



HAL
open science

Vers un logiciel prédictif des ambiances sonores urbaines

Jean-François Augoyard, Michel Berengier, Jean Kergomard, Jean-Pierre Peneau

► To cite this version:

Jean-François Augoyard, Michel Berengier, Jean Kergomard, Jean-Pierre Peneau. Vers un logiciel prédictif des ambiances sonores urbaines. [Rapport de recherche] Centre National de la Recherche Scientifique; PIR-Villes. 1998, 107 p. hal-01876963

HAL Id: hal-01876963

<https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-01876963>

Submitted on 19 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

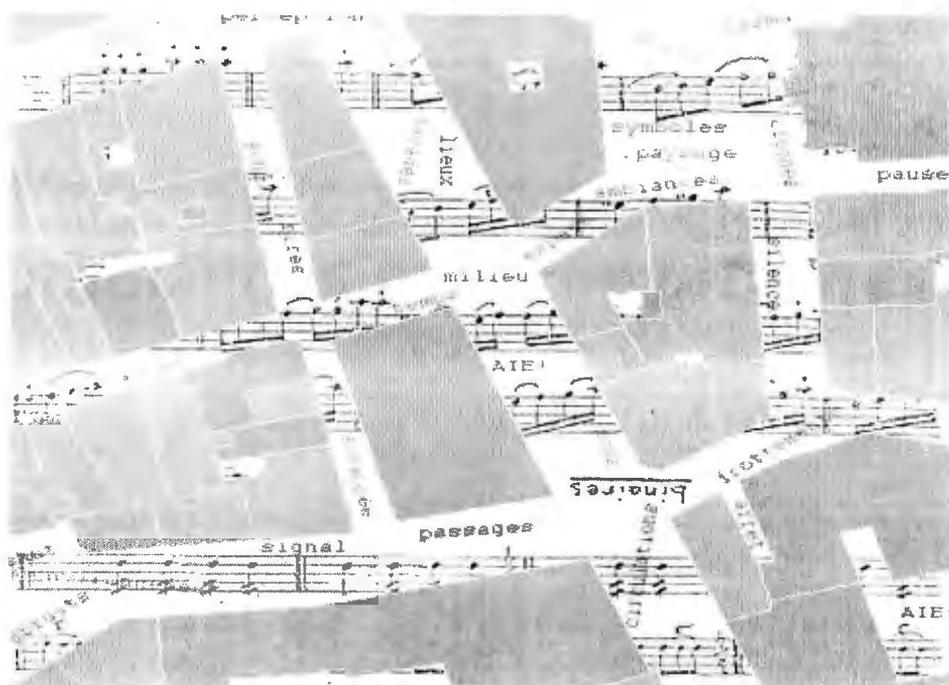
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Programme interdisciplinaire de recherche sur la ville PIR-Villes

Vers un logiciel prédictif des ambiances sonores urbaines.



MM. J-F. Augoyard (CRESSON), M. Bérengier (LCPC),
J. Kergomard (LAUM), J-P. Péneau (CERMA)

Action : « Ville sensible »

Fédération de Recherche 73 « Physique et Images de la Ville »
Centre National de la Recherche Scientifique
(CERMA) Rue Massenet 44300 Nantes

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	5
1.1	OBJECTIF ET CADRE DE LA RECHERCHE	7
1.2	ÉTAT DE L'ART AVANT LES TRAVAUX	8
1.3	MODALITÉS DE COLLABORATION ET PRÉSENTATION DU RAPPORT	9
2	DESCRIPTION DES TRAVAUX ENTREPRIS	11
2.1	CARACTÉRISATION ET IDENTIFICATION DES SOURCES SONORES EN MILIEU URBAIN	13
2.1.1	INTRODUCTION	13
2.1.2	CLASSEMENT DES SOURCES SONORES D'ORIGINE ROUTIÈRE	14
2.1.3	PREMIERS PAS VERS LA MODÉLISATION DES VÉHICULES	15
2.1.4	CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE DES VÉHICULES EN CONDITION URBAINE	23
2.1.5	INTRODUCTION DES SOURCES SONORES EN MILIEU URBAIN : PREMIÈRES MESURES DANS UNE ÉCOLE	29
2.1.6	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	34
2.1.7	BIBLIOGRAPHIE	34
2.1.8	PUBLICATIONS	36
2.2	MODÉLISATION DE LA PROPAGATION DU SON EN MILIEU URBAIN PAR UN PROCESSUS DE DIFFUSION [18]	37
2.2.1	INTRODUCTION	37
2.2.2	DIFFUSION À L'ÉCHELLE D'UN QUARTIER : MODÈLE MACROSCOPIQUE	39
2.2.3	DIFFUSION DANS UNE RUE : MODÈLE MICROSCOPIQUE	45
2.2.4	CONCLUSION	51
2.2.5	BIBLIOGRAPHIE	53
2.2.6	PUBLICATIONS	54
2.3	CARACTÉRISATION DIMENSIONNELLE DE LA DIFFUSIVITÉ DES FORMES ARCHITECTURALES ET URBAINES	55
2.3.1	MORPHOLOGIE URBAINE ET ÉCHELLES DE LA VILLE : ÉTAT DE L'ART	55
2.3.2	CAMPAGNE DE MESURES IN SITU	68
2.3.3	IMPLANTATION NUMÉRIQUE DU MODÈLE DE DIFFUSION	71
2.3.4	CONCLUSIONS	75
2.3.5	BIBLIOGRAPHIE	75
2.3.6	PUBLICATIONS	78
2.4	PARCOURS D'ÉCOUTE QUALIFIÉE : UNE APPROCHE SONORE D'UN QUARTIER	81
2.4.1	PRÉSENTATION	81
2.4.2	ANALYSE	86
2.4.3	CONCLUSION :	99
2.4.4	BIBLIOGRAPHIE	101
3	CONCLUSION	103
3.1	RÉSULTATS OBTENUS	105
3.2	PERSPECTIVES	106

1 INTRODUCTION

1.1 Objectif et cadre de la recherche

Il n'est sans doute pas exagéré d'avancer que les concepteurs chargés de la réalisation des projets urbains ne disposent pas d'un outillage très développé, leur permettant de traiter de manière satisfaisante les questions de contrôle des ambiances. Ce constat très général peut-être transposé sans peine au domaine des ambiances sonores. La qualification dans ce registre cède trop souvent sa place à des approches correctives, intervenant fréquemment en aval des décisions structurantes d'aménagement. La qualité sonore n'est pas considérée comme un véritable paramètre de programmation, de conception ou de réhabilitation des secteurs urbains. A fortiori, la place des phénomènes sonores dans la combinaison des facteurs physiques et climatiques, caractérisant globalement les ambiances urbaines, reste mal cernée.

Si l'on peut attendre des progrès significatifs dans le domaine, au prix de l'utilisation de procédures de simulation numérique, il n'en reste pas moins que des réflexions de fond à la fois théoriques et méthodologiques, portant à la fois sur la qualité sonore des espaces urbains et sur les modalités différentielles de son appréciation, sont un préalable nécessaire au développement des procédures d'instrumentation. La prévision des phénomènes sonores en milieu urbain ne peut se mettre en œuvre par la seule prise en compte des dimensions physiques.

Forte de ces présupposés, la recherche entreprise avait pour objectif principal la définition des caractéristiques d'un logiciel de prédiction des ambiances sonores en milieu urbain. Ce logiciel devait être tout particulièrement utilisable dans les phases opérationnelles de conception et de réalisation de projets d'aménagement urbain.

En regard des logiques et des outils existants - marqués pour l'essentiel par la quête de solutions correctives des nuisances dues au trafic ou aux activités génératrices de bruit - la démarche entreprise visait à développer de nouvelles méthodes de prédiction des phénomènes caractérisées par :

- une représentation plus qualitative de l'environnement sonore;
- une opérationnalité capable de se traduire dans les stades initiaux 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 rencontrés dans le patchwork urbain.

Pour atteindre ces objectifs, il apparaissait nécessaire d'associer des recherches sur :

- l'analyse des tissus et la méthodologie du projet urbain;
- la qualification de l'espace sonore urbain;
- la modélisation des phénomènes acoustiques et la validation in situ.

Ces trois axes représentaient les domaines respectifs de recherche des équipes de la Fédération de Recherche 73 « Physique et Images de la Ville » qui se sont associées pour soumettre ce projet à l'appel d'offre du PIR-Villes. Leur proposition visait la formulation du cahier des charges très précis d'un logiciel de prédiction des ambiances sonores urbaines. La teneur de celui-ci devait être gagée par des opérations d'élaboration théorique, d'analyse de terrain, de validation et de prototypage de certains modules, ainsi que par une collaboration active avec des concepteurs de projets en situation opérationnelle réelle.

Ces objectifs ont dû être revus en proportion d'une coupe budgétaire sévère, frappant la notification initiale, elle-même avait été réduite en regard du chiffrage du projet. Pour mémoire l'évaluation de l'opération était au départ de 521 800 F HT, la somme attribuée par le PIR-Villes correspondait à 390 000 F HT, le montant effectivement versé, après l'amputation des crédits de 1996, était ramené à 220 685 F HT.

La poursuite de l'action n'a pu être possible qu'au prix d'une révision de ces objectifs et d'une aide substantielle du Ministère de l'Environnement. Ce dernier a soutenu le volet concernant la caractérisation des données sonores urbaines à hauteur de 190 000 F HT.

Par rapport au programme annoncé, c'est la partie correspondant à la collaboration avec les concepteurs de projets urbains qui a le plus souffert de ces restrictions. Dans les autres champs, on peut estimer que les objectifs ont été atteints à hauteur de 60 à 80 %. Il va sans dire qu'un travail complémentaire est nécessaire pour atteindre le but fixé de formulation du cahier des charges du simulateur.

1.2 Etat de l'art avant les travaux

Il existe actuellement deux méthodes opérationnelles pour étudier la propagation sonore en milieu urbain : la mesure sur maquette et la simulation par rayons sonores. La mesure sur maquette consiste à reproduire à échelle réduite (50^{ème}, 100^{ème}, voire 200^{ème}) un territoire urbain et les volumes construits. Des sources ultra-sonores y sont installées. Leurs caractéristiques sont semblables à celles des sources réelles des bruits - à une translation fréquentielle près. Les niveaux sonores sont mesurés en un grand nombre de points sur la maquette.

La simulation par rayons sonores consiste à faire tracer par un ordinateur un très grand nombre de rayons sonores issus des différentes sources et se propageant dans toutes les directions. A chaque impact sur un bâtiment ou sur le sol, ces rayons sont réfléchis suivant les lois de l'acoustique géométrique, et l'ensemble des rayons recueillis dans différentes zones réceptrices permet de reconstituer le niveau sonore.

Ces deux approches toutes deux issues de l'acoustique des salles, s'avèrent très lourdes à l'usage: ainsi la mesure sur maquette exige des locaux de grande taille, une atmosphère contrôlée, et un long travail de maquettiste. (cf. le centre des maquettes du CSTB de Grenoble). Les logiciels existant (MITHRA, CARTO-BRUIT, MICRO-BRUIT, SoundPlan, Motus Trafic, Ramsete, Cadna A, LIMA et ODEON notamment) ne prennent en compte que des données simplifiées et ont du mal à reproduire la multiplicité et la variabilité des sources sonores. Ils sont le plus souvent conçus dans une perspective défensive de réalisation d'ouvrages protecteurs anti-bruits.

Les méthodes plus qualitatives, utilisables en phase de conception reposent sur des typologies sommaires. Elles correspondent à des logiques de conception accusant l'âge de leur élaboration. (travaux de Pascal Bar et Brigitte Loye dans la décennie 70/ 80). Elles n'ont cependant pas été remplacés par un outillage plus proches des modalités présentes de la conception urbaine, et conservent à ce titre une réelle légitimité. La piste tracée récemment par le CRESSON, à partir de l'inventaire des effets sonores en milieu urbain, constitue l'apport le plus notoire en la matière. Elle doit cependant pouvoir évoluer vers un appareillage plus orienté vers les procédures projectuelles.

Le panorama de la situation au niveau international reconduit les caractéristiques du contexte essentiellement français qui vient d'être décrit. Des outils numériques de simulation existent aux Pays-Bas, au Danemark, des systèmes d'auralisation sont

proposés dans différents pays anglo-saxons. Mais, les uns et les autres sont trop souvent hors de portée des professionnels de la conception et de la gestion de l'espace urbain.

1.3 Modalités de collaboration et présentation du rapport

Le déroulement de la recherche a permis un réel travail interdisciplinaire. Au delà des informations mutuelles régulières sur l'avancement du travail de chaque équipe, dispensées lors des nombreuses réunions de coordination qui ont été organisées, des phases entières de la recherche ont été conduites en étroite collaboration entre spécialistes de disciplines différentes. Les architectes-urbanistes ont étudiés avec les physiciens des méthodes de caractérisation des indices de diffusion. Les caractérisations qualitatives des sources sonores ont fait l'objet d'échanges et parfois aussi de controverses entre les acousticiens développant les méthodes métrologiques et les sociologues tenants des parcours qualifiés. Les choix des morphologies significatives et des secteurs d'étude ont été l'occasion d'infléchir le point de vue sur la forme urbaine des uns et des autres. Ces croisements de savoirs et d'expériences ont permis une acculturation réciproque, dans des champs étrangers a priori à la discipline de formation de chaque équipe.

Le compte-rendu de ces échanges aurait pu être retenu comme élément structurant du présent rapport. On a pris le parti plus conventionnel d'une restitution présentant les travaux et les apports de chacune des entités participantes. Ce choix a le mérite d'une clarté de formulation des démarches et des résultats. Les collaborations sont généralement signalées, bien souvent, elles se manifestent d'elles même, telle ou telle séquence ayant nécessité la participation de plusieurs équipes. La séquence retenue organise les exposés successifs du travail réalisé de la manière suivante :

La première partie du rapport est consacrée à l'identification et à la caractérisation physique des sources sonores. Cette contribution a été pour l'essentiel conduite au LCPC. Elle aborde les questions du niveau sonore des véhicules en fonction de leur type et de la nature des chaussées, en étudiant les conditions du passage des conditions routières à celles du trafic urbain. Elle traite également la question de la caractérisation physique des sources humaines, à partir d'un travail sur une cour d'école.

La seconde partie est dédiée à la modélisation de la propagation du son en milieu urbain par un processus de diffusion. Elle développe ce qui constitue un trait marquant et une originalité forte du travail, en faisant l'hypothèse d'une analogie de la propagation sonore avec des phénomènes thermiques ou lumineux. Ce choix permet d'avoir recours à la théorie mathématique de la diffusion. Deux modèles de diffusion sont proposés : l'un pour un tissu urbain en 2 dimensions, l'autre pour une rue en 3 D.

La troisième partie intéresse la caractérisation dimensionnelle de la diffusivité des structures urbaines et architecturales. Elle développe un modèle fractal des formes urbaines, puis un modèle faisant également appel aux mesures fractales pour caractériser la texture et ce faisant la diffusivité des parois des scènes urbaines. Les validations expérimentales in situ conduites dans une rue de Nantes sont présentées dans ce chapitre.

La quatrième et dernière partie rend compte du travail effectué pour traiter la question de l'approche qualitative des sources, seule susceptible de permettre une appréhension réellement fondée de la question des ambiances sonores. L'expérience de mise en œuvre de la méthode des parcours d'écoute qualifié sur le secteur de Rezé -retenu comme terrain d'étude- est décrite de manière détaillée. Les campagnes de mesure sur ce même site doivent se poursuivre, dans les phases ultérieures de la recherche.

Une conclusion s'efforce d'établir un bilan des travaux réalisés et des résultats obtenus. Elle donne également les lignes directrices des prolongements souhaitables de la recherche amorcée.

2 DESCRIPTION DES TRAVAUX ENTREPRIS

2.1 Caractérisation et identification des sources sonores en milieu urbain

David Gaulin

Responsables scientifiques : Michel Bérengier (LCPC Centre de Nantes) et Claude Dépollier (LAUM, UMR CNRS 6613)

2.1.1 Introduction

La caractérisation et l'identification des sources sonores en site urbain se présentent selon deux modalités : une **approche qualitative** faisant principalement appel à la statistique et une **approche quantitative** permettant d'identifier ces sources par des critères physiques.

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

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

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

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

En milieu urbain, ces deux hypothèses principales ne seront pas remplies du fait d'une part, des faibles vitesses de circulation pour lesquelles les bruits d'origine moteur et d'échappement deviennent non négligeables et d'autre part, du fait de la présence du bâti (diffraction, réflexion). Le travail consiste à étudier tout d'abord une adaptation de la procédure de mesure de façon à pouvoir qualifier, pour les types de trafics urbains représentatifs, la puissance acoustique de chaque type de sources en fonction du support sur lequel se déplacera cette source. Dans le but de caractériser au mieux les sources sonores d'origine routière, il est indispensable de les recenser et si possible, de les regrouper en différentes catégories. Ce travail a déjà été effectué, notamment par le CETUR¹. Cette classification est-elle toujours valable? C'est à cette question que nous tenterons de répondre dans la première partie. La modélisation des véhicules en terme de source sonore équivalente ainsi que l'évolution fréquentielle de leur puissance

¹ CETUR : Centre d'Etudes des Transports Urbains. Actuellement CERTU.

acoustique sont indispensables, notamment pour l'approche propagative. Ceci fait l'objet des paragraphes 2.3 et 2.4.

Les sources sonores d'origine humaine seront abordées dans la deuxième partie.

2.1.2 Classement des sources sonores d'origine routière

2.1.2.1 Quelques rappels bibliographiques

De nombreux écrits font référence au classement des sources sonores d'origine routière. Parmi les plus importants, on peut citer le guide du bruit [2], le modèle de prévision allemand RLS 90 [3] et le modèle américain FHWA TNM [4].

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

- Véhicules légers (véhicules de poids total en charge inférieur à 3.5 tonnes),
- Véhicules lourds (véhicules de poids total en charge supérieur à 3.5 tonnes) en distinguant si possible les véhicules de poids total en charge compris entre 3.5 et 12 tonnes (poids lourd) de ceux possédant un poids total en charge supérieur à 12 tonnes (train routier),
- Deux roues motorisés en distinguant essentiellement 3 catégories : les motocyclettes (cylindrée supérieure à 125 cm³), les vélomoteurs (cylindrée comprise entre 50 et 125 cm³) puis les cyclomoteurs (cylindrée inférieure à 50 cm³).

Les poids lourds (PL) et les trains routiers (TR) sont regroupés dans la même catégorie. A ce propos, un récent rapport de l'INRETS [5] fait ressortir, dans ses premières conclusions, un écart très faible entre les poids lourds et les trains routiers. En effet, le "test de sensibilité" PL/TR y est de l'ordre du décibel.

Le modèle de prévision allemand RLS 90 [3] reste assez proche de la classification du guide du bruit. Il distingue deux classes de véhicules :

- Les véhicules légers dont le poids total en charge est inférieur à 2.8 tonnes,
- Les poids lourds dont le poids total en charge est supérieur à 2.8 tonnes.

Par contre, le modèle américain FHWA TNM [4] sépare les véhicules en cinq catégories :

- 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),
- 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,
- Trains routiers (Heavy trucks) : véhicules de transport de marchandises à plus de deux essieux, en général d'un poids total supérieur à 12 tonnes,
- Autobus : tout véhicule à deux ou trois essieux conçu pour transporter neuf passagers ou plus (pas d'indications de poids total),

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

On constate que seul ce dernier modèle sépare les poids lourds et les trains routiers, ceci provient certainement du fait que les trains routiers rencontrés sur le continent américain présentent la caractéristique d'avoir leur pot d'échappement dirigé vers le haut. D'ailleurs, comme mentionné précédemment, le "US Department of Transportation Federal Highway Administration" observe un écart de 4 dBA entre les catégories de véhicules lourds "Medium Trucks" et "Heavy Trucks".

2.1.2.2 Mesures préliminaires

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

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

Les résultats, basés sur une analyse non seulement en niveau global mais par bandes tiers d'octave, nous ont permis de distinguer 2 grandes classes de véhicules (en omettant les deux roues) :

–Les véhicules légers : voitures particulières et utilitaires,

–Les poids lourds et trains routiers.

Nous retrouvons donc la même classification que le guide du bruit [2], établie il y a une vingtaine d'années. Ceci paraît logique du fait que l'ensemble des catégories de véhicules a, a priori, bénéficié d'une diminution générale du niveau d'émission sonore. Même si les niveaux absolus sont différents, l'écart entre les véhicules reste inchangé. Les utilitaires dont le poids total en charge est inférieur à 3.5 tonnes peuvent être regroupés avec les véhicules légers comme le préconise le guide du bruit. En effet, leur niveau sonore est quasiment identique à celui des voitures particulières. Concernant les poids lourds et les trains routiers, nous n'avons pas trouvé une différence assez importante permettant de les dissocier. Ceci confirme également les études précédentes.

2.1.3 Premiers pas vers la modélisation des véhicules

2.1.3.1 Introduction

Après avoir vérifié la classification, il s'agit maintenant de modéliser ces véhicules en terme de source sonore équivalente, c'est à dire déterminer un ensemble de paramètres, dont la hauteur de la source sonore équivalente et sa puissance acoustique. Ce concept de source équivalente ponctuelle et omnidirectionnelle sera discuté ci-après. Ces résultats constitueront les données d'entrée du modèle de propagation du son en milieu

urbain développé par J. Picaut [1]. Des travaux ont cependant déjà été réalisés. Le Guide du bruit, par exemple, préconise une hauteur de 20 cm pour la source équivalente, hauteur qui paraît erronée aujourd'hui. En effet, depuis 1980, date à laquelle a été publié cet ouvrage, des progrès sensibles ont été réalisés sur l'acoustique du compartiment moteur. Ces derniers rendent le bruit de roulement prépondérant à partir de 50-60 km/h. Ceci conduit à imaginer une source sonore équivalente plus proche du sol.

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

2.1.3.2 Différentes représentations des sources sonores [6]

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

Les mesures sont effectuées au passage, à 7.5 m de l'axe de déplacement des véhicules. Les résultats obtenus sont présentés tableau 1.

Tableau 1 : Ecart entre les niveaux maximum théoriques et mesurés au passage en fonction de la vitesse (dBA).

Source	Vitesse (m/s)		
	10	20	30
monopole	< 0.1	0.2	0.3
Dipôle //	0.1	0.2	0.5
Dipôle ⊥	0.2	0.5	1.3

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

2.1.3.2.1 Détermination des hauteurs de sources sonores équivalentes : Méthode de Glegg et Yoon [7] [8]

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

La hauteur effective des sources de bruit d'un véhicule est un paramètre important pour la construction des écrans antibruit le long des autoroutes. Par exemple, si le bruit est principalement dû au contact pneumatique-chaussée, des écrans de faibles hauteurs seront nécessaires, contrairement au cas des poids lourds où le moteur et l'échappement constituent des sources importantes. La méthode FHWA pour les écrans acoustiques utilise une hauteur de source équivalente de 2.44 m pour les trains routiers (échappement en hauteur) basée sur des résultats d'expériences du début des années 70.

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

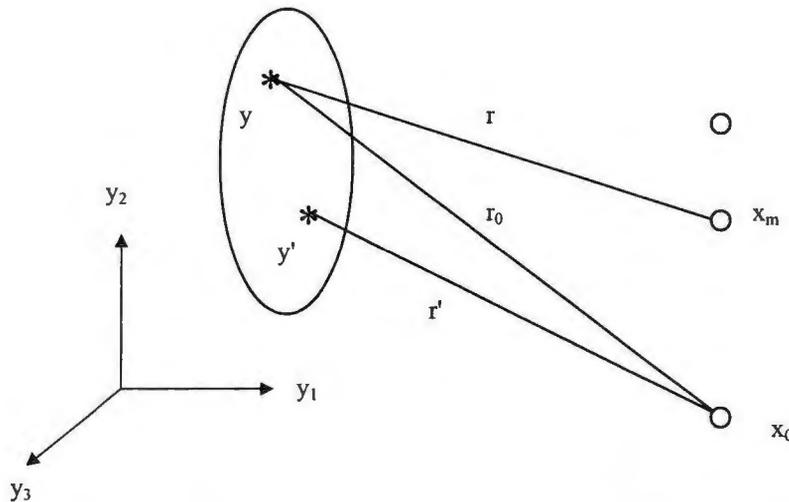


Figure 1 : Système de coordonnées pour une distribution de source. y et y' sont les positions de source, x_0 et x_m les positions de mesure.

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 :

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

avec : k : nombre d'onde, h_m : hauteur du microphone, r : distance source-microphone;

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

où : C_m : interspectre entre le microphone de référence situé en x_0 et le microphone situé en x_m , C_0 : autospectre du microphone de référence.

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

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

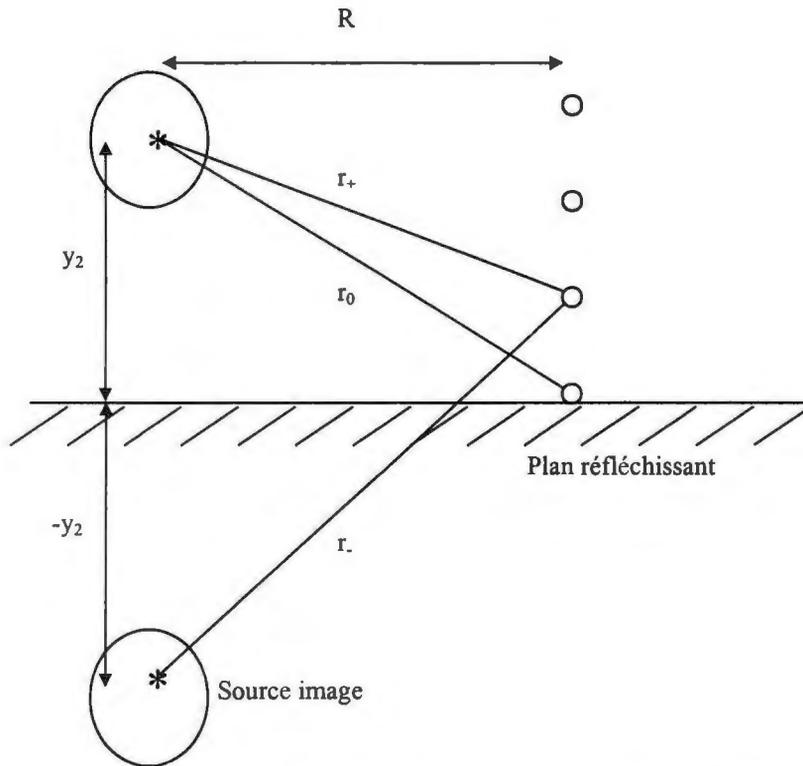


Figure 2 : Schéma montrant les distances de propagation entre une source, son image et un réseau de microphones.

En accord avec cette démarche théorique, une méthode de mesure a été développée en utilisant un réseau vertical de sept microphones. Cette méthode est relativement insensible à la directivité et aux déplacements horizontaux des sources par rapport à leur position initiale. L'objectif est de mesurer des hauteurs de sources équivalentes pouvant atteindre 2.5 m et dans la gamme de fréquence 250-2500 Hz et d'appliquer cette procédure à des véhicules circulant sur autoroute.

Les résultats moyens pour les véhicules légers sont présentés figure 3. Bien que le graphique fasse apparaître une hauteur de source de 40 cm entre 500 et 1000 Hz due à la prédominance du bruit de contact pneumatique-chaussée dans cette gamme, les auteurs notent que la valeur réelle est probablement inférieure. Aux basses et hautes fréquences, la hauteur de source remonte aux environs de 60 cm.

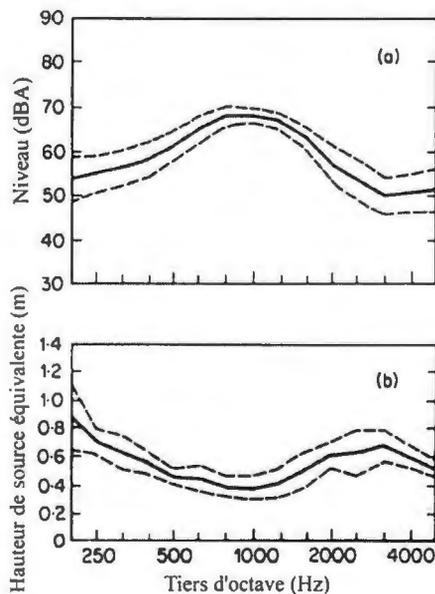


Figure 3 : Hauteur de source équivalente pour 25 véhicules légers.

— : valeur moyenne;
 - - - : valeur moyenne ± écart-type [8].

L'objectif des auteurs de cette étude était de mesurer la hauteur de source équivalente de véhicules circulant sur autoroute dans le but d'optimiser les écrans antibruit. Il a été trouvé dans le cadre de cette étude 1.2 m pour les trains routiers, 0.7 m pour les poids lourds et 0.6 m pour les véhicules légers. A noter que des résultats similaires ont été obtenus par Coulson [9] avec la même technique.

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

De nombreuses mesures utilisent des antennes acoustiques. Notre démarche est cependant différente. Elle est fondée sur l'utilisation des phénomènes propagatifs entre deux microphones séparés de 5.5 m. A cet effet, nous employons le modèle de propagation "PL-PROPATE" développé au LCPC. Dans ce dernier, le revêtement est acoustiquement caractérisé à partir du modèle d'impédance de Delany et Bazley [10] [11], qui présente l'avantage d'être simple et fiable sur l'ensemble de la gamme de fréquence utile. Comme nous l'avons vu précédemment les véhicules sont modélisés par une source de type monopolaire. Les paramètres du modèle sont : la hauteur de la source ponctuelle, l'impédance de surface de la couche de roulement et les conditions météorologiques. Pour chaque position de microphone, il nous fournit une atténuation par rapport au champ libre. Rasmussen [12] utilise une démarche similaire pour déterminer l'atténuation excédentaire du bruit routier.

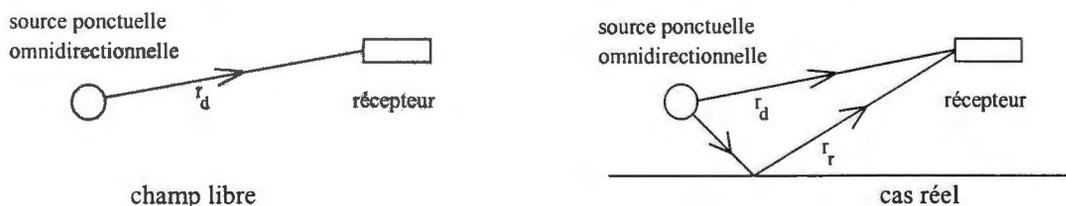


Figure 4 : Distances de propagation en champ libre et en présence d'un sol.

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

$$\frac{p_r}{p_0} = \frac{A_s}{4\pi r_d} e^{ikr_d} \quad \text{avec } A_s : \text{amplitude de la source et } p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.}$$

Dans le cas réel, l'expression précédente devient :

$$\frac{p_r}{p_0} = \frac{A_s}{4\pi r_d} e^{ikr_d} + Q \frac{A_s}{4\pi r_r} e^{ikr_r} \quad \text{avec } Q = |Q|e^{i\gamma} : \text{coefficient de réflexion du sol}$$

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

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

avec : f : fréquence considérée (Hz), c : célérité du son (m/s).

D'où l'atténuation excédentaire donnée par le logiciel "PL_PROPATE" :

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

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

$$Att_1 = L_{\text{mesuré},1} - L_{\text{libre},1} \text{ pour le premier microphone,}$$

$$Att_2 = L_{\text{mesuré},2} - L_{\text{libre},2} \text{ pour le second microphone.}$$

où $L_{\text{mesuré}}$ est le niveau mesuré dans le cas réel.

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

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

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

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

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

Si l'on tient compte de la dispersion géométrique et de l'absorption atmosphérique, les niveaux sonores en décibels sont :

$$L_{\text{libre},1} = L_w - 10\text{Log}4\pi r_1^2 - \text{Absor}_{\text{air},1}$$

$$L_{\text{libre},2} = L_w - 10\text{Log}4\pi r_2^2 - \text{Absor}_{\text{air},2}$$

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

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

$$L_{\text{calculé},2} = L_{\text{mesuré},1} + Att_2 - Att_1 + \text{Absor}_{\text{air},1} - \text{Absor}_{\text{air},2} - 20\text{Log}\frac{r_2}{r_1} \quad (3)$$

Un procédé de calage, dont la variable est la hauteur de source, est utilisé afin d'ajuster $L_{\text{calculé},2}$ 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 microphones sont également positionnés au-dessus d'un sol réfléchissant. On évite ainsi les ruptures d'impédance. La largeur de la plateforme de mesure (chaussée et bordure) est de ce fait suffisante.

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

le même site que précédemment. Plusieurs configurations concernant la position de la source et des microphones ont été testées.

Les résultats de ces premiers tests sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 : Hauteurs de source équivalente calculées pour différentes configurations.

	Centre du ventilateur à 18 cm du sol (hauteur du début du ventilateur : 9 cm)	Centre du ventilateur à 93 cm du sol (hauteur du début du ventilateur : 84 cm)
Microphone 1 à 7.5 m, 1.2 m Microphone 2 à 13 m, 1.2m	11.5 cm	75 cm
Microphone 1 à 7.5 m, 1.2 m Microphone 2 à 3.75 m, 1.2m	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 des défauts de planéité de la surface de la chaussée d'une part et de l'incertitude liée à la position de la source acoustique équivalente d'autre part, on peut considérer que l'estimation de cette hauteur pour les configurations choisies est satisfaisante.

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

Les essais ont été effectués sur la piste de référence du LCPC. Le dispositif, illustré figure 5, est constitué d'une Renault Clio 1.4l essence et de deux microphones BK demi pouce. Le véhicule effectue plusieurs passages à vitesse stabilisée : 80 et 100 km/h, devant les microphones. La position du microphone 2 a été imposée par la largeur maximale de la piste. Les spectres mesurés sont obtenus avec un analyseur Hewlett Packard 35665A : ce sont les spectres correspondant au niveau global maximum mesuré lors du passage du véhicule, c'est à dire au droit des microphones. Tous les résultats sont issus d'un moyennage sur plusieurs passages. Les contraintes relatives à la position du véhicule sur la chaussée sont celles contenues dans la norme S31-119 [13], à savoir que le véhicule ne doit pas s'écarter de plus de 50 cm de l'axe médian de la voie d'essai.

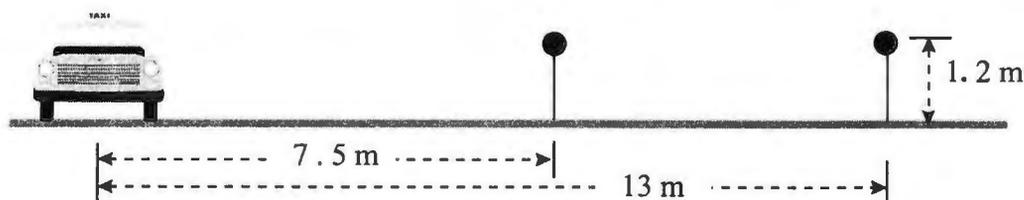


Figure 5 : Schéma du dispositif.

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

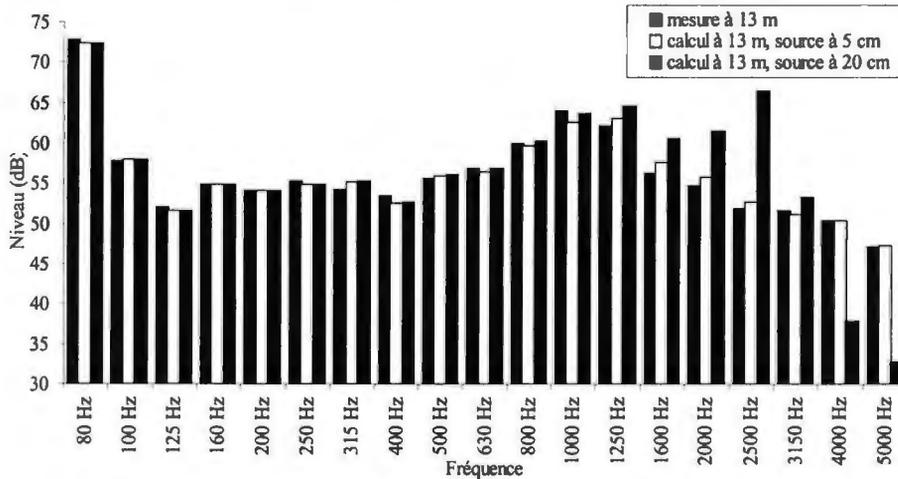


Figure 6 : Comparaison entre la mesure et le calcul à 80 km/h pour une source située respectivement à 5 et 20 cm du sol.

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

D'autres mesures effectuées sur site routier réel (revêtement parfaitement réfléchissant) ont fourni des hauteurs similaires. Les mêmes mesures effectuées sur des trains routiers ayant des vitesses stabilisées situées entre 60 et 90 km/h ont donné des hauteurs de source identiques à celles trouvées pour les véhicules légers. Connaissant la hauteur de la source sonore équivalente, il est maintenant possible d'obtenir le spectre de puissance :

$$L_w = L_{\text{mesuré},1} - \text{Att}_1 + 10\text{Log}4\pi r_1^2 + \text{Absor}_{\text{air},1} \quad (4)$$

Afin de confirmer le bon ajustement trouvé sur les spectres, un calcul identique a été effectué sur les signatures temporelles :

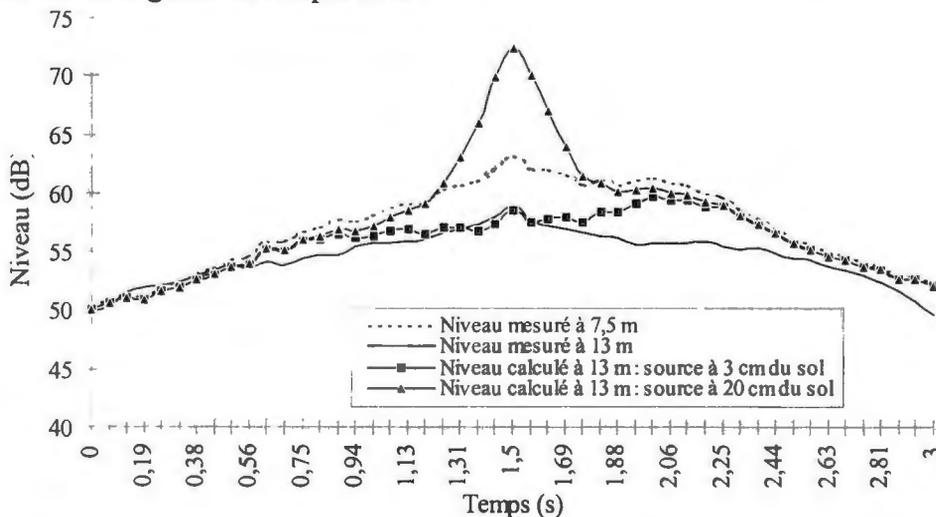


Figure 7 : Comparaison pour 2 hauteurs de sources de l'évolution temporelle du passage d'un véhicule à 100 km/h et pour le tiers d'octave 2.5 kHz.

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

L'ensemble de ces résultats montre de façon indiscutable que la source sonore équivalente est située beaucoup plus proche du sol que les 20 cm usuels. Les travaux du LCPC sur la prévision des niveaux sonores (en termes de L_{eq}) à grande distance vont aussi dans le même sens. En effet, l'écart mesure-calcul de 3-4 dB à 100 m pour une hauteur de source de 20 cm, est réduit à environ 1 dB avec une hauteur de source de l'ordre de 5 cm [14]. Notons que la précision de la mesure est de l'ordre du décibel. Deux exemples figurent dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Comparaison LAeq calculé pour différentes hauteurs de sources – LAeq mesuré.

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

Dans le cadre d'une collaboration avec le LCPC, l'INRETS a conduit une étude relative à la détermination de la hauteur de source équivalente à partir d'une mesure utilisant une antenne de champ proche. Les résultats confirment, une nouvelle fois, une hauteur de source très faible. [15].

2.1.4 Caractérisation acoustique des véhicules en condition urbaine

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

2.1.4.1 Modèle de simulation du bruit rayonné par les véhicules [16]

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

$$L_{we} = A_0 + A_1S + A_2L \tag{5}$$

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

où : L_{we} et L_{wt} sont respectivement la puissance acoustique pondérée A émise par le complexe moteur-échappement et celle émise par le contact pneumatique-chaussée. S est la vitesse de rotation du moteur, L est la charge moteur sous forme de pourcentage et V, la vitesse du véhicule. Les coefficients de régression sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Coefficients de régression [Oshino & al.].

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

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

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

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

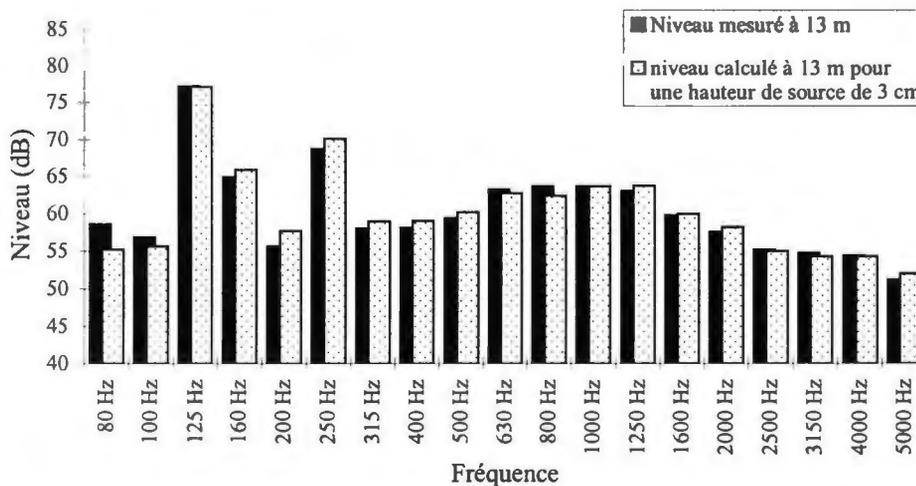


Figure 8 : Comparaison niveau mesuré-niveau calculé pour un véhicule de type Renault Clio en accélération : 50 km/h, 2^{nde}, 3700 tr/min.

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

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

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

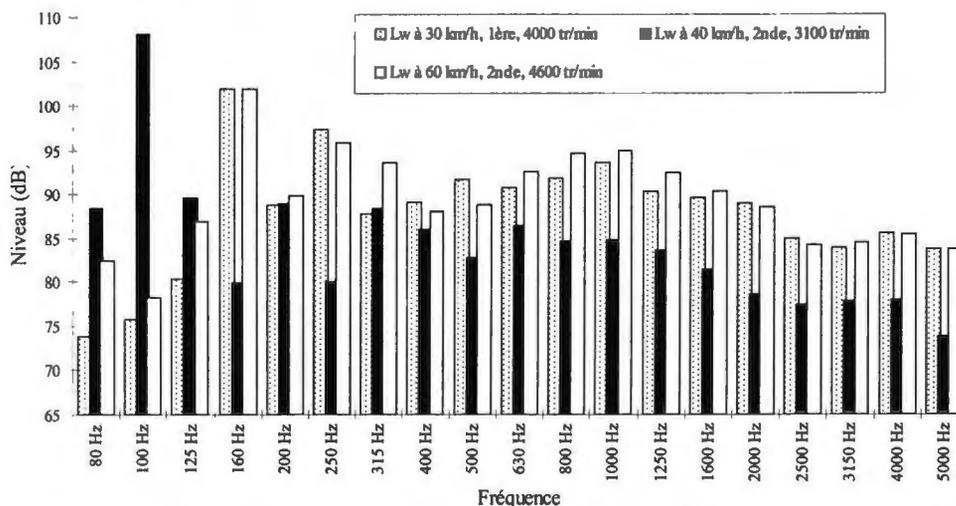


Figure 9 : Spectres de puissance mesurés d'un véhicule de type Renault Clio en accélération.

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

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

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

où : r est le régime moteur en tr/min et n le nombre de cylindres du véhicule considéré. Le facteur 2 est représentatif d'un moteur à quatre temps. En effet, le processus complet de combustion, pour ce type de moteur, déclenche une explosion tous les 2 aller-retour du piston. Cette expression est également utilisée par W. T. Ng & Al. [17].

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

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

Dans la littérature [16], les niveaux déterminés sont des niveaux globaux. Des niveaux tiers d'octave seraient plus appropriés, notamment pour l'approche propagative. A partir de mesures où la vitesse, le régime moteur et l'accélération sont connus, il est possible de déterminer, par régression, les paramètres d'une loi de variation des niveaux sonores. Plusieurs lois ont été examinées. La meilleure corrélation a été obtenue avec la loi de régression suivante :

$$L_w = 10\text{Log}\left(10^{(a_0+a_1S+a_2A)/10} + 10^{(a_3\log V)/10}\right) \quad (7)$$

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.

Tableau 5 : Quelques coefficients de régression a_0 , a_1 , a_2 , a_3 calculés pour le véhicule de type Renault Clio.

	a_0	a_1	a_2	a_3
315 Hz	75.5487	0.0011	4.3526	42.8996
1000 Hz	64.0057	0.0054	3.8413	47.6009
2000 Hz	57.1702	0.0064	1.8092	43.3546
5000 Hz	52.8894	0.0061	2.3229	37.7349

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

Les régressions ont été déterminées pour un échantillon d'environ 80 passages de la Renault Clio 1.4l.

Les mesures ont été effectuées pour des vitesses comprises entre 30 et 80 km/h, des régimes moteur compris entre 2300 et 4600 tr/min et des accélérations allant -0.6 à $+1.9 \text{ m.s}^{-2}$. 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 :

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

Dans ce cas, on applique la régression uniquement sur les raies de fréquence représentatives du bruit moteur (fondamentale et harmoniques). Le paramètre vitesse, conformément à l'intuition, n'a aucune influence sauf pour les harmoniques où une légère dépendance apparaît.

Une comparaison mesure-calcul est représentée figure 10.

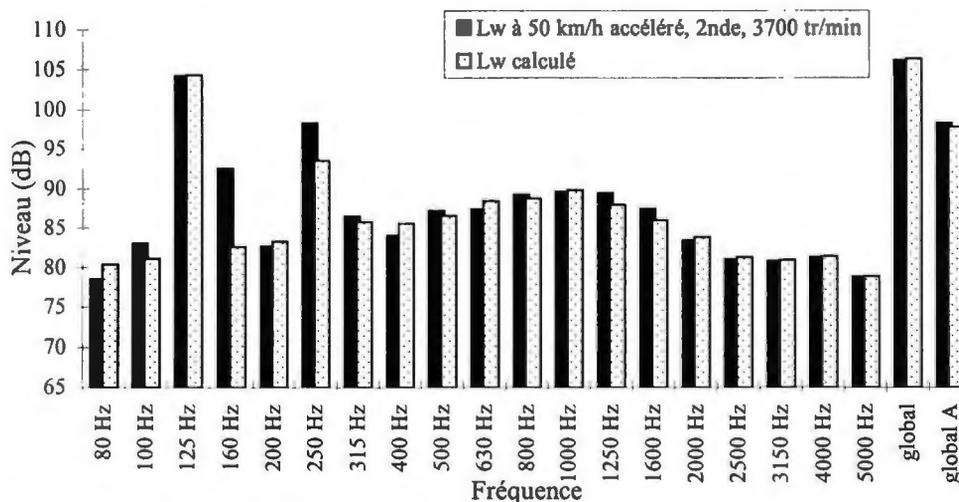


Figure 10 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 50 km/h.

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 mais leur effet, déjà faible, devient négligeable lorsque le niveau global est exprimé avec la pondération A.

Le régime moteur est un paramètre très important dans la détermination des spectres des sources sonores de type routier. Pour l'ensemble de nos mesures nous nous sommes fiés aux indications données par le compte-tours. Connaissant les caractéristiques mécaniques des véhicules (rapports de boîte), il est possible de déterminer des approximations de la relation vitesse - régime moteur. Ne possédant pas les caractéristiques de la Renault Clio, nous avons déterminé cette loi à partir des points expérimentaux recueillis lors des essais. C'est une loi linéaire du même type que celle déterminée dans la littérature par Oshino [16] :

$$S = \frac{c^{te}}{r} V \tag{9}$$

S est exprimé en tr/min, V en km/h, r est le rapport engagé (1^{ère}, 2^{nde}, etc...) et $c^{te} \approx 154$ pour notre véhicule d'essai.

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

Cette modélisation est aussi applicable, moyennant quelques modifications, aux cyclomoteurs d'une cylindrée inférieure à 50 cm³, moyen de transport particulièrement répandu en ville. Ce paragraphe sera consacré à l'étude d'un cyclomoteur de type Peugeot 103 SP2.

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

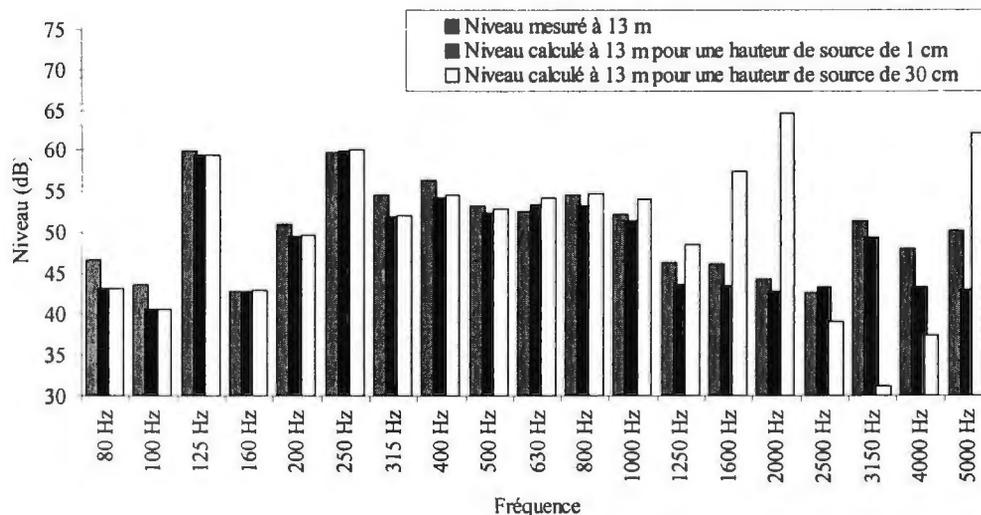


Figure 11 : Comparaison niveau mesuré - niveau calculé pour un Peugeot 103 SP2 à l'arrêt : hauteurs source respectives de 30 et 1 cm.

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

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

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

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

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

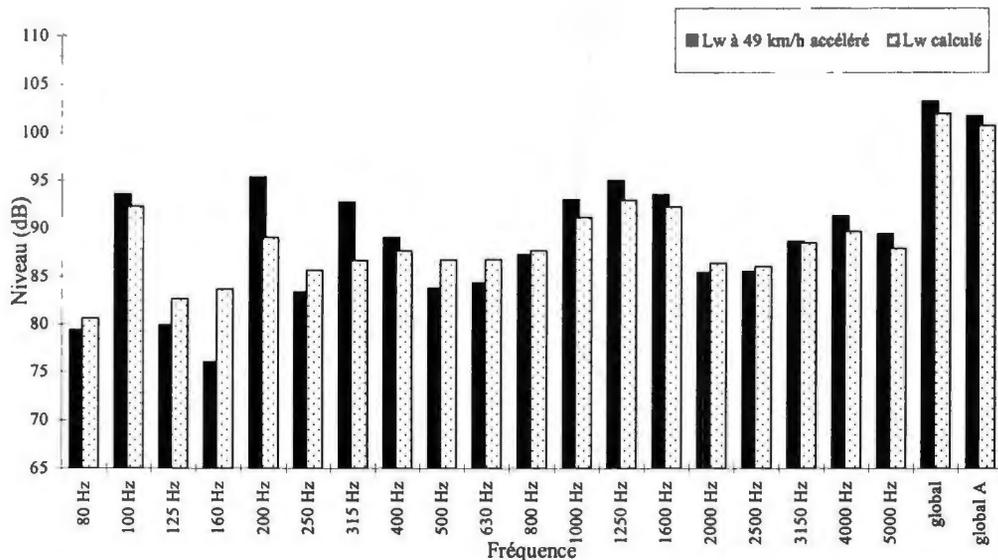


Figure 12 : Comparaison entre la puissance acoustique calculée et mesurée en régime accéléré à 49 km/h.

2.1.5 Introduction des sources sonores en milieu urbain : premières mesures dans une école

Les *sources sonores d'origine "humaine"* deviennent de plus en plus importantes 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.

Elles sont cependant complexes et fortement non-stationnaires. Ceci 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 qui devrait permettre d'affecter à chacun de ces types de source des indicateurs physiques que nous introduirons dans les modèles propagatifs.

Tout d'abord, il faut avouer que la bibliographie concernant la modélisation des sources sonores d'origine humaine n'est pas très étoffée, aucun article d'intérêt majeur n'ayant pu être dégagé. Afin de mieux cerner les comportements 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.

2.1.5.1 Protocole et site de mesure

Le site était constitué d'un bâtiment rectiligne d'une hauteur R+2, à l'intérieur duquel se trouvait les salles de classes, et d'une cour de récréation qui débouchait sur un parc. Un plan des lieux est représenté sur la figure 13.

Ces essais ont consisté à placer 8 microphones autour de la cour de récréation et un dernier au premier étage du bâtiment afin d'enregistrer pendant chaque récréation le bruit des enfants jouant dans la cour. Pour ne pas les perturber et éviter ainsi une modification de leur comportement, les microphones étaient dissimulés dans les

arbustes bordant la cour, sauf le numéro 9 qui était visible mais inaccessible car placé au premier étage. Mis à part quelques cas particuliers, les enfants n'ont pas été influencé par la présence des microphones.

Ces mesures ont duré deux jours afin d'étudier la reproductibilité des mesures. En effet, il était important d'examiner les similitudes et les éventuelles différences des signaux acoustiques issus de plusieurs récréations.

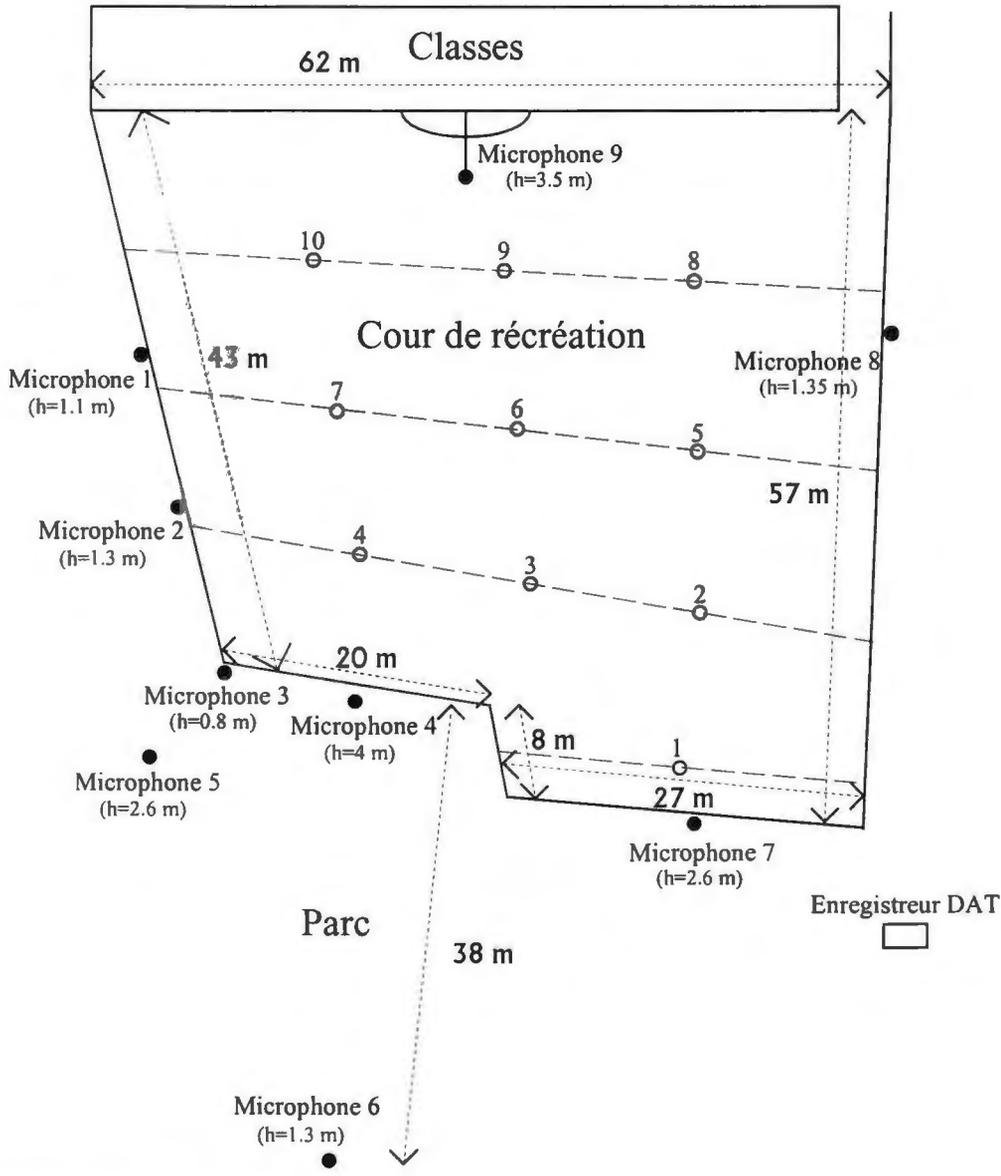


Figure 13 : Plan de la cour de récréation, placement des microphones et des sources sonores fictives (numérotées de 1 à 10).

2.1.5.2 Premiers résultats

Le premier traitement des données consistait à déterminer, pour chaque microphone, le niveau énergétique moyen (L_{eq}) sur toute la période de la récréation (environ 35 minutes), avec une durée élémentaire de 1 seconde.

Sur la figure 14 est représentée une comparaison des niveaux mesurés ($L_{eq,1s}$) entre les diverses récréations, pour un microphone. A noter que le nombre d'enfants présents dans la cour variait selon les récréations entre 200 et 220.

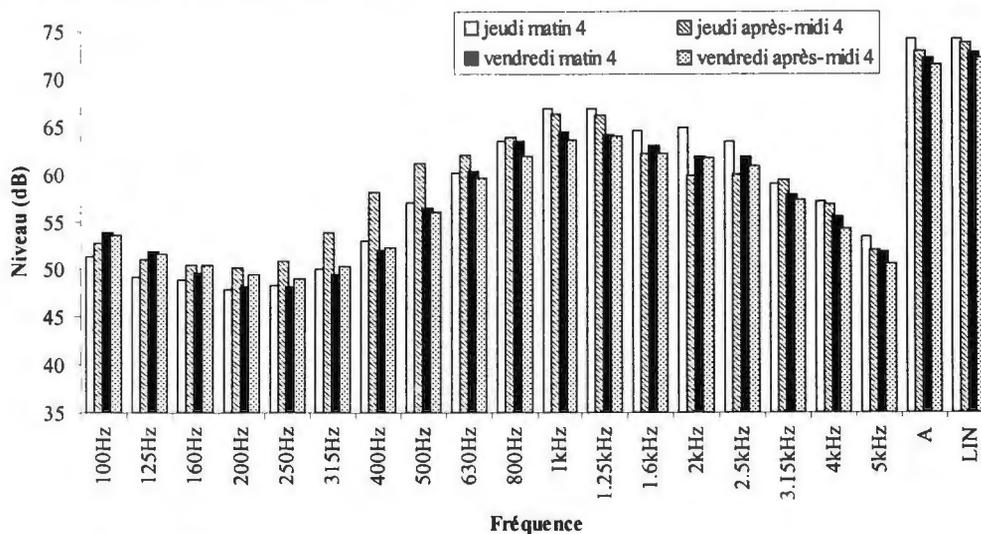


Figure 14 : Comparaison des niveaux mesurés entre les différentes récréations ($L_{eq,1s}$) pour le microphone 4.

Les écarts entre les diverses récréations sont très peu marqués. La reproductibilité obtenue est très satisfaisante.

En comparant, entre eux, les spectres issus des différents microphones, on constate la même forme spectrale. A première vue, seule une différence globale de niveau, liée à l'atténuation géométrique, permet de différencier un spectre d'un autre. La modélisation de ce type de source s'avère ainsi facilitée. La partie la plus énergétique du spectre se trouve répartie entre les tiers d'octave 1 et 2.5 kHz.

2.1.5.3 Modélisation : sources sonores fictives

Les cotes réelles de la cour de récréation ainsi que les positions des microphones ont été mesurées lors des essais. Nous avons ensuite reproduit la configuration des lieux sur papier et placé un ensemble de sources sonores ponctuelles fictives (de 1 à 10), chacune simulant un groupe d'enfants. Ces sources sont réparties suivant le repérage des endroits préférés des enfants à l'intérieur de la cour, effectué lors des essais. Les enfants se trouvant répartis aléatoirement dans la cour, on obtient la répartition des sources sonores fictives représentée figure 13.

Nous allons procéder à l'aide d'une technique similaire à celle utilisée pour les sources mécaniques et notamment pour celles de type routier. Le problème est légèrement plus compliqué puisque nous devons faire intervenir l'impédance du sol qui n'est plus infinie ainsi que les réflexions spéculaires sur le bâtiment. Dans un premier temps, nous allons remonter à la puissance acoustique de la source 1 en supposant que seule cette source intervient dans les signaux recueillis microphone 7. Ceci est vrai en première approche puisque la distance les séparant est très faible. Les signaux issus des autres sources ont une influence quasiment nulle sur les niveaux reçus microphone 7 (voir figure 13). Une puissance acoustique identique est ensuite affectée à chacune des 9 autres sources fictives. Le niveau obtenu à chaque microphone est recalculé en simulant la propagation jusqu'à celui-ci et en sommant l'énergie apportée par toutes

les sources fictives. Les réflexions sur le bâtiment sont prises en compte. L’hypothèse faite au début, à savoir que seule la source 1 intervenait dans le signal recueilli au microphone 7, est ensuite affinée : la puissance acoustique fixée pour toutes les sources est corrigée afin de minimiser les écarts mesure-calcul pour chaque microphone et pour chaque tiers d’octave. Cette nouvelle puissance reste identique pour toutes les sources sonores.

Pour tous ces calculs, il était nécessaire de définir une hauteur pour chacune des sources sonores fictives comme nous l’avons fait pour les sources de type routier. Nous avons choisi 1 m, en rapport avec la taille des enfants. Cette hauteur n’a que peu d’influence sur les résultats.

Des comparaisons entre le signal mesuré et calculé pour les microphones 1 et 9 sont représentées figure 15 et 16. A chaque récepteur une sommation énergétique est effectuée sur les signaux issus des 10 sources fictives et de leur réflexion sur le bâtiment.

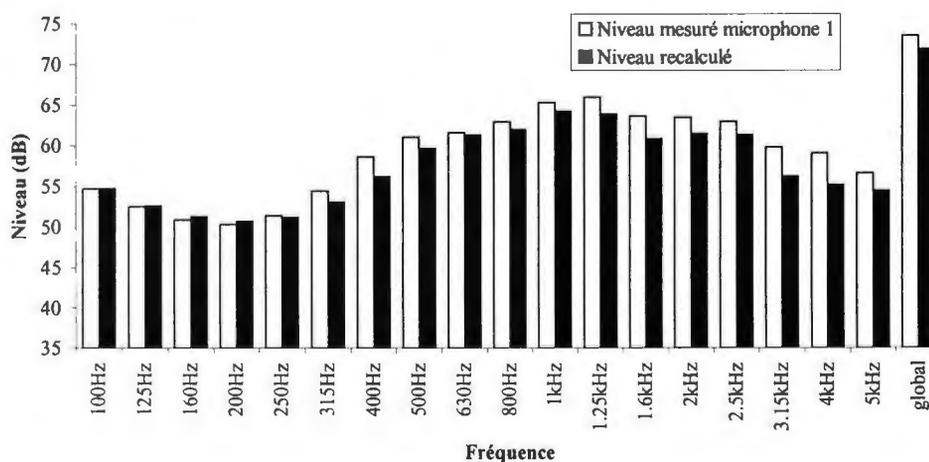


Figure 15 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone 1.

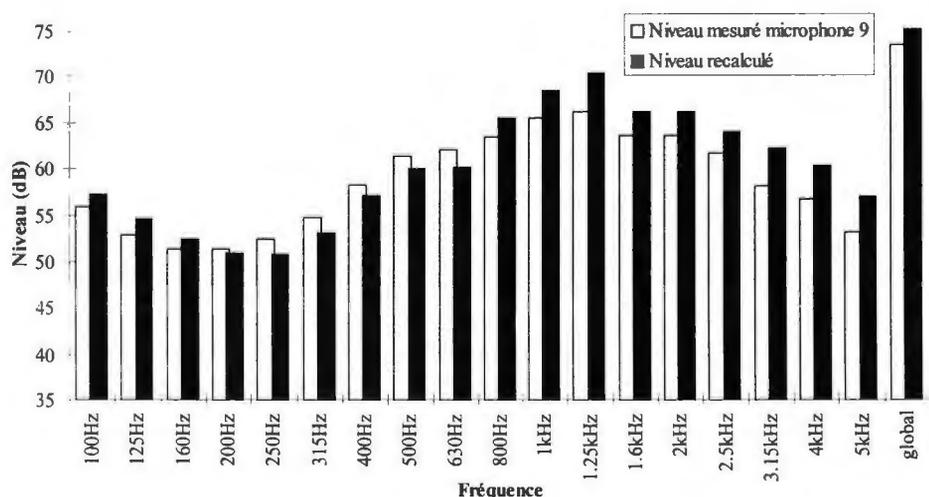


Figure 16 : Comparaison des niveaux mesurés et calculés au microphone 9.

Les calculs coïncident assez bien avec les mesures. Les écarts obtenus pour le microphone 9 sont dus à des effets non pris en compte dans le modèle. Le bâtiment,

sur lequel nous avons fixé le microphone 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 17).



Figure 17 : Emplacement du microphone 9.

Connaissant maintenant le spectre de puissance acoustique d'un groupe de 20 enfants, on peut en déduire le spectre moyen pour un seul enfant.

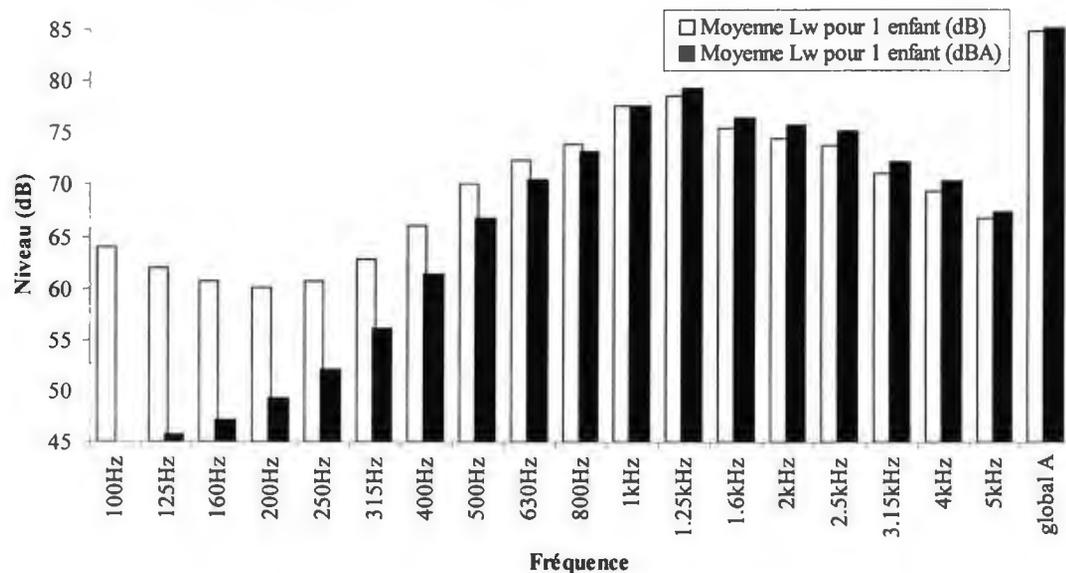


Figure 18 : Puissance acoustique calculée pour un enfant.

2.1.6 Conclusion et perspectives

Une méthode d'estimation de la hauteur de source sonore équivalente a été mise au point. C'est une méthode simple car elle n'utilise que deux microphones. Les diverses validations effectuées montrent sa fiabilité. Les hauteurs trouvées sont toujours très proches du sol, que ce soit en phase stabilisée, accélérée ou décélérée. Ceci s'explique bien dans le cas d'un véhicule léger mais plus difficilement pour un cyclomoteur ou une motocyclette. Des essais complémentaires utilisant une technique intensimétrique sont prévus pour déterminer la directivité de telles sources.

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

Concernant les sources d'origine humaine, des essais dans la cour de récréation d'une école primaire ont fourni des résultats intéressants. La cour de récréation peut être simulée par un ensemble de sources ponctuelles, chacune symbolisant un groupe d'enfants. Ces sources sont réparties à différents endroits de la cour d'après quelques observations. A l'aide d'une technique similaire à celle utilisée pour les sources mécaniques et notamment pour celles de type routier, la propagation est simulée jusqu'aux différents microphones; le but étant de faire correspondre les calculs aux niveaux effectivement mesurés en ces points. Une bonne adéquation entre calculs et mesures a été obtenue.

Une autre campagne de mesures est prévue prochainement dans une seconde école primaire à Rezé afin de valider les résultats précédents.

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

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

2.1.7 Bibliographie

- [1] Picaut J., Modélisation de la propagation du son en milieu urbain par un processus de diffusion, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées (à paraître).

- [2] Guide du bruit des transports terrestres (1980), Prévision des niveaux sonores, CETUR, 317 pages.
- [3] Hamet J. F. (1996)-1, Bruit de trafic routier, Abaques d'émission du modèle de prévision allemand : RLS 90. Rapport MMA 9609, 41 pages.
- [4] 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.
- [5] Lelong J. (1997), Influence des véhicules lourds sur un bruit de trafic interurbain. Tests de sensibilité PL/TR, INRETS, Rapport MMA 9701, 16 pages.
- [6] Favre B. M. (1983), Noise emission of road vehicles : evaluation of some simple models, J. Acoust. Soc. Am. 91(4), 571-582.
- [7] Glegg S. A. L. & Young 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.
- [8] 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.
- [9] Coulson R. 1996. Method for measuring vehicle noise source height and subsurface spectra, Transportation Research Record 1559, 8-13.
- [10] Delany M. E. & Bazley E. N. 1970. Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Appl. Acoust. 3, 105-116.
- [11] Bérengier M. & Hamet J. F. 1997. Etude acoustique des milieux poreux; application aux revêtements drainants, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées 212 Nov.-Déc. 97 Réf 4141, 65-74.
- [12] Rasmussen K. B. (1982), Propagation of road traffic noise over level terrain, Journal of Sound and Vibration 82(1), 51-61.
- [13] Norme AFNOR S31-119, (1993), Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées.
- [14] 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. (à paraître)
- [15] 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. (à paraître)
- [16] Oshino Y. & Tachibana H. (1993), Prediction of road traffic noise taking account of transient running conditions of vehicles, Inter-noise 93, 629-632.
- [17] 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.

2.1.8 Publications

Péneau J. P., Woloszyn P., Bérengier M., Gaulin D., Picaut J., Hardy J., Simon L., Tixier N., Augoyard J. F., Delétre J. J., Polack J. D.. Actes des journées "Ville et acoustique": "Vers un logiciel des ambiances sonores urbaines". Paris, 5 et 6 Janvier 1998 (à paraître)

Hamet J. F., Pallas M. A., Gaulin D. & Bérengier M. 1998. Acoustic modeling of road vehicles for traffic noise predictions : determination of the source heights. Proceedings of the 16th ICA/135th ASA-Seattle, J. Acoust. Soc. Am. (à paraître)

2.2 Modélisation de la propagation du son en milieu urbain par un processus de diffusion [18]

Judicaël Picaut

Responsables scientifiques : Jean-Dominique Polack (Professeur à Paris VI), Laurent Simon (Maître de Conférences à l'Université du Maine) et Jean Hardy (Chargé de Recherche CNRS au LAUM)

2.2.1 Introduction

Un des objectifs de notre travail a été de proposer une modélisation originale de la propagation du son en milieu urbain qui soit bien adaptée à des zones fortement construites (notamment de type centre-ville) et utilisable quelque soit le type des sources sonores (mécaniques et humaines). D'autre part, en vue de l'intégration de ce travail dans un projet plus global de simulation d'autres phénomènes physiques (thermique, aérodynamique, d'éclairement et d'ensoleillement...), il a été fait le choix de développer un modèle qui soit compatible avec la modélisation d'autres ambiances. En particulier, la simulation de la propagation du son en milieu urbain, à l'aide d'une équation de diffusion (comme en thermique), a semblé une piste intéressante. Cette idée originale est développée ci-dessous.

La complexité de la modélisation

La modélisation de la propagation du son en milieu urbain peut être envisagée à deux échelles. A l'échelle d'une rue (échelle microscopique), les premiers travaux ont consisté à modéliser la rue par deux façades parallèles partiellement absorbantes et un sol totalement réfléchissant, puis à appliquer ou à adapter la théorie des sources images [19 - 22].

Les écarts observés entre ces modèles simples et les données expérimentales ont été attribués à une absence de prise en compte des multiples réflexions et diffractions par les irrégularités des façades. En d'autres termes, en plus du son direct (rayonnement source-récepteur) et des premières réflexions (réflexions d'ordre 1,2...), il existe un champ diffus alimenté par ces multiples réflexions et diffractions, qui est fonction de la dimension de la rue et de la diffusivité des façades (Figure 19).

A la différence des modèles classiques de l'acoustique, il est envisageable de considérer que ce champ diffus ne se propage pas mais se «répand» dans la rue (comme pour la conduction de la chaleur), d'où cette idée originale de diffusion de l'énergie sonore.

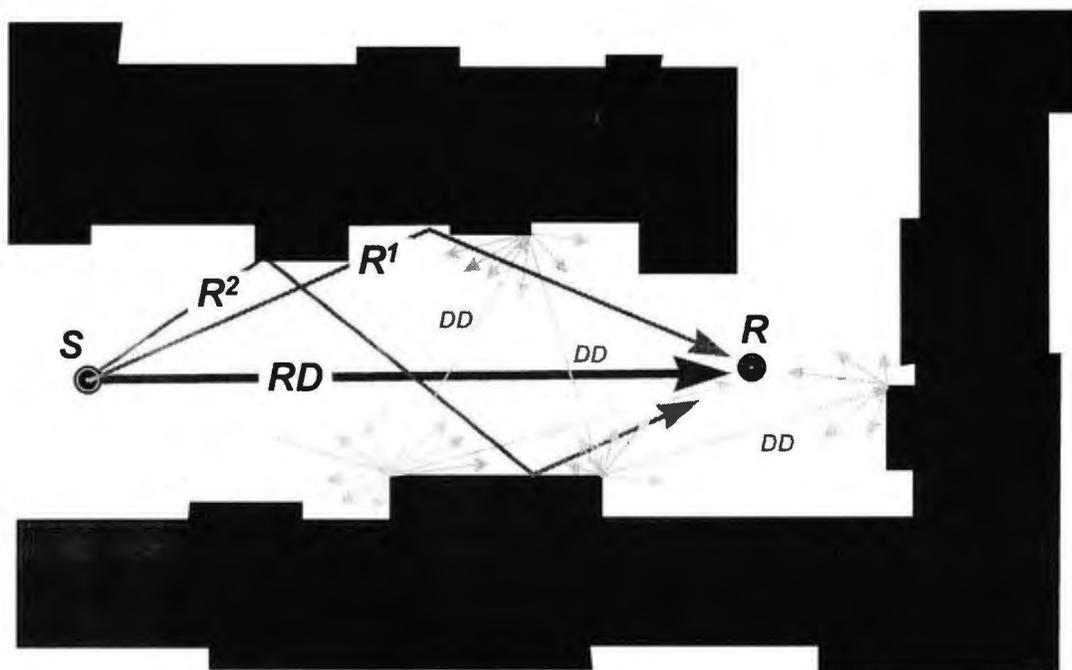


Figure 19 : Représentation schématique des multiples réflexions et diffractions dans une rue.

- RD : Rayonnement direct.
- R¹ : réflexion d'ordre 1.
- R² : réflexion d'ordre 2.
- DD : Diffraction et diffusion.

A l'échelle d'un quartier (échelle macroscopique), compte tenu de la morphologie complexe du tissu urbain, il serait illusoire de vouloir décrire exactement la propagation du son. Les recherches à cette échelle se sont donc orientées vers une description statistique de la propagation. Considérant les bâtiments comme des objets diffractants, certains auteurs [23- 26] ont supposé que la propagation peut se ramener, sous certaines conditions, à un processus de diffusion comparable à la diffusion de particules dans un milieu diffusant (gaz de Lorentz par exemple). Dans ces modèles, les bâtiments sont disposés aléatoirement et détachés les uns des autres, ce qui en limite le champ d'application à des zones périurbaines constituées de grands blocs d'habitations isolés.

A l'issue de cette rapide bibliographie (une description plus complète est proposée dans [18]), l'idée originale qui consiste à utiliser la théorie mathématique de la diffusion pour décrire la propagation du son en milieu urbain, semble intéressante. Bien entendu, cela pose un certain nombre d'interrogations : Comment passer d'un processus de propagation à un processus de diffusion ? Quels sont les paramètres importants de cette diffusion ? Quel sera le domaine de validité d'une telle modélisation ?...

Dans les deux paragraphes qui suivent, nous tentons de répondre à ces questions et proposons deux modèles de diffusion du son en milieu urbain : à l'échelle d'un quartier (modèle 2D) et à l'échelle d'une rue (modèle 3D). Le premier de ces deux modèles est le résultat de simulations numériques de la propagation de particules sonores (méthode générique des rayons sonores) associé à un traitement statistique des résultats. Le second résulte d'une étude théorique sur la modélisation des champs sonores diffus dans une rue, et confirme l'intuition du premier modèle.

2.2.2 Diffusion à l'échelle d'un quartier : modèle macroscopique

Dans cette partie, nous présentons des résultats de simulations numériques qui ont été réalisées pour décrire statistiquement la propagation du son à l'échelle d'un quartier. Ces simulations sont basées sur le concept des particules sonores souvent utilisé en acoustique des salles : une source sonore émet dans toutes les directions des particules porteuses d'une énergie sonore, se déplaçant en ligne droite à vitesse constante. A chaque collision avec un objet (un mur par exemple), l'énergie sonore est partiellement absorbée et la particule est réfléchiée dans une autre direction suivant des lois de réflexion bien déterminées. Le suivi simultané d'un grand nombre de particules permet de définir les propriétés statistiques du milieu de propagation (dans notre cas, un milieu urbain dense).

2.2.2.1 L'espace urbain virtuel de simulation

La réalisation de notre espace urbain virtuel a suivi deux règles de construction : (1) de façon à minimiser le nombre de paramètres nécessaires pour définir complètement le milieu de propagation, une disposition périodique de bâtiments a été retenue ; (2) pour éviter qu'une particule sonore puisse se perdre à l'infini sans subir de collisions (ce serait le cas si nous avions considéré des avenues) et ainsi éviter toute divergence numérique, le domaine de propagation est fixé à horizon fini. Le respect simultané de ces deux règles ne pouvant pas être réalisé avec des bâtiments rectangulaires, notre choix s'est finalement porté vers un arrangement périodique de bâtiments hexagonaux (Figure 20).

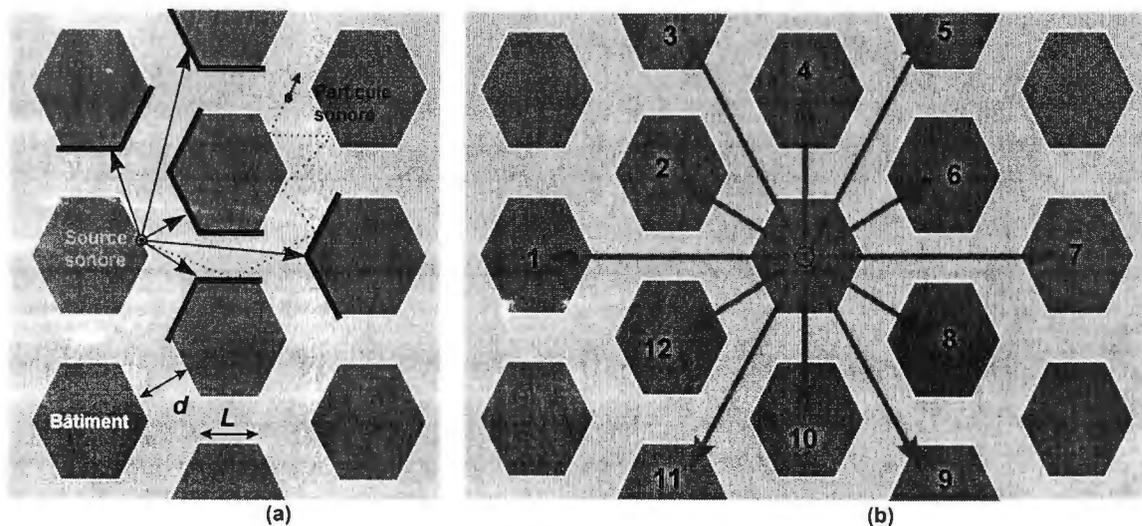


Figure 20 : Espace urbain virtuel : réseau de bâtiments hexagonaux.

- (a) Depuis une façade, le nombre de bâtiments pouvant être atteint par une particule sonore est volontairement limité à 5 (11 façades cibles).
- (b) Au total, par symétrie de rotation, les 12 bâtiments les plus proches du bâtiment d'émission sont considérés.

Même si cette disposition n'a rien de réaliste (*a priori*), elle a le mérite de proposer des rues et des façades parallèles, de présenter des intersections ainsi que des

propriétés de symétrie très intéressantes. Outre la périodicité de la disposition, les axes de symétrie et les invariances par rotation d'angle $\pi/3$ du motif permettent de réduire d'un facteur 12 la complexité de la simulation. De plus, pour simplifier encore les traitements, nous considérons que depuis un point localisé sur une façade d'un des bâtiments, une particule sonore ne pourra atteindre que les 5 bâtiments les plus proches (Figure 20). Par symétrie, un bâtiment en «voit» donc au total 12 autres. Ainsi, connaissant le point de départ de la particule sonore et sa direction incidente, le point de collision de cette même particule avec une autre façade est aisément déterminable à partir d'un nombre limité de fonctions continues.

2.2.2.2 Simulation de la réflexion du son par une façade

De manière simple, quand les dimensions des irrégularités de surface sont petites par rapport à la longueur d'onde, les façades se comportent comme des miroirs réfléchissants et l'onde sonore est réfléchiée spéculairement. Inversement, lorsque les irrégularités sont de la taille de la longueur d'onde incidente, voire plus grande, l'onde sonore est réfléchiée dans toutes les directions avec des amplitudes différentes (phénomènes de diffusion et de diffraction acoustique, Figure 21).

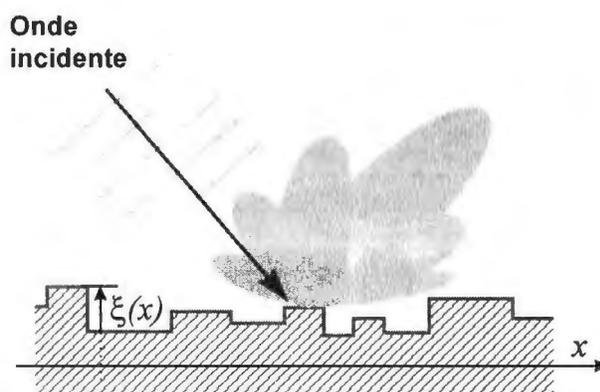


Figure 21 : Diffraction du son par une surface irrégulière caractérisée par la taille $\xi(x)$ de ses irrégularités.

La plupart des modèles de réflexion sont pour le moment issus des travaux en acoustique des salles, bien plus nombreux sur ce sujet. Ainsi, Lyon [27] et Davies [28] ont supposé qu'une partie de l'onde sonore est réfléchiée dans la direction spéculaire tandis que le reste est renvoyé uniformément dans toutes les directions (réflexion uniforme, Figure 22a). Makarewicz [29], Wu [30] et Heutschi [31] ont supposé quant à eux que l'ensemble de l'énergie est réfléchiée suivant la Loi de Lambert en $\cos\theta$, θ désignant l'angle de réflexion (Figure 22b). Néanmoins sans *a priori* sur ce qu'il se passe réellement, nous avons choisi de tester un certain nombre de lois, excepté la loi de réflexion spéculaire qui, pour ce type de réseau, abouti à des comportements très spéciaux [32] [33]. Nous avons utilisé notamment une loi de réflexion semi-diffuse (22c), proposée par Hidaka [34] pour l'acoustique des salles, dont l'intérêt est de pouvoir prendre en compte analytiquement et simplement la taille et la disposition des irrégularités de façades. Cette dernière loi est paramétrée par trois termes : la fréquence de l'onde sonore, la taille $\xi(x)$ (dans le plan normal à la façade) des irrégularités de surface et leur longueur de corrélation (dans le plan de la façade). En pratique, nous avons supposé que les irrégularités sont disposées aléatoirement et que

leur taille (dans le plan normal à la façade) suit une distribution Gaussienne de variance σ^2 , avec une longueur de corrélation T .

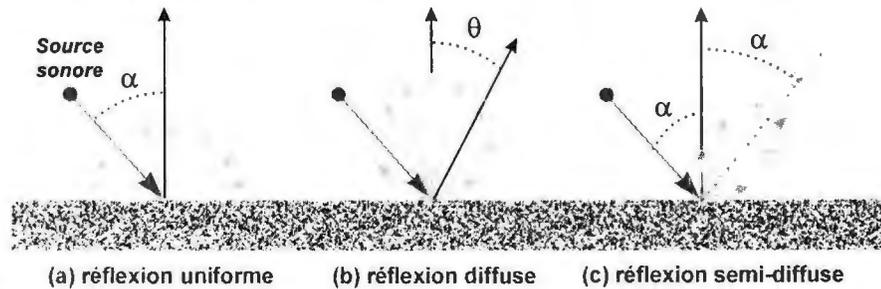


Figure 22 : Lois de réflexion utilisées pour la simulation de la réflexion du son par des façades de bâtiments.

2.2.2.3 La procédure des simulations numériques

La source sonore étant localisée en un point quelconque sur une façade, l'angle d'émission des particules sonores est choisi aléatoirement ❶. Le point de collision de cette particule avec la façade d'un autre bâtiment est calculé analytiquement à partir d'un ensemble de fonctions analytiques paramétrées par la position du bâtiment d'émission, par la position de la façade d'émission sur ce même bâtiment et par l'angle d'émission ❷. Connaissant l'angle d'incidence de cette particule sur la façade de collision, l'angle de réflexion est choisie aléatoirement, par la méthode de réjection [38], suivant la loi de réflexion retenue ❸. La particule sonore est ensuite émise dans cette nouvelle direction ❹, puis le processus recommence comme en ❷... En pratique, pour chacune des simulations, nous avons uniquement considérés 50 particules sonores, chacune d'entre elles subissant 50 réflexions, d'où un total 2500 collisions par simulation. Ce choix offre un bon compromis entre le temps de calcul et la qualité « statistique » des résultats.

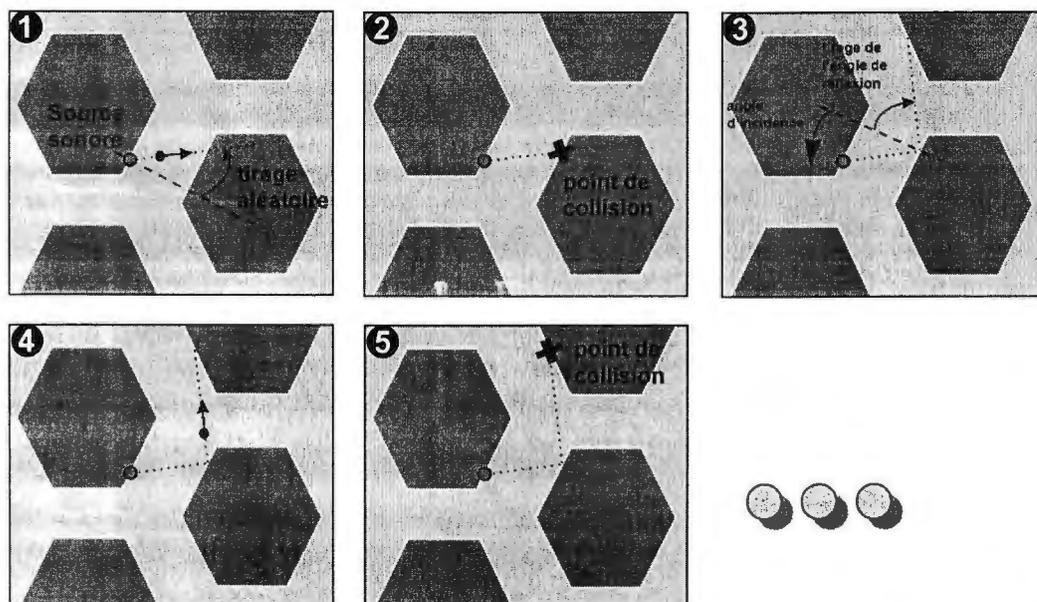


Figure 23 : Description de la procédure utilisée pour les simulations de propagation de particules sonores dans le milieu urbain virtuel :

- ❶ Tirage aléatoire de l'angle d'émission. ❷ Recherche du point de collision. ❸ Tirage aléatoire de l'angle de réflexion suivant la loi de réflexion choisie. ❹ Déplacement de la particule dans la direction de réflexion. ❺ Recherche de nouveau point de collision...

2.2.2.4 Le traitement des données et la mise en évidence de la diffusion

La position de chacune des particules étant connue à chaque collision, il est possible de connaître exactement l'évolution de la distance $R(t)$ source-récepteur au cours du temps t (Figure 24a). En pratique, nous nous sommes intéressés au carré de cette quantité soit $R^2(t)$ et plus exactement à la moyenne de cette quantité sur l'ensemble des particules sonores, notée $\langle R^2(t) \rangle$. Ainsi, nous avons pu constater, que quel que soit la loi de réflexion choisie, l'évolution de cette quantité au cours du temps est approximativement linéaire (Figure 24b). En d'autres termes, nous pouvons écrire en première approximation que :

$$\langle R^2(t) \rangle = 4Dt. \quad (1)$$

Ce résultat statistique est typique d'un processus de diffusion à deux dimensions, qui caractérise en particulier la limite d'un mouvement Brownien [36]. D définit le coefficient de diffusion du milieu. Utilisant les développements classique de la théorie mathématique de la diffusion, nous pouvons ainsi définir la probabilité $W(R,t)$ qu'une particule sonore soit à la position R dans le réseau, au temps t , par :

$$W(R,t) = \frac{1}{4\pi Dt} \exp\left(-\frac{R^2}{4Dt}\right) \quad (2)$$

qui est solution de l'équation de diffusion bien connue, à deux dimensions :

$$\frac{\partial W}{\partial t} - D \Delta W = 0 \quad (3)$$

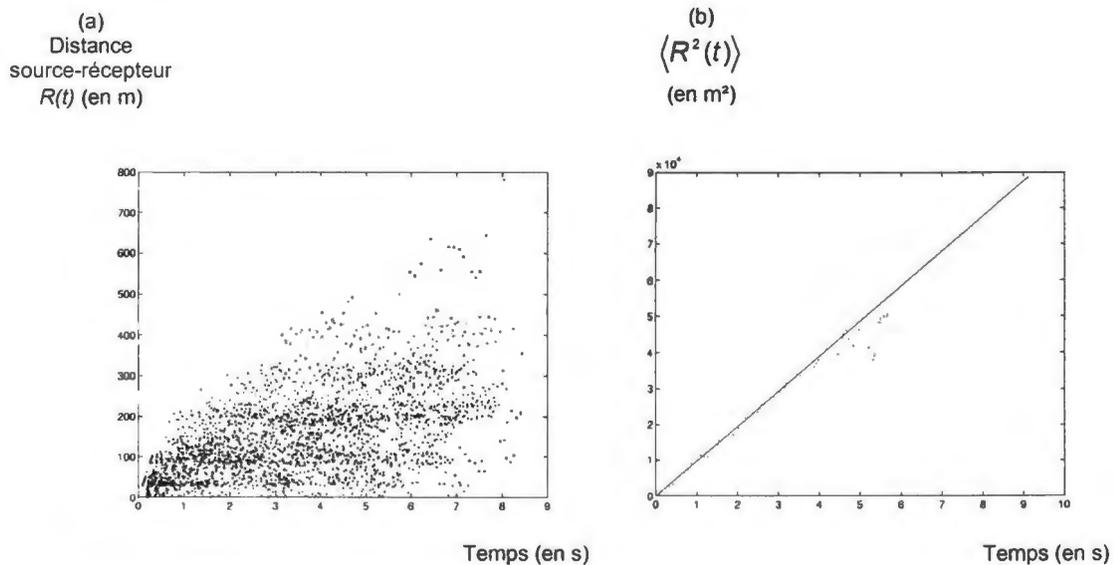


Figure 24 : Propagation d'une particule sonore dans le réseau de bâtiments hexagonaux ($L=113m$, $d=29.4m$).

- (a) Distance source-particules au cours du temps (à chaque collision)
- (b) Evolution au cours du temps (en s) de la moyenne des carrés de la distance source-récepteur (...) et approximation linéaire (—) avec $D=2431m^2/s$.

Le coefficient de diffusion dépend à la fois de la loi de réflexion fixée et des paramètres du réseau (largeur des rues et longueur des façades). Ainsi, lorsque la réflexion uniforme est choisie (Figure 25a) nous avons observé que la valeur (estimée) du coefficient de diffusion du réseau est très proche de la valeur définie dans la théorie des marches aléatoires par :

$$D_{rw} = \frac{n \langle r^2 \rangle}{4}, \tag{4}$$

où n et $\langle r^2 \rangle$ désigne respectivement le nombre de collisions par unité de temps et la valeur moyenne des carrés des déplacements entre deux collisions. D'autre part, la Figure 25 montre que l'évolution de D avec la largeur de rue d est approximativement linéaire, quelque soit la loi de réflexion choisie. Dans les cas les moins favorables la différence est inférieure à 30%. La diffusivité du réseau est donc d'autant plus grande (les particules s'éloignent d'autant plus rapidement de la source) que la largeur de rue est grande. C'est un résultat auquel nous pouvions bien entendu nous attendre.

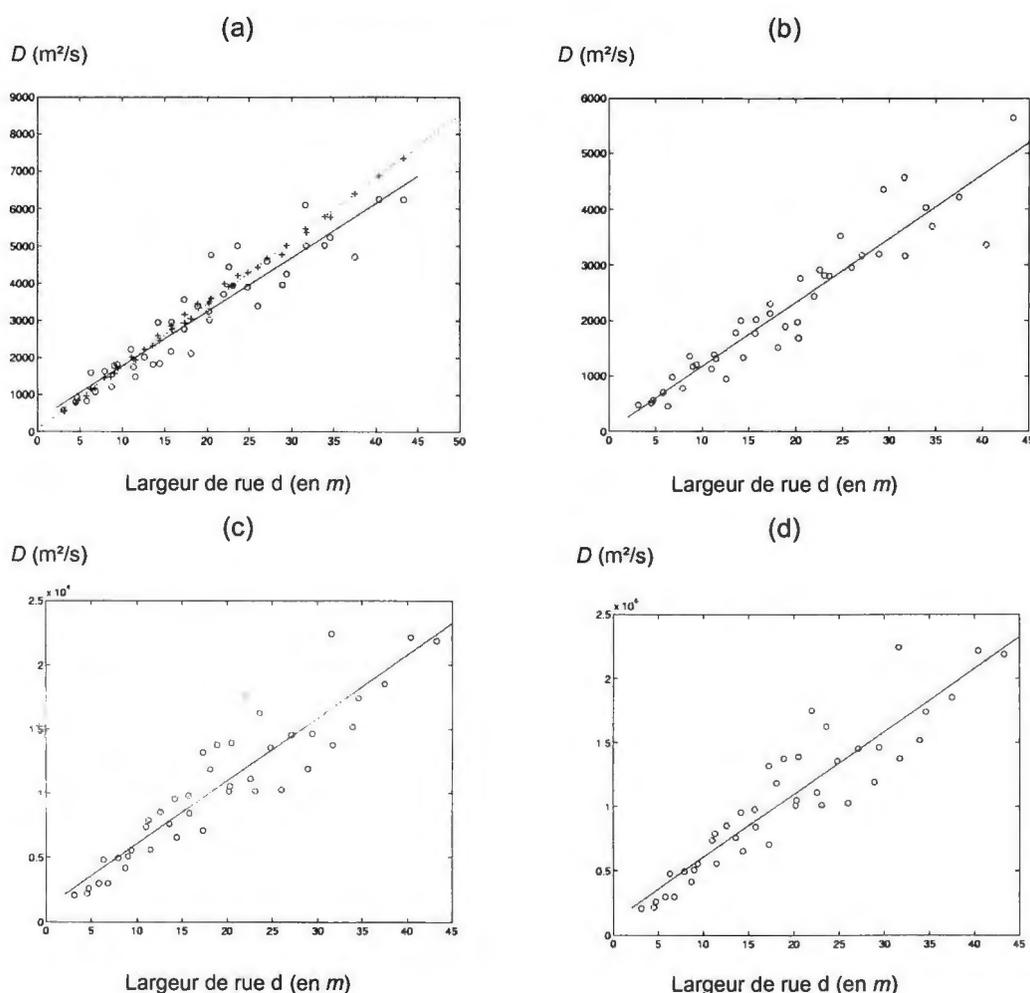


Figure 25 : Evolution des coefficients de diffusion (en m²/s) 'o' et '___' approximation linéaire en fonction de la largeur de rue d (en m), pour différentes lois de réflexion :

- (a) Réflexion uniforme (sur cette figure, la valeur théorique de D définie à la relation (4) et son évolution linéaire '....' avec d sont également représentées) ;
- (b) Réflexion diffuse (Loi de Lambert) ;
- (c) Réflexion semi-diffuse à 1000Hz avec $T/\sigma = 5$;
- (d) Réflexion semi-diffuse à 1000Hz avec $T/\sigma = 15$.

2.2.2.5 Généralisation du modèle de diffusion à un milieu urbain quelconque

Ces simulations ont mis en évidence que la présence des irrégularités de façades est suffisante pour générer un processus de diffusion, même dans un réseau régulier. Ce résultat permet donc d'envisager la modélisation de la propagation du son dans un milieu urbain également sous la forme d'un processus de diffusion (la disposition «plus aléatoire» des bâtiments dans une configuration urbaine réelle, ne fait que rajouter un degré de diffusion supplémentaire).

Ainsi, considérant une zone urbaine construite (Figure 26), caractérisée par une distribution de sources sonores (qui peuvent être ponctuelles, fixes ou mobiles, linéiques...), la densité d'énergie sonore $w(r,t)$ au point r (dans une rue) et au temps t , vérifie en première approximation l'équation de diffusion suivante :

$$\frac{\partial w}{\partial t} - D \Delta w + \eta w = S(r,t). \quad (5)$$

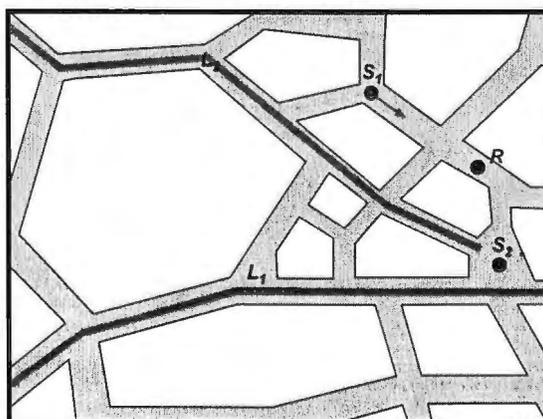
Cette équation est la forme généralisée de (3), dans laquelle nous avons introduit deux termes supplémentaires : un terme de source $S(r,t)$ et le coefficient η prenant en compte les phénomènes d'absorption (par unité de distance) causés par l'atténuation atmosphérique, l'absorption partielle par la chaussée et les façades, ainsi que l'absorption totale par les ouvertures. D'un point de vue pratique, la solution de cette équation peut être déterminée par le calcul de la fonction de Green [37].

La limite principale de ce modèle réside actuellement dans l'absence d'informations sur les coefficients D et η . Une première étude théorique [cf. paragraphe 2.3] a déjà permis de relier le coefficient D au degré de fractalité du tissu urbain mais ce travail nécessite encore de nombreux développements. Une autre procédure, plus empirique mais qu'il est de toute façon nécessaire d'entreprendre pour valider ces études théoriques, est la mesure *in situ* de ces deux termes. Même s'il existe une infinité de configurations urbaines, il est possible de procéder uniquement à quelques mesures dans des situations types (Figure 27) (issues d'une classification des tissus urbains à déterminer). Ce travail est d'ailleurs actuellement en cours au sein des travaux de la Fédération de Recherche.

Même si la précision d'un tel modèle n'est pas encore déterminée, à terme son intérêt pourrait résider dans sa facilité de prédiction d'un niveau sonore ambiant d'un quartier (*coloration* sonore), résultant d'une multitude de sources, à partir seulement de quelques valeurs moyennes du tissu urbain (hauteur de bâtiments, largeur de rue...).

Figure 26 : Généralisation du modèle de diffusion à un milieu urbain complexe.

S1 : source ponctuelle en déplacement
L1, L2 : sources linéiques (flux de circulation)
R : Point d'observation



Le modèle de diffusion pourrait permettre à terme d'estimer le niveau sonore en un point d'observation R , créé par un environnement multi-sources. S_1 source ponctuelle en déplacement (véhicule), S_2 source ponctuelle immobile (fontaine), L_1 et L_2 sources linéiques (flux de circulation sur un boulevard...).

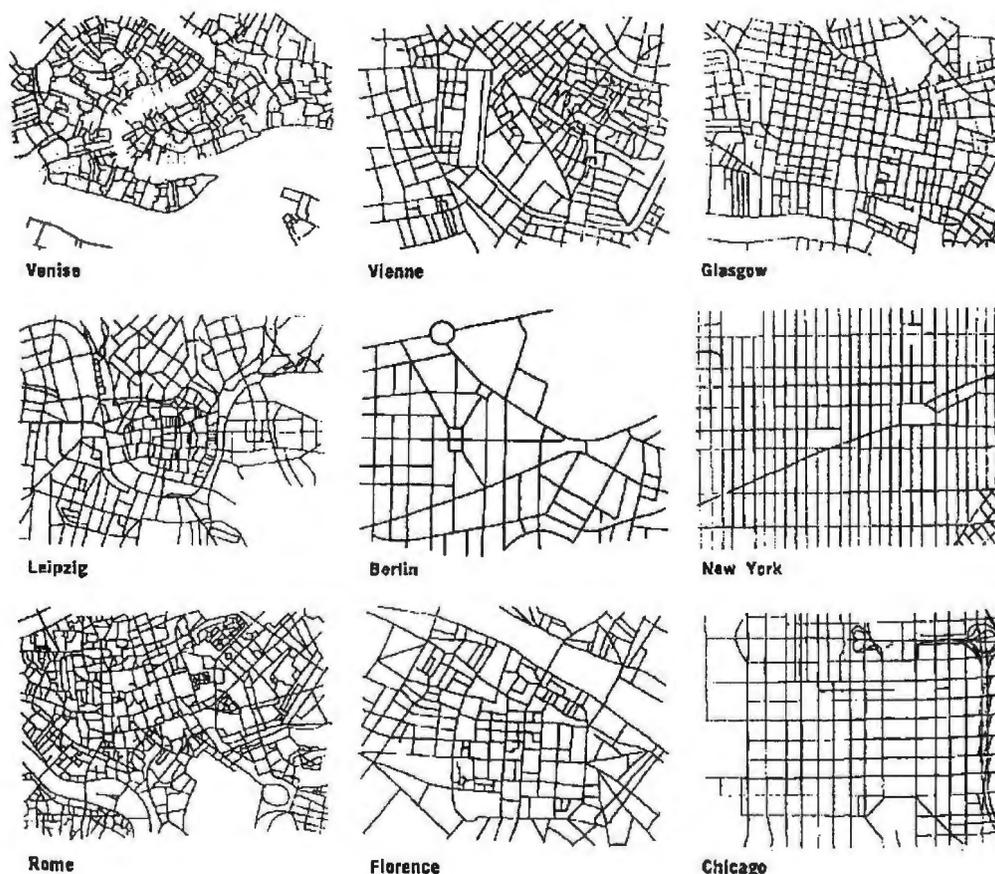


Figure 27 : Exemples de quelques typologies de réseaux urbains.

[d'après D. Engel, R. Jagals et U.T. Jagals, «Analyse structurale de l'Espace urbain», *L'Architecture d'aujourd'hui* 153, 48-53, décembre 1970-janvier 1971].

2.2.3 Diffusion dans une rue : modèle microscopique

Parallèlement à cette étude sur la diffusion sonore à l'échelle d'un quartier, un autre travail a été entrepris pour modéliser la propagation sonore à l'échelle d'une rue. Ce nouveau modèle est basé sur une idée originale développée dans le cadre de l'acoustique des salles pour modéliser les champs sonores diffus [38].

2.2.3.1 Le modèle de diffusion

Le concept des particules sonores est là encore utilisé, mais cette fois d'un point de vue théorique et à l'échelle d'une rue. Dans une salle, comme dans une rue, à chaque collision avec un mur, la particule subit à la fois une perte d'énergie qui est fonction du coefficient d'absorption de l'obstacle et à la fois un changement de direction qui dépend de la loi de réflexion imposée (Figure 28). Ce processus est donc équivalent à

un processus de diffusion en physique du solide, comme par exemple la diffusion de la lumière dans le brouillard.

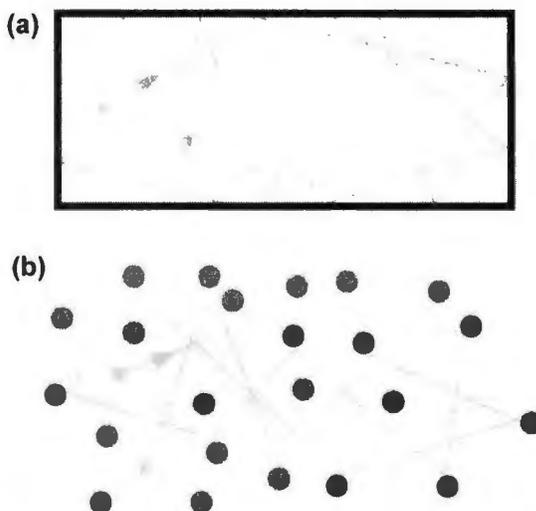


Figure 28 : Analogie entre le déplacement d'une particule sonore dans une salle (a) et le déplacement d'une particule élémentaire dans un milieu constitué d'objets diffusants (b).

Posant certaines hypothèses, il est possible de pousser l'analogie encore plus loin pour modéliser le phénomène acoustique avec des lois issues de la physique du solide. Ainsi, pour une salle constituées de parois diffuses, nous avons pu montrer deux résultats fondamentaux [38] :

- (R1) il existe un flux d'énergie proportionnel au gradient d'énergie sonore ; cela se traduit par un «déplacement» d'énergie des zones les plus énergétiques vers les moins énergétiques.
- (R2) la densité d'énergie sonore dans une salle diffuse est solution d'une équation de diffusion.

Ce modèle permet d'aller au delà de la théorie classique de la réverbération, initiée par Sabine. Notamment, cette modélisation permet de vérifier une observation souvent faite par les spécialistes de l'acoustique des salles, mais qui n'avait pas encore de justification théorique satisfaisante : le champ sonore et le temps de réverbération ne sont pas uniformes dans une salle, mais dépendent de la position de la source et de la répartition de l'absorption sur les parois.

2.2.3.2 Application à une rue parallélépipédique

En nous basant sur ces travaux et en supposant que la présence des irrégularités de surface des façades bordant une rue est suffisante pour créer un processus de diffusion, nous pouvons écrire que la densité d'énergie sonore w dans la rue est solution d'une équation de diffusion de la forme :

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \text{div}(\mathbf{D} \text{grad } w) = 0, \quad (6)$$

où \mathbf{D} désigne là encore un coefficient de diffusion sous la forme d'un tenseur de rang 2.

Cette tensorisation résulte d'une part de la prise en compte des trois dimensions de l'espace et d'autre part, de la non uniformité de la diffusion dans la rue (toutes les surfaces de la rue (chaussée, façades) n'ont pas la même diffusivité). Néanmoins, pour une rue parallélépipédique, pour des raisons de symétrie et lorsque les axes sont bien choisis (Figure), seuls les éléments diagonaux D_x , D_y et D_z de \mathbf{D} subsistent :

$$\frac{\partial w}{\partial t} - D_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - D_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0. \quad (7)$$

A la différence de l'équation (5), les termes d'absorption et de sources sont introduits cette fois-ci directement à travers les conditions aux limites et conditions initiales choisies pour la résolution de cette équation. Ainsi l'absorption par les façades latérales (caractérisées chacune par les coefficients d'absorption en énergie α_1 et α_2) est prise en compte par l'intermédiaire des coefficients d'échange [39] :

$$h_1 = \frac{c\alpha_1}{4} \quad \text{et} \quad h_2 = \frac{c\alpha_2}{4}, \quad (8)$$

où c désigne la célérité du son.

La chaussée est supposée ici parfaitement réfléchissante, bien que la prise en compte de son absorption soit possible. En pratique, cette absorption est négligeable en comparaison de l'absorption par les façades et par les ouvertures. Aux deux extrémités de la rue et à la «limite du toit» nous imposons que la densité d'énergie est nulle. Cette dernière hypothèse suppose que la rue est assez haute et longue pour que l'énergie sonore à ces limites soit suffisamment faible pour être considérée comme nulle. Nous affranchissons également du rayonnement de la source par les extrémités.

Les conditions aux limites de la rue s'écrivent donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} D_y \frac{\partial w}{\partial y} = h_1 w \quad \text{en } y = 0 \\ -D_y \frac{\partial w}{\partial y} = h_2 w \quad \text{en } y = \ell_y \\ D_z \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = \ell_z \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} w = 0 \quad \forall y, z \quad x = 0 \\ w = 0 \quad \forall y, z \quad x = \ell_x \\ w = 0 \quad \forall x, y \quad z = 0 \end{array} \right. \quad (9)$$

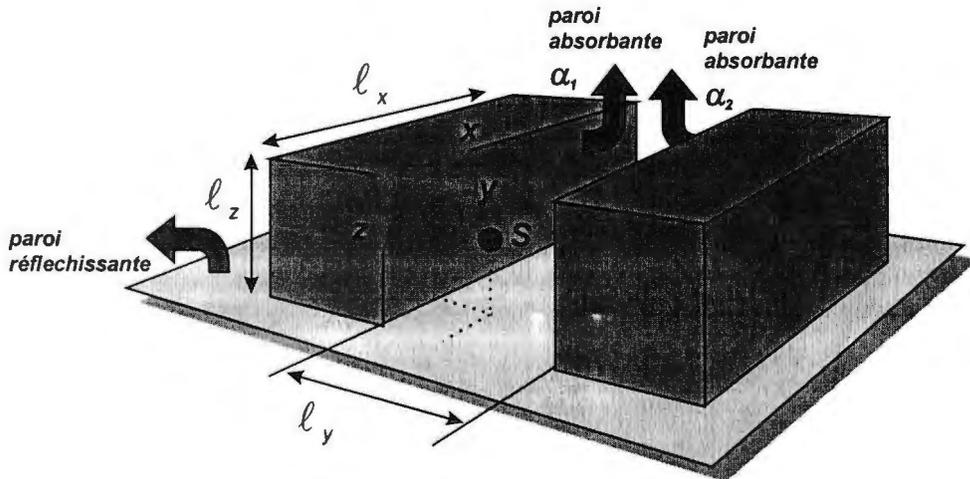


Figure 29 : Conditions aux limites dans la rue.

Les conditions initiales sont celles d'une source impulsionnelle localisé en (x_0, y_0, z_0) , émettant au temps $t=0$ et d'amplitude w_0 . La solution de l'équation est trouvée par la méthode de séparation de variable et s'écrit finalement sous la forme d'un produit croisé de trois fonctions de l'espace et du temps :

$$\begin{aligned}
 w(x, y, z, t) &= \sum_{k,m,n} a_{kmn} \\
 &\times \sin\left(\frac{k\pi}{l_x} x\right) \left[u_m \cos\left(\frac{u_m\pi}{l_y} y\right) + B_1 \sin\left(\frac{u_m\pi}{l_y} y\right) \right] \sin\left(\frac{[2n-1]\pi}{l_z} z\right) \\
 &\times \exp\left[-\left(\frac{k\pi}{l_x}\right)^2 D_x t - \left(\frac{u_m\pi}{l_y}\right)^2 D_y t - \left(\frac{[2n-1]\pi}{l_z}\right)^2 D_z t\right]
 \end{aligned} \tag{10}$$

où a_{kmn} est défini à partir des conditions initiales. Les quantités B_1 et B_2 vérifient :

$$B_1 = h_1 l_y / D_y \text{ et } B_2 = h_2 l_y / D_y, \tag{11}$$

et sont équivalentes aux nombres de Biot usuellement définis dans la théorie de la conduction de la chaleur. Les valeurs de u_m sont obtenues en résolvant une équation transcendante fonction de B_1 et B_2 . La solution $W(x,y,z)$ en régime permanent (lorsque la source émet de façon continue) est obtenue simplement en intégrant l'expression (10) sur le temps :

$$\begin{aligned}
 W(x, y, z) &= \int_0^{+\infty} w(x, y, z, t) dt \\
 &= \sum_{k,m,n} a_{kmn} \\
 &\times \sin\left(\frac{k\pi}{l_x} x\right) \left[u_m \cos\left(\frac{u_m\pi}{l_y} y\right) + B_1 \sin\left(\frac{u_m\pi}{l_y} y\right) \right] \sin\left(\frac{[2n-1]\pi}{l_z} z\right) \\
 &\times \left[+\left(\frac{k\pi}{l_x}\right)^2 D_x + \left(\frac{u_m\pi}{l_y}\right)^2 D_y + \left(\frac{[2n-1]\pi}{l_z}\right)^2 D_z \right]^{-1}
 \end{aligned} \tag{12}$$

L'ensemble des relations et équations obtenues n'est pas présenté ici, mais est détaillé dans la référence [18].

2.2.3.3 Discussion sur la détermination des coefficients de diffusion

Là encore, comme pour le modèle macroscopique, nous n'avons pas connaissance des expressions théoriques des coefficients de diffusion. Néanmoins, compte tenu des travaux réalisés en acoustique des salles sur ce modèle de diffusion, nous pouvons émettre un certain nombre d'hypothèses :

- (H1) Puisque le coefficient de diffusion d'une salle diffuse dépend des dimensions de la salle par l'intermédiaire du libre parcours moyen [38] (distance moyenne entre deux collisions), les coefficients de diffusion D_x , D_y et D_z dépendent probablement des dimensions de la rue.
- (H2) Le coefficient de diffusion associé une direction doit être fonction de la dimension de la rue dans cette même direction. En effet, plus la rue est longue, plus l'énergie diffuse rapidement dans l'axe de la rue.
- (H3) La diffusion étant introduite principalement par les irrégularités des façades, que nous supposons homogènes sur toute la rue, les trois coefficients de diffusion doivent dépendre d'un même paramètre, caractéristique de la forme, de la disposition et de la taille des irrégularités. En pratique, l'architecture d'une rue étant assez homogène (notamment en centre ville et dans les quartiers les plus anciens), cette hypothèse semble vérifiée.

Après de nombreux essais, la condition suivante a semblé la plus adéquate :

$$\frac{D_x}{\ell_x} = \frac{D_y}{\ell_y} = \frac{D_z}{\ell_z} = \Gamma, \quad (13)$$

où Γ est caractéristique de la diffusivité des façades. Bien que discutable *a priori*, puisque difficilement justifiable, cette forme de solution a le mérite de simplifier le modèle de diffusion. De plus, le bon accord théorie-expérience obtenu (cf. paragraphe suivant) justifie *a posteriori* cette relation. L'intégration de la condition (13) dans l'expression (10) permet de réécrire la solution en régime variable sous une forme plus simple :

$$w(x, y, z, t) = \sum_{k,m,n} a_{kmn} r_{kmn} \exp(-\tau_{kmn} \Gamma t) \quad (14)$$

où a_{kmn} et r_{kmn} sont définis à partir de $x, y, z, \ell_x, \ell_y, \ell_z, B_1$ et B_2 . Notamment, dès que la quantité Γt devient grande, seul le premier terme de cette expression est important, les autres tendant très rapidement vers 0. D'où la forme simplifiée suivante de la solution en régime variable :

$$w(x, y, z, t) \approx a_{111} r_{111} \exp(-\tau_{111} \Gamma t) \quad (15)$$

La mesure de la décroissance d'énergie au cours du temps, en un point donné d'une rue, associée à cette forme simplifiée de solution, permet alors d'estimer la valeur de Γ . Cette quantité est ensuite réintégrée dans les solutions générales (10) et (12).

2.2.3.4 Comparaison théorie-expérience

La validation du modèle de diffusion est basée sur des données expérimentales obtenues dans une maquette d'une rue à l'échelle 1/50^{ème}. Le système de mesure dans la maquette a lui-même été validé par des mesures *in situ*, réalisé en 1997 par le L.C.P.C., dans la Rue d'Orléans à Nantes. Le système expérimental de la maquette et les modalités de mesures dans la Rue d'Orléans étant déjà présentés en détail dans [18] et dans le paragraphe 2.3.3, nous n'y revenons pas dans ce rapport. Nous précisons simplement que la limite fréquentielle supérieure du système expérimental a été fixée à 1.6kHz. Par conséquent, seuls les résultats concernant les bandes 1/3 d'octaves en dessous de cette fréquence limite ont été conservés. D'autre part, les quantités mesurées ne fluctuant pas beaucoup d'une bande à l'autre, seule la moyenne des temps de réverbération et des niveaux sonores sur ces bandes est présentée. Toutefois, cela n'exclue pas l'hypothèse de comportements différents en fonction de la fréquence, probablement en haute fréquence. Néanmoins, cette dépendance fréquentielle n'a pas pu être observée dans notre étude, du simple fait que la bande de fréquence d'étude est limitée expérimentalement à 1.6kHz.

Les figures 30 et 31 présentent des comparaisons théorie-expérience en termes de temps de réverbération et d'atténuation du son en distance, pour une valeur de Γ estimée à 35m/s. Les mesures ont été réalisées dans une maquette de rue de dimension équivalente pleine échelle $\ell_x \times \ell_y \times \ell_z = 96m \times 8m \times 12m$.

Le temps de réverbération (en s) est définie comme le temps nécessaire pour observer une décroissance de 60dB de l'énergie sonore en un point d'observation. D'un point de vue expérimental la mesure des temps de réverbération a été réalisée en plusieurs points dans l'axe de la rue. Ces mesures ont été comparées (Figure 30) avec la décroissance d'énergie théorique définie par la relation (10) en chacun des points. Cette figure montre un bon accord entre le modèle et les mesures, notamment lorsque la distance source-récepteur devient grande. En effet, plus la distance source-récepteur est grande, plus le champ sonore diffus résultant des multiples réflexions et diffusion de l'onde sonore devient important. L'accord théorie-mesure en est donc d'autant meilleur. A l'inverse, en champ proche (20 premiers mètres de propagation environ), la décroissance de l'énergie sonore (provenant essentiellement des premières réflexions et non du champ diffus) est assez mal restituée par le modèle. Notre modèle théorique étant fondé sur l'hypothèse de diffusion du champ sonore, cet écart en champ proche était tout à fait prévisible.

Les niveaux sonores estimés par le modèle de diffusion, en régime permanent, ont également été comparés aux niveaux sonores mesurés dans l'axe de la rue (Figure 31), pour deux positions de sources. Le rayonnement direct de la source (décroissance de l'énergie en $1/r^2$) étant relativement important en champ proche, une solution incluant le champ direct a également été proposée. Là encore, mis à part à l'extrémité de la rue où un décrochement est observé, un excellent accord a été obtenu entre le modèle et les mesures. Le léger écart obtenu au bout de la rue provient de la condition aux limites imposées ($w=0$) à cette extrémité.

2.2.4 Conclusion

Que ce soit à l'échelle d'un quartier ou à celle d'une rue, l'utilisation de la théorie mathématique de la diffusion semble être une solution simple pour modéliser la propagation sonore dans des milieux complexes. Le principal intérêt du modèle réside dans le fait que toute la complexité architecturale des façades des bâtiments et de l'organisation même du milieu urbain (sources des multiples réflexions et diffractions de l'onde sonore), est totalement prise en compte dans un unique terme : le coefficient de diffusion.

Cependant, la généralisation de la méthode et son application sont pour le moment limitées du fait de l'absence d'expressions théoriques, semi-empiriques ou même empiriques, de ce terme. Une campagne de mesure du coefficient de diffusion, dans différents types de configurations urbaines (à l'échelle d'une rue ou d'un quartier) est prévue pour tenter de le relier à des indicateurs morphologiques simples.

Une fois le modèle de diffusion validé dans sa forme la plus simple, son extension sera envisagée pour prendre en compte de nouveaux éléments tels que le rayonnement sonore par les extrémités, la présence d'intersections, l'intégration de sources mobiles et linéiques, la prise en compte des effets météorologiques...

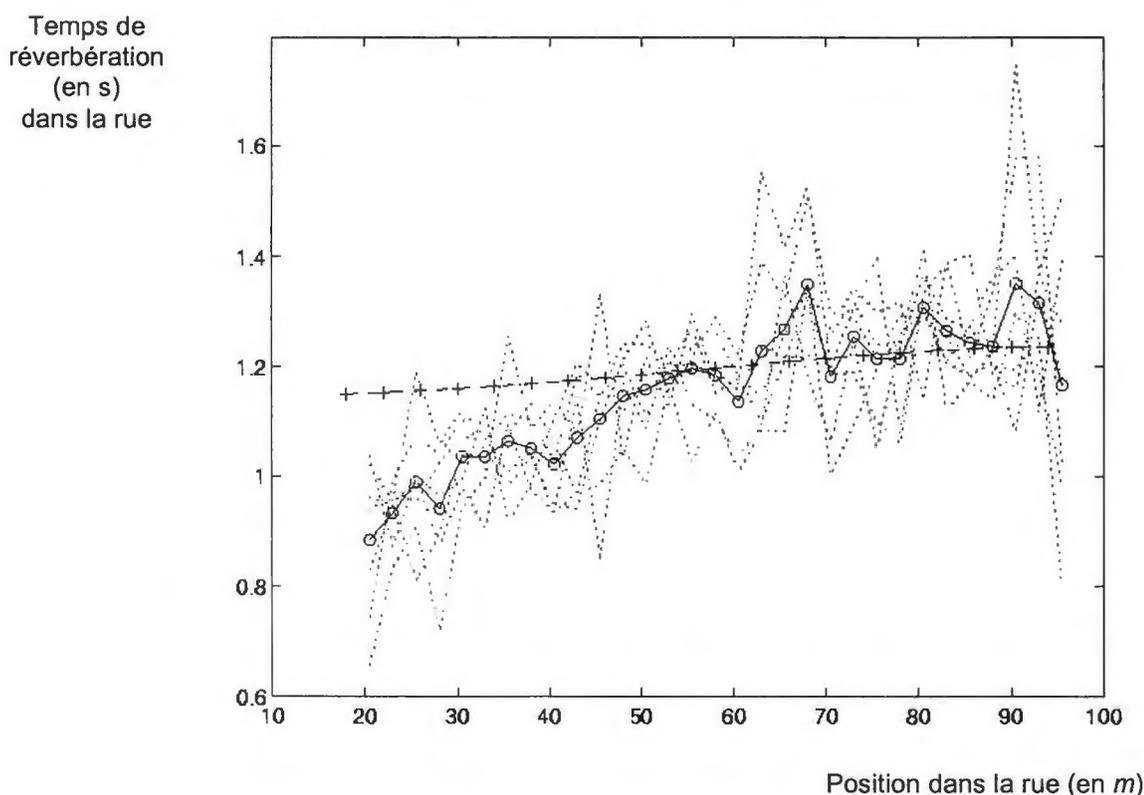


Figure 30 : Temps de réverbération dans l'axe de la rue. Comparaison théorie-expérience.

'-o-' Mesure (moyenne des temps de réverbération (représenté par '....') mesurés sur les premières bandes 1/3 d'octaves).

'-+-' Temps de réverbération estimés à partir de la décroissance d'énergie prédite par la relation (10).

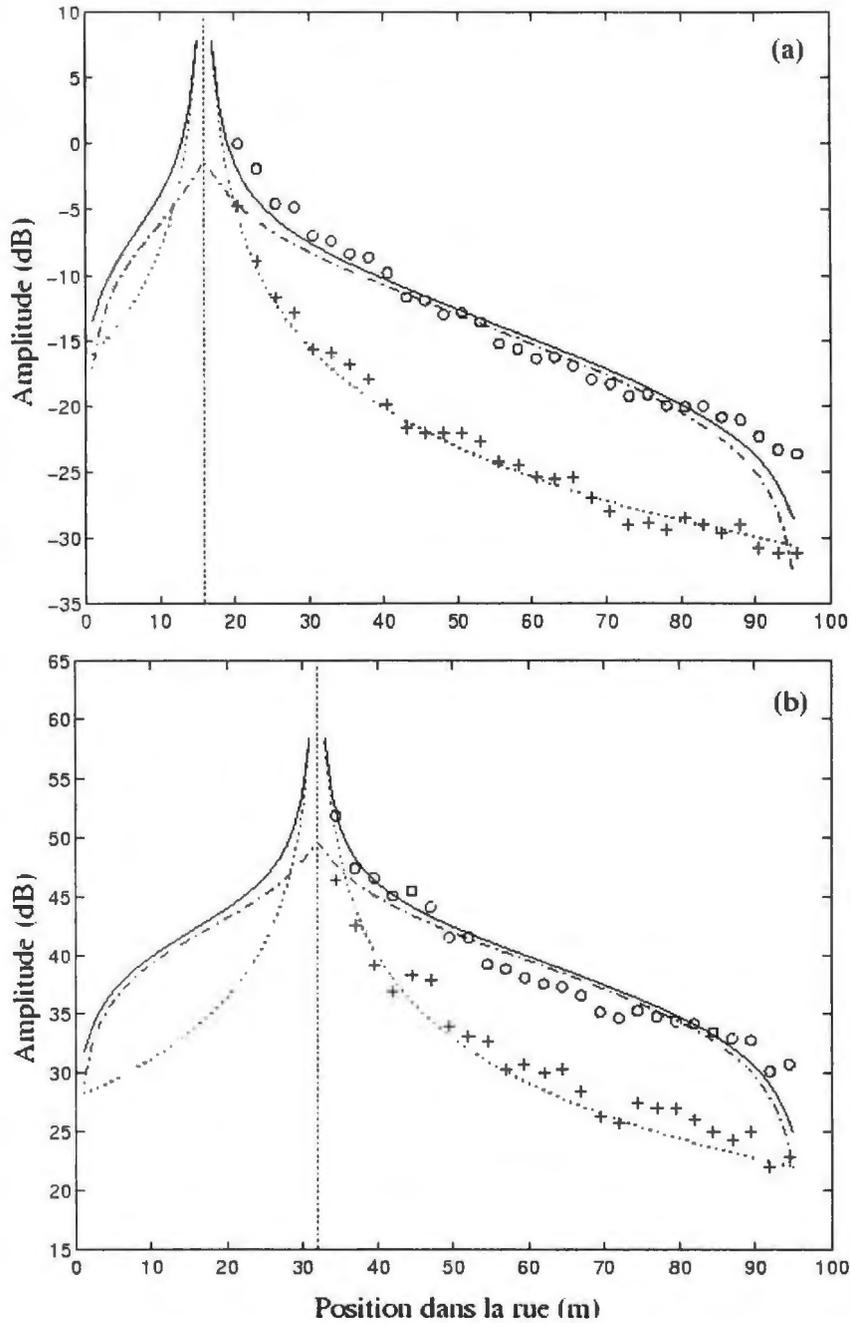


Figure 31 : Atténuation du son en distance par rapport à la source.
 Comparaison théorie-expérience.

- (a) Source sonore à 2m au dessus du sol et 16m de l'embouchure ($y_0=4m$).
- (b) Source sonore à 2m au dessus du sol et 32m de l'embouchure ($y_0=4m$).
- 'o' Mesure (moyenne sur les premières bandes 1/3 d'octaves).
- '+' Estimation du son direct (mesure).
- '.....' Estimation de la décroissance du son direct en $1/r^2$.
- '-.-.' Modèle théorique du champ diffus.
- '—' Modèle théorique incluant le champ direct (l'estimation du son direct est nécessaire pour « caler » le modèle de diffusion).

2.2.5 Bibliographie

- [18] 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, Le Mans, 125 pages.
- [19] Wiener F.M., Malme C.I., Gogos C.M. (1965), Sound propagation in urban areas, J. Acoust. Soc. Am, **37**(4), pp. 738-747..
- [20] Schlatter W.R. (1971), Sound power measurement in a semi-confined space, M. sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 63 pages.
- [21] Sergeev M.V. (1979), Scattered sound and reverberation on city and in tunnels, Sov. Phys. Acoust., **25**(3), pp. 248-252.
- [22] Vinokur R.Y. (1979), Propagation of sound generated by a point source in certain built-up urban environments, Sov. Phys. Acoust., **25**(5), pp. 377-379.
- [23] Bullen R. (1979), Statistical evaluation of the accuracy of external sound levels predictions, J. Sound Vib., **65**(1), pp. 11-28.
- [24] Bullen R. (1979), Traffic noise in urban areas, Australian Road Research, **9**(4), pp. 11-15.
- [25] Leschnik W. (1980), Zur Schallausbreitung in bebauten und Bepflanzten gebieten, Acustica, **44**, pp. 14-22.
- [26] Kuttruff H. (1989), A mathematical model for noise propagation between buildings, J. Sound Vib., **85**(1), pp. 115-128.
- [27] Lyon R.H. (1974), Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation, J. Acoust. Soc. Am., **55**(3), pp. 493-503.
- [28] Davies H.G. (1978), Multiple-réflexion diffuse-scattering model for noise propagation in streets, J. Acoust. Soc. Am., **64**(2), pp. 517-521.
- [29] Makarewicz R. (1994), Réflexion of noise by buildings facades, Appl. Acoust., **43**, pp. 149-157.
- [30] Wu S., Kittinger E. (1995), On the relevance of sound scattering to the prediction of traffic noise, Acustica, **81**, pp. 36-42.
- [31] Heutschi K. (1995), A simple method to evaluate the increase of traffic noise emission due to buildings, for a long straight street, Appl. Acoust., **44**, pp. 259-274.
- [32] Hardy J., Weber J. (1980), Diffusion in a periodic wind-tree model, J. Math. Phys., **21**(7), pp. 1802-1808.
- [33] Keane M.S., Rauzy G. (1980), Stricte ergodicité des échanges d'intervalles, Mathematische Zeitschrift, **174**, pp. 203-212.
- [34] Hidaka T. (1995), Sound field simulation, some considerations of related problems for wave theoretical auralization, Proceedings of the 2nd International Congress on Acoustics and Musical Research, pp. 11-22.
- [35] Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. (1991), Numerical Recipes in C, the Art of Scientific Computing, Cambridge University Press.

- [36] Chandrasekhar S. (1943), Stochastic problems in physics and astronomy, Reviews of Modern Physics, **15**(1), pp. 1-89.
- [37] Bruneau M. (1998), Manuel d'Acoustique Fondamentale, Editions Hermes, Paris, 576 pages.
- [38] Picaut J., Polack J.-D., Simon L. (1997), A mathematical model of diffuse sound field based on a diffusion equation, Acustica/acta acustica, **83**(4), 614-621.

2.2.6 Publications

2.2.6.1 Revues

J. Picaut , J.-D. Polack, L. Simon, A mathematical model of diffuse sound field based on a diffusion equation, ACUSTICA/acta acustica 83 (4), pages 614-621 (1997).

2.2.6.2 Congrès, colloques

J. Picaut , J.-D. Polack, L. Simon, A mathematical model of diffuse sound field based on a diffusion equation, Forum Acusticum, Anvers (Belgique), ACUSTICA/acta acustica 82 Suppl.1, S 153 (Avril 1996).

J. Picaut , J.-D. Polack, L. Simon, Sound attenuation in streets, Forum Acusticum, Anvers (Belgique), ACUSTICA/acta acustica 82 Suppl.1, S 166 (Avril 1996).

J. Picaut , J. Hardy, Propagation of sound in an hexagonal network: a diffuse process ? 33rd Conference on Acoustics, Czech Acoustical Society, Prague, pages 116-119 (Septembre 1996).

J. Picaut, J.-D. Polack, L. Simon, Sound field in rooms with non-uniform absorption, 4^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Marseille, pages 279-282 (Avril 1997).

Picaut , J. Hardy , L. Simon, Propagation du son dans une ville composée de bâtiments hexagonaux, J. 4^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Marseille, pages 279-282 (Avril 1997).

Woloszyn, F. Raymond, J. Picaut, Morphological parametering of a diffuse acoustic model for complex urban areas, The Sixth Western Pacific Regional Acoustics Conference, Hong-Kong, pages 231-236 (Septembre 1997)

J.-P Péneau, P. Woloszyn, M. Bérengier, D. Gaulin, J. Picaut , J. Hardy , L. Simon, N. Tixier, J.F. Augoyard, J.-J. Delétré, J.-D. Polack, Vers un logiciel prédictif des ambiances sonores urbaines, Colloque Ville et Acoustique, Paris, (à paraître)

J. Picaut , J. Hardy , L. Simon, Sound Propagation in a network of hexagonal buildings, 16th International Congress on Acoustics, Seattle, Journal of the Acoustical Society of America 103 (5), (à paraître)

J. Picaut , J.-D. Polack, L. Simon, Sound field in long enclosures with diffusely reflecting boundaries, 16th International Congress on Acoustics, Seattle, Journal of the Acoustical Society of America 103 (5), (à paraître)

2.3 Caractérisation dimensionnelle de la diffusivité des formes architecturales et urbaines

Philippe Woloszyn

Responsables scientifiques : M. J.P. Péneau (laboratoire CERMA URA CNRS 1581) et M. M. Bérengier (LCPC Centre de Nantes)

2.3.1 Morphologie urbaine et échelles de la ville : état de l'art

Dans la plupart des cas, l'agglomération urbaine européenne a été créée par le développement de la ville sur le territoire par un processus d'*agrégation* des anciennes communes rurales et de quartiers plus récents, dont la densité est de moins en moins forte. Cette dynamique urbaine génère ainsi soit des continuités, soit des discontinuités ou ruptures qui semblent résister à l'analyse morphologique classique. En regard de cette difficulté, on formule l'hypothèse d'existence de lois d'*auto-organisation* de la ville.

La nature même du processus de croissance en "tache d'huile" reflète une telle complexité du développement urbain, qu'il semble échapper au contrôle de la planification, dont le rôle est réduit à la gestion de ses conséquences, à tel point qu'on assimile cette évolution à un processus de croissance organique, métaphore à laquelle sont empruntés les qualificatifs d'agglomération, d'agglutination ou de dissolution urbaine. Face à cette complexité, la caractérisation de la forme urbaine revêt une importance notoire dans l'appréhension des limites de la ville et la définition de la notion de centralité. L'analyse qualitative de la continuité du tissu doit permettre à la fois d'opérer une typologie des formes existantes, et d'en analyser la distribution sur la totalité de l'espace urbain. Ce développement de la ville de proche en proche, non contrôlé et apparemment inorganisé peut cependant être décrit par un certain nombre de modèles, que l'on peut classer en deux grandes familles : les modèles explicatifs et les modèles descriptifs.

Si les modèles explicatifs représentent, la plupart du temps, une approche conceptuelle intéressante, ils sont en revanche totalement inopérants pour : effectuer de la prévision ou lancer une procédure de simulation². L'opérationalité est en revanche garantie par l'utilisation des modèles dits descriptifs qui sont aptes à appliquer des variables à une situation urbaine, pourvu que ses lois de comportement soient connues : c'est le talon d'Achille de ce type de modèles qui possèdent les caractéristiques exactement inverses

²Le modèle "Polymétric" de K. Dieter, développé pour l'Agglomération de Boston est à ce titre parlant : structuré logiquement comme un modèle démographique, il édictait les lois d'attraction entre quartiers, fonction linéaire des facteurs de localisation et du coût d'accessibilité des activités. Si ce modèle a eu une valeur pédagogique en permettant de comprendre les mécanismes de la formation de la valeur foncière, il n'a eu en revanche aucun succès dans ses tentatives prévisionnelles, tant à Boston que dans la Région Parisienne [49].

des modèles explicatifs : l'absence de base théorique ne leur permet pas d'être des outils d'analyse : ce sont des méthodes de prévision ou de simulation³.

Le caractère abstrait des modèles explicatifs (dits de compréhension) des phénomènes d'interaction entre sources sonores et cadre construit s'oppose de fait au caractère concret des modèles descriptifs dont l'objet est d'établir une correspondance géométrique entre formes urbaines et diffusion (modèle analogique du filtre acoustique). Cette correspondance constitue le corps de notre recherche dans le cadre du logiciel prédictif.

La complexité inhérente aux villes anciennes a longtemps cherché un modèle décrivant ces *lois d'ordre interne du processus de l'auto-organisation* des structures urbaines, et nous nous proposons de les approcher par la compréhension des *lois globales d'occupation des sols* du construit et par les *lois de structuration géométrique* du cadre bâti. Nous allons tenter à cette fin de construire un modèle de quantification de la morphologie irrégulière, dispersée et imprécise des villes par l'analyse multiéchelle de leur interface construit-non construit.

2.3.1.1 Sauts d'échelle et genèse du modèle fractal des structures urbaines

Cette mesure de l'homogénéité de la surface bâtie ne peut être obtenue que par l'estimation de sa dimension fractale, de par le caractère intégrateur des autres types de mesures habituellement appliquées aux zones urbaines telles que la densité (surfactive, volumique) ou le rapport de forme (frontal, horizontal). En raison de leur caractère intégrateur, les types de mesures classiques appliquées à la forme urbaine ne quantifient pas les discontinuités de leur structure, seules susceptibles de renseigner le modèle de diffusion acoustique à la base théorique du modèle prédictif. Nous avons émis l'hypothèse d'un modèle géométrique pertinent et généralisable pour le paramétrage de la diffusion sonore dans la ville, en essayant de quantifier la répartition des mesures des objets urbains à chaque niveau de leur hiérarchie, à l'aide du modèle fractal.

La notion de fractale, introduite pour la première fois par B.B.Mandelbrot [84] au début des années 70 à propos du problème de la mesure de la côte de Bretagne (*fractal* : qui a été fractionné à l'infini, du latin *fractus*, dérivé du verbe *frangere* qui signifie briser) regroupe de nombreux travaux mathématiques antérieurs, comme ceux de Poincaré, Cantor, Péano, Julia, Bouligand, Hausdorff, Besicovitch ou Minkowski, qui, dès la fin du XIX^e siècle, se sont penchés très tôt sur des propriétés géométriques curieuses telles que l'*auto similarité* (propriété de conservation de la géométrie d'une forme à plusieurs échelles), les *fonctions continues non dérivables*, ou les notions relatives à la *mesure d'un ensemble fermé*. Ces notions ont ensuite été appliquées dans le domaine de la ville, tout d'abord par l'école américaine [40] puis par P. Frankhauser en France. [44] [45] [46] [47]

³ notamment le modèle "Empiric" de D. Hill, version simplifiée du modèle "Polymétric" de K. Dieter, également développé pour l'Agglomération de Boston ou le modèle de I.S. Lowry appliqué à la ville de Pittsburgh, qui permettent une application opérationnelle des lois d'interaction entre localisation des activités, mécanismes fonciers et rôle des accessibilités sous la forme de systèmes d'équations simultanées, modèles incapables de se "réinitialiser" par la prise en compte de nouvelles variables explicatives [50] [51].

La construction d'un indicateur géométrique complexe décrivant les *ruptures dimensionnelles* du cadre bâti doit impérativement être liée à l'échelle d'analyse de la ville :

- La première échelle, l'échelle régionale, rend compte de la distribution géographique des sites construits : elle se lit sur une représentation plane de dimension 2.
- La deuxième échelle, l'échelle urbaine, décrit la distribution du bâti sur tout ou partie de la surface de la ville, dans les trois dimensions de la volumétrie des bâtiments.
- La troisième échelle, l'échelle architecturale, intègre les caractéristiques de surface (dimension 2) des bâtiments constitutifs du tissu urbain, texture, modénature et décrochements.

Ces échelles successives de la structure urbaine nous incitent à explorer les valeurs intermédiaires de leurs dimensions représentatives : c'est la genèse de l'hypothèse fractale, qui attribue à chacun de ses objets d'étude une dimension *non entière*. Pour mesurer la hiérarchie de distribution des surfaces construites de la ville, nous avons associé un *modèle géométrique d'évaluation inter-dimensionnelle* pour ses échelles intermédiaires.

- Le niveau intermédiaire entre échelle régionale et échelle urbaine de la ville décrit une structuration de la forme urbaine en *tissu*, contenant des entités irrégulières dans leur *contenu*. La mesure de ces entités décrira ainsi leur *masse*, leur *densité*, et leur *hiérarchie*.
- Le niveau intermédiaire entre échelle urbaine et échelle architecturale de la ville décrit une dilution spatiale du volume bâti dans l'espace de la ville, contenant des entités irrégulières dans leurs *frontières*. Ce type spécifique de mesure dimensionnelle sera développé par la suite.

2.3.1.2 L'analyse fractale : méthodologie du pavage dimensionnel

- Le premier niveau intermédiaire entre échelle régionale et échelle urbaine de la ville définit une modalité de mesure fractale utilisant la méthode du *pavage dimensionnel* (ce qui revient à calculer cette grandeur au moyen d'intégrales multiples), afin de déterminer les propriétés *de connectivité* de la structure urbaine étudiée.

La méthode du pavage que nous allons utiliser ici consiste à effectuer des essais de mesure de la trame urbaine en prenant comme unité : $\mu = \varepsilon^\alpha$, l'exposant α étant, pour l'instant, indéterminé.

Prenons l'exemple d'un carré (dimension $d = 2$), de côté L : recouvrons-le de pavés de côté ε ; la mesure est donnée par $M = N\mu$, où N est le nombre de pavés, donc :

$$M = N\varepsilon^\alpha = (L/\varepsilon)^d \cdot \varepsilon^\alpha$$

$$= L^d \cdot \varepsilon^{(\alpha - d)}$$

Pour $\alpha = 1$, on a : $M \rightarrow \infty$ quand $\varepsilon \rightarrow 0$: la "longueur" du carré (dans le sens de la quantification dimensionnelle stricte, à ne pas confondre avec le périmètre) est donc infinie.

Pour $\alpha = 3$, on a : $M \rightarrow 0$ quand $\varepsilon \rightarrow 0$: le “ volume ” d'un carré est nul.

La surface du carré n'est donc obtenue que pour $\alpha = 2$, et sa dimension est celle d'une surface $d = \alpha = 2$.

Cette méthode, généralisable aux dimensions non-entières, définit la α -mesure de recouvrement comme une *technique d'évaluation du contenu spatiale d'une entité* par un pavage ε (appelé *jauge* par B.Mandelbrot [84]), définissant la dimension d'une entité géométrique quelconque.

2.3.1.3 Simulation fractale d'un tissu urbain virtuel

Dans le but de détailler le processus du dimensionnement fractal du tissu urbain, nous avons procédé à une série de simulations consistant à construire un tissu urbain virtuel par itération d'une lacune (que l'on peut appeler générateur) dans un quadrilatère (initiateur).

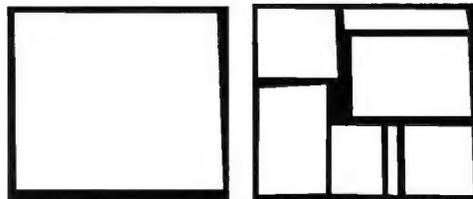


Figure 32 : Quadrilatère initiateur : I0 et Lacune génératrice : I1

Dans les itérations qui vont suivre, nous considérons les blocs *disloqués* (en blanc sur les schémas) comme la trace de l'occupation du sol des éléments bâtis : nous obtiendrons donc, par itérations successives, un tissu virtuel de plus en plus fragmenté, et dont les lacunes hiérarchisées schématiseront les différentes catégories de voies de circulation et de places urbaines.

Outre les grands axes de circulation, nous itérons une fois de plus (itération I2) afin d'obtenir les rues principales et les places :

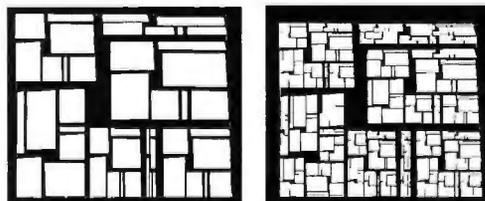


Figure 33 : Itérations I2 et I3

Et nous continuons notre fractalisation urbaine virtuelle (itération I3) pour constituer les rues de desserte et décrochements du bâti, nous donnant à présent une configuration spatiale très fractionnée, à l'image de certains tissus médiévaux, exception faite de la perpendicularité très affirmée de notre tissu simulé.

La ressemblance frappante de ce type de structure avec les tissus urbains montre bien l'analogie avec la distribution des lacunes sur des structures fractales telles que les tapis de Sierpinski⁴.

⁴Ce type de structure plane est assujettie à une distribution hiérarchique des lacunes qui lui donne sa forme très particulière de *damier autosimilaire* : c'est la forme générique des tapis de Sierpinski, généralisable à n-dimensions.

On note, pour ce type de structure, une double hiérarchie du plein et du vide, de l'emprise construite au sol et du réseau des voies de circulation (lacunes) : celles-ci sont analogues à la structure hiérarchique des fractales ramifiées, spécifiques aux structures en réseau.

L'évolution dimensionnelle des différents stades de fractionnement de notre tissu virtuel montre une décroissance régulière, significative d'une lacunarité croissante :

Echantillon	Dimension fractale	Ecart type Sx
I0	D = 1.98	0.022
I1	D = 1.94	0.036
I2	D = 1.88	0.027
I3	D = 1.82	0.025

Les dimensions calculées lors de l'itération du tissu révèlent une décroissance quasi-linéaire de la dimension :

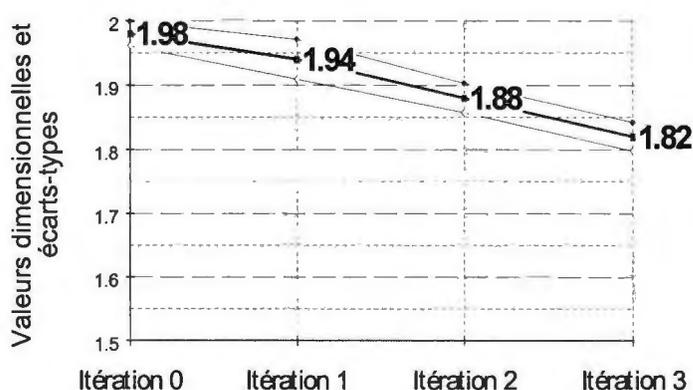


Figure 34: Décroissance de la dimension du tissu urbain itéré.

Ce phénomène est révélateur de la distribution hyperbolique des lacunes, caractéristique d'une distribution de Pareto⁵ qui décrit une loi de hiérarchisation des lacunes que l'on retrouve notamment dans les structures fractales de type tapis de Sierpinski.

A travers ce type de distribution, nous pouvons établir une relation entre le nombre de zones appartenant à un niveau hiérarchique donné (correspondant en l'occurrence à chacune des itérations successives) et leur surface.

La dimension fractale et la caractérisation des lacunes ne donnent par contre aucune information sur la topologie du réseau des espaces vides (dans le sens de leur ouverture ou de leur fermeture). Elles définissent une qualité et une quantité de ramification des espaces vides (lacunarisation des espaces bâtis) : les propriétés

⁵La distribution de Pareto définit, pour un ensemble E donné comprenant n éléments à un niveau hiérarchique h, une extension surfacique S_n de ces éléments suivant une progression géométrique au nième niveau d'itération i_n.

décrites qualifient la desserte des espaces vides (distribution en réseaux), et la connectivité des espaces occupés (distribution morphologique des zones construites).

Le caractère linéaire de l'évolution dimensionnelle de ce tissu virtuel est bien significatif de la distribution hyperbolique homogène de l'extension des lacunes : en effet, comme il s'agit de la construction d'une forme auto similaire, notre tissu fractal présente la relation suivante entre le nombre de lacunes (rues et cours) N_n et leur extension l_n à une étape n :

$$N_n = Cte \cdot (l_n)^{-D}$$

L'exposant D étant la valeur de la pente dans une représentation double-logarithmique liant longueur de maille de quadrillage et nombre de mailles se situant dans une lacune (analyse à maille variable) :

$$\log(N_n) = Cte - D \cdot \log(l_n)$$

Ce réseau auto similaire, très homogène, peut être qualifié selon son degré de hiérarchisation, lisible par son exposant d qui n'est pas nécessairement égal à la dimension fractale de l'ensemble bâti.

2.3.1.4 Instabilité dimensionnelle en mesure multifractale

Après avoir établi une nomenclature des zones constituant le générateur (itération I1), nous avons nommé les zones constituant le tissu virtuel à l'étape d'itération I3, afin d'y établir une série de mesures locales dans le but d'effectuer une mesure multifractale⁶ de l'échantillon du tissu urbain :

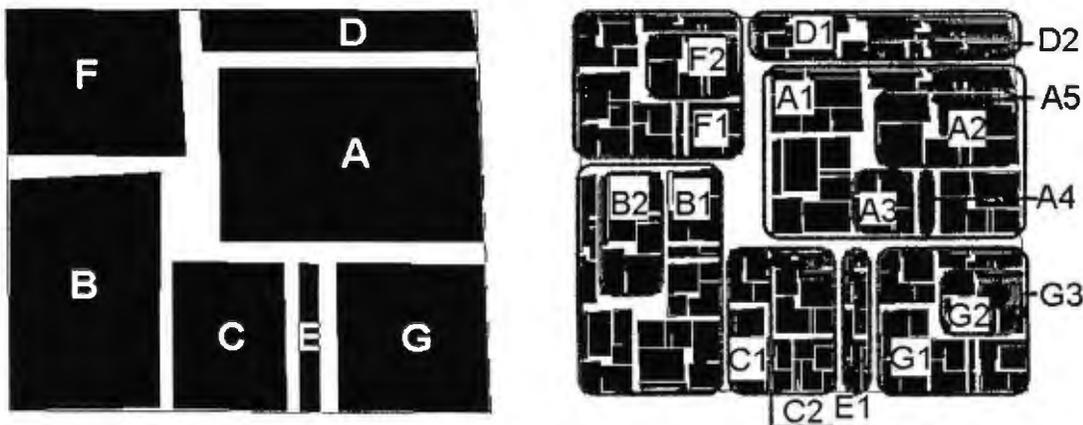


Figure 35 : Nomenclature des zones élémentaires du tissu urbain virtuel

⁶Hypothèse introduite par B.B.Mandelbrot en 1968-1976 dans le but de modéliser l'intermittence dans la distribution spatiale de la diffusion.

Les résultats obtenus confirment le caractère local de la fractalité du tissu virtuel, et donc son comportement morphologique multifractal :

	Dimension	Ecart-type
A0	1.82	0.025
A1	1.85	0.099
A2	1.82	0.089
A3	1.82	0.13
A4	1.69	0.278
A5	1.68	0.464
B1	1.81	0.046
B2	1.88	0.095
C1	1.79	0.02
C2	1.62	0.119
D1	1.75	0.132
D2	1.62	0.343
E1	1.94	0.364
F1	1.79	0.027
F2	1.72	0.172
G1	1.8	0.019
G2	1.88	0.14
G3	1.8	0.154

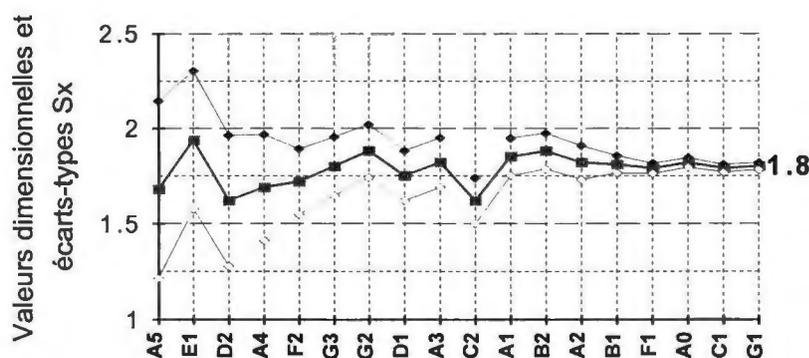


Figure 36 : Mesure multifractale du tissu simulé (valeur moyenne et écart type)

Au vu des résultats des mesures, le comportement morphologique de cette structure surfacique n'est pas strictement auto similaire : la structure analysée est invariante par une loi d'échelle différente suivant les axes Ox et Oy , la surface itérée est *auto affine*.

C'est le processus d'itération non homothétique du générateur qui est responsable de cet état de fait : ce dernier étant *a priori* non régulier (c'est à dire composé de quadrilatères différents du carré), les itérations successives s'inscrivent nécessairement dans les quadrilatères irréguliers (rectangles) de rapport $L / \ell \neq 1$ le composant.

Le tissu virtuel ayant été généré de manière fractale après $k = 3$ itérations, nous avons la relation implicite liant la masse $M(L)$ à la dimension D , via le nombre d'itérations k :

$$M(L) = k M(L/\ell), \text{ soit}$$

$$A(L) \cdot L^D = k A(L/\ell) \cdot (L/\ell)^D$$

Et l'on détermine D asymptotiquement en faisant tendre L vers l'infini, sachant qu'alors $A(L/\ell)/A(L) \rightarrow 1$, d'où :

$$k (\ell/h)^D = 1$$

Dans notre exemple, $k = 3$ et $L =$ variable. Ceci explique le caractère hétérogène de la structure par la variation locale du rapport de masse $M(L)$.

Ce rapport de masse répond, pour une structure à similitude interne, à la relation :

$M(bL) = \lambda \cdot M(L) = b^D \cdot M(L)$, relation valable pour les structures fractales auto affines avec des exposants différents en O_x et en O_y (c'est à dire différents pour les largeurs l et les longueurs L des structures locales du tissu simulé).

Cette variation des dimensions locales de la structure soulève plusieurs constatations : tout d'abord, mis à part le cas atypique de la zone E1, on remarque que les résultats dimensionnels les plus élevés correspondent aux îlots se rapprochant le plus du quadrilatère parfait (carré) : c'est le cas des zones A3 et G2 (voir graphique précédent).

A contrario, les dimensions les plus faibles traduisent les unités morphologiques dont la forme est la plus allongée (rectangles), ce qui est lisible sur les zones C2, D1, D2 et A4.

L'influence globale de la forme (Rapport L/ℓ) de chaque échantillon sur la lacunarité de la structure sera développée par l'étude des rapports dimensionnels périmètre / surface.

Suite à ces dernières observations, nous pouvons donc déduire l'existence de propriétés locales de la structure urbaine, mesurables par les méthodes fractales appliquées localement. Les processus de croissance étant généralement différents pour des sous-ensembles locaux de la ville (zones urbaines périphériques, par exemple), l'hypothèse de la multifractalité se trouve pleinement vérifiée pour la description de la répartition de la surface bâtie dans les zones urbaines. L'analogie de celle-ci avec les tapis de Sierpinski nous montre la dépendance de la quantification dimensionnelle vis à vis de l'échelle d'analyse.

2.3.1.5 Pavage multiple et domaine de fréquence d'une entité urbaine

Le principe général de l'analyse fractale est de quantifier l'irrégularité d'un objet en effectuant des changements d'échelle successifs, afin d'obtenir une discrimination spatiale de ses propriétés formelles. Nous appliquerons ce principe à la ville pour caractériser les secteurs urbains dont l'organisation hiérarchique est homogène, et pour

déterminer un paramètre de l'extrusion des façades urbaines dans l'espace de propagation acoustique.

Il faut ici rappeler le principe directeur de l'analyse par α -recouvrement tel qu'il se trouve appliqué aux échantillons surfaciques binaires (blanc = 1 = construit, noir = 0 = non construit, en termes d'analyse d'image) du tissu urbain que nous étudions :

Soit $Q(i, j, L)$, un quadrilatère de taille L^2 centré sur le point (i, j) (secteur d'analyse monofractale); pour un point donné de notre surface d'analyse S , p est le nombre de pixels de S appartenant à $Q(i, j, L)$.

Si la totalité de notre surface S contient $M(m, L)$ quadrilatères $Q(i, j, L)$, on a :

$$M(m, L) = \sum_{(i, j) \in S} X_{Q(i, j, L)}, \quad L \in (1, 2, \dots, l) \text{ et } m \in (1, 2, \dots, m_{\max}), \text{ avec } X_{Q(i, j, L)} = 1$$

si le quadrilatère de taille $L^2 = l \times l$ centré sur le point (i, j) contient m points de S , et $X_{Q(i, j, L)} = 0$ dans le cas contraire.

Soit T le nombre total de points de la surface S (dans notre cas, $T = 600 \times 600 = 360000$ pixels), on définit la densité de probabilité $P(m, L)$ d'avoir m points de S dans un quadrilatère de taille L^2 centré sur un point (i, j) de S :

$$P(m, L) = \frac{M(m, L)}{T}, \quad \text{d'où : } \sum_{m=1}^{m_{\max}} P(m, L) = 1, \quad \forall L$$

Comme l'analyse s'effectue sur des secteurs de taille strictement identiques, on a :

$$M(m, L) = \frac{T}{m} P(m, L), \quad \forall L \text{ et } \forall m$$

Le nombre moyen de quadrilatères de taille L^2 contenant m points de S se définit donc par :

$$\langle M(L) \rangle = \sum_{m=1}^{m_{\max}} M(m, L) = \sum_{m=1}^{m_{\max}} \frac{T}{m} P(m, L)$$

Comme $\langle M(L) \rangle$ est proportionnel à L^{-D} , on a : $\log(\langle M(L) \rangle) = -D \log(L) + Cte$

A partir des valeurs de $\langle M(L) \rangle$ obtenues par le calcul sur une série de valeurs de L , la régression effectuée sur les points de coordonnées $(\log(\langle M(L) \rangle), \log(L))$ nous donne une droite dont la pente correspond à l'exposant d'Hölder de la région analysée. Ceci nous donne, en soustrayant cet exposant à la dimension euclidienne de l'objet (dans ce cas, la dimension du plan = 2), la dimension fractale de la région.

Ce type d'analyse caractérise le *domaine de fréquence* d'une irrégularité de surface ou de volume de la structure urbaine et quantifie sa *complexité interfaciale* pour une distance caractéristique donnée.

Nous avons en ce sens développé un programme de pavage dimensionnel à fenêtres multiples, destiné à évaluer l'homogénéité des zones de diffusion acoustique de la ville. Cet algorithme a été appliqué au tissu urbain nantais, sur une base cartographique numérique de la ville de Nantes de type IGN - Trapu.

Les mesures dimensionnelles de ces échantillons numériques ont été effectuées suivant deux protocoles distincts : une série de mesures par *fenêtre glissante* nous ont procuré des résultats intéressants en ce qui concerne la détection des lacunes importantes (zones non construites telles que éléments naturels, places ou grands boulevards), tandis que les mesures par *fenêtres séparées* nous fournit une information quantitative au niveau de la hiérarchie locale de la distribution des pleins et des vides, informant également la densité des zones construites.

En appliquant la technique présentée à l'agglomération nantaise, puis à des échelles de plus en plus petites de son tissu constitutif, nous avons évalué l'hétérogénéité de ses zones construites (en blanc sur les représentations cartographiques de la Figure 37) :

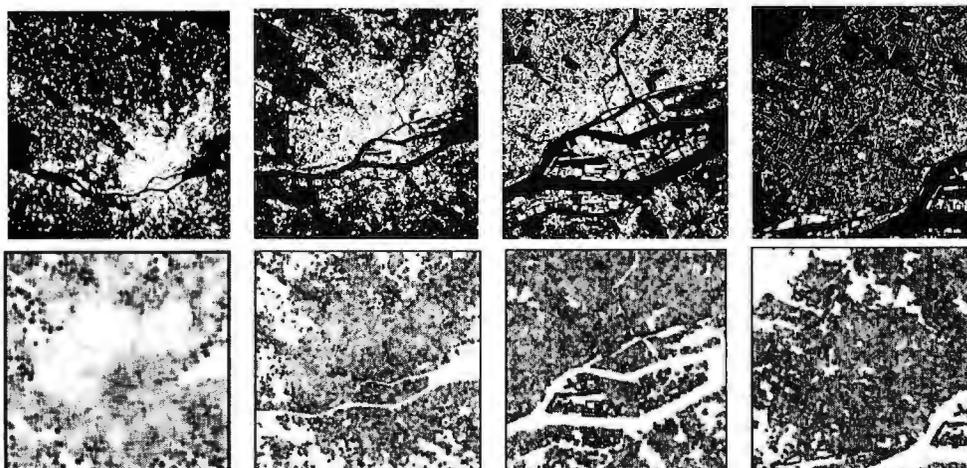


Figure 37 : Analyse fractale par fenêtres glissantes des échantillons du tissu urbain nantais

L'analyse fractale utilisant des fenêtres glissantes agit comme un analyseur automatique d'image, opérant à la fois un lissage des contours du bâti, un repérage numérique des lacunes et une détection des zones de rupture du bâti.

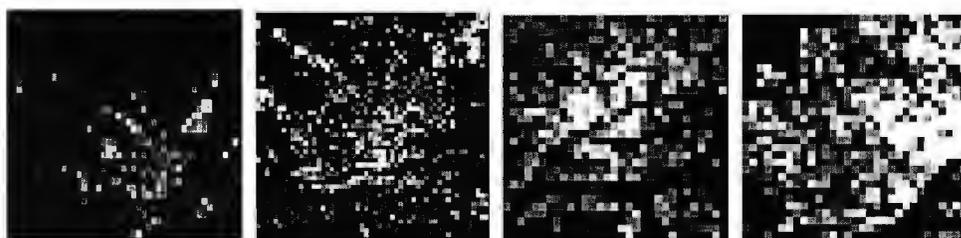


Figure 38 : Analyse fractale par fenêtres séparées des échantillons du tissu urbain nantais

Le résultat de l'analyse fractale à fenêtres séparées (Figure 38) quantifie le tissu bâti en termes d'interfaces : les zones à forte complexité structurelle sont identifiées comme ayant une valeur dimensionnelle faible (proche de 1, que traduisent des niveaux de gris tendant vers le blanc), tandis que les zones plus sombres, à valeur dimensionnelle forte (proches de 2), identifient les zones construites à faible complexité (zone suburbaines, résidentielles, ou à faible densité d'occupation). Ce modèle de discrimination hiérarchique de la surface urbaine est exploitable pour repérer les zones à forte complexité interfaciale, c'est à dire les secteurs urbains où le principe de diffusion acoustique est applicable.

2.3.1.6 L'échelle architecturale : saucisse de Minkowski et spectre de forme

Les méthodes fractales ne s'applique pas seulement à l'analyse des tissus urbains à l'échelle régionale [47], et nous allons les appliquer à l'échelle des quartiers, puis des bâtiments.

Si le niveau intermédiaire entre échelle régionale et échelle urbaine de la ville décrit une structuration de la forme urbaine en *tissu*, le niveau intermédiaire entre échelle urbaine et échelle architecturale de la ville décrit, quant à elle, une dilution spatiale du volume bâti dans l'espace de la ville. Celle-ci est mesurable par la méthode de la *saucisse de Minkowski*, dont le principe est de remplacer chaque point de la limite du bâti par un élément structurant et à en prendre l'union ; c'est l'opération morphologique de *dilatation*.

Le résultat, appelé saucisse de Minkowski, nous donne la mesure de la surface du profil à chaque pas de fermeture, et la scrutation du profil par l'élément structurant dont on fait varier la taille le fait tendre vers la forme la plus faiblement convexe que l'on puisse obtenir dans l'espace des mesures que l'on aura défini (la forme finale sera linéaire quel que soit le profil de départ si l'espace des mesures est infini).

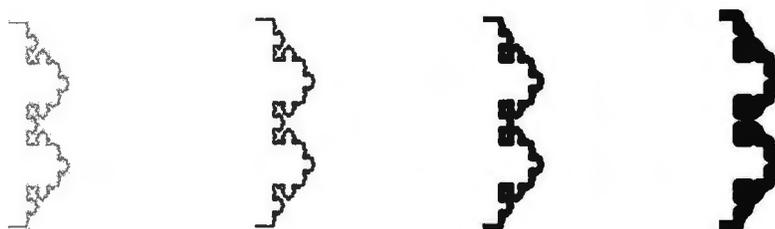


Figure 39 : Saucisses de Minkowski d'un profil de Sierpinski exploitant différentes tailles de l'élément structurant.

La méthode est applicable pour un profil numérisé, le périmètre approché étant donné en effectuant une squelettisation, réduisant la ligne fermée à l'épaisseur d'un pixel : cette manipulation préliminaire est nécessaire dans la mesure où une érosion de même taille que la dilatation sur le contour analysé (fermeture) ne redonne le contour de départ que si aucun rayon de courbure n'est inférieur à l'élément structurant : dans le cas contraire, les parties concaves s'épaississent ; il sera donc nécessaire d'être vigilant sur la longueur du rayon R des disques de recouvrement en rapport aux rayons de courbure minimaux lorsqu'on appliquera la méthode de fermeture sur les objets à analyser.

On effectuera ainsi, sur chaque profil représentant la structure de façades urbaines que nous étudions, des fermetures de taille croissante jusqu'à obtenir une enveloppe faiblement convexe, en mesurant la surface du profil obtenu à chaque pas de fermeture. L'ensemble de ces mesures définissant une fonction spectrale, il est nécessaire de ramener chacune d'elles à une *masse de référence*, qui, dans notre cas, est le diamètre λ de l'élément structurant (disque)⁷.

La valeur ainsi obtenue pour chaque longueur caractéristique est un estimateur de complexité du profil analysé, il nous indique l'amplitude et la fréquence spatiale de sa *rugosité*, paramètre spatial déterminant les longueurs d'onde où le processus de diffusion acoustique est maximal. Cette méthode de morphologie mathématique nous permet ainsi d'obtenir le *spectre de forme* du profil urbain, c'est à dire la

⁷Les fonctions spectrales de caractérisation des rugosités ont été abordées de manière très complète par Chermant J.L., Coster M., et Gougeon G., en synthétisant les fonctions de distribution de certains types de particules par leurs moments d'ordre 1, et dans une moindre mesure, par leurs moments d'ordre 2 [80].

correspondance spatiale de chacun de ses éléments constitutifs avec le spectre sonore, afin d'en déduire ses propriétés de diffusion acoustique.

Nous allons à présent valider cette méthode par comparaison mesure-calcul sur une courbe fractale calculable : la *courbe de Weierstrass*. Cette courbe est modélisée à partir d'un initiateur $i(0)$ de longueur totale $L = 1$ (1 étant la longueur de chacun des segments), que l'on soumet à une application itérée qui est définie par le générateur $i(1)$.

C'est lors de la définition du générateur que l'on introduit les paramètres géométriques de départ qui définiront l'objet fractal en sortie : nous fixons ainsi le facteur de réduction r qui détermine la longueur l_i à l'itération i des nouveaux segments à partir de l'initiateur $i(0)$, et le nombre de segments secondaires n . Chaque partie linéaire est ainsi remplacée par cette construction, dont les paramètres sont, pour la courbe de Weierstrass, de $n = 8$ et $r = 1/4$.

A l'itération $i(2)$, chaque segment est alors de longueur $l_2 = r.l_1 = r^2.l$. Le nombre total de segments de longueur l_2 est donc égal à n^2 , et la longueur totale de la courbe est donc de : $L_2 = n^2.l_2 = n^2.r^2.l = 4.L$.

A chaque itération, nous substituons donc successivement ce générateur à chaque segment dans le rapport d'un quart, et nous continuons à itérer jusqu'à ce que la courbe soit auto similaire dans l'ensemble du domaine spatial défini par le point d'observation (intervalle de départ). Quatre itérations à partir du générateur suffisent à approximer la courbe fractale de Weierstrass, dont la dimension est définie par : $D = \frac{\log 8}{\log 4} = 1,5$.

Considérons à présent la courbe de Weierstrass comme une fonction $y = f_0(x)$, et $f_1(x)$ comme la fonction périodique, de période $T = 1 / F = w.f_0(Fx)$ pour $1 \leq x < T$.

Si $w < T$, la série $\sum f_n(x)$ est partout convergente et sa somme $G(x)$ est continue, sans admettre de dérivée : l'objet obtenu relève bien de la géométrie fractale.

La méthode en α -recouvrement estime la dimension de la courbe itérée à $D_\alpha = 1,47$, alors que la méthode de Minkowski nous donne une valeur de $D_M = 1,493$, c'est à dire à 0,07 % de la valeur dimensionnelle réelle, avec une variance $\sigma^2 = 0,999$!

itération $i(0)$ (initiateur)	itération $i(1)$ (générateur)	itération $i(3)$	itération $i(4)$	itération $i(5)$
$D_\alpha = 0,98$	$D_\alpha = 0,99$	$D_\alpha = 1,22$	$D_\alpha = 1,41$	$D_\alpha = 1,47$
$D_M = 1,006$	$D_M = 1,065$	$D_M = 1,261$	$D_M = 1,417$	$D_M = 1,493$

Outre la précision et l'exactitude de l'évaluation fractale de la courbe itérée par la méthode de Minkowski, celle-ci nous permet également une grande exactitude dans le dimensionnement préfractal, en discernant sans équivoque une droite (l'initiateur) d'un ensemble macroscopique de segments (générateur). L'observation du spectre de forme de la courbe de Weierstrass nous renseigne ainsi très précisément sur son comportement préfractal.

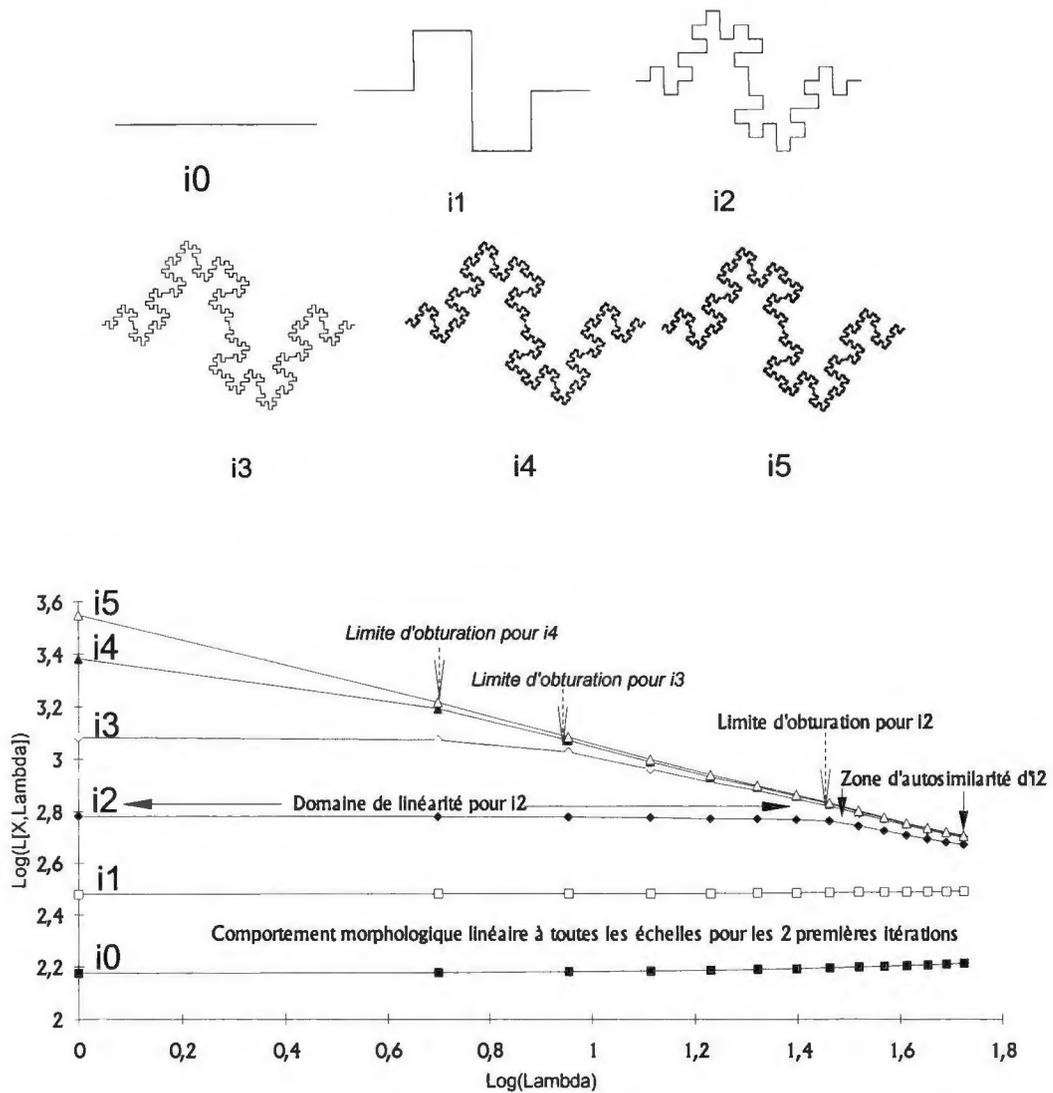


Figure 40 : Représentations et spectres de forme de la courbe de Weierstrass

Dans cet exemple de spectre de forme de la courbe de Weierstrass, la *limite d'obturation* observable pour chacune de ces itérations discerne :

- un domaine dit *de linéarité*, à savoir l'ensemble des distances spatiales pour lesquelles la courbe de Weierstrass *est vue* comme une droite,
- et une zone d'*auto similarité*, c'est à dire l'ensemble des distances spatiales pour lesquelles la courbe se comporte de manière fractale. La pente de cette zone du graphe nous indique très précisément la valeur fractale de la courbe. Cette valeur, outre l'estimateur de complexité qu'elle représente, nous indique l'amplitude et la fréquence spatiale de la *rugosité* de l'échantillon étudié, paramètre capital pour la détermination des longueurs d'onde où le processus de diffusion acoustique est maximal.

L'analyse de Minkowski discerne les disruptions du cadre construit à *toutes les échelles* : non seulement, la structuration spatiale des plans de réflexion acoustique peut être normée (macro et micro-texture des façades urbaines), mais la distance des plans entre eux (largeur de la rue) est également quantifiable par cette méthode.

Une application de cette méthode aux façades urbaines sera détaillée lorsque nous aborderons les problèmes de modélisation numérique.

2.3.2 Campagne de mesures in situ

2.3.2.1 Le site de mesures

Le choix d'une architecture de type Haussmannienne pour simuler la rue à échelle réduite n'a pas été le fruit du hasard. En effet, la campagne de mesures acoustiques a été menée dans une rue de Nantes constituée de ce type d'immeubles : la rue d'Orléans. Le choix de ce site de mesure a en outre été dicté par des impératifs de correspondance avec la maquette acoustique à échelle réduite (1/50°) développée au LAUM : sa particularité est d'être parfaitement rectiligne et continue sur une centaine de mètres, ce qui rend la correspondance avec la maquette et le modèle numérique pertinente. Toujours en ce qui concerne cette exigence de fidélité par rapport aux modèles de simulation, nous avons vidé la rue de toute occupation automobile et piétonne avant d'effectuer les manipulations.

2.3.2.2 Description des manipulations

Nous avons procédé à deux types de manipulations, en bénéficiant de l'aide instrumentale du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. La première manipulation concernant le champ diffus utilisait un réseau unique de sept récepteurs disposés sur l'axe transversal de la rue, en suivant une progression géométrique (microphones à 2, 4, 8, 16, 32, 64 et 96 m. de la source). La deuxième manipulation consistait à disposer deux réseaux de quatre microphones de mesure, l'un latéral et l'autre en hauteur.

La source sonore utilisée était un revolver calibré, et l'enregistrement des tirs s'est fait sur un système d'acquisition digital huit pistes. Le dépouillement de ces signaux simultanés a été effectué sur un logiciel d'estimation automatique des temps de réverbération, utilisé habituellement en acoustique des salles.

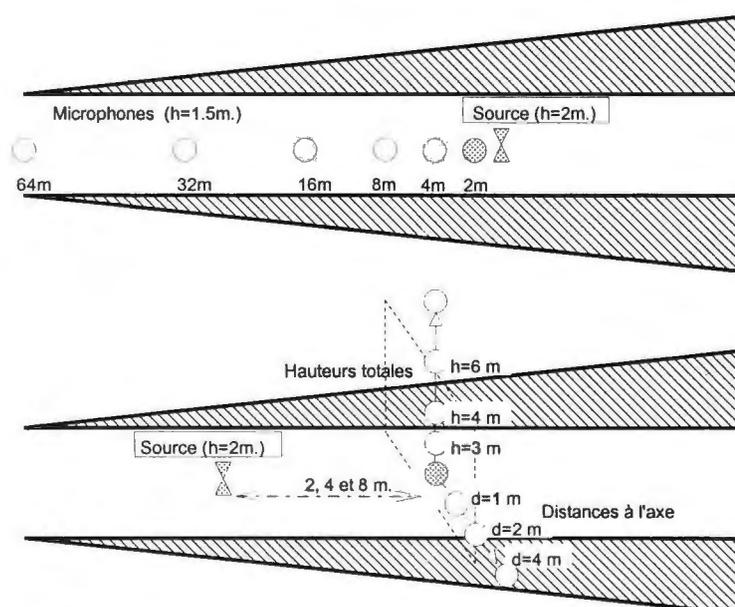


Figure 41 : Positionnement source-récepteurs dans les mesures longitudinales et transversales du champ sonore de la rue d'Orléans

2.3.2.3 Résultats

Le résultat des tirs enregistré sur le système digital 8 pistes a été analysé sur une chaîne de mesure 01 dB - "dB Isol", elle permet d'obtenir une estimation automatique des temps de réverbération à chaque fréquence 1/3 d'octave pour tous les points de mesure de la rue d'Orléans.

Une première représentation des courbes de décroissance des temps de réverbération à 1000 Hz nous montre la forte dépendance spatiale de ces valeurs. On constate notamment que leur évolution longitudinale suit une loi de croissance jusqu'à 16 m., distance à partir de laquelle la valeur se stabilise. On peut donc en déduire que l'établissement du champ diffus acoustique (corollaire de la stabilité de la valeur des temps de réverbération) est fortement dépendant de la distance à la source. Pour ce type de source (assimilée à une source impulsionnelle, dont la composition en fréquences, s'étalant de 100 à 20 kHz, est stable), et dans ce type de configuration spatiale (correspondant, de par le choix et l'aménagement de notre site d'étude, à un modèle canonique de *rue-canyon*), le seuil spatial d'établissement du champ diffus est de 15 à 20 mètres, ce qui confirme les hypothèses de diffusion généralement admises en acoustique des salles.

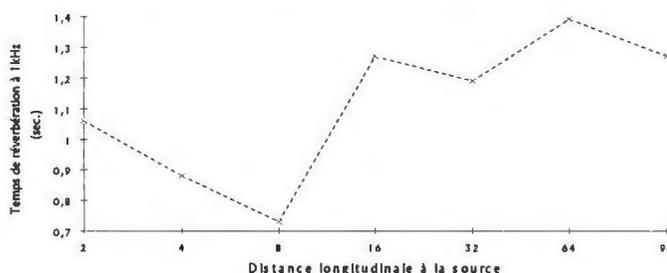


Figure 42 : Valeurs des temps de réverbération sur la longueur de la rue à 1 kHz

En ce qui concerne la section de la rue, cette croissance des valeurs du temps de réverbération à 1 kHz en largeur (axe latéral) et en hauteur est encore observable, quoique nettement moins sensible, au vu des distances à la source nettement plus faibles. La variation des valeurs mesurées confirme cependant une homogénéité avec les résultats des mesures longitudinales, le temps de réverbération variant entre 0.7 et 1.2 sec, lorsqu'on s'éloigne de la source de 1 à 8 m. L'hypothèse de champ diffus, confirmée à partir de 15 m. de la source, n'est donc ici pas valide : nous sommes dans un champ acoustique semi-diffus, admettant un coefficient de diffusion spécifique, dépendant de la distance à la source. *Ce coefficient ne deviendra indépendant de la position du point de réception qu'à des distances à la source supérieures à 15 m.*

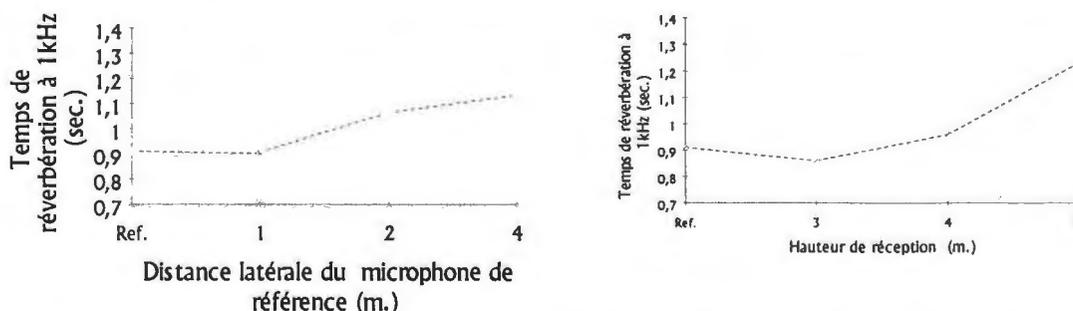


Figure 43 : Valeurs des temps de Réverbération sur la largeur et la hauteur de la rue à 1 kHz

Les valeurs des temps de réverbération (TR) sur l'ensemble du spectre de fréquences audibles nous confirment les premières déductions issues de leur analyse à 1 kHz, à savoir une grande stabilité à partir de 16 m., confirmant l'homogénéité spatiale du champ acoustique diffus loin de la source, ce phénomène étant particulièrement remarquable aux moyennes et hautes fréquences. L'évolution des TR sur la section de la rue (évolution latérale et en hauteur) est toujours moins sensible que leur évolution longitudinale, dont l'échelle de distance est plus grande.

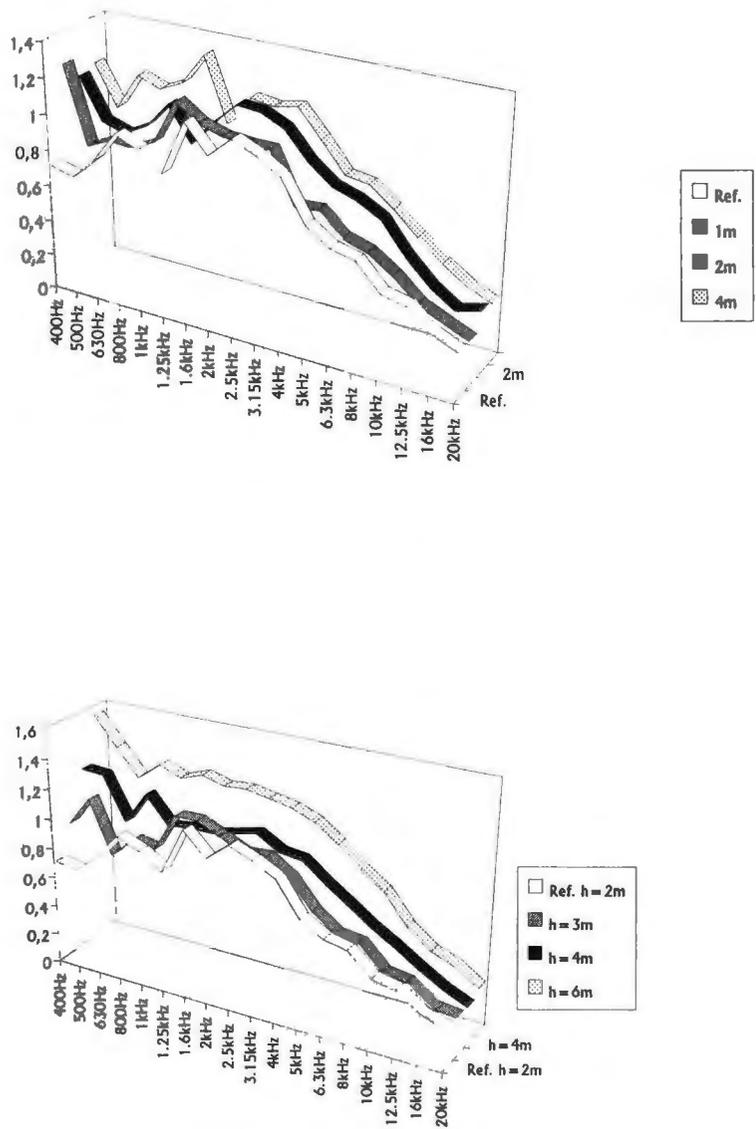


Figure 44 : Valeurs expérimentales de la distribution transversale et en hauteur des Temps de Réverbération de la rue sur la totalité du spectre de fréquences

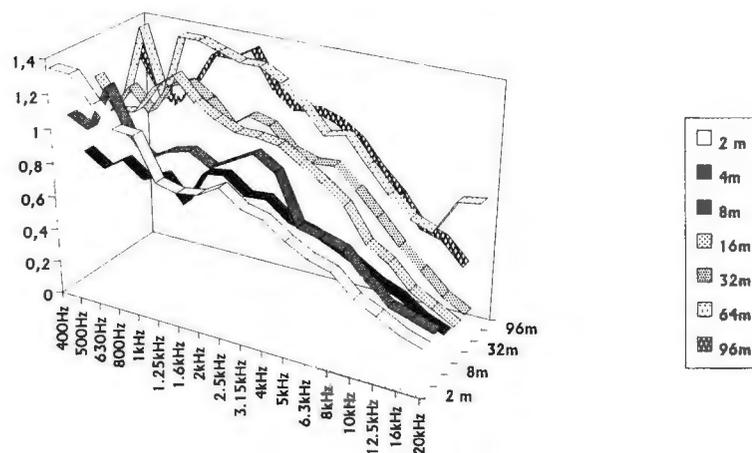


Figure 45 : Valeurs expérimentales de la distribution longitudinale des Temps de Réverbération de la rue sur la totalité du spectre de fréquences

Ces résultats confirment l'existence de deux zones de diffusion spécifiques, la première, zone qualifiée de semi-diffuse, quantifie la vitesse de décroissance de l'énergie acoustique en fonction de la position du récepteur par rapport à la source, et la seconde, la zone de diffusion homogène, dans laquelle la décroissance est indépendante de la localisation spatiale du point de réception. La coexistence de ces deux lois de comportement énergétique dans une enceinte unique sera, pour des raisons pratiques de modélisation numérique, résolue par l'emploi d'un terme générique qui, appliqué à l'équation canonique de la diffusion, sera à même de décrire ces deux comportements antinomiques par une seule loi de comportement énergétique global : le coefficient de diffusion.

2.3.3 Implantation numérique du modèle de diffusion

2.3.3.1 Description de la méthode numérique

La simulation du processus de diffusion à l'intérieur d'une rue a été effectuée sur un code de calcul de type éléments finis, en utilisant l'équation canonique de la diffusion. (Renvoi au paragraphe 2.2)

2.3.3.2 Diffusion dans une rue analogue au site d'expérimentation

Après avoir modélisé la distribution surfacique des éléments de la façade urbaine correspondant à notre exemple expérimental sur un maillage, nous lui avons appliqué l'équation canonique de la diffusion, avec les conditions aux frontières et aux limites que nous venons de décrire.

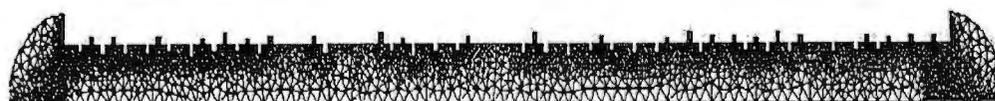


Figure 46 : Maillage du demi-espace plan de la rue suivant la distribution statistique des éléments de façade.

Une procédure de linéarisation temporelle a ensuite été appliquée sur ces résultats, afin d'obtenir une lecture comparative directe des temps de réverbération en fonction de la distance à la source. Cette procédure consiste à déterminer l'échelle de temps caractéristique à la décroissance de l'énergie diffuse dans la rue simulée correspondant aux 60 dB classiquement utilisés pour le calcul du temps de réverbération en acoustique statistique. Pour cela, nous avons effectué une estimation temporelle d'un facteur de décroissance d'énergie de 2^{20} , que nous avons réduit à 2^{10} (chute d'énergie de 30 dB), pour accélérer les calculs. La décroissance d'énergie constatée sur le modèle numérique nous donne alors, après renormalisation, des longueurs temporelles compatibles avec les résultats expérimentaux.

En ce qui concerne la simulation du champ acoustique longitudinal, nous pouvons lire des valeurs temporelles qui suivent la même évolution générale que les résultats expérimentaux entre 16 et 96 m, ce qui confirme les premières conclusions issues de l'expérimentation, concernant la présence d'un champ acoustique parfaitement diffus (qui se traduit par une loi de diffusion stable et linéaire dans ce domaine de distances) à partir de 16 m.

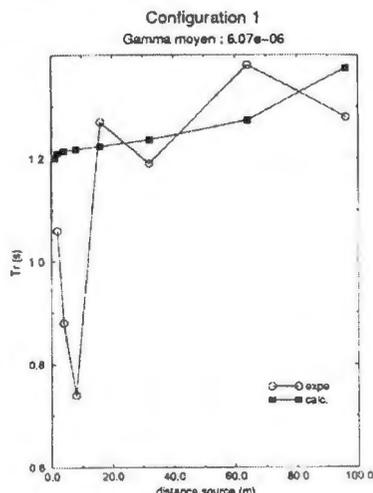


Figure 47 : Diffusion longitudinale ; comparaison des résultats expérimentaux et numériques ; détermination du coefficient de diffusion

2.3.3.2.1 Simulation de la diffusion dans une rue à complexité croissante

La suite de l'étude consiste à faire varier l'indentation des façades, puis d'estimer l'influence de celle-ci sur le processus de diffusion stationnaire et instationnaire. Cette variation est tout d'abord linéaire, elle consiste à découper les façades de l'enveloppe bâtie en n parties égales, avec n = 5, 10, 30, 100, puis 1000 segments pour approcher une façade lisse. Ces indentations ont été réalisées en conservant le volume de diffusion (volume d'air compris entre les façades), afin de rendre la procédure de renormalisation possible.

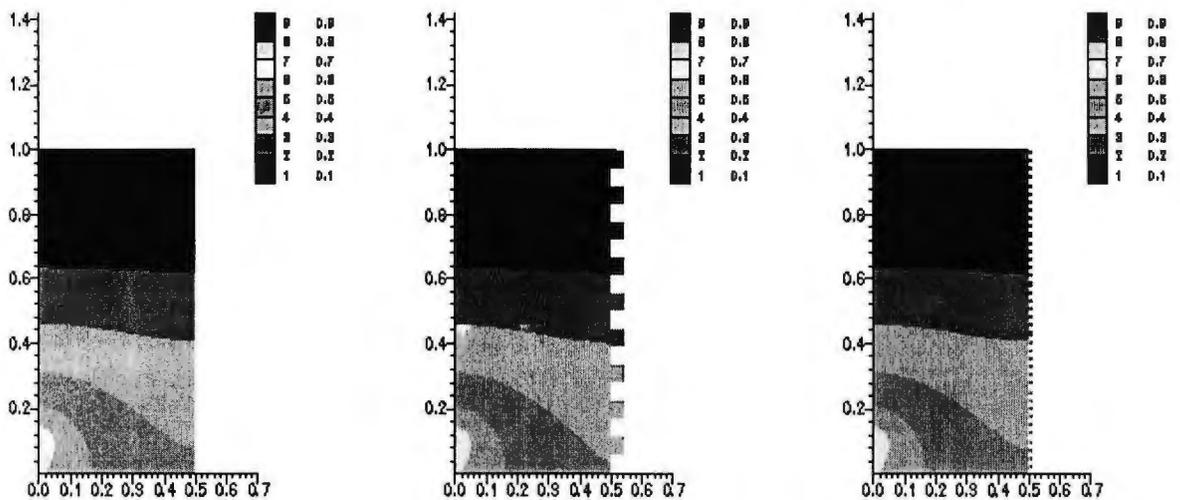


Figure 48 : Diffusion stationnaire dans la rue avec variation d'indentation régulière des façades : 1000, 10 et 30 divisions

L'état stationnaire de la diffusion (obtenu après un temps supérieur au temps de mélange $t > 150$ ms) est similaire dans chacune des configurations. Observons à présent le comportement temporel de l'énergie après extinction de la source (diffusion instationnaire) :

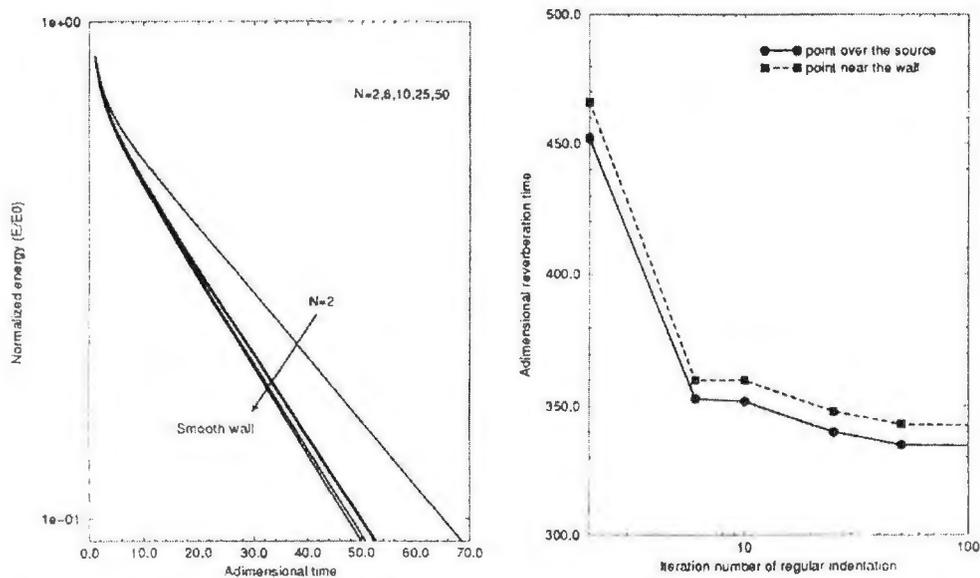


Figure 49 : Evolution temporelle de l'énergie normalisée et évolution du temps de réverbération en fonction de la variation régulière d'indentation des façades de la rue

L'on constate que, mis à part le cas marginal de la division de la façade en deux parties égales ($n = 2$), la variation temporelle de l'énergie est très proche quelle que soit la configuration des façades : les courbes de décroissance et, en conséquence, les temps de réverbération sont du même ordre de valeur, mais accusent tout de même une différence significative (au minimum de 10^{-3}) au vu de la précision des calculs numériques (de l'ordre de 10^{-6}) mis en oeuvre dans cette simulation. En outre,

l'évolution des temps suit le même sens que l'évolution de la forme de l'enveloppe : plus l'indentation est importante en taille, plus le temps de réverbération augmente, avec un minima pour $n = 1000$, modèle d'une enveloppe lisse. Comme nous travaillons dans la coupe sur rue, c'est à dire avec des distances maximales récepteur-source de 5 m., le temps de réverbération augmente également avec la distance : ceci confirme notre positionnement dans un champ semi-diffus, en accord avec l'expérience dans la rue d'Orléans ; l'influence de la morphologie des façades urbaines tend donc à s'amenuiser lorsqu'on s'en éloigne.

L'indentation des façades urbaines a ensuite été modélisée de manière non linéaire, par une analogie au modèle fractal du tapis de Sierpinski ouvert, créant, à travers trois itérations successives, une enveloppe dont l'échancrure augmente rapidement, par un principe de complexification cumulative auto affine.

Les résultats de la diffusion stationnaire sur ces interfaces pré fractales sont lisibles sur les demi-coupes sur rues :

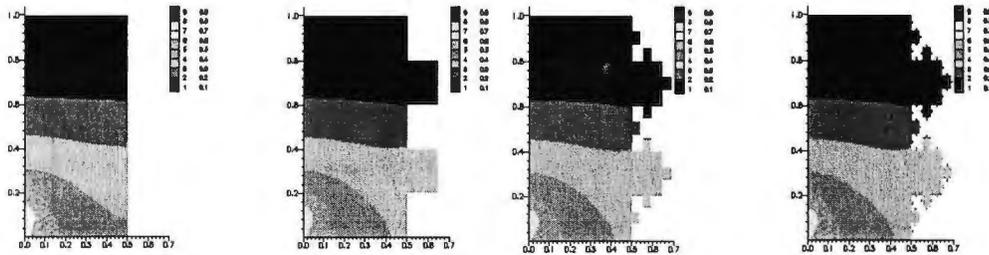


Figure 50 : Champs stationnaires de diffusion acoustique dans des demi-coupes sur rue à complexité interfaciale croissante

Ainsi que nous avons déjà pu le constater en étudiant la diffusion stationnaire dans la rue à indentations régulières, la différence du champ de diffusion relatif à chacune de ces configurations est négligeable. Il n'en est pas de même pour l'évolution temporelle de la décroissance d'énergie dans la rue :

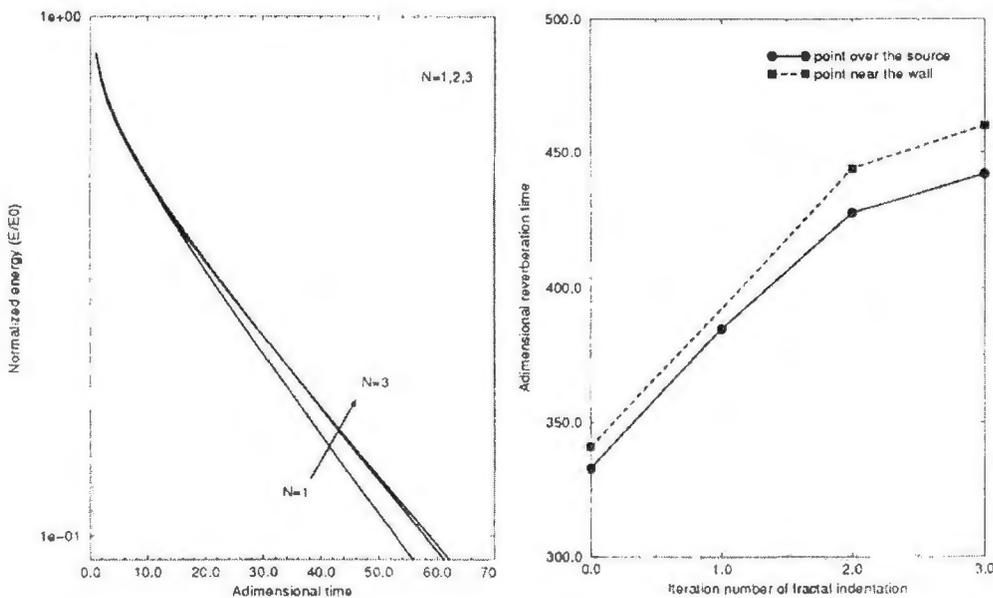


Figure 51 : Evolution temporelle de l'énergie normalisée et évolution du temps de réverbération en fonction de la variation auto-affine d'indentation des façades de la rue

Comme dans l'exemple précédent, l'évolution des temps suit le même sens que l'évolution de la forme de l'enveloppe : plus la façade se rapproche de la morphologie fractale, plus le temps de réverbération augmente. Il y a, là encore, confirmation de la présence d'un champ semi-diffus, en accord avec l'expérience. L'on constate en outre que la variation temporelle de l'énergie est assez proche quelle que soit la configuration des façades, alors que les temps de réverbération accusent tout de même une différence maximale de plus de 100 s. en "temps adimensionnel" entre l'enveloppe lisse et la plus découpée, ce qui, rapporté aux temps de réverbération effectivement constatés dans la rue d'Orléans, porte la différence à près d'une demi-seconde, ce qui est significatif de l'influence de la morphologie des façades urbaines sur le processus de diffusion.

2.3.4 Conclusions

Notre travail de recherche trouve ici un positionnement en charnière entre les outils de simulation et la conception architecturale et urbaine : en effet, le modèle global de simulation des ambiances sonores urbaines vise une opérationnalité instrumentale dans le processus de conception en aménagement, en architecture et en urbanisme opérationnel. Le travail spécifique d'évaluation multi-échelle des formes urbaines que nous venons de présenter a pour vocation de constituer une interface graphique d'aide au projet, tant pour la conception de filtres acoustiques urbains que pour la conception de diffuseurs à bande de fréquence réglable en acoustique des salles.

Ces travaux relatifs à la caractérisation morphologique du tissu urbain pour le modèle prédictif des ambiances sonores urbaines peuvent également être généralisés autour de modalités nouvelles de représentation multi-phénomènes des ambiances, contribuant ainsi à définir un cadre méthodologique global pour le développement de la notion d'*ambiance située*.

Les phénomènes physiques à l'origine des ambiances multi-phénomènes se manifestent cependant à des *échelles caractéristiques* très différentes : en effet, si les longueurs d'onde du signal sonore correspondent à des longueurs usuelles comprises entre les échelles architecturales et urbaines (du millimètre au mètre), les longueurs caractéristiques du spectre lumineux (micromètre) ou des phénomènes météorologiques (kilomètre) sont, quant à eux, situés dans une métrique très différente.

L'intérêt opératoire de ces investigations, conjugué au questionnement méthodologique fondamental du *rôle de l'espace dans la manifestation de tous les phénomènes d'ambiance* doit permettre, à terme, de constituer le cahier des charges d'un modèle intégrant l'ensemble de ces manifestations physiques, reposant sur la *quantification multi-échelle de la structure urbaine*.

2.3.5 Bibliographie

Morphologie urbaine

- [39] Baker N.V., Steemers K., Crowter D., Nikopolou M., "Can simplified urban parameters indicate environmental performance ?", Actes de la journée Cuepe *Energie et climat urbain*, Lausanne, 1995.

- [40] Batty M., Xie Y., "From cells to cities", in : *Planning and design*, 1994 celebration issue, London, 1994, pp.s31-s48.
- [41] Belchun B., "Les sources numériques d'information géographique urbaine", document interne Cerma, 1994.
- [42] Bottema M., "Aerodynamic roughness parameters for homogeneous building groups ; part 1 : theory", Document Sub-Meso # 18.
- [43] Brown F.E., "The spatial development of the city of London", *Centre for Configurational Studies*, Reprint series, Faculty of technology / The Open University Walton Hall, Milton Keynes, 1984, 136 p.
- [44] Frankhauser P., "Aspects fractals de la morphologie urbaine", Ecole d'été de modélisation dynamique en géographie, Gordes, 1994, 34 p.
- [45] Frankhauser P., "Aspects fractals des structures urbaines", *L'espace géographique* n°1, Paris, 1991, pp.45-69.
- [46] Frankhauser P., "Fractales, tissus urbains et réseaux de transports", *Rev. écon. pol.* 104 (2/3) mars-juin 1994, pp.435-455.
- [47] Frankhauser P., "La fractalité des structures urbaines", *Anthropos*, coll. Villes, Paris, 1994, 291p.
- [48] Groleau D., Marenne C., "Environmental specifics of the urban built form", *Rebuilding the European City*, Integration of Renewable Energies in Established Urban Structures, European conference, Corfu, July 1995.
- [49] Guionnet S., Croset G., direction de P. Merlin, "Facteurs de localisation des activités en région parisienne", I.A.U.R.P., Paris, 1969, 249 p.
- [50] Hill D.M., "A growth allocation model for the Boston region. Its development, calibration and validation", Traffic Research Corporation, Philadelphia, 1964, 32 p.
- [51] Lowry I.S., "Design for an intra regional location model", Pittsburgh Regional Planning Association, Pittsburgh, 1960.
- [52] Merlin P., "Méthodes quantitatives et espace urbain", Masson, Paris, 1973, 190 p.
- [53] Péneau J.P., "Des densités aux rugosités", *Les Annales de la Recherche Urbaine*, Paris, 1995.
- [54] Péneau J.P., "La simulation des ambiances urbaines", *Le Courrier du CNRS* N°81 La Ville, Paris, 1994, pp.137-1390.
- [55] Péneau J.P., "Morphologie urbaine et climat urbain", *Actes de la journée Cuepe énergie et climat urbain*, Lausanne, 1995, pp.19-29.
- [56] Rabie, J. : "Towards the simulation of urban morphology", in : *Environment and Planning B : Planning and design*, Vol.18, London, 1991, pp.57-70.
- [57] Sini J.F., Bottema M., Mestayer P.G., Costes J.P., "Terrains et canopée urbaine : modélisations atmosphérique, morphologique et géographique", *Journées Environnement, Vie et Sociétés* du CNRS, Janvier 1996, Paris.
- [58] Steadman J.P., "Built forms and building types : some speculations", in : *Planning and design*, 1994 celebration issue, London, 1994, pp.s7-s30.

- [59] Steadman P., Brown F., Rickaby P., "Studies in the morphology of the English building stock", in : Environment and Planning B : *Planning and design*, Vol.18, London, 1991, pp.85-98.

Acoustique

- [60] Adobes A., Audonnet I, Luzzato E : "Helmholtz Resonators : A numerical package to optimise their design and control their implementation", J. of Low Freq. Noise and Vib. 9, 1990, pp.92-97.
- [61] Allard J.F., "Propagation of sound in porous media", Elsevier applied science, London, 1993, 284 p.
- [62] Amram M., Droin L., Chvojka V.J., "Optimisation géométrique de guides d'ondes utilisés comme filtres passe-bas pour le contrôle des bruits de basse fréquence", Applied Acoustics 19, 1986, pp.285-303.
- [63] Augustynska D., "Calcul de silencieux à réflexion et à absorption", Revue d'Acoustique 31, 1974, pp.45-55.
- [64] Beckmann P., Spizzichino A., "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces", Artech House, Norwood, 1987, 503p.
- [65] Bourbié T., Coussy O., Zinszner B., "Acoustique des milieux poreux", Publication de l'institut français du pétrole, Editions Technip, Paris.
- [66] Clarence S.C., Herman M., Wayne M.W., "Specularly scattered sound and the probability density function of a rough surface" J. Acoust. Soc. Am. 53 (6), 1973.
- [67] D'Antonio P., "Fractals and number theory ara changing the shape of acoustics", Sound and Vibration, October 1992.
- [68] Fahy F.J., Schofield C., "A note on the interaction between a Helmholtz resonator and an acoustic mode of an enclosure", J. Sound Vib. 72, 1980, pp.365-378.
- [69] Goff J.A., "The relationship between local- and global- scale scattering functions for fractal surfaces under a separation of scales hypothesis" J. Acoust. Soc. Am. 97 (3), March 1995.
- [70] Jessel M. : "Théorie et pratique des absorbeurs acoustiques actifs dans les conduits et pavillons", Revue d'Acoustique 31, 1974, pp.11-14.
- [71] Kuttruff H., "Sound decay in reverberation chambers with diffusing elements", J.Acous.Soc.Am. 69, 1981, pp.1716-1728.
- [72] Lauterborn W., Parlitz U., "Methods of chaos physics and their application to acoustics" J. Acoust. Soc. Am. 84 (6), December 1988.
- [73] Lyamshev M.L., "Fractals in acoustics" Proceedings ICA 95, Trondheim, Norway 26-30 June 1995.
- [74] Mellen R.H., Silling G., "Sound propagation through atmospheric turbulence : multifractal phase fluctuations" J. Acoust. Soc. Am. 97 (1), January 1995.
- [75] Ondet J.L. et Barbry A.M., "Prévision des niveaux sonores dans les locaux encombrés", notes scientifiques et techniques de l'INRS, Vandoeuvre, 1984.
- [76] Polack J.D., "Playing billiards in the concert hall : the mathematical foundations of geometrical room acoustics" Applied Acoustics 38 (1993), pp.235-244.

- [77] Soulage D., "Morphologie des vides et performances acoustiques des enrobés drainants", Bulletin de Liaison des LPC, *Environnement et génie urbain*, Paris, 1992.
- [78] Thorsos E.I., "The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum" J. Acoust. Soc. Am. 83 (1), January 1988.

Rugosimétrie

- [79] Chermant J.-L., Coster M., "Précis d'analyse d'images", Presses CNRS, Paris, 1989, 562 p.
- [80] David D., Caplain R., "Méthodes usuelles de caractérisation des surfaces", Eyrolles, Paris, 1988.
- [81] Degrange M., Ramspacher V., Wehbi D., Roques-Carmes C., "Etude topographique des interfaces plâtres-alginates de classe A", Journal de Biomatériaux Dentaires n°1/3, Paris, 1985.
- [82] Laurini R., Thompson D., "Fundamentals of spatial information systems", Academic Press, London, 1992.
- [83] Lucas J., Begou P.-A., "Description de la macrotecture et de la microtecture", Bulletin de Liaison des LPC N°185, *Adhérence des chaussées*, Paris, 1993.
- [84] Mandelbrot B. : "Les objets fractals", Paris, Flammarion, 1992, 268 p.
- [85] Paladin G., Vulpiani A., "Anomalous scaling laws in multifractal objects", Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1987, 225 p.
- [86] Pentland A., "Fractal based description of natural scenes", IEEE Trans. on pattern analysis and machine intelligence, 1994, 6(6), pp.661, 674.
- [87] Tricot C., Wehbi D., Roques-Carmes C., "Perturbations et propriétés holdériennes en traitement du signal", Revue Phys.Appl., 25, pp.509-516, 1990.

2.3.6 Publications

Communications orales

Siret D. Woloszyn P., "Modèles et modélisations pour la simulation des ambiances sonores urbaines" in : Ecole thématique "Modélisation de la ville". Garchy : CNRS septembre 1997.

Woloszyn P., "Propagation sonore en milieu urbain" in : séminaire CERAM "Propagation et contrôle du bruit". ENPC Noisy-Le-Grand, avril 1996.

Woloszyn P., "Environnement sonore urbain : aspects acoustiques et psycho-acoustiques" in : 2^{ème} journée thématique du groupe Bruits, sons et vibrations, Aix-en Provence, novembre 1995.

Communications écrites

Congrès :

Woloszyn P., Raymond F., Picaut J., "Morphological parametering of a diffusive acoustic model for complex urban areas" in : Wesprac'97 6th Western Pacific regional acoustic conference, Hong-Kong, 19-21 nov. 1997, pp.231-236

Woloszyn P., Bérengier M., "Mesures dimensionnelles et implantation numérique d'un modèle de diffusion acoustique en milieu urbain". in : 4^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Marseille, 14-18 avril 1997. Toulouse : Société Française d'Acoustique, 1997, pp. 1287-1290

Woloszyn P., "Mesures multiéchelles du tissu urbain et paramétrage d'un modèle de diffusion acoustique en milieu construit", in : Symposium Saint-Venant : Analyse multiéchelle et systèmes physiques couplés, Marne-la-Vallée, 28-29 août 1997.

Woloszyn P., "Mesures morphologiques et paramétrage acoustique du tissu urbain : Une esquisse du "Modulateur morpho-acoustique"", in : Paysage & Ambiances : 3èmes Rencontres des Doctorants des Ecoles d'Architecture, Toulouse, 23-24 mai 1996, 1996, 8 p.

Woloszyn P., "Influence de la morphologie du tissu construit sur l'environnement sonore", in : La gestion de l'espace sonore urbain : séminaire CARTA, Angers, 20 février 1996. [s.l.] : [s.n], 1996, 6p.

Publications avec comité de lecture :

Woloszyn P Siret D., "Du complexe au simplexe", le modèle des objets ambiants. Cahiers de la Recherche Architecturale, 1998 (paraître)

Woloszyn P., "Des effets de filtrage aux modulateurs morpho-acoustiques", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1997, vol. 208, mars-avril 1997, pp.75-85

Woloszyn P., "Le modulateur morpho-acoustique", Les Annales de la Recherche urbaine, 1996, n° 70. Avril 1996, pp.158-159

Woloszyn P., "Vers un simulateur des ambiances sonores urbaines", Acoustique et Techniques, 1997, n°8, janvier 1997, pp.17-19

Publications sans comité de lecture

Woloszyn P., Garreau J., "Les ambiances sonores urbaines", Revue générale des Routes et des Aéroports, 1996, vol., n°743 septembre 1996, pp.41-45

Rapports scientifiques :

Woloszyn P., "Le modulateur morpho-acoustique en milieu urbain", Paris : Rapport intermédiaire de Recherche CNRS-Pir-Villes, 1996, [150p.]

Léobon A., Woloszyn P., "Qualification et cartographie des ambiances sonores du centre historique nantais", Paris : Laboratoire de Mécanique Physique U.R.A. 879 du C.N.R.S., 1995, 189p.

Moch A., Léobon A., Lafage L., Serre P., Woloszyn P., Laboratoire de Mécanique Physique de Villepreux. "Etat des lieux des recherches sur l'environnement sonore urbain", Paris : Institut Parisien de recherche : Architecture, urbanistique, société, 1993, 81p.

2.4 Parcours d'écoute qualifiée : une approche sonore d'un quartier

Nicolas Boyer, Nicolas Tixier

Responsable scientifique Jean-François Augoyard (CRESSON UMR 1563)

2.4.1 Présentation

2.4.1.1 Méthode : Parcours d'écoute qualifiée

En amont et en complément des techniques habituelles de relevés métrologiques, une approche plus qualitative de l'environnement sonore urbain amenant à la notion d'ambiance a été conduite. Pour cela, nous avons proposé une approche *in situ* par une technique adaptée de la méthode des parcours commentés [89] : il s'agit d'un dispositif d'amplification acoustique, permettant une sur-qualification des phénomènes sonores.

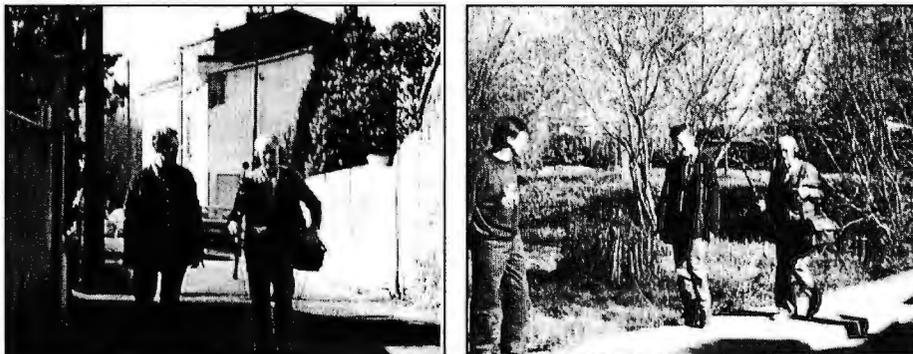


Figure 52 : *Parcourant écoutant* équipé d'un double système d'enregistrement synchronisé

1. L'écoute amplifiée : micro directionnel + perche dirigée par l'écouter + enregistrement D.A.T. de l'environnement sonore + casque (la bande est étalonnée en niveau dB(A), permettant une exploitation métrologique ultérieure).
2. Commentaires : micro-cravate + enregistrement Dictaphone de ses descriptions.

Ce dispositif technique aide ainsi les personnes à parler de ce qui d'habitude va de soi et s'exprime difficilement : notre environnement sonore ordinaire. Un enquêteur accompagne le participant pour le guider, et éventuellement régler les problèmes techniques ou relancer ses descriptions. Cette présence est nécessaire pour contextualiser et relativiser les commentaires lors des phases d'analyses.

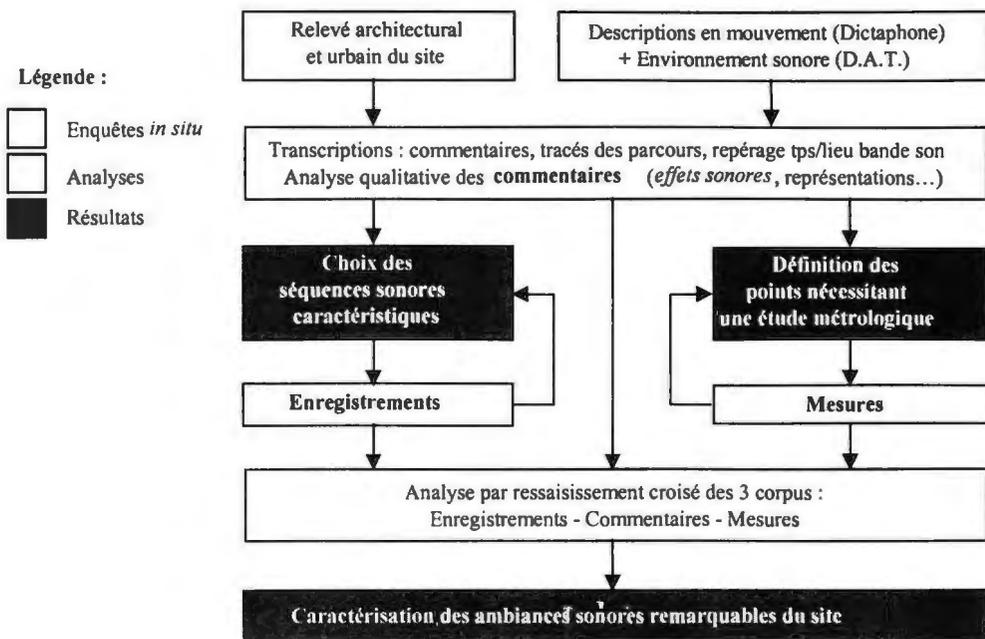


Figure 53 : Schéma de la méthode mise en œuvre

Pour illustrer cette méthode, une séquence issue de l'étude nantaise, entreprise à Rezé, sert d'exemple simplifié. Le participant emprunte un chemin de terre battue, puis une route gravillonnée, dans un quartier pavillonnaire limitrophe d'une zone urbaine plus importante (commerces, immeubles, carrefours, tramway...).

2.4.1.2 Terrain

2.4.1.2.1 Situation

Le terrain d'étude est un quartier de Rezé. Commune de la Loire-Atlantique, Rezé fait partie de la banlieue sud de Nantes, située sur la Loire.

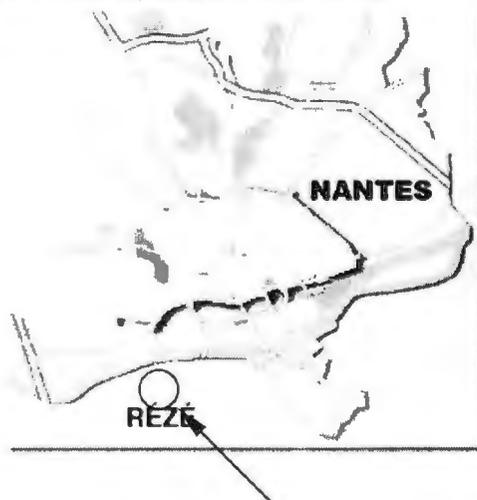


Figure 54 : Localisation du terrain d'étude

Ce site a été choisi en raison des modifications importantes qu'il devait subir. Le réaménagement de l'axe routier périphérique en « voie urbaine » est prévu d'octobre 1996 à juillet 1997. Les travaux vont transformer cette grande pénétrante d'accès au cœur de l'agglomération dans le but de mieux desservir les quartier alentours (mise en

2.4.1.3 Relevés

Il a été effectué un relevé photographique du site. Chaque photographie numérique ou panorama est localisée par un point et un angle d'orientation d'où la prise de vue a été faite. Les numéros des photographies concernant chaque bâtiment sont indiqués (de 1 à 131).

Un relevé typo-morphologique a été effectué. Il consiste en une caractérisation du bâti. Le tout est stocké dans une base de données. Une fiche type est présentée à la suite du relevé photographique.

Les critères (rubriques du fichier) utilisés pour ce relevé sont les suivants :

Numéro du bâtiment

Etage : Sol, R, R+1, R+2...

Toiture : Plat, < 45°, ≈ 45°, > 45°

Couverture : goudron, tuiles, ardoises, zinc,...

Façade : Pierre, crépis fin, crépis gros, bois, métal, vitre, béton lisse,...

Activité : habitation, école, commerce, entrepôt, garage, mixte, jeu,...

Observations : texte libre

Références photographiques

Zones :

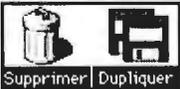
- 1 Carrefour automobiles
- 2 Place du marché
- 3 Passage puis pont
- 4 Traversée du village
- 5 Rue Julien Marché
- 6 Rue Emile Zola
- 7 Rue du Port au Blé
- 8 Chemin puis stade
- 9 Rue Victor Hugo

Ce découpage correspond à celui des parcours commentés. Il respecte principalement les changements typo-morphologiques du site et les logiques de cheminement (changement de rue, de type d'espace...)

Numéro :	13	Zone :	7 Rue du Port au Blé
Etage :	R	Activité :	Ecole
Toiture :	< 45°	Référence photo :	50,54,56,57,58
Couverture :	Tuiles		
Façade :	Crépis fin		

Description :

Renseignements : entretien avec la directrice
 190 enfants de la petite section maternelle au CM2, soit de 3 ans à 11 ans environs
 8 enseignants et 12 personnes de service
 Restauration : 100 à 120 personnes
 Horaires : 8h45 - 11h45 et 13h45 - 16h45 le lundi, mardi, jeudi vendredi et le samedi matin deux fois sur trois. Le mercredi l'école est ouverte de 9h30 à 11h30 pour une activité de bibliothèque de quartier.
 Récréation : 10h30 - 10h45 et 15h15 - 15h30 pour le primaire
 10h30 - 11h00 et 15h15 - 15h45 pour la maternelle
 Etude jusqu'à 19h00, récréation de 16h45 à 17h00, 17h15.
 Sonnerie pour la fin des récréations.
 Les parents attendent côté rue du Port au Blé



Supprimer | Dupliquer



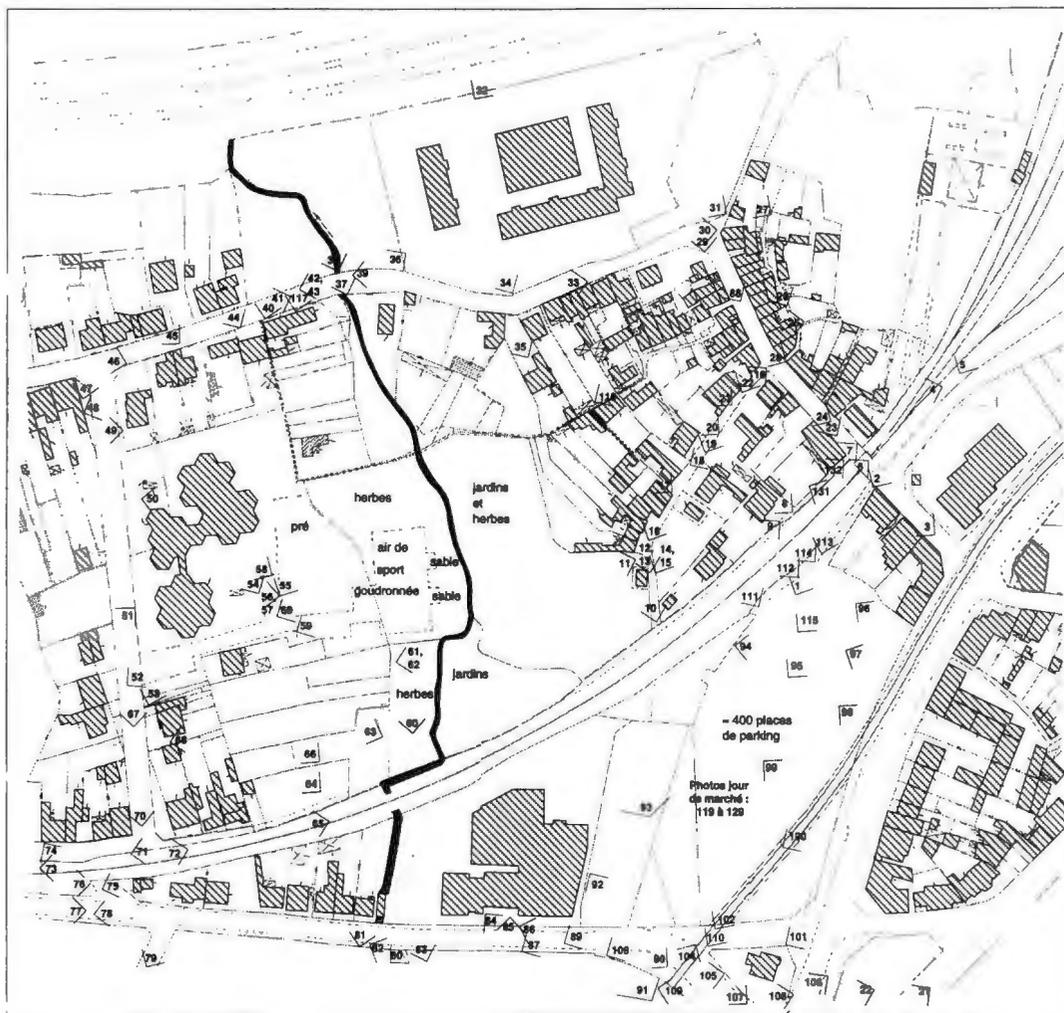
Annuler | Valider




Bati	
Numéro	L
Etage	A
Toiture	A
Couverture	A
Façade	A
Activité	A
Observation	T
Ref_photo	A
Zone	A
Photo_1	I
Photo_2	I

Structure du fichier

Figure 56 : Base de données : fichier relevé typo-morphologique



Extraits :



N° 31



N° 46



N° 91

Figure 57 : Relevé photographique : carte des prises de vues

2.4.2 Analyse

2.4.2.1 Tableau des participants

Date	Heure début	Participant	Sexe	Age	Critère 1	Critère 2
12/03/97	21:00	Nicolas Tixier	Masculin	30	Enquêteur - DEA Cresson	3 demies journées sur le site
13/03/97	11:00	Guy Emile monographie	Masculin	85	Retraité, jardinier (W hopital avant)	Habite depuis 41 ans maison
13/03/97	15:30	Valérie	Féminin	30	Secrét. administrative (au chômage)	15 ans dans le quartier
14/03/97	10:15	Nicolas Boyer	Masculin	23	Enquêteur Architecte	5 jours sur le site
14/03/97	14:00	Benoît	Masculin	26	Doctorant LCPC	Connaissance légère du lieu
15/03/97	14:30	Annick	Féminin	50	Enseignante école Port au Blé	Très bonne connaissance
15/03/97	16:12	Jean-Jacques	Masculin	44	Chauffeur de bus	Ne connaissait que la place
17/03/97	19:15	Martine	Féminin	40	Assistante commerciale	Très bonne connaissance du lieu
18/03/97	12:50	Aïcha	Féminin	23	Etudiante algérienne DEA au CERMA	Aucune connaissance du lieu
18/03/97	13:25	Karima	Féminin	24	Etudiante algérienne DEA au CERMA	Aucune connaissance du lieu

2.4.2.2 Consignes de transcription

Comme à chaque fois que des commentaires ou des discussions enregistrées sont à mettre par écrit, des problèmes de transcriptions interviennent. Aux vues des différentes phases d'analyses et d'une *aisance* de lecture à sauvegarder, les règles suivantes ont été posées :

- Tout conserver.
- Ponctuer les commentaires pour respecter au mieux le rythme des phrases, les styles interrogatifs ou affirmatifs nécessaires et en faciliter ainsi la lecture.
- Mettre les interventions de l'enquêteur ; donc indiquer qui parle : « **Enquêteur :** » puis « **E. :** » et le prénom ou code du participant, « **Salomé :** », par exemple. Revenir à la ligne entre les changements de personne.
- Préciser entre parenthèses les réaction non-verbales explicites. Par exemple : (rire), (raclements de gorge), (ton plus fort), (toux), (parle en même temps que...), (prononciation spéciale), etc., ainsi que quelques remarques nécessaires à la compréhension des commentaires (utilisation très spéciale de la perche et du micro,...).
- Préciser entre crochets les problèmes de transcription :
 - [?] quand il y a un doute sur la compréhension lors de la re-écoute.
 - [inaudible] quand une partie de l'écoute l'est.
- Signifier les silences et leur longueur par des points de longueur variable :

« Je n'ai pas fait attention.....heu je ne sais pas »

- Faire très peu de transcription phonétique qui pourraient entraîner des difficultés de lecture.
- Transcrire les onomatopées (tout au moins essayer) et les transcrire en lettres majuscules : VRRROUMMM, CLAC CLAC...
- Mettre des guillemets pour préciser ce qui est lu par les parcourants :
« Je passe devant, heu, la pâtisserie “Au blé doré” sur ma droite... »

2.4.2.3 Transcription des commentaires

Pour monter la complexité et la richesses des données recueillies lors des enquêtes, nous présentons un extrait du parcours commenté de Martine :

Lundi 17 03 97 Début : 19h15 Durée : 35 mn Météo : un peu froid,
Fin : 19h50 temps gris

Observations : Habite depuis sept années le quartier. Travaille quelques heures par semaine depuis trois mois à la boulangerie « Aux délices du château ».

Zone 1 :

Martine : alors, je démarre, je suis au Laboratoire Médical, donc heu..... j'entends mes pas..... j'entends, heu..... c'est marrant, on dirait un bruit de vagues..... des voitures..... encore.... voitures qui passent sur passage piéton..... il est lourd, oui, c'est lourd à deux mains....

Enquêteur : oui, comme ça, à deux mains (en parlant du micro et de la perche).

Martine : alors, il n'y a pas de voiture, c'est calme, j'entends mes pas..... je m'engage dans le rond point.... voiture dans le rond point, ça fait du bruit de vagues..... voiture à l'arrêt qui démarre..... voiture qui redémarre à mes pieds..... j'entends toujours mes pas. Je le signale toujours ?

E. : oui, parce que, oui, par contre vous pouvez dire heu quel son ça fait. Est-ce que ça fait des SCHRRRR SHRRRR ou est-ce que ça fait des sons....

Martine : ah, ça fait des, des claquements, des claquements avec, avec le sable qui crépite sous mes pieds j'entends..... les voitures qui passent sur les rails de chemin de fer (en fait du tramway), une espèce de bruit de TTTTTRRRLLLL je sais pas quoi....

E. : C'est exactement ça.

Zone 2 :

Martine : alors là on longe la ligne de tramway..... toujours mes pieds qui claquent et le train qui arrive (en fait le tramway) voilà..... il ralentit.... WHIZZZZ, un espèce de sifflement..... voilà, il siffle encore. Il s'arrête..... Je suis toujours le long de la ligne de tram..... j'entends moins les voitures..... le tram redémarre, ça me siffle un peu dans les oreilles, j'entends les voitures qui passent sur les passages, ça fait..... comment définir le bruit des voitures qui passent sur un passage piéton ? (tentative d'onomatopée un peu inaudible)..... beaucoup de voitures, et ça fait toujours le même bruit, VRRROUM VRRROUM..... on traverse la.... la ligne de tram.... mes pas claquent, mes chaussures claquent toujours... CLAC CLAC..... VRRROUM les voitures toujours.... une moto.... je m'éloigne de la ligne de tram et je m'éloigne de la route..... j'entends des oiseaux !..... il y a un peu d'arbres autour de nous.... je traverse la place du marché..... j'entends le tram derrière moi.... un autre.... le bruit est plus calme.... la clochette du tram..... VRRRUMMM il redémarre.... je l'entends très fort..... toujours sur la place du marché....

Zone 3 :

On se dirige heu..... vers..... une ligne de chemin de fer..... avec une route qui va passer au-dessus.... toujours le bruit du tram intense derrière moi..... le sifflement... ça fait sifflement oui..... ça crépite sous mes pas parce qu'il y a du sable sur le goudron.... une espèce de petit chemin piétonnier, pas piétonnier, heu.... enfin si goudronné, piétonnier.... avec du sable... SHRAAA SHRRRII SHRRRIIT SHRRRIIT ça fait SCHRIIT SCHRRRIIT sous mes pieds..... ça c'est le bruit de mes pas (en rapprochant le micro du sol) (rires).... voilà, on arrive au bord de.... de la rue Julien Marchais et on va traverser le pont qui enjambe la ligne de chemin de fer..... donc pas de train bien sûr, c'est calme..... j'entends quand même un bruit de fond qui est... qui est le tram... qui est les voitures.....

Zone 4 :

Là on s'engage dans un petit chemin goudronné avec du sable aussi.....ça crépite toujours sous mes pas SCHRIIT SCHRRRIIT... vous entendez les petits oiseaux ? CUI CUI, il y a un petit peu de verdure, il y a des jardins autour de nous... toujours nos pas alors là vous entendez, moi j'entends les oiseaux.... j'entends.... un bruit de fond, c'est indéfinissable, je ne peux pas l'imiter, c'est... comme des trains au loin... là on est dans un, dans un tout petit chemin étroit goudronné avec des jardins, heu, particuliers à côté, un mur, sur ma droite.... la ligne de chemin de fer en contrebas... et le bruit des voitures au fond VVVRRR VVVRRR le bruit de fond...

Habitante : bonjour monsieur, ça va depuis l'autre jour ?

Martine : bonsoir madame

Habitante : Alors vous êtes toujours au travail ?

E. : bonsoir madame

Habitante : ça continue (rires)...

Martine : ah mais je vois que monsieur est connu !

Habitante : oh bien oui, il est passé, ça fait combien de temps deux ou trois jours ? Avec l'autre monsieur sinon... [inaudible]

Martine : bonne soirée madame.

Habitante : merci vous aussi.

Martine : ça c'était la petite entracte avec la mamie dans son jardin.... qui a l'air de connaître mon guide..... et le monsieur est dans son poulailler (rire)

(le chien aboie à notre passage)

Martine : ah, je viens d'entendre le chien...

Habitant : [inaudible]

Martine : alors là on parle avec le monsieur qui est en bordure de la ligne de chemin de fer et on vient d'entendre son chien aboyer

Un habitant : je viens de donner à manger à mon chien dans le creux de ma main, autrement il [inaudible].....

Martine : ah, voilà, le chien mange..... votre chien mange dans le creux de votre main ? Sinon il ne mange pas ?

Habitant : [inaudible]caprice.

Martine : oh ça,..... ah oui c'est un caprice à mon avis.....

(rires des deux personnes)

E. : oui, on continue, bonsoir.

Habitant : alors vous faites tout le tour....

Martine : au revoir.

(le chien aboie)

Martine : alors voilà, le chien, il nous dit au revoir. Bon..... on longe toujours ce petit chemin..... j'entends comme un bruit de vagues, c'est marrant cette espèce de VRRRUMM, cette espèce de ressac qu'on entend, alors qu'on n'est pas à la mer du tout. Là on est sur un chemin de terre.... on se croirait à la campagne d'un seul coup..... parce que derrière moi, je n'ai.... derrière moi, j'ai la ville... et là j'ai l'impression de rentrer à la campagne..... parce que je ne vois ni la ligne de chemin de fer, ni les voitures..... on entend que nos pas..... je me suis arrêtée parce qu'en fait on entend les oiseaux et je voulais capter ça en fait.... mais il y a toujours ce bruit de fond comme si c'était la mer au loin..... on reprend une petite route qui est goudronnée avec des graviers.... donc on entend toujours.... (micro dirigé vers le sol).... voilà.... les graviers sous les chaussures..... là ! (reconnaissance immédiate) Je viens d'entendre la cloche du tram, j'oriente mon micro à droite en fait vers la ligne de tram et je l'ai bien entendu... sans regarder..... je remets le micro droit devant..... et j'ai toujours ce bruit de fond..... là je n'ai pas de bruits particuliers en fait qui viennent troubler..... cet espace, heu.... un peu de verdure..... comme si on était à la campagne..... j'entends des voix et je vois personne.... comme si des gens parlaient, comme si des enfants jouaient dans une cour..... là, c'est une fenêtre ouverte, je viens d'entendre la, la télévision, ou la radio.....

Zone 5 :

Là je m'approche, on s'approche de , d'une rue..... voilà, ça c'est une voiture (elle attend que la voiture soit passée pour parler) qui vient de descendre la rue doucement parce qu'il y a un pont avant..... je descend moi-même cette rue..... et je vais traverser la rue.... là vous entendez une voiture qui monte, auto-école..... et ça c'est les voitures qui redescendent.... un bruit de diesel.... trois voitures.... le VRRRRMMMM on entend que ça en fait..... voilà, ça s'éloigne....

Zone 6 :

Alors je suis dans une rue un peu moins fréquentée..... et qui est la rue Emile Zola... j'entends des volets qui se ferment, je vois rien, j'entends des volets.... voilà, une voiture derrière moi, je me retourne.... un diesel VRRROOOUM, un bruit infernal, encore une voiture.... qui me couvre tout les autres bruits en fait.... là c'est quoi [?]...... un véhicule utilitaire.... suivi d'une voiture. Là c'est le crépitement de nos pieds passent [?] sur des cailloux.... et là il y a plein de voitures à l'arrêt qui manœuvrent.... qui couvrent tout le reste... et là ça passe plus près de moi, parce que c'est une rue étroite.... une 2 chevaux, vous avez reconnu la 2 chevaux ?... Quand les voitures s'éloignent on retrouve nos pas, on re-entend nos pas... les oiseaux !..... des gens qui parlent, j'entends des gens qui parlent que je ne vois pas..... voilà, j'entends des gens.... qui parlent.... ça vient.... je ne sais pas d'où ça vient.... je sais pas d'où ça vient !..... voilà, c'est très clair.... j'entends des enfants, on longe un immeuble.... on longe un immeuble de quatre cinq étages... six étages..... et les enfants sont dehors, je les vois pas..... SHRRITCH SHRRITCH, c'est nos pas.... voilà, les enfants sont à ma droite... eu dessus d'une heu... d'une petite dune d'herbes en fait, au pied des immeubles..... les enfants jouent crient.... voilà on les entend bien.... on entend toujours les oiseaux.... c'est un quartier verdoyant, c'est un quartier où il y a quand même des arbres...

Un enfant : oh y a un micro !

Martine : voilà les enfants m'ont vu. Ça les.... ça les intéresse... ah on a vu le micro... ah ouais, reportage en direct... Est-ce qu'on entend quelque chose là ? Rien. (Micro au dessus d'une plaque d'égout)... C'est une bouche d'égout. Un camion..... qui sort des immeubles... qui est passé sur des graviers..... et ça a fait un bruit de craquement, de crépitement... j'entends un train ?.... j'entends un train !... C'est un train ?.... C'est un avion !!!.... Martine, c'est un avion... c'est un avion..... un avion qui passe haut, très haut parce que je ne le vois pas.... une voiture..... une voiture encore... qui s'éloigne... ça y est je vois l'avion au loin... il tourne pour atterrir... là c'était un vélo, un VTT... j'entends toujours ce VRRR, ce grondement d'avion.... là vous avez un petit cours d'eau, on traverse un petit cours d'eau... je vous dis pas la couleur de l'eau, mais c'est de l'eau... GLOU GLOU GLOU (le micro est descendu au niveau de l'eau sous le pont).... alors

c'est un tout petit cours d'eau, l'eau à mon avis n'est pas potable du tout... je continue... toujours ce bruit de fond... je signale toujours ce bruit de fond ? ... toujours ce bruit de fond qui est certainement du... parce que je m'oriente directement face à elle, à la quatre voies... qui est à ma droite, à droite de la rue Emile Zola... là une voiture arrive sur moi... voilà... ah le bruit... ça c'est le bruit que je fais sur du sable, c'est en travaux, sur le trottoir... ce bruit très fort, c'est.... toujours cette route, cette, cette quatre voies qui résonne (prononcé avec insistance et prolongation : rrréssonne)... un bruit constant... le VRRRUMMM d'une voiture qui ralentit, encore une voiture..... là je viens de passer sur une plaque d'égout et mon pied a traîné... sur la plaque... on est toujours rue Emile Zola, une voiture roule vite... une autre l'a croisé plus doucement... je vais pas imiter le bruits de la voiture à chaque fois (rires)... il y a pas mal de petits travaux et le bruit de nos pas change... alors là, je traverse... un craquement, je viens d'entendre un craquement : un portail... est-ce que vous entendez les oiseaux, moi je les entends bien (arrêt pour entendre les oiseaux)... il y a les oiseaux qui dominent et au fond ce... ce bruit... incessant.

Zone 7 :

Alors nous rentrons dans la rue, rue du Port au Blé... toujours des voitures qui viennent de passer rue Emile Zola..... sur cette rue, c'est un peu plus calme, parce que c'est un axe moins fréquenté..... une petite rue... le bruit des oiseaux domine..... toujours ce bruit de vagues au fond j'entends..... une voiture vient de passer rue Emile Zola, mais on l'entend moins..... un vélomoteur doit passer dans la rue certainement parce que je l'entends..... on passe devant une école, l'école du Port au Blé, donc à cette heure-ci il est 19h30 alors évidemment c'est calme, j'entends que mes pas dans le... le casque..... vraiment c'est plus calme, hein, mon sentiment dans cette rue, c'est..... c'est plus agréable... une voiture vient de s'engager dans la rue..... voilà (elle vient de passer)..... je viens de faire un tour sur moi-même et j'entends toujours les oiseaux, et toujours ce bruit de fond... le bruit des voitures..... qui doivent passer dans la rue Emile Zola.....

Zone 8 :

Alors là je m'engage... dans un petite heu impasse..... j'ai l'impression que ce bruit de fond est plus fort maintenant... parce que c'est plus... il y a moins... c'est plus libre en face de moi... il y a plus de verdure..... c'est plus aéré (prononcé avec de l'espace entre les lettres : a é r é), donc les bruits sont moins étouffés... un chien.... les oiseaux toujours..... des enfants, des enfants ou des gens qui parlent, non, des enfants..... toujours des... le bruit d'une voiture qui vient de passer..... mes pas claquent parce que c'est bitumé... oui, voilà, des enfants qui jouent quelque part..... qui parlent, j'ai l'impression qu'ils sont tout près..... là je m'engage dans un... dans une heu... dans un endroit qui n'est pas fréquenté par des voitures, qui peut être fréquenté que par des enfants à pieds, c'est goudronné, il y a un peu de pelouse, effectivement les enfants étaient là... à droite..... j'ai entendu " encore ", ils nous connaissent ? (rires) d'accord...

Un enfant : qu'est-ce que vous venez faire ?

Un autre : écouter les sons de la rue.

Martine : voilà... ils ont un peu compris les enfants, je les ai bien entendu là.

Un enfant : et écouter les oiseaux.

Martine : voilà... j'entends les oiseaux et j'entends les enfants... j'entends aussi ce bruit de la ville là..... le tram... un chien..... c'est toujours bitumé, c'est toujours du goudron par terre..... nos pieds claquent... les oiseaux, c'est incroyable, c'est très fort... on se rapproche de la ligne de chemin de fer..... j'entends comme si c'était le bruit d'un... d'un train sur des rails... mais je ne sais pas ce que c'est..... bon alors on vient de me dire que c'est un cul de sac, on retourne..... toujours les enfants évidemment..... et là ça fait du bien parce que... on se sent... on n'entend moins les bruits de la ville, moins le bruit des voitures, heu le ronronnement (prononcé en faisant rouler les r) de la ville ici et pourtant on est à deux pas..... j'entends comme des ronronnements des..... pas ronronnement c'est..... des choses qui passent très vite, je peux pas..... le tram s'arrête, je l'entends..... des motos, j'entends un bus ? Non..... le moteur..... d'une moto

plutôt... CUI CUI toujours les oiseaux.... la nuit tombe... ce qui est assez fascinant c'est qu'on entend tout le temps le... le bruit de fond, cet espèce de ressac comme si on était à la mer et on ne voyait pas la mer... c'est un bruit constant en fait, même si heu..... d'autres bruits viennent se greffer dessus.... c'est... voilà... le, le, comme des freins, je pense que c'est le tram que j'ai entendu...

Zone 7 :

On se rapproche d'une voie, d'une route.... j'entends des voitures qui passent..... toujours nos pieds qui claquent, on est sur un trottoir, toujours sur la rue du Port au Blé, là... et on s'approche.... là une voiture qui prend un virage.... voilà.... et une autre qui arrive derrière moi.... qui s'engage dans le virage, voilà... alors là on va s'approcher de la rue... du passage à niveau... vélomoteur... voiture, vélomoteur en même temps... alors là ce sont des vélomoteurs, des jeunes.... qui accélèrent qui ralentissent, qui passent devant, qui sont passés sur le passage à niveau.... voilà qui redémarrent, ah ça, ça fait un bruit infernal... voiture... toujours des voitures, je traverse le passage à niveau... des vélomoteurs viennent de démarrer, je traverse le passage à niveau, les voitures sont... rue.... rue....

Zone 9 :

Je sais plus c'est rue Victor Hugo ça ? Donc là je me rapproche de plus en plus de cet axe qui est un axe important... voilà une voiture à l'arrêt qui démarre au stop, voilà... et là je me... je suis toujours... alors là je m'engage donc on a bien dit dans la rue Emile Zola ?

E. : Victor Hugo.

Martine : heu oui Victor Hugo, excusez moi, Victor Hugo, voilà... alors là c'est très passé en fait hein ? Je traverse la rue, sans me faire écraser parce que ça roule vite ici.... voilà... alors là ça n'arrête pas, le bruit des voitures domine, je n'entends plus rien d'autre.... si les oiseaux là ! Ça c'est un chien qui passe, CLIC CLIC, ses ongles sur le goudron (le micro est mis au niveau du sol)..... alors là vous avez les oiseaux.... que j'entends... et maintenant qu'il n'y a plus de voiture, je, je, je j'entends ce ronronnement que j'avais tout à l'heure.... là toujours des voitures qui arrivent... toujours une voiture... une autre qui la croise, deux.... trois voitures... une moto, non un scooter, enfin [inaudible].... des voitures, des voitures... toujours voitures... là tout est mélangé, j'entends un peu les oiseaux, j'entends un peu les voitures... beaucoup les voitures là ! ... ah ben une voiture de flics qui roule à toute allure ah ben bien... je passe auprès d'un chantier.... rien de spécial.... ça crépite sous les pas parce qu'il y a du sable.... une voiture vient de s'engager là, quelqu'un vient de claquer une portière... toujours une voiture... toujours des voitures... je passe devant un chantier... toujours le ronronnement des voitures... une voiture qui démarre... le tram... qui démarre... VROUUUMM... voilà.... les voitures qui... s'arrêtent au feu... là je... on se rapproche de la ligne de tram... on revient pratiquement au point de départ.... toujours boulevard Victor Hugo ou rue Victor Hugo..... là les voitures viennent de passer le passage... voilà les rails, elles viennent de franchir les rails, le CLAC CLAC CLAC CLAC...

Zone 1 :

Toujours ce bruit de fond plus calme... je traverse la ligne de... les rails..... voilà, ça c'est des voitures qui viennent de passer les rails.... ça claque très fort... là ce n'est plus du bitume, c'est, ce n'est pas goudronné le trottoir, ce sont des tous petits pavés, ça claque différemment... je passe devant la Caisse d'Epargne, j'arrive au rond-point là... d'où on est parti tout à l'heure... j'entends des cris, des gens, des jeunes... qui sont en fait à ma droite là... des diesels... des voitures dans le rond-point... VRRROUM bruit sonore... ah deux petites minettes qui papotent... toujours ce bruit fort dans le rond-point hein...on s'éloigne des filles... ça y est.... super... oh ça demande un peu de concentration quand même non ? Oh....

2.4.2.4 « La table et les ciseaux »

Cette étape fait suite à la retranscription des parcours. Chaque tableau correspond au découpage d'une zone. Le découpage par participant est gardé à l'intérieur de chaque tableau ce qui fait que des commentaires sont conservés dans leur quasi intégralité. Le découpage par séquence « signifiante » se fait selon cinq façon d'appréhender le sonore. Les trois premières correspondent à trois des quatre écoutes de Pierre Schaeffer [99] à savoir :

- **ouïr** (correspondant souvent au fond sonore)
- **entendre** (correspondant souvent à l'ambiance sonore)
- **écouter** (correspondant souvent aux signaux sonore)

L'analyse des commentaires nécessite de rajouter deux autres critères :

- **les sons liés au participant ;**
- les commentaires concernant une **qualification générale** de l'espace sonore.

Une même séquence « signifiante » peut parfois se retrouver dans plusieurs colonnes⁸.

Carrefour automobile

<i>Parcours</i>	<i>Fond Sonore (ouïr)</i>	<i>Sons liés au participant</i>	<i>Signaux Sonores (écouter)</i>	<i>Signaux Sonores (écouter)</i>	<i>Qualification générale</i>
<i>Nicolas T 12 03'97 21h00</i>	- Y a un bruit de fond continu. En fait, on arrive au parking. - J'entends quasiment que la circulation.	- J'entends la voiture qui arrive devant moi..... - Il y a vraiment beaucoup de monde au parking. Au rond point (rires). - Les voitures s'arrêtent aux feux, ou qui accélèrent au rond-point.. Y a plus de voiture, c'est beaucoup plus calme d'un seul coup. - Une voiture au rond-point. Qui change de vitesse...	- elle change de vitesse au parking. Elle change de vitesse au rond-point. Ça fait deux voitures qui passent au rond-point, il y a une espèce de passage en roue libre ou presque, où le moteur est en changement de vitesse... Ah, là, c'est une camionnette, on entend ses freins. - Les voitures qui traversent le, le passage du tramway, (...) on entend ce, ces quatre coups. A chaque fois que la voiture traverse, là y en a une... c'est presque à retardement. - Le scooter on l'entend vraiment moins sur le passage du tramway, mais les voitures ça c'est vraiment euh, très caractéristique encore.		
<i>Valérie 13-03 97 15h00</i>	- Oh, c'est, c'est carrément stressant. C'est stressant dans..... ça pourrait se calmer. J'attends ça avec impatience. Parce qu'en fait le bruit des voitures masque absolument tout autre bruit possible. Je vois le tramway que je n'entends même pas.	- en fait, les bruits dérangent nettement quoi. Ces voitures, ces circulations. En plus on est encaissé entre deux rues. - Un camion.....Donc là sur la place. Là c'est un bus qui passe.....	- Là c'est une banque qui vient de se refermer, avec un passant qui sort et on a un petit peu de mal à le distinguer dans... parmi toutes ces voitures. - Une voiture qui klaxonne au loin. Pas si loin que ça d'ailleurs.....		- Donc là c'est Alors là on pouvait rien dire tellement on entend rien.....

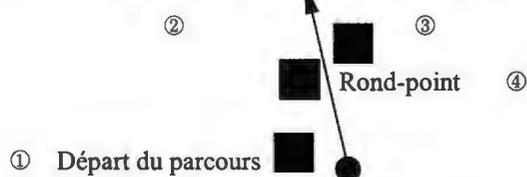
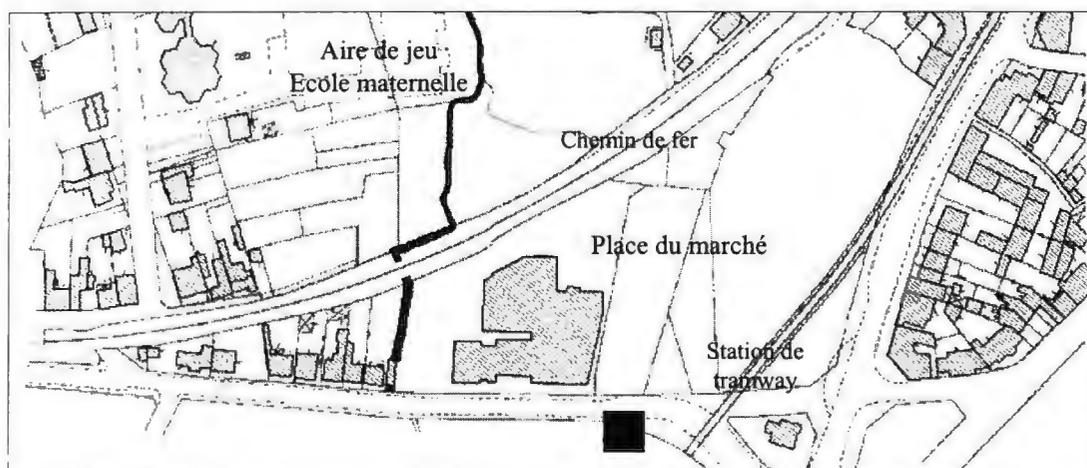
⁸ Pour plus de précisions sur cette méthode, se reporter au volume I de l'étude Vigny-Musset [96].

Parcours	Fond Sonore (ouïr)	Sons liés au participant	Signaux Sonores (écouter)	Signaux Sonores (écouter)	Qualification générale
<i>Nicolas B</i> 14/03/97 10h00	- Circulation, accélération, décélération..... - Voiture, voiture, voiture.	- Les voitures passent. - Ralentissement des moteurs pour laisser passer quelqu'un. - Un T.A.N. (bus) passe. - Une mobylette va démarrer. Une mobylette passe.. - Accélération ... une voiture monte.	- Frein à main. - TACATAC sur le passage du tram, à cause des rails.		- A part la circulation, rien d'autre.
<i>Benoît</i> 14/03/97 14h00	- D'accord, donc là je suis au rond-point juste après le panneau..... au niveau de la banque.... du vent... dans les oreilles..... - un environnement qui a un petit peu grossi encore une fois... - on arrive au rond-point, on va couper le rond-point.. beaucoup de voitures....	- j'entends le camion qui bouge devant moi.... - une voiture qui démarre..... - Bon là j'entends bien le bruit des voitures... accélération désaccélération... le cyclo, mais je ne l'ai pas vraiment entendu, on entend plus d'oiseau du tout.....	- des pneus sur le sol.... - klaxon.... - des pneus sur les rails de tramway.... - un chien.... (il re-aboie) ouais un chien.... - une mobylette derrière nous qui c'est.... (elle vrombit) Whaou, ça tue les oreille ça ! Hou la la malheur, et voilà, c'était une mobylette.... c'était Jacky sur sa mobylette....	- j'entends nos pas par terre.... - plaque d'égout sous mes pieds, que j'ai entendu....	- beaucoup de voitures, un bruit surprenant.... surprenant en densité et en intensité quand les voitures passent très près.... un tout petit peu disproportionné, pour l'instant j'entends que des voitures.... - il y a une sensation de proximité.... très forte. parfois c'est très surprenant des voitures qui arrivent derrière.... - ça fait un peu peur, on a l'impression que les voitures arrivent toutes vers nous, [inaudible].
<i>Annick</i> 15/03/97 14h30	- heu... le roulement de voitures... sans cesse de voitures... c'est ce qui me paraît le plus fort. - mais le.... j'entends surtout les voitures qui sont, qui sont à l'arrêt là.....	- Alors là, j'entends des bruits de, des bruits de mobylette... encore un bruit de mobylette, très désagréable.... - Là j'entends le tramway qui passe.... - heu j'entends les voitures qui redémarrèrent après l'arrêt du tramway.... - J'entends le...oui, le... légèrement le tramway - voilà... des voitures, heu qui arrivent, heu par derrière.... un scooter.... une espèce de scooter... - ça c'est le passage du... de l'autobus.... voilà, bruit d'une voiture qui passe.... redémarrage des voitures.... - là, heu oui, le roulement, le roulement lent des voitures qui, qui arrivent au rond-point....	- une voiture encore plus agréable (ironie), le pot d'échappement peut-être.... un bruit heu.... ben de roulement - j'entends des, j'entends des personnes qui parlent, des voix de personnes... - le redémarrage des voitures, après le feu rouge - voilà, voiture avec remorque, et les rebonds de la remorques sur les rails... nous sommes sur les rails du tramway.... - oui, donc le départ du tramway, sa cloche et son démarrage.... des cris d'enfants !... de jeunes - heu, j'entends le.... freinage d'un bus, j'ai entendu le freinage d'un bus.... le grincement des pneus.... [inaudible], bruit très fort		
<i>J.Jacques</i> 15/03/97 17h00	- Alors à cet endroit-ci ça fait plutôt penser à... au flux et au reflux de la mer.... plus des bimoteurs, enfin des espèces de... d'aéroplanes.... - mais sinon, ça fait toujours l'impression de flux et de reflux.... comme il y a beaucoup de voitures qui passent... ouf, là ça se calme un peu, merci.... - toujours la marée montante et descendante des bagnoles....	- Alors là c'est un rond-point.... qui est déjà effrayant à traverser d'habitude, mais là avec le bruit, c'est encore pire....	- une voix d'enfant, je ne sais pas d'où elle vient ? - j'ai regardé autour, mais je ne vois pas d'enfant, je ne sais pas d'où est venue cette voix.... ah c'est bizarre parce que on dirait que les voix viennent de... le micro est orienté en face et on dirait qu'il y a des, ça prend des voix qui viennent de l'arrière gauche.... - Oui, mais j'ai l'impression que c'est passé parce que c'était une voix aiguë, ou alors, c'est moi qui entend plus les aigus.... - ah là j'ai entendu des voix d'hommes comme si elles avaient rebondi sur le bitume et elles étaient venues... dans le	- ah on n'entend le bruit des pas.... le gravier.... - alors je ne sais pas si ce sont les pas de Nicolas ou les miens qui font le plus de bruit, mais... ah, les pas de Nicolas oui, ça fait du bien ça, j'amène le micro près de ses pieds.... ah ça c'est extraordinaire !.... ah oui, à la fois [?] un film de science-fiction.	- je suis assez surpris, parce que j'ai l'impression que... souvent ça va... pêcher des voix qui sont assez loin... je ne sais pas si je les aurais entendu. bon, ben si jamais il y a un grand bruit à l'instant c'est qu'on se prend un tram dans le dos, parce que... on est à raz de la voie....

Parcours	Fond Sonore (ouïr)	Sons liés au participant	Signaux Sonores (écouter)	Signaux Sonores (écouter)	Qualification générale
			<p>micro tout près....</p> <p>- ce sont les pneus sur les rails, le rythme que ça fait... ah ! des voix, je ne sais pas d'où elles viennent ?..... ah oui, en face....une voix de dame, très aiguë....un diesel....</p>		
<i>Martine</i> 17/03/97 19h15	<p>- beaucoup de voitures, et ça fait toujours le même bruit, VRRROUM VRRROUM....</p> <p>- VRRROUM les voitures toujours....</p>	<p>- et le train qui arrive (en fait le tramway) voilà.... il ralentit.... WHIZZZZ, un espèce de sifflement.... voilà, il siffle encore. Il s'arrête....</p> <p>- une moto....</p> <p>- VRRRUMMM il redémarre.... (le tram) je l'entends très fort.... toujours sur la place du marché....</p>	<p>- le tram redémarre, ça me siffle un peu dans les oreilles,</p> <p>- comment définir le bruit des voitures qui passent sur un passage piéton ? tentative d'onomatopée un peu inaudible</p> <p>- je m'éloigne de la ligne de tram, de la route....j'entends des oiseaux !</p> <p>- la clochette du tram....</p>	<p>- Alors là on longe la ligne de tramway.... toujours mes pieds qui claquent</p> <p>- on traverse la.... la ligne de tram.... mes pas claquent, mes chaussures claquent toujours.... CLAC CLAC...</p>	<p>- Je suis toujours le long de la ligne de tram....j'entends moins les voitures....</p> <p>- j'entends le tram derrière moi.... un autre.... le bruit est plus calme.... (elle est au milieu de place)</p>
<i>Aïcha</i> 18/03/97 12h50	<p>- Pour le moment, j'entends que le bruit des voitures qui passent. Pour le moment y a rien.</p> <p>- A part ça, tout est calme. Il n'y a rien de spécial. Toujours le bruit des voitures qui passent l'une après l'autre...</p> <p>- Y a toujours les voitures qui passent l'une après l'autre et qui font un bruit biens sûr...</p> <p>- On passe le rond-point Il y a toujours le bruit des voitures, les bruits de motos...</p>	<p>- Voilà une voiture qui passe. Ben, elle fait un bruit ordinaire à n'importe quelle voiture. Une moto. Un peu plus de bruit d'une moto qu'une voiture biens sûr.</p> <p>- Je crois que dans le rond-point il y a plus de bruit, de voitures, que où j'étais auparavant... Oui, il y a plus de bruit de voitures par là....</p> <p>- Mais je crois que le bruit de voitures, ici, est moins que, la rue où on vient de passer (en revenant par la rue Victor Hugo)</p>			
<i>Karima</i> 18/03/97 13h25	<p>- J'entends le bruit de la circulation.</p> <p>- Pour l'instant je n'entends que le bruit des moteurs de voitures. Pas autre chose.</p> <p>- Toujours des voitures... Donc il y a le bruit des voitures qui passent.</p> <p>- Et le bruit est constant ici parce que, il y a constamment une circulation.</p> <p>- Je n'entends que le bruit des voitures, je n'entends rien d'autre. Et il augmente ou diminue suivant que la voiture démarre ou s'arrête.</p>	<p>- Euh... il y a une voiture qui passe là. Là, y a plusieurs voitures qui passent, l'une derrière l'autre. Là; y a plus de voitures. Et puis là, ça recommence.</p> <p>- une moto passe, une grosse moto passe.</p> <p>- une voiture s'est arrêtée près de moi....</p> <p>- la circulation n'est plus aussi dense donc j'entends moins....</p> <p>- Là, il y a une voiture qui passe, je suis en train de traverser et je laisse passer les voitures donc il y a un bruit quand même assez important.</p> <p>- un fourgon démarre. Un scooter passe donc il fait un bruit... infernal. et le bruit s'atténue quand la voiture s'éloigne.</p> <p>- On s'approche du rond point. Il y a plein de voitures qui passent, avec leur moteur, je les entends très bien.</p> <p>- des personnes attendent le bus, elles sont en train de parler, mais je n'entends pas très bien.</p> <p>- un bus vient de démarrer.</p>		<p>- Ah, ça c'est moi qui ait tapé le micro contre une voiture.</p>	<p>- Donc là, il y a une circulation très dense au niveau d'une voie assez importante. Donc il y a beaucoup de voitures qui passent, une circulation très dense.</p> <p>- - Donc je disais que les bruits étaient constants parce que la circulation est constante. On peut dire continue. C'est toujours les moteurs des voitures, je n'entends que ça, j'entends pas autre chose.</p>

2.4.2.5 Tableaux de synthèse

2.4.2.5.1 Carrefour automobile



1 • rond-point - emplacement de départ (108)



2 • rond-point à partir de rue V. Hugo (109)



3 • vue à partir du rond-point - bât. adm. (107)



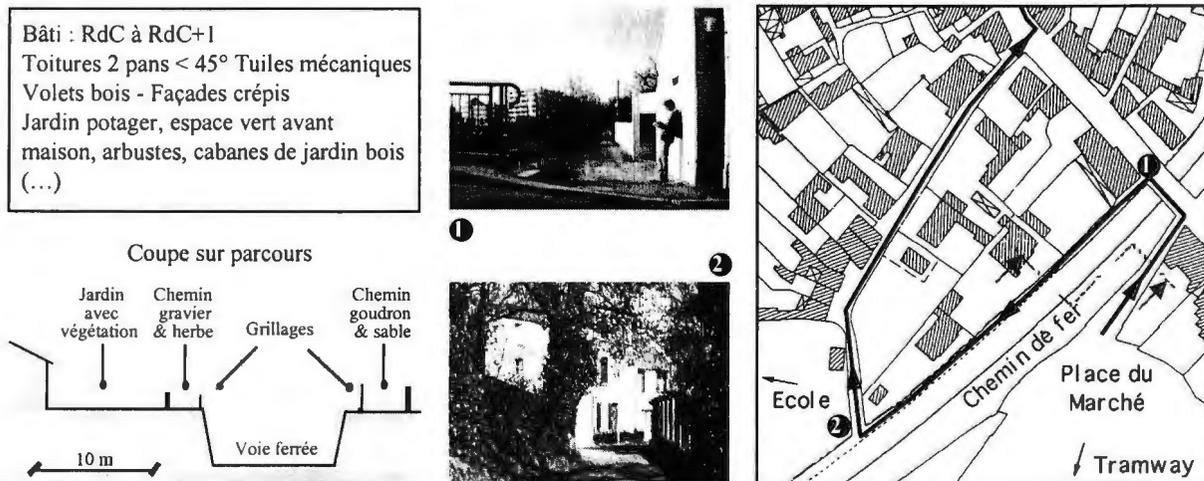
4 • Arrêt bus municipal av. rond-point (106)

Figure 58 : Localisation et illustrations photographique des lieux

Enregistrement (D.A.T.)	Expressions remarquable (extraits) (Dictaphone)	Qualification <i>Effets sonores</i>	Temporalité <i>Séquence</i>	Mesures indicatives	Synthèse Remarques
Flux de voitures	<ul style="list-style-type: none"> - <i>J'entends quasiment que la circulation.</i> - <i>Oh, c'est carrément stressant... ça pourrait se calmer. J'attends ça avec impatience.</i> - <i>voiture, voiture, voiture...</i> - <i>A part la circulation, rien d'autre.</i> - <i>Un trafic très dense, même très surprenant en fait.</i> - <i>Beaucoup de voitures, et ça fait toujours le même bruit, VRRROUM VRRROUM... toujours.</i> - <i>En fait les bruits dérangent nettement quoi.</i> 	Continuum prégnant	Flux, dépendant principalement des heures d'activité de la journée. Horaires de travail.	Niveau sonore élevé	Continuum perçu très négativement, incitant à passer très vite le rond-point.
Flux de voitures	<ul style="list-style-type: none"> - <i>... en fait, le bruit des voitures masque absolument tout autre bruit possible. Je vois le tramway que je n'entends même pas.</i> - <i>le cyclo, mais je ne l'ai pas vraiment entendu, on n'entend plus d'oiseau du tout.</i> - <i>Donc là c'est... Alors là on pouvait rien dire tellement on entend rien.</i> 	Masque			Les participants s'arrêtent même de parler, pensant que leur voix sera couverte par le son des voitures, ils attendent que ça passe ou que eux soient passés.
Absence du flux	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Y-a plus de voiture, c'est beaucoup plus calme d'un coup.</i> - <i>Maintenant la circulation n'est plus aussi dense.</i> 	Coupure	Moments « creux » de la journée	Niveau sonore	Apaisement
Variations moteurs	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Une voiture au rond-point qui change de vitesse.</i> - <i>Ça fait deux voitures qui passent au rond-point, on a un peu l'impression que, il y a une espèce de passage en roue libre ou presque, où le moteur est en changement de vitesse.</i> - <i>circulation, accélération, décélération...</i> - <i>Bon, ben là j'entends bien le bruit des voitures... accélération, désaccélération.</i> 	Rythmicité <i>Décrescendo</i> <i>Crescendo</i>	Séquence sonore des moteurs autour du rond-point, en général, désaccélération, changement de vitesse parfois un temps très court en « roue libre », puis accélération		
	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Ouh la la malheur... et voilà, c'était une mobylette.</i> - <i>Une mobylette va démarrer... une mobylette passe BRRRAAMM...</i> 	Anticipation <i>Crescendo ou irruption</i>	Vision puis audition en crescendo si le véhicule poursuit le chemin anticipé ou démarre par exemple		On voit un véhicule arriver, on craint par avance la puissance sonore de son passage.
Sons caractéristiques de véhicules	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Alors là, j'entends des bruits de mobylette... encore un bruit de mobylette, très désagréable.</i> - <i>Une mobylette derrière nous qui c'est (elle vrombit) Whaou. ça tue les oreilles ça !</i> - <i>Une voiture encore plus agréable (ironie), le pot d'échappement peut-être... un bruit heu... ben de roulement.</i> - <i>heu, j'entends le... freinage d'un bus, j'ai entendu le freinage d'un bus... le grincement des pneus.</i> - <i>un diesel</i> - <i>Il y a une moto qui passe. une GROSSE moto qui passe.</i> - <i>Là, il y a un scooter qui passe donc il fait un bruit... infernal.</i> - <i>Là il y a un bus qui vient de démarrer.</i> 	Emergence <i>Irruption</i> Signaux sonores		Variation en intensité ou en fréquence.	

Enregistrement (D.A.T.)	Expressions remarquable (extraits) (Dictaphone)	Qualification <i>Effets sonores</i>	Temporalité <i>Séquence</i>	Mesures <i>indicatives</i>	Synthèse <i>Remarques</i>
Passage de véhicules sur les rails du tramway ou sur les passages pour piétons	<p>- Les voitures qui traversent le, le passage du tramway, font un son euh, enfin, elles coupent les 4 rails du tramway, et on entend ce, ces 4 coups. A chaque fois que la voiture traverse, là y en a une... voilà, c'est presque à retardement.</p> <p>- voilà, voiture avec remorque, et les rebonds de la remorque sur les rails... nous sommes sur les rails du tramway... oui, on entend différent quand les voitures passent sur les rails du tramway.</p> <p>- TACATAC sur le passage du tram, à cause des rails.</p> <p>- Des pneus sur les rails du tramway...</p> <p>- Là le bruit que l'en entend et bien ce sont les pneus sur les, les rails, le rythme que ça fait...</p> <p>- J'entends les voitures qui passent sur les passages, ça fait.....</p> <p>comment définir le bruit des voitures qui passent sur un passage piéton ? (tentative d'onomatopée un peu inaudible).</p>	Répétition	Sons très bref généré à chaque passage d'un véhicule. Séquence différente pour les bus et les camions.	Intensité variant en fonction entre autre du poids du véhicule	Reconnaissance du type de véhicule en fonction du claquement : voiture, camion, bus, moto) et de sa vitesse.
Tramway	<p>- J'entends le... oui, le,... légèrement le tramway.</p> <p>- Là, j'entends le tramway qui passe.</p> <p>- Le tram redémarre, ça mes siffle un peu dans les oreilles.</p> <p>- La clochette du tram...</p> <p>- VRRRUMMM il redémarre... je l'entends très fort.</p> <p>- et le tram qui arrive... voilà... il ralentit... WHZZZZ, un espèce de sifflement... voilà, il siffle encore. Il s'arrête.</p>	Emergence Crescendo Signal sonore	Fréquence selon les horaires et les jours		Les gens citent beaucoup plus l'arrivée du tramway que son départ.

2.4.2.5.2 Traversée du village



Enregistrement (D.A.T.)	Expressions remarquable (extraits) (Dictaphone)	Qualification Effets sonores	Temporalité Séquence	Mesures indicatives	Synthèse Remarques
Aboiements	- Ah! Là c'est un chien qui est en train de, qui aboie, parce qu'il a du nous sentir. - Là, il y a le chien qui reprend... - Là, c'est un autre chien qui est plus près.	<i>Irruption</i>	Notre passage déclenche l'aboïement d'un chien, puis d'un autre...	Illustration de ce phénomène par un graphe intensité / temps	Interaction citadin avec son milieu
Voix forte	- Il y a même le maître qui crie au loin...	<i>Enchaînement</i>	...avec parfois le « C'est pas fini! » d'un maître au loin.		
Pas sur les graviers	- Là on s'engage dans un petit chemin goudronné avec du sable aussi... ça crépite toujours sous mes pas SCHRIIT SCHRIIT. - Comme tout à l'heure j'entends mes pas, c'est du goudron avec des petits graviers, du sable par dessus.	<i>Accompagnement</i>	Continu sur toute cette partie		Interaction citadin avec son milieu
Oiseaux	- Vous entendez les petits oiseaux ? CUI CUI... - Les oiseaux plus présents. - un corbeau sur la gauche... les oiseaux sifflent... les oiseaux...	<i>Irruption</i> <i>Attraction</i>	Continu sur toute cette partie	Haut niveau sonore, principalement dans le spectre des aigus.	Les habitants du quartier remarquent beaucoup moins les oiseaux que les personnes venant d'un lieu plus urbain, ceci malgré la forte émergence dans les aigus. Les personnes s'arrêtent pour mieux écouter les oiseaux.
Enfants Jeux de ballon	- On entend nettement des enfants qui jouent... plusieurs enfants, heureux, ils crient leur joie. - Ouais, en plus on a presque l'impression d'être dans la cour de l'école, on les voit presque jouer.	<i>Ubiquité</i> <i>Emergence</i>	Horaires de récréation et des activités extérieures		L'école avec son aire de jeu est légèrement en contrebas à 250 m.
Tramway Clochette	- Là! (reconnaissance immédiate) je viens d'entendre la cloche du tram,... j'oriente mon micro à droite en fait vers la ligne de tram et je l'ai bien entendu ... sans regarder...	<i>Emergence</i> <i>Citation</i>	Fréquence selon les horaires et les jours		Le son du tramway malgré son niveau assez élevé n'est pas cité si la clochette n'est pas utilisée.
Bruit de fond Circulation routière	- On se croirait à la campagne d'un seul coup parce que derrière moi, j'ai la ville, et là j'ai l'impression de rentrer à la campagne parce que je ne vois ni la ligne de chemin de fer, ni les voitures... - Mais il y a toujours ce bruit de fond comme si c'était la mer au loin.	<i>Drône urbain</i> <i>bourdon</i> <i>Contraste</i>	Continu	Niveau sonore Pendant le marché Sur la place : Leq = 60 dB(A) Sur le chemin : Leq = 43,6dB(A)	La sensation de calme est renforcée par le type de bâti moins urbain, la végétation et par la non visibilité des sources (voitures, tram, école, ...)

Figure 59 : Séquence de parcours commenté à Rezé

2.4.3 Conclusion :

2.4.3.1 Evolution de la méthode. Quel usage pour une simulation ?

La méthode utilisée pour qualifier l'environnement sonore d'un quartier a nécessité une évolution entre la première étude (terrain grenoblois)⁹ et la seconde (terrain nantais). Cette évolution est intervenue non pas au niveau du travail de terrain, qui lui s'est affiné sans changement majeur dans les techniques utilisées, mais bien au niveau de l'analyse. En effet, les données recueillies s'avèrent de nature assez différentes entre les deux terrains. Cette différence est facilement explicable. A Grenoble, le Quartier Vigny-Musset étant en chantier ou en friche, la diversité des activités est réduite. De plus l'étude se déroulant en été, de nombreux établissements étaient fermés (usines, écoles), les travaux étaient arrêtés et les habitants de quartiers sont en vacances. L'information sonore récoltée en était moins riche, à la fois en quantité et en complexité. Le côté « désert » du site limite les interactions citadin / environnement. Ce contexte a néanmoins permis d'ajuster la méthode et d'établir des tableaux de type « conseils au preneur de sons » où l'on identifiait les sources sonores et leurs caractéristiques.

La seconde étude, Rezé, a montré que pour un quartier, « en activité » il devient nécessaire d'établir une grille d'analyse qui tienne compte plus fortement de la complexité de l'environnement. Pour cela, il a été utile d'introduire de nouveaux critères de lecture. Des critères qui tenaient compte de la dimension temporelle et dynamique des sons, de la dimension narrative des séquences sonores et des interactions citadin / environnement. Les résultats obtenus caractérisent davantage des moments de perception que des sources sonores clairement identifiées et localisées.

On est confronté à ces deux types de résultats non contradictoires, présentant d'un côté une identification des sources sonores caractéristiques et quasi « objectivables », et de l'autre, une identification des phénomènes sonores, des effets sonores qualifiant principalement une complexité perçue et vécue non moins réelle.

Mais, lesquels devront être retenus pour informer le logiciel de simulation ?

Face à cette question, il semble plus intéressant au regard de la complexité des données de terrain de se tourner vers une démarche proposant des va-et-vient entre simulation et étude *in situ*. Ce travail implique d'utiliser des outils similaires autant du côté A (*in situ*) que du côté B (simulation) pour l'évaluation et la caractérisation de l'environnement sonore. Pour savoir quels types de données nous avons besoin et sous quelles formes, il peut être nécessaire d'affiner le type de modélisation qui sera utilisé. Il s'agit de commencer non pas simplement une confrontation entre un terrain et sa simulation, mais bien plus de travailler de façon circulaire sur les apports mutuels. Ceci pour déduire à la fois les composantes principales nécessaires à la simulation

⁹ La ZAC Vigny-Musset est située dans les quartiers sud de Grenoble. En friche et en construction pendant la durée de l'étude (été 1996), elle est interdite au cheminement. Par contre, le pourtour de la ZAC est un parcours réellement praticable et pratiqué dans sa quasi totalité. Les changements futurs sont importants le long de ce parcours côté « intérieur », mais le trajet et son extérieur reste relativement sans modification concernant le bâti. A pied il s'effectue entre 30 et 45 minutes. Le trajet a été décomposé en 9 zones pour l'analyse. Elles respectent en général les changements de voirie.

autant que pour mettre au point les outils de relevé et les catégories d'analyse et de caractérisation. Cette proposition peut être schématisée de la manière suivante :

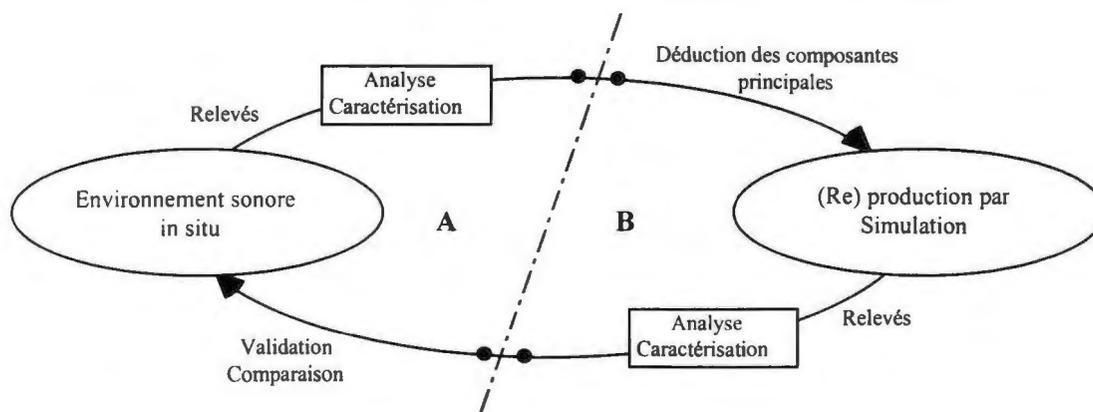


Figure : Schéma de la démarche proposée

2.4.3.2 Vers des indicateurs qualitatifs de l'environnement sonore

Cette localisation et cette caractérisation des phénomènes sonores remarquables permettent une économie métrologique, en répondant aux questions classiques de l'évaluation acoustique des zones urbaines étendues : que mesurer, où, quand et par quels types de mesures et d'analyse ?

Cette approche complémentaire aux techniques classiques permet d'agrandir le champ de l'observable en métrologie acoustique grâce à une prise en compte interdisciplinaire des phénomènes sonores (caractérisation du bâti, des activités, perception citadine, mesures, temporalité...)

De plus, les mesures et les enregistrements ne saisissent que certaines dimensions de l'environnement sonore perçu. A partir du parcours, l'écoute et la parole citadine permettent d'introduire **les paramètres fondamentaux de la qualification des ambiances**, à savoir **les dynamiques temporelles** par la dimension événementielle et souvent narrative de l'environnement sonore ainsi que **les interactions du citadin avec son milieu**.

Les effets sonores [93] s'avèrent ici un véritable outil opératoire pour qualifier les ambiances à partir de la perception et de l'action du citadin *in situ*. Cette approche esquisse aussi **de nouveaux indicateurs qualitatifs de l'environnement sonore** qui s'inscrivent dans la dimension temporelle et contextuelle nécessaire à cette qualification.

Les deux études réalisées (Grenoble puis Nantes) ont permis un début d'affinement par les différents recoupements effectués de ces indicateurs. Il semble alors nécessaire d'aller plus loin dans une double perspective :

- Cumuler les études de ce type pour une validation de ces critères en fonction des tissus urbains.

- Mieux articuler ce travail avec les autres équipes (LAUM, CERMA, LCPC, LAM) par une reprise sélective de quelques séquences représentatives permettant à la fois des apports mutuels et une confrontation avec le modèle numérique.
- Décliner cette approche pour d'autres modes « d'écoute » que celle du piéton : en voiture, transport en commun, chez soi,...

2.4.4 Bibliographie

- [88] Coll., La qualité sonore des espaces habités. Sonic quality in housing and the living environment, Grenoble, actes du colloque international, Jean-François Augoyard Ed., CRESSON, 1991.
- [89] Coll. (Sous la Dir. Thibaud J-P. et Grosjean M.), L'espace urbain en méthode, Marseille, Parenthèses, (à paraître)
- [90] Amphoux P. & alii, Aux écoutes de la ville, Lausanne, IREC-EPFL / CRESSON, 1992.
- [90] Amphoux P., L'identité sonore des villes européennes, guide méthodologique, Lausanne, IREC-EPFL / CRESSON, 1993.
- [92] Augoyard J-F., L'environnement sensible et les ambiances architecturales, in *L'espace géographique*, n°4, 1995, pp. 302-318.
- [93] Augoyard J-F, Torgue H., A l'écoute de l'environnement. Répertoire des effets sonores, Marseille, Parenthèses, 1995.
- [94] Bourdieu P., Juin 1991, Ahmed X, in *Revue de littérature générale*, n° 96/2 Digest, chp. 2. (Version originale du verbatim de l'un des entretiens publiés dans *La Misère du monde* (Seuil, 1993), suivie d'une note de travail interne sur les problèmes de transcription.), 1996.
- [95] Boyer N., Tixier N., (sous la dir. de Augoyard J-F), Vers un simulateur des ambiances urbaines. Parcours d'écoute qualifiée. Application à un quartier grenoblois : Vigny-Musset, Rapport de recherche PIR-VILLES, Grenoble, CRESSON, 1996.
- [96] Chelkoff G. & alii, Entendre les espaces publics, Grenoble, CRESSON, 1988.
- [97] Murray Schäfer R., Le paysage sonore, toute l'histoire de notre environnement sonore à travers les âges, Paris, Lattès, 1979.
- [98] Odion J-P. & alii, Testologie architecturale des effets sonores, prédictibilité de la qualité sonore, Grenoble, CRESSON, 1996.
- [99] Schaeffer P., Traité des objets musicaux, Paris, Seuil, 1966.
- [100] Thibaud J-P., Boyer N., Tixier N. & alii, L'observation des ambiances, in *Les cahiers de la recherche architecturale*, (à paraître)

3 CONCLUSION

3.1 Résultats obtenus

Depuis le lancement de ce projet, des résultats ont été obtenus dans les différents registres disciplinaires associés pour l'opération. Ils sont tour à tour brièvement présentés dans les lignes qui suivent :

En modélisation, la nouveauté de la méthode explorée a nécessité des travaux préliminaires, assurant des fondements solides aux propositions théoriques et instrumentales retenues. Ils se sont traduits par les opérations suivantes :

- la réalisation d'un modèle de diffusion à une dimension pour une enceinte close;
- la vérification du modèle diffusif pour une enceinte fermée (modèle diffusif de propagation pour une salle);
- l'étude en deux dimensions du mouvement d'une particule dans un tissu urbain théorique à forme hexagonale, cette approche permettant d'obtenir le coefficient de diffusion, le libre parcours moyen, ainsi que la densité d'énergie dans le réseau;
- la généralisation du modèle de diffusion au cas d'un milieu urbain quelconque et l'étude de la diffusion d'une rue parallélépipédique.

En analyse urbaine, les travaux ont reposé sur une hypothèse de séparation d'échelle, distinguant l'échelle urbaine de propagation au niveau des îlots et du quartier, de l'échelle architecturale rendant compte de la modénature des façades.

Chacune de ces échelles est caractérisée par une procédure d'analyse morphologique particulière :

- L'échelle dite « urbaine » a fait l'objet d'un traitement discret visant à établir différentes classes hiérarchiques de complexité du tissu urbain, visant à ségréguer les quartiers urbains susceptibles de répondre au cahier des charges du modèle diffusif décrit ci-dessus. La méthode utilisée pour ce traitement, dite de « densitométrie fractionnaire », consiste à scruter la complexité hiérarchique de la maille urbaine par une procédure de recouvrement surfacique variable, fournissant au final une mesure de « lacunarité » (quantification de l'arrangement géométrique entre les pleins et les vides) du tissu étudié.
- L'échelle dite « architecturale », plus concernée par les modalités mêmes de la propagation du son, est l'objet, quant à elle, d'une procédure d'analyse de profils des façades urbaines, finalement caractérisées par des « spectres de formes » utilisant une méthode d'érosion-dilatation des profils étudiés.

En terme de qualification et d'inventaire des sources sonores, deux opérations ont été conduites à Grenoble et à Rezé-les-Nantes. Elles reposaient sur la méthode des « parcours commentés ». Les commentaires descriptifs de l'écouter réagissant aux diverses sources sonores entendues lors du parcours, étaient associés à des mesures additionnelles et à un relevé architectural et typo-morphologique. La méthode permet de relativiser le poids des valeurs mesurées et de mettre en évidence divers phénomènes d'interaction entre l'écouter et l'environnement, elle révèle notamment la surqualification de certaines sources.

Pour permettre la validation du modèle, des campagnes de mesures ont été prévues. Une méthode spécifique a été mise au point sur un site à Rezé-les Nantes et appliquée

de manière systématique sur une rue du centre ville à Nantes, la rue d'Orléans. Des acquisitions nombreuses de réponses impulsionnelles ont été réalisées pour différentes positions de la source et pour des microphones situés soit dans l'axe soit sur une section de la rue. Les premiers dépouillements de ces mesures confirment la variation du temps de réverbération en fonction de la distance à la source. Des simulations numériques de champ diffus dans les rues ont également été conduites. Elles correspondent dans de bonnes proportions aux évolutions obtenues par les mesures.

L'étude de caractérisation des sources sonores en milieu urbain a été amorcée plus récemment. En un premier temps, elle a porté sur les sources d'origine mécanique, correspondant aux véhicules automobiles et aux véhicules ferroviaires. Les automobiles ont été modélisées en considérant les voitures comme des sources monopolaires omnidirectionnelles, au moyen d'un modèle de propagation propre au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Un bon accord entre les mesures et le modèle peut être observé. L'ensemble de cette modélisation doit être validé à nouveau, dans le cadre d'un travail de l'INRETS effectué à l'aide de mesures obtenues par une antenne en champ proche. L'ensemble de ces démarches constitue un fondement solide pour des études plus complexes, concernant la dynamique des sources mécaniques (bruits à l'accélération ou à la décélération).

3.2 Perspectives

De manière très synthétique, on peut répertorier de la manière suivante les tâches restant à effectuer, pour élaborer - à partir des prototypages - le cahier des charges détaillé du simulateur des ambiances sonores urbaines :

- Au titre du LAUM, au niveau théorique, le modèle de diffusion devra être étendu à une enceinte ouverte simulant une rue. Par la suite, le passage du modèle 1D à 2D se posera et permettra de caractériser des configurations de type « carrefour ». En matière d'expérimentation, la maquette au 1/50^{ème} étant construite, le système de déplacement et le système d'acquisition étant opérationnels, il conviendra d'effectuer de façon systématique des mesures de réponses impulsionnelles, pour plusieurs configurations réalistes de rues. La confrontation théorie-expérience permettra d'affiner la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. Enfin, l'étude bi-dimensionnelle du mouvement d'une particule dans un tissu urbain théorique de maille hexagonale sera élargie à un réseau plus réaliste, correspondant par exemple à un quartier existant.
- Au L.C.P.C., dans le cadre de la poursuite du travail de thèse de D.Gaulin, et sur le point précis de l'identification des sources d'origine mécanique, les parties qui restent à traiter concernent d'une part, la prise en compte des conditions réelles de circulation (accélération, décélération, effet de rampe, etc.) et d'autre part, l'évaluation de la statistique de présence de chaque type de sources sur des périodes de référence à définir; ceci dans le but d'alimenter le modèle de propagation développé au LAUM. Pour ce qui regarde les autres types de sources (sources d'origine humaine), deux approches sont envisagées : la première consiste en une classification qualitative permettant de déterminer les modes d'apparition (continu, périodique, aléatoire); la seconde à caractère plus quantitatif affectera à chaque type de sources, un ou plusieurs indicateurs physiques susceptibles d'être introduits dans les modèles propagatifs. Pour les sources de type fortement non-stationnaire, des techniques d'analyse temps-

fréquence pourront être envisagées. Un ensemble de validations expérimentales sera enfin conduit sur le site de Rezé-les-Nantes

- Les résultats des parcours commentés effectués à Grenoble et à Rezé-les-Nantes, devront être complétés par deux campagnes de mesures permettant un traitement statistique des sources répertoriées ; ces dernières constituant la base de données sources du simulateur.
- Le calage des modèles d'évaluation morphologique avec le modèle de diffusion du son en milieu urbain se fera par ajustement successif autour de deux procédures : les mesures sur la maquette au 1/50^e réalisée par le LAUM, les mesures in situ effectuées à Nantes par le LCPC. Les deux premières modalités d'évaluation du champ acoustique diffusif en milieu urbain sont en cours de finalisation, les résultats étant destinés à fiabiliser le modèle de diffusion du son. A l'issue de la confrontation, le modèle de diffusion développé au LAUM sera implanté dans un code de calcul à éléments finis. Ce code utilisant l'équation canonique de la chaleur présentera un caractère a-fréquentiel, la composante spectrale sera, en conséquence, amenée par les « spectres de forme » issus de l'analyse morphologique des échantillons urbains.

Ces allers-retours successifs entre mesures et simulations nous permettront, in fine, de caractériser le coefficient de diffusion sur tout le spectre des fréquences audibles.

