

Calcul prévisionnel du bruit en milieu urbain : limites des approches actuelles et perspectives

Judicaël Picaut

Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes
Division Entretien, Sécurité et Acoustique des routes
Route de Bouaye
BP 4129
44341 Bouguenais CEDEX
Tél. : 02 40 84 57 89
Fax : 02 40 84 59 92
E-mail : Judicael.Picaut@lcpcc.fr

Résumé

Dans cet article, nous revenons sur les méthodes générales de prévision acoustique dans l'environnement, en insistant notamment sur les modèles de propagation utilisés en acoustique urbaine. Une analyse succincte des méthodes «classiques» montre qu'elles ne sont sans doute pas totalement adaptées à un milieu urbain «dense» (de type centre-ville), en raison de la complexité de la morphologie urbaine. Cette complexité se traduit notamment par la présence de multiples réflexions diffuses, d'encombrement et d'effets météorologiques spécifiques, qui peuvent avoir un effet important sur la prévision des niveaux sonores en milieu urbain. Nous terminons cet article en proposant deux approches qui sembleraient plus adaptées à la complexité de la morphologie urbaine et aux phénomènes propagatifs mis en jeu. La première, très simple, est basée sur des équations de transport (modèle énergétique). La seconde, beaucoup plus complexe à mettre en œuvre, est basée sur des résolutions numériques dans le domaine temporel (modèles ondulatoires).

Abstract

In this article, we reconsider the general methods of acoustic prediction in the environment, and mainly in urban area. A brief analysis of these methods shows that they are not adapted to typical urban environment like in city centre, because of the complexity of urban morphology. This complexity is particularly due to the presence of multiple diffuse reflections, meteorological effects and fitting objects in the street, which can have important effects on noise levels prediction in urban area. In parallel, we propose two alternative approaches which seem well adapted to the urban morphology complexity as well as to the propagative phenomena. The first one is based on transport equations (energetic model), and the second one concerns the numerical resolution of the wave equation in the temporal domain.

La prévision acoustique en milieu extérieur est un sujet particulièrement important, notamment depuis la mise en place de la directive européenne 2002/49/CE sur l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement. En particulier cette directive impose la production de cartes de bruit pour les grandes agglomérations, ce qui suppose donc d'avoir recours à des outils de prévision acoustique performants. Au niveau européen, le projet HARMONOISE a permis d'établir un certain nombre d'outils [1]. En France, les outils de simulation utilisent la «Nouvelle méthode de prévision du bruit» (NMPBRoutes -96) [2]¹. Les conditions de réalisation de ces cartes de bruit sont par ailleurs décrites dans un guide édité par le CERTU [3]. Toutefois, ces méthodes, comme beaucoup d'autres, ayant été initialement proposées pour modéliser la propagation acoustique en milieu ouvert ou périurbain (propagation à longue distance avec une prise en compte de quelques objets bâtis), on peut s'interroger sur leur application au cas d'un milieu urbain dense.

Dans cet article, il n'est toutefois pas question de répondre à cette question ou de montrer l'inapplicabilité des méthodes classiques, mais plutôt de soulever certains aspects physiques qui peuvent amener à relativiser les résultats obtenus. Par ailleurs, nous nous intéressons uniquement aux phénomènes propagatifs. Les aspects «sources sonores urbaines» et «indicateurs urbains» ne sont pas traités ici.

Dans un premier temps, nous revenons d'abord sur l'ensemble des méthodes classiques permettant de modéliser la propagation du son en acoustique architecturale et urbaine, puis nous présentons plus en détail le principe des méthodes utilisées dans les outils «opérationnels». Dans un second temps, et suite aux derniers résultats des recherches sur la propagation acoustique en milieu urbain, nous nous interrogerons sur l'absence de prise en compte des multiples réflexions diffuses de façades, de certains effets météorologiques,

ou même de l'encombrement, sur la prévision acoustique en milieu urbain. Enfin, ceci nous amènera alors à suggérer dans un troisième temps, des méthodes alternatives de prévision acoustique sans doute plus adaptées au milieu urbain.

Limites des approches actuelles

Les méthodes «classiques» de prévision acoustique en acoustique architecturale et urbaine

La modélisation des champs sonores en acoustique architecturale et urbaine est à l'origine d'un nombre considérable d'études, d'abord initiées dans le cadre de l'acoustique des salles (dès les années 1900), puis étendues plus tardivement au cas de l'acoustique urbaine (à la fin des années 70). Dans chacun des cas, l'objectif de ces études a été de proposer un ou plusieurs modèles de prévision acoustique, ou, de manière plus aboutie, permettant de simuler virtuellement l'acoustique d'un lieu (auralisation acoustique). Plusieurs approches ont ainsi été proposées [4,5] :

- Les méthodes **de résolution de l'équation des ondes et de décomposition modale** [5], bien que permettant une approche analytique exacte en théorie, sont difficilement applicables dans la majeure partie des situations courantes. En effet, cette démarche qui consiste à résoudre l'équation de propagation ou à décomposer le champ sonore sur les modes propres du milieu de propagation, ne peut être utilisée en pratique que pour des géométries simples (domaine rectangulaire), fermées (pas d'ouverture ou de couplage entre les domaines), vides et avec des caractéristiques d'absorption et de réflexion uniformes au niveau des surfaces (parois, façades, sol), ce qui n'est évidemment pas le cas en réalité, que ce soit pour une salle «usuelle» ou pour une rue, par exemple.

- Par ailleurs, les méthodes numériques fondées sur les **éléments finis** ou les **éléments de frontière**, pour la résolution numérique de l'équation d'onde ou de sa forme intégrale [6], et qui consistent à mailler le domaine d'étude ou sa surface, pour ensuite calculer le champ sonore en chaque nœud du maillage deviennent inapplicables à l'échelle d'une salle et encore moins, à l'échelle d'une rue. Ceci est notamment vrai en haute fréquence où les longueurs d'ondes sont très petites par rapport aux dimensions du milieu de propagation. Des conditions de convergence des résultats imposent en effet que la distance entre deux nœuds du maillage soit de l'ordre du dixième de la longueur d'onde, ce qui a pour conséquence d'imposer un nombre considérable de nœuds, et d'entraîner des temps de calcul de l'ordre de plusieurs jours à plusieurs semaines, suivant l'étendue du domaine d'étude ! De nouvelles méthodes numériques, permettant de prendre en compte certains phénomènes propagatifs complexes, ont également vu le jour, comme les méthodes des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [7] [10], particulièrement adaptées au milieu urbain. Bien qu'elle ne repose pas réellement sur la résolution de l'équation des ondes mais plutôt sur une équivalence physique, on citera également la méthode des lignes de transmission (TLM)

[8,9], dont l'application à l'urbain semble intéressante. Le principal intérêt de ces «nouvelles» méthodes repose sur le mode de résolution dans le domaine temporel, plutôt que dans le domaine fréquentiel, ce qui permet de considérer réellement la propagation acoustique comme un phénomène variable et non comme un phénomène stationnaire. Nous reviendrons plus loin sur ces méthodes.

- **La théorie statistique de la réverbération** (également appelée «théorie de Sabine», ou encore «théorie des champs diffus»), dont les fondements datent des travaux de W. C. Sabine [11] couramment employée en acoustique des salles. A la différence des méthodes précédentes à caractère «ondulatoire», cette approche est énergétique. Elle décompose la densité d'énergie totale du champ sonore en deux parties : le champ direct, résultant du rayonnement direct de la source, et le champ réverbéré résultant des multiples réflexions du son sur les parois du domaine. Par construction, la théorie classique de la réverbération impose l'uniformité de la réverbération et l'absence de flux d'énergie dans l'ensemble du milieu de propagation. Autrement dit, l'énergie sonore et la durée de réverbération sont uniformes en tout point du domaine étudié. Ces considérations permettent d'exprimer le temps de réverbération et l'énergie du champ réverbéré, sous forme d'expressions analytiques simples, parmi lesquelles les formules de Sabine et d'Eyring bien connues. Malheureusement, cette hypothèse dite de champ diffus n'est pas vérifiée en pratique, dès lors que la forme du milieu de propagation n'est plus homogène (formes allongées, comme des rues, des couloirs, des locaux plats) et que l'absorption acoustique devient importante et non uniforme. De plus, la théorie de la réverbération s'applique très mal aux géométries présentant des ouvertures, et en particulier au cas du milieu urbain.

- **La méthode des sources-images** [11,12], issue de l'acoustique géométrique², permet de calculer la densité d'énergie sonore dans un milieu de forme complexe et repose sur une analogie avec les rayons lumineux. Il s'agit là encore d'une approche énergétique, fondée sur la construction de sources virtuelles, images de sources réelles, simulant l'effet des réflexions successives de l'énergie sonore sur les parois de l'enceinte. La contribution énergétique de chaque source-image en un point donné est celle habituellement rencontrée dans le cas de la propagation en champ libre, pondérée par le coefficient d'absorption des parois considérées. Cette approche, principalement numérique, est néanmoins réductrice dans la mesure où les réflexions sur les parois du domaine sont traitées intégralement de manière spéculaire (angle de réflexion égal à l'angle d'incidence), alors que de nombreux auteurs ont montré l'importance des effets des réflexions diffuses dans le calcul du champ sonore [13,14] et dans les procédures liées à l'auralisation [15], en acoustique architecturale comme en acoustique urbaine.

1- La NMPB 96 est un sous-ensemble de la méthode française normalisée : «NF S31-133:2007 Acoustique – Bruit des infrastructures de transports terrestres – Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques».

2- Les hypothèses de l'acoustique géométrique stipulent que les ondes sonores se déplacent le long de rayons sonores, le plus souvent en ligne droite avec une célérité du son constante. Chaque rayon sonore est porteur d'une intensité sonore qui décroît avec l'inverse au carré de la distance de propagation, de manière à simuler la divergence géométrique de l'onde sonore.

- **La méthode du tracé de rayons** [16], très démocratisée, a donné naissance à de nombreux logiciels commerciaux de prévision du champ sonore, aussi bien en acoustique des salles (Odeon³, CATT-Acoustic^{TM4}...) qu'en milieu extérieur (Mithra[®] et Mithra-SIG^{®5}, SoundPLAN^{®6}, CadnaA^{®7}...). Cette approche énergétique, reposant également sur les hypothèses de l'acoustique géométrique, suppose que l'énergie sonore est distribuée sur un certain nombre de rayons rectilignes émis à partir d'une source sonore et déviés de manière spéculaire lors de leur rencontre avec les parois du milieu de propagation. Le calcul de l'énergie sonore au niveau d'un volume récepteur est réalisé par comptage du nombre de rayons qui le traversent. Le problème majeur réside dans la définition de la taille de ce volume, le plus souvent une sphère. En effet, il doit être représentatif d'un récepteur réel mais doit également permettre de comptabiliser suffisamment de rayons sonores pour déterminer le niveau d'énergie de manière précise, ce qui en pratique nécessite de tirer un grand nombre de rayons sonores, et ce d'autant plus que le milieu de propagation est de forme complexe et constitué de volumes «couplés». Pour résoudre ce problème, le logiciel Mithra utilise par exemple une méthode de tracé de rayons «inverse», qui part du récepteur vers la source. La notion de «rayons sonores» a également été étendue pour donner naissance à des méthodes de tracé de faisceaux sonores [17].

Au-delà de ces méthodes «classiques» qui ont donné lieu à la plupart des outils actuels de prévision des niveaux sonores en acoustique architecturale et urbaine, on peut également citer d'autres méthodes plus complexes, comme les méthodes de radiosité fondées sur une analogie avec l'éclairage [12] [18] ou les méthodes hybrides résultant du couplage de plusieurs méthodes entres-eux (tracé de rayons et sources-images [19], ou tracé de rayons et radiosité par exemple)... Néanmoins, dans la plupart des cas, ces méthodes sont trop complexes à mettre en œuvre et trop coûteuses en temps de calcul.

Ce que les approches «opérationnelles» prennent en compte...

D'un point de vue plus opérationnel, les logiciels de prévision acoustique de référence dans les bureaux d'étude utilisent des méthodes de calcul similaires. En France, le calcul est basé sur la «Nouvelle méthode de prévision du bruit» (NMPBRoutes – 96, NF S31-133:2007) [1], qui est par ailleurs très proche de celle décrite dans la norme internationale ISO 9613-2 [20]. Bien qu'initialement développée pour fournir une méthode de calcul de la propagation du bruit routier en milieu extérieur relativement ouvert (faible densité de bâtiments), ces méthodes sont également utilisées pour la prévision acoustique en milieu urbain, donc présentant une forte densité de bâtiments, ce qui est déjà en soi une forme de détournement de la méthode, dont nous reparlerons plus loin.

Par construction, ces méthodes reposent sur les notions de rayons sonores et de sources-images telle qu'elles ont été décrites plus haut. Il s'agit donc essentiellement de méthodes énergétiques et géométriques, applicables en trois dimensions (3D), mais bien souvent limitée à 2 dimensions. Il est important de préciser que ces méthodes n'intègrent pas de dépendance temporelle : les niveaux sonores sont calculés pour des sources sonores en régime établi ou permanent. Sans rentrer dans les détails⁸, ces méthodes permettent de prendre en compte le rayonnement direct entre la source

3- Odeon est un logiciel distribué par la société Brüel & Kjær (<http://www.bksv.com>)

4- CATT AcousticTM est un logiciel développé par la société CATT (<http://www.catt.se>)

5- Mithra[®] est un logiciel développé par le CSTB. Mithra-SIG[®] est un logiciel développé par l'IGN et le CSTB, distribué par la société Geomod (<http://www.geomod.fr/logiciels/mithra/mithra-sig.htm>)

6- SoundPLAN[®] est un logiciel développé par la société Braunstein + Berndt GmbH (<http://www.soundplan.com/>)

7- CadnaA[®] est un logiciel développé par la société DataKustik (<http://www.datakustik.de/frameset.php?lang=en>)

8- Le principe de la NMPB est détaillé dans l'article de Guillaume Dutilleul présent dans ce même numéro

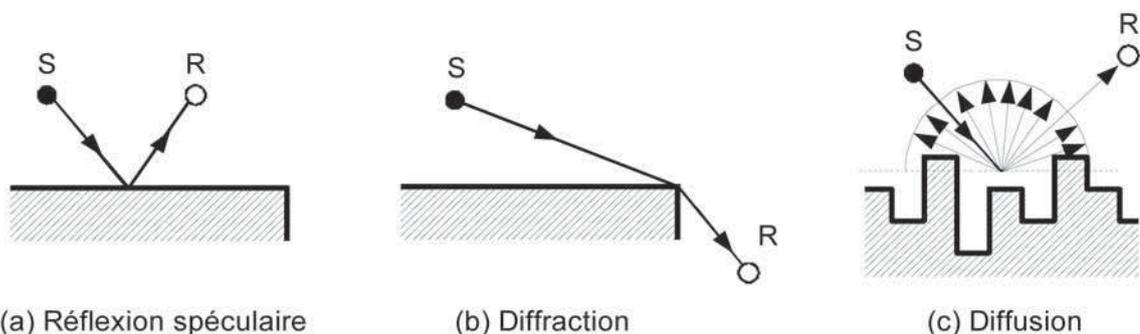


Fig. 1 : Réflexion (a), diffraction (b) et diffusion (c) par une façade urbaine. Pour une façade parfaitement plane, l'onde sonore est réfléchi de manière spéculaire : l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence (a). En présence d'une arête verticale ou horizontale, l'onde sonore est diffractée (b). Lorsque la façade est irrégulière (présence de fenêtres, modénature...), l'onde sonore est diffractée par chacun des éléments composant la façade (Figure 2) : l'ensemble de ces diffractions crée le phénomène de diffusion (c). Dans cet exemple, la diffusion est uniforme (l'onde sonore est diffusée dans toutes les directions avec la même amplitude). Néanmoins la figure de diffusion (ou lois de réflexion diffuses) est fonction de la taille, de la forme et de la distribution des irrégularités de façade.

Reflection, edge diffraction and diffuse reflection by a building. When building façades are perfectly plane surfaces, sound rays are reflected in the specular direction (the reflected angle is equal to the incident angle). In presence of building edges, sound rays are diffracted. When building surfaces are irregular, sound rays are diffracted by each building element (Figure 2), leading to the diffusion phenomena. In this example, we consider an uniform reflection, meaning that sound rays are reflected in all directions with the same probability.

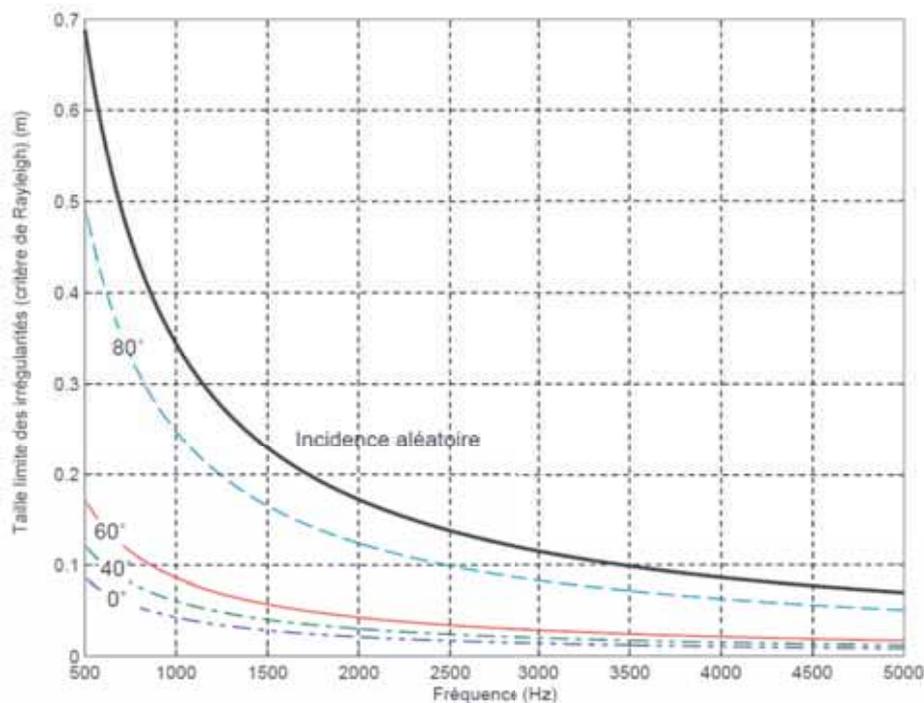


Fig. 2 : Définition de limite entre la réflexion spéculaire et la diffusion (utilisation du critère de Rayleigh), en fonction de la fréquence de l'onde sonore incidente et de la taille des irrégularités de façade, pour plusieurs angles d'incidence (0°, 40°, 60°, 80°) et en incidence aléatoire. Par exemple, à 3500Hz, en incidence aléatoire, les irrégularités de façade dont la taille est supérieure à 10cm généreront des réflexions diffuses

Rayleigh Criterion versus the frequency, for several incident angles (0°, 40°, 60°, 80°, and random incident). It defines the limit between specular and diffuse reflection in function of the size of the building irregularities. For example, at 3500Hz, in random incidence, irregularities of 10cm will produce diffusion

sonore et le récepteur Figure1(a)), lorsque celui-ci existe, les trajets réfléchis sur des parois planes verticales, en considérant l'hypothèse de réflexion spéculaire (l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence), les trajets diffractés par les arêtes horizontales et verticales, comme le bord d'un écran ou d'un bâtiment (Figure1(b)). Pour chacun des trajets, il faut alors considérer la divergence géométrique qui traduit l'affaiblissement du niveau sonore en fonction de la distance de propagation, l'absorption atmosphérique due aux effets visco-thermiques lors de la propagation du son dans l'air, en fonction de la distance de propagation, les effets de sol, résultant de l'interférence entre l'onde sonore réfléchi par la surface du sol et le rayonnement direct, et fonction de la nature plus ou moins acoustiquement absorbante des sols. Plus précisément, les effets de sol sont pris en compte par l'intermédiaire d'un coefficient d'absorption en énergie. Enfin, et de manière à prendre en compte les effets météorologiques sur la propagation du son, la NMPB intègre plus particulièrement des termes correctifs définis pour des conditions «favorables» à la propagation ou pour des conditions «homogènes».

Ce que les approches «opérationnelles» ne prennent pas en compte...

Limite entre le milieu semi-ouvert (périurbain) et le milieu urbain

Comme nous l'avons déjà signalé plus haut, les méthodes de prévision acoustique en milieu extérieur ont été développées pour des milieux de propagation «ouverts». Par cette dernière

expression, il faut comprendre des milieux de propagation pouvant présenter quelques obstacles, bien détachés les uns des autres, comme des bâtiments ou des écrans acoustiques dans une zone périurbaine. Dans ces conditions, ces méthodes donnent des résultats très satisfaisants. Le cas du milieu urbain est complètement différent, puisque la densité de bâtiments est telle qu'il n'est pas possible de les considérer individuellement. Ces bâtiments forment des réseaux de rues qui vont contribuer à des phénomènes propagatifs propres, et qui sont détaillés par la suite.

Les multiples réflexions et la diffusion de façade

Les méthodes classiques considèrent que la réflexion acoustique d'une onde sur une façade est exclusivement spéculaire, ce qui revient à considérer que les façades agissent comme des «miroirs parfaits». Cependant, la morphologie réelle d'une façade est de très loin différente d'une surface parfaitement plane. La présence d'irrégularités de façade (menuiseries, pierres de taille, renforcements...) donne naissance à des réflexions sonores dans d'autres directions que la réflexion spéculaire (Figure1(a)) : on parle alors de «réflexions diffuses» ou de «diffusion de façade» (Figure 1(c)). La «forme» de la diffusion dépend en général de la taille et la distribution des irrégularités de façades, mais également de la fréquence et de la direction d'incidence de l'onde sonore (Figure 2).

Pour caractériser la «capacité» des façades à produire des réflexions diffuses, il est commun d'introduire un coefficient de diffraction d compris entre 0 et 1, semblable à celui

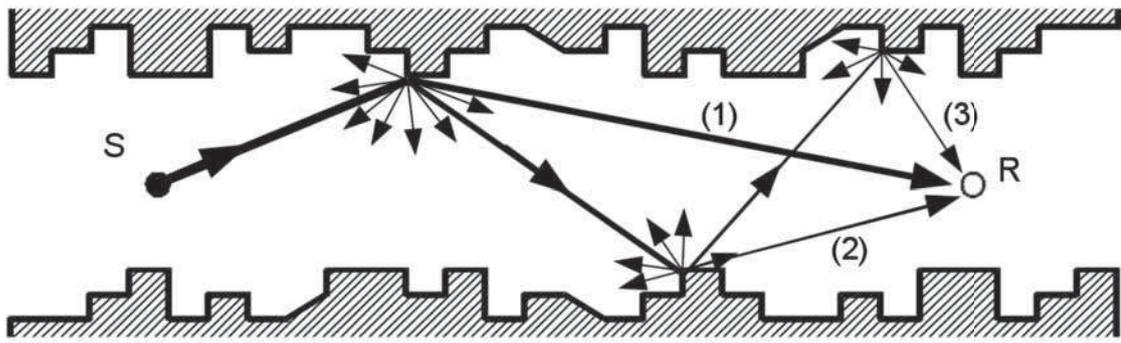
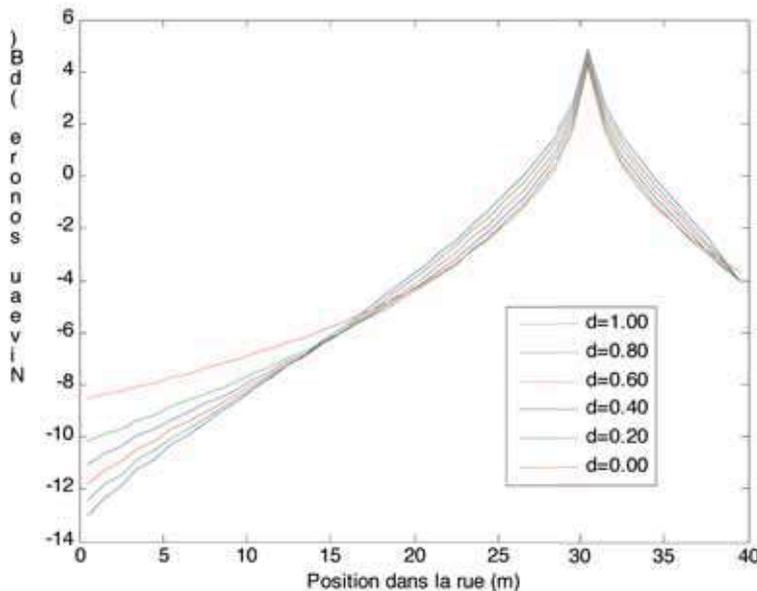
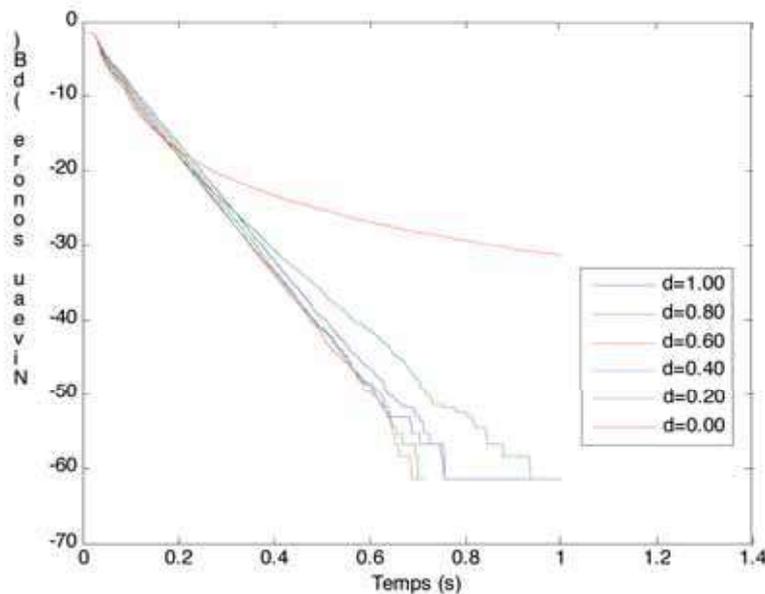


Fig. 3 : Réflexions diffuses multiples dans une rue. Dans cet exemple, les réflexions diffuses d'ordre 1 (1 réflexion diffuse), d'ordre 2 (2 réflexions diffuses) et d'ordre 3 sont présentées

Illustration of first order, second order and third order multiple diffuse reflections in a street



(a) Atténuation sonore globale dans l'axe d'une rue



(b) Décroissance globale du niveau sonore dans une rue

Fig. 4 : Atténuation (a) et décroissance (b) globales dans une rue de 8m de large, 40m de long et 8m de hauteur, en fonction du coefficient de diffusion d des façades ($d=0.00$ désigne des façades 100% spéculaires ; $d=1.00$ désigne des façades 100% diffuses avec la loi de Lambert). L'absorption des façades et l'atténuation atmosphérique sont négligées. La diffusion est modélisée par une loi de Lambert. Le sol est supposé parfaitement réfléchissant (spéculaire). La source sonore, de niveau de puissance normalisé 0dB, est située en (6.5,30.5,1.5). Simulations réalisées avec le code de calcul SPPS [23]

Sound attenuation (a) and sound decay (b) in a street of 8m width, 40m long and 8m height, for several values of the scattering coefficient d of the building façades ($d=0.00$ for specular reflection; $d=1.00$ for diffuse reflection). The diffusion is modelled using the Lambert's law. The ground is supposed to be perfectly reflecting. Sound absorption by façades and atmospheric attenuation are neglected. The sound source, with a normalised sound power of 0dB, is located at position (6.5,30.5,12.5) in the street. Numerical simulations are carried out with the SPPS software [23]

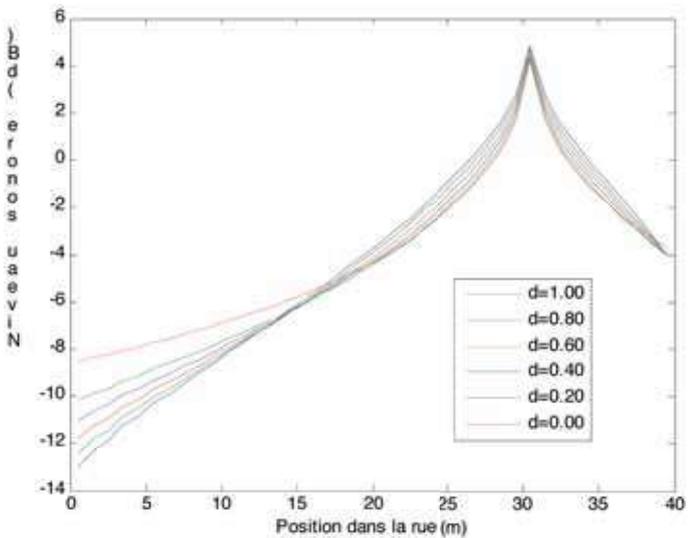
introduit en acoustique des salles. Pour des façades entièrement «spéculaires», ce coefficient vaut 0 ; pour des façades entièrement diffuses, il vaut 1. En général, la réflexion acoustique par une façade est un mixte entre ces deux types de réflexion [4,5].

Par ailleurs, en milieu urbain, la densité de bâtiments est telle que ces réflexions diffuses vont elles-mêmes donner naissance à de nouvelles réflexions diffuses, et ainsi de suite (Figure 3). Ces multiples réflexions diffuses alimentent un champ sonore «diffus» qui devient prépondérant face au champ direct et aux premières réflexions spéculaires, proche de la source, puis décroît

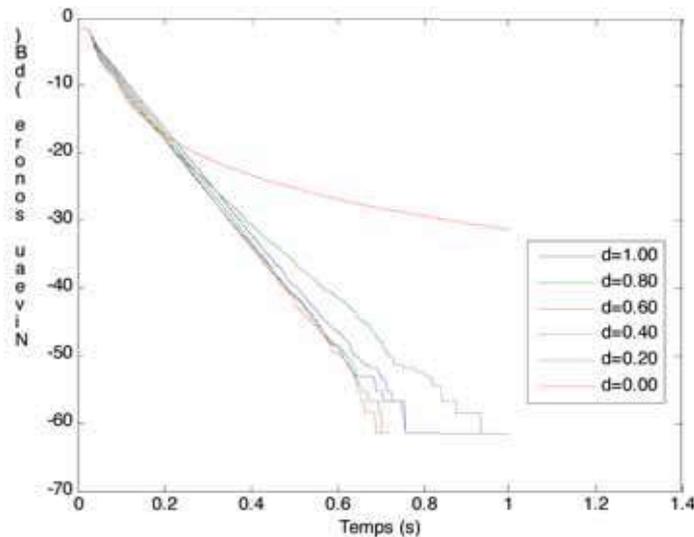
très vite loin de la source (Figure 4). S'il n'existe pas de trajet direct entre la source et le récepteur (si la source est dans une rue, et que le point récepteur est dans une rue adjacente par exemple), le champ sonore au point récepteur est presque exclusivement alimenté par ces multiples réflexions diffuses. Dans ces mêmes conditions, les méthodes classiques auraient donc tendance à sous-estimer le niveau sonore, puisqu'il serait dans ce cas alimenté uniquement par les diffractions sur les «coins de la rue» et éventuellement les réflexions spéculaires si elles existent. Par ailleurs, la Figure 4 montre également que la décroissance temporelle dans la rue est largement modifiée par les conditions de réflexion sur les façades : la durée de réverbération est plus courte pour des façades produisant des réflexions diffuses ($d=1,00$) que pour des façades produisant des réflexions spéculaires ($d=0,00$).

Enfin, des études récentes [4] ont montré que la propagation acoustique dans une rue est fonction de la forme des réflexions diffuses, elles-mêmes fonction de la morphologie des façades. A titre d'exemple, la Figure 5 montre l'effet de lois de réflexion diffuse différentes, sur l'atténuation sonore et la réverbération dans une rue. Comparée à des réflexions spéculaires, cette figure montre que la différence de niveau sonore à l'extrémité de la rue peut atteindre jusqu'à 5dB suivant les lois de réflexions diffuses, et que la durée de réverbération peut diminuer d'un facteur 6. Ces calculs, réalisés par une approche particulière⁹ avec des lois de réflexion diffuse arbitraires ont également été validés par des calculs par éléments de frontières¹⁰ sur des coupes de rues, en prenant en compte des façades réelles¹¹.

Ceci montre bien l'importance de considérer les réflexions diffuses dans les outils de prévision acoustique pour le milieu urbain, soit en prenant en compte des lois de réflexions diffuses (dans les approches énergétiques géométriques et en complément des réflexions spéculaires) [21,22], soit en prenant compte la morphologie architecturale réelle des façades (dans des approches ondulatoires de types éléments de frontière par exemple). Des études ont ainsi été réalisées pour essayer de mesurer les lois de réflexion réelles des façades [4], mais l'analyse des données expérimentales s'est avérée difficile. Cette approche expérimentale a laissé place à des approches numériques pour modéliser les lois de réflexion de façades urbaines réelles à partir de leur modèle numérique [21,22], mais au détriment de temps de calcul très long.



(a) Atténuation sonore globale dans l'axe d'une rue



(b) Décroissance globale du niveau sonore dans une rue

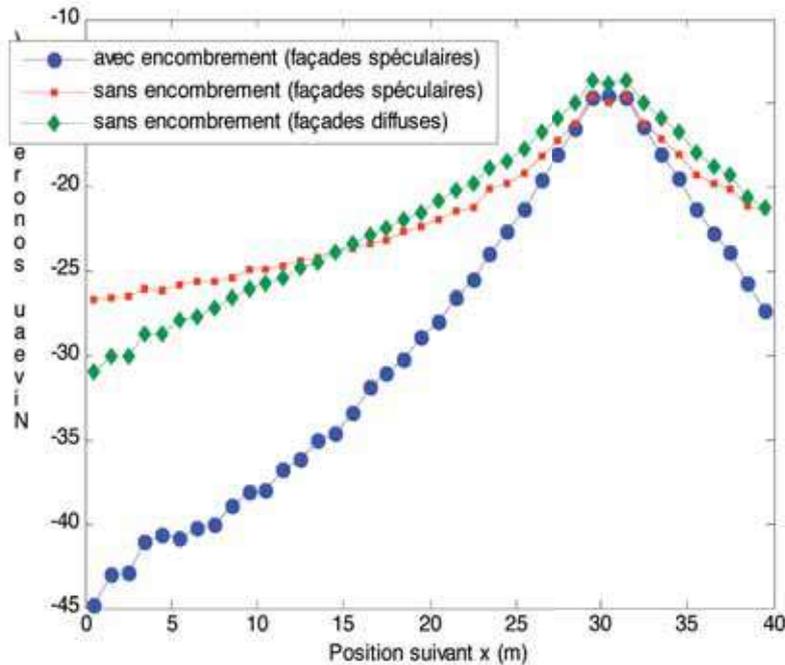
Fig. 5 : Atténuation sonore (a) et décroissance globale (b), pour différentes lois de réflexion sur les façades. La loi de Lambert est une loi de réflexion en $\cos \theta$, θ désignant l'angle d'incidence. La loi uniforme traduit une réflexion équiprobable dans toutes les directions. Les lois en wn (n , entier positif) traduit des réflexions orientées autour de la normale à la façade. Les lois semi-diffuses sont des lois de réflexion centrées autour de la réflexion spéculaire [4]

Sound attenuation (a) and sound decay (b) for several diffuse reflection laws: Lambert's law, uniform reflection, wn laws (the direction of reflection is around the normal to the façade), and semi-diffuse reflections (the reflection is around the specular direction) [4]

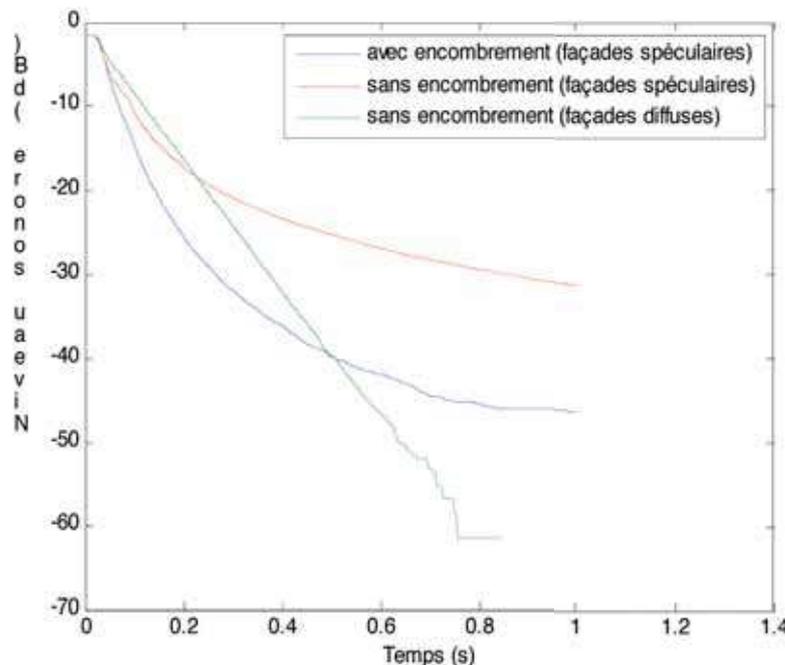
9- Les calculs ont été réalisés avec le logiciel SPPS développé par le LCPC [23]. Ce code est basé sur une approche particulière (particules sonores), qui est une extension de la méthode des rayons, et qui permet de modéliser la plupart des phénomènes propagatifs (absorption, atténuation, réflexion, diffusion) par une méthode de Monte-Carlo (tirage aléatoire).

10- Les calculs par éléments de frontière ont été réalisés avec le logiciel MICADO développé par le CSTB [24].

11- Des relevés photogrammétriques réalisés par l'Ecole d'architecture de Bordeaux ont permis de réaliser des modèles numériques de façades réelles. Ces modèles ont pu ensuite être intégrés directement dans le code de calcul par éléments de frontière MICADO [24].



(a) Atténuation sonore dans l'axe d'une rue



(b) Décroissance globale du niveau sonore dans une rue

Fig. 6 : Atténuation sonore au centre de la rue à 1,5 m de hauteur (a) et décroissance globale dans la rue (b) avec et sans encombrement. L'encombrement est modélisé de manière statistique, en considérant 50 véhicules répartis sur la chaussée (320 m²). Chaque véhicule est caractérisé par une surface diffractante de 3 m², parfaitement diffusante (diffusion uniforme dans toutes les directions). Les façades sont 100% spéculaires ou 100% diffuses (suivant les cas). Le sol est 100% spéculaire.

Sound attenuation in the middle of the street at 1.5m height (a) and global sound decay (b) with and without fitting objects. A probabilistic modelling is used for the fitting objects: 50 cars are considered on the pavement. Each car is defined by a scattering surface of about 3m², and is perfectly diffuse (the diffusion is uniform). Building façades are specular or diffuse. The pavement is specular.

Cette notion de champ diffus alimenté par les multiples réflexions diffuses a également donné naissance à un nouveau modèle de prévision acoustique, basé sur le concept de particules sonores et sur les équations de transport/diffusion, qui a été largement appliqué et validé en acoustique des salles [25] et en acoustique urbaine [26,27,28]. L'intérêt principal de cette méthode réside dans les temps de calcul qui sont de l'ordre de quelques secondes en régime permanent, à quelques minutes en régime variable, y compris à l'échelle de plusieurs rues. Nous reviendrons sur cette méthode à la fin de ce document.

L'encombrement dans les rues

La plupart des outils de prévision acoustique pour le milieu urbain considère que les rues sont vides de tout objet. Toutefois, la présence de voitures en stationnement ou en circulation, et même de mobiliers urbains, est source de réflexions acoustiques supplémentaires (réflexion acoustique sur un abri bus par exemple), pouvant générer de la diffusion, ce qui peut avoir un impact sur la distribution et l'atténuation du champ sonore dans une rue, surtout proche du sol.

À titre d'illustration, la Figure 6 présente l'effet de la présence de véhicules dans une rue, sur l'atténuation sonore et la réverbération du son dans une rue. En présence d'un encombrement, l'atténuation sonore proche du sol est beaucoup plus importante que si la rue est vide. Par ailleurs, la décroissance temporelle est également plus rapide. Cette étude préliminaire semble donc montrer l'intérêt de prendre en compte l'encombrement présent à l'intérieur d'une rue, dans les outils de prévisions acoustiques. Afin d'approfondir l'influence de l'encombrement sur la propagation acoustique dans une rue et d'en évaluer les effets relatifs par rapport aux autres phénomènes propagatifs (diffusion de façade, effets météorologiques), des études complémentaires, numériques et expérimentales, sont toutefois nécessaires.

Les phénomènes météorologiques en milieu urbain

En milieu ouvert, les conditions micro-météorologiques (gradient thermique, turbulence d'origine thermique et aérodynamique) peuvent avoir une influence importante sur la propagation

acoustique à longue distance [29,30]¹². C'est d'ailleurs pour cette raison que la NMPB intègre par exemple des conditions météorologiques «simplifiées» dans ses calculs. En milieu urbain, les distances de propagation sont nettement inférieures à celles des problèmes en milieu ouvert. D'autre part, il est probable que l'effet des gradients thermiques à l'échelle d'une rue soit faible. On peut donc penser dans un premier temps que les effets météorologiques sont négligeables en milieu urbain¹³.

Toutefois, la présence d'un bâti dense peut engendrer des comportements aérodynamiques particuliers, comme l'effet «canyon» d'une rue, amplifiant ou diminuant la célérité du son en fonction de la direction du vent moyen dans la rue, ou encore les effets de turbulences aérodynamiques créés par les sommets des bâtiments, notamment en présence d'un vent perpendiculaire à une rue, ainsi que les effets de turbulences thermiques.

En l'absence¹⁴ d'une étude expérimentale sur l'effet des conditions météorologiques sur la propagation acoustique en milieu urbain, il est toutefois difficile d'évaluer leur importance réelle. Des études numériques, basées sur des approches ondulatoires, et notamment la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), ont cependant déjà montré l'importance de la turbulence atmosphérique. Ögren et Forssén [31] ont par exemple mis en évidence des augmentations de 2 à 5 dB à 1 600 Hz des niveaux sonores en présence de turbulence, tout en soulignant la difficulté de la détermination des paramètres réels de la turbulence en milieu urbain. Ces résultats ont d'ailleurs été confirmés par ceux de Renterghem et al [32]. En basse fréquence, ces études ont montré les effets de la turbulence semblent négligeables. De son côté, Heimann [10] a montré¹⁵ l'influence de la forme et de l'absorption acoustique des toits (plat ou oblique) sur le niveau sonore entre deux bâtiments dans un ensemble périurbain (bâtiments parallèles et détachés), en présence d'un vent transversal par rapport à l'axe de la rue.

Ces études, bien que préliminaires, et à prendre avec précaution en l'absence de validations expérimentales, tendent quand même à montrer par des approches différentes que l'absence de prise en compte des effets météorologiques et de la morphologie architecturale réelle¹⁶ peut être à l'origine d'une erreur importante sur la prévision des niveaux sonores. Cela est sans-doute le cas lorsque les sources sonores sont relativement éloignées des points récepteurs (récepteurs dans des zones «calmes» par exemple).

Les phénomènes interférentiels

La plupart des méthodes de prévision acoustique couramment utilisées en acoustique architecturale et urbaine, comme la NMPB¹⁷, sont des approches énergétiques. L'intérêt de ces méthodes est de considérer les ondes sonores comme des phénomènes incohérents (donc sans relation de phase), de telle manière que l'on puisse additionner leurs contributions respectives. Cette hypothèse permet de diminuer considérablement la complexité et la durée des calculs par rapport à une approche ondulatoire.

En milieu urbain, il est tout à fait possible de considérer que le champ diffus résultant des multiples réflexions

diffuses est de nature incohérente, notamment en hautes fréquences (typiquement 500 Hz), pour lesquelles la longueur d'onde est très inférieure aux distances caractéristiques d'une rue (comme la largeur de la rue) ou des façades (comme la taille des irrégularités de façade). Par ailleurs, certains effets micro-météorologiques comme la turbulence semblent participer à la diffusion de l'énergie sonore à ces fréquences.

En basse fréquence, les longueurs d'onde peuvent être de l'ordre de grandeur des dimensions caractéristiques de la rue ou des façades, ce qui peut engendrer par exemple des phénomènes d'ondes stationnaires entre les façades d'une rue, y compris lorsque les façades sont de formes très irrégulières. Ce résultat a notamment été mis en évidence dans l'étude présentée à la référence [21]. L'approche énergétique est donc limitée, puisqu'elle ne peut pas modéliser ce type de phénomène.

Plus globalement, l'ensemble des phénomènes mis en jeu durant la propagation, quelque soit la fréquence (réflexion par les façades, réflexion par le sol, diffraction, effets météorologiques) interagissent entre eux du fait des relations de phase. Pour obtenir une description fine de la propagation intégrant l'ensemble des phénomènes mis en jeu, les méthodes énergétiques devront laisser place un jour ou l'autre à des approches ondulatoires.

Conclusion

Dans ce document, nous avons essayé de mettre en évidence les limites des outils actuels de prévision acoustique en milieu urbain, concernant la modélisation des phénomènes propagatifs. **L'origine commune de ces limites est la complexité de la morphologie architecturale urbaine**, aussi bien au niveau de la rue (réseau de rues, rue de largeur variable...) que de la façade (répartition et taille des irrégularités de façade). Cette complexité architecturale engendre des effets sur la propagation acoustique différents de ceux rencontrés en milieu ouvert ou semi-ouvert. Parmi ces effets, nous avons insisté notamment sur les **multiples réflexions diffuses** qui engendrent un champ sonore «diffus» qui est souvent prépondérant par rapport au rayonnement direct et aux réflexions spéculaires. Nous avons également souligné

12- Voir également l'article de Benjamin Cotté et Philippe Blanc-Benon, dans ce même numéro.

13- Le guide du CERTU sur l'application de la directive 2002/49/CE en agglomération [3], considère effectivement que ces effets météorologiques sont négligeables en milieu urbain.

14- Un projet de recherche sur «l'influence des effets micro-météorologiques sur la propagation acoustique en milieu urbain», piloté par le LCPC, en collaboration avec le laboratoire de mécanique des fluides (UMR CNRS 6598) de l'École centrale de Nantes, et le laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine (UMR CNRS 6613) devrait toutefois débuter en 2008 (projet de 4 ans financé par la région des Pays de la Loire).

15- Dans cette étude, Heimann a utilisé un modèle temporel de propagation basé sur les équations linéarisées d'Euler (LE) en trois dimensions.

16- L'effet de la turbulence atmosphérique est directement lié à la forme de chaque bâtiment et à l'organisation des bâtiments entre eux. La morphologie architecturale va donc de pair avec les effets météorologiques : une mauvaise connaissance de l'un des deux, engendrera vraisemblablement des écarts importants sur les prévisions acoustiques.

17- Les phénomènes pris en compte dans la NMPB, comme la diffraction par les écrans et la réflexion par le sol, prennent bien en compte la notion de fréquence dans le calcul de leurs effets respectifs. Par contre, les contributions de chaque effet sont additionnées au point récepteur, donc sans prendre en compte les relations de phase.

l'influence de certains effets météorologiques (vent longitudinal et transversal moyen dans une rue, turbulence atmosphérique), fortement liée à la forme et à l'organisation du bâti. Nous avons également soumis l'hypothèse d'une influence de l'encombrement présent dans une rue, sur les niveaux sonores notamment à proximité du sol. Il semble donc indispensable d'intégrer ces effets dans les calculs prévisionnels.

La plupart des méthodes utilisées en acoustique urbaine sont des approches basées sur les hypothèses de l'acoustique géométrique, donc essentiellement énergétiques. Par conséquent, les effets de chacun des phénomènes propagatifs (réflexion, diffraction, diffusion, absorption, effets météorologiques...) peuvent «s'additionner». Dans ces conditions, la difficulté réside dans le fait de proposer un modèle qui puisse intégrer l'ensemble des phénomènes. Parmi les approches que nous avons citées, celle basée sur le concept des particules sonores et des équations de transport/diffusion semble à même de répondre à cette difficulté. L'intérêt de ce modèle réside dans la rapidité des calculs quelle que soit la complexité du domaine étudié, et sa capacité à intégrer de nombreux phénomènes, tels que la diffusion de façade [28], la transmission acoustique par des cloisons et des ouvertures [33], les fortes absorptions, l'atténuation atmosphérique, la présence d'encombrements [34] et potentiellement les effets météorologiques. Par ailleurs, ce même modèle étant appliqué simultanément en acoustique des salles et en acoustique urbaine, il autorise une modélisation globale du bruit en milieu urbain, en permettant de considérer les échanges entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments. Enfin, à la différence des méthodes classiques, cette méthode est temporelle, et permet donc de calculer l'évolution du niveau sonore au cours du temps. Cet aspect «temporel» peut être fondamental en milieu urbain dans la mesure où les nuisances sonores semblent plus liées aux fluctuations de niveau sonore¹⁸ et aux émergences par rapport au niveau moyen, qu'à des valeurs «globales» sur des périodes données.

Toutefois, comme pour la propagation acoustique à longue distance, la réalité des phénomènes physiques fait que les effets propagatifs interagissent entre-eux en raison des relations de phase entre les ondes sonores. En augmentant le nombre de phénomènes pris en compte dans les outils de calcul «classiques» - ce qui est toutefois nécessaire pour améliorer les prévisions acoustiques en milieu urbain -, on risque également d'augmenter les incertitudes sur les

résultats des calculs, du fait de cette absence de prise en compte des interactions entre les phénomènes. Nous sommes donc en présence d'un paradoxe qu'il faudra garder à l'esprit, tant que des approches énergétiques seront utilisées.

Pour sortir de ce paradoxe, une solution possible consiste à utiliser des approches ondulatoires numériques, seules méthodes permettant de prendre en compte la morphologie réelle du milieu urbain. Le **développement de nouvelles méthodes de résolution numérique dans le domaine temporel** (FDTD et TLM par exemple) constitue le premier axe de cette évolution attendue des modèles. Pour se convaincre de l'intérêt de ces approches, il suffit de considérer le nombre croissant d'études utilisant des méthodes temporelles en acoustique des salles, comme en milieu extérieur, y compris en acoustique urbaine¹⁹.

Le second axe de cette évolution, se situe au niveau de la **disponibilité de maquettes numériques du milieu urbain**, dont la précision s'est extrêmement accrue ces derniers temps, que ce soit au niveau des façades, du quartier ou de la ville. Là encore, des applications récentes dans d'autres domaines (Google Earth, Géoportail IGN, bases de données BD TOPO® et BATI 3D®, Villes en 3D des Pages Jaunes) montrent que les données existent. Enfin, le troisième axe de cette évolution vient de l'**augmentation constante de la puissance de calcul des ordinateurs personnels** et la simplification des techniques de calcul numériques. On peut citer par exemple les techniques de calculs distribués²⁰, permettant d'utiliser un réseau local d'ordinateurs de bureau pour des calculs scientifiques, ou encore le calcul parallèle²¹ sur des ordinateurs de bureau équipés de la nouvelle génération microprocesseurs multi-cœurs (2 à 4 cœurs), et enfin le «détournement» de la puissance des cartes graphiques, avec des capacités²² de calcul extrêmement poussées, pour faire du calcul scientifique (solution²³ Tesla de Nvidia).

Enfin et pour conclure, le développement de nouvelles techniques de calcul permet également d'envisager la simulation audio (auralisation) d'un environnement complexe, comme le milieu urbain (à une échelle de propagation toutefois réduite). On peut par exemple citer les travaux de N. Tsingos à l'INRIA²⁴ [17,22] sur l'extension des approches classiques issues de l'acoustique géométrique, afin d'intégrer l'ensemble des phénomènes de diffraction, à la fois sur les arêtes et sur les surfaces des bâtiments.

18- La notion de réverbération dans les rues peut être importante pour qualifier les nuisances sonores.

19- Cf. numéro spécial de la revue *Applied Acoustics*, Vol. 68(2), 2007.

20- Informations sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Calcul_distribué. Le projet SETI@home, pour la recherche des signes d'une intelligence extra-terrestre, est une des applications les plus connues du calcul distribué.

21- Informations sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Calcul_

22- A l'origine, les capacités de calcul des cartes graphiques sont dédiées à l'affichage pour des applications incluant la 3D, le montage vidéo, la synthèse d'image. Ces derniers temps, les cartes graphiques sont devenues plus performantes que le microprocesseur lui-même. Toutefois, les processeurs de carte graphique n'étant pas conformes strictement à la norme IEEE 754 sur la représentation des nombres en virgule flottante, les calculs sont réalisés en simple précision.

23- Informations sur : http://www.nvidia.com/object/tesla_computing_solutions.html

24- Informations sur : <http://www.sop.inria.fr/revues/Nicolas.Tsingos/>

Références bibliographiques

[1] Van Maercke D. & Defrance J. (2007), Development of an analytical model for outdoor sound propagation within the Harmonoise project, *Acta Acustica united with Acustica*, 201-212.

[2] NMPB – Routes – 96 (1997) Bruit des infrastructures routières. Méthode de calcul incluant les effets météorologiques. Version expérimentale, CERTU, CSTB, LCPC, SETRA.

[3] CERTU (2006) Comment réaliser les cartes de bruit stratégiques en agglomération. Mettre en œuvre la directive 2002/49/CE.

[4] Picaut J. (2006) Modélisation des champs « diffus » en acoustique architecturale et urbaine par un processus de diffusion de l'énergie sonore, Habilitation à diriger des Recherches, Editions du LCPC.

[5] Kang J. (2007), *Urban Sound Environment*, Taylor & Francis.

[6] Bruneau M. (1998) *Manuel d'acoustique fondamentale*, Editions Hermès.

- [7] Van Renterghem T. & Botteldooren D. (2007) Prediction-step staggered-in-time FDTD: An efficient numerical scheme to solve the linearised equations of fluid dynamics in outdoor sound propagation, *Applied Acoustics* 68(2), 201-216.
- [8] Hofmann J. & Heutschi K. (2007) Simulation of outdoor sound propagation with a transmission line matrix method, *Applied Acoustics* 68(2), 158-172.
- [9] Dutilleul G. & Kristiansen U. (2003) Implementation of a boundary with diffuse reflection in TLM, 10th International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Suède, 3655-3662.
- [10] Heimann D. (2007) Three-dimensional linearised Euler model simulations of sound propagation in idealised urban situations with wind effects, *Applied Acoustics* 68(2), 217-237.
- [11] Cremer L. & Müller H.A. (1982) Principles and applications of room acoustics, vol. 1, Applied Science Publishers.
- [12] Kuttruff H. (2000) Room acoustics, Spon Press.
- [13] Hodgson M. (1991) Evidence of diffuse surface reflections in rooms, *Journal of the Acoustical Society of America* 89(2), 765-771.
- [14] Picaut J., Barlet A., Chartier F., Woloszyn P. & Schmich I. (2006) Effects of diffuse reflection by building façades on the sound propagation and soundscapes in urban areas, Euronoise 2006, Tampere, Finlande.
- [15] Torres R.R., Svenson U.P. & Kleiner M. (2001) Computation of edge diffraction for more accurate acoustics auralization, *Journal of the Acoustical Society of America* 109(2), 600-610.
- [16] Kulowski A. (1985) Algorithmic representation of the ray tracing technique, *Applied Acoustics* 18, 449-469.
- [17] Tsingos N. (1998) Simulation de champs sonores de haute qualité pour des applications graphiques interactives, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier.
- [18] Kang J. (2002), *Acoustics of long spaces*, Thomas Telford.
- [19] Korany N., Blauert J. & Abdel Alim O. (2001) Acoustic simulation of rooms with boundaries of partially specular reflectivity, *Applied Acoustics* 62, 875-887.
- [20] ISO 9613-2:1996 (1996) Acoustics -- Attenuation of sound during propagation outdoors -- Part 2: General method of calculation, International Organization for Standardization.
- [21] Picaut J., Woloszyn P., Schmich I., Defrance J., Noé N., Sémidor C., Barlet A. & Chartier F., (2006) Effets de la réflexion diffuse des façades urbaines sur la propagation acoustique et sur la représentation de l'environnement sonore urbain, Programme « Bruit et Nuisance Sonore » du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Contrat CV03000021, Rapport Final.
- [22] Tsingos N., Lefebvre S., Dachsbacher C. & Dellepiane M. (2007) Extending geometrical acoustics to highly detailed architectural environments, 19th International Congress on Acoustics, Madrid, Espagne.
- [23] Picaut J. (2005) Application numérique du concept de particules sonores à la modélisation des champs sonores en acoustique architecturale, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées* 258-259, 59-88.
- [24] Jean P. (1998) A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise, *Journal of Sound and Vibration* 212(2), 275-294.
- [25] Valeau V., Picaut J. & Hodgson M. (2006) On the use of a diffusion equation for room acoustics, *Journal of the Acoustical Society of America* 119(3), 1504-1513.
- [26] Picaut J., Hardy J. & Simon L. (1999) Prediction of background noise in a built-up area: a periodic disposition of buildings, *Physical Review E* 60(4), 4851-4859.
- [27] Picaut J., Simon L. & Hardy J. (1999) Sound field propagation modeling in streets with a diffusion equation, *Journal of the Acoustical Society of America* 106(5), 2638-2645.
- [28] Le Pollès T., Picaut J., Bérengier M. & Bardos C. (2004) Sound field modeling in a street canyon with partially diffusely reflecting boundaries by the transport theory, *Journal of the Acoustical Society of America* 116(5), 2969-2983.
- [29] Piercy J.E., Embleton T.F.W. & Sutherland L.C. (1977) Review of noise propagation in the atmosphere, *Journal of the Acoustical Society of America* 61(6), 1403-1418.
- [30] Embleton T.F.W. (1996) Tutorial on sound propagation outdoors, *Journal of the Acoustical Society of America* 100(1), 31-48.
- [31] Ögren M. & Forssén J. (2004) Modelling of a city canyon problem in a turbulent atmosphere using an equivalent sources approach, *Applied Acoustics* 65, 629-642.
- [32] Van Renterghem T., Botteldooren D. & Salomons E. (2005) Parameter study of sound propagation between city canyons with coupled FDTD-PE model, *Forum Acusticum* 2005, 1153-1156.
- [33] Billon A., Valeau V., Picaut J. & Sakout A. (2006) On the use of a diffusion model for acoustically coupled rooms, *Journal of the Acoustical Society of America* 120(4), 2043-2054.
- [34] Valeau V., Hodgson M. & Picaut J. (2007) A diffusion-based analogy for the prediction of sound in fitted rooms, *Acta Acustica united with acustica* 93(1), 94-105.