

RESUMÉ et MOTS CLÉS

Pour la diffusion sur le *web*

TITRE EN FRANÇAIS : MODELISATION MULTI-SOURCE DES ENVIRONNEMENTS SONORES URBAINS

Résumé en français :

Le nombre de personnes vivant dans les villes ne cesse d'augmenter et l'on estime que d'ici 2050, près de 66 % des 9,5 milliards d'habitants de la planète seront des citoyens. Avec l'urbanisation rapide, de nouveaux défis environnementaux en matière de développement durable et de santé publique sont devenus essentiels. De nombreux travaux de recherche ont mis en lumière les effets négatifs d'une exposition prolongée au bruit sur la santé humaine : augmentation du risque de maladies cardiovasculaires, santé mentale et troubles du sommeil. Selon le rapport de l'Agence européenne pour l'environnement de 2017, au moins 18 millions de personnes sont fortement gênées et 5 millions sont fortement perturbées dans leur sommeil en raison d'une exposition prolongée au bruit dans l'Union européenne. Des actions politiques telles que la directive européenne de 2002 ont été mises en place pour évaluer l'impact du bruit par les États et les acteurs territoriaux. À cette fin, des cartes de bruit ont été mises en place pour évaluer l'exposition au bruit sur un territoire, mais elles se limitent à de simples indicateurs de l'environnement acoustique : le niveau sonore moyen lorsqu'il dépasse un certain seuil, calculé uniquement pour quelques sources considérées comme gênantes ou nuisibles (trafic routier, ferroviaire, aérien et industriel). Ces approches négligent souvent la dynamique et la complexité intrinsèques des environnements sonores urbains, négligeant ainsi leur dynamique temporelle et la multiplicité des sources qui intègrent la composition urbaine.

En effet, les environnements sonores urbains abritent une grande diversité de sources sonores, chacune contribuant à sa manière à l'expérience sonore d'un lieu. Ils se caractérisent par leur complexité, leur variabilité et leur nature dynamique, façonnés par des facteurs tels que l'aménagement urbain, les modes d'occupation des sols, les infrastructures et le comportement humain. Alors que les méthodes traditionnelles de mesure du bruit se concentraient exclusivement sur ces derniers, une nouvelle approche pluridisciplinaire a vu le jour : le paysage sonore. Inventé par R. M. Schafer dans les années 1970, le concept de paysage sonore s'écarte de la vision négative et réactive des réglementations en matière de contrôle du bruit et offre une perspective de l'identité acoustique d'un lieu, naturellement liée à la perception humaine. S'appuyant souvent sur des évaluations perceptives, des données acoustiques et des modèles statistiques, l'approche du paysage sonore est utilisée pour estimer la dimensionnalité des attributs du paysage sonore et la perception subjective qui y est liée, fournissant ainsi de riches informations sur la qualité sonore des espaces urbains et sur la manière dont les êtres humains s'y rapportent. Néanmoins, en raison de la nature complexe de ces environnements, la prise en compte physique de la multiplicité des sources et de leur dynamique constitue actuellement un goulot d'étranglement scientifique dans la modélisation de ces environnements. Ainsi, toute représentation pertinente de ces systèmes complexes devrait englober tous les sons audibles, tels que les voix humaines, les chants d'oiseaux, les fontaines d'eau ou la musique et sa dynamique, en plus des sources « négatives » traditionnelles (par exemple, le trafic routier). Dans ce contexte, la modélisation multi-sources apparaît comme un cadre prometteur pour caractériser les environnements sonores urbains. Cette approche permet l'intégration simultanée de diverses sources sonores et leur représentation à l'aide de techniques cartographiques.

Le but ultime du travail présenté dans cette thèse est de développer et d'explorer un cadre de modélisation numérique pour les environnements sonores urbains basé sur un principe de multi-sources qui transmet avec précision la dynamique des compositions urbaines. Plus précisément, cette recherche vise à : (1) développer une méthodologie pour représenter le comportement des sources sonores dans l'espace urbain ; (2) adopter un protocole open-source, généralisé et évolutif qui favorise la représentation spatiale et temporelle des sources urbaines ; et (3) proposer un cadre de modélisation qui favorise l'intégration des données perceptives pour l'exploration des liens entre les mesures acoustiques, les niveaux sonores simulés, et la perception. Pour parvenir à une modélisation fine des environnements sonores urbains, ce travail propose un protocole qui consiste à segmenter le comportement de chaque source étudiée en un modèle d'activité et d'émission suivi d'un calcul des niveaux sonores de chaque source sur une grille de récepteurs. En incorporant un module d'activation dynamique des sources, ce cadre de modélisation permet la production de séries temporelles pour chaque source, qui peuvent être utilisées pour explorer les questions liées à la perception. En représentant la concurrence entre les différentes sources sonores dans l'espace urbain, nous pouvons explorer comment ces interactions subtiles façonnent la perception des lieux, et finalement prédire comment les différentes compositions urbaines seront vécues par les citoyens. Ce cadre vise à répondre aux limites susmentionnées dans les études sur les paysages sonores et à fournir une compréhension plus nuancée des paysages sonores urbains en intégrant les sirènes d'alerte précoce, les voix humaines et le trafic routier.

Ce travail présente une application de modélisation des sirènes d'alerte utilisant la méthodologie proposée. Un protocole expérimental a été déployé autour d'une sirène installée dans une ville en France, afin d'évaluer son audibilité de manière

perceptive et par modélisation. Des mesures de niveau sonore lors de l'activation de la source ont été réalisées avec l'application smartphone NoiseCapture à différentes distances et sur plusieurs axes par un groupe de 25 participants. Il leur a également été demandé de remplir un questionnaire sur les informations perceptives de la sirène telles que son audibilité, le niveau sonore perçu ou le masquage de la sirène par le passage des véhicules. Une comparaison entre les niveaux acoustiques mesurés à l'aide de NoiseCapture et les niveaux sonores simulés à l'aide de NoiseModelling a été effectuée. Les résultats de cette étude ont permis de valider l'utilisation du modèle Common Noise Assessment Methods in Europe pour évaluer l'audibilité d'un système d'alerte situé en milieu urbain dans un rayon de 2,8 km autour de la sirène. Enfin, une métrique reliant l'audibilité au niveau sonore modélisé est proposée, permettant le développement de cartes d'audibilité des sirènes dans la zone d'étude.

De même, un protocole d'exploration pour la modélisation de la voix des piétons dans la ville de Nantes, en France, est présenté dans ce travail. Ce protocole impliquait la collecte de mesures de niveau sonore au cours de deux campagnes de mesure distinctes à l'aide de l'application pour smartphone NoiseCapture, associée à des enquêtes capturant des informations perceptives telles que le cercle d'affect circumplex, la présence perçue de sources sonores, l'émergence de sources sonores et la variabilité de l'environnement sonore. En outre, des simulations dynamiques de la voix des piétons et du trafic routier ont été réalisées à l'aide de NoiseModelling. En mettant en œuvre le cadre de modélisation proposé dans ce travail, nous produisons une cartographie de la voix des piétons dans la région. De plus, nous obtenons un ensemble de niveaux sonores sous forme de séries temporelles, ce qui nous permet d'étudier l'émergence de la voix des piétons par rapport aux niveaux du trafic routier. Cette recherche espère fournir un outil numérique qui peut être intégré de manière transparente dans les pratiques actuelles en matière de paysage sonore en vue de la production d'indicateurs modélisés du paysage sonore. Enfin, ce modèle peut non seulement contribuer à la création d'environnements sonores de meilleure qualité, mais aussi promouvoir des politiques sonores mieux informées qui prennent en compte les aspects négatifs et positifs des sources présentes dans les environnements sonores urbains.

MOTS-CLÉS en français (8 maximum) :

- | | | | |
|---|---------------------------|---|------------------|
| 1 | Modélisation multi-source | 5 | Bruit de trafic |
| 2 | Modélisation dynamique | 6 | Sirènes d'alerte |
| 3 | Paysage sonore | 7 | NoiseModelling |
| 4 | Voix de piétons | 8 | |

TITRE EN ANGLAIS : MULTI-SOURCE MODELLING OF URBAN SOUND ENVIRONMENTS

Résumé en anglais :

The number of people living in cities is constantly increasing, and it is estimated that by 2050, almost 66% of the world's 9.5 billion inhabitants will be urban dwellers. With rapid urbanization, new environmental challenges of sustainable development and public health have become central. Evidence from numerous research endeavors have shed light on the negative impacts of prolonged exposure to noise on human health: increase in the risk of cardiovascular diseases, mental health, and sleep disturbance. According to the European Environment Agency report in 2017, at least 18 million people are highly annoyed and 5 million are highly sleep disturbed because of long-term exposition to noise in the European Union. Political actions such as the 2002 European Directive have been introduced to assess the impact of noise by states and territorial players. To this end, noise maps have been enforced in the evaluation of the exposure to noise in a territory, however, they are limited to simple indicators of the acoustic environment: the average sound level when it exceeds a certain threshold, calculated only for a few sources considered as annoying or harmful (road, rail, air traffic, and industrial). These approaches often oversee the intrinsic dynamics and complexity of urban sound environments, thus neglecting their temporal dynamics and the multiplicity of sources that integrate the urban composition.

Indeed, urban sound environments host a great diversity of sound sources, each contributing in its own way to the sonic experience of a place. They are characterized by their complexity, variability, and dynamic nature, shaped by factors such as urban design, land use patterns, infrastructure, and human behavior. As traditional noise methods focused exclusively on the latter, a new, multi-disciplinary approach emerged: the soundscape. Coined by R. M. Schafer in the 1970s, the soundscape concept diverges from the negative and reactive vision of noise control regulations and offers a perspective of the acoustical identity of a place, naturally intertwined with human perception. Often relying on perceptual assessments, acoustical data, and statistical models, the soundscape approach is used for estimating the dimensionality of soundscape attributes and the subjective perception related to them, thus providing rich insights about the sonic quality of urban spaces and how humans relate to it. Nevertheless, due to the complex nature of these environments, a current scientific bottleneck in the modeling of such environments is the physical consideration of the multiplicity of sources and their dynamics. Thus, any pertinent representation of such complex systems should encompass all audible sounds, such as human voices, birdsong, water fountains, or music and its dynamics; in addition to traditional “negative” sources (e.g. road traffic). In this context, multi-source modelling emerges as a promising framework to characterize urban sound environments. This approach allows for the simultaneous integration of diverse sound sources and their representation through the use of cartographic techniques.

The ultimate goal of the work presented in this thesis is to develop and explore a numerical modelling framework for urban sound environments based on a multi-source principle that accurately conveys the dynamics of urban compositions. Specifically, this research aims to: (1) develop a methodology to represent the behavior of sound sources in the urban space; (2) adopt an open-source, generalized and scalable protocol that favors the spatial and temporal representation of urban source sources; and (3) propose a modelling framework that favors the integration of perceptual data for the exploration of links between acoustic measurements, simulated sound levels, and perception. To achieve a fine modelling of urban sound environments, this work proposes a protocol that consists in the segmentation of the behavior of each source under study into an activity and emission model followed by a calculation of sound levels from each source over a grid of receivers. By incorporating a dynamic source activation module, this modelling framework enables the production of time series for each source, which are be used to explore questions related to perception. By representing the competition between different sound sources in the urban space, we can explore how these subtle interactions shape the perception of places, and eventually predict how different urban compositions are going to be experienced by city dwellers. This framework seeks to address aforementioned limitations in soundscape studies and provide a more nuanced understanding of urban soundscapes by integrating early warning sirens, human voices, and road traffic.

This work presents an application for modelling early warning sirens using the proposed methodology. An experimental protocol was deployed around a siren installed in a town in France, to assess its audibility perceptually and through modelling. Sound level measurements during source activation were made with the NoiseCapture smartphone application at different distances and on several axes by a group of 25 participants. They were also asked to fill in a questionnaire on perceptual information about the siren such as its audibility, the perceived sound level, or the masking of the siren by passing vehicles. A comparison between acoustic measurement levels using NoiseCapture and simulated sound levels using NoiseModelling was performed. The results of this study validated the use of the Common Noise Assessment Methods in Europe model to evaluate the audibility of a warning system located in an urban environment within a radius

of 2.8 km around the siren. Finally, a metric linking audibility to modeled sound level is proposed, enabling the development of siren audibility maps in the study area.

Similarly, an exploration protocol for modelling pedestrian voice in the city of Nantes, France is introduced in this work. This protocol involved the collection of sound level measurements during two distinct measurement campaigns using the NoiseCapture smartphone application, coupled with surveys capturing perceptual information such as the circumplex circle of affect, perceived presence of sound sources, emergence of sound sources, and variability of the sound environment. Additionally, dynamic simulations for pedestrian voice and road traffic were conducted using NoiseModelling. By implementing the modelling framework proposed in this work, we produce a pedestrian voice cartography in the area. Moreover, we obtain a set of sound levels in a time series fashion, which allows us to study the emergence of pedestrian voice with respect to road traffic levels. This research hopes to provide a numerical tool that can be integrated seamlessly in current soundscape practices towards the production of modelled soundscape indicators. Finally, this model can not only inform the creation of better-quality sound environments but also promote better informed sound policies that consider both the negative and positive aspect of sources found in urban sound environments.

MOTS-CLÉS en anglais (8 maximum) :

- | | | | |
|---|------------------------|---|----------------------|
| 1 | Multi-source modelling | 5 | Road traffic noise |
| 2 | Dynamic modelling | 6 | Early warning sirens |
| 3 | Soundscape | 7 | NoiseModelling |
| 4 | Pedestrian voice | 8 | |

NOM et Prénom du doctorant SILIEZAR MONTOYA Jonathan

Visa du Directeur de thèse

