

La simulation d'environnements sonores : trente ans de recherches au CSTB

Jacques Martin, Julien Maillard

CSTB

Direction Santé Confort

24, rue Joseph Fourier

38400 Saint Martin d'Hères

Tél : 04 76 76 25 25

E-mail : jacques.martin@cstb.fr

Résumé

Le CSTB travaille depuis de nombreuses années sur la simulation auditive d'environnements sonores. Cette approche, que l'on appelle également auralisation, se base sur des résultats de modèles physiques de l'émission et de la propagation acoustique pour fournir un rendu sonore 3D immersif fidèle à l'environnement simulé. En complément des prévisions quantitatives, l'utilisateur dispose ainsi d'une évaluation perceptive des résultats directement par l'écoute. Cet article propose un rapide aperçu sur les techniques et les outils d'auralisation développés au CSTB au cours des trente dernières années ainsi que sur les différentes méthodes de modélisation qui les sous-tendent. Les quatre étapes importantes de l'auralisation sont présentées : la construction des signaux sources, la modélisation des effets de propagation, les traitements du signal associés et enfin, la restitution spatialisée du champ sonore au point d'écoute.

Abstract

CSTB has worked for many years on audio simulations of sound environments. This approach, also called auralization, uses physical models of sound emission and propagation to provide immersive 3D audio rendering of the simulated soundscape. In addition to quantitative predictions, auralization thus provides a perceptive evaluation through listening. This paper gives a brief overview of the auralization techniques and associated software tools developed at CSTB over the last 30 years, including the various numerical methods of acoustics underlying auralization. The discussion is divided along the following four main steps: construction of source signals, modelling of propagation effects, associated signal processing and finally, 3D audio rendering of the sound field calculated at the listener location.

O

ndes sonores, vibratoires, lumineuses, électromagnétiques... Nous sommes sans cesse exposés à des ondes naturelles ou artificielles partout où nous nous trouvons. Dans notre domicile, dans les transports, sur notre lieu de travail, pendant nos loisirs, des ondes sont générées par des sources et se propagent dans un milieu qui les modifie, les complexifie dans un processus multi-échelles : matériaux, produits et composants, bâtiments et quartiers, villes et territoires. Améliorer le confort des individus et prévenir leur santé imposent d'évaluer leur exposition dans les environnements où ils vivent.

Les ondes sonores étant très fortement présentes, la qualité de l'environnement sonore a fait l'objet de beaucoup d'études depuis de nombreuses années. Si on fait abstraction de la problématique des altérations physiologiques liées à l'intensité et à la durée d'exposition fortes, ces études poussent la connaissance sur de nombreuses questions : le confort dans les bâtiments,

l'isolation ou l'absorption des systèmes de constructions, la qualité des espaces urbains, l'intelligibilité et la sécurité, le confort dans les transports, la qualité d'une salle de spectacle ou encore la morbidité liée au bruit [1]. Au cœur de cette grande diversité d'études : la caractérisation de l'exposition sonore de l'Homme dans son environnement.

Depuis le début des années 1980, le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) mise sur la modélisation numérique des phénomènes physiques de propagation avec pour objectif d'obtenir les grandeurs utiles pour caractériser l'exposition. Pour cela, les mathématiques et la physique apportent un ensemble d'équations sous-tendant la propagation des ondes de la source jusqu'à l'individu. Il convient de les résoudre en y introduisant les conditions relatives aux situations rencontrées. La résolution de ces équations peut s'appuyer sur la mise en œuvre de méthodes numériques «exactes».

Ces méthodes, basées généralement sur des techniques dites d'éléments finis, sont largement utilisées dans de nombreuses applications, le plus souvent industrielles. Cependant, lorsqu'on s'intéresse à l'exposition de l'Homme, elles trouvent rapidement leurs limites :

- le volume de données et le temps de calcul strictement liés à la longueur d'onde les cantonnent aux fréquences basses à moyennes, insuffisantes au regard de l'étendue du spectre requis ;
- les dimensions des problèmes que l'on peut raisonnablement traiter (travailler sur une ville entière n'est pas encore atteignable) ;
- et enfin, de par leur caractère exact, la grande sensibilité du résultat aux données d'entrée dont l'utilisateur dispose.

Par conséquent, en parallèle des méthodes «exactes», le CSTB s'est tourné vers le développement de méthodes d'ingénierie permettant de converger vers la solution physique répondant aux équations pour les environnements complexes qui émaillent notre vie de tous les jours. Ainsi, dans les années 80, sont nés Epidaure et Mithra qui sont, respectivement, les premiers logiciels d'acoustique des salles et d'acoustique environnementale. On peut ensuite citer Acoubat pour l'acoustique du bâtiment.

Ces premiers outils numériques permettent de prévoir les indicateurs habituellement utilisés par les acousticiens pour caractériser les environnements sonores. Dans leur expression, ces indicateurs quantitatifs utilisent très souvent des grandeurs intégrées avec pour unité le décibel. La réglementation s'appuie totalement et logiquement sur ces indicateurs. Pour autant, la combinaison de grandeurs intégrées et/ou pondérées dans le temps et en fréquence assortie d'une unité logarithmique certes liée au fonctionnement de l'oreille, reste peu compréhensible pour les non-acousticiens, qu'ils soient décideurs politiques, décideurs de maîtrise d'ouvrage ou citoyens. L'acte d'évaluer un projet, une situation, de choisir entre plusieurs alternatives, de co-concevoir dans une équipe pluridisciplinaire est grandement facilité si, en complément du quantitatif, une présentation qualitative est offerte aux acteurs. La meilleure solution passe par notre système de perception, autrement dit notre capacité à proposer une évaluation de l'environnement sonore directement par l'écoute «comme si l'on se trouvait à la place» de l'individu exposé à cet environnement.

C'est pourquoi depuis la fin des années 80, le CSTB mobilise une partie de sa recherche vers cet objectif de simulation auditive, aujourd'hui communément appelé auralisation, et ce, sur la base de ses moteurs de modélisations pourvoyeurs de grandeurs quantitatives issues de calculs physiques. L'objet de cet article est de retracer de manière très synthétique toutes les grandes étapes de ces trente années d'histoire(s) de simulations des environnements sonores.

Les quatre clefs d'un simulateur

Proposer une évaluation d'un futur environnement sonore par une écoute directe, avec pour contrainte un calcul prévisionnel basé sur des simulations physiques repose sur quatre grandes étapes clefs liées aux mécanismes naturels de construction de cet environnement.

Clef numéro 1 : Construire les signaux sources

Une source sonore présente dans un environnement va émettre un signal de pression dans toutes les directions de l'espace. Il convient donc de pouvoir en produire une réplique en prenant en compte les caractéristiques d'émission de la source : la puissance, le contenu spectral qui peut varier au cours du temps (changement de régime d'un moteur par exemple) et la directivité qui va modifier le contenu spectral selon la direction d'émission. Les techniques de modélisation des sources mises en œuvre résumées dans la deuxième partie (page 12) s'articulent autour de la mesure ou de la synthèse numérique selon le type de source.

Clef numéro 2 : Modéliser les effets du milieu de propagation

L'onde issue de la source se propage dans le milieu. Outre son atténuation due à la propagation, elle est modifiée par des obstacles qu'elle traverse ou sur lesquels elle peut se réfléchir, se diffracter. Il s'agit dans cette étape d'identifier et de modéliser toutes ces modifications intervenant dans toutes les directions. Les modèles utilisés dépendent du contexte et sont présentés dans la troisième partie (page 12).

Clef numéro 3 : Construire la version numérique des signaux résultants au point d'écoute

Se pose ici un problème de pure algorithmique : comment reconstruire le plus précisément possible l'ensemble de toutes ces contributions avec les caractéristiques modélisées tout en optimisant au maximum l'efficacité des temps de traitement. L'objectif vise à garantir la validité physique du résultat tout en privilégiant au maximum l'interactivité pour l'utilisateur (déplacements interactifs de l'auditeur, des sources, modification des matériaux, ...). La quatrième partie (page 16) donne un aperçu du fonctionnement de ces algorithmes.

Clef numéro 4 : Restituer auditivement les signaux synthétisés avec toutes leurs richesses temporelles, spectrales et spatiales

Il est facile de restituer fidèlement les contenus spectral et temporel d'un signal modélisé numériquement. La dynamique et la bande passante des systèmes électro-acoustiques classiques répondent très bien au besoin. Rendre le contenu spatial de l'ensemble des champs identifiés est moins trivial. Là encore plusieurs techniques, propriétaires pour certaines, sont mises en œuvre. Elles sont précisées dans la cinquième partie (page 17).

Construire les signaux sources

Comme indiqué précédemment, il faut disposer à tout instant et dans toutes les directions du signal audio émis par les sources présentes dans l'environnement. Différentes stratégies sont déployées pour obtenir le bon signal source à injecter judicieusement dans les moteurs de simulation. Elles dépendent de la complexité et de la nature de la source considérée. On distingue ainsi, des sources simples, des sources complexes et des sources complexes étendues. Pour la plupart, les sources, quelles qu'elles soient, peuvent être fixes ou en déplacement.

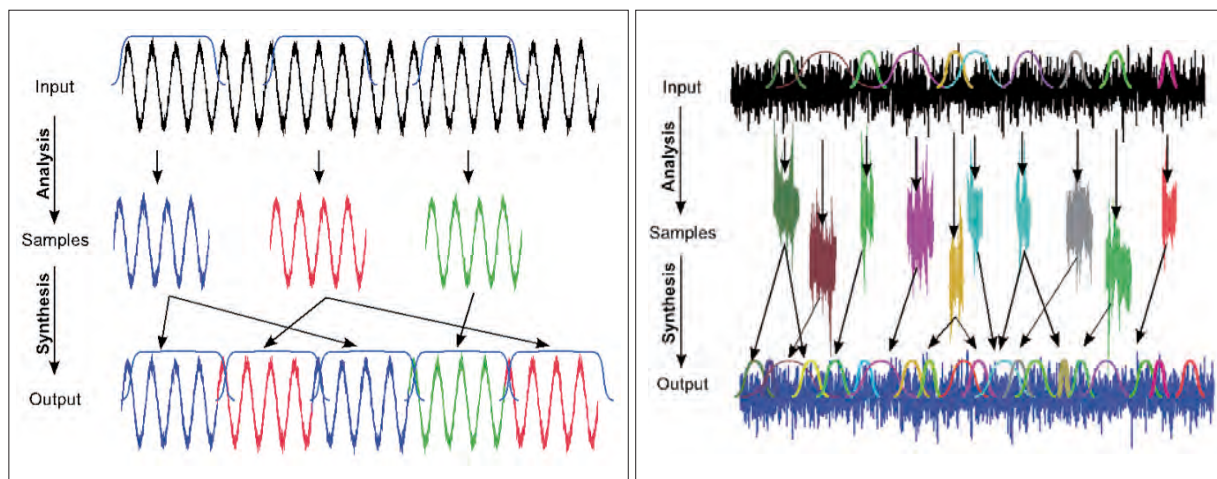


Fig. 1 : Schémas de principe de la synthèse granulaire : les grains sont concaténés de manière synchrone dans le cas de bruits à forte harmonie (schéma de gauche) et asynchrone dans les autres cas (schéma de droite)

Source simple

Par source simple, on entend une source ponctuelle pouvant être directive mais dont l'émission n'est pas liée à son déplacement ou à sa vitesse de déplacement. Exemples de source simple : une enceinte acoustique, une voix, un instrument de musique, une fontaine, etc. Dans la grosse majorité des cas, la modélisation de ce type de source passe par la mesure de sa directivité (en octave ou en tiers d'octave) et par un enregistrement audio calibré dans l'axe principal de la source. Le signal audio dans une direction quelconque est obtenu par filtrage conformément à la directivité.

Source complexe

La source complexe est une association en un point de sources simples comportant des directivités différentes et dont le signal émis est susceptible de varier avec le déplacement. Exemples : véhicules routiers (voiture, camion, deux-roues), avion en champ suffisamment lointain, ... Ce type de sources comporte des variations importantes du signal émis comme le bruit de roulement avec la vitesse, le bruit moteur en fonction du régime, lui-même dépendant de la vitesse et de l'accélération. La stratégie de construction du signal source repose sur des méthodes originales de synthèse numérique temps-réel brevetées que le CSTB a développées dans ses travaux de recherche. On peut séparer les méthodes de synthèse numériques en deux groupes. Le premier groupe est constitué des méthodes de synthèse pure pour lesquelles le signal est entièrement reconstruit à partir de modèles physiques ou perceptifs. Le second groupe comprend des méthodes de synthèse hybrides pour lesquelles la reconstruction du signal utilise des signaux mesurés comme données d'entrée. Cette deuxième approche est bien adaptée à la synthèse de sources de bruit complexes dont la représentation par modèle physique est soit pas assez précise, soit trop coûteuse en temps de calcul. Le bruit des véhicules routiers ou ferroviaires est un bon exemple de ce type de sources complexes. Le CSTB a développé pour ces sources une technique spécifique de synthèse granulaire [2]. Issue des algorithmes de traitement de la parole et de synthèse musicale, cette méthode utilise une base

de données de signaux élémentaires, également appelés grains, obtenus à l'aide d'un algorithme d'extraction spécifique appliqué à des enregistrements. Dans le cas d'un véhicule à moteur, ces enregistrements concernent le bruit moteur et le bruit de contact pneu/chaussée (roulement) à régime et vitesse variables. Un ensemble de grains couvrant la totalité des plages de régimes et vitesses disponibles est ainsi construit. Lors de la synthèse, les grains associés aux valeurs cibles de régime et de vitesse à l'instant courant sont concaténés suivant un algorithme d'addition par recouvrement dit «overlap-and-add» synchrone dans le cas du bruit moteur et asynchrone dans le cas du bruit de roulement. Le principal avantage de la synthèse granulaire introduite ici par rapport à d'autres techniques de synthèse pure basées sur des signaux analytiques est une très grande fidélité par rapport aux signaux réels. Par ailleurs, cette technique est particulièrement adaptée à une mise en œuvre temps réel, la génération du signal se réduisant à la sélection des grains et au traitement d'addition par recouvrement. Notons que ce type de synthèse granulaire est également bien adapté au bruit des tramways ainsi qu'aux réacteurs d'avions.

Source complexe étendue

La source complexe étendue est un ensemble de sources simples ou complexes distribuées et liées spatialement. Ces sources peuvent être fixes ou en déplacement. Exemples : véhicules de transport ferroviaire (train, tram), convoyeur de matériaux sur chantier, centrale à béton, etc. Les méthodes de modélisation mises en œuvre permettent de prendre en compte des sources linéiques, des sources surfaciques, à base de sources élémentaires ponctuelles. Par exemple, le simulateur de chantier «By-Oasis» met en œuvre des sources complexes étendues basées sur des enregistrements et une caractérisation en puissance et directivité de sources élémentaires [3]. Les tramways utilisent une source complexe étendue en mouvement dont les sources élémentaires représentent chaque bogie et les appareils en toiture. Dans ce cas, les signaux sources élémentaires sont construits suivant une synthèse granulaire afin de prendre en compte la dépendance sur la vitesse et l'accélération du véhicule.

Modéliser le milieu de propagation

Cette étape est une clef très importante à forte valeur ajoutée. Une action de recherche de fond est menée depuis plus de trente ans (elle constitue notre cœur de métier sur l'évaluation quantitative) sur laquelle s'appuie ensuite la conception et la mise en œuvre de simulateurs à même de fournir des rendus sonores d'environnements complexes scientifiquement validés. Cette action vise le développement de modèles couvrant l'ensemble des phénomènes physiques présents dans l'environnement. Comme indiqué dans l'introduction, les problèmes posés sont multi-échelles, du matériau au territoire en passant par le bâtiment et la ville. Selon le type d'environnement étudié, différentes méthodes de modélisation sont utilisées en fonction de leur taille et de la finesse requise pour prendre en compte les effets des phénomènes significatifs. Ces méthodes peuvent être couplées pour appréhender des problèmes pour lesquels plusieurs échelles sont simultanément concernées. Pour simplifier, on peut avant tout distinguer deux classes de situations : la modélisation de la propagation à l'intérieur des volumes fermés ou semi-ouverts et la modélisation de la propagation en espaces extérieurs.

Modèles de propagation dans les volumes

Deux niveaux de précisions sont utilisés sur la base de deux méthodes différentes. Un premier niveau assez simplifié est mis en œuvre pour modéliser le comportement qualitatif global d'un bâtiment. Un deuxième niveau, plus fin, permet d'analyser la qualité d'un volume remarquable (salle de spectacle, habitacle d'un véhicule de transport, etc.).

Analyse du comportement d'un bâtiment : l'outil AcouBAT Sound

Ce moteur de calcul permet la prévision des performances de l'ouvrage à partir des performances des systèmes de construction mis en œuvre. Les chemins de propagation entre les locaux, chemins direct et latéraux sont identifiés. Basée sur une méthode de type SEA, l'atténuation sur chaque chemin est ensuite calculée selon les normes EN 12354-1 à 6 [4] avec une détermination améliorée, par rapport à la norme, de la prise en compte des jonctions. On détermine ainsi l'isolement entre locaux, donnée d'entrée utilisée dans la simulation auditive.

Les performances acoustiques des matériaux et des systèmes utilisés sont soit, issues, d'une mesure en laboratoire, soit modélisées par l'outil AcouSYS qui permet de calculer ces performances à partir des propriétés macroscopiques des différentes couches qui composent le système, sur la base d'une méthode de matrice de transfert [5]. L'ensemble des calculs dans ce modèle est effectué en tiers d'octave.

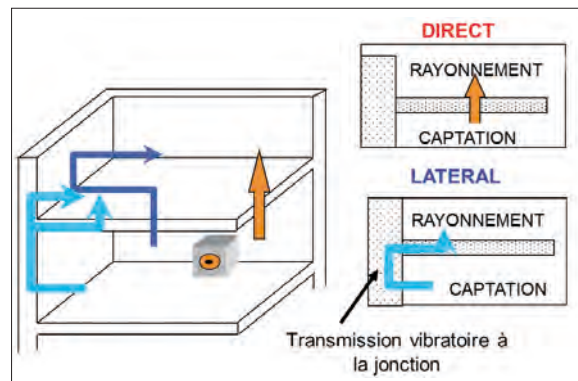


Fig. 2 : Chemins de transmissions modélisés par AcouBAT Sound

Analyse fine du comportement d'un volume

Il s'agit de rendre l'environnement sonore d'un volume complexe en conservant toutes les richesses spectrales, temporelles et spatiales des ondes émises par les sources qui atteignent le point d'écoute par toutes les voies de propagation liées aux formes du volume et aux obstacles qu'il contient. Ainsi les mécanismes de réflexion, diffraction, diffusion et réverbération doivent être modélisés. Là encore, le CSTB a développé au fil des ans tout un ensemble de méthodes adaptées à chacun des phénomènes et qui sont couplées pour modéliser l'ensemble de toutes ces contributions. Les traitements sont ici effectués en 3D et en bande fine. A chaque étape, toutes les informations nécessaires au rendu auditif sont soit conservées, soit transmises en temps réel au processus de rendu. Sans les décrire dans le détail, le tableau ci-dessous donne une liste des méthodes mises en œuvre et les processus physiques pour lesquels elles sont utilisées [6], [7], [8], [9].

Méthodes utilisées	Phénomènes modélisés
Lancer de rayons/faisceaux adaptatifs	Trajets spéculaire/diffraction
Lancer de particules	Diffusion/réverbération
Méthode de géodésique	Ondes rampantes
Radiosité acoustique	Diffusion en milieu confiné
Couplage méthode intégrale/lancer de rayons	Rayonnement vibratoire

Tabl. 1 : Modélisation du comportement d'un volume fermé ou semi-ouvert

Historiquement, ces différentes méthodes ont été développées au fil des années, comme l'illustre le tableau ci-dessous :

Petit historique		
Période	Outil	Fonctionnalités offertes
Années 80	EPIDAURE	Prévision énergétique/octave, facette planes, sources ponctuelles, volume fermé, dédié acoustique des salles
Années 90	EBINAUR	Prévision pression/bande fine, réverbération statistique, diffusion statistique, facettes planes, sources ponctuelles, volume fermé, salle et habitacle
2000 et +	ICARE	Prévision pression/bande fine, diffraction, réverbération particules, facettes courbes, sources ponctuelles/surfaciques, volumes fermé/semi ouvert, salle, habitacle, stade, ...
2010 et +	AURALIES	Calculs et restitution audio temps-réel dans un volume

Tabl. 2 : Historique des méthodes géométriques développées au CSTB

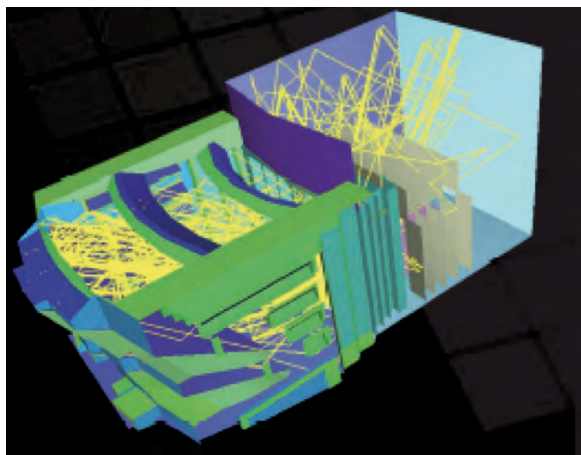


Fig. 3 : Simulation de l'Opéra Bastille avec prise en compte de l'influence des décors

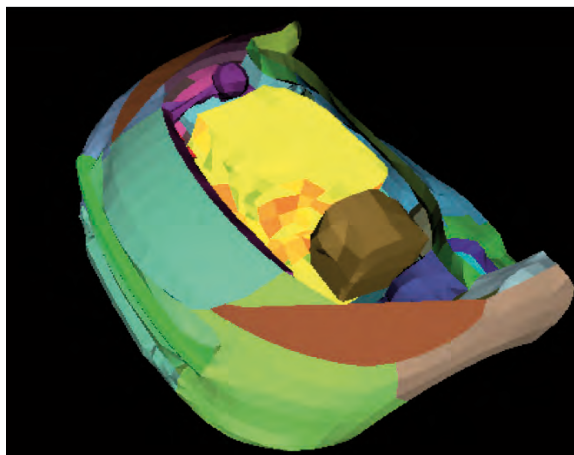


Fig. 4 : Simulation par méthode de radiativité du champ rayonné par un moteur en sous-capot

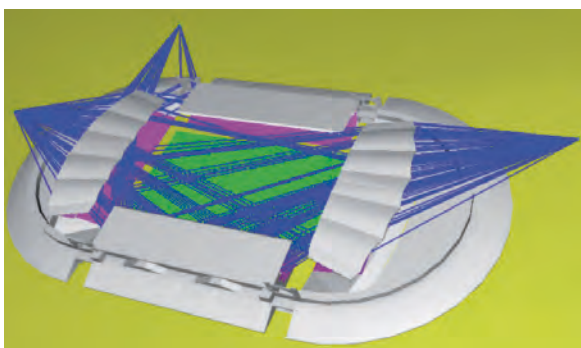


Fig. 5 : Simulation aux abords du stade de Gerland (Lyon) par méthodes géométriques (espace semi-ouvert)

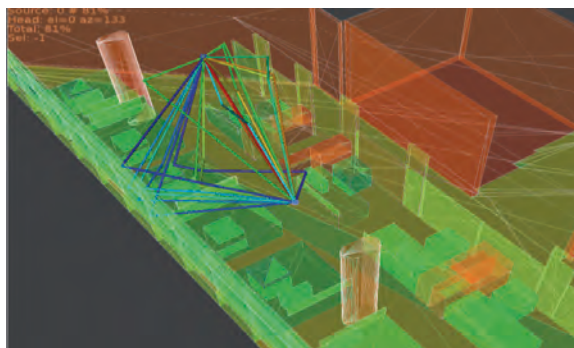


Fig. 6 : Auralisation temps réel dans un bureau paysager - Auralies.

Modèles de propagation dans les espaces extérieurs

La modélisation physique de la propagation sonore en milieu extérieur adresse de nombreuses applications à géométrie et complexité variables : il peut s'agir du simple passage d'un véhicule isolé (voire d'une source ponctuelle fixe) dans une zone très peu encombrée, du bruit émis par un espace de chantier de travaux publics, du bruit de trafic proche de voies routières ou encore de trafic urbain dense avec l'ensemble des champs sonores émis par les autres sources rencontrées en ville. De nombreux phénomènes physiques agissant sur les signaux sources sont à prendre en compte par les modèles : effet de sol, atténuation de l'air, effets des protections acoustiques qui peuvent être de forme complexe incluant plusieurs matériaux, réflexion sur les façades des bâtiments, diffraction sur les arêtes horizontales et verticales de ces mêmes bâtiments, effet de masquage, effets météorologiques (vent, température), etc.

Un grand nombre de modèles de prévision de la propagation acoustique en espace extérieur a été développé au CSTB. Il s'agit tout autant de formulations analytiques applicables à des cas simples que des méthodes numériques capables de prendre en compte la complexité des frontières et du domaine fluide. Le choix d'un modèle

propagatif pour une application donnée dépend de facteurs comme le temps de calcul, la précision recherchée et la disponibilité des données d'entrée (acoustiques, géométriques et atmosphériques).

Face à la diversité des phénomènes et à la taille des environnements à traiter, le cœur du savoir-faire du CSTB en termes de modèles applicables pour l'auralisation s'est construit au cours de ces nombreuses années de recherche principalement autour de deux familles de méthodes :

- Des méthodes type éléments finis (BEM 2D, 2,5D, 3D) ou de lancer de rayons/faisceaux 3D utilisées en amont. Par exemple pour modéliser l'effet d'un écran absorbant/réfléchissant de forme complexe (outil MICADO) ou pour produire le signal sonore s'échappant des ouvertures d'un volume semi-ouvert (outil ICARE).
- Des méthodes de lancer de rayons/faisceaux 2,5 D plus adaptées étant donnés le nombre de sources, le nombre d'obstacles et la taille des domaines à traiter (ville par exemple).

Les figures, page suivante, illustrent les différentes phases du calcul acoustique basé sur une méthode géométrique 2.5D comme celle mise en œuvre dans le logiciel Mithra-SIG.

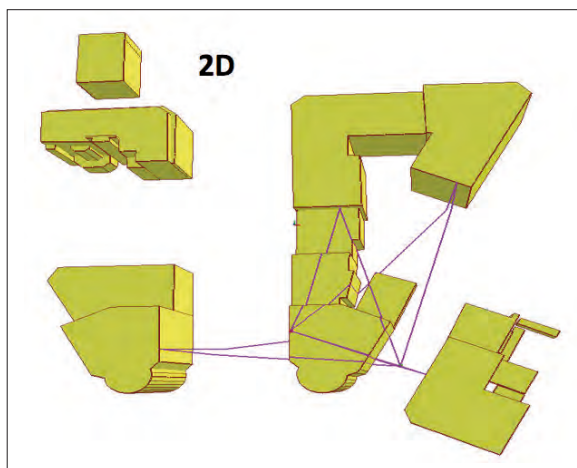


Fig. 7 : Phase 1 : Construction d'une arborescence en 2D des chemins entre la source et le récepteur

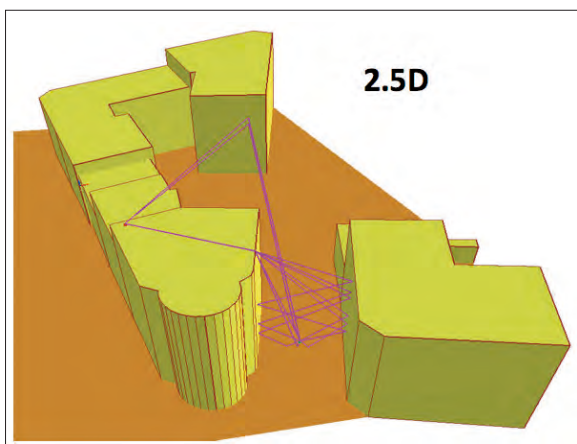


Fig. 8 : Phase 2 : passage en 3D pour chaque chemin identifié dans la phase 1. La technique phase 1 puis phase 2 visant l'efficacité de l'algorithme constitue une méthode 2,5D

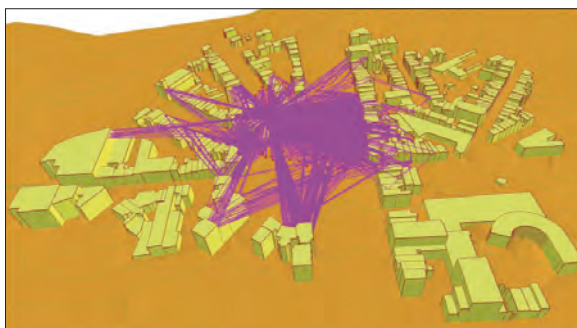


Fig. 9 : Phase 3 : l'ensemble des chemins acoustique source/récepteur sont déterminés

Comme précédemment, le tableau ci-dessous retrace l'historique des développements menés au CSTB.

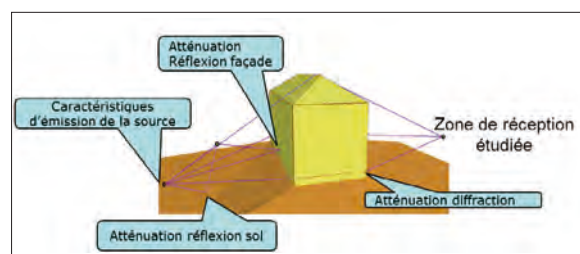


Fig. 10 : Phase 4 : pour chaque chemin, les phénomènes physiques modifiant l'onde sonore sont modélisés

Construire le signal résultant au point d'écoute

Cette étape concerne la mise en œuvre optimisée de méthodes de traitement du signal permettant de construire numériquement le signal à restituer en combinant les signaux sources et les résultats issus des modèles de propagation. Ces modèles caractérisent le champ sonore au point d'écoute sous la forme de chemins de propagation acoustique entre les sources et le point d'écoute. Le signal au point d'écoute s'obtient donc en appliquant aux signaux sources les traitements associés à chaque chemin. Ces traitements doivent permettre de modifier le contenu spectral et temporel du signal.

Dans la majorité des cas, le modèle de propagation sépare l'atténuation fréquentielle, d'une part, et le retard de propagation, d'autre part. Pour ces cas, les techniques de traitement du signal utilisent des filtres dont la réponse en fréquence suit la réponse calculée et des lignes à retard. Lorsque la propagation est caractérisée sous la forme d'une réponse impulsionnelle pour laquelle il est nécessaire de conserver l'information de phase, le traitement du signal utilise alors directement la convolution du signal avec cette réponse impulsionnelle. Dans la plupart des cas, l'atténuation fréquentielle est obtenue par bandes de fréquences (octave ou tiers d'octave). Le traitement du signal utilise dans ce cas soit une séparation du signal par bande suivi d'une amplification par bande avant recombinaison, soit un traitement par bloc dans le domaine fréquentiel par FFT. Dans les deux cas, cette approche permet l'interpolation dynamique de l'atténuation fréquentielle lors du déplacement des sources ou de l'auditeur. Le retard de propagation nécessite un traitement particulier dans le cas de sources et d'un auditeur en mouvement. Le retard est alors variable et doit être interpolé de manière à supprimer tout artefact audible. Un algorithme efficace d'interpolation est utilisé garantissant la continuité de la dérivée du retard ce qui permet le rendu fidèle des effets Doppler.

Petit historique		
Période	Outil	Fonctionnalités offertes
Années 80	Mithra	Prévision énergétique/octave, géométrie propriétaire, sources ponctuelles, sources linéiques
Années 90	MithraSON V1	Pré-calcul Mithra, sources ponctuelles, trafic générique à vitesse constante, synthèse véhicule isolé par filtrage temps-espace
2000 et +	MithraSIG	Nouveaux noyaux géométrique et acoustique, données SIG
2010 et +	MithraSON V2	Pré-calcul Mithra intégré puis restitution interactive couplée à un générateur de trafic

Tabl. 3 : Historique des méthodes géométriques du CSTB en environnements extérieurs

Différents niveaux de complexité apparaissent en fonction des applications : si le signal source est connu à l'avance et la scène est statique, le traitement peut être appliqué lors d'une phase de pré-calcul. Les premières maquettes sonores utilisaient cette approche. En revanche, lorsque le simulateur autorise le déplacement interactif de l'auditeur ou des sources ou bien encore le changement des matériaux voire de la géométrie, les traitements doivent être appliqués en temps réel. Le CSTB a fait le choix dès ses premiers travaux sur la spatialisation du son de privilégier l'approche temps réel lorsque celle-ci ne nuit pas à la qualité perçue des restitutions. Les différentes étapes de traitement du signal utilisent donc un certain nombre d'optimisations de manière à garantir une mise en œuvre temps réel tout en assurant la fidélité des signaux construits par rapport aux modèles de propagation sous-jacents [10], [11]. On peut séparer les optimisations en deux groupes : optimisations perceptives et optimisations algorithmiques. Les optimisations perceptives consistent à trier les chemins en fonction de leur importance perceptive afin de ne conserver que les contributions significativement perçues par l'auditeur. Ces techniques utilisent les propriétés de masquages temporel, fréquentiel et spatial de l'appareil auditif. Elles permettent de réduire considérablement le nombre de contributions spatialisées individuellement dans les simulateurs dédiés aux volumes complexes. Ce sont également ces mêmes propriétés de masquage qui permettent d'agréger les contributions tardives d'une réponse impulsionnelle de salle en une réponse impulsionnelle diffuse unique que l'on appliquera au signal source par convolution [12].

Les optimisations algorithmiques se basent d'une part sur l'utilisation de techniques de traitement du signal efficaces en termes de temps de calcul et d'autre part sur une mise en œuvre optimisée tirant partie des capacités des processeurs modernes. Un exemple bien connu concerne la convolution à base de FFT. Une mise en œuvre efficace nécessite également des techniques de programmation optimisées et en particulier l'utilisation du calcul parallèle. Ainsi, les simulateurs du CSTB sont basés sur un moteur de traitement du signal sous la forme d'un graphe de rendu parallélisé qui permet de répartir la charge de calcul associée aux traitements sur l'ensemble des cœurs disponibles. Par ailleurs, certaines opérations coûteuses comme la convolution par FFT peuvent être implémentées sur les processeurs graphiques (GPU) de manière à augmenter la complexité des simulations.

Restituer l'environnement sonore synthétisé

La dernière étape d'un simulateur d'environnement sonore concerne la restitution audio fidèle du champ sonore simulé aux oreilles de l'utilisateur à l'aide d'un système de restitution électro-acoustique approprié. Deux aspects sont à considérer ici : le contenu spectral et temporel du champ restitué, d'une part, et ses propriétés spatiales, d'autre part. Une évaluation perceptive précise nécessite en général que chacun de ces deux aspects soient traités. La restitution des contenus spectral et temporel du champ sonore est assurée assez facilement en utilisant un système dit « haute-fidélité » dont les réponses temporelle et fréquentielle ne déforment pas les signaux restitués. Le système doit être nécessairement calibré de manière à garantir les niveaux d'exposition calculés.

La restitution des propriétés spatiales du champ sonore est plus complexe. Il s'agit ici de reproduire la position spatiale des contributions sonores calculées. Le CSTB a fourni un effort de recherche important dans ce domaine. Ces travaux ont débouché sur la mise en œuvre et l'optimisation de différentes techniques de restitution sonore 3D, aujourd'hui disponibles dans ses simulateurs. Les techniques utilisées englobent les méthodes de restitution dites « perceptives » et les méthodes dites « physiques ».

Les méthodes « perceptives » se basent sur la restitution du signal binaural à l'entrée des conduits auditifs. Il s'agit des techniques de restitution binaurale. Les signaux sont alors restitués à l'aide d'un casque. Chaque contribution sonore de la scène simulée est dans ce cas filtrée par les fonctions de transfert des deux oreilles associées à sa direction d'arrivée. Ces fonctions de transfert (*Head Related Transfer Function* ou HRTF) sont mesurées en laboratoire ou bien simulées numériquement. Le CSTB a proposé et mis en œuvre une technique intelligente de filtrage par HRTF basée sur la décomposition des réponses impulsionnelles associées sur une base de vecteur réduite à partir de l'analyse en composantes indépendantes (ACI) [13]. L'algorithme qui découle de cette décomposition permet la restitution binaurale d'un grand nombre de contributions dynamiques pour un coût de calcul réduit de manière très significative, comparativement aux approches classiques.

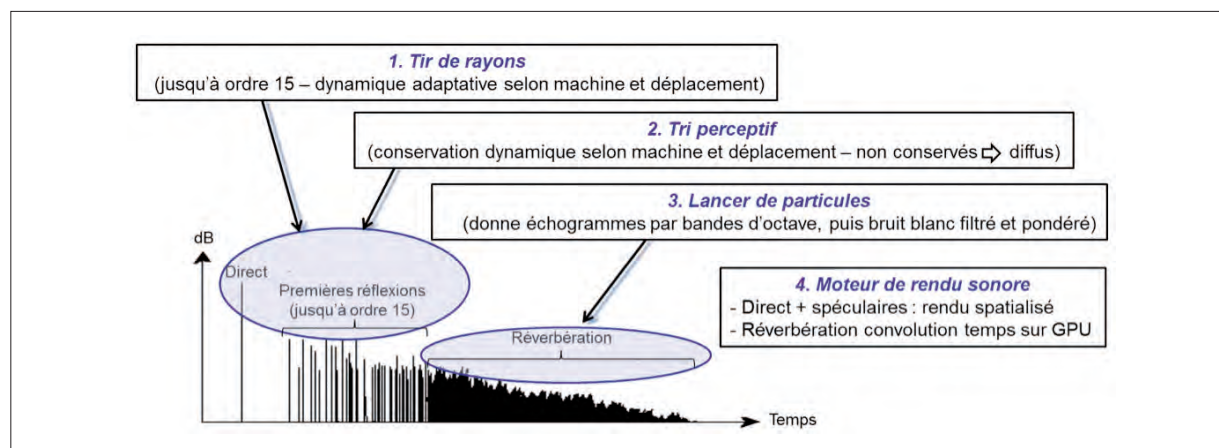


Fig. 11 : Schéma de principe des traitements temps-réel appliqués à l'auralisation dans les volumes complexes

Dérivées de la restitution binaurale, les techniques transaurales permettent la construction du signal binaural à l'aide de haut-parleurs. Le CSTB a mis au point un siège d'écoute basé sur cette approche, utilisant deux haut-parleurs positionnés au niveau des accoudoirs. Une matrice de filtrage inverse est construite à partir des fonctions de transfert haut-parleurs/conduits auditifs de manière à restituer à la position des oreilles de l'utilisateur les signaux binauraux gauche et droit, en entrée du filtrage transaural.

Les méthodes «physiques» utilisent des systèmes multi-haut-parleurs afin de reconstruire fidèlement le champ sonore à l'intérieur d'une zone d'écoute plus ou moins étendue. Ceci concerne les méthodes dites «Ambisonic» et les méthodes «Wave-Field Synthesis ou WFS». Le CSTB dispose d'algorithmes performants pour ces deux méthodes qui, comme dans le cas de la restitution binaurale, autorisent le déplacement dynamique des sources en temps réel. Le système «Ambisonic» implémente une décomposition du champ sonore sur la base des harmoniques sphériques. La décomposition est couplée à un système multi-haut-parleurs positionnés dans un plan pour une restitution 2D ou bien répartis dans l'espace entourant la zone d'écoute pour une restitution 3D. En fonction du nombre de haut-parleurs utilisés et de la puissance de calcul disponible, il est possible de faire varier l'ordre de la décomposition. Une décomposition à des ordres élevés («Higher Order Ambisonic ou HOA») augmente la taille de la zone d'écoute à l'intérieur de laquelle le champ sonore est correctement reproduit et ce, sur toute la plage des fréquences utiles. Le CSTB dispose d'une technique d'optimisation du système HOA pour des positions de haut-parleurs non régulières ce qui autorise une installation dans un local sans contrainte particulière. Le système «WFS» se base également sur une représentation analytique du champ sonore, plus précisément sur l'approximation champ lointain de l'intégrale de Kirchhoff-Helmholtz. Il autorise une restitution fidèle en 2D sur une large zone d'écoute mais ce, au prix d'un nombre important de haut-parleurs. Le CSTB dispose d'un système à 48 haut-parleurs et a également mis au point et fourni les algorithmes du système «WFS» installé au Laboratoire LTE de l'IFSTTAR, Bron [14].

Conclusion

Cet article avait pour objectif de faire un point sur les méthodes avancées de modélisation et de simulation auditive des environnements complexes développées au CSTB depuis une trentaine d'années. Au-delà d'une description scientifique des méthodes et des algorithmes, la question importante sous-jacente concerne l'appropriation de ces techniques et leurs utilisations courantes par les acteurs, en adéquation avec leurs besoins. Pour réussir ce défi, notre expérience fait ressortir quelques critères clefs :

- Les outils doivent être simples à mettre en œuvre, par exemple sans que la mise en données géométrique ne devienne une étape compliquée et coûteuse : que ce soit dans le bâtiment ou dans une problématique urbaine, force est de constater que la transition numérique avance à marche forcée avec la montée en puissance du BIM («Building Information Model»), la généralisation de l'utilisation des SIG ou l'arrivée de formats ouverts comme CityGML.

- Les outils doivent permettre de comparer rapidement des alternatives en atteignant au maximum l'interactivité : là encore, des progrès considérables ont été réalisés au cours de ces dernières années. La technologie algorithmique mais aussi la puissance des machines et des cartes graphiques associées permettent quasiment d'atteindre l'interactivité dans tous les cas traités. Le champ de la recherche comporte encore plusieurs actions ouvertes sur la modélisation et la caractérisation de la grande diversité des sources sonores qui émaillent nos environnements.
- Les simulations sonores proposées doivent être «scientifiquement validées» et non reposer sur «des effets» censés représenter les phénomènes. Toutes les méthodes présentées ici ont pour fondement des résultats de modèles physiques éprouvés qui leur apportent cette garantie scientifique.
- Le coût associé à la réalisation d'une simulation sonore constitue également un critère important mais qui ne constitue plus l'obstacle majeur : les progrès effectués à la fois sur la mise en données et sur les techniques l'ont énormément réduit. Par ailleurs, il est maintenant possible de proposer des petits outils dédiés à la conception, sans représentation graphique sophistiquée, à coût réduit.
- Enfin, le pas le plus important à finaliser reste de l'ordre de l'humain. Si d'importantes avancées ont été réalisées en phase de conception, l'utilisation répandue de ces technologies en phase de communication proposant une information compréhensible par tous, spécialistes ou non spécialistes se heurte encore à la crainte d'alimenter des éventuelles polémiques de par la transparence qu'elles apportent. Il y a plus de trente ans, les premiers indicateurs calculés en sortie de modèles physiques prévisionnels soulevaient les mêmes craintes. L'évolution de l'accueil de ces techniques auprès des acteurs, les facilités d'utilisation et les développements assez récents ciblés sur les usages, conduisent vers leur intégration dans les pratiques autour de la prise en compte du confort et de la santé dans nos lieux de vie.

Références bibliographiques

- [1] Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe, WHO, ISBN : 978 92 890 0229 5, 2011
- [2] J. Jagla, J. Maillard et J. Martin, Sample-based engine noise synthesis using a harmonic synchronous overlap-and-add method Proc. of IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, pp. 373-376, 2012
- [3] J. Maillard, A simulation and restitution technique for the perceptive evaluation of road traffic noise FORUM ACUSTICUM 2005, Budapest, 29 Août-02 septembre, 2005
- [4] Norme NF EN 12354 - Acoustique du bâtiment - Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des éléments
- [5] M.L. Munjal, Response of a multilayered infinite plate to an oblique plane wave by means of transfer matrices, Journal of Sound and Vibration 162, pp. 333-343, 1993
- [6] N. Noe, C. Rougier, J. Rouch and I. Schmich, An hybrid beam and particle tracing with time dependant radiosity for accurate impulse response of rooms prediction, Acoustics 2012.
- [7] F. Gaudaire, N. Noé, J. Martin, P. Jean, D. Van Maercke, Méthode de rayons pour caractériser la propagation acoustique dans les milieux encombrés in Proceedings of Confort Automobile et Ferroviaire, Le Mans, France, 2000
- [8] N. Noé, F. Gaudaire, P. Jean, M. Vermet, A general ray-tracing solution to reflection on curved surfaces and diffraction by their bounding edges, in proceedings of the 9th ICTCA, Dresden, Germany, 2009
- [9] J.-F. Rondeau, A. Duval, C. Morgenstern, G. Borello, S. Frikha, A. Gallet, P. Jean, N. Noé, SONVERT: hybrid traffic noise simulation approach, in SAE 2009 Noise and Vibration Conference and Exhibition, St. Charles, IL, USA, 2009

- [10] J. Maillard, Prediction and auralization of construction site noise Edinburgh, Scotland, Euronoise 2009, October 26-28, 2009
- [11] J. Maillard & J. Jagla, Auralization of non-stationary traffic noise using sample based synthesis - Comparison with pass-by recordings Proc. of Internoise 2012, New York City, New York, 2012
- [12] R. Loyet, J. Maillard, J.-C lehl, & B. Péroche, Perceptual clustering for ray based auralization Euronoise 2009, October 26-28, Edinburgh, Scotland, 2009
- [13] M. Emerit, E. Dudouet, J. Martin, Head related transfer function and high order statistics. Proc 15th International Congress on Acoustics 1995: pp. 437-440, 1995
- [14] J. Maillard, J. Martin, P. Champelovier, J. Lambert, Perceptive evaluation of road traffic noise inside buildings using a combined image and wave field synthesis system CFA/DAGA 2004, Strasbourg, France, 2004
- [15] J. Maillard & J. Jagla, Auralisation du bruit des transports terrestres en milieu urbain. Acoustique & Techniques, n°71, 2013
- [16] J. Maillard & J. Jagla, Effect of Load on Engine Noise for the Auralization of Road Traffic Proceedings of EuroNoise 2015, 31 May - 3 June, Maastricht, pp. 763-768, 2015
- [17] J. Martin J, D. van Maercke D, J-P Vian, Binaural simulation of concert halls: a new approach for the binaural reverberation process. J Acoust Soc Am 1993;94:3255-3264
- [18] D. Botteldooren, Modelling outdoor sound propagation: a careful balance between physical rigour and engineering practice, plenary lecture, Euronoise 2009, Edinburgh, 2009
- [19] E.M. Salomons, R. Blumrich, D. Heimann, Eulerian Time-Domain Model for Sound Propagation over a Finite-Impedance Ground Surface. Comparison with Frequency-Domain Models, Acta Acustica united with Acustica 88, pp. 483-492, 2002
- [20] E.M. Salomons, Computational atmospheric acoustics, Kluwer, Dordrecht, 2001
- [21] J. Defrance, Y. Gabillet, A new analytical method for the calculation of outdoor noise propagation, Applied Acoustics 57(2), pp. 109-127, 1999
- [22] P. Jean, A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise, J. Sound Vib. 212, pp. 275-294, 1998
- [23] K. Gilbert, M. White, Application of the parabolic equation to sound propagation in a refracting atmosphere, J. Acoust. Soc. Am. 85(2), pp. 630-637, 1989
- [24] V. Cerveny, M. Popov, I. Psencik, Computation of wave fields in homogeneous media. Gaussian beam approach, Geophys. J.R. Astron. Soc. 70, pp. 109-128, 1982
- [25] F. Di Napoli, A Fast Field Program for Multilayered Media, Tech. Report 4130, Naval Underwater Systems Center, New London (1971)