

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Modélisation stochastique pour la production de cartes de bruit  
multi-sources**

P. Aumond<sup>a</sup>, A. Can<sup>a</sup>, L. Jacquesson<sup>a</sup> et C. Lavandier<sup>b</sup>

<sup>a</sup>IFSTTAR, CEREMA, UMRAE, Route de Bouaye, F-44344 Bouguenais, France

<sup>b</sup>ETIS, UMR 8051, ENSEA, CNRS, Univ. Paris Seine, Univ. Cergy-Pontoise, 95000 Cergy-Pontoise,  
France

pierre.aumond@ifsttar.fr

La méthodologie de création des cartes sonores réglementaires est maintenant standardisée, notamment dans le cadre d'application de la directive européenne de 2002. Cette approche cartographique souffre néanmoins de limites, mises en exergue lors de sa confrontation à l'expérience terrain. Il a été démontré que la dynamique des environnements sonores ainsi que la présence de sources de type naturelles (par exemple les oiseaux) ou humaines (les voix) jouent un rôle important sur la qualité des environnements sonores perçus. Cependant, l'indicateur de niveau sonore équivalent  $L_{eq}$  ne donne pas d'information sur la distribution des niveaux sonores et seules les sources de transport (principalement la circulation routière) sont généralement intégrées dans le modèle standard. Pour pallier à ces limites, une approche stochastique et multi-source a été utilisée dans cette étude pour modéliser les environnements sonores urbains. Une comparaison des résultats avec les mesures acoustiques et perceptives, issues d'une campagne de terrain sur les XIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> arrondissements de Paris, permet de démontrer l'intérêt de l'usage de ce type de modélisation. Les cartes sonores multi-sources sont produites à l'aide du plugin de calcul NoiseModelling intégré au SIG open source OrbisGis.

## 1 Introduction

La représentation des environnements sonores urbains au moyen de cartes de bruit est devenue une norme depuis l'adoption de la directive européenne sur le bruit 2002/49/CE [1]. Le cadre de modélisation permettant de générer des cartes de bruit est désormais bien établi : les indicateurs agrégés à long terme sont calculés sur la base d'un recueil ou d'une estimation des variables du trafic routier, aérien et ferroviaire, suivi de calculs d'émissions sonores et de propagation [2]. Ce cadre ne tient toutefois pas compte des variations des niveaux sonores à court terme et empêche ainsi la production d'indicateurs statistiques ou d'indicateurs d'émergence qui améliorent la caractérisation des milieux sonores urbains [3-5].

De plus, le fait de limiter les cartes sonores aux sources de trafic tronque la réalité. Une gamme plus large de sources sonores, y compris les sons naturels, intervient lorsqu'on demande aux gens de décrire les environnements sonores urbains et d'évaluer leur qualité [6-8]. Certains modèles lient les variables perceptuelles, en particulier le caractère agréable ou désagréable de l'environnement sonore, au moment de la présence de sources sonores urbaines typiques comme les oiseaux ou les voix, et l'expérience montre que les sons naturels sont souvent perçus comme ayant un impact positif sur la perception des environnements sonores [9-11].

En conséquence, la cartographie a récemment évolué vers des approches multisources [12-14]. Si ces premières recherches prouvent la faisabilité et l'intérêt de produire des cartes de bruit orientées vers les sources, elles doivent faire l'objet de recherches plus approfondies pour mieux prendre en compte la localisation des sources sonores et leurs activités temporelles, ainsi que leurs niveaux spécifiques et leurs contenus spectraux.

Nous proposons un cadre de modélisation probabiliste pour produire des cartes sonores orientées source qui partagent la même structure quelle que soit la source sonore. Le modèle est illustré pour la production de cartes sonores du trafic, des voix et des oiseaux. De plus, l'approche probabiliste permet d'étudier la concurrence entre les sources sonores, c'est-à-dire la probabilité qu'une source sonore, ou un groupe de sources sonores, dépasse le niveau sonore d'autres. Ce modèle permet donc d'avoir accès à la probabilité d'entendre une source ou un ensemble de sources dans un environnement sonore pendant une certaine période de temps. Or ce paramètre a une influence sur la qualité de l'environnement perçue dans un cadre urbain [7].

## 2 Méthode

### 2.1 Cadre de modélisation

Notre approche est stochastique : un ensemble de cartes sonores  $n \times k$  est créé, correspondant à  $n$  représentations de l'environnement sonore instantané possible pour chacune des  $k$  sources sonores considérées. Chaque carte sonore  $i_k$  peut être vue comme la photographie à un instant  $t$  de l'environnement sonore équivalent (sur 1 seconde) possiblement rencontré pour la contribution d'une source sonore donnée. Les statistiques sont établies à partir d'un nombre suffisant de cartes ou de combinaisons de cartes pour caractériser l'environnement sonore où les paramètres d'entrée du modèle sont stables, par exemple lorsque la densité des oiseaux pendant la période et la zone d'étude est constante. Un des objectifs est de prendre en compte la variabilité temporelle 1-s de l'environnement sonore pour calculer les indicateurs d'environnement sonore originaux. L'évolution temporelle des environnements sonores, c'est-à-dire la cohérence entre deux itérations  $i$  consécutives, n'est pas une sortie cible de la modélisation contrairement à la modélisation dynamique des environnements sonores. Nous suivons le même schéma de modélisation en quatre étapes quelle que soit la source sonore.

**Etape 1 :** La répartition spatiale des sources sonores potentielles (humains, oiseaux, voitures) est définie. La répartition spatiale de ces sources est déduite de la densité des sources sonores pour une zone donnée (maille, tronçon routier, etc.) pour une période de temps donnée.

**Etape 2 :** La matrice d'atténuation par bande d'octave (63-8000 Hz), entre chaque couple "source sonore potentielle (niveau de puissance) / récepteur (niveau de pression)", est calculée. Nous considérons que pour la période de temps modélisée, la propagation acoustique reste inchangée.

**Etape 3 :** Un ensemble de  $n$  cartes sonores est créé pour chaque source sonore  $k$ . Chaque carte sonore est calculée en activant au hasard une proportion des sources sonores potentielles par rapport aux connaissances sur l'activité sonore des sources. Par exemple, si l'on suppose que 30% des humains présents en un lieu parlent pendant la même seconde, seulement 30% des humains localisés sur la carte sont sélectionnés au hasard et activés pour une carte  $i$ . Un spectre de niveau de puissance acoustique équivalent sur 1 seconde est attribué à chaque source sonore activée, en fonction des connaissances sur la source sonore : variabilité 1-s des niveaux de puissance acoustique, spectre sonore, prosodie des voix, etc. Chaque carte sonore  $i$  est calculée en additionnant la contribution, à chaque récepteur, de chaque source sonore activée à l'instant  $i$ . La contribution

individuelle de chaque source sonore est la somme entre le niveau de puissance acoustique et l'atténuation liée à la propagation du son calculée à l'étape 2. Les sources sonores activées varient à chaque itération, mais la matrice d'atténuation n'est calculée qu'une seule fois, ce qui limite très fortement le temps de calcul (dans cette étude moins de 3 heures pour le calcul de propagation).

**Etape 4 :** Les indicateurs de niveau sonore sont calculés à chaque récepteur en fonction des  $n$  cartes sonores. Des indicateurs sonores caractérisant la dynamique du bruit sont également calculés, tels que les niveaux statistiques pour chaque source sonore modélisée ( $L_{10}$ ,  $L_{50}$  et  $L_{90}$ , correspondant au niveau sonore dépassé respectivement 10, 50 et 90% du temps). Mais il peut également s'agir de la proportion des combinaisons entre les  $n \times k$  cartes sonores calculées pour chaque source sonore où le niveau sonore d'une source sonore définie est supérieur aux autres. Par exemple, à un emplacement donné, pour  $x\%$  des cartes sonores calculées, le niveau sonore des oiseaux est supérieur à celui de la circulation routière.

## 2.2 Outils

Toutes les étapes de modélisation sont implémentées à l'aide du logiciel libre SIG OrbisGis. L'ensemble des données géographiques utilisées proviennent de la base de données libre Open Street Map (OSM), à l'exception des données de trafic qui appartiennent à la mairie de Paris.

La propagation sonore réalisée lors de l'étape 2 présentée ci-dessus utilise le plugin gratuit et open-source Noisemodelling, qui a déjà été développé en tant que plugin OrbisGis pour produire des cartes statiques de bruit routier [15]. La méthode de propagation utilisée est la méthode européenne CNOSSOS pour les calculs d'atténuation acoustique, voir détails dans [15]. Le Tableau 1 donne un résumé des paramètres définis par l'utilisateur qui ont été utilisés pour cette étude. La hauteur des bâtiments est une donnée disponible dans la base BD\_Topo, mais cette base appartient à l'IGN. Pour respecter le parti pris dans ce travail de n'utiliser que des données ouvertes, la hauteur des bâtiments a été fixée à 10m.

Tableau 1 : Valeurs données aux paramètres définis par l'utilisateur dans cette étude pour la propagation du son.

Paramètres	Configuration pour cette étude
Ordre de réflexion maximal	2
Ordre de diffraction maximal	1
Distance source-récepteur maximale	500 m
Hauteur des bâtiments	10 m
Hauteur des récepteurs	1.5 m
Coefficient d'absorption du sol	G=0
Coefficient d'absorption des parois	G=0.23

## 2.3 Présentation du cas d'étude

Lors des projets GRAFIC et Cart\_ASUR, des évaluations perceptives ont permis de recueillir des notes moyennes d'agrément sonore (caractère agréable ou désagréable d'un lieu), de temps de présence de circulation routière, des voix et des oiseaux, sur les 13<sup>e</sup> et 14<sup>e</sup> arrondissement de Paris. Un total de 45 lieux a été évalué. Seules les données recueillies au printemps et en été, au

cours de la journée, ont été retenues dans le travail présenté ici, afin de solliciter la présence du chant des oiseaux.

En parallèle, dans le projet GRAFIC, 23 lieux ont été mesurés en continu pendant un an, donnant accès pour ces lieux à un très grand nombre de mesures acoustiques (énergétiques et spectrales) toutes les secondes.

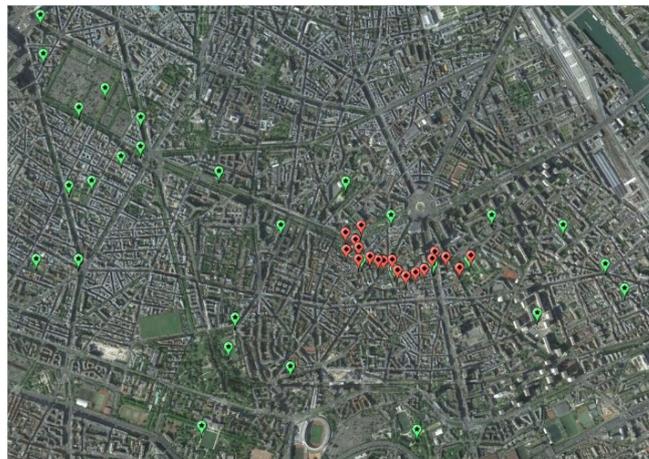


Figure 1 Emplacements des situations évaluées. Les points rouges correspondent aux sites évalués en mars 2015 (projet GRAFIC). Les points verts correspondent aux sites évalués à différents moments de la journée entre mars 2014 et septembre 2014 (projet Cart\_ASUR)

## 3 Modèles d'émission

### 3.1 Trafic

Les positions possibles pour le trafic routier correspondent aux routes. Nous choisissons une résolution de 10 m d'espacement pour individualiser les émissions sonores des véhicules. Ces sources ponctuelles deviennent des sources sonores potentielles pour chaque itération de carte, combinées à la densité des véhicules, pour activer les sources de trafic routier sur le réseau. Les densités de trafic sont calculées à partir des débits et des vitesses moyennes, pour différentes catégories de véhicules.

À chaque calcul  $i$ , la probabilité d'activer une source ponctuelle est le rapport entre la densité calculée et la densité des sources possibles sur le réseau routier. Une fois activée, le niveau de puissance acoustique et le spectre acoustique d'une source sonore sont calculés sur la base du modèle d'émission sonore NMPB2008, en fonction de la catégorie et de la vitesse du véhicule.

### 3.2 Voix humaines

En milieu urbain, la plupart des piétons sont situés sur les trottoirs et les zones piétonnes. Les trottoirs ne sont pas directement disponibles dans la base de données Open Street Map. Dans notre cas, ils sont obtenus en soustrayant à une zone tampon autour des routes, une zone tampon plus étroite autour des routes et des zones de bâtiments.

La distribution spatiale des piétons dans un centre-ville dépend fortement des paramètres morphologiques, tels que la fonctionnalité de la zone, des zones commerciales ou du réseau de transport, et des moyens de transport en mode doux. En première approximation, nous proposons une estimation macroscopique des volumes piétonniers à partir des données ouvertes disponibles fournies par Open Street Map. Les paramètres du modèle sont calibrés à l'aide des données ouvertes sur les volumes de passages piétons de la

Ville de Montréal (plus d'une centaine de points de comptage). Le modèle repose sur la densité des points d'intérêt (commerces, gares, etc.) dans des rayons de différentes tailles. Les densités sont exprimées par des fonctions de noyau quadratiques. L'équation 1 montre le modèle construit sur les données de Montréal, qui exprime le débit piétonnier  $Q$  (piéton par heure), basé sur la densité des magasins  $K_{sh,300}$  dans un rayon de 300m, la densité des stations de transports publics (métros et tramways)  $K_{PT,400}$  dans un rayon de 400m, et la densité des restaurants  $K_{rt,400}$  dans un rayon de 400m.

$$Q = 5593 K_{sh,300} + 36922 K_{PT,400} + 3042 K_{rt,400} \quad (1)$$

Le modèle explique bien la variabilité des débits piétonniers sur l'ensemble de données de Montréal ( $R^2_{adj.} = 56\%$ ,  $p < 0.05$ ). Il sera considéré comme suffisant en première approximation et en l'absence de modélisation plus fine pour modéliser les débits piétonniers dans la ville de Paris. Les débits piétonniers déterminés sur la zone avec l'équation 1 sont ensuite convertis en densités piétonnières. La hauteur des sources ponctuelles pour piétons est réglée à 1,5 m.

Une relation entre la densité piétonnière et le nombre de piétons qui parlent a été élaborée par Qi et Kang [16]. Ils suggèrent que 30 % des piétons qui parlent simultanément dans une foule dense est une bonne approximation. Pour notre cas d'étude, et dans un esprit de simplification, ce nombre est retenu dans la modélisation, et pour chaque carte sonore générée  $i$ , 30% des sources ponctuelles piétonnières sont activées aléatoirement.

Le spectre sonore des voix humaines, catégorisé en voix d'hommes, de femmes et d'enfants, se trouve par exemple dans [17]. Il indique un maximum d'énergie dans la bande de fréquences 250-500 Hz. Le niveau de puissance acoustique des personnes qui parlent varie en fonction du niveau sonore de fond. Selon Lazarus [18], les conditions de parole normales élevées sont de 60 dB à 1 mètre de la source sonore. Pour notre cas d'étude, le spectre présenté dans le Tableau 2 est utilisé.

Tableau 2 Spectre des voix pour notre cas d'étude (en dB)

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$L_w$ (dB)	35	50	53	57	53	50	45	40

### 3.3 Chants d'oiseaux

Les indicateurs de morphologie urbaine, en particulier la proportion du territoire occupée par les bâtiments, l'indice de dispersion des espaces verts et les périmètres des espaces verts, sont corrélés à la présence d'oiseaux et à la diversité des espèces rencontrées [19][20]. Ainsi, sans connaissance additionnelle de la répartition spatiale de l'oiseau, ils sont placés par défaut, dans notre étude, dans des zones qui recouvrent des arbres situés dans les rues, les parcs et le centre de blocs urbains, qui correspondent souvent à des jardins privés. La hauteur des sources ponctuelles pour les oiseaux est fixée à 4 m.

La proportion d'oiseaux qui chantent en même temps est une donnée non trouvée dans la littérature. Sans connaissances supplémentaires, nous considérons que 10% des sources sonores potentielles émettent du son lors d'une même seconde.

Calder et Willam ont relié la puissance acoustique  $P$  des passereaux chanteurs à leur poids [21]. Il peut aussi être montré qu'il est possible d'estimer la fréquence centrale de chant des passereaux en fonction de leur poids [22]. Sur la base de ces travaux, le tableau 3 présente le niveau d'émission de puissance acoustique par bande d'octave utilisé dans cette étude pour modéliser les chants d'oiseaux.

Tableau 3 Spectre du chant des oiseaux dans le cas de notre étude (en dB)

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$L_w$ (dB)	-	-	-	54	80	80	84	68

## 4 Résultats

### 4.1 Indicateurs statistiques

Les  $n$  cartes sonores instantanées (équivalent 1-s) sont générées par la mise en œuvre de la modélisation présentée pour le trafic, les oiseaux et les voix. La compilation de  $n$  itérations ( $n = 300$ ) d'environnements sonores instantanés possibles aide à calculer les indicateurs statistiques de bruit décrits à l'étape 4, qui ne sont pas accessibles par les approches standard de cartographie statique du bruit. La Figure 2 donne un exemple de carte  $L_{50}$  produite pour le bruit de trafic routier, qui souligne comme on pouvait s'y attendre les niveaux plus importants sur les boulevards. Ces types de cartes construites sur des indicateurs percentiles peuvent être utiles pour évaluer, par exemple, la plage de variation des niveaux sonores dans une rue pour une source sonore donnée.



Figure 2. Carte de  $L_{50}$  pour le bruit de trafic. Echelle linéaire du rouge pâle < 40 dB au rouge foncé > 65 dB.

### 4.2 Interactions entre les sources

La confrontation des 300 cartes sonores instantanées produites permet d'estimer la probabilité qu'une source sonore émerge du mélange sonore de l'environnement global. La Figure 3 illustre la compétition entre sources sonores pour le cas des bruits d'oiseaux et du bruit de trafic. On considère qu'un bruit d'oiseau émerge, pour une carte sonore instantanée donnée  $i$  et à un récepteur donné, si le niveau de pression acoustique de la carte sonore des oiseaux dépasse le niveau de pression sonore due à la circulation routière et dépasse 40 dB (limite fixée pour le niveau sonore de fond urbain) à 4 kHz.

La carte montre la forte proportion des cartes pour lesquelles les oiseaux sont entendus dans les parcs (parc Montsouris par exemple, point entouré en rouge), du fait d'une part du nombre important d'oiseaux s'y trouvant, et d'autre part de la distance à la route atténuant le bruit de

trafic. A l'inverse, une très faible proportion des cartes créées renvoie un volume des bruits d'oiseaux supérieur au bruit de trafic sur les boulevards, traduisant la faible probabilité d'entendre à un instant donné les oiseaux sur les boulevards. Notons qu'en pratique les sources en compétitions sont multiples. Par exemple, pour le point situé au sud du parc Montsouris cité précédemment, on pourrait s'attendre à ce que les bruits d'oiseaux, qui ne sont pas très bruyants dans le sud du parc, soient masqués par la fontaine si nous combinions ces deux cartes sonores (carte due à la présence des oiseaux et carte due à la présence des fontaines).

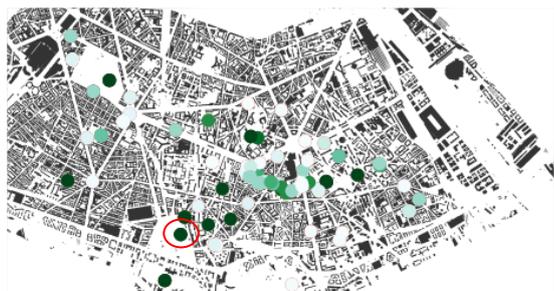


Figure 3. Proportion des cartes produites pour lesquelles le niveau des oiseaux est supérieur au niveau du trafic sur la bande de fréquence centrée sur 4kHz (Echelle linéaire du blanc 0% au vert 100%)

### 4.3 Validation

La Figure 4 compare les indicateurs estimés dans cette étude, aux variables de temps de présence du trafic, des voix, et des oiseaux, recueillis sur 45 situations urbaines différentes dans le cadre de tests perceptifs menés dans les projets GRAFIC et Cart\_ASUR. Le test perceptif consistait à évaluer le temps de présence perçu de la source d'intérêt sur une échelle allant de 0 à 10, sur une durée d'écoute allant de 3mn (GRAFIC) à 10mn (Cart\_ASUR). En ce qui concerne le temps de présence perçu de la circulation routière, le  $L_{50}$  relatif au bruit routier s'avère être un indicateur très fiable, avec une corrélation significative  $r = 0.84$ . En ce qui concerne le temps de présence perçu des oiseaux, puisque cette source est souvent masquée par le bruit de circulation, le  $L_{50}$  n'est pas l'indicateur retenu. En revanche, le pourcentage estimé par le modèle des cartes pour lesquelles les oiseaux émergent est significativement corrélé au temps de présence perçu des oiseaux, avec  $r = 0.68$ . Enfin, le pourcentage des cartes estimé par le modèle pour lesquelles les voix émergent est également significativement corrélé au temps de présence perçu des voix, mais dans une moindre mesure, avec  $r = 0.34$ .

Ces résultats montrent donc l'intérêt de la méthode pour l'estimation des variables perceptives caractérisant l'agrément sonore.

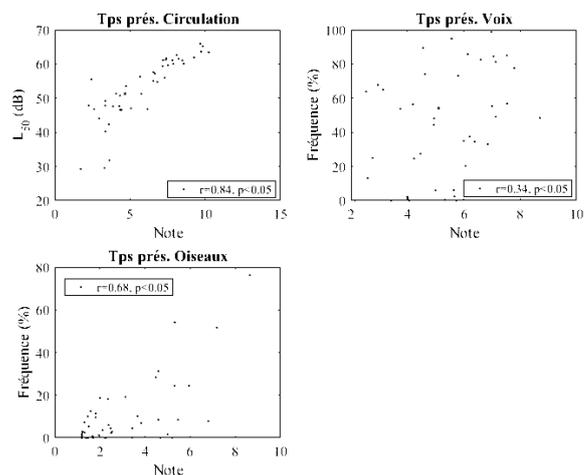


Figure 4. Comparaison entre les variables physiques calculées, et le temps de présence perçus, pour le trafic, les oiseaux, et les voix.

Enfin, l'approche de modélisation permet l'estimation d'indicateurs traduisant la dynamique temporelle des niveaux de bruit, tels que les indicateurs percentiles. La Figure 5 confronte les indicateurs estimés aux mesures réalisées sur les 23 stations fixes du projet GRAFIC.

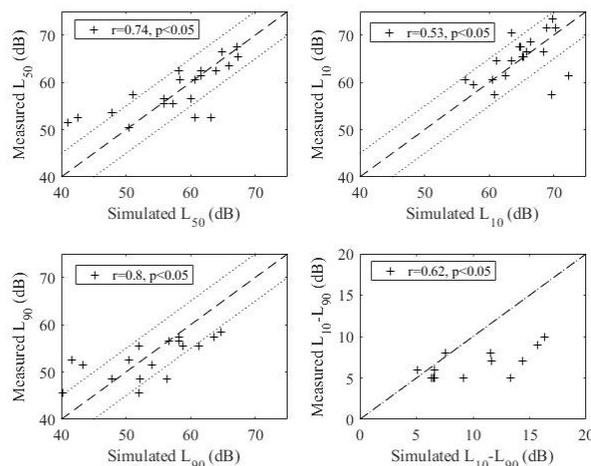


Figure 5. Comparaison entre les indicateurs statistiques issus de mesures et de simulation, pour le bruit de trafic routier.

## 5 Discussion

Chaque bloc de la chaîne de modélisation repose inévitablement sur des simplifications. Les répartitions spatiales des sources sonores, le niveau de puissance acoustique et le spectre sont des approximations faites avec des valeurs réalistes basées sur une revue de la littérature, mais insuffisantes.

Ainsi, il a été montré dans cet article que la présence des voix n'est pas si bien appréhendée par le modèle choisi. Cette difficulté à prédire la présence des voix à partir de données géo-référencées a déjà été rencontrée dans la littérature [14]. On pourrait identifier et localiser les voix d'enfants autour des écoles par exemple.

Plus généralement, pour de futures études où l'on voudrait se rapprocher de la réalité du terrain, tous les paramètres devront être affinés à l'aide, par exemple, de

mesures in situ des piétons, du trafic ou du comptage des oiseaux.

Le cadre de modélisation rend également possible d'intégrer de la variabilité dans les sources pour un temps de calcul constant. Il sera par exemple possible de séparer les voix d'hommes des voix de femmes, de faire une distinction entre les voix de conversation sur les trottoirs et les voix d'expressions plus extraverties autour des restaurants et des jardins ou d'introduire une variabilité dans la hauteur des sources pour les oiseaux.

L'émergence de la source sonore à partir d'un mélange sonore est particulièrement intéressante pour les études de paysages sonores, et il serait très intéressant d'inclure également les effets de masquage dans l'étape finale, pour présenter une cartographie encore plus représentative de l'environnement sonore perçu par les passants en ville.

Enfin, il paraît important d'aller plus loin dans la confrontation proposée dans cet article entre les indicateurs d'émergence produits et la façon dont ces émergences sont perçues.

## 6 Conclusion

Un cadre de modélisation adaptable à toutes les sources sonores rencontrées en milieu urbain a été proposé et appliqué sur deux arrondissements de Paris. Il se compose de quatre étapes : (étape 1) une distribution spatiale des sources sonores potentielles d'intérêt ; (étape 2) le calcul d'une matrice de propagation du son ; (étape 3) l'activation stochastique des sources sonores pour  $n$  itérations de la carte sonore ; (étape 4) le calcul des indicateurs sonores originaux, dont certains proviennent de la combinaison de cartes sonores calculées.

Le cadre proposé intègre des blocs de modélisation indépendants qui laissent ouvertes les améliorations à chaque étape de la modélisation, ou le choix entre différents modèles en fonction des données d'entrée disponibles. L'approche stochastique permet également d'estimer la variabilité des niveaux sonores. Les cartes finales proposées permettent au lecteur d'observer si une source sonore spécifique émerge du mélange sonore global, et donc de donner des informations très complémentaires aux cartes de niveau sonore bien connues. Elles permettent aussi d'avoir accès à des indicateurs statistiques du niveau sonore.

Afin de promouvoir la recherche reproductible et la réutilisation du cadre de modélisation, toutes les données et le code sont disponibles sur Github<sup>1</sup>.

## Remerciements

La validation expérimentale proposée dans cet article repose sur deux campagnes expérimentales réalisées dans le cadre des projets Cart\_ASUR (Convention n°1217C0035) et GRAFIC (Convention n°1317C0028) financés tous deux par l'Ademe. Dans le cadre de ces projets, les auteurs remercient la ville de Paris pour la mise à disposition des données de trafic.

## Références

[1] EC. Directive 2002/49/EC of the European parliament and the Council of 25 June 2002 relating to the

assessment and management of environmental noise. *Off J Eur Communities*. 2002;189(12):12–25.

- [2] Kephelopoulou S, Paviotti M, Anfosso-Lédée F, Van Maercke D, Shilton S, Jones N. Advances in the development of common noise assessment methods in Europe: The CNOSSOS-EU framework for strategic environmental noise mapping. *Sci Total Environ*. 2014 Jun;482–483:400–10.
- [3] Liu J, Kang J, Luo T, Behm H, Coppack T. Spatiotemporal variability of soundscapes in a multiple functional urban area. *Landsc Urban Plan*. 2013;115:1–9.
- [4] Can A, Leclercq L, Lelong J, Defrance J. Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: Experimental evidence. *Appl Acoust*. 2009;70:821–9.
- [5] Brocolini L, Lavandier C, Quoy M, Ribeiro C. Measurements of acoustic environments for urban soundscapes: Choice of homogeneous periods, optimization of durations, and selection of indicators. *J Acoust Soc Am*. 2013 Jul 1;134(1):813–21.
- [6] Nilsson ME, Botteldooren D, De Coensel B. Acoustic Indicators of Soundscape Quality and Noise Annoyance in Outdoor Urban Areas. In: 19th International Congress on Acoustics. 2007.
- [7] Ricciardi P, Delaitre P, Lavandier C, Torchia F, Aumond P. Sound quality indicators for urban places in Paris cross-validated by Milan data. *J Acoust Soc Am*. 2015 Oct;138(4):2337–48.
- [8] Brown AL, Kang J, Gjestland T. Towards standardization in soundscape preference assessment. *Appl Acoust*. 2011 May 1;72(6):387–92.
- [9] Lavandier C, Defreville B, Defréville B. The contribution of sound source characteristics in the assessment of urban soundscapes. *Acta Acust United Acust*. 2006 Nov;92(6):912–21.
- [10] Aumond P, Can A, De Coensel B, Botteldooren D, Ribeiro C, Lavandier C. Modeling Soundscape Pleasantness Using perceptual Assessments and Acoustic Measurements Along Paths in Urban Context. *Acta Acust United Acust*. 2017 May 1;103(3):430–43.
- [11] Guastavino C. The Ideal Urban Soundscape: Investigating the Sound Quality of French Cities. *Acta Acust United Acust*. 2006;92:945–51.
- [12] Hong JY, Jeon JY. Exploring spatial relationships among soundscape variables in urban areas: A spatial statistical modelling approach. *Landsc Urban Plan*. 2017 Jan;157:352–64.
- [13] Aletta F, Kang J. Soundscape approach integrating noise mapping techniques: a case study in Brighton, UK. *Noise Mapp*. 2015 Jan;2(1):1–12.
- [14] Lavandier C, Aumond P, Gomez S, Dominguez C. "Urban soundscape maps modelled with geo-referenced data", *Noise Mapping Journal*, Vol. 3(1), pp. 278-294, 2016. Available from: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/noise.2016.3.issue-1/noise-2016-0020/noise-2016-0020.pdf>
- [15] Fortin N, Bocher E, Petit G, Gouge A, Picaut J, Dutilleul G. Urban noise maps in a GIS. In: Open Source Geospatial Research and Education Symposium [Internet]. 2012. p. 227–35. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/278381211\\_Urban\\_noise\\_maps\\_in\\_a\\_GIS](https://www.researchgate.net/publication/278381211_Urban_noise_maps_in_a_GIS).
- [16] Meng Q, Kang J. The influence of crowd density on the sound environment of commercial pedestrian streets. *Sci Total Environ*. 2015 avril;511:249–58.

<sup>1</sup> <https://github.com/pierromond/NoiseModelling/wiki>.

- [17] Speech Levels in Various Noise Environments [Internet]. [cited 2017 Aug 8]. Available from: <http://www.auditory.org/mhonarc/2008/msg00529.html>
- [18] Lazarus H. Prediction of Verbal Communication in Noise— A review: Part 1. *Appl Acoust.* 1986 Jan 1;19(6):439–64.
- [19] Hao Y, Kang J, Krijnders JD. Integrated effects of urban morphology on birdsong loudness and visibility of green areas. *Landsc Urban Plan.* 2015 May;137:149–62.
- [20] Pellissier V, Cohen M, Boulay A, Clergeau P. Birds are also sensitive to landscape composition and configuration within the city centre. *Landsc Urban Plan.* 2012 février;104(2):181–8.
- [21] Calder WA. The Scaling of Sound Output and Territory Size: Are They Matched? *Ecology.* 1990;71(5):1810–6.
- [22] Wallschläger D. Correlation of song frequency and body weight in passerine birds. *Experientia.* 1980 Apr 1;36(4):412–412.