



**HAL**  
open science

## **Imagerie acoustique en milieu urbain : de la mesure à la perception du paysage sonore**

Raphaël Leiba, François Ollivier, Régis Marchiano, N Misdariis, Jacques Marchal

### ► **To cite this version:**

Raphaël Leiba, François Ollivier, Régis Marchiano, N Misdariis, Jacques Marchal. Imagerie acoustique en milieu urbain : de la mesure à la perception du paysage sonore. Congrès Français d'Acoustique, Apr 2016, Le Mans, France. <hal-01449416>

**HAL Id: hal-01449416**

**<https://hal.science/hal-01449416v1>**

Submitted on 30 Jan 2017

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

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



HAL Authorization

**CFA2016/195**

## **Imagerie acoustique en milieu urbain : de la mesure à la perception du paysage sonore**

R. Leiba<sup>a</sup>, F. Ollivier<sup>a</sup>, R. Marchiano<sup>a</sup>, N. Misdariis<sup>b</sup> et J. Marchal<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institut Jean le Rond d'Alembert - UPMC, 2 Place de la gare de ceinture, 78210 Saint Cyr L'Ecole, France

<sup>b</sup>STMS Ircam-CNRS-UPMC, 1 Place Igor-Stravinsky, 75004 Paris, France

raphael.leiba@upmc.fr

Pour la caractérisation de l'environnement sonore urbain une approche possible consiste à évaluer des indicateurs énergétiques comme le niveau acoustique moyen ou d'autres plus sophistiqués tels l'indice  $L_{den}$  construit par pondération des périodes de la journée : jour(d)/soirée(e)/nuit(n). Le  $L_{den}$  est notamment utilisé pour constituer les cartes de bruit introduites par la directive européenne 2002/49/EC. Ces cartes sont un moyen particulièrement efficace pour informer les riverains et surveiller leur exposition au bruit. Cependant, elles reposent sur des modèles numériques simplifiés, se limitent à l'analyse des différents types de transport (ferroviaire, routier, etc.), et ne prennent pas en compte le ressenti global des personnes. La notion de paysage sonore ("*soundscape*" en anglais) introduite par Robert Murray Schafer et étudiée plus récemment dans le cadre du projet européen "*Soundscapes of European Cities and Landscapes*" cherche à apporter une description globale de l'environnement sonore. Il prend en compte la nature des sources de bruit, le contexte de l'écoute, ou encore l'accoutumance à l'environnement sonore étudié.

Dans une démarche complémentaire, notre travail cherche à quantifier localement le paysage sonore urbain en utilisant des cartes de niveau acoustique produites à l'aide d'antennes de microphones à très grand nombre d'éléments (entre 128 et 256). Cette méthode doit permettre de détecter, et localiser les nombreuses sources potentiellement présentes dans la zone d'analyse mais aussi d'évaluer leur niveau et leur spectre, instantanés et moyennés. Analyser l'évolution temporelle des sources doit permettre de mieux comprendre l'environnement sonore et de construire des modèles plus complets.

Ce travail présentera en détail le dispositif expérimental qui met en œuvre des microphones et un système numériques. On présentera aussi les premiers résultats issus de l'analyse de mesures au passage de véhicules et de scènes urbaines. Enfin on discutera des moyens et méthodes pour exploiter ces outils en vue du développement de modèles perceptifs.

Pour la caractérisation de l'environnement sonore urbain une approche possible consiste à évaluer des indicateurs énergétiques comme le niveau acoustique moyen ou d'autres plus sophistiqués tels l'indice  $L_{den}$  construit par pondération des périodes de la journée : jour(d)/soirée(e)/nuit(n). Le  $L_{den}$  est notamment utilisé pour constituer les cartes de bruit introduites par la directive européenne 2002/49/EC. Ces cartes sont un moyen particulièrement efficace pour informer les riverains et surveiller leur exposition au bruit. Cependant, elles reposent sur des modèles numériques simplifiés, se limitent à l'analyse des différents types de transport (ferroviaire, routier, etc.), et ne prennent pas en compte le ressenti global des personnes. La notion de paysage sonore ("*soundscape*" en anglais) introduite par Robert Murray Schafer et étudiée plus récemment dans le cadre du projet européen "*Soundscapes of European Cities and Landscapes*" cherche à apporter une description globale de l'environnement sonore. Il prend en compte la nature des sources de bruit, le contexte de l'écoute, ou encore l'accoutumance à l'environnement sonore étudié.

Dans une démarche complémentaire, notre travail cherche à quantifier localement le paysage sonore urbain en utilisant des cartes de niveau acoustique produites à l'aide d'antennes de microphones à très grand nombre d'éléments (entre 128 et 256). Cette méthode doit permettre de détecter, et localiser les nombreuses sources potentiellement présentes dans la zone d'analyse mais aussi d'évaluer leur niveau et leur spectre, instantanés et moyennés. Analyser l'évolution temporelle des sources doit permettre de mieux comprendre l'environnement sonore et de construire des modèles plus complets.

Ce travail présentera en détail le dispositif expérimental qui met en œuvre des microphones et un système numériques. On présentera aussi les premiers résultats issus de l'analyse de mesures au passage de véhicules et de scènes urbaines. Enfin on discutera des moyens et méthodes pour exploiter ces outils en vue du développement de modèles perceptifs.

## 1 Introduction

La directive européenne 2002/49/CE [1] rend obligatoire la mise en place de cartes stratégiques de bruit et des plans de prévention du bruit dans l'environnement (PPBE). Ainsi, les collectivités locales doivent s'investir dans l'amélioration de l'ambiance sonore dans la ville. Au-delà de ce regard réglementaire, le développement des écoquartiers avec une prise en compte importante du confort acoustique montre l'intérêt grandissant de l'amélioration de la qualité de l'environnement sonore urbain par les citoyens eux-mêmes.

Ces cartes de bruit apportent des informations concrètes mais présentent plusieurs limites. D'une part elles séparent les différents type de bruit (routier, ferroviaire, industriel ou aérien) au lieu de fournir une information globale. D'autre part la quantification en décibels est mal comprise du grand public.

Le projet Harmonica [2] propose un outil de diagnostic de l'environnement sonore basé sur l'étude de l'évolution du niveau instantané pondéré A. L'indice Harmonica est la somme d'un sous-indice relatif au niveau de bruit de fond et d'un second relatif au caractère événementiel des sources. L'indice total est compris entre 0 et 10. Cet indice est en bon accord avec le ressenti des riverains. L'indice Harmonica montre que le niveau de bruit seul ne suffit pas à évaluer la gêne perçue par le riverain. R. M. Schafer écrit que [3] "*Seule une appréciation d'ensemble de l'environnement acoustique peut nous donner les moyens d'améliorer l'orchestration sonore du monde*" proposant ainsi de cerner d'abord les bruits gênants et les bruits à favoriser dans le paysage sonore (*soundscape* en anglais) avant d'envisager de diminuer l'intensité sonore. Il ajoute que "*la meilleure législation contre le bruit à notre époque est celle qui réunira à la fois des dispositions quantitatives et qualitatives*".

Hiramatsu [4] confirme l'intérêt de cette approche *soundscape* par rapport aux cartes de bruit en niveau  $L_{den}$  en insistant sur le fait que l'identification des sources de bruit et des événements sonores donne une information plus complète.

Dans ces approches, la source est l'objet central. Être capable de discerner les sources individuelles dans une scène sonore complexe nous semble être primordial.

Notre travail s'inscrit dans le cadre de l'enjeu majeur qui vise à développer de nouveaux outils de qualification et quantification de l'environnement sonore à destination du grand public et des élus. Notre approche consiste à réaliser l'identification et la quantification des sources de bruits dans la ville à partir de techniques d'imagerie acoustique. La gêne sonore induite par ces sources est ensuite étudiée à travers des modèles de gêne existants. La question de la sommation des gênes spécifiques à chaque source se pose afin d'obtenir la gêne globale de la scène sonore étudiée.

Nous présenterons dans un premier temps l'état actuel de la prise en compte de la gêne sonore dans les politiques publiques et quelques modèles décrits dans la littérature. Nous décrirons ensuite une méthode d'utilisation d'antenne acoustique pour le diagnostic local du paysage sonore. Enfin nous proposerons d'intégrer des données issues de l'imagerie acoustique à un modèle de gêne sonore.

## 2 Perception de l'environnement sonore urbain

Depuis près d'un siècle le décibel est employé pour quantifier les événements sonores avec une métrique qui se rapproche du niveau sonore ressenti. Cette échelle est associée à la loi psychophysique de Weber-Fechner qui décrit la sensation à un phénomène sensoriel comme le logarithme de l'excitation. L'introduction des pondérations fréquentielles répond au besoin de rapprocher la mesure du niveau perçu en prenant en compte le filtrage fréquentiel de l'oreille. Le niveau  $L_{den}$ , introduit par la directive européenne 2002/49/CE [1] prend en compte la gêne accrue à différentes périodes de la journée pour un même niveau sonore. Il est obtenu à partir des niveaux le jour ( $L_d$ , de 6h à 18h), en soirée ( $L_e$ , de 18h à 22h) et de nuit ( $L_n$ , de 22h à 6h) calculés

avec la pondération A et majorés de +5 dB pour  $L_e$  et +10 dB pour  $L_n$ , comme l'indique la définition suivante :

$$L_{den} = 10 \log \left[ \frac{12}{24} \cdot 10^{L_d/10} + \frac{4}{24} \cdot 10^{(L_e+5)/10} + \frac{8}{24} \cdot 10^{(L_n+10)/10} \right] \quad (\text{dBA}) \quad (1)$$

Les cartes stratégiques du bruit sont exprimées en  $L_{den}$  [1]. Elles se révèlent être un outil de communication simple et efficace mais ont pour principale limitation d'être réalisées par type de sources de bruit. De plus, dans ces réglementations, le bruit est uniquement considéré comme une nuisance excluant d'éventuels caractères perceptifs positifs.

## 2.1 Concept de *paysage sonore*

Le concept de paysage sonore, introduit par Raymond Murray SCHAFER [3], repose sur l'idée que les sons qui nous entourent ne doivent pas être considérés uniquement négativement, qu'ils peuvent être harmonieux mais que cette harmonie serait perdue dans les grandes villes. Ce concept cherche à prendre en compte la nature des sources de bruit, le contexte de l'écoute, ou encore l'accoutumance à l'environnement sonore.

Les efforts de description du paysage sonore initiés dans le cadre du *World Soundscape Project* piloté par R.M. Schafer proposent un outil beaucoup plus complet qu'une carte de bruit. En effet, la notion de source y est primordiale et chacune d'entre elles y est définie et quantifiée par un niveau subjectif ou une verbalisation. Dans ce cadre, un exemple de cartographie du paysage sonore est celui réalisé par HONG et JEON [5] qui proposent des cartes d'évaluation subjective (allant de "n'entend pas" à "domine complètement" traduit sur une échelle de 0 à 5) de quatre types de sources différentes : bruits routiers, bruits industriels, bruits dus aux activités humaines et bruits naturels.

Le concept de paysage sonore se base sur la différenciation des sources de bruit à conserver (comme les sons d'origine naturelle) et à réduire (celles qui nous gênent). C'est pourquoi il est intéressant de proposer un outils de description des sources de bruit et de quantifier la gêne induite par celles-ci. Notre objectif final est de réaliser des cartes de gêne sonore et de fournir ainsi un outil d'information vers le grand public.

## 2.2 Modèles de gêne sonore

Partie intégrante de concept de *soundscape*, la caractérisation des sources dans l'environnement sonore en termes de gêne est un prérequis à toute étude.

La gêne est définie par Guski *et al.* [6] comme la relation entre une situation acoustique et une personne perturbée dans une action en cours. Par exemple, on s'accommode d'un bruit constant d'un grand axe routier sous ses fenêtres alors qu'on serait gêné par le son d'un klaxon émergeant de manière soudaine pendant une lecture.

Les modèles de gêne sonore cherchent à relier le ressenti avec des grandeurs physiques mesurables pour chaque source (gêne spécifique) ainsi que pour la scène sonore entière par une sommation des gênes spécifiques (gêne totale). Pour ce

dernier point, la littérature ne converge pas vers un modèle faisant consensus.

L'un des modèles les plus intéressants décrit dans la littérature est celui proposé par MOREL *et al.* [7]. Lors de travaux précédents [8, 9] ces auteurs ont montré que la diversité du trafic routier pouvait se classer en sept catégories perceptives. L'une de ces catégories, par exemple, regroupe les bus, les véhicules légers et lourds passant à vitesse constante. Le travail de MOREL *et al.* consiste à attribuer un modèle de gêne sonore aux différentes catégories perceptives de véhicules. Ce modèle, dont le principe est résumé dans la figure 1, propose de calculer une gêne spécifique de chaque catégorie perceptive comme la combinaison linéaire de paramètres physiques ou psychoacoustiques, tels que la sonie ou la force de fluctuation. Les coefficients de ces combinaisons linéaires sont obtenus par régression linéaire des gênes expérimentales mesurées. Pour la catégorie perceptive décrite précédemment, les auteurs mesurent une influence significative du facteur "niveau de bruit" qui est mieux décrit par la sonie (notée  $N$ ) calculée avec le modèle de Zwicker [10] que par le  $L_{Aeq}$ . Ils montrent ainsi que la gêne spécifique de cette catégorie de véhicule est donnée par :

$$A = 1,32 N - 0,32 \Delta N^- - 0,36 \quad , \quad (2)$$

où  $\Delta N^-$  est le taux de décroissance de la sonie au cours du temps.

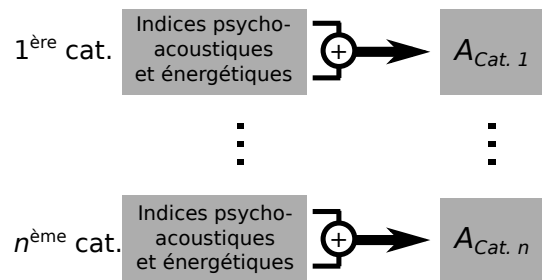


FIGURE 1 – Schéma de principe du modèle de Morel *et al.* [7]

Ces modèles linéaires de la gêne nécessitent la connaissance des caractéristiques physiques des sources de bruit. L'imagerie acoustique utilise des antennes de microphones pour faire des cartes de la pression acoustique. Il est donc possible d'en tirer des informations spectrales, temporelles et spatiales sur les sources de bruit. L'imagerie acoustique peut donc, pour une scène sonore donnée, automatiser la description locale du paysage sonore.

## 3 Matériel et méthode de l'imagerie acoustique

La plupart des systèmes d'imagerie acoustique actuels se basent sur l'utilisation de microphones analogiques nécessitant pour chaque voie une chaîne de conditionnement encombrante et rendant assez compliquée la mise en place d'expérience à grand nombre de microphones en extérieur. Le système acoustique Mégamicros est basé sur l'utilisation de microphones numériques MEMS (*Micro Electronic and Mechanical System*). Les antennes qu'il peut piloter à l'heure actuelle sont composées de 256 microphones au maximum mais le projet ambitionne à court terme l'acquisition simultanée de 1024 microphones déployés sur plusieurs dizaines de mètres.

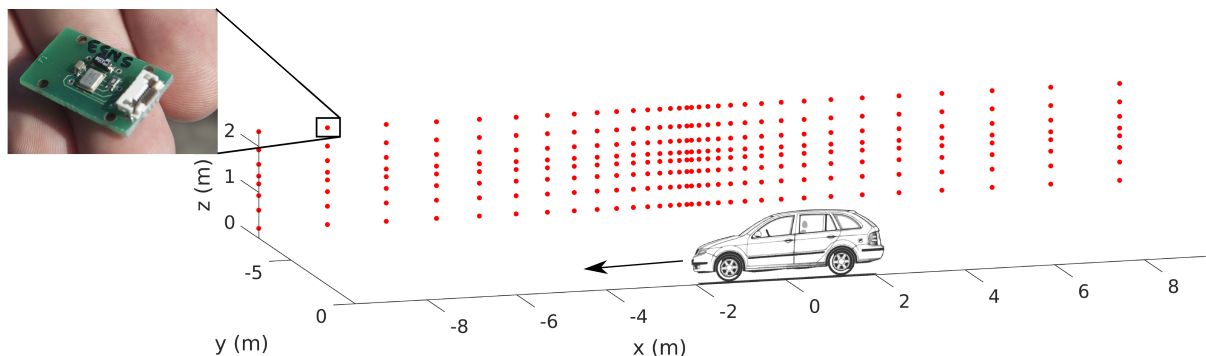


FIGURE 2 – Dispositif expérimental pour la mesure de bruit de passage de véhicules - Antenne de 256 microphones (points rouges) et photo d'un microphone MEMS.

### 3.1 Le système acoustique

Les microphones MEMS utilisés (ADMP441) intègrent un convertisseur analogique/numérique éliminant la chaîne de conditionnement et réduisant considérablement l'encombrement. Les microphones sont omnidirectionnels et disposent d'une réponse en fréquence constante entre 60 et 15 000 Hz. Les détails du système sont présentés par VANWYNSBERGHE *et al.* [11].

En plus des 256 microphone MEMS, le système Mégamicros gère 4 voies analogiques et des voies logiques permettant la synchronisation de l'acquisition. La faible consommation électrique du système permet son alimentation par batteries ce qui lui confère une grande autonomie. L'utilisation de câbles RJ45 de grande longueur (10 mètres) permet le déploiement de géométries très diverses. Ainsi, de l'antenne circulaire présentée par VANWYNSBERGHE *et al.* [11] à une antenne de 19,6 m de long et 2,25 m de haut composée de 256 microphones et présentée sur la figure 2, en passant par une antenne de 22 mètres de long avec 128 microphones espacés de 17 cm linéairement (visible sur la figure 6 et 7), le système Mégamicros a prouvé sa grande modularité. Les antennes sont conçues et leur géométrie est optimisée numériquement en fonction des besoins et contraintes de l'expérience dans le but de mettre en œuvre la technique classique de formation de voies (*beamforming*) [12] pour l'imagerie.

### 3.2 Méthodes d'imagerie

Notre étude poursuit deux objectifs complémentaires exploitant tout deux la formation de voies avec des antennes adaptées. Premièrement, à l'échelle du véhicule, il s'agit de localiser les sources de bruit et de les identifier en termes de variations temporelles, de spectre et de directivité, dans des scénarios représentatifs de l'évolution en ville. Il sera alors possible de constituer des catégories de gêne spécifique. Deuxièmement, à l'échelle de la rue, on cherche à quantifier la gêne globale induite par le trafic combinant de nombreuses sources.

#### 3.2.1 A l'échelle du véhicule

La figure 2 présente le dispositif expérimental des mesures réalisées sur le site de La Ferté-Vidame de PSA Peugeot-Citroën en janvier 2016. Ces essais ont été réalisés en se basant sur les recommandations de la norme ISO 362 relative à l'évaluation du bruit au passage de véhicule.

L'antenne était placée à 7,5 m de la trajectoire du véhicule. En revanche les tests réalisés ont été adaptés pour tenir compte de la spécificité du trafic urbain.

L'objectif de ces mesures était de constituer une base de données de sources acoustiques représentatives des conditions de conduite dans la ville. Ces sources pourront ensuite être identifiées à l'échelle de la rue.

Pour l'ensemble des véhicules participant à l'expérience (cf tableau 1) les scénarios suivants ont été enregistrés :

- 25 km/h à vitesse constante en second rapport (aller/retour, moteur allumé ou éteint) ;
- 50 km/h à vitesse constante en troisième rapport (aller/retour, moteur allumé ou éteint) ;
- situation feu rouge : décélération de 30 à 0 km/h, ralenti moteur devant le centre de l'antenne puis accélération de 0 à 30 km/h avec passage de rapport (aller/retour) ;
- Accélération plein gaz sur les 20 m devant l'antenne (aller/retour)

Les essais ont été réalisés avec des véhicules de différentes cylindrées, énergie et gamme. Le détail est présenté dans le tableau 1.

Nom du véhicule	Énergie	Cylindrée	Gamme
Citroën C4	diesel	4 cyl.	berline
Citroën DS3	essence	3 cyl.	citadine
Peugeot Ion	électrique		citadine
Citroën Picasso	diesel	4 cyl.	monospace
Renault Laguna	diesel	4 cyl.	berline
Yveco Daily	diesel	4 cyl.	utilitaire
Peugeot E-Vivacity	électrique		scooter
Peugeot Speedfight	essence	50 cm <sup>3</sup> , 2 temps	scooter
Peugeot Metropolis	essence	400 cm <sup>3</sup> , 4 temps	scooter

TABLEAU 1 – Caractéristiques des véhicules utilisés lors des essais sur piste.

Pour établir la faisabilité de la localisation de sources en mouvement, une expérience préliminaire a été menée.

Un haut-parleur émettant un signal harmonique à 2 kHz a été placée au niveau de la vitre du passager avant dans une voiture roulant à 20 km/h. La figure 3 montre le résultat d'imagerie pour cette mesure. Le niveau acoustique est intégré sur la bande de fréquences comprise entre 1970 et 2030 Hz pour s'affranchir de l'effet Doppler. Les images sont calculées sur une durée de 100 ms de sorte à restreindre l'étendue spatiale des lobes. Cette durée induit tout de même une avancée du véhicule de 50 cm pendant la période, dégradant donc la résolution. La dynamique de 3 dB permet d'évaluer la résolution de l'antenne à 2 kHz. Le résultat en termes de résolution et de localisation permet de valider l'utilisation du dispositif pour l'imagerie.

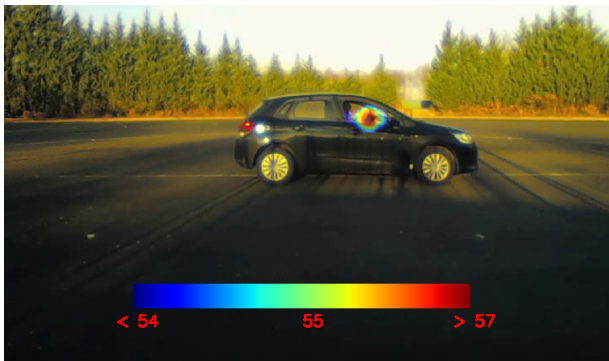


FIGURE 3 – Localisation d'une source contrôlée à 2 kHz - Intégration sur 3% de bande - Dynamique 3 dB.

BRAUN *et al.* [13] ont cherché à caractériser les spectres des sources de bruit issus des véhicules légers thermiques. Les résultats présentés montrent qu'une image acoustique intégrée sur la bande d'octave de 500 Hz permet d'évaluer la contribution des sources de bruit principales (moteur et pneumatique).

La figure 4 montre le résultat de la formation de voie sur la bande d'octave de 500 Hz pour un véhicule léger thermique, une Citroën C4 diesel roulant à vitesse constante à 25 km/h. On peut y voir la contribution majoritaire du contact pneu/chaussée (mesurée à 63 dB) et du moteur (mesurée à 68 dB). On retrouve ici les sources classiques rapportées par la littérature [13] pour ce régime et cette vitesse avec la prédominance du bruit moteur.

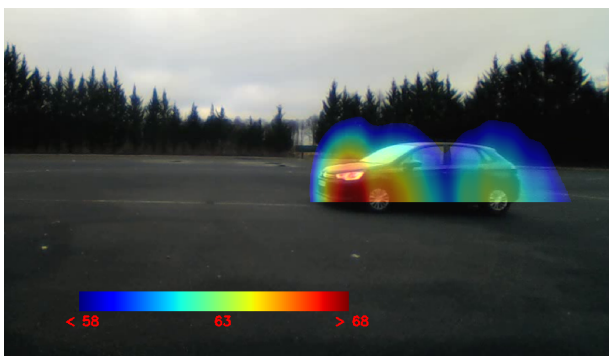


FIGURE 4 – Image sur la bande d'octave de 500 Hz - Citroën C4 - 25 km/h - Vitesse stabilisée - Dynamique : 10 dB.

La figure 5 présente le résultat pour une vitesse identique, moteur coupé à l'entrée de la zone de mesure. On retrouve uniquement les deux sources de bruit de roulement avec un

niveau à 63 dB.

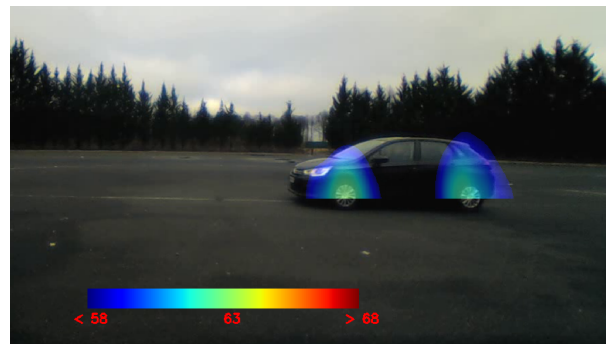


FIGURE 5 – Image sur la bande d'octave de 500 Hz - Citroën C4 - 25 km/h - Vitesse stabilisée - Moteur coupé - Dynamique : 10 dB.

Ces résultats fournissent les premiers éléments de la base de données de sources à partir de laquelle nous formerons les catégories perceptives destinées à alimenter les modèles de gêne décrits plus haut. Ces catégories pourront être constituées en analysant le trafic à l'échelle de la rue.

### 3.2.2 A l'échelle de la rue

L'expérience suivante a été réalisée à l'aide d'une antenne linéaire de 22 m de long comportant 128 MEMS espacés de 17 cm. L'antenne est disposée à 9 m de hauteur avec une vue plongeante sur un axe urbain à 4 voies (voir figure 6 et 7) et à proximité d'un feu tricolore. Sur cet axe, le trafic alterne entre vitesses stabilisées, arrêts, démarrages et accélérations. Grâce à ce dispositif, on est en mesure de produire des images avec une bonne résolution longitudinale. En revanche, dans la direction transversale, les sources sont moins bien discriminées. Les images présentées ici sont intégrées sur une fenêtre de 125 ms (temps d'intégration des sonomètres) et sur la bande d'octave de 1000 Hz.

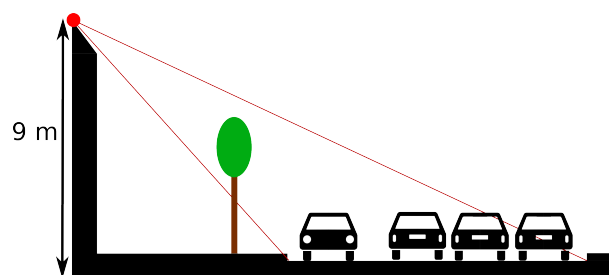


FIGURE 6 – Installation du dispositifs de mesure utilisés en ville - Antenne de 128 microphones en rouge.

La figure 8 présente l'image obtenue lors du démarrage d'un camion. Le moteur et l'échappement sont les sources principales du rayonnement. On peut constater le masquage de la voiture passant dans le même faisceau, derrière le camion. Il faut noter que ce masquage existe aussi à l'écoute.

La figure 9 montre l'image obtenue au passage d'un petit utilitaire à vitesse stabilisée. On retrouve les résultats obtenus lors des mesures avec véhicules isolés : les sources principales sont les contacts pneu/chaussée.

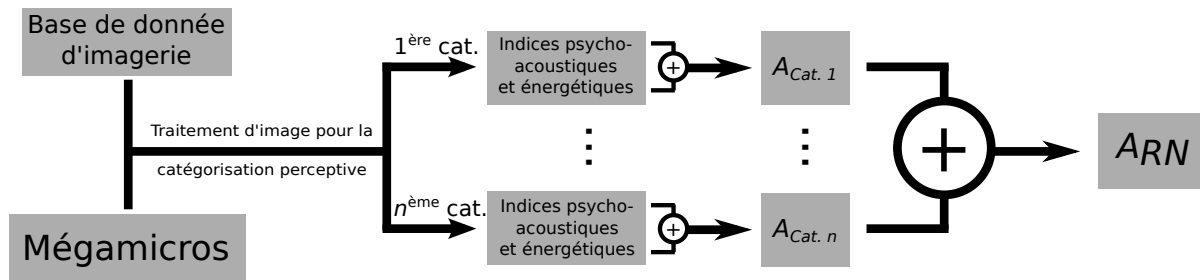


FIGURE 10 – Schéma de principe de l’adaptation du modèle de Morel *et al.* [7] avec les données issu du système Mégamicros. Avec  $A_{RN}$  la gêne associée au bruit de trafic routier et  $A_{cat.n}$  la gêne spécifique de la  $n^{\text{ième}}$  catégorie de véhicule.



FIGURE 7 – Photo de l’antenne de 128 microphones en ligne et des autres dispositifs de mesure utilisés pour la série de mesure dans la ville.

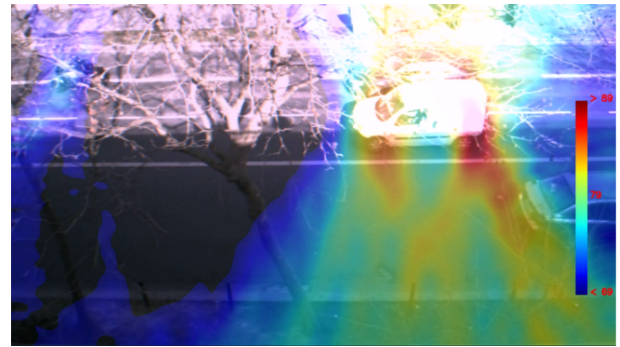


FIGURE 9 – Formation de voie d’une voiture à vitesse constante sur la bande d’octave de 1000 Hz - Quai Saint Bernard à Paris - 15 dB de dynamique.



FIGURE 8 – Formation de voie d’un camion au démarrage sur la bande d’octave de 1000 Hz - Quai Saint Bernard à Paris - 15 dB de dynamique.

## 4 Conclusion

Des expériences ont été menées à l’aide de grandes antennes acoustiques développées dans le cadre du projet Mégamicros. Elles ont permis de collecter des données pour caractériser les sources issues de véhicules routiers, mais aussi d’observer le bruit du trafic urbain grâce à l’imagerie acoustique. Les résultats préliminaires montrent la faisabilité de la méthodologie proposée et résumée dans la figure 10 :

- identification des sources à l’échelle du véhicule ;
- constitution de catégories perceptives spécifiques à partir des mesures à l’échelle de la rue ;
- mise en œuvre du modèle de MOREL *et al.* pour obtenir des gênes spécifiques et globales pour les scènes sonores étudiées.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier : Dominique BUSQUET (UPMC), Pascal CHALLANDE (UPMC), Jean-Christophe CHAMARD (PSA), Hélène MOINGEON (UPMC), Christian OLLIVON (UPMC) et Christophe ROUSSARIE (PSA).

Cette recherche bénéficie du support de la Chaire “Mobilité et qualité de vie en milieux urbains”, portée par la Fondation UPMC et soutenue par les Mécènes (PSA Peugeot-Citroën et RENAULT).

## Références

- [1] Directive européenne 2002/49/CE relative à l’évaluation et à la gestion du bruit dans l’environnement, 2002.
- [2] Fanny MIETLICKI, Christophe MIETLICKI, Carlos RIBEIRO, Piotr GAUDIBERT, BRUNO VINCENT et Vincent GISSINGER : [www.noiseineu.eu](http://www.noiseineu.eu) : New tools to inform the public about environmental noise in cities and to assist decision-making. *In EuroNoise*, 2015.
- [3] Raymond Murray SCHAFER : *Le Paysage Sonore*. Wildproject, 4ème édition, 2010.
- [4] Kozo HIRAMATSU : Soundscape - the concept and its significance in acoustics. *In ICA*, Kyoto, 2004.
- [5] Joo Young HONG et Jin Yong JEON : Soundscape mapping in urban contexts using gis techniques. *In InterNoise*, 2014.

- [6] R. GUSKI, U. FELSCHER-SUHR et R. SCHUEMER : The concept and of noise and annoyance : How and international experts and see it. *Journal of Sound and Vibration*, 223(4):513–527, 1999.
- [7] J. MOREL, C. MARQUIS-FAVRE et L.-A. GILLE : Noise annoyance assessment of various urban road vehicle pass-by noises in isolation and combined with industrial noise : A laboratory study. *Applied Acoustics*, 101:47–57, Jan 2016.
- [8] J. MOREL, C. MARQUIS-FAVRE, D. DUBOIS et M. PIERRETTE : Road traffic in urban areas : A perceptual and cognitive typology of pass-by noises. *Acta Acustica united with Acustica*, 98(1):166–178, Jan 2012.
- [9] Julien MOREL : *Caractérisation physique et perceptive du bruit routier urbain pour la définition d'indicateurs de gêne sonore en situation de mono-exposition et de multi-exposition en présence de bruit industriel*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2012.
- [10] Hugo FASTL et Eberhard ZWICKER : *Psychoacoustics - Facts and Models*. Berlin : Springer Verlag, 3rd édition, 2007.
- [11] C. VANWYNSBERGHE, R. MARCHIANO, F. OLLIVIER, P. CHALLANDE, H. MOINGEON et J. MARCHAL : Design and implementation of a multi-octave-band audio camera for realtime diagnosis. *Applied Acoustics*, 89:281–287, Mar 2015.
- [12] Antoine PEILLOT : *Imagerie acoustique par approximations parcimonieuses des sources*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2012.
- [13] M.E. BRAUN, S.J. WALSH, J.L. HORNER et R. CHUTER : Noise source characteristics in the ISO 362 vehicle pass-by noise test : Literature review. *Applied Acoustics*, 74(11):1241–1265, Nov 2013.