# Ambiances sonores urbaines et interaction ville-bâtiment

Judicaël Picaut, Gwenaël Guillaume, Guillaume Dutilleux

▶ **To cite this version:**

Judicaël Picaut, Gwenaël Guillaume, Guillaume Dutilleux. Ambiances sonores urbaines et interaction ville-bâtiment. RéférenceS, 2012, pp.34-50, schémas, graphiques, carte, ill. en coul. hal-00845852

**HAL Id: hal-00845852**
**https://hal.science/hal-00845852**

Submitted on 18 Jul 2013

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

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

# Ambiances sonores urbaines et interaction ville-bâtiment

Judicaël Picaut, Gwénaël Guillaume
Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)
Guillaume Dutilleux
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg

**Le bruit est un problème sociétal majeur, dont l'impact sanitaire, environnemental et même économique est très important. Plus encore qu'au bruit lui-même, la population et les décideurs publics sont de plus en plus sensibles à la notion de qualité de l'environnement sonore, notamment en milieu urbain. La question qu'il est donc légitime de se poser est de savoir si les outils et méthodes proposés par les laboratoires de recherche, donc à terme par le monde opérationnel, vont bien dans le sens de cette demande. Dans cet article, nous nous focaliserons essentiellement sur la problématique centrale de la démarche, à savoir la modélisation de la propagation du son en milieu urbain. Les aspects « sources sonores », « indicateurs acoustiques » et « perception », même s'ils constituent des sujets de recherche importants, ne seront que très peu abordés. Dans un premier temps, nous reviendrons sur l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu dans le processus de propagation acoustique, notamment en milieu urbain. Dans un second temps, nous balayerons les approches proposées pour modéliser la propagation acoustique, aussi bien les approches opérationnelles que les recherches en cours. Enfin, nous présenterons les perspectives de recherche en la matière, dont certaines sont déjà d'actualité.**

## Introduction

### *Un contexte sociétal important*

Le bruit constitue un problème sociétal majeur, dont l'impact sur la santé est maintenant bien établi (atteinte aux facultés auditives, développement de problèmes cardio-vasculaires, stress, troubles du sommeil, troubles cognitifs notamment en milieu scolaire)[1,2], en particulier en zones urbaines et périurbaines où les sources de bruit sont nombreuses et variées. En 2000, l'institut de sondage IPSOS a ainsi mis en évidence au travers d'une étude portant sur les risques associés au logement sur la santé, que le bruit est la menace environnementale inquiétant le plus les ménages français (30 % de la population interrogée), ce qui place cette gêne juste devant les craintes concernant la pollution de l'air (29 % des sondés). Une étude de l'INSEE cette fois, parue en octobre 2002, indique par ailleurs que dans les agglomérations de plus de 50 000 habitants, les habitants placent le bruit devant l'insécurité quand il s'agit de hiérarchiser les problèmes locaux les plus préoccupants. Enfin, en 2010, l'institut de sondage TNS Sofres a réalisé une enquête relative au vécu des nuisances sonores chez les français. Il en ressort que le bruit est une nuisance pour 2 français sur 3. Cette même enquête a tout particulièrement étudié la situation des habitants des trois plus grandes agglomérations françaises. Pour 25 % d'entre eux, le bruit rend très irritable et est identifié comme cause de fatigue. Le bruit conduit même 20 % des habitants de grandes agglomérations à envisager un déménagement.

En milieu urbain,[3] la circulation est citée comme source principale de bruit que ce soit dans l'habitat individuel ou collectif, ce qui représente en 2007 une dépense évaluée à 788 millions d'euros rien que pour le bruit des transports (remplacement des silencieux des pots d'échappement, murs anti-bruits, recensement et résorption des points noirs « bruit ») et 833 millions d'euros pour les dépenses liées à l'isolation des bâtiments, soit un total d'environ 1,7 milliard (+6 % par an de 2000 à 2007)[4].

[1] Source : Site internet de l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses)
[2] Source : Good practice guide on noise exposure and potential health effects, EEA Technical report, No 11/2010, 40p.
[3] Source : enquête Logement 2002 INSEE
[4] Source : service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Commissariat général au développement durable (CGDD), Rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement (édition 2009).

On pourrait citer encore beaucoup d'autres statistiques sur le sujet, mais toutes iraient dans le même sens, à savoir la mise en évidence de l'importance des enjeux sociétaux, sanitaires, environnementaux et économiques de la lutte contre le bruit, notamment en milieu urbain. Ces enjeux ont d'ailleurs été soulignés dans le rapport de synthèse récent du groupe de travail N°3 du Grenelle de l'Environnement, en charge des problèmes d'environnement et de santé.

### *Un contexte législatif fort en matière de lutte contre les nuisances sonores*

Pour faire face à ces enjeux et apporter des solutions, un certain nombre de lois et décrets ont déjà été mis en place depuis plusieurs années afin de réglementer les nuisances sonores. La loi « Bruit » ou loi « Royal » n°92-1444 du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit tend par exemple à prévenir, réduire et limiter l'émission et la propagation de bruits susceptibles de nuire à la santé des habitants.[5] En matière de bruit de voisinage, le décret[6] n°2006-1099 du 31 août 2006 fixe par exemple des critères acoustiques pour les activités à la fois sportives, culturelles et professionnelles, ou l'arrêté[7] du 30 juin 1999 (autrement appelé « Nouvelle réglementation Acoustique », NRA) relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation contraint les maîtres d'ouvrage à respecter des critères d'isolation acoustique pour toute nouvelle construction. En matière de bruit des transports terrestres, nous pouvons par exemple citer l'article L.571-9 du code de l'environnement qui impose la prise en compte du bruit dans tout projet neuf d'infrastructure routière ou ferroviaire, et lors de la transformation significative d'une voie existante, ainsi que l'article L.571-10 qui institue le classement des infrastructures de transports terrestres en fonction de leurs caractéristiques acoustiques et de leur trafic. Sur la base de ce classement, le Préfet détermine en particulier les niveaux de nuisances sonores à prendre en compte et les prescriptions techniques applicables lors de la construction d'un bâtiment afin d'atténuer l'exposition des occupants à ces nuisances.

Au niveau européen, la directive[8] 2002/49/CE sur l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement insiste, d'une part, sur la nécessité d'informer les riverains sur les risques et les effets du bruit dans l'environnement, et d'autre part, sur l'adoption de plans d'action en matière de prévention et de réduction du bruit. Cette directive impose notamment aux grandes agglomérations de produire des cartes de bruit et tend également à harmoniser les méthodes de calcul et de mesures au sein de la communauté européenne.

Plus globalement, les objectifs du groupe de travail n°3 du Grenelle de l'Environnement se basent sur un certain nombre d'éléments de ce contexte législatif, de manière à proposer des solutions pour résorber et pour éviter l'apparition de nouveaux points noirs, à améliorer la qualité de l'environnement sonore et à développer l'information et la prévention auprès du public.

### *Du contexte à la problématique de la modélisation des ambiances sonores urbaines*

Si nous nous replaçons une nouvelle fois dans le contexte du Grenelle de l'Environnement, les moyens identifiés pour la réalisation des objectifs du groupe de travail n°3 visent principalement à l'amélioration des connaissances scientifiques, en particulier sur la relation bruit-santé, sur la définition d'indicateurs représentatifs de la gêne sonore et sur l'impact du bruit sur les pathologies non auditives. Plus globalement, ces objectifs nécessitent également de nouvelles recherches et des avancées technologiques en matière de prévention du bruit. Concernant ce dernier point, deux axes sont traditionnellement considérés : la réduction du bruit à la source (véhicules moins bruyants, politique de gestion du trafic) et le développement de dispositifs de protection des habitants contre les nuisances sonores (murs anti-bruits, revêtements de chaussées moins bruyants, isolation acoustique des bâtiments).

Entre ces deux axes majeurs, que l'on pourrait qualifier de « source » et de « réception », se dissimule la problématique de la « propagation » acoustique en milieu extérieur. En effet, que ce soit pour la réalisation de cartes de bruit dans le cadre de la directive européenne, ou pour la détermination de l'impact sonore d'une infrastructure de transport dans le cadre de la loi « Bruit », il est nécessaire de recourir à des outils pour modéliser la propagation acoustique, outils basés sur des modèles de référence (*i.e.* modèles de laboratoire) ou sur des modèles d'ingénierie (*i.e.* modèles simplifiés utilisés en

[5] Source : Ministère en charge de l'écologie et du développement durable. Loi codifiée aux articles L.571.1 à L.571.26
[6] Détail du texte sur le site internet Legifrance
[7] Détail du texte sur le site internet Legifrance
[8] Détail du texte sur le site internet

général par des bureaux d'étude). De ce fait, de nombreux travaux de recherche ont porté et portent encore sur le développement d'approches et de modèles qui puissent représenter au mieux les phénomènes rencontrés lors de la propagation acoustique. De nombreuses méthodes ont ainsi été proposées, notamment en milieu extérieur « ouvert » (*i.e.* très faiblement bâti), mais, comme nous le verrons, aucune ne permet de répondre complètement aux exigences imposées concernant la modélisation de l'environnement sonore en milieu urbain (*i.e.* fortement bâti).

## Propagation acoustique en milieu urbain

La modélisation des champs sonores en acoustique 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). Comme nous le verrons au fil de cet article, l'objectif de ces études est de proposer des modèles de prévision acoustique prenant en compte la complexité des phénomènes physiques propagatifs mis en jeu, ou, de manière plus aboutie, permettant de simuler l'acoustique d'un lieu. Dans cette partie, nous proposons d'abord un rappel sur la nature des phénomènes propagatifs rencontrés, puis nous présentons les différentes approches en matière de modélisation de la propagation acoustique.

### *Nature des phénomènes physiques*

Les phénomènes physiques mis en jeu dans le processus de propagation acoustique sont très divers. Se limitant à la problématique du bâtiment), les principaux phénomènes sont les suivants[9] :

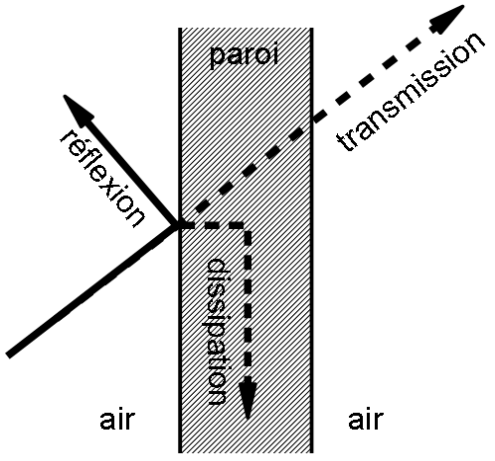
- L'**émission acoustique** : une onde acoustique est produite par la vibration d'un objet (source), vibration qui se transmet de proche en proche dans le milieu de propagation (et non par déplacement de matière). Il s'agit donc d'un phénomène vibratoire, résultant d'un mouvement périodique, défini par une fréquence de pulsation. Dans l'air, la vibration se transmet (à une vitesse définie par la célérité acoustique), grâce à un mouvement longitudinal *(i.e*. dans le sens de la propagation) des molécules d'air. Si la fréquence de l'onde est comprise dans la gamme du spectre [20, 20000] Hz, on parle d'onde acoustique audible (onde sonore). On définit également les sons complexes périodiques et les sons complexes non périodiques (bruit), comme des ensembles de vibrations périodiques ou aléatoires, respectivement. Une vibration dans l'air génère donc localement une variation de vitesse des molécules d'air, ainsi qu'une variation de pression : on parle alors de vitesse acoustique et de pression acoustique, principales variables d'une onde sonore. Les ondes acoustiques peuvent également se propager dans des milieux solides (onde sismique par exemple), soit du fait d'une vibration transversale des particules constituant la matière (mouvement des particules perpendiculaire à la direction de propagation), soit du fait d'une vibration longitudinale (comme l'air). Revenant au contexte de notre article, le sujet qui nous intéresse concerne aussi bien la problématique[10] du bruit (onde aérienne) que celle des vibrations (onde solidienne), l'ensemble étant généré par des sources multiples (sources de transport, sources industrielles, sources des activités « humaines »…).
- La **dispersion géométrique** : les caractéristiques initiales d'une onde sonore sont définies par les sources dont elles sont issues. En champ libre, c'est-à-dire dans un domaine de propagation sans obstacle, on considère principalement deux types de source : les sources ponctuelles (un véhicule léger « vu à grande distance » par exemple) définies par un rayonnement sphérique ; et les sources cylindriques (un flot continu de véhicules par exemple) définies par un rayonnement cylindrique. Dans chacun des cas, au fur et à mesure de la propagation acoustique, l'énergie sonore se répartit sur la surface, soit d'une sphère, soit d'un cylindre, centrée sur la source. En s'éloignant de la source (*i.e.* la surface de la sphère ou du cylindre augmentant), on observe une décroissance de l'intensité acoustique, appelée dispersion géométrique, se traduisant par une diminution du niveau sonore par doublement de distance par rapport à la source, de 6 dB pour une onde sphérique, ou de 3 dB pour une onde cylindrique.

[9] Pour une présentation détaillée et accessible de ces phénomènes physiques, le lecteur pourra se reporter au ouvrages suivants : [1-3].

[10] La problématique du bruit aérien est toutefois celle qui est la plus considérée actuellement.

- La **dissipation acoustique** : au cours de son déplacement, l'onde sonore est en partie absorbée par le milieu de propagation, en raison des effets visco-thermiques (dans l'air) ou visco-élastiques (dans un solide).
  - La dissipation des ondes acoustiques dans un milieu solide est fonction des propriétés physiques et mécaniques du matériau constituant le domaine de propagation. Dans la pratique, une « structure » (une paroi, une cloison, une façade, un sol…) est souvent constituée de plusieurs couches de matériaux différents[11], de telle sorte qu'elle favorise ou non le phénomène d'**absorption acoustique** (Figure 1). La capacité de la structure à absorber une onde acoustique est définie par le coefficient d'absorption acoustique (en pression ou en énergie). En pratique, pour des applications en acoustique du bâtiment ou des salles, la mesure du coefficient d'absorption diffère suivant le cas d'application : on parlera ainsi du coefficient d'absorption sous incidence normale (mesure au tube Kundt), ou du coefficient d'absorption en champ diffus (ou coefficient de Sabine) mesuré en salle réverbérante.
  - La dissipation des ondes acoustiques dans l'air est à l'origine du phénomène d'**absorption atmosphérique** l'onde sonore est peu à peu absorbée au cours de sa propagation. Cette absorption augmente avec la fréquence (ce qui explique que les « basses fréquences » se propagent plus loin que les « hautes fréquences »), et varie avec le degré d'hygrométrie et la température de l'air. Ainsi, en général, les ondes sonores se propagent plus loin par temps humide que par temps sec. La capacité de l'air à absorber une onde sonore est définie par le coefficient d'absorption atmosphérique, souvent défini en dB par km (ou par 100 m).
- La **réflexion acoustique** (Figure 1) : ce phénomène intervient en général à l'interface entre deux milieux, le plus souvent l'air et une « structure » (réflexion acoustique par une cloison, une façade, un sol…), et caractérise la part de l'onde acoustique qui est réfléchie par la structure. La réflexion acoustique est définie par le coefficient de réflexion (en pression ou en énergie), complément du coefficient d'absorption (*cf.* ci-dessus). Le coefficient de réflexion dépend donc également des propriétés physiques et mécaniques de la structure considérée et des propriétés de l'air.
- La **transmission acoustique** (Figure 1) : si une structure est à l'interface de part et d'autre avec l'air (une fenêtre, une porte, une cloison…), la part de l'onde qui n'est pas dissipée par le matériau peut également traverser la cloison. Ce phénomène de transmission acoustique est caractérisé par un coefficient de transmission acoustique (en pression ou en énergie), qui dépend là encore des propriétés des matériaux constituant la structure. En acoustique du bâtiment, il est plus courant d'utiliser le coefficient d'affaiblissement (en dB) de la structure ou encore l'une des définitions de l'indice d'affaiblissement ou de l'isolement, au lieu de la définition classique du facteur de transmission.

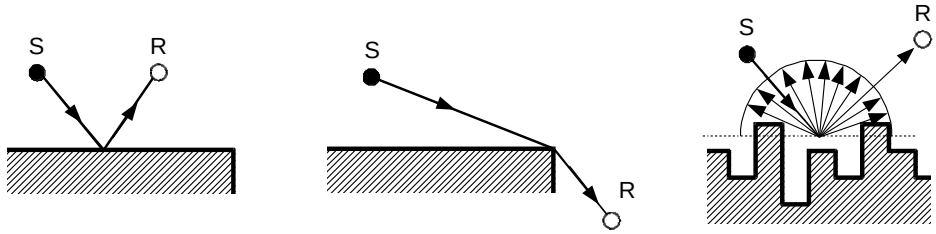
**Figure 1 :** Illustration des phénomènes de réflexion, d'absorption (dissipation) et de transmission acoustique à travers une paroi




[11] La « forme » d'une structure peut également intervenir. C'est le cas par exemple d'un résonateur de Helmholtz (système composé d'une cavité et d'un col, et éventuellement de matériaux absorbants sur les surfaces du résonateur), utilisé en acoustique des salles pour « absorber » certaines fréquences.

- La **diffraction acoustique** (Figure 2b) : ce phénomène se présente lorsqu'une onde sonore rencontre un obstacle de dimension finie ou qui présente des ouvertures. C'est par exemple le cas en présence d'une paroi contenant une ouverture (fenêtre ouverte), ou d'arrêtes verticales ou horizontales sur le bord d'un bâtiment ou d'un écran acoustique. Le phénomène de diffraction est fonction de la longueur d'onde incidente, ainsi que de la forme et des dimensions caractéristiques de l'objet diffractant.

**Figure 2 :** Illustration des phénomènes de réflexion spéculaire, de diffraction par une arête et de diffusion par une surface irrégulière




(a) Réflexion spéculaire (b) Diffraction (c) Diffusion

- La **diffusion acoustique** par des surfaces : la direction des ondes sonores réfléchies dépend de l'état de surface de la surface en question (présence d'irrégularités, de cavité ; parois courbes…). Si la surface est totalement plane, l'onde sonore est réfléchie dans la **direction spéculaire** (Figure 2a). Si la surface est très irrégulière, les effets de réflexion spéculaire et de diffraction acoustique se produisent simultanément générant de la diffusion acoustique (Figure 2c). En effet, si la longueur d'onde est grande devant les irrégularités (Figure 3a), la surface se comporte comme si elle était parfaitement plane. Si la longueur d'onde est de l'ordre de grandeur des irrégularités (Figure 3b), alors il peut y avoir diffraction par l'irrégularité. Enfin, si la longueur d'onde est très petite devant la taille caracté-ristique des irrégularités (Figure 3c), il y a alors réflexion spéculaire sur une surface de l'irrégularité.

  En milieu urbain, ce phénomène intervient notamment sur les façades des bâtiments, normalement constituées de nombreuses irrégularités avec parfois une certaine périodicité (fenêtres, pierres de tailles, modénature…) Ainsi, une onde incidente pourra, en fonction de la taille et de la distribution des irrégularités localisées dans la zone active de réflexion (Figure 4a), subir différents phénomènes de réflexion suivant la longueur d'onde et en fonction de la direction d'incidence (Figure 4b).

**Figure 3 :** Diffusion par une surface irrégulière en fonction de la longueur d'onde incidente et de la taille des irrégularités de surface

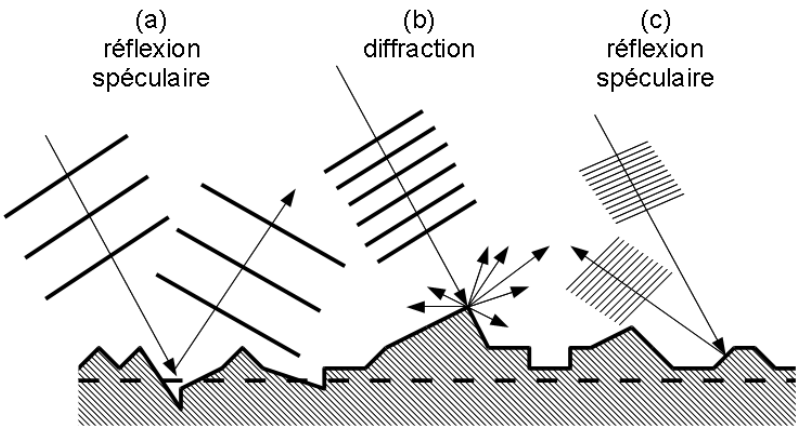
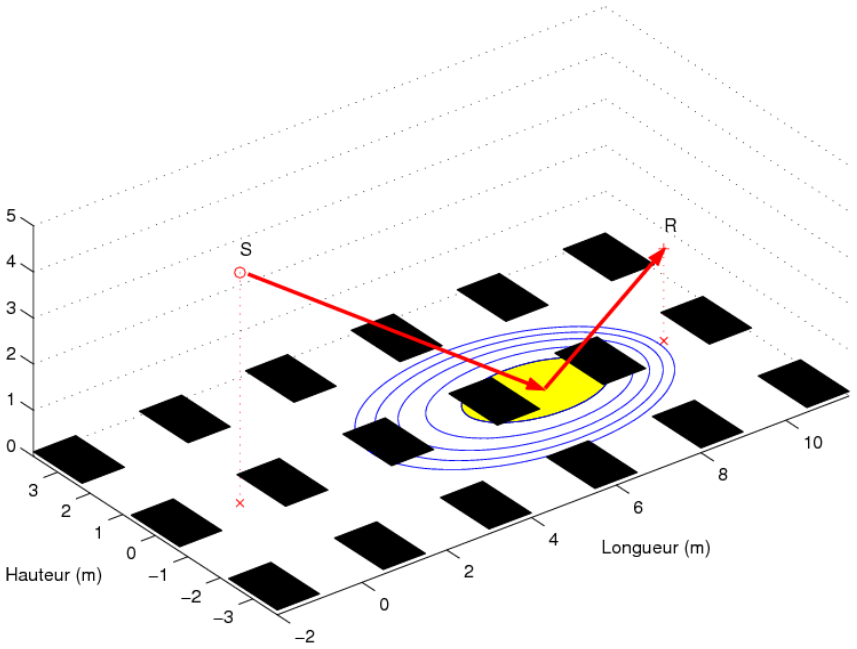
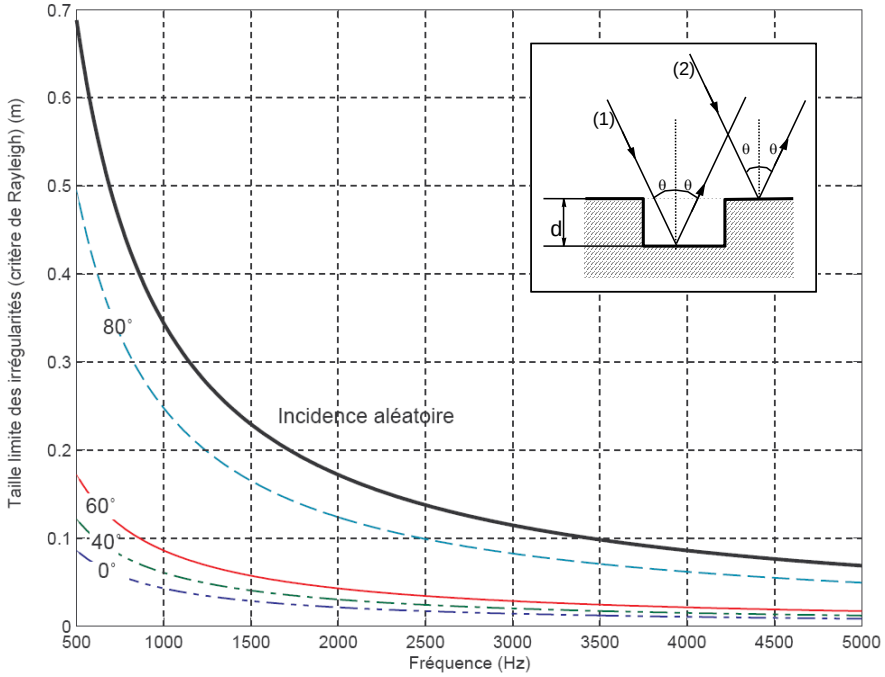


**Figure 4 :** Représentation de la zone active de réflexion d'une façade urbaine et définition de limite entre la réflexion spéculaire et la diffusion

(a) Illustration de la zone active de réflexion (en jaune) d'une façade (principe des zones de Fresnel) en fonction de la position de la source et du récepteur, à 1000 Hz.

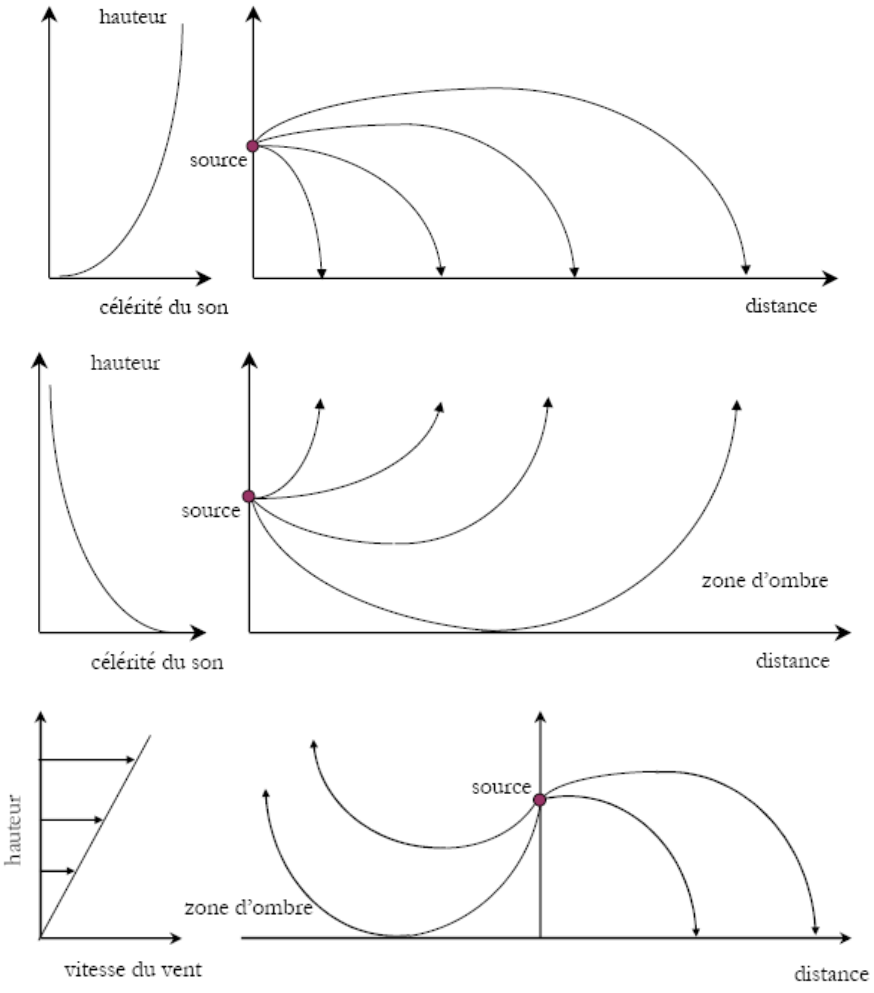



(b) Limite entre réflexion spéculaire et diffusion acoustique (critère de Rayleigh), en fonction de la fréquence de l'onde sonore incidente et de la taille *d* des irrégularités de façade, pour plusieurs angles d'incidence θ (0°, 40°, 60°, 80°) et en incidence aléatoire. La zone située au dessus (respectivement au dessous) d'une courbe correspond à des réflexions diffuses (respectivement spéculaires).



- La **diffusion acoustique** par des objets : si le domaine de propagation est encombré (c'est par exemple le cas en milieu industriel, lorsque qu'un local est rempli de nombreuses machines et caisses disposées sur le sol, ou en milieu urbain avec des voitures en circulation et stationnement ou du mobilier urbain), une onde sonore peut subir des réflexions et diffractions multiples, produisant là encore un processus de diffusion (du même type, par exemple, que la diffusion de la lumière dans le brouillard).
- La **réfraction acoustique** : en milieu extérieur, la propagation acoustique peut être influencée par des conditions micro-météorologiques, régies par des lois thermiques (transfert de chaleur) et aérodynamiques (profils de vent), pouvant par ailleurs donner lieu à une interaction très forte avec le sol (topographie, température de surface et de sous-sol, hygrométrie, cultures, forêts, obstacles, bâti...). Plus précisément, les échanges thermiques entre le sol et la couche basse de l'atmosphère conduisent à une variation de la température de l'air en fonction de la hauteur au dessus du sol, et donc a une variation de la vitesse du son. Par ailleurs, en raison de l'état de rugosité de surface du sol, le vent présente une vitesse plus élevée en hauteur qu'au niveau du sol. Finalement, l'évolution de la célérité du son en fonction de l'altitude génère un phénomène de réfraction acoustique : les ondes sonores sont amenées à avoir des trajets non plus rectilignes, comme ce serait le cas avec des conditions atmosphériques homogènes, mais incurvés, soit vers le sol (gradient de célérité vertical positif, *i.e.* des conditions « favorables » à la propagation), soit vers le ciel (gradient de célérité vertical négatif, *i.e.* des conditions « défavorables » à la propagation).

**Figure 5 :** Illustration des effets de réfraction. De haut en bas : gradient vertical positif de température (sans vent), gradient vertical négatif de température (sans vent), gradient vertical de température (sans effets thermiques)



### *La modélisation de la propagation acoustique*

Dans ce paragraphe, nous citons très succinctement les différentes approches développées pour modéliser la propagation en milieu ouvert, et en particulier en milieu urbain. L'objectif n'est pas ici de faire une liste exhaustive des modèles, mais de montrer les principales limites des approches existantes, souvent soulignées par de nombreux chercheurs, notamment dans le contexte urbain. Pour un état de l'art précis, le lecteur pourra se reporter à des documents de référence, en particulier aux ouvrages de Attenborough *et al* [4], Salomons [5], Ostashev [6] et à l'article de Bérengier *et al* [7], concernant la propagation acoustique en milieu ouvert, ainsi qu'à l'ouvrage de Kang [8] et au mémoire de Picaut [9] concernant la propagation acoustique en milieu urbain.

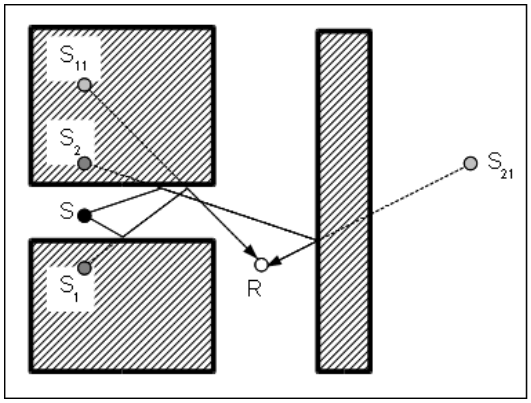
Plusieurs types d'approches ont été développés. Certaines méthodes sont basées sur des concepts énergétiques et éventuellement géométriques, plus simples à mettre en œuvre dans le domaine opérationnel, et pour lesquelles les phénomènes physiques sont simplifiés. À l'inverse, d'autres méthodes reposent sur le caractère ondulatoire de la propagation, avec une modélisation soit dans le domaine fréquentiel, soit dans le domaine temporel. Ces dernières méthodes sont toutefois plus difficiles à mettre en œuvre et leurs utilisations sont en général limitées aux seuls laboratoires de recherche.

#### Méthodes énergétiques et géométriques

La **théorie statistique de la réverbération** (également appelée « théorie de Sabine », ou encore « théorie des champs diffus »), dont les fondements datent des travaux de Sabine [10], est couramment employée en acoustique des salles. Cette méthode énergétique 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 (décroissance d'énergie au cours du temps) 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 (rues, couloirs, locaux plats) et que l'absorption acoustique devient importante et non-uniforme. Par ailleurs, la théorie de la réverbération s'applique très mal aux géométries présentant des ouvertures, et en particulier au cas du milieu urbain. Pour autant, les premières approches en matière de modélisation de la propagation du son en milieu urbain se sont basées sur ce concept de champ diffus, mais les applications sont restées très limitées en raison d'un manque de pertinence flagrant.

La **méthode des sources-images** [10], issue de l'acoustique géométrique, permet de calculer la densité d'énergie sonore dans un milieu de forme complexe, en se basant sur une analogie avec les rayons lumineux (Figure 6). 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 qui est employée dans certains outils du commerce comme CadnaA®, 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 et dans les procédures liées à l'auralisation [11], en acoustique architecturale comme en acoustique urbaine.

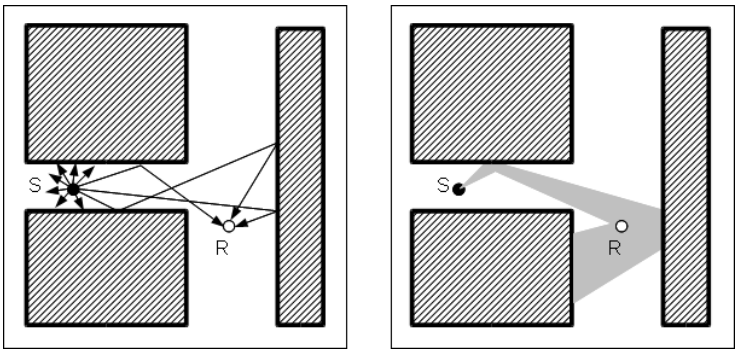
**Figure 6 :** Illustration de méthodes des sources-images (représentation de la source réelle S et des sources-images d'ordre 1 et 2)




La **méthode du tracé de rayons** [12], très démocratisée, a donné naissance à de nombreux logiciels commerciaux de prévision du champ sonore en milieu extérieur et notamment pour la réalisation de cartes de bruit (Mithra® et Mithra-SIG®, SoundPLAN®…). 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 lors de leur rencontre avec les parois du milieu de propagation (Figure 7). 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 tenter de résoudre ce problème, le logiciel Mithra utilise par exemple une méthode de tracé de rayons « inverse », qui part du récepteur vers la source. Le tracé de rayons inverse peut cependant échouer dans certaines configurations. La notion de « rayons sonores » a également été étendue pour donner naissances à des méthodes de tracé de faisceaux sonores [13] (Figure 7) ou de particules sonores [14].

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 des **méthodes statistiques** basées sur des équations de transport ou de diffusion de l'énergie sonore [9], ou encore les **méthodes de radiosité** fondées sur une analogie avec l'éclairage [8], voire des **méthodes hybrides** résultant du couplage de plusieurs méthodes entre elles (tracé de rayons et sources-images, ou tracé de rayons et radiosité par exemple)… Néanmoins, dans la plupart des cas, ces méthodes sont trop complexes à mettre en œuvre et cumulent les limitations propres à chaque modèle.

**Figure 7 :** Illustration de méthodes des rayons (à gauche) et des faisceaux sonores (à droite)

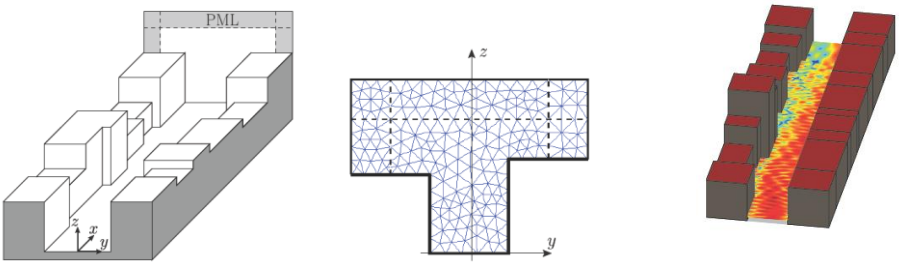


**Méthodes « ondulatoires » fréquentielles**

Comme nous l'avons présenté précédemment, la propagation acoustique en milieu extérieur est soumise à de nombreux phénomènes propagatifs définis par un comportement ondulatoire (*i.e.* relation de phase entre les composantes du champ sonore). Il est bien connu que les effets de sol (impédances homogènes et discontinues), les effets de réflexion acoustique sur les objets (bâti, sol, mobilier urbain…), les effets de diffraction par les arêtes des obstacles (bâti) ou les irrégularités de surface (façades), les effets météorologiques (gradient de célérité du son, turbulences atmosphériques) interagissent les uns avec les autres. Ces interférences génèrent une distribution du champ sonore qui ne peut pas, en principe, être modélisée par une approche énergétique ou géométrique, mais qui nécessite des approches ondulatoires. En évoquant la notion d'approche ondulatoire, il vient immédiatement à l'esprit l'**équation d'onde dans le domaine temporel** ou **l'équation d'Helmholtz dans le domaine fréquentiel**. Toutefois, la résolution analytique directe de ces équations, dans des domaines de propagation aussi complexes qu'en milieu extérieur, n'est évidemment pas possible, et a laissé place à des méthodes numériques fréquentielles et temporelles.

Une approche alternative a été récemment proposée par Pelat [15], pour modéliser la propagation du son en milieu dans une rue, en se basant sur une **formulation multimodale de la propagation acoustique**, elle-même inspirée de la théorie des « guides d'onde ». Le principe de base de cette méthode consiste à considérer la rue comme un guide d'ondes ouvert par le haut (Figure 8). La pression acoustique dans le plan vertical d'émission acoustique est d'abord obtenue par une méthode numérique classique FEM (cf. ci-après), tandis que le champ sonore résultant est ensuite propagé dans la rue en introduisant les modes propres et valeurs propres numériques obtenus dans une formulation multimodale classique. Cette approche très prometteuse permettrait ainsi de modéliser la propagation acoustique dans des cas complexes (rues de section variable, façade avec prise en compte de modèles d'impédance, profils de célérité acoustique).

**Figure 8 :** Approche mixte FEM-modale de la propagation acoustique [15]




La **méthode des éléments finis** (FEM) consiste par exemple à résoudre l'équation de propagation des ondes acoustiques (équation de Helmholtz) exprimée sous sa forme discrète en subdivisant les dimensions spatiales et le temps en « éléments » [16]. La **méthode des éléments de frontière** (BEM) repose quant à elle sur la résolution de l'équation intégrale des problèmes aux limites [17]. Les effets de la topographie du site, et la présence d'un sol d'épaisseur finie avec des discontinuités d'impédance ou d'éventuels écrans anti-bruits, peuvent être pris en compte. Ces approches ne sont pas limitées en soi à la modélisation dans le domaine fréquentiel, mais le coût numérique d'une dépendance temporelle les rend rapidement inexploitables. Ces méthodes sont néanmoins bien adaptées pour étudier la propagation acoustique dans des milieux de géométries complexes car elles permettent de modéliser la majorité des phénomènes propagatifs, hormis les effets des hétérogénéités de l'atmosphère.

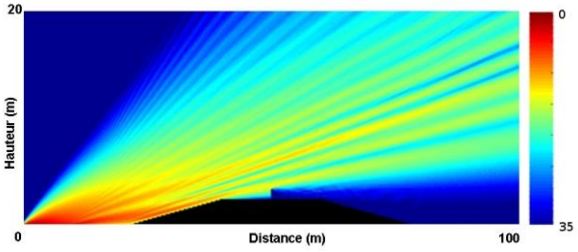



**Figure 9 :** Approche fréquentielle basée sur l'équation parabolique : propagation au dessus d'un site non-plan, en présence d'un écran acoustique et en milieu hétérogène (source B. Gauvreau, IFSTTAR)

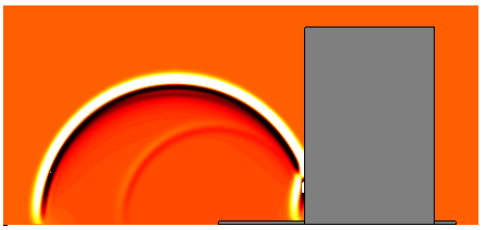
Les **méthodes basées sur l'équation parabolique** (PE) ont également été largement employées pour la modélisation de la propagation acoustique en milieu extérieur 2D dans une atmosphère en mouvement turbulent, et présentant des topographies et des géométries complexes [5] (Figure 9). Cette méthode est toutefois valable uniquement en champ lointain, pour de faibles angles d'ouverture de la source. Il faut préciser que de nouveaux travaux ont permis de lever une limitation majeure de cette approche, à savoir l'absence de prise en compte de la rétro-propagation des ondes sonores, ce qui en interdisait l'utilisation en milieu « diffus » comme le milieu urbain (*i.e.* les ondes sonores arrivent simultanément de toutes les directions en raison des nombreuses réflexions). Les travaux récents de Lihoreau ont ainsi permis d'étendre l'approche grâce à une reformulation des équations de base de l'approche, et ce, en 3D [18].

Globalement, les méthodes « fréquentielles » que nous venons de présenter, bien que considérées encore aujourd'hui comme des approches de référence, sont limitées par des considérations numériques, ce qui les restreint à des applications en deux dimensions, mono-fréquentielles (*i.e.* un calcul par fréquence), et « basses-fréquences » du fait d'une résolution spatiale très (trop) fine en plus haute fréquence par rapport aux distances de propagation considérées. Par ailleurs, les approches utilisées ne permettent pas d'avoir une description temporelle de la propagation acoustique. Or, si on se replace dans un contexte de prévision du bruit en milieu extérieur, les nuisances sonores sont souvent perçues à travers des notions d'émergence d'une source sonore par rapport au bruit de fond ambiant, émergence souvent liée au caractère mobile et dynamique des sources. Par ailleurs, des travaux récents sur la problématique des indicateurs de gêne en milieu urbain, ont bien montré la nécessité de disposer d'indicateurs dynamiques, liés aux fluctuations temporelles du trafic routier [19].

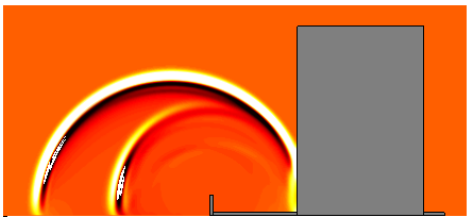
Enfin, pour être complet, les conditions météorologiques comme les effets de sol fluctuent également dans le temps, à des échelles de temps toutefois différentes. Ces fluctuations « naturelles » sont à la l'origine d'une très grande fluctuation et variabilité des niveaux sonores notamment à longue distance et probablement en milieu urbain. Depuis maintenant quelques années, les efforts des chercheurs se sont donc orientés vers une nouvelle génération de modèles de référence, basée sur une résolution temporelle des phénomènes propagatifs.

**Figure 10 :** Approche temporelle par la méthode TLM de la propagation acoustique : représentation d'un front d'onde (à un instant t) avec et sans écran acoustique à proximité d'un bâtiment réfléchissant

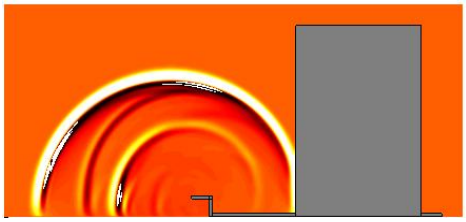
(a) sans écran, surfaces réfléchissantes



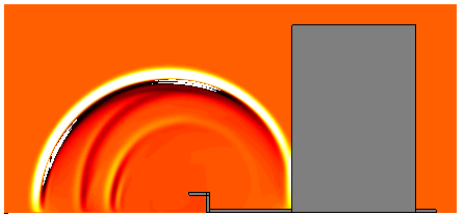
(b) avec écran droit réfléchissant



(c) avec écran en « L » réfléchissant



(d) avec écran en « L » absorbant (végétalisé)



**Méthodes « ondulatoires » temporelles**

À la différence des méthodes fréquentielles, les méthodes temporelles sont évidemment particulièrement adaptées à la modélisation de la propagation du son dans des milieux variant dans le temps. À titre d'exemple, la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) appliquée aux équations d'Euler linéarisées a fait l'objet de nombreux travaux et permet de tenir compte de l'ensemble des phénomènes propagatifs cités

auparavant concernant la propagation du son en milieu extérieur [20]. Quelques applications en acoustique urbaine ont également été proposées en FDTD, comme l'étude de l'effet du vent sur la propagation du son en milieu urbain idéalisé. D'autres se sont intéressés à la propagation du son au-dessus de toits végétalisés. Comme toutes les méthodes temporelles, la FDTD reste également limitée par le coût numérique, du fait du compromis entre la finesse du pas spatial, du pas temporel et des distances de propagation considérées en milieu extérieur. Des algorithmes optimisés permettent toutefois de minimiser ce coût en considérant des schémas aux différences finies d'ordre élevé.

Plus récemment, quelques auteurs ont proposé une méthode temporelle alternative et originale, la **méthode des lignes de transmission** (TLM) [21] (Figure 10). Cette méthode numérique, basée sur une représentation discrète des phénomènes ondulatoires, semble particulièrement adaptée à la modélisation de la propagation du son dans des milieux hétérogènes, de topographies et de géométries complexes, et permettrait, comme le montrent de récents travaux, de prendre en compte la plupart des phénomènes influant sur la propagation acoustique en milieu extérieur.

### Approches opérationnelles

Revenant au contexte réglementaire dont nous avons parlé plus haut, à savoir la réalisation de cartes de bruit ou encore la mise en évidence de points noirs « bruit », il a bien fallu, à un moment donné, faire le choix d'une méthode dite opérationnelle. Pour des raisons historiques (les approches de base de ces méthodes opérationnelles ont été choisies dès la fin des années 80), et aujourd'hui encore pour des raisons pratiques (utilisation de modèles simples à destination de bureaux d'étude, limitation des durées de calcul…), l'utilisation de méthodes fréquentielles et encore moins temporelles, a été complètement « bannie » des approches opérationnelles, au profit de méthodes énergétiques basées sur le concept de rayon sonore, dont nous avons parlé plus haut.

Ainsi, en France, le calcul est basé sur la Nouvelle Méthode de Prévision du Bruit (NMPB, NF S31-133) [22], qui présente quelques similitudes avec la norme internationale ISO 9613-2. 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. Cette extension est toutefois discutable compte-tenu de la spécificité de certains phénomènes en milieu urbain (effets météorologiques par exemple).

Par construction, ces méthodes reposent sur les notions de rayons sonores et de sources-images telles qu'elles ont été décrites plus haut. Il s'agit donc essentiellement de méthodes énergétiques et géométriques, applicables en trois dimensions, mais bien souvent limitées 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 détails, ces méthodes permettent de prendre en compte le rayonnement direct entre la source sonore et le récepteur, lorsque celui-ci existe, les trajets réfléchis sur des parois planes verticales, en considérant l'hypothèse de réflexion spéculaire, les trajets diffractés par les arêtes horizontales et verticales. Pour chacun des trajets, il faut alors considérer la divergence géométrique, l'absorption atmosphérique, les effets de sol, résultant de l'interférence entre l'onde sonore réfléchie par la surface du sol et le rayonnement direct, et fonction de la nature plus ou moins absorbante des sols. Enfin, et de manière à prendre en compte les effets météorologiques sur la propagation du son, la NMPB calcule un niveau sonore de long terme pour chaque trajet à partir d'un calcul en conditions homogènes et un calcul en conditions « favorables ».

## Perspectives de recherche

### *Quelle influence de la micro-météorologie sur les prévisions acoustiques en zones urbaines ?*

Comme nous venons juste de le faire remarquer, les méthodes actuelles pour la prévision du bruit en milieu urbain ou pour la cartographie sonore en zones urbaines reposent sur les mêmes principes que ceux utilisés en zones périurbaines (méthode NMPB par exemple). Ainsi, certains effets météoro-logiques observés en champ libre (sans obstacle) ont été intégrés dans la plupart de ces approches opérationnelles, notamment sous forme d'un profil vertical de célérité.

Cependant, les effets micro-météorologiques en milieu urbain sont très différents de ceux rencontrés en milieu ouvert ou faiblement bâti. La pertinence des approches classiques est donc discutable : il est nécessaire aujourd'hui d'évaluer l'influence réelle des effets micro-météorologiques sur la propagation acoustique spécifiquement en milieu urbain. Cette étude[12] pourra d'abord être envisagée à partir de campagnes expérimentales mêlant des mesures acoustiques et micro-météorologiques simul-tanées, en laboratoire et sur site, afin d'estimer l'importance des différents effets micro-météorologiques spécifiques au milieu urbain (thermique, aérodynamique). Ce travail permettra alors d'évaluer la nécessité d'intégrer ou non ces effets spécifiques dans les méthodes de calcul actuelles. Si les effets observés sont importants, il sera sans-doute nécessaire d'intégrer des modèles météorologiques, comme ceux développés par Météo-France, directement dans les outils de modélisation acoustique, en considérant par ailleurs les fluctuations temporelles à différentes échelles[13]. Le couplage de modèles acoustiques et météorologiques élaborés semble effectivement la solution la plus pertinente. En raison de l'augmentation des ressources numériques nécessaires à ce type d'approche, il est probable que son utilisation se limitera dans un premier temps aux seuls laboratoires de recherche.

**Figure 11a :** Campagne de mesure acoustique et météo, sur maquette, pour l'évaluation des effets météorologiques sur la propagation acoustique dans une rue (projet EM2PAU, IFSTTAR)

[12] Une étude expérimentale, financée par la Région des Pays de La Loire, est actuellement en cours sur ce sujet (collaboration IFSTTAR, Université du Maine, École Centrale de Nantes).

[13] Des travaux de ce type sont actuellement en cours à l'IFSTTAR, en collaboration avec le Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France (CNRM), et proposent d'intégrer un modèle micro-météorologique dans l'approche acoustique TLM.

### *Végétation et végétalisation : quel impact sur la propagation acoustique en milieu urbain ?*

Les réflexions actuelles concernant les questions environnementales et énergétiques mèneront dans le futur à des aménagements urbains ou interurbains qui feront une part importante à la végétation et à la végétalisation. Les exemples de la plupart des projets récemment proposés pour quelques grandes « villes de demain » en sont une illustration éloquente, tant au niveau paysager (parcs, etc.) qu'urbanistique (façades et toitures végétalisées, etc.). Cependant, l'influence de la végétation sur la propagation acoustique (propagation en milieu boisé, en présence de toitures ou façades végétalisées, par exemple) est actuellement très mal connue. Comme pour les effets météorologiques, il semble là encore important de déterminer cette influence, afin d'en évaluer l'utilisation qui pourrait être faite de ce type d'aménagement pour réduire les nuisances sonores en milieu urbain (développement de protections végétalisées innovantes). Des travaux de recherche se sont d'ailleurs engagés très récemment sur ce sujet (projet ANR Veg-DUD pîloté par l'IRSTV[14], projet européen HOSANNA auquel contribue le CSTB[15]). En complément, une réflexion plus générale sur la notion de « zones calmes », souvent associées à des espaces végétalisés (parcs en centre-ville), devra être en menée.

**Figure 11b :** Exemple de toiture végétalisée en milieu urbain (Chicago City Hall Green Roof, auteur : TonyTheTiger, licence : GFDL/CC-by-sa-3.0°

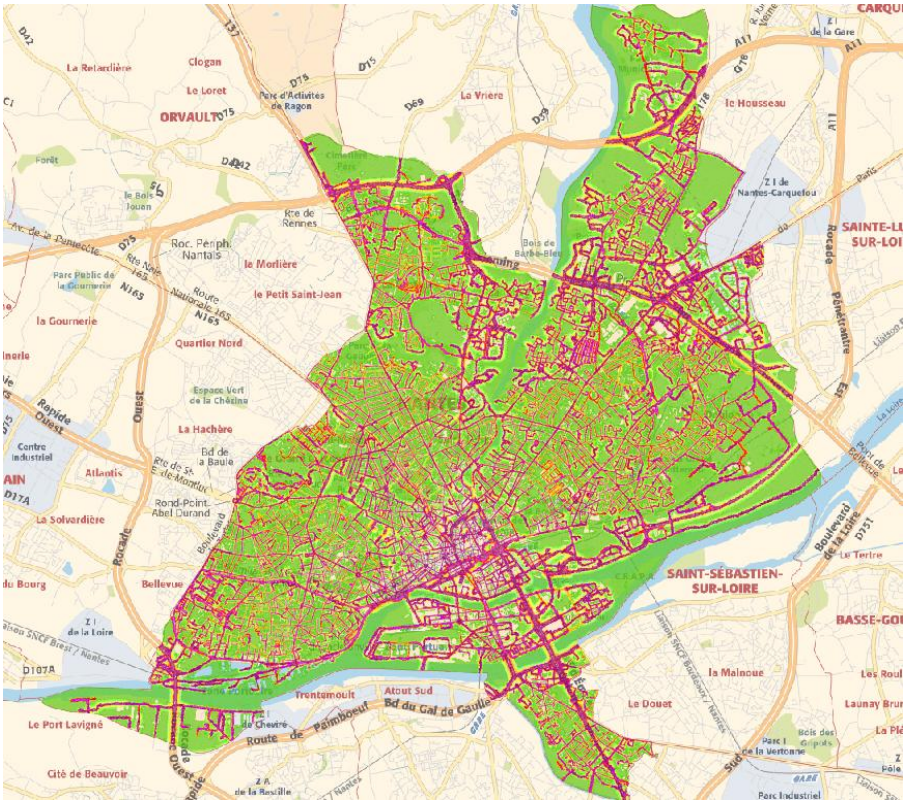
[14] Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, FR CNRS 2488.

[15] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

### *Impacts sur le bruit des stratégies de déplacement en milieu urbain*

La mobilité est au cœur des enjeux pour rendre les villes durables, aussi bien d'un point de vue économique et social, qu'environnemental. Les déplacements urbains sont une des sources majeures de pollution, sous forme de rejets de gaz à effets de serre, mais également sous forme de nuisances sonores. Concernant ce dernier aspect, la cartographie sonore des villes, telle qu'elle est préconisée par la directive européenne 2002/49/CE, peut apporter un début de réponse, à un instant donné. Dès lors qu'il s'agit de tester différents scénarii de plans de déplacement urbain (PDU), avec une prise en compte plus précise des différents moyens de transports (véhicules légers, bus, tramways, deux-roues motorisés…) et des trafics associés, les méthodes de calculs actuelles ne sont plus adaptées, notamment en raison des temps de calcul que cela supposerait, et d'une prise en compte des trafics peu réaliste. Deux axes de recherche peuvent être envisagés simultanément. Il conviendrait tout d'abord de développer des approches opérationnelles plus rapides à mettre en œuvre afin de pouvoir tester plusieurs scénarii d'un projet. Ce travail peut consister à simplifier les approches existantes, au détriment toutefois de la qualité des résultats[16]. Toutefois, la solution d'avenir consiste certainement à développer de nouvelles approches, plus pertinentes, couplant des modèles dynamiques de trafic à des modèles acoustiques temporels (énergétiques, ondula-toires). C'est d'ailleurs dans cette voie que se sont engagés ensemble plusieurs laboratoires dans le cadre du projet de recherche CITEDYNE, pîloté par le CSTB.

**Figure 12 :** Réalisation d'une carte de bruit par une approche simplifiée (champ direct et champ réfléchi à l'ordre 1) sur la commune de Nantes (65x10$^6$ m², 1.7 millions de points de calcul, 346 millions de points sources, durée du calcul : 1h20) - Projet ARN Eval-DPU (IRSTV)




[16] Ce type d'approche est actuellement envisagé dans le cadre du projet ANR Eval-PDU pluridisciplinaire sur l'évaluation des plans de déplacement urbains, piloté par l'IRSTV. Concernant la problématique acoustique, le travail porte plus spécifiquement sur le développement d'un outil de simulation acoustique sous SIG, couplé à un modèle de trafic stationnaire.

### *De la prévision du niveau de bruit équivalent à la simulation de l'environnement sonore*

Le contexte réglementaire dont nous avons déjà parlé à plusieurs reprises, incite essentiellement à la détermination ou à la mesure de niveaux sonores, au travers d'indicateurs réglementaires (*i.e.* des indicateurs dits « objectifs »). Or, la perception de la qualité de l'environnement sonore (ou du confort sonore, ou de l'ambiance sonore, ou à l'inverse de la gêne sonore) ne se limite pas à la seule observation d'un niveau sonore. Il est aujourd'hui devenu indispensable de produire des outils qui permettent d'aller jusqu'à une prévision de la qualité de l'environnement sonore. Deux axes sont envisageables. Le premier, qui fait déjà l'objet de travaux depuis plusieurs années, consiste à développer de nouveaux indicateurs, proposant une corrélation plus pertinente avec la notion de qualité ou de gêne. Ce travail passe par la réalisation d'études mêlant des questionnaires d'enquête, et des écoutes en laboratoires, afin de contribuer au développement d'indicateurs objectifs. Le second axe, novateur tout en restant dans l'esprit des évolutions technologiques récentes, consisterait à développer des outils de modélisation numérique permettant de simuler l'environnement sonore d'un lieu[17], et d'en modifier les différentes composantes. Des développements de cette nature ont déjà été réalisés en s'appuyant sur les méthodes de tracés de rayons. L'avenir repose certainement sur l'utilisation de modèles temporels ondulatoires (tel que la TLM, intrinsèquement adaptée à la simulation de l'environnement sonore), là encore, associés à des modèles de sources sonores dynamiques.

### *De la propagation aérienne du bruit des transports au problème vibratoire*

Les nuisances sonores (bruit aérien) sont clairement celles citées en premier lieu dans tous les sondages et enquêtes récentes. Pour autant, depuis maintenant quelques années, la problématique des nuisances vibratoires (associées aux « véhicules de transports ») est pointée du doigt, notamment en raison de l'évolution des modes de transports urbains laissant de plus en plus de place aux véhicules « lourds » (bus, tramway, tram-bus, etc., en plus du « traditionnel » métro) guidés ou non. La source de gêne étant unique, il conviendrait de proposer des modèles de sources (bruit aérien et vibration) plus globaux.

### *De l'extérieur à l'intérieur des bâtiments, et réciproquement*

Dans le même esprit « d'approche globale » que nous venons d'évoquer pour mêler bruit aérien et vibration, il conviendrait également de proposer une approche globale à l'échelle de la problématique « environnementale ». En effet, historiquement, les outils de prévision acoustique ont été développés à trois échelles différentes (la ville, le bâtiment, un local), avec des approches différentes. Ainsi, dans un premier temps, la détermination des niveaux sonores en façade d'un bâtiment nécessitera l'utilisation d'un outil d'acoustique environne-mentale, prenant en compte la nature du trafic routier, le bâti, la topographie, la météorologie… Dans un second temps, la prévision à l'intérieur même du bâtiment nécessitera un calcul d'acoustique du bâtiment, intégrant la multiplicité des sources de bruit internes et externes, la nature des matériaux de construction… S'il s'agit en plus d'un bâtiment abritant une salle nécessitant des qualités acoustiques spécifiques (salle de spectacle, salle de cours…), le recours à un outil d'acoustique des salles sera indispensable. Ce choix d'échelle est évidemment arbitraire et peu réaliste, dans la mesure où les nuisances sonores ne « connaissent » pas ces limites d'échelle, et que la gêne ou la qualité sonore peut être aussi bien perçue à travers des sources de bruit venant simultanément de l'intérieur ou de l'extérieur d'un domaine. Il est désormais indispensable de proposer des approches globales de prévision du bruit, intégrant la « transmission » acoustique intérieur-extérieur d'un bâtiment. Ce travail peut être envisagé soit en développant effectivement un modèle global (comme cela pourrait être le cas avec une approche ondulatoire), soit en couplant de manière opérationnelle des approches spécifiques existantes.

## Conclusion

Durant cette dernière décennie, les outils de prévision dans le domaine de l'acoustique environnementale ont évolué de manière considérable, en parallèle à l'amélioration des connaissances sur les phénomènes physiques mis en jeu dans le processus de propagation acoustique. Même si de nombreux objets sont encore à l'étude (météorologie urbaine,

[17] Ce type d'approche est déjà proposé en acoustique des salles pour évaluer la qualité acoustique d'une salle de spectacle (auralisation [11]). Toutefois, dans le domaine de l'acoustique environnementale, compte tenu de la nature des sources (multiples, dynamiques et mobiles) et de l'échelle spatiale considérée, cette approche « acoustique des salles » ne semble pas pertinente pour répondre à la problématique posée.

végétalisation, propagation acoustique au-dessus d'une étendue d'eau…), la tendance des approches est à la globalisation et à la généralisation, à savoir le développement d'outils couplant des modèles météorologiques, des modèles dynamiques de trafic, des modèles temporels de propagation acoustique, l'ensemble permettant soit de produire des indicateurs acoustiques corrélés aux notions de qualité de l'environnement sonore ou de gêne, soit de simuler l'environnement sonore. Par ailleurs, et notamment en milieu urbain, le « bruit » est de plus en plus considéré comme une composante de « confort » parmi d'autres, comme le confort thermique dans le bâtiment, la pollution de l'air (émission de polluants par les véhicules) dans les rues, la mobilité à l'échelle de la ville… En résumé, l'avenir des recherches en matière d'acoustique urbaine passe par l'utilisation intensive des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, à travers le calcul intensif, les approches multi-modèles et le développement de simulations réalistes, avec un objectif, la modélisation numérique de la ville, et un point commun, la ville numérique.

## Bibliographie


[1] Fischetti A.
Initiation à l'acoustique
*Éditions Belin, Collection Sup Sciences - Septembre 2009*

[2] Hamayon L.
Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments
*Éditions du Moniteur - Seconde édition, Novembre 2010*

[3] Navi P.
Propriétés acoustiques des matériaux
*Presses polytechniques et universitaires romandes – 2006*

[4] Attenborough K., Li M.K., Horoshenkov K.
Predicting Outdoor Sound
*Spon Press Edition - Août 2006*

[5] Salomons E. M.
Computational Atmospheric Acoustics
*Kluwer Academic Publishers - Novembre 2001*

[6] Ostashev V., Attenborough K.
Acoustics in Moving Inhomogeneous Media
*Spon Press Edition - Décembre 1997*

[7] Bérengier M.
Propagation acoustique à grande distance : effets de sol et effets météorologiques
*Techniques de l'Ingénieur - Avril 2009*

[8] Kang J.
Urban Sound Environment
*Spon Press Edition - Septembre 2006*

[9] Picaut J.
Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches
*Université du Maine - Novembre 2006*

[10] Kuttruff H.
Room Acoustics
*Taylor & Francis Ltd - Mai 2009*

[11] Vorländer M.
Auralization
*Springer - Octobre 2007*

[12] Kulowski A.
Algorithmic representation of the ray tracing technique
*Applied Acoustics - Vol. 18, 1985, pp. 449-469*

[13] Tsingos N.
Simulation de champs sonores de haute qualité pour des applications graphiques interactives
*Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier - Décembre 1998*

[14] Picaut J.
Application numérique du concept de particules sonores à la modélisation des champs sonores en acoustique architecturale
*Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*
*Vol. 258-259, Octobre-Novembre-Décembre 2005, pp. 59-88*

[15] Pelat A.
Approche modale de la propagation acoustique dans les guides d'ondes ouverts
*Thèse de doctorat de l'Université du Maine - Décembre 2009*

[16] Marburg S., Nolte B., Nolte M.
Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods
*Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K - Mars 2008*

[17] Ciskowski R.D., Brebbia C.A.
Boundary element methods in acoustics
*Computational Mechanics Publication, Elsevier Applied Science – 1991*

[18] Lihoreau B.
A 3D parabolic equation code for street canyon propagation
*Proceedings of Euronoise 2009 - Octobre 2009*

[19] Can A.
Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
*Représentation du trafic et caractérisation dynamique du bruit en milieu urbain - Décembre 2008*

[20] Salomons E.M., Blumrich R., Heimann D.
Eulerian time-domain model for sound propagation over a finite-impedance ground surface comparison with frequency-domain models
*Acta Acustica united with Acustica - Vol. 88, 2002, pp. 483-492*

[21] Guillaume G.
Application de la méthode TLM à la modélisation de la propagation acoustique en milieu urbain
*Thèse de doctorat de l'Université du Maine - Octobre 2009*

[22] Association Française de Normalisation
NF S 31-133 : Acoustique - Bruit dans l'environnement - Calcul de niveaux sonores
*AFNOR Éditions - Février 2011*