les

dimensions de la source sonore sont très faibles devant celle de la longueur d'onde λ considérée, chaque front d'onde possède les mêmes amplitude et phase en tout point de sa surface (sphérique ou cylindrique). A grande distance de la source, il est naturel d'imaginer des fronts d'onde quasiment plans. L'onde sonore tend ainsi vers une onde plane mais les lois de décroissance des niveaux sonores restent identiques.
Dans le cadre de notre étude, nous considérons uniquement des véhicules "isolés", donc simulés par des sources ponctuelles (décroissance de 6 dB par doublement de distance). Si l'on prend en compte une succession de véhicules suffisamment rapprochés, la décroissance des niveaux sonores s'amenuise au fur et à mesure que la distance récepteur – axe de circulation augmente pour atteindre, cette fois-ci, 3 dB par doublement de distance (source linéaire).

A2.2. Absorption atmosphérique [Gauvreau 1999] [Marsh 1982] [Bruneau 1983] [Bass & al. 1990, 1995-1996] [Embleton 1996] [International standard ISO 9613]

L'atténuation des ondes sonores est essentiellement due à la dispersion géométrique (cf. § A2.1) et à l'effet de sol (cf. § A2.3). Elle peut également résulter de divers processus liés notamment aux caractéristiques des fluides dans lesquels elles se propagent. Dans le cas de l'air, la dissipation de l'énergie acoustique résulte essentiellement de la relaxation moléculaire : il s'agit du retard à l'établissement d'un équilibre, consécutif à une sollicitation extérieure (physique, thermique, chimique...). Ce phénomène peut être important dans l'air lors de la propagation à longue distance et/ou dans certaines circonstances : les retards temporels sont affectés de manière significative par la concentration en molécules polyatomiques, en particulier en molécules de vapeur d'eau, ou en termes plus communs par l'humidité relative ; cet effet est donc directement proportionnel à la pression atmosphérique et à l'hygrométrie.

La norme ISO 9613-1 : 1993 (E) donne une méthode de calcul qui permet de quantifier ces effets. L'atténuation provoquée par l'absorption atmosphérique est une fonction de deux fréquences de relaxation f_{rO} et f_{rN}, respectivement celle de l'oxygène et de l'azote. Les valeurs de f_{rO} et f_{rN} en hertz peuvent être calculées par :

$$f_{rO} = \frac{Pa}{Pr}\left(24 + 4.04 \times 10^4 h \frac{0.02 + h}{0.391 + h}\right) \qquad \text{A2.5}$$

et :

$$f_{rN} = \frac{Pa}{Pr}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{-1/2} \times \left(9 + 280h \exp\left\{-4.17\left[\left(\frac{T}{T_0}\right)^{-1/3} - 1\right]\right\}\right) \qquad \text{A2.6}$$

où Pa, Pr et h désignent respectivement la pression atmosphérique ambiante en kilopascals, la pression atmosphérique ambiante de référence en kilopascals : Pr = 101.325 kPa et la concentration molaire de vapeur d'eau en pourcentage.

Le coefficient d'atténuation α'_{air}, en décibels par mètre, résultant de l'absorption atmosphérique a pour expression :

$$\alpha'_{air} = 8.686 f^2 \left(\left[1.84\times10^{-11} \left(\frac{Pa}{Pr}\right)^{-1} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/2} \right] + \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-5/2} \times \left\{ 0.01275 \left[\exp\left(\frac{-2239.1}{T}\right) \right] \left[f_{r0} + \left(\frac{f^2}{f_{r0}}\right) \right]^{-1} + 0.1068 \left[\exp\left(\frac{-3352}{T}\right) \right] \left[f_{rN} + \left(\frac{f^2}{f_{rN}}\right) \right]^{-1} \right\} \right) \qquad \text{A2.7}$$

où f est la fréquence de l'onde acoustique en Hertz, T la température ambiante en Kelvin et T_0 la température ambiante de référence en Kelvin : $T_0 = 293.15$ K.

Absorption atmosphérique et dispersion géométrique devront être prises en compte lors de la propagation des ondes sonores. Cependant, cette prise en compte pourra être implicite en considérant les niveaux de pression sonore relatifs au champ libre, ou atténuation excédentaire.

A2.3. Caractéristiques acoustiques liées à la présence du sol [Gauvreau 1999]

De façon générale, lorsqu'une onde acoustique rencontre une surface, deux phénomènes se produisent simultanément : la réflexion et la transmission. Plusieurs niveaux de complexité peuvent être envisagés pour décrire le comportement du sol.

Si l'on considère une onde sonore de nature sphérique, émise par une source ponctuelle, la pression sonore en un point x du milieu de propagation au-dessus d'un sol à impédance s'exprime par l'équation de Weyl-Van der Pol [Piercy & al. 1977] :

$$p(x) = \frac{A_d}{r_d} \exp(ik_d r_d) + R_p \frac{A_r}{r_r} \exp(ik_r r_r) + (1 - R_p) F(w) \frac{A_r}{r_r} \exp(ik_r r_r) \qquad \text{A2.8}$$

où :

- A_i : amplitude des ondes i = d, r (directe et réfléchie)[1]
- r_i : longueur du rayon acoustique i = d, r
- k_i : vecteur d'onde associé i = d, r
- R_p : coefficient de réflexion en onde plane
- $F(w)$ est une fonction complexe qui traduit l'interaction des fronts d'onde sphérique avec le sol. L'argument w de F est complexe ; il est appelé "distance numérique".

[1] En l'absence de turbulence, les amplitudes A_d et A_r sont égales, ainsi que les vecteurs k_d et k_r.

Annexe 2

Les expressions de F(w) et de w s'écrivent respectivement :

$$F(w) = +2iw^{1/2}e^{-w}\int_{-iw^{1/2}}^{\infty} e^{-u^2}du \qquad \text{A2.9}$$

$$w = \frac{2ik_0 r_r}{(1-R_p)^2\cos^2\phi_i}\left(\frac{Z_0}{Z}\right)^2\left(1-\frac{k_0^2}{k^2}\cos^2\phi_i\right) \qquad \text{A2.10}$$

où $Z_0 = \rho_0 c_0$ et Z sont respectivement les impédances de l'air et du sol, k_0 et k leurs nombres d'ondes associés et ϕ_i l'angle entre la surface et le rayon incident (figure A2.1).

A2.3.1. Modèle de surface - Phénomène de réflexion

A2.3.1.1. Modèle de surface à réaction localisée

Dans le cas de la réaction localisée, quelque soit l'angle d'incidence, l'onde transmise se propage suivant la normale à la surface du matériau. Les ondes transmises latéralement ne sont pas considérées. L'impédance et le coefficient de réflexion du matériau sont alors indépendantes de l'angle d'incidence de l'onde sonore ϕ_i (Figure A2.1). C'est le cas par exemple d'une chaussée réfléchissante ou de l'herbe.

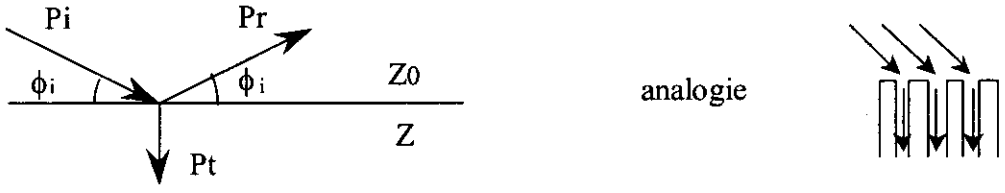

Figure A2.1 : Modèle de surface à réaction localisée.

On accède ainsi au coefficient de réflexion en onde plane R_p (défini comme le rapport complexe de la pression acoustique incidente à celle réfléchie, sur la surface de réflexion) en fonction de l'impédance réduite du matériau (rapport de l'impédance de celui-ci à l'impédance de l'air Z_0) par la relation :

$$R_p(\phi_i) = \frac{\frac{Z}{Z_0}\sin\phi_i - 1}{\frac{Z}{Z_0}\sin\phi_i + 1} \qquad \text{A2.11}$$

A2.3.1.2. Modèle de surface à réaction non localisée ou étendue

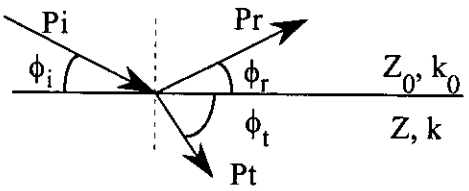

Figure A2.2 : Modèle de surface à réaction étendue.

En réaction étendue, l'onde transmise ne se propage plus selon la normale à la surface, mais selon un angle ϕ_t (figure A2.2) lié à ϕ_i par la relation de Snell-Descartes :

$$k_0 \cos\phi_i = k \cos\phi_t \qquad \text{A2.12}$$

où $k_0 = \frac{2\pi f}{c_0}$ et $k = \frac{2\pi f}{c}$ sont respectivement les nombres d'onde dans l'air et dans le matériau (c : célérité de l'onde acoustique dans le matériau).

Dans ce cas, le coefficient de réflexion en onde plane Rp est donné par :

$$R_p(\phi_i) = \frac{\zeta(\phi_i)\sin\phi_i - 1}{\zeta(\phi_i)\sin\phi_i + 1} \qquad \text{A2.13}$$

où :

$$\zeta(\phi_i) = \frac{Z}{Z_0 \sin\phi_t} = \frac{Z}{Z_0 \sqrt{1 - \left(\frac{k_0}{k}\right)^2 \cos^2\phi_i}} \qquad \text{A2.14}$$

C'est typiquement le cas des chaussées poreuses ou de la neige fraîche, pour lesquelles impédance et coefficient de réflexion dépendent de la position du point de mesure, sauf en incidence normale où les deux modèles de réaction sont équivalents (cf. eq. A2.13 et A2.14 avec $\phi_i = \frac{\pi}{2}$).

A2.3.1.3. Prise en compte de l'effet d'épaisseur

Jusqu'ici, nous avons supposé que le sol était infiniment épais et homogène mais, dans certaines situations pratiques, il serait plus réaliste de modéliser celui-ci par une couche d'épaisseur finie reposant sur un milieu réfléchissant. Ainsi la pelouse recouvre bien souvent un lit de roches ou un sol pénétré par des racines et la neige ne constitue qu'une couche finie au-dessus d'une surface gelée et dure. Après avoir traversé la couche d'épaisseur e, les ondes acoustiques rencontrent le matériau d'impédance considérée infinie (figure A2.3). Elles se réfléchissent alors plusieurs fois le long des surfaces du dioptre ainsi formé et perdent ainsi une partie de leur énergie. Le "rayon" réfléchi est davantage un faisceau sonore et la réflexion ne peut plus être considérée comme spéculaire ($\phi_i \neq \phi_r$) dès lors que les longueurs d'onde sont comparables aux dimensions caractéristiques du sol.

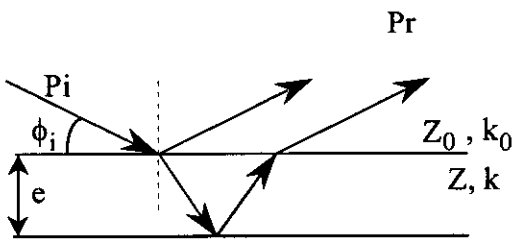

Figure A2.3 : Modèle à effet d'épaisseur.

On exprime alors le coefficient de réflexion en onde plane par la relation suivante :

$$R_p(\phi_i) = \frac{\frac{Z(e)}{Z_0}\sin\phi_i - 1}{\frac{Z(e)}{Z_0}\sin\phi_i + 1} \qquad \text{A2.15}$$

où :

$$Z(e) = \frac{Z}{\sin\phi_t}\coth(-ike\sin\phi_t) = -i\frac{Z}{\sin\phi_t}\cot an(ke\sin\phi_t) \qquad \text{A2.16}$$

(Z impédance du matériau poreux, e son épaisseur) et où l'angle de transmission ϕ_t est donné par :

$$\sin\phi_t = \sqrt{1-\left(\frac{k_0}{k}\right)^2\cos^2\phi_i} \qquad \text{A2.17}$$

N.B. Dans le cas de la réaction localisée, on a $\phi_t = \frac{\pi}{2}$ i.e. $\sin\phi_t = 1$ et $Z(e) = -iZ\cot an(ke)$.

A2.4. Modèles d'impédance

A2.4.1. Modèle semi-empirique de Delany et Bazley [Delany & Bazley 1970]

A la suite de nombreuses mesures sur des matériaux fibreux, Delany et Bazley ont développé un modèle de type semi-empirique qui relie les propriétés acoustiques (Z et k) à un seul paramètre dimensionnel : le rapport fréquence/perméabilité (f/σ), permettant ainsi de calculer les parties réelle et imaginaire de l'impédance Z du matériau pour les différents types de réaction abordés dans les paragraphes précédents.

Les lois de Delany et Bazley peuvent s'exprimer de la façon suivante :

$$\frac{Z}{Z_0} = 1 + 9.08\left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.754} + j11.9\left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.732} \qquad \text{A2.18}$$

avec f : fréquence considérée (Hz),
σ : résistance au passage de l'air (cgs Rayls/cm).

Delany et Bazley précisent que les formules ne peuvent être employées avec confiance que dans la gamme :

$$10 < \frac{f}{\sigma} < 1000 \qquad \text{A2.19}$$

Mais Chessel [Chessel 1977] et plus récemment Embleton [Embleton & al. 1983] ont élargi cette gamme à des surfaces présentant des imperméabilités allant de σ = 10 c.g.s. Rayls/cm jusqu'à $\sigma = 10^5$ à 10^6 c.g.s. Rayls/cm sans que les niveaux de pression déduits soient en contradiction avec l'expérience.

On rappelle que 1 c.g.s. Rayls/cm = 1 $g.cm^{-3}.s^{-1}$ = 1000 $N.s.m^{-4}$ = 1000 $kg.m^{-3}.s^{-1}$ = 1000 M.K.S. Rayls/m. Le tableau A2.1 fournit quelques ordres de grandeur de σ :

Tableau A2.1 : Ordres de grandeur de σ.

Type de matériau	Imperméabilité en c.g.s. Rayls/cm
Mousse réticulée	3 à 5
Neige fraîche	6 à 15
Laine minérale	15 à 35
Mousse d'argile	15 à 50
Sous-bois (feuilles, épines)	20 à 80
Pelouse	150 à 300
Pré, champ de céréales	200 à 500
Terre compactée	2000 à 4000
Revêtement routier fermé	50000 à 100000
Béton lisse et peint	> 100000

A2.4.2. Autres modèles

D'autres modèles ont été développés comme le modèle microstructurel de K. Attenborough [Attenborough 1983, 1993] mais il nécessite une connaissance plus complète de la structure du sol et les quatre paramètres qui le définissent (porosité, résistance au passage de l'air, forme des pores, tortuosité) se révèlent très difficiles à mesurer en pratique. Le modèle de Hamet et Bérengier [Hamet & Bérengier 1993] est quant à lui particulièrement bien adapté au cas des chaussées poreuses du type enrobés bitumineux drainants. On peut également citer le modèle Allard [Allard 1993] développé à l'Université du Maine au Mans pour les milieux poreux du type mousse réticulée.

Annexe 3 : Classification acoustique des principaux revêtements routiers.

Les revêtements routiers mentionnés dans le présent document sont issus de diverses familles :

- les Bétons Bitumineux Semi-Grenus (BBSG),
- les Bétons Bitumineux Très Minces (BBTM),
- les Enduits Superficiels (ES),
- les Bétons Bitumineux Drainants (BBDr).

A l'intérieur d'une même famille, la granulométrie est un paramètre important : c'est elle qui détermine la taille des "cailloux" utilisés. On parle par exemple de granulométries 0/6, 0/10, 0/14 ou 10/14 pour les plus communes, les deux chiffres indiquant les tailles limites des éléments, en mm, que l'on rencontre dans la formulation du revêtement considéré.

Les quatre types de revêtements cités ci-dessus présentent une granulométrie de 0/10.

Le type de revêtement ainsi que sa granulométrie influent directement sur le niveau de bruit comme le montre la figure A3.1 sur laquelle sont représentés les niveaux de bruit moyens au passage pour des véhicules légers circulant à 90 km/h. Cette figure est issue de la base de données des revêtements, constituée au Laboratoire Régional de Strasbourg [Dulau & al. 1999].

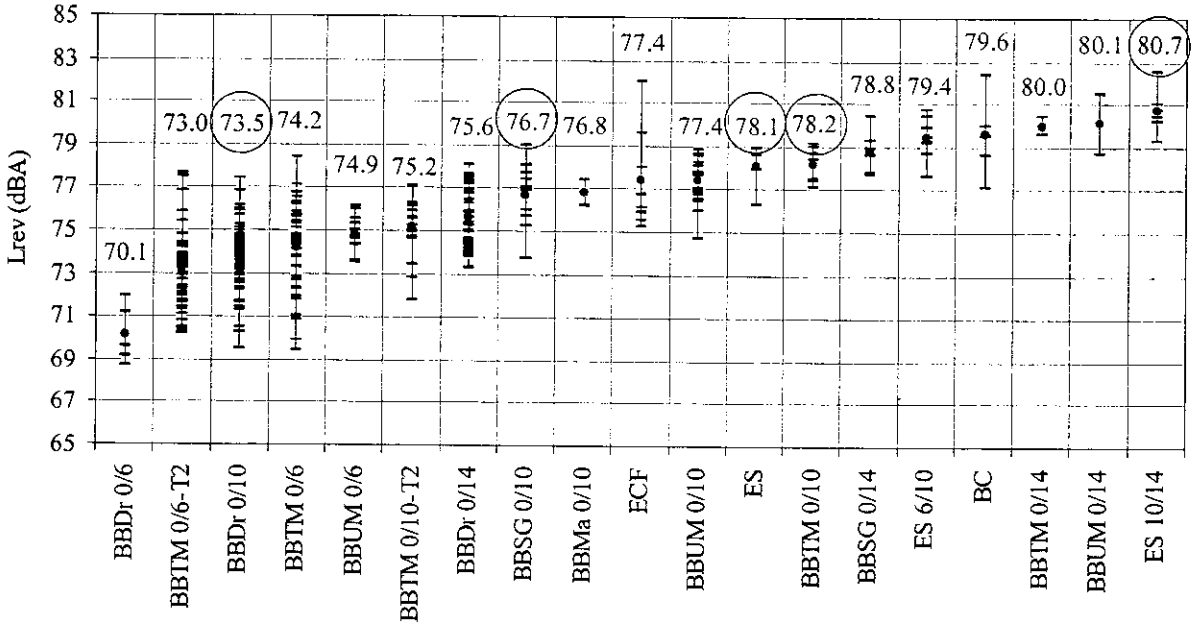

Figure A3.1 : Niveaux de pression sonore moyens pour les principaux revêtements routiers utilisés aujourd'hui.

On constate que l'effet revêtement peut atteindre plus de 10 dBA entre les deux extrêmes. Pour les revêtements que nous considérons dans ce document, les écarts sont plus faibles. On obtient en effet, du plus bruyant au plus silencieux : entre 78.1 et 80.7 dBA pour un ES, 78.2 dBA pour un BBTM 0/10, 76.7 dBA pour un BBSG 0/10 et 73.5 dBA pour un BBDR 0/10. L'écart entre le BBSG et le BBTM est relativement faible, tout particulièrement si l'on considère que l'erreur de mesure peut atteindre ± 1 dBA.

Aux revêtements considérés dans le présent document, peuvent s'ajouter d'autres familles (cf. figure A3.1), dont nous donnons la signification :

- les Bétons Bitumineux Très Minces de nouvelle génération (BBTM-T2), proches des BBDr de par leur porosité importante,
- les Bétons Bitumineux Ultra Minces (BBUM),
- les Bétons Bitumineux Minces (BBMa),
- les Enrobés Coulés à Froid (ECF),
- les Bétons de Ciment (BC).

Ces derniers revêtements sont nettement moins employés que les quatre cités dans ce document, tout particulièrement en milieu urbain.

Annexe 4 : Caractéristiques de l'appareillage de mesure utilisé

A l'exception des mesures préliminaires récapitulées au chapitre 1 (cf. § 1.2.2), toutes les campagnes d'essais ont réuni le même appareillage, c'est-à-dire :

- un ou plusieurs microphones Bruël & Kjaër type 4165 (réponse en fréquence sur la figure A4.1),
- un enregistreur numérique DAT Sony PCM-800 doté de huit voies d'acquisition ainsi qu'un préamplificateur de type Spirit Pro Tracker, utilisé pour rehausser les niveaux d'enregistrement,
- un analyseur bi-voies Hewlett Packard 35665A.

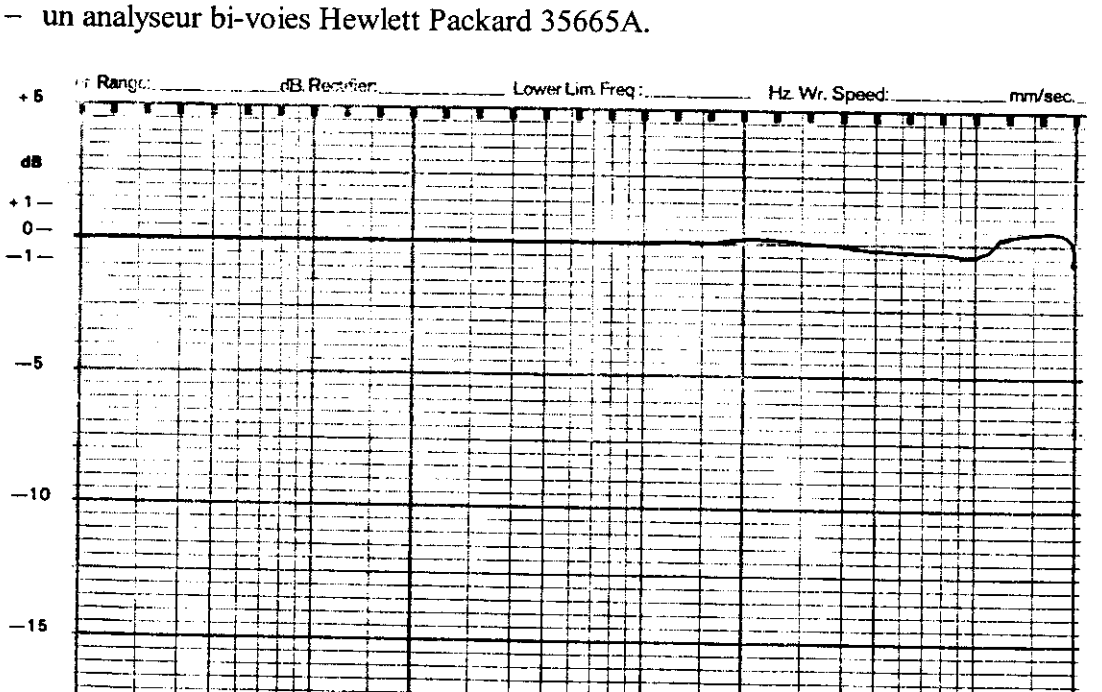

Figure A4.1 : Réponse en fréquence d'un microphone de type BK 4165.

La réponse du microphone est pratiquement plate de 20 Hz à 20 kHz. En effet les écarts ne dépassent pas ± 0.5 dB, même en haute fréquence. Nous nous limitons de toute façon à environ 5.5 kHz (bande de tiers d'octave 5 kHz).
Afin de vérifier la parfaite transparence de la chaîne d'acquisition quant aux signaux acoustiques, quelques vérifications de base ont été effectuées. L'analyseur lui-même a subi un test d'équilibrage de la voie 2 par rapport à la voie 1 (figure A4.2). Nous avons pu ainsi contrôler la parfaite indépendance du traitement des données vis à vis de la voie d'entrée utilisée. Un écart inférieur à ± 0.005 dB a été obtenu sur tout le spectre audible. Le même test a été effectué sur l'ensemble préamplificateur et enregistreur numérique DAT Sony (figure A4.3) pour toutes les voies d'acquisition avec de très bons résultats (écart inférieur à ± 0.1 dB).

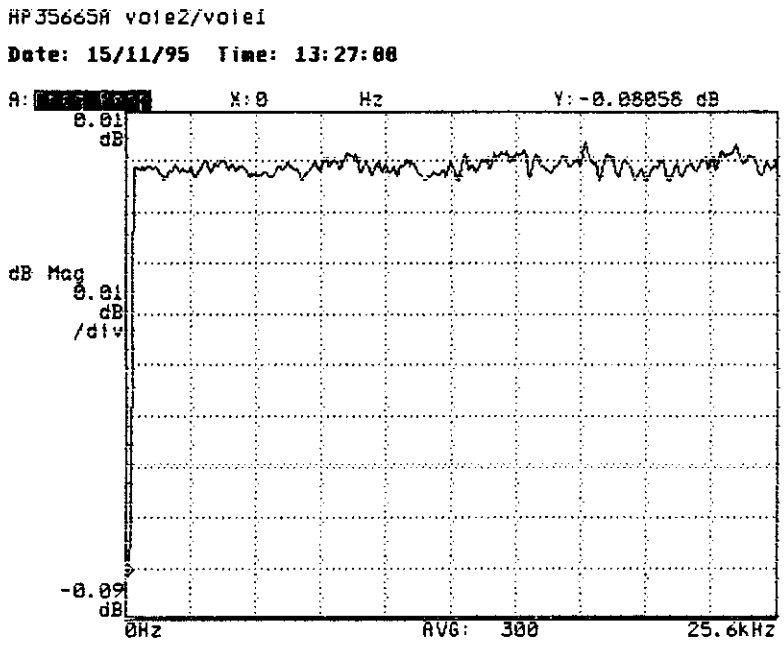

Figure A4.2 : Test d'équilibre des deux voies d'acquisition de l'analyseur Hewlett Packard.

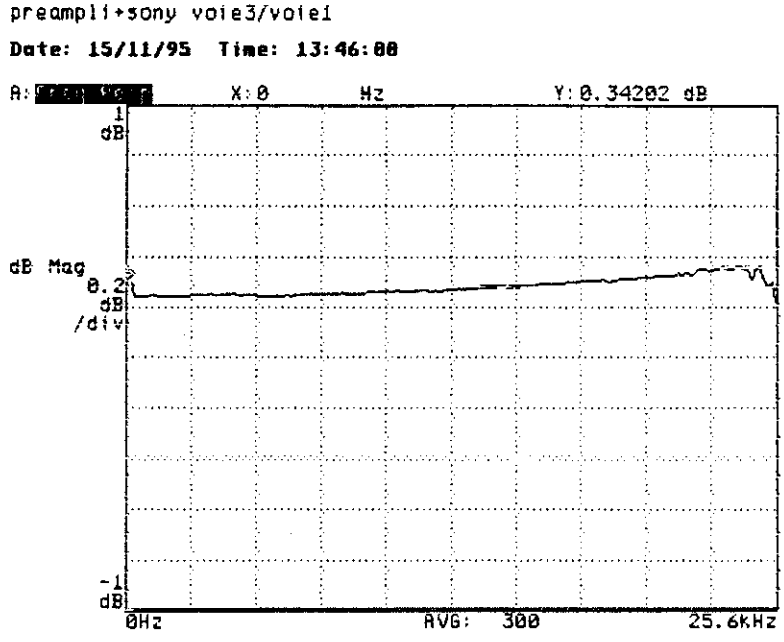

Figure A4.3 : Test d'équilibre des voies d'acquisition 1 et 3 de l'enregistreur numérique DAT Sony.

Un examen de la réponse en fréquence de chaque voie de l'ensemble préamplificateur et enregistreur numérique (figure A4.4) a aussi été effectué, de même qu'une analyse de la réponse à un signal carré de 5 ms (figure A4.5). En ce qui concerne la réponse en fréquence, une déviation inférieure à $\pm$ 0.5 dB est obtenue sur l'ensemble de la bande de fréquence (de quelques Hertz à plus de 20 kHz). Par contre, la réponse à un signal carré de 5 ms laisse

apparaître une constante de temps assez importante. Ce phénomène ne provient pas de l'enregistreur mais du seul préamplificateur (figure A4.6), ce qui n'est pas très gênant pour nos applications dans la mesure où les signaux à enregistrer sont pratiquement continus.

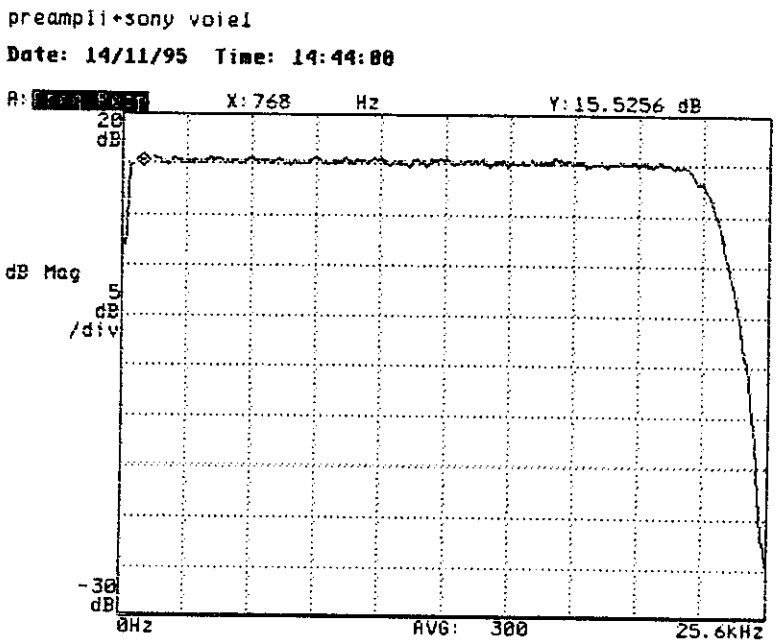

Figure A4.4 : Réponse en fréquence de l'ensemble préamplificateur et enregistreur numérique pour la voie 1.

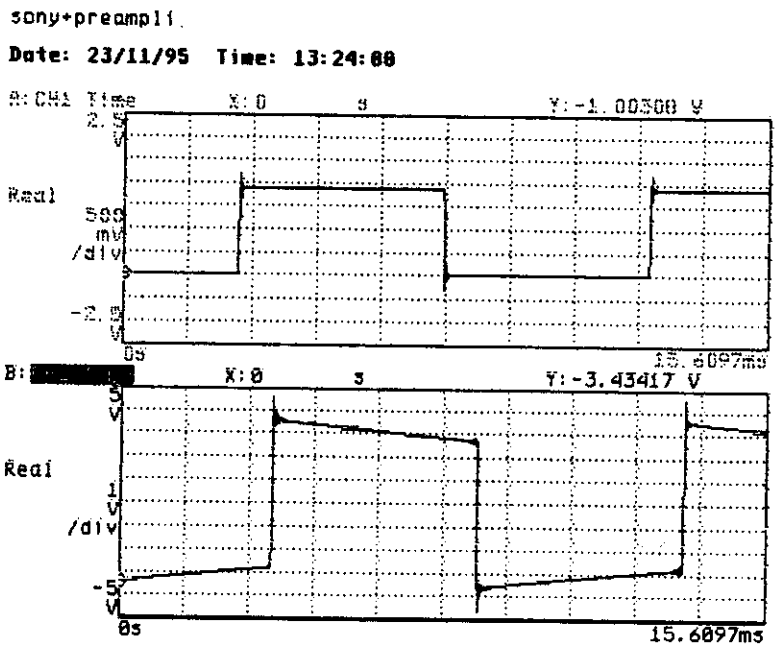

Figure A4.5 : Réponse de l'ensemble préamplificateur et enregistreur numérique à un signal carré.

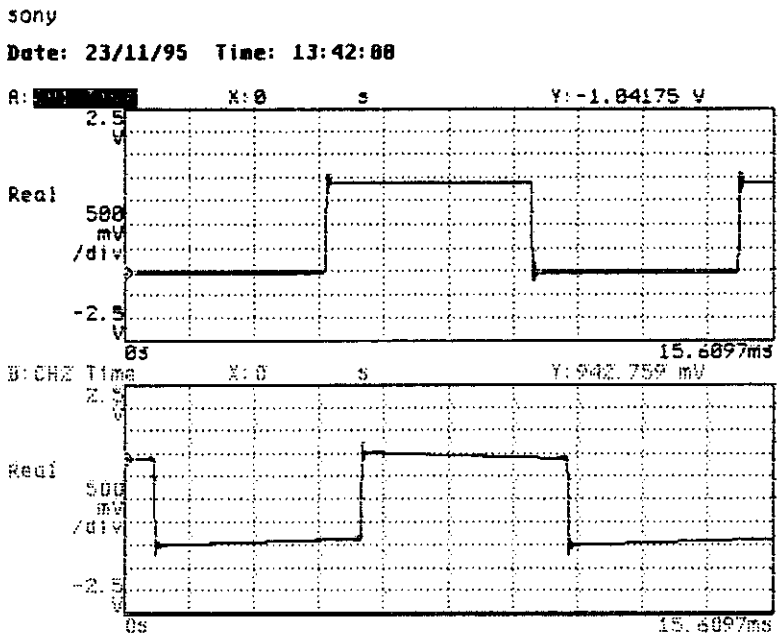

Figure A4.6 : Réponse de l'enregistreur numérique à un signal carré.

En conclusion, on peut affirmer que la chaîne d'acquisition et de reproduction n'entraîne aucune modification des signaux acoustiques sur la gamme de fréquence 80 Hz – 5 Hz que nous utilisons lors de nos campagnes d'essais.

Annexe 5 : Spectres moyens de la parole

Les figures A5.1 et A5.2 montrent des spectres moyens de la parole chez un homme parlant à voie normale [Kinsler & Frey 1962] (figure A5.1) et une comparaison entre le spectre moyen chez un homme et chez une femme [Byrne & al. 1994] (figure A5.2).
Sur la seconde figure, les deux traits noirs représentent la moyenne pour les hommes (voix la plus grave) et pour les femmes.

Les deux figures amènent à une conclusion identique : le maximum d'énergie est obtenu aux environs de 500 Hz, tant chez l'homme que chez la femme. Notons que la figure A5.2 est représentative de la langue française parlée au Canada. Cependant, toutes les langues semblent présenter, au détail près, le même spectre moyen [Byrne & al. 1994].

Nous n'avons malheureusement pu trouver de données concernant les enfants d'âge compris entre 5 et 10 ans. On imagine cependant que le maximum d'énergie doit être atteint pour une fréquence supérieure à 500 Hz, compte-tenu du caractère plus aigu d'une voix d'enfant.

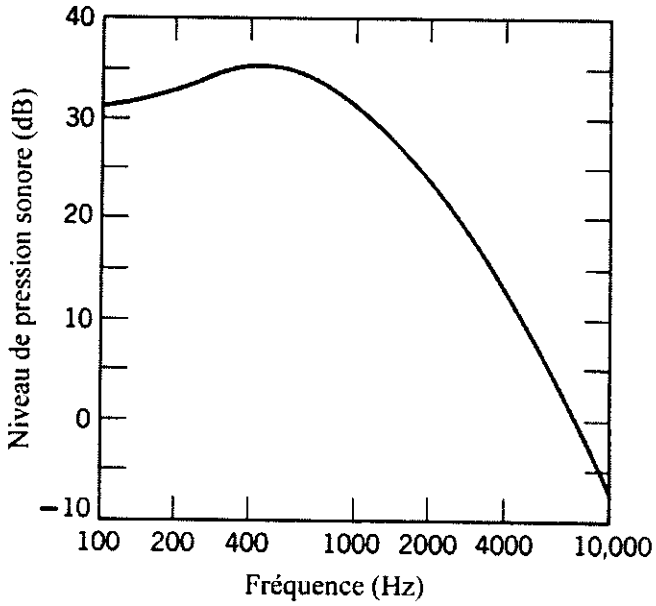

Figure A5.1 : Spectre moyen de la parole pour un homme. Le niveau global moyen est de 65 dB [Kinsler & Frey 1962].

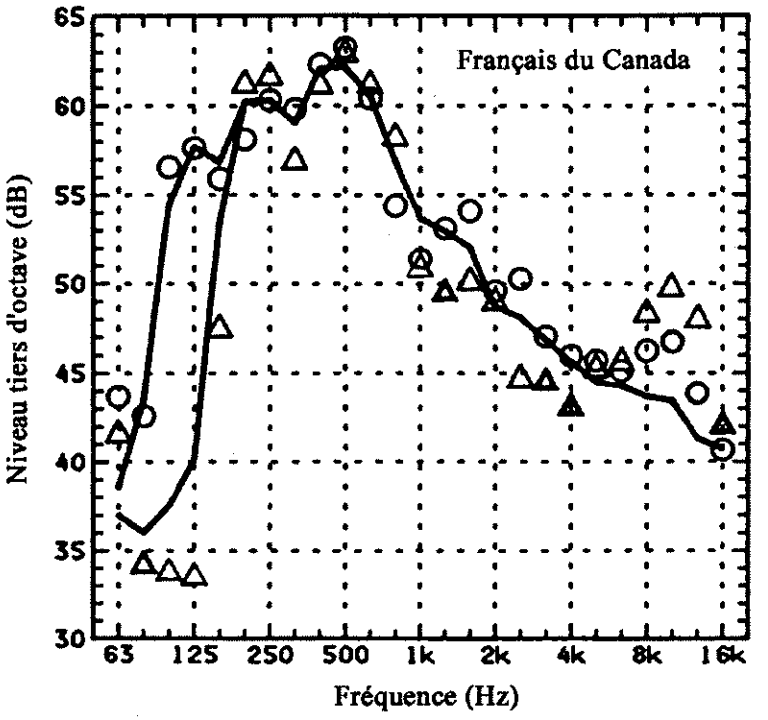

Figure A5.2 : Comparaison des spectres moyens de la parole chez un homme et chez une femme. O : homme; Δ : femme ; ——— moyenne [Byrne & al. 1994].