

Effets de la réflexion diffuse des façades sur la propagation acoustique et sur la représentation de l'environnement sonore en milieu urbain

Judicaël Picaut

LCPC¹
Route de Bouaye
BP 4129
44341 Bouguenais CEDEX
E-mail : judicael.picaut@lcpc.fr

Catherine Sémidor

Aline Barlet
Françoise Chartier
Pascal Butzbach
GRECO²
École d'Architecture et de Paysage de Bordeaux
Domaine de Raba
33405 Talence CEDEX
E-mail : Catherine.semidor@bordeaux.archi.fr

Philippe Woloszyn

Hany Hossam El Dien
CERMA³
École d'Architecture de Nantes
Rue Massenet
BP 81931
44319 Nantes CEDEX 3
E-mail : philippe.woloszyn@cerma.archi.fr

Isabelle Schmich

Jérôme DeFrance
Philippe Jean
CSTB⁴
24 Rue Joseph Fourier
38400 Saint Martin d'Hères
E-mail : isabelle.schmich@cstb.fr

De récents travaux ont montré l'influence des effets de diffusion par les façades urbaines sur la propagation du champ sonore dans une rue. Comme en acoustique des salles, les effets de diffusion peuvent également avoir un effet sur la perception sonore. Malgré tout, les outils prévisionnels actuels utilisés classiquement en acoustique urbaine, n'intègrent pas encore cette composante, principalement à cause d'un manque d'information sur les phénomènes engendrés. L'objectif principal de ce projet de recherche est donc d'apporter des éléments quantitatifs concernant l'influence de la diffusion de façade sur l'atténuation sonore et la réverbération dans une rue, ainsi que sur la perception sonore. Le second objectif est de déterminer, expérimentalement ou numériquement, les lois de réflexion des façades urbaines dans quelques morphologies «types», puis de constituer une base de données architecturales qui pourra alimenter les logiciels prévisionnels.

Architectural morphology is an important factor for the prediction of soundscapes and noise propagation in urban areas. As in room acoustics, the sound field in a street is characterised by the building façades irregularities, in such a way that two similar streets (in size) can produce two different sound fields for two different building frontages. However, most of the existing softwares and models take only the specular reflection into account, in order to predict the diffuse reflection by a building façade, implying a significant uncertainty in the sound prediction. The main purpose of this project is, first, to investigate (mathematically, numerically and experimentally) how the sound field is influenced by a building façade, and secondly, to characterise several urban frontages by typical reflection laws. Then, a coupling morphological and acoustical database will be built up and introduced in a current software of urban sound prediction, in order to be used by town planners and architects in their urban projects.

Introduction

Problématique

Le thème de la diffusion sonore par les façades urbaines (ou réflexion diffuse) est un sujet de préoccupation de plus en plus important, aussi bien du point de vue du physicien, pour la compréhension des phénomènes entrant en jeu dans la propagation acoustique, que du point de vue de l'urbaniste et de l'architecte pour la prise en compte de la morphologie des façades dans les projets d'aménagements urbains à l'échelle de l'espace public.

Sur l'initiative du GDR CNRS 2493 «Bruit des Transports», plusieurs organismes se sont regroupés pour mettre leur compétence en commun, à travers un projet de recherche financé dans le cadre de l'APR «Bruit et Nuisances sonores», par le ministère de l'Écologie et du développement durable.

L'objectif de ce projet de recherche est de mettre clairement en évidence les effets «physiques» de la réflexion diffuse sur la propagation et la décroissance de l'énergie sonore dans une rue, notamment grâce à des simulations numériques faisant intervenir différentes lois de réflexion arbitraires (i.e. différents types de réflexion diffuse) sur les façades de la rue. De manière complémentaire, il conviendra également de déterminer les effets engendrés sur la sensation sonore, à partir d'enregistrements *in situ*, réalisés dans des sites «équivalents» du point de vue des sources sonores rencontrées, mais de morphologie architecturale distincte. Une fois ces effets mis en évidence, les lois de réflexion réelles seront définies pour différents types de façades urbaines, soit analytiquement ou numériquement pour des façades élémentaires, soit géométriquement ou expérimentalement (analyse fractale, mesures sur maquette et *in situ*) pour des géométries plus complexes. La dernière étape visera à intégrer les lois de réflexion obtenues dans des logiciels classiques de cartographie sonore, sous la forme d'une base de

données architecturales qui permettra de modéliser le comportement d'un type de façade par une loi de réflexion qui lui est propre.

En sachant pourquoi et comment prendre en compte les réflexions diffuses provoquées par l'architecture des façades dans les outils classiques d'évaluation des niveaux sonores en milieu urbain, on aidera l'architecte ou l'urbaniste à faire des choix en amont du processus de conception architecturale ou urbaine dans le but d'obtenir un environnement sonore agréable.

État de l'art

Au niveau théorique, depuis que Lyon [1] a montré expérimentalement l'intérêt de prendre en compte le phénomène de réflexion diffuse par les façades urbaines dans les calculs de niveau sonore, un certain nombre de chercheurs a proposé de modéliser la réflexion du son sous la forme d'une condition mixte, spéculaire et diffuse. Ainsi, dans la littérature, les quelques modèles théoriques de propagation supposent qu'une partie de l'énergie sonore incidente sur une façade est réfléchi spéculairement tandis qu'une autre partie est réfléchi uniformément dans toutes les directions de l'espace [2,3], suivant une loi de réflexion particulière. Le rapport entre la part d'énergie spéculaire et la part d'énergie diffuse est souvent défini comme le degré de diffusion [4] ou le coefficient de diffraction [5] de la façade. Malgré tout, bien qu'il soit a priori évident que la loi de réflexion dépende de la rugosité des façades, les applications proposées en acoustique urbaine [5] font souvent références à une seule loi, la loi de Lambert, déjà utilisée pour modéliser les champs diffus en acoustique des salles [6]. Il faut pourtant préciser que cette loi n'a jamais été justifiée sur des façades réelles, ni par des mesures, ni par des modèles théoriques. Elle n'a pas *a priori* de sens pour une façade, dont les irrégularités sont en général disposées périodiquement. D'autre part, l'utilisation de cette loi en acoustique des salles fait déjà l'objet d'un certain nombre de critiques [7]. Plus récemment, Kang [8] a aussi montré à partir de simulations numériques basées sur un modèle de radiativité, de grandes différences sur le temps de réverbération et l'atténuation sonore dans une rue, suivant que la réflexion est considérée soit comme totalement spéculaire, soit comme totalement diffuse.

Dans un autre article récent [9], des simulations numériques ont également montré que la propagation du son dans une ville est potentiellement conditionnée par les lois de réflexion des façades.

Ce rapide état de l'art sur les études théoriques de propagation du son en milieu urbain et la prise en compte des phénomènes de réflexion diffuse montre bien la limite des connaissances sur ce sujet, en faisant notamment ressortir un certain nombre d'interrogations :

- Est-il réaliste de séparer la réflexion spéculaire de la réflexion diffuse, plutôt que de considérer une seule et même loi de réflexion incluant les deux phénomènes ?
- Quelle est l'influence des lois de réflexion des façades sur la répartition et la décroissance de l'énergie sonore dans une rue ?

- Comment déterminer analytiquement, numériquement, géométriquement ou expérimentalement, la loi de réflexion réelle d'une façade à partir de sa morphologie architecturale (taille et disposition des irrégularités de surface) ?

Au niveau opérationnel, il est également important de signaler que les outils actuels de prévision des niveaux sonores en milieu urbain, basés notamment sur des méthodes de rayons sonores, ne prennent absolument pas en compte ces phénomènes de réflexion diffuse. La plupart des logiciels se limitent uniquement à la réflexion spéculaire et des diffractions par les arêtes de bâtiment, ce qui, compte tenu des études théoriques et des observations expérimentales présentées ci-dessus, paraît insuffisant.

Au niveau expérimental et architectural, hormis les quelques études réalisées par les organismes présents au sein de ce projet, il n'existe pas à notre connaissance d'autres travaux, au plan national ou international, sur la mesure de la réflexion diffuse de façades urbaines et sur l'intégration des aspects «morphologie urbaine».

De même, dans le domaine du confort urbain, aucun travail ayant pour objet précis l'étude de l'impact de la réflexion diffuse en façade sur la sensation auditive en milieu urbain n'a été publié. Un certain nombre de recherches en psycho-acoustique se sont intéressées à la perception proprement dite de différents critères acoustiques comme le sharpness ou la rugosité [10] mais jamais en relation avec la sensation et donc l'évaluation qui en était faite. De surcroît, en dehors des travaux des partenaires de ce projet [17,18], aucune étude psychosociologique ne s'est préoccupée de l'impact de la propagation des sons sur le confort ressenti, sans compter la rareté des approches multisensorielles.

Les objectifs attendus

L'objectif de ce projet de recherche est ainsi :

- de mettre clairement en évidence les effets de la réflexion diffuse sur la répartition et la décroissance de l'énergie sonore dans une rue ;
- de mettre en évidence ces mêmes effets sur la perception et la cognition sonore ;
- de caractériser ces lois de réflexion pour des «façades types» ;
- d'intégrer ces lois de réflexion dans un outil existant et opérationnel de prévision des niveaux sonores en milieu urbain, sous la forme d'une base de données architecturale.

Les résultats attendus et les aspects innovants sont explicitement cités dans le point 4 ci-dessus. En intégrant les lois de réflexion réelles des parois, pour quelques façades types, dans les logiciels actuels de prévision acoustique en milieu urbain, les niveaux sonores calculés devraient être plus représentatifs de la réalité. D'autre part, en intégrant ces lois de réflexion sous la forme d'une base de données architecturales (à un type de façade correspondrait une loi de réflexion), l'architecte disposera d'une dimension supplémentaire pour définir l'ambiance

sonore qu'il souhaite mettre en place. Afin d'illustrer les résultats de cette étude, un exemple d'intégration de lois de réflexion dans un logiciel classique de prévision acoustique sera proposé.

Méthodologie, résultats et perspectives

Le projet de recherche a été décomposé en 4 phases, chaque phase reprenant un des objectifs présentés ci-dessus. Cette partie présente l'état d'avancement du programme de recherche, après 8 mois de travail. La phase 1 étant terminée, nous en présentons dès maintenant les premières conclusions. Les autres phases étant en cours, nous nous focaliserons uniquement sur les premiers développements et les méthodologies envisagées.

Influence de la réflexion diffuse sur la propagation acoustique (phase 1)

La première phase de notre travail a donc consisté à mettre en évidence les effets des réflexions diffuses sur la propagation acoustique dans une rue. En effet, bien que certaines études aient déjà montré qualitativement l'influence de la diffusion de façade, il nous a semblé opportun de reconsidérer le problème, en apportant cette fois des éléments quantitatifs. Deux approches numériques complémentaires ont ainsi été envisagées. La première, basée sur des simulations numériques en 3D de la propagation de particules sonores, a permis d'étudier l'atténuation et la réverbération du champ sonore d'une rue, pour plusieurs conditions de réflexion sur les façades. En parallèle, une approche numérique 2D par éléments de frontière (*Boundary Element Method* ou BEM) a permis d'évaluer l'influence directe de la morphologie architecturale des façades sur la répartition du niveau sonore sur une section de rue.

Approche numérique par une méthode de Monte Carlo

Afin d'évaluer l'influence des lois de réflexion des façades sur la propagation acoustique dans une rue, nous avons utilisé le programme SPPS développé par le LCPC [11]. Ce programme permet de simuler numériquement la propagation de particules sonores dans une rue, définie par ses dimensions et les propriétés acoustiques de ses parois (absorption, diffusion, loi de réflexion). Le principe des simulations repose sur le suivi de chaque particule durant son trajet. Entre deux collisions avec les parois du domaine, les particules se propagent en ligne droite à la célérité du son. Lors d'une collision avec une paroi, des tirages de nombres aléatoires permettent de déterminer si la particule est absorbée ou réfléchie, puis dans le second cas, si elle est réfléchie dans la direction spéculaire ou dans une direction diffuse (figure 1). La distribution des particules dans l'enceinte au cours du temps est ensuite déterminée en comptabilisant le nombre de particules dans chacune des mailles du domaine, ce qui permet finalement de calculer le niveau sonore et le temps de réverbération en tout point de la rue.

De manière générale une façade est caractérisée par un coefficient d'absorption α (compris entre 0 et 1) et un coefficient de diffusion d (compris entre 0 et 1). Dans ces

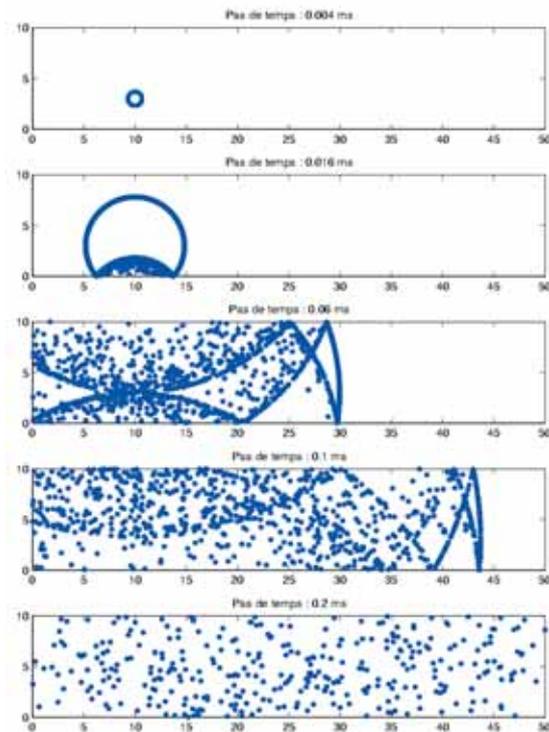


Fig. 1 : Illustration du programme SPPS : simulation (2D) de la propagation de particules sonores dans une rue de 50 m de longueur et de 10 m de largeur, à plusieurs pas de temps. La source impulsionnelle est localisée au point (10,3) et émet 2 000 particules dans la rue. Les deux extrémités de la rue sont totalement absorbantes. Le coefficient d'absorption des façades est fixé à 0,1. Les réflexions sur les façades de la rue sont supposées mixtes (spéculaires et diffuses)

conditions, une partie $(1-\alpha) \times d$ de l'énergie incidente sur une façade est réfléchie spéculairement, tandis qu'une partie $(1-\alpha) \times (1-d)$ est réfléchie de manière diffuse suivant une loi de réflexion particulière $R(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_r)$, \mathbf{v}_i et \mathbf{v}_r désignant respectivement la direction incidente et la direction de réflexion d'une particule sur la façade. De manière à évaluer un grand nombre de conditions de réflexion, nous avons donc réalisé des simulations pour plusieurs valeurs du coefficient de diffusion et plusieurs lois de réflexion [12]. En particulier, nous avons considéré des lois de réflexion spéculaire, uniforme et de Lambert (diffusion idéale), ainsi que des réflexions semi-diffuses censées se rapprocher des cas réels (figure 2). Pour ces dernières, la direction de réflexion est alors choisie autour de la direction spéculaire, avec une probabilité qui dépend de la répartition et de la taille des irrégularités de façade.

À titre d'exemple, la figure 3 montre l'atténuation sonore et les temps de réverbération dans l'axe d'une rue, passant par la source sonore, pour plusieurs lois de réflexion. Les différentes courbes montrent très nettement des comportements différents en fonction des conditions de réflexion, qui peuvent se traduire par des écarts allant du simple au double pour les temps de réverbération, et des différences de l'ordre de 5 dB en terme d'atténuation sonore. Lorsque le coefficient de diffusion des façades augmente (i.e. les réflexions ont un comportement de plus en plus spéculaire), les résultats

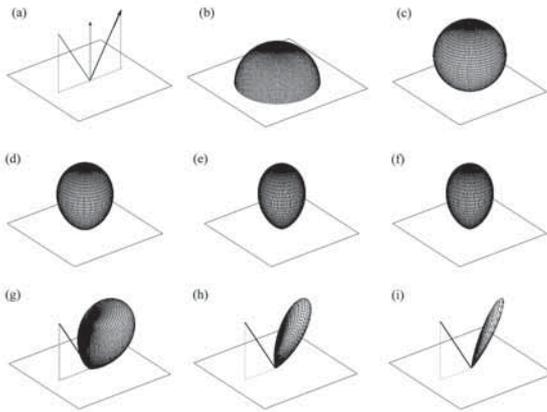


Fig. 2 : Exemples de lois de réflexion utilisées dans les simulations SPPS : (a) spéculaire, (b) uniforme, (c) Lambert (diffusion idéale), (d-f) lois en wn ($n=2,3$ et 4), (g-i) lois semi-diffuses

sont également très similaires. De manière générale, l'ensemble des simulations qui ont été réalisées, montre des effets notables des lois de réflexion sur la propagation acoustique dans une rue.

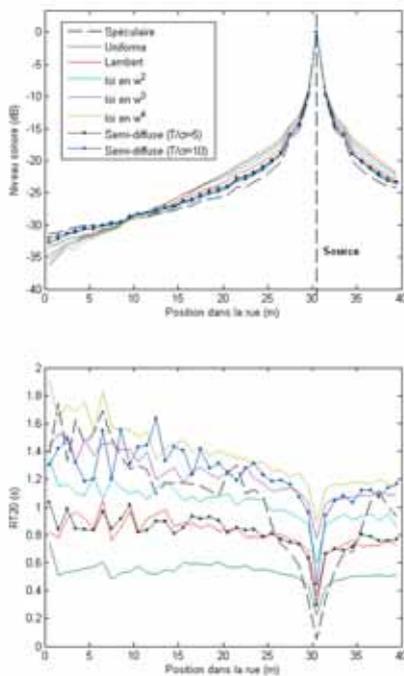


Fig. 3 : Niveau sonore et temps de réverbération (RT20) dans une rue de 40 m de long, 8 m de large et 8 m de haut, avec une source localisée en (30.5, 6.5, 1.5), pour plusieurs lois de réflexion. L'absorption du sol et des façades est égale à 0,1. Le coefficient de diffusion des façades est fixé à 0 pour toutes les lois de réflexion, excepté pour la courbe de référence en spéculaire. Le sol est supposé produire des réflexions spéculaires

Approche numérique par une méthode BEM

À la différence des simulations précédentes, où les lois de réflexion ont été choisies arbitrairement, les simulations par la méthode BEM permettent d'évaluer la répartition de l'énergie sonore dans une coupe de la rue, en prenant

en compte la géométrie réelle de la façade. L'ensemble des simulations numériques présentées dans cette partie a été effectué avec le code de calcul MICADO (Méthode Intégrale de Calcul Acoustique de la Diffraction par les Obstacles) [13] et [14] permettant d'effectuer des calculs en 2 dimensions. Il est basé sur la méthode des éléments fins de frontière avec une approche variationnelle. Cette méthode numérique est développée depuis le début des années soixante et est fondée sur la théorie des équations intégrales de frontières en 2 dimensions (la troisième dimension est considérée comme infinie ce qui implique notamment des sources linéiques et non ponctuelles). Le logiciel a été mis au point par Philippe Jean au CSTB. L'avantage de la méthode BEM (par rapport à l'autre grande méthode numérique, la méthode FEM, *Finite Element Method*) réside dans les conditions de maillage : seuls les éléments de frontières doivent être discrétisés pour accéder au champ de pression, ce qui la rend particulièrement bien adaptée en espace infini. Le code de calcul MICADO utilise la formulation directe de la méthode des éléments fins de frontière ; celle-ci se base sur l'équation intégrale d'Helmholtz définie par :

$$(\Delta + k^2)p(M) = f(m), \forall M \in \Omega$$

où $p(M)$ est la pression acoustique en un point M de l'espace, $f(M)$ est la distribution des sources, k est le nombre d'ondes, et où Ω est l'espace, de volume V . Pour résoudre cette équation, on introduit la fonction de Green pour une source ponctuelle S en espace infini, la condition de Sommerfeld de rayonnement à l'infini, et après quelques simplifications mathématiques, on obtient l'équation intégrale de Helmholtz (ou de Helmholtz-Kirchhoff) donné par :

$$c(M).p(M) = p_0(M) + \int_{\sigma} \left[p(S) \frac{\partial G}{\partial n_s}(S, M) - G(S, M) \frac{\partial p}{\partial n_s}(S) \right] dS, M \in \Omega$$

où $c(M)$ est un coefficient, fonction de la position du récepteur, valant :

$$c(M) = 1 - \frac{1}{4\pi} \int_{\sigma} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS.$$

$p(M)$ est le champ de pression en un point M de l'espace pour une source ponctuelle S , $p_0(M)$ est le champ de pression incident dans le volume extérieur V , G est la fonction de Green de l'équation de Helmholtz pour l'espace infini vérifiant la condition de Sommerfeld, telle que :

$$G(S, M) = \frac{\exp(ikr(S, M))}{2ik} \quad \text{dans } \mathfrak{R}$$

$$G(S, M) = -\frac{i}{4} H_0(kr(S, M)) \quad \text{dans } \mathfrak{R}^2$$

$$G(S, M) = -\frac{\exp(ikr(S, M))}{4\pi r(S, M)} \quad \text{dans } \mathfrak{R}^3$$

où H_0 est la fonction de Hankel d'ordre zéro et de première espèce. Le champ rayonné par la distribution de sources $f(M)$ s'écrit alors comme étant la convoluée de G

et de f (sous l'hypothèse, généralement vérifiée, que f est une fonction intégrable) :

$$p_0(M) = G * f(M) = \int_{\mathbb{R}^n} f(P) G(M, P) dV(P)$$

Le champ incident p_0 peut être interprété comme la réponse en un point M de la distribution de source P d'amplitude $f(P)$. De façon générale la fonction de Green d'un problème est la solution élémentaire de l'équation de Helmholtz satisfaisant aux conditions de Sommerfeld et à un certain nombre de conditions aux limites. Plus cette fonction de Green prend en compte d'informations, plus le domaine d'intégration de l'équation intégrale correspondante est petit. C'est pourquoi après la fonction de Green en espace infini, les chercheurs se sont attachés à trouver la fonction de Green pour la propagation au-dessus d'un sol plan rigide, puis à inclure les effets de sol. Dans de nombreux domaines de l'acoustique des travaux sont toujours effectués pour trouver des expressions judicieuses de ces fonctions de Green, susceptibles d'être utilisées numériquement dans des méthodes d'éléments finis de frontière.

MICADO résout le problème en utilisant une approche variationnelle : l'équation intégrale d'Helmholtz est multipliée par une fonction test admissible et est intégrée sur la surface de la structure étudiée. Une fonctionnelle est construite et la solution du problème est trouvée en rendant stationnaire cette fonctionnelle. Une telle approche permet de surmonter les problèmes de singularités des intégrales et des matrices non symétriques au prix d'un ordre d'intégration plus élevé. Le logiciel commence par discrétiser l'équation à résoudre ; ensuite il calcule les intégrales sur chaque élément par des quadratures de Gauss puis il assemble la matrice du système linéaire à résoudre pour déterminer la pression acoustique et la vitesse normale sur la surface. Pour cela, le logiciel MICADO utilise une décomposition de Cholevski pour une matrice positive et symétrique ($M=L.L^T$). Après résolution, la pression est connue en tout point du maillage. Il est ensuite possible de calculer la pression en tout point récepteur grâce à une intégrale simple.

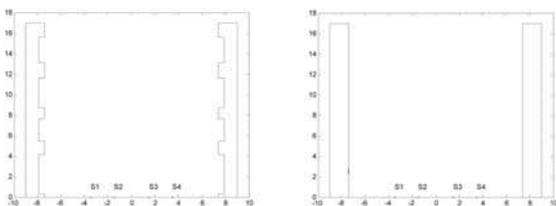


Fig. 4 : Coupe de la rue en U avec façades réelles (à gauche) et du cas de référence avec façades planes (à droite) utilisées pour les simulations BEM.

Une première série de rues en U présentant des typologies de façades académiques ou réelles a été étudiée. On donne en figure 4 un exemple de géométrie simulée correspondant à la situation réelle de la figure 5. Pour cette première phase de l'étude, on considère quatre lignes sources (S1 à S4 en figure 4), incohérentes entre elles, qui modélisent l'émission sonore due au trafic

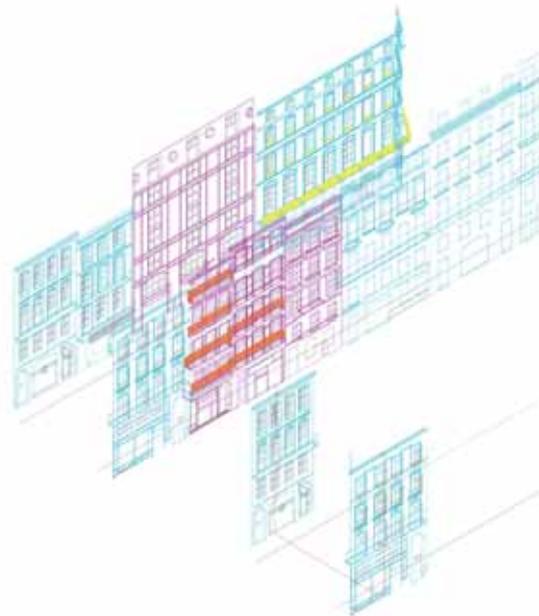


Fig. 5 : Vues 3D de la rue en U issues des plans d'architecte et coupe sur la façade (visualisée par le trait rouge) présentée en figure 4

roulier. Les récepteurs (R1 et R2) sont situés sur les trottoirs, de part et d'autre, à une hauteur de 1,50 m (oreille humaine). Dans une première étape, les surfaces des bâtiments ainsi que la chaussée sont considérées comme parfaitement réfléchissantes. Les calculs sont menés de 50 à 5000 Hz avec 20 fréquences par bande de tiers d'octave. Le critère de maillage BEM est de 5 éléments minimum par longueur d'onde. Un exemple de résultat est donné en figure 6. Il s'agit de l'atténuation sonore, moyennée pour chaque bande de tiers d'octave simulée, pour le cas des façades réelles complexes par rapport au cas des façades planes. On voit parfaitement que d'importants phénomènes d'interférences entrent en jeu et, sans modifier sensiblement le champ acoustique global pondéré A, le spectre de niveau de pression calculé aux récepteurs est très fortement modifié selon la fréquence (jusqu'à 10 dB de différence). L'effet de diffusion par les façades est ici sans équivoque.

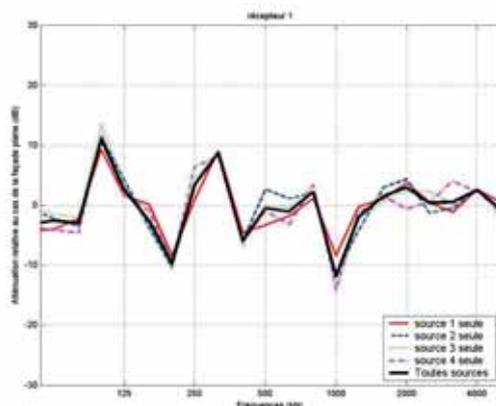


Fig. 6 : Effet de façade : atténuation sonore relative au cas de la rue en U avec surfaces planes

Des calculs de cartes verticales de niveau de pression ont été effectués sur une typologie de façade avec des fenêtres en retrait de 50 cm par rapport à la façade plane. Les cartes ont été calculées sur toute la hauteur de 17 m de la façade et de 4 m de largeur à partir de la façade avec un maillage régulier de 40×160 , c'est-à-dire des pavés d'environ 10 cm^2 . La précision des calculs a été augmentée pour les récepteurs proches de la façade. L'influence des quatre sources a été étudiée séparément. La figure 7 présente la géométrie simulée ainsi que la situation de référence.

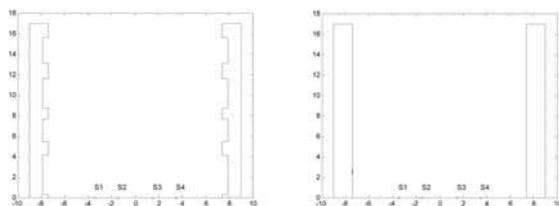


Fig. 7 : Coupe de la rue en U avec façades irrégulières (à gauche) et du cas de référence avec façades planes (à droite) utilisées pour les simulations BEM

En figures 8, 9 et 10, on montre des exemples de résultats de cartes d'iso-atténuation pour les bandes de tiers d'octave 50, 630 et 2000 Hz. On voit à nouveau que cette atténuation dépend fortement de la fréquence, ainsi que de la position de la source et du récepteur.

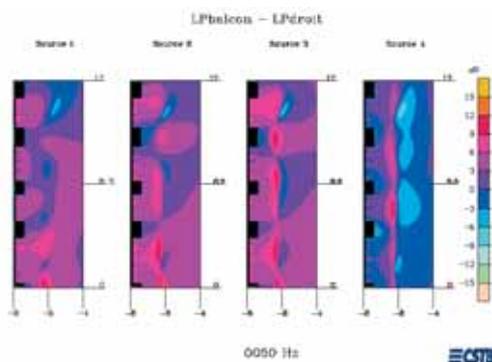


Fig. 8 : Cartes verticales d'iso-atténuation (dB) calculées pour chacune des quatre sources sonores, par rapport à la configuration de référence (façades planes). Résultats pour le tiers d'octave 50 Hz

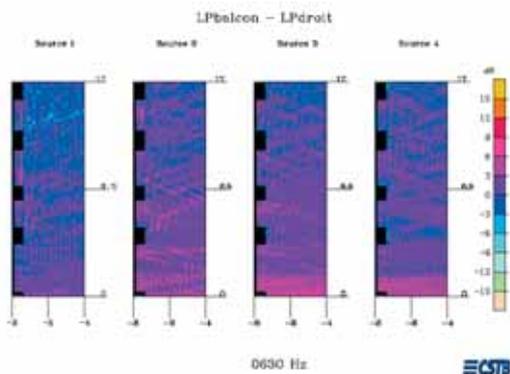


Fig. 9 : Cartes verticales d'iso-atténuation (dB) calculées pour chacune des quatre sources sonores, par rapport à la configuration de référence (façades planes). Résultats pour le tiers d'octave 630 Hz

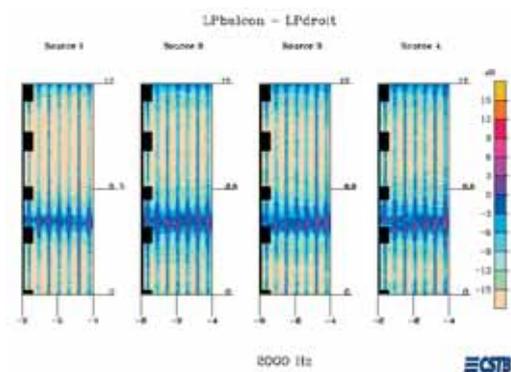


Fig. 10 : Cartes verticales d'iso-atténuation (dB) calculées pour chacune des quatre sources sonores, par rapport à la configuration de référence (façades planes). Résultats pour le tiers d'octave 2000 Hz

À 50 Hz, un renforcement de l'énergie apparaît généralement, alors qu'à 2000 Hz, il y a une forte diminution du niveau sonore. Une fois encore, il s'agit de différences sensibles au niveau des spectres reçus, mais peu visibles en terme de niveaux globaux pondérés A.

Conclusions sur la phase 1

Que ce soit par l'approche « particule sonore » (3D) et l'approche BEM (2D), les résultats montrent que la morphologie des façades influe de manière non négligeable sur la répartition et la réverbération du son dans une rue. Ces résultats, qui confirment certains travaux sur le sujet, montrent une nouvelle fois l'intérêt de prendre en compte la morphologie réelle des façades dans les outils de simulation, comme les logiciels de prévision acoustique. Une mauvaise prise en compte des conditions de réflexion peut alors engendrer des écarts importants par rapport à la réalité, ce qui peut avoir un impact non négligeable d'un point de vue « respect de la réglementation acoustique ».

Influence de la réflexion diffuse sur la perception sonore (phase 2)

Au-delà des effets physiques sur la propagation acoustique que nous venons de présenter, il convient également d'étudier l'impact de la diffusion sur la perception. Plus généralement, l'influence de la réflexion diffuse sur la perception sonore est à resituer dans un contexte plus global dont l'objectif est de définir et de créer des outils d'évaluation du confort acoustique des citoyens.

Notre premier travail a donc consisté à mettre au point un protocole méthodologique adapté pour recueillir et analyser les perceptions et évaluations des sujets face à des informations sonores. Dans cet objectif, nous avons expérimenté la procédure de catégorisation libre. Le choix de cette méthode trouve sa motivation dans le fait qu'elle n'implique dans une première phase aucune contrainte de verbalisation et qu'elle ne pose a priori aucune hypothèse sur les critères perceptifs de qualité. En effet, ce qui est visé dans cette étude, c'est de pouvoir accéder à la diversité des modes perceptifs et évaluatifs des sujets, afin de mettre à jour les critères pertinents qui dirigent

et organisent ces processus. Dans cette procédure, la consigne donnée aux sujets n'impose aucun critère prédéfini pour la classification de séquences sonores qui leur sont diffusées. La tâche demandée aux sujets est de classer le corpus sonore présenté en catégories de qualités équivalentes, sans contrainte sur le nombre de catégories ni sur celui des éléments par catégorie [15]. La seconde phase correspond quant à elle à l'argumentation langagière ou graphique des catégories ainsi créées. Cette première expérimentation a bien permis d'identifier une liste de critères sur lesquels se sont basés les sujets pour effectuer la tâche de catégorisation des séquences sonores [16]. Nous pouvons penser que ces critères sont ceux utilisés par les sujets dans le processus de traitement des informations qui s'effectue de manière automatique et continu dans la vie quotidienne des sujets. Ainsi, nous avons mis au point une méthodologie pertinente pour l'étude de la perception d'environnements ou d'objets sonores (figure 11). De fait, le protocole de situation d'écoute proposé est reproductible et adaptable en fonction de la problématique retenue.



Fig. 11 : Protocole d'une situation d'écoute

La poursuite de notre travail peut alors se définir en trois phases :

- Application du protocole de situation d'écoute ;
- Validation en laboratoire des critères identifiés en phase 1 ;
- Validation *in situ* des critères.

Dans une première étape, il s'agit d'utiliser le protocole ainsi défini en sélectionnant 2 villes, 2 types de site, 2 types de façade et 2 types de source pour constituer notre échantillon de séquences sonores. Notre plan expérimental repose sur le croisement de ces différentes variables, aboutissant alors à un corpus de 16 situations. La réalisation des séquences sonores procède dans un premier temps de l'enregistrement en situation réelle des deux sources choisies. Ces deux enregistrements, après un traitement du signal permettant une décontextualisation de chacune des sources, seront diffusés sur les sites afin

d'y être à nouveau enregistrés et donc contextualisés. Les 16 séquences sonores ainsi obtenues seront restituées aux sujets lors de la procédure de catégorisation. Plusieurs situations d'écoute seront organisées afin de constituer une base de critères de catégorisation qui soit la plus représentative possible. Dans cette première étape, la catégorisation libre est particulièrement adaptée puisqu'elle permet avant tout de vérifier l'existence d'un effet de la nature des façades sur la perception et l'évaluation d'une source sonore, ce qui n'a encore jamais été démontré. Elle donne également l'opportunité dans le cas où l'influence serait avérée, d'en définir la nature. La tâche de catégorisation libre ainsi réalisée permet d'étudier de manière spécifique les processus de perception et d'évaluation, en dégageant et en rendant explicites des critères, que l'on peut alors manipuler comme variables.

Au cours de la seconde étape, également en laboratoire, nous pourrions sélectionner et valider cette liste de critères pertinents rendant compte des dimensions perceptives et évaluatives des sujets. Sur la base du même échantillon sonore, nous nous proposons cette fois de recourir à une méthode d'évaluation classique, basée sur l'utilisation d'échelles [17].

Enfin une troisième étape, réalisée *in situ*, est nécessaire à notre problématique. En effet, elle intervient en complément de l'expérimentation en laboratoire où les sons diffusés sont fortement décontextualisés. Ainsi, si notre travail se centre dans le domaine du sonore, il est néanmoins indispensable d'avoir toujours à l'esprit le caractère multisensoriel de l'espace urbain. Les dimensions physiques, sensibles, sociales et esthétiques jouent un rôle conjoint dans la perception et l'évaluation de l'environnement urbain [18]. D'un point de vue méthodologique, nous nous proposons de faire caractériser globalement l'environnement (figure 12). Pour chaque type de façades (par exemple A1, A2), un seul échantillon de personnes (A) sera constitué et participera à l'étude des deux sites d'une même ville. Il apparaît alors que les deux types de façade doivent être présents sur chaque site et se trouver non loin l'une de l'autre permettant ainsi d'offrir un environnement globalement similaire.

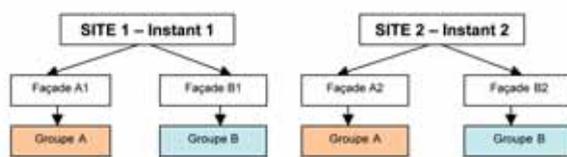


Fig. 12 : Principe d'une caractérisation globale de l'environnement. Pour chaque type de façades (par exemple A1, A2), un seul échantillon de personnes (A) sera constitué et participera à l'étude des deux sites d'une même ville

L'évaluation des ambiances sociales et physiques (visuelles, olfactives, climatiques et sonores) se fera simultanément sur un même site par deux groupes identiques (A et B) du point de vue socio-démographique, au moyen d'un questionnaire. Il sera constitué principalement de questions fermées reprenant notamment les critères précédemment validés.

Morphologie des façades et diffusion acoustique : les lois de réflexion (phase 3)

Les travaux précédents ont d'ors et déjà montré l'influence de la diffusion de façade sur la propagation acoustique dans une rue. D'un point de vue perceptif, comme en acoustique des salles, on peut également s'attendre à des influences non négligeables de la diffusion sur la perception sonore d'un lieu, en terme de qualité notamment. La valeur des résultats issus d'outils de prévision en acoustique urbaine (comme actuellement les logiciels de tracé de rayons) repose donc sur la manière dont ils vont intégrer cette diffusion dans le cœur de leur calcul (cf. la phase 4 du projet). Il est cependant d'abord nécessaire de pouvoir caractériser ces lois de réflexion – qui sont pour l'instant inconnues – pour des morphologies «types» de façade. Dans le cadre de notre projet, plusieurs approches sont envisagées. La première repose tout naturellement sur la mesure de ces lois de réflexion, soit *in situ*, soit sur maquette. En parallèle, seront entreprises deux autres approches, basées sur «description géométrique tridimensionnelle» des façades par analyse photogrammétrique. La première consistera à réaliser une étude BEM sur plusieurs coupes de façades, pour définir une loi de réflexion moyenne sur l'ensemble de la façade. La seconde repose sur une analyse fractale des éléments de façade pour caractériser leur potentialité de diffusion.

Approche expérimentale :

mesure de lois de réflexion *in situ* et sur maquette

L'évaluation de la réflexion diffuse des façades réelles sera faite *in situ* et sur maquette à partir de mesures de réponses impulsionnelles de type MLS ou autre (figure 13). Le principe consiste à envoyer un signal sonore en direction de la façade, pour ensuite capter simultanément l'onde incidente et l'onde réfléchi par la façade. Après traitement des différents signaux, il est possible de déterminer la réponse impulsionnelle de la façade, laquelle est ensuite traitée pour ne retenir que les contributions de la façade.



Fig. 13 : Système expérimental pour la mesure de la loi de réflexion d'une façade. La source sonore est disposée en hauteur (dans la nacelle). Le microphone est monté à l'extrémité d'un mât, à la même hauteur que la source. Un dispositif au sol permet de déplacer le mât microphonique sur un demi-cercle centré sur la façade. Le traitement temps réel des signaux sources et microphoniques permet de calculer la réponse impulsionnelle de la façade pour des position de source et de récepteur donnée

Ces contributions sont alors analysées dans le domaine fréquentiel, ce qui permet ensuite de déterminer la fonction de transfert de la façade pour des positions de source et de récepteur données. Reproduisant cette procédure pour plusieurs positions de récepteur, l'ensemble des fonctions obtenues permet alors de déterminer la loi de réflexion de la façade, à une fréquence donnée et pour une position source. Les résultats se présenteront alors sous la forme d'un diagramme de directivité de surface, représentant les lois de réflexion en coordonnées polaires de la façade pour chacune des bandes de fréquence spécifiées [19,20].

Approches morphologiques :

représentation de la potentialité de diffusion

Dans les deux cas envisagés, il conviendra de disposer d'une description tridimensionnelle des façades étudiées. Ce relevé des façades sera réalisé en utilisant un système de photogrammétrie portable associé à une chaîne topographique classique (théodolite) (figure 14). Cet équipement permet d'avoir, à partir de clichés calibrés, une représentation à la fois visuelle et numérisable des surfaces à plusieurs échelles (figure 15) avec une précision supérieure au millimètre.

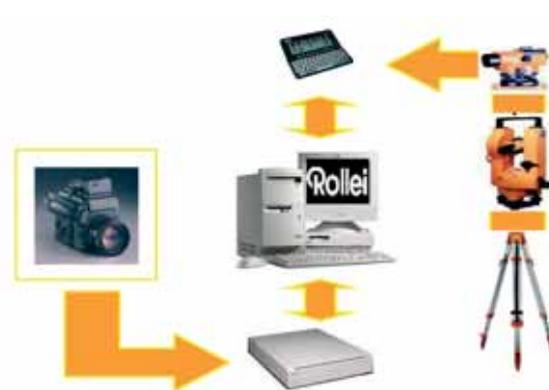


Fig. 14 : L'analyse photogrammétrique permet de définir avec précision les formes, les dimensions et la position dans l'espace d'un objet quelconque, en utilisant essentiellement des mesures faites sur plusieurs photographies de cet objet

Il devient alors possible de repérer les irrégularités de surface (depuis le grain du revêtement jusqu'à la présence de balcon en passant par des modénatures diverses : corniches, colonnades...) qui constituent la rugosité de la façade et d'en déduire par comparaison de densité de points, d'arêtes..., son *indice de potentialité de diffusion* [21].

Ce dernier pourra être évalué par une méthode purement géométrique utilisant les données spatiales issues de l'analyse photogrammétrique après restitution graphique de la surface [22] ou en effectuant une analyse fractale des surfaces restituées [23]. Cette dernière méthode permet de modéliser les comportements acoustiques spécifiques à chacune des fréquences spatiales de la structure de façade analysée, pour chaque angle de réception et pour chaque fréquence de la source sonore incidente. L'analyse fractale nous permettra ainsi,



(a) Prise de vue par photogrammétrie



(b) Traitement numérique de la photographie après calibrage topographique



(c) Représentation numérique à l'échelle de la façade complète



(c) Représentation numérique à l'échelle d'un élément de façade (fenêtre et corniche)

Fig. 15 : Représentation numérique d'une façade après analyse par photogrammétrie

par le traitement de la seule information géométrique des façades urbaines, de déduire son comportement acoustique dans tout le spectre des fréquences sonores (figure 16).

D'autre part, en réalisant des calculs par élément de frontière (2D et 2D 1/2) à partir des données issues de l'analyse photogrammétrique, il sera possible de déterminer des lois de réflexion pour des coupes particulières des façades. En moyennant ces lois de réflexion sur l'ensemble des façades, nous disposerons ainsi d'une loi de réflexion «moyenne» de la façade.

Intégration d'une base de données architecturales / lois de réflexion dans les outils de simulation (phase 4)

De manière générale, les lois de réflexion obtenues par la mesure ou numériquement seront croisées avec les caractéristiques géométriques des façades afin d'estimer leur *indice de potentialité de diffusion*, information permettant de proposer un type de classement qui soit utilisable par les architectes. Le catalogue de façades sera alors construit à partir d'une grille d'analyse basée sur une typologie des *indices de potentialité de diffusion*. Afin d'illustrer la méthode, quelques lois de réflexion



Fig. 16 : Principe du calcul de la potentialité de diffusion d'une façade urbaine par technique fractale. L'analyse fractale des arêtes constituant les objets architecturaux présents sur une façade, permet de définir les lois de diffusion de la façade pour plusieurs fréquences spatiales

correspondant à différents *indices de potentialité de diffusion* seront intégrées dans un logiciel de tracé de rayons. Ce logiciel sera ensuite appliqué à une configuration urbaine réelle (rue dont la loi de réflexion est connue) afin de valider l'ensemble de l'approche.

Conclusion

Ce projet de recherche devrait constituer une avancée majeure dans le cadre de la prévision acoustique en milieu urbain, en proposant d'intégrer pour la première fois des lois de réflexion réelles [24] dans les outils de simulation acoustique. D'autre part, les recherches menées pendant la phase 2 devraient apporter des informations complémentaires intéressantes en matière de perception sonore en milieu urbain. En associant les résultats obtenus d'un point de vue perceptif avec les résultats physiques de la propagation pour différentes façades urbaines, l'architecte pourrait disposer d'un outil lui permettant de proposer des morphologies de façade «idéales», c'est-à-dire, favorisant simultanément la diminution du bruit dans la rue, tout en offrant une ambiance sonore «agréable».

Références bibliographiques

- [1] R.H. Lyon, Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation, *Journal of the Acoustical Society of America* 55(3), 493-503, 1974.
- [2] H.G. Davies, Multiple-reflection diffuse-scattering model for noise propagation in streets, *Journal of the Acoustical Society of America* 64(2), 517-521, 1978.
- [3] C.H. Chew, Prediction of traffic noise from expressway. Part II: Buildings flanking both sides of expressway, *Applied Acoustics* 32, 61-72, 1991.
- [4] K. Heutschi, A simple method to evaluate the increase of traffic noise emission level due to buildings, for a long straight street, *Applied Acoustics* 44, 259-274, 1995.
- [5] R. Makarewicz, P. Kokowski, Reflection of noise from a building's facade, *Applied Acoustics* 43, 149-157, 1994.
- [6] H. Kuttruff, *Room acoustics*, Applied Science Publishers, 1973.
- [7] T. Hidaka, Sound field simulation. Some considerations of related problems for wave theoretical auralization, *CIARM'95*, 11-22, 1995.
- [8] J. Kang, Sound propagation in street canyons: comparisons between diffusely and geometrically reflecting boundaries, *Journal of the Acoustical Society of America* 107(3), 1394-1404, 2000.
- [9] J. Picaut, L. Simon, J. Hardy, Prediction of background noise in a built-up area, *Physical Review E* 60(4), 4851-4859, 1999.
- [10] S. Meunier, Critères psychoacoustiques des nuisances sonores : évaluation perceptive des bruits de circulation routière et ferroviaire, *Acoustique & Techniques* 26, 30-35, 2001.
- [11] J. Picaut, Numerical sound field modelling in room acoustics and workshops using sound particles, 7^{ème} Congrès Français d'Acoustique (CFA) – 30^{ème} Congrès de la Société Allemande d'Acoustique (DAGA), Strasbourg, France, 241-242, 2004.
- [12] J. Picaut, Effects of diffusion on the sound propagation in a street, *Internoise 2004*, Prague, République Tchèque, 2004.
- [13] P. Jean, A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise, *Journal of Sound and Vibration* 212(2), 275-294, 1998.
- [14] P. Jean, J. Defrance, Y. Gabillet, The importance of source type on the assessment of noise barriers, *Journal of Sound and Vibration* 226(2), 201-216, 1999.
- [15] D. Dubois., V. Maffiolo, M. Castellengo, Qualité sonore de l'environnement urbain : sémantique et intensité, *Acoustique & Techniques* 16, 14-21, 1998.
- [16] F. Chartier, Ecouter, ressentir, évaluer : vers de nouveaux descripteurs de l'environnement sonore urbain, rapport de stage de DESS « Psychologie Environnementale », Université René Descartes Paris 5, GRECO-Bx, 2004.
- [17] P. Woloszyn, Virtual Reality as an Ambience Production Tool, *IEPM'03 – International Conference on Industrial Engineering and Production Management*, Porto, 2003.
- [18] A. Barlet, Reconnaissance et perception de l'espace urbain à travers l'écoute de relevés sonores in situ, dans « Le projet urbain : Enjeux, expérimentation et professions » sous la direction de d'A. Hayot et A. Sauvage, Editions de La Villette, 258-265, 2000.
- [19] P. Woloszyn, How can Incidence Angle Improve the Determination of Urban Sound Diffusion?, 8th International Congress on Sound and Vibration (ICSV8), International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Hong Kong, Chine, 2001.
- [20] S. Colle, Etude de la réflexion diffuse en façade, rapport de stage de DEA Acoustique Appliquée de l'Université du Maine, GRECO-Bx, 2002.
- [21] C. Semidor, Relations entre architecture et qualité acoustique : contribution à la caractérisation acoustique d'un lieu d'écoute, Thèse d'Etat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, sous la direction de C. Azais, 1999.
- [22] R. Perrotin, Etude de la réflexion diffuse en façade : mise en forme des données architecturales, rapport de stage de 2^{ème} année Université de Technologie de Compiègne, GSU 03, Filière ECU, GRECO-Bx, 2003.
- [23] P. Woloszyn, Fractal Scattering Indicators for Urban Sound Diffusion, *Thinking in Patterns: Fractals and Related phenomena in Nature*, M. M. Novak Editions, World Scientific Publishing, Singapore, 221-232, 2004.
- [24] C. Semidor, A l'écoute d'une ville. Evaluation quantitative de la qualité du confort urbain vis-à-vis du bruit des transports, *Acoustique & Techniques* 26, 5-7, 2001.

1 - LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées.

2 - GRECO : Groupe Recherche Environnement Conception de Bordeaux.

3 - CERMA : Centre de recherche méthodologique d'architecture.

4 - CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment.

