



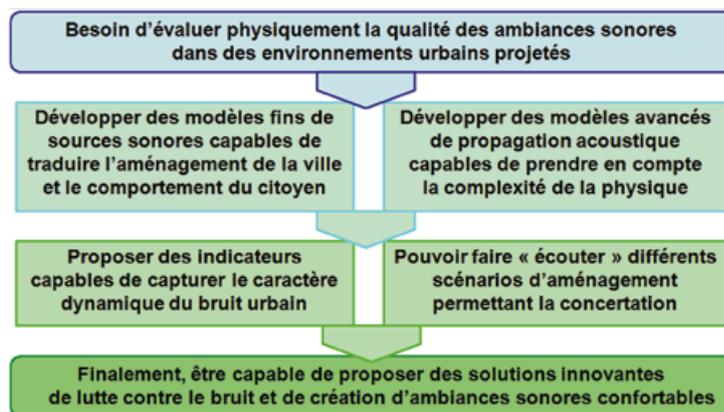
Dossier : **Eco-quartiers et environnement sonore**

Évaluation de l'environnement sonore des espaces urbains par une méthode d'auralisation temps réel du bruit des transports terrestres

Julien MAILLARD, Jan JAGLA, Jérôme DEFRANCE,
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

Dans le cadre du développement d'éco-quartiers, l'évaluation de l'environnement sonore des espaces urbains associés constitue un enjeu de recherche primordial. Dans ce domaine, les modèles numériques de prévision du bruit sont régulièrement améliorés. Les logiciels de cartographie basés sur ces modèles fournissent les indicateurs standards de niveaux de bruit utilisés pour vérifier le respect de la réglementation ou pour comparer différents scénarios (ce sont alors des niveaux dits de « long-terme »). Cependant, l'évaluation précise de la gêne sonore nécessite aussi des indicateurs spécifiques propres à la perception par les individus.

C'est particulièrement vrai en présence de trafics non-stationnaires. Ces indicateurs utilisent une représentation fine du champ sonore basée sur ses propriétés temporelles, spectrales et spatiales (par exemple, l'évolution du niveau sonore seconde par seconde). Une deuxième approche consiste à réaliser des tests d'écoute comparatifs à partir de simulations auditives du bruit de trafic dans son environnement urbain. Sous réserve d'une validation rigoureuse, ces tests fournissent alors une estimation directe du ressenti sonore et de la gêne potentielle associée. L'objectif final est de pouvoir proposer des solutions innovantes de contrôle du bruit urbain susceptibles de créer une ambiance sonore confortable.



Démarche d'évaluation physique de la qualité des ambiances sonores urbaines

Apport de l'auralisation

Dans ce contexte, l'application des techniques d'auralisation au bruit de trafic routier a connu récemment un intérêt grandissant. L'auralisation fournit en effet un rendu sonore 3D d'un environnement virtuel basé sur un modèle numérique physiquement valide. Elle représente donc un outil de recherche pour l'évaluation des solutions de protection antibruit innovantes ou encore pour le développement d'indicateurs de gêne. Elle constitue également un outil de



Dossier: Eco-quartiers et environnement sonore

conception propre aux projets d'infrastructures, utilisable par les urbanistes et consultants en acoustiques.

Pour être appliqué à l'évaluation perceptive d'environnements sonores, le système d'auralisation doit nécessairement reproduire de manière fidèle le champ sonore réel. Par ailleurs, il est important de permettre à l'utilisateur le changement dynamique de certains paramètres comme les caractéristiques du trafic (débit, pourcentage de poids-lourds, etc.), le type de revêtement ou la position de l'auditeur afin de faciliter l'analyse. Dans ce cas, le système d'auralisation nécessite une implémentation temps réel dont la complexité dépend des ressources de calcul disponibles.



Vue du logiciel intégrant l'auralisation : il permet de prendre en compte la complexité de l'environnement urbain et des sources sonores dynamiques

Les systèmes d'auralisation sont généralement basés sur des modèles de l'acoustique géométrique afin de représenter le champ sonore au point d'écoute à partir des contributions élémentaires. Les contributions perceptivement importantes sont ainsi restituées individuellement à l'aide de systèmes de restitution spatialisés tels le casque ou les systèmes multi-haut-parleurs de type Ambisonic. Dans le cas du bruit de trafic, l'auralisation peut se décomposer en trois tâches principales : la synthèse des signaux source (par exemple bruits de moteur et de roulement), le filtrage de ces signaux afin de modéliser la propagation acoustique associée à une contribution individuelle et la spatialisation de chaque contribution.

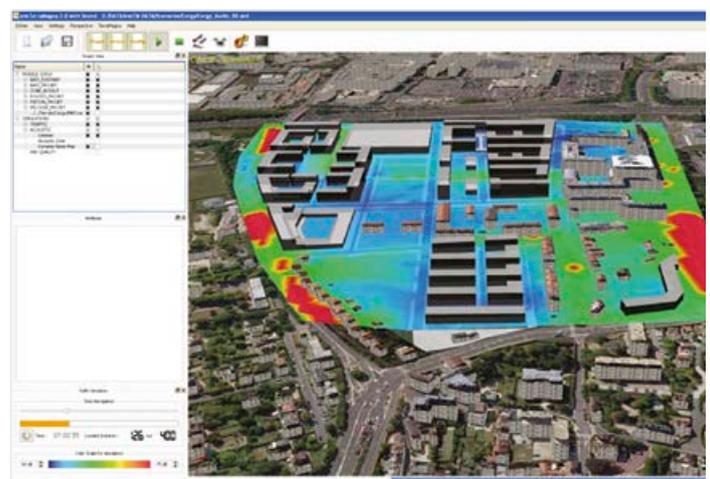
Principe du système d'auralisation

Le système d'auralisation décrit ici constitue un module indépendant d'un logiciel développé au CSTB pour la prévision des niveaux sonores et la simulation auditive des

bruits extérieurs. Conçu à l'origine pour les bruits de chantier, cet outil intègre désormais l'auralisation du bruit de trafic routier. La prévision des niveaux de bruit utilise un lancer rapide de faisceaux en 2D et les méthodes standardisées de modélisation de la propagation. Le module d'auralisation implémente un algorithme de restitution temps réel permettant de manière interactive la navigation sur une zone du site modélisé ainsi que la configuration des sources de bruit.

Un récepteur peut naviguer en temps réel dans le site et « écouter » l'ambiance sonore.

Les modules « hors temps réel » incluent la modélisation du site et le calcul des contributions acoustiques. La modélisation du site regroupe la définition du terrain et bâti, des protections acoustiques, du réseau routier et des propriétés du trafic. Le calcul des contributions acoustiques est réalisé lors d'une étape de prétraitements pour une grille de récepteurs répartis sur la zone d'écoute. Pour chaque récepteur, un ensemble de trajets acoustiques par segment de voie de circulation est déterminé et stocké en mémoire. Durant la restitution sonore, le moteur de rendu sonore de sources en déplacement accède à la base de données des trajets afin de mettre à jour les nœuds de traitement du signal en fonction de la position et orientation de l'auditeur. La construction des bases de données du bruit moteur et de



Vue du logiciel intégrant l'auralisation. Ici, la carte de bruit est dynamique et évolue seconde par seconde.

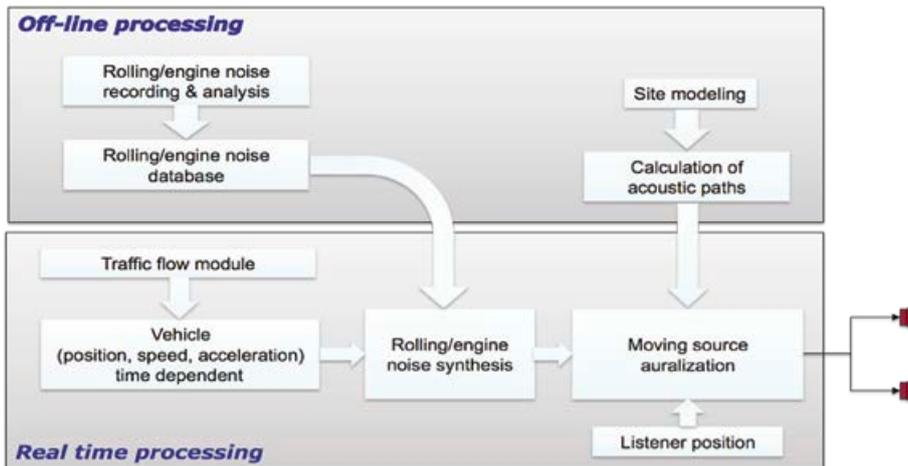
roulement pour chaque type de véhicule constitue également une étape de pré-calcul. Chacune de ces bases de données contient les signaux ou grains élémentaires associés à un type



Dossier : Eco-quartiers et environnement sonore

de véhicule et une combinaison de pneumatique/revêtement de chaussée pour l'ensemble de la plage de vitesses et régimes moteur.

sont construites à partir de l'extraction de segments issus d'enregistrements du bruit moteur et pneumatique pour des régimes et vitesses variant sur l'ensemble de la plage utile. Les



Vue générale du système d'auralisation pour la partie bruit de trafic. Les modules dans le cadre supérieur (hors temps réel) sont utilisés lors d'une étape de pré-calculs ; les modules du cadre inférieur sont exécutés en temps réel lors de la restitution sonore

enregistrements du bruit de roulement sont réalisés pour des décélérations entre vitesse maximale et vitesse minimale. Chaque segment élémentaire de signal (grain) extrait représente ainsi le bruit source du contact pneu/chaussée pour une vitesse donnée. Les enregistrements du bruit moteur sont obtenus à partir de montées en régime du moteur, véhicule à l'arrêt, le microphone de prise de son étant positionné à proximité du bloc moteur.

L'extraction des grains est

réalisée de manière à inclure exactement le bruit émis par un cycle complet du moteur pour un régime donné. Lors de la phase de synthèse, les signaux source des bruits moteur et roulement sont générés en temps réel en assemblant les grains élémentaires associés aux valeurs cibles de régime moteur et vitesse du véhicule. La puissance de calcul nécessaire est faible et permet la synthèse temps réel d'au moins une centaine de véhicules simultanément sur les machines récentes. Cette approche fait l'objet d'un dépôt de brevet.

Les modules « temps réel » incluent le module de simulation du trafic, de synthèse des signaux source et d'auralisation de sources en mouvement. La simulation du trafic utilise le moteur Symuvia du LICIT, laboratoire IFSTTAR. Ce moteur est basé sur un modèle de trafic macroscopique qui fournit à pas de temps discrets la position, vitesse et accélération de l'ensemble des véhicules présents sur le réseau. Pour chaque véhicule auralisé, le module de synthèse utilise le type de véhicule, revêtement de chaussée, vitesse et accélération pour piloter la génération des signaux source du bruit moteur et de roulement. Chaque signal est ensuite envoyé au module d'auralisation qui implémente les étapes de traitement du signal nécessaires à la modélisation des effets de propagation le long d'un ensemble de trajets acoustiques dont les caractéristiques évoluent suivant les déplacements du véhicule sur le réseau et de l'auditeur. Enfin, chaque trajet acoustique est spatialisé en fonction de sa direction d'arrivée au point d'écoute.

L'extraction des grains est

Modélisation des effets de propagation

Suivant le modèle de propagation Harmonoise, les trajets sonores entre chaque segment de voie et l'ensemble des récepteurs sont calculés pour différentes hauteurs de sources au-dessus du sol afin de modéliser les sources principales des véhicules légers, poids-lourds et 2-roues. Chacun de ces trois types de véhicules peut ainsi être auralisé sur chaque voie de circulation en sélectionnant le chemin adéquat. Un chemin de propagation est caractérisé par son atténuation acoustique, la position de la source ainsi que la matrice de transformation associée à la source image. La matrice de transformation associée à la source image est utilisée tout d'abord pour calculer la position de la source image (image de la source réelle après réflexions sur les bâtiments et écrans) et donc le retard de propagation du trajet et sa direction d'arrivée, et d'autre part pour identifier les chemins cohérents entre deux

Synthèse des signaux source de bruit routier

Comme évoqué précédemment, les bruits moteur et roulement constituent deux sources indépendantes. La synthèse temps réel de ces deux composantes utilise une technique de synthèse granulaire mise au point spécifiquement pour ce type de signaux. Dans cette approche, des bases de données comportant environ un millier de signaux élémentaires



Dossier: Eco-quartiers et environnement sonore

positions successives de source ou d'auditeur. La directivité des sources est appliquée lors de la restitution temps réel à partir de l'angle d'émission du trajet et les données de directivité des composantes moteur et roulement du véhicule considéré. Finalement, un module de spatialisation mixe l'ensemble des contributions afin de construire un signal de sortie multi-canal destiné au système de restitution sélectionné (mono, stéréo, Ambisonic ou binaural).

Exemple de validation

La validation est une étape importante de la mise en œuvre du système d'auralisation. Elle inclut en particulier mais pas seulement la comparaison des niveaux de pression obtenus à partir des simulations auditives avec les niveaux mesurés sur des séquences enregistrées. Une campagne de mesure a été menée récemment dans cette optique.

Différents véhicules ont été enregistrés au passage à diverses allures. Le bruit de roulement a été mesuré sur le même axe ainsi que les bruits moteur des trois véhicules. Les bases de données moteur et roulement construites à partir de ces enregistrements ont ensuite été utilisées pour l'auralisation des bruits au passage, les séquences auralisées utilisant une modélisation du site de mesure ainsi que les données mesurées expérimentalement de vitesse au passage et régime moteur. Les résultats sont très prometteurs : la comparaison entre niveaux enregistrés au passage et niveaux simulés montre une grande similitude.

J. MAILLARD, J., J. MARTIN, « A simulation and restitution technique for the perceptive evaluation of road traffic noise ». Proc. Paris, France, EURONOISE 2008

M.E. NILSSON, M. RADSTEN-EKMAN, J. ALVARSSONI, P. LUNDEN, & J. FORSSEN (2011). « Perceptual validation of auralized road traffic noise ». Proceedings of Inter-Noise 2011. Osaka, Japan: The Institute of Noise Control Engineering of Japan and the Acoustical Society of Japan.

J. MAILLARD, « Prediction and auralization of construction site noise, » in Proc. Edinburgh, Scotland, EURONOISE 2009, October 26-28, 2009

J. JAGLA, J. MAILLARD, and N. MARTIN, « Sample-based engine noise synthesis using a harmonic synchronous overlap-and-add method, » in Proc. of IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, 2012, pp. 373 – 376.

J. MAILLARD and J. JAGLA, « Auralization of non-stationary traffic noise using sample based synthesis – Comparison with pass-by recordings, » in Proc. New York City Internoise, 2012, August 19-22.

Contacts :

CSTB

24, rue Joseph Fourier

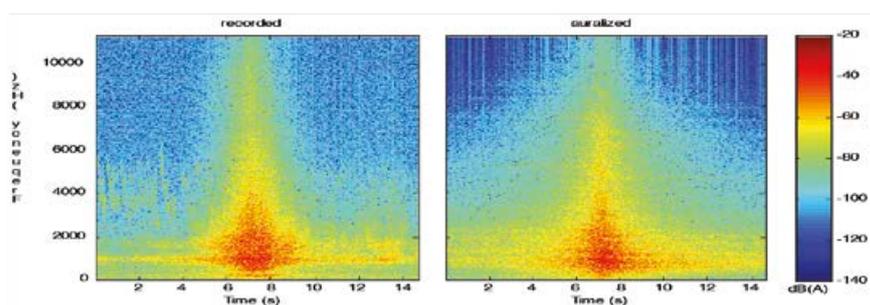
38400 SAINT MARTIN D'HERES

Julien MAILLARD

Mail : julien.maillard@cstb.fr

Jérôme DEFRANCE

Mail : jerome.defrance@cstb.fr



Spectrogrammes obtenus au passage d'une BMW320 à 76 km/h et 2280 tours/minute : enregistré (à gauche) et auralisé (à droite)

Références bibliographiques

D. VAN MAERCKE and J. DEFRANCE, « Development of an analytical model for outdoor sound propagation within the harmonoise project », Acta Acustica united with Acustica 93, 201 – 212 (2007).

A. CAN, L. LECLERC, J. LELONG, J. DEFRANCE, « Capturing urban traffic noise dynamics through relevant descriptors », Applied Acoustics 69 (12), 1270-1280 (2008)