

# Vers une meilleure description des environnements sonores urbains grâce aux mesures mobiles

## Arnaud Can

LUNAM Université/IFSTTAR  
Département AME  
Laboratoire d'Acoustique Environnementale,  
CS 4  
Route de Bouaye  
44344 Bouguenais CEDEX  
E-mail : arnaud.can@ifsttar.fr

## Catherine Lavandier, Pauline Delaitre

Laboratoire MRTE  
Université de Cergy Pontoise  
Département Génie Civil  
5 Mail Gay Lussac  
Neuville sur Oise  
95031 Cergy Pontoise CEDEX  
E-mail : catherine.lavandier@u-cergy.fr

## Laurent Brocolini

Laboratoire MRTE  
Université de Cergy Pontoise  
actuellement au  
Laboratoire Vibrations Acoustique (LVA)  
INSA de Lyon,  
Campus LyonTech la Doua  
Bâtiment Saint Exupéry,  
25 bis, avenue Jean Capelle  
69621 Villeurbanne CEDEX

## Résumé

*Des méthodes alternatives de cartographie de l'environnement sonore en milieu urbain, s'appuyant sur des réseaux de mesures fixes ou mobiles, ont récemment vu le jour. Cet article dresse une revue de leurs modes opératoires, qui s'achèment progressivement vers la mesure participative, et liste les principaux défauts et avantages de ces approches. De plus, deux méthodes de catégorisation spatiale et temporelle des environnements sonores sont proposées, qui utilisent en entrée un recueil de données physiques, ou un recueil de données physiques et perceptives. Elles permettent de définir les zones spatiales, ou les périodes temporelles, durant lesquelles les environnements sonores sont homogènes, non seulement du point de vue des niveaux énergétiques, mais également selon d'autres dimensions physiques et/ou perceptives. La mise en commun des méthodes de mesures mobiles et de ces traitements statistiques, pourra permettre à terme d'aller vers des cartographies des environnements sonores urbains plus réalistes, et tenant compte de l'ensemble des sources sonores.*



Suite la mise en place de la directive européenne 2002/49/CE, la cartographie du bruit est devenue pour les agglomérations, un élément incontournable de lutte contre les nuisances sonores en milieu urbain [1]. C'est en effet un outil très efficace pour communiquer avec les usagers de la ville sur les niveaux de bruit auxquels ils sont exposés. L'approche recommandée pour établir les cartes de bruit consiste dans un premier temps à identifier et évaluer les principales sources de bruit, notamment routières, puis à effectuer un calcul de la propagation du son, de manière à déterminer les indicateurs énergétiques ( $L_{den}$ ), sur une grille de récepteurs [2][3]. La force de cette approche est de permettre l'évaluation de l'impact sur les niveaux de bruit de différentes stratégies de réduction des nuisances sonores. Elle présente néanmoins le désavantage de nécessiter des phases de collecte des données de trafic, et d'acquisition du réseau, longues et coûteuses.

De plus, les modèles de propagation classiques sont souvent inadaptés pour calculer la propagation du son dans certaines configurations particulières, mais courantes en milieu urbain (impact de la végétation sur les niveaux de bruit, effets de la micro-météorologie urbaine sur la propagation acoustique...), ce qui peut générer localement des erreurs importantes.

En parallèle à l'amélioration de ces méthodes de cartographies traditionnelles, des méthodes alternatives de cartographie du bruit sont en cours de développement, et s'appuient directement sur la mesure. Les données collectées peuvent alors être issues d'un ou plusieurs des modes opératoires suivants : réseaux de mesures fixes, mesures mobiles (un opérateur se déplaçant avec un sonomètre et un instrument de géolocalisation), mesures participatives (les opérateurs étant alors les citoyens volontaires équipés de smartphones dotés d'applications de mesure du bruit) [4][5][6].

L'attrait pour ces méthodes vient du fait qu'elles permettent une réduction des coûts opérationnels, tout en maintenant une bonne résolution spatiale, en opérant par exemple des mesures aux endroits où l'estimation des niveaux de bruit s'avère difficile [7]. L'autre avantage de telles mesures est qu'elles sont sensibles à l'intégralité des sources sonores présentes en milieu urbain, là où les cartographies classiques ne modélisent, par exemple, que les principaux axes routiers. En revanche, les échantillons collectés sont souvent de faible durée, ce qui entraîne des problèmes de représentativité statistique ; ceci peut toutefois être contrebalancé en s'appuyant sur des protocoles de mesures associant des mesures à court terme et des mesures sur le long terme [8].

D'autre part, les limitations des évaluations quantitatives des environnements sonores urbains ont récemment été démontrées. Les indicateurs énergétiques peinent à décrire les variations temporelles inhérentes au bruit de trafic routier, qui sont très prononcées en milieu urbain [9]. De plus, si ces indicateurs sont bien corrélés à la gêne sur le long terme [10], ils ne sont pas appropriés pour rendre compte de l'agrément sonore en milieu urbain sur des périodes courtes. En effet, la dimension spectrale [11] et la dimension dynamique [12] de l'environnement sonore affectent sa valeur qualitative, conjointement à sa dimension énergétique. Ces dimensions peuvent avantageusement être capturées via la mesure, par le biais d'un jeu d'indicateurs sélectionnés de manière pertinente.

Ce bref état des lieux des deux approches, que sont la modélisation et la mesure, pour la réalisation des cartes de bruit, montre leur complémentarité, et laisse entrevoir la possibilité de proposer des cartographies décrivant plus finement les environnements sonores perçus par les citoyens. Cet article présente un ensemble de traitements statistiques pouvant être appliqués aux données acoustiques collectées, de manière à affiner la description des environnements sonores urbains. Dans la première partie, les modes opératoires utilisés pour obtenir des cartes de bruit à partir de données issues de la mesure sont présentés. Dans la seconde partie, des méthodes de catégorisation qui permettent de déterminer les zones spatiales et les périodes temporelles homogènes du point de vue de l'environnement sonore, sont détaillées. Enfin, dans la troisième partie, les perspectives qu'offrent ces nouvelles méthodes en termes de cartographies, sont exposées.

## Approches métrologiques pour la cartographie

### Principes et apport de la mesure mobile

Le principe de la mesure mobile consiste à faire parcourir les rues d'intérêt par un opérateur équipé d'un sonomètre et d'un Système de Positionnement Géolocalisé (GPS). Les deux appareils étant synchronisés, le GPS donne à chaque pas de temps (classiquement 1 seconde) la position de l'opérateur, et le sonomètre donne à l'instant correspondant le niveau de pression acoustique continue équivalent pondéré A (soit le  $L_{Aeq,1s}$ ), ainsi que l'évolution des niveaux par bande de 1/3 d'octave  $L_f$ , avec  $f$  variant entre 20 Hz et 20 kHz.

De multiples passages, et de préférence à des horaires différents, permettent ensuite de déterminer, en chaque point du réseau, une mesure représentative du  $L_{Aeq}$ , ou de tout autre indicateur, pour la période considérée. Pour faciliter l'analyse, il est courant d'agréger les positions données par le GPS sur une carte fixe prédéfinie, suivant le réseau routier avec une résolution spatiale donnée (par exemple un point tous les 5 m dans [7]). Chaque position donnée par le GPS est alors remplacée par les coordonnées du point le plus proche sur la carte fixe (voir figure 1b). Cette méthode permet en outre, si la résolution spatiale est telle que les échantillons collectés en chaque point sont de l'ordre de 10 secondes ou plus, de calculer certains indicateurs décrivant les variations de bruit à court terme (indices statistiques, variations temporelles...).

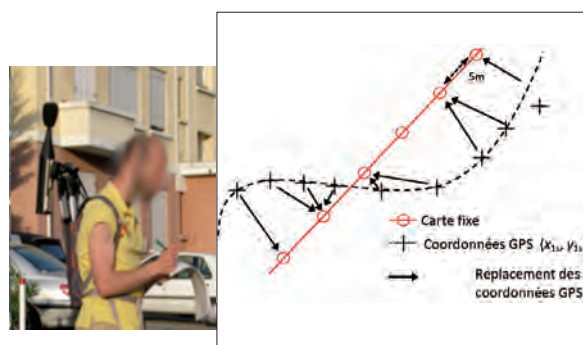


Fig. 1 : a) Dispositif expérimental, b) Traitement des données GPS collectées

Différents modes opératoires sont possibles pour réaliser les mesures, par exemple à pieds ou à vélo. Les aspects expérimentaux liés aux mesures à pieds ont été discutés dans [15]. Il s'avère que l'opérateur agit alors comme un écran qui peut atteindre 1,3 dB (A) à 1,5 dB (A) s'il est situé entre la source et le sonomètre, selon que le sonomètre est porté au niveau de la taille ou au niveau des épaules. Cependant, cet effet est amoindri en situation opératoire réelle, où l'opérateur marche le plus souvent parallèlement à la route. Il est malgré tout recommandé de porter le sonomètre au niveau des épaules minimum, pour éviter l'effet d'écran que rajoutent les véhicules stationnés [15]. Dans [16] par exemple, le parti est pris de porter le sonomètre de façon à ce que le microphone soit situé au-dessus de la tête de l'opérateur (Figure 1a). Parcourir le réseau à vélo permet de couvrir plus rapidement une large zone spatiale, mais présente deux inconvénients :

- (i) il est nécessaire de diminuer la résolution spatiale du fait de la vitesse accrue à vélo, de manière à ce que chaque point du réseau soit parcouru (un point tous les 50 m par exemple dans [17] parcourus en une dizaine de secondes) ;
- (ii) l'opérateur doit s'assurer que le bruit de roulement du vélo n'amène aucun biais expérimental [15]. Notons que le bruit généré par le vélo lui-même peut dans certains cas être filtré en raffinant l'échantillonnage à 100 ms, et en prenant les valeurs minimums mesurées chaque seconde  $L_{Amin,1s}$  [17].

### Apport et limitations de la mesure mobile

Les avantages de la mesure mobile, pour affiner la résolution spatiale des cartographies, ont été discutés dans [18]. Il est montré que, malgré la durée très courte des échantillons collectés, la mesure mobile présente le gros avantage de parcourir chaque point du réseau. En comparaison avec un réseau de mesures fixes couplé avec des méthodes d'interpolations classiques, de type Krigeage ou Pondération Inverse à la Distance (PID), les erreurs moyennes s'en trouvent considérablement réduites. En effet, il est difficile d'estimer le niveau de bruit au sein d'une rue par la simple mesure des niveaux dans les rues alentour suivie d'une interpolation, et sans connaissance supplémentaire sur le réseau (par exemple sur les volumes de trafic), car les variations spatiales des niveaux de bruit sont trop importantes, et la contribution des sources locales trop prédominante. La mesure mobile contourne cette difficulté en parcourant chaque point du réseau. En revanche, les mesures mobiles présentent de grosses difficultés en termes d'échantillonnage : il suffit que la mesure ait été faite à un instant de la journée particulièrement calme ou bruyant, ou durant un événement sonore bref, pour que l'estimation soit faussée. Plusieurs solutions ont été proposées pour atténuer cette variabilité :

- i) les mesures peuvent être moyennées avec les mesures réalisées dans le voisinage et à une période similaire (par exemple dans la même rue et à moins de 50 m), de manière à lisser l'influence des événements sonores et à augmenter artificiellement la taille des échantillons ;
- ii) les stations de mesures fixes permettent, puisqu'elles stockent l'historique des niveaux de bruit, de calibrer la mesure en corrigeant le fait qu'elle est réalisée sur une plage horaire calme ou bruyante de la journée [8].

De ce fait, l'association entre un réseau de capteurs fixes, et des mesures mobiles, s'avère très efficace : les capteurs fixes capturent les variations temporelles des niveaux de bruit, et les capteurs mobiles capturent leurs variations spatiales. Néanmoins, une faiblesse concernant les mesures mobiles demeure : l'instabilité des données GPS collectées. Pour s'affranchir des erreurs possibles de la mesure de position, les points trop éloignés de la trace prédéfinie peuvent être filtrés (par exemple en ignorant les points éloignés de plus de 25 m de la trace fixe). Malgré tout, le problème subsiste lors de dérive du GPS, ou de perte temporaire du signal. Ceci peut entraîner une mesure des niveaux de bruit précise, mais assignée à une mauvaise position sur la carte, avec les répercussions qu'on imagine sur les cartes produites... Le développement d'algorithmes pour filtrer automatiquement les couples {position, mesure} incohérents, reste nécessaire.

### Vers des mesures participatives

Des recherches actuelles visent à étendre le concept des mesures mobiles aux mesures participatives. L'idée sous-jacente est que, d'ici peu, la majorité des citoyens seront équipés de smartphones, potentiellement à même de réaliser des mesures des niveaux de bruit ambiants fiables, et pouvant être géo-localisés. Il est attendu que la précision moindre de ces téléphones, par rapport aux instruments de mesures traditionnels, puisse être compensée par le très grand nombre de données rendues disponibles.

D'un point de vue métrologique, de fortes variations peuvent être observées, en fonction du smartphone et de l'application de mesure du bruit retenus [19]. Néanmoins, si le couple {smartphone, application} est bien choisi, la mesure devient possible, et est entachée d'erreurs moyennes de l'ordre de 1 dB sur des tests réalisés en laboratoire [19]. De plus, une phase de calibration peut être mise en place dans le cas où tous les opérateurs utilisent les mêmes smartphones et les mêmes applications [20].

Les mesures en conditions opératoires réelles s'avèrent néanmoins plus délicates. Les mesures peuvent être réalisées soit par un panel d'opérateurs volontaires présélectionnés et formés à la mesure [5], qui opèrent suivant un protocole défini, soit par des utilisateurs s'étant portés volontaires pour que leur appareil enregistre les niveaux de bruit en continu. Ce dernier cas permettrait une collecte de données plus importante, mais la principale difficulté est que la mesure peut alors être extrêmement dépendante du contexte, le smartphone pouvant se trouver dans un sac, tenu dans la paume en configuration de mesures adéquates, ou encore tenu par l'utilisateur mais en situation de discussion, au moment où la mesure est enclenchée. Pour contourner cette difficulté, Rana et al. proposent une série de modules qui analysent le signal pour détecter le contexte de la mesure [21]. Dans un premier temps, un module discrimine les périodes où l'opérateur est en discussion avec le téléphone, à partir du spectre mesuré, le spectre de la voix étant très différent du spectre de trafic routier. Ensuite, un second module détecte, avec un taux de succès de 84 %, si le téléphone est tenu dans la main (ce qui est considéré comme la position optimale pour la mesure), ou bien dans un autre contexte (dans le sac ou dans la poche) ; dans ce dernier cas la mesure n'est alors pas prise en compte. Ce module s'appuie sur les données accélérométriques enregistrées par le téléphone, qui sont classifiées avec la méthode des k-plus proches voisins.

### Approches statistiques pour la description des environnements sonores

Au-delà de l'estimation des indicateurs énergétiques sur le long terme, la collecte de données mobiles permet a priori de décrire plus finement les variations spatio-temporelles des niveaux de bruit. Elle donne accès également à des indicateurs difficilement estimables par la modélisation, comme les indicateurs d'émergence (de type nombre d'événements sonores, ou temps passé au-dessus d'un seuil donné) ou les indicateurs décrivant les variations temporelles des niveaux (écart-type des mesures, variations moyennes des niveaux à l'échelle de la seconde...). Il semble donc nécessaire, pour une utilisation optimale de ces données, de mettre en place un traitement statistique adapté aux données collectées.

Ce traitement nécessite deux étapes :

- i) une sélection des indicateurs acoustiques à même de caractériser les environnements sonores observés ;
- ii) une catégorisation des environnements sonores.

La catégorisation des environnements sonores a fait l'objet de nombreuses recherches récentes. L'objectif consiste à définir des classes homogènes du point de vue de l'environnement sonore, sur l'ensemble des indicateurs retenus. De ce fait, deux situations avec un niveau énergétique équivalent peuvent être classées dans des catégories différentes si elles diffèrent selon d'autres indicateurs. Cette approche permet donc de décrire les environnements sonores sur l'ensemble de leurs dimensions. Dans [13][14], des classes homogènes du point de vue de l'environnement sonore sont définies sur la base d'un grand nombre de mesures ; dix classes sont formées dans [13], et vingt classes dans [14]. Dans [14], ces classes sont décrites qualitativement, et sont de type : « environnement sonore dominé par le bruit de trafic routier et sirènes », « bruits de fontaine et d'oiseaux », etc. Dans [13], les classes ont été formées sur la base de nombreuses mesures, en fonction de leur valeur pour treize indicateurs acoustiques (niveau de pression, rugosité, fluctuation de force, etc.). Ensuite, des méthodes de classification (les Machines à Vecteurs de Support dans [14]) sont « entraînées » pour pouvoir décider à laquelle de ces classes appartient toute nouvelle mesure.

L'intérêt de ces approches est, d'une part, de pouvoir réduire les environnements observés à un nombre fini d'environnements prédéfinis, et, d'autre part, de ne plus décrire les environnements sur leur seule dimension énergétique. Ceci présente également un intérêt en termes de représentation cartographique, chaque classe pouvant être aisément représentée. Il est nécessaire néanmoins de savoir déterminer l'emprise spatiale et temporelle des classes. Les deux prochaines sections détaillent deux approches originales et simples à mettre en œuvre, pour améliorer la description des environnements sonores en milieu urbain. Elles s'appuient toutes les deux sur un recueil de données, et sur une analyse statistique de ces données.

### Définition par la mesure acoustique des zones spatiales homogènes

#### Expérimentation

Dans le cadre du projet EUREQUA<sup>1</sup>, une expérimentation a été menée à Marseille du mardi 18 au jeudi 20 juin 2013. Des mesures mobiles géo-référencées ont été collectées durant dix-neuf périodes d'une heure couvrant différentes périodes du jour et de la nuit (une période toutes les trois heures : [0h-1h] – [3h-4h] – [6h-7h]...). Chaque parcours d'une heure a consisté en un relevé des données {t, x, y,  $L_{Aeq,1s}$ ,  $L_{eq,1s,20Hz}$ , ...,  $L_{eq,1s,20kHz}$ } avec un échantillonnage d'une seconde. Le parcours, long de 2,34 km, a été discrétisé en cent-cinquante points, distants en moyenne de 15,6 m (voir Figure 4, page 44). En moyenne, pour chacun des dix-neuf parcours, vingt-trois secondes de données sont collectées en chacun des cent cinquante points, à partir desquels ont été calculés douze indicateurs acoustiques, calculés sur la base des valeurs de  $L_{Aeq,1s}$  collectées : le  $L_{eq,A}$ , le  $L_{max,A}$ , les indices statistiques  $L_{10,A}$ ,  $L_{50,A}$ ,  $L_{90,A}$ ,  $L_{min,A}$ , le  $L_{10,A} - L_{90,A}$ , le  $L_{max,A} - L_{min,A}$ , l'écart type  $\sigma_{L_{eq,A}}$ , la moyenne des différences entre valeurs consécutives des niveaux sonores  $\delta_{L_{eq,1s,A}}$ ,  $\delta_{L_{eq,2s,A}}$  et  $\delta_{L_{eq,5s,A}}$ .

Les  $\delta_{L_{eq,1s,A}}$ ,  $\delta_{L_{eq,2s,A}}$  et  $\delta_{L_{eq,5s,A}}$ , calculés de la manière suivante :

$$\delta_{L_{eq,xs,A}} = \text{mean} (|L_{eq,xs,A}(t) - L_{eq,xs,A}(t-x)|) \quad (1)$$

Ils renseignent sur les fluctuations à court terme des niveaux sonores et donnent une approximation de la rugosité du son.

Ces mêmes douze indicateurs ont été calculés pour chacune des trente et une bandes de 1/3 d'octave  $f$  entre 20 Hz et 20 kHz (ex :  $L_{10,500Hz}$ ,  $\delta_{Leq,2s,1kHz}$ , etc.). De plus, le  $L_{f-L_{Aeq}}$  qui reflète la contribution de la bande de 1/3 d'octave sur le niveau global, est calculé pour chaque bande de fréquence  $f$ .

Enfin, trois Centres de Gravité Spectraux (CGS ou SGC en anglais), le  $CGS_{[20\text{ Hz}-20\text{ kHz}]}$ , le  $CGS_{[50\text{ Hz}-20\text{ kHz}]}$ , et le  $CGS_{[50\text{ Hz}-10\text{ kHz}]}$ , sont calculés ainsi :

$$CGS_{[f_{min}-f_{max}]} = \frac{\sum_{f=f_{min}:f_{max}} f * 10^{L_{f/10}}}{\sum_{f=f_{min}:f_{max}} 10^{L_{f/10}}}$$

Ces derniers indicateurs révèlent si le niveau de bruit global résulte de contributions dans les basses ou les hautes fréquences. Au total les nombres d'indicateurs calculés sont donc  $n_{ind} = 12 + (12+1)*31 + 3 = 418$ .

#### Sélection d'un jeu d'indicateurs physiques

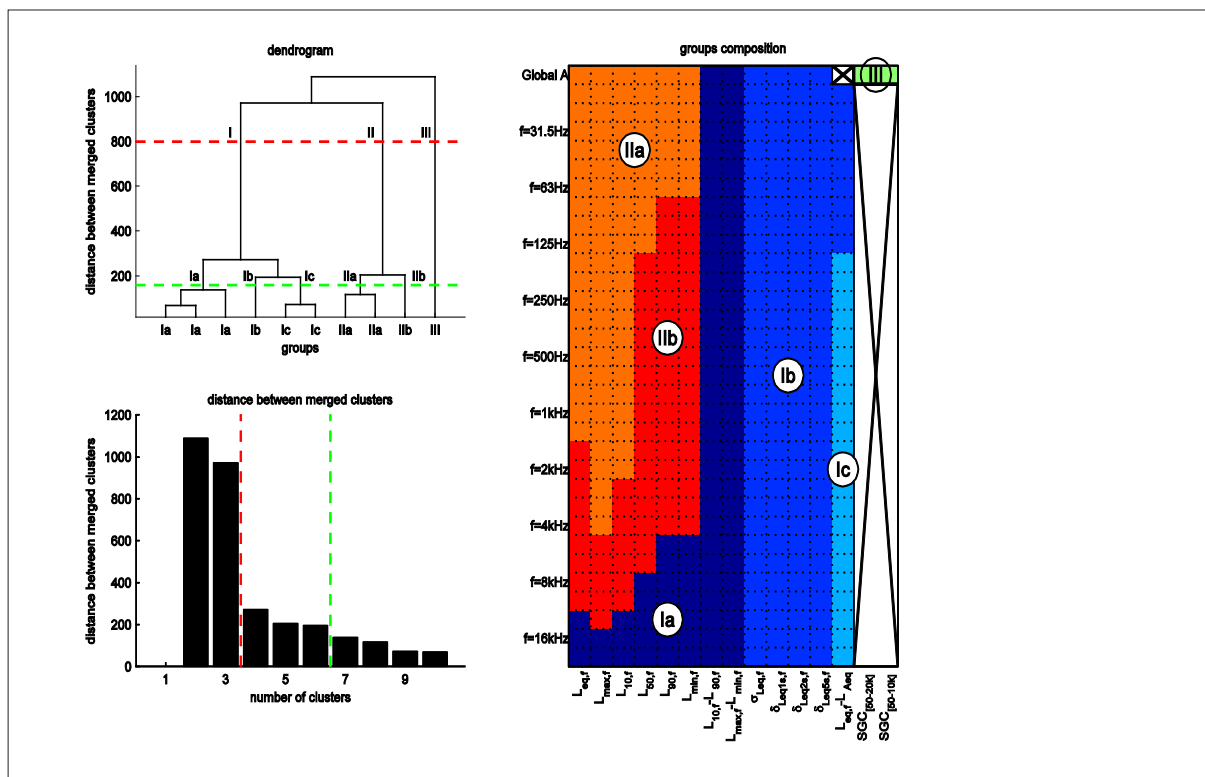
Comme expliqué dans la section précédente, les échantillons collectés en chaque point du réseau permettent le calcul d'un grand nombre d'indicateurs acoustiques. Bien qu'utiles à la description fine de l'environnement sonore, ces indicateurs sont pour la plupart fortement corrélés, et contiennent donc une part d'information redondante. Une procédure est proposée ci-dessous, pour sélectionner un jeu d'indicateurs pertinents pour décrire l'environnement sonore d'un site à partir d'un nombre réduit d'indicateurs.

Une méthode de regroupement hiérarchique ascendante est appliquée, utilisant la méthode de Ward. Les individus formant les groupes sont les 418 indicateurs, calculés sur les 19 \* 150 points. L'algorithme commence par 418 groupes contenant chacun un unique élément, puis tente de regrouper deux groupes à chaque étape, jusqu'à ce que tous les indicateurs se trouvent dans le même groupe. Les paires de groupes qui sont regroupés sont ceux qui minimisent, parmi tous les regroupements possibles, la somme du carré des distances entre les points et les centroïdes des groupes respectifs. Les groupes formés à chaque étape sont illustrés par le dendrogramme de la figure 2. Les distances entre les groupes formés augmentent considérablement si plus de trois groupes sont formés, ce qui indique qu'il est possible de décrire l'environnement sonore avec un ensemble de trois indicateurs. Retenir six indicateurs est également possible pour une description plus fine de l'environnement sonore. Les compositions des groupes sont données dans la figure 2 :

- Le groupe I contient les indicateurs décrivant les variations des niveaux de bruit ;
- Le groupe II contient les indicateurs énergétiques, à l'exception des plus hautes fréquences ;
- Le groupe III contient les CGS, qui sont les seuls indicateurs décrivant le spectre dans son ensemble.

Enfin, au sein de chaque groupe, l'indicateur retenu est celui offrant la meilleure corrélation moyenne par rapport aux autres indicateurs du groupe.

<sup>1</sup>EUREQUA : « Evaluation mUltidisciplinaire et Requalification Environnementale des QUartiers », projet ANR-11-VILD-0006 financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).



**Fig. 2 : Dendrogramme des indicateurs et composition des six principaux groupes d'indicateurs**

Les trois indicateurs retenus *in fine* par la procédure sont l'écart-type  $\delta_{\text{Leq,A}}$  (groupe I), le  $L_{50,A}$  (groupe II), et le Centre de Gravité Spectral  $\text{CGS}_{[50\text{ Hz}-10\text{ kHz}]}$  (groupe III), qui reflètent les trois dimensions des environnements sonores que sont respectivement les variations temporelles, les niveaux énergétiques, et le spectre. Il est intéressant de souligner que ces dimensions ressortent également de tests perceptifs. En effet, il est montré dans [11] que le contenu spectral a une influence prédominante sur les préférences entre les sons. Dans [12], les trois mêmes dimensions émergent de tests perceptifs d'environnements sonores.

### Catégorisation de l'environnement sonore

Les trois indicateurs sélectionnés sont utilisés pour décrire les modifications spatiales et temporelles des environnements sonores. La figure 3, page suivante, illustre ces modifications pour trois périodes d'une heure. Les caractéristiques principales de l'environnement sonore du site expérimental sont soulignées :

- augmentation du  $CGS_{[50\text{ Hz-10 kHz}]}$  dans le sud de la zone, où les bruits naturels dominent ;
- augmentation des valeurs de  $\delta_{Leq,A}$  la nuit dans le nord de la zone, due aux passages isolés de véhicules ;
- diminution du  $L_{50,A}$  du nord vers le sud, quelle que soit la période, en raison de la localisation des routes principales, au nord du site.

De manière à faciliter la description de l'environnement, une catégorisation spatiale du site est opérée, sur la base

des trois indicateurs et des dix-neuf périodes de mesure (soit cinquante-sept variables). Des couples de localisations appartiennent à la même classe si leurs valeurs sur les trois indicateurs sont similaires quelle que soit la période. La méthode de regroupement hiérarchique ascendante appliquée met en évidence l'intérêt de distinguer quatre classes, pour lesquelles les environnements sonores sont homogènes spatialement et temporellement. Ces quatre classes sont représentées sur la figure 4, page suivante :

- Le groupe G1 réunit la zone la plus bruyante du site, où les valeurs de  $L_{50,A}$  sont les plus élevées (valeur centroïde de  $L_{50,A}$  de 65,3 dB (A)). La zone de G1 s'étend le long de l'avenue Dr Heckel et du boulevard de la Valbarelle, qui sont des routes où le trafic est dense ;
- Le groupe G2 correspond à une zone de transition, impactée par les forts niveaux émis sur le boulevard de la Valbarelle ; elle est caractérisée par une valeur centroïde du  $L_{50,A}$  de 54,4 dB (A) ;
- Le groupe G3 correspond à une zone calme contenant des rues avec un trafic faible (les véhicules lents étant la principale source de bruit), avec une valeur centroïde de  $L_{50,A}$  de 49 dB (A) et un centroïde du CGS<sub>[50 Hz-10 kHz]</sub> de 457 Hz ;
- Le groupe G4 est une zone légèrement plus calme que G3, avec une valeur moyenne de  $L_{50,A}$  de 47,6 dB (A), mais elle diffère surtout fondamentalement au niveau du spectre, avec une valeur moyenne du CGS<sub>[50 Hz-10 kHz]</sub> de 731 Hz. En effet, le sud de la zone est un espace très arboré, et donc marqué par des sons aigus, dus en particulier aux oiseaux présents à cet endroit.

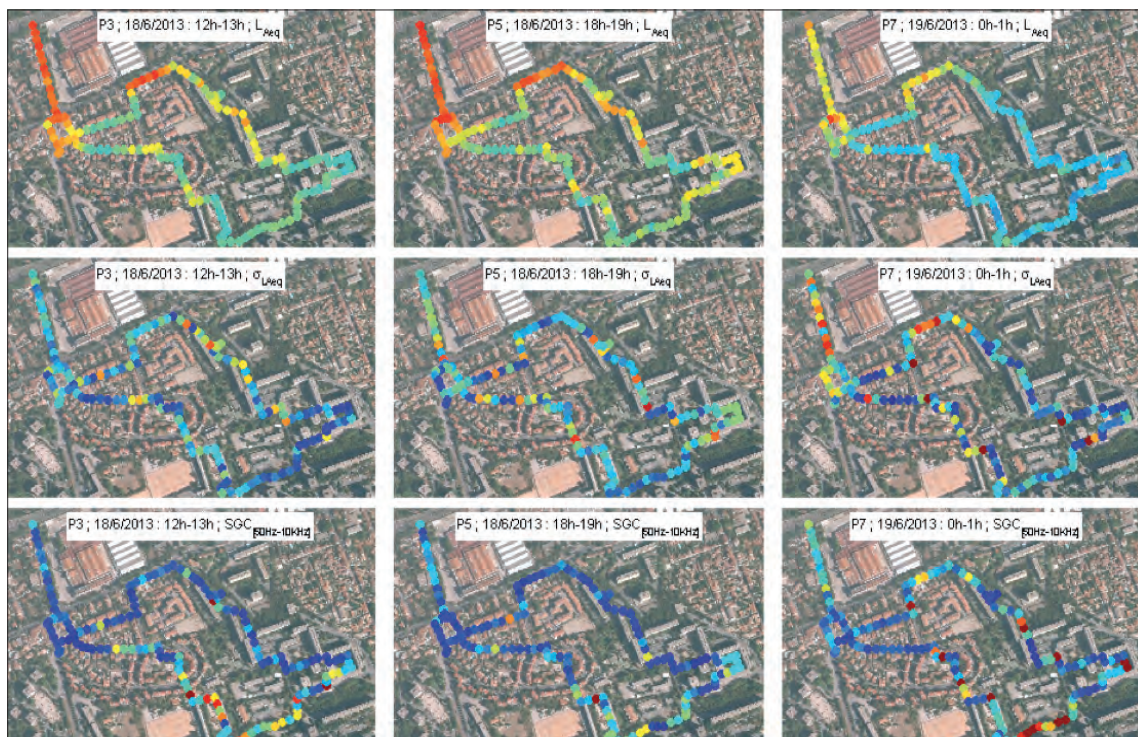


Fig. 3 : Carte de bruit pour les trois indicateurs  $L_{50,A}$  (en haut),  $\sigma_{Leq,A}$  (au milieu), et  $CGS_{[50\text{ Hz}-10\text{ kHz}]}$  (en bas), décrits pour trois périodes d'une heure

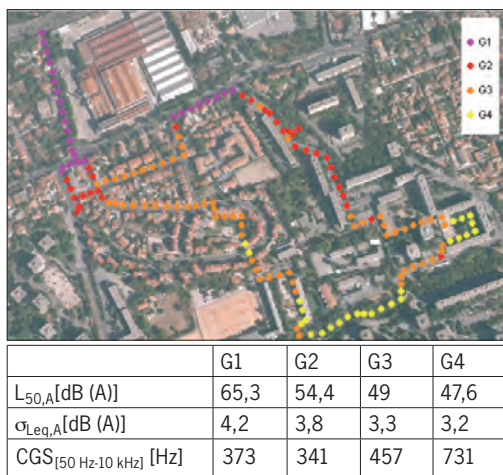


Fig. 4 : Description de la catégorisation spatiale des environnements sonores (en haut), basée sur le  $L_{50,A}$ , le  $\sigma_{Leq,A}$  et le  $CGS_{[50\text{ Hz}-10\text{ kHz}]}$ , et prenant en compte les dix-neuf périodes d'une heure. Tableau des valeurs des centroïdes pour les trois indicateurs et les quatre classes formées

Ainsi, la procédure permet de délimiter précisément l'étendue spatiale de chacun des environnements sonores distincts rencontrés sur la zone. Cette méthode peut ainsi avantageusement être couplée aux études perceptives :

- en délimitant les zones homogènes, il est possible de déterminer les endroits propices pour interroger les citadins sur les environnements sonores perçus avec en vue la création de cartes perceptives ;
- la méthode permet de localiser les zones de transition, qui sont des points cruciaux dans la perception des environnements sonores [22].

### Définition par la mesure perceptive des zones spatiales homogènes

#### Expérimentation

Dans le cadre du projet Cart\_ASUR<sup>1</sup>, soixante téléphones mobiles ont été distribués à soixante participants volontaires afin qu'ils effectuent pendant un an une série de mesures acoustiques et perceptives en divers lieux situés dans les XIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> arrondissements de Paris, à différents moments de la journée, et en deux saisons différentes (saison fraîche entre octobre et mars et saison douce entre avril et septembre). Environ cinq mille situations sont ainsi mesurées, à la fois d'un point de vue acoustique, mais aussi d'un point de vue perceptif. Les participants doivent se rendre aux lieux et créneaux horaires prédéfinis. Ils doivent enregistrer l'évolution du niveau sonore toutes les secondes pendant dix minutes et écouter l'environnement sonore pendant ce temps-là. Ensuite, il leur est demandé d'évaluer l'environnement sonore à partir d'un questionnaire.

L'acquisition des données acoustiques, photographiques et perceptives et leur transfert sur un serveur s'effectuent automatiquement via une application développée par l'équipe BrusSense de l'université de Bruxelles (VUB) [20]. Contrairement aux expériences présentées dans les paragraphes précédents, les participants restent en un même lieu pendant la mesure.

Dix typologies de lieux ont été sélectionnées (Figure 5) : deux passages (rose clair), quatre rues (rose), trois boulevards (fushia), deux rues commerçantes (parme), deux écoles (azur), deux rues de restaurants (bleu), deux marchés (rouge), quatre carrefours ou places (marron), un cimetière (orange), six jardins (jaune) et trois zones de transition (noir). Au total, trente et un lieux ont été étudiés.

2-Cart\_ASUR : « Représentations cartographique de la qualité des ambiances sonores urbaines : acceptabilité des cartes », ASUR Convention 1217 C 0035 financée par l'ADEME.

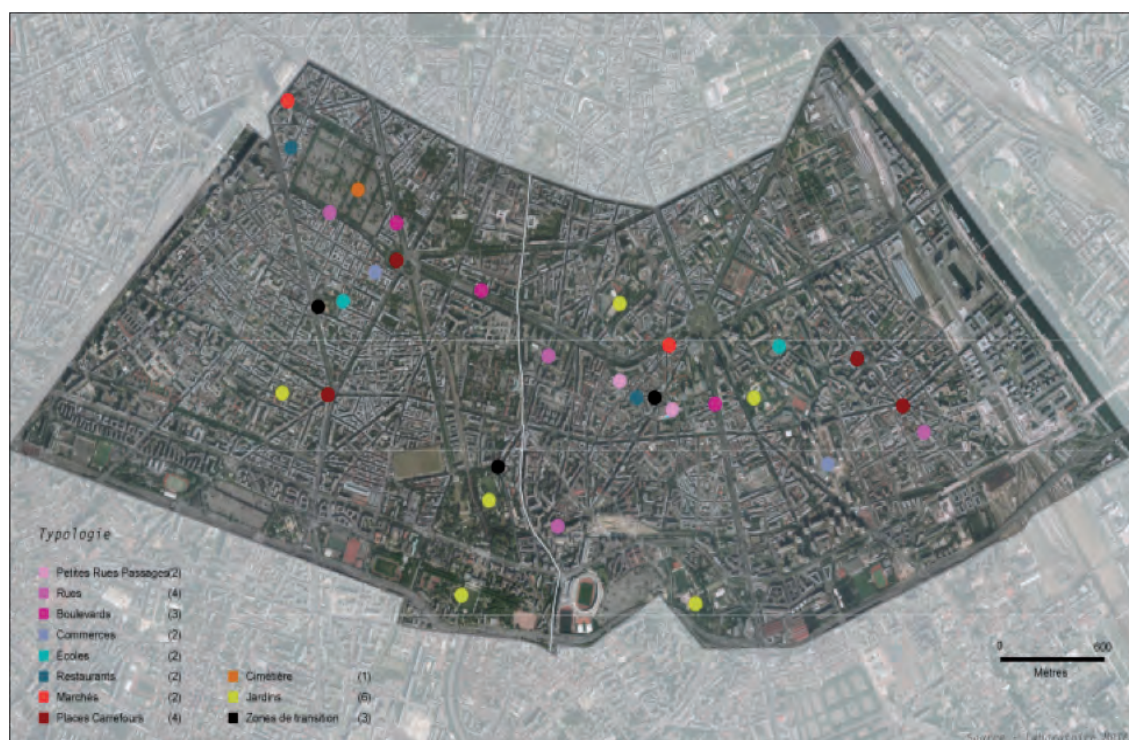


Fig. 5 : Localisation des points de mesures dans les XIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> arrondissements de Paris

|                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Agrément sonore                                                                                          |
| Agrément visuel                                                                                          |
| Force sonore                                                                                             |
| Animation                                                                                                |
| Enveloppement                                                                                            |
| Familiarité                                                                                              |
| Intensité sonore de diverses sources : mobylettes, voitures etc. (voir capture d'écran ci-contre)        |
| Temps de présence de diverses sources : circulation, voix, oiseaux etc. (voir capture d'écran ci-contre) |

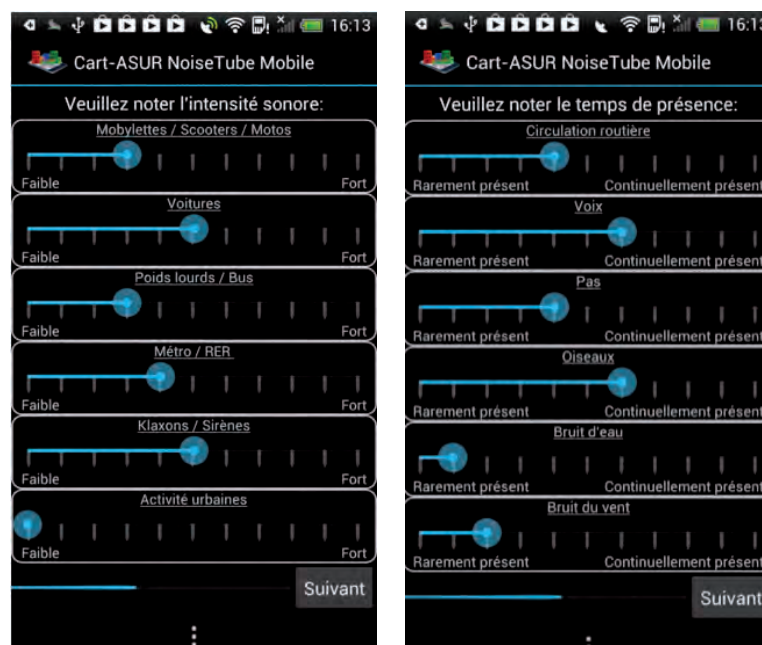


Fig. 6 : Liste des échelles sémantiques et exemples de capture d'écran lors des mesures sur smartphone

*Sélection d'un jeu de variables perceptives*  
Les variables perceptives sont issues du questionnaire dédié à l'application. Ce questionnaire est basé sur dix-huit échelles sémantiques. Il se décompose en trois grandes parties (Figure 6) :

- Une évaluation globale de l'environnement : conditions météorologiques, agrément sonore, agrément visuel, etc. ;

- Une évaluation de l'intensité sonore pour les sources émergentes, de 0 (faible) à 10 (fort) ;
- Une évaluation du temps de présence pour les sources qui n'émergent pas beaucoup du bruit de fond, de 0 (rarement présent) à 10 (continuellement présent).

À la fin de chaque session, le participant est invité à prendre une ou plusieurs photos du lieu évalué.

### Catégorisation de l'environnement sonore

Les résultats présentés dans cet article sont basés sur les mesures réalisées entre octobre 2013 et mars 2014 soit environ deux mille points de mesures. Pour chaque situation (un lieu à un moment donné) une vingtaine de participants différents ont effectué les mesures. Sur ces vingt mesures et pour chaque variable, la valeur de la médiane et la valeur de l'interquartile (75 % - 25 %) ont alors été calculées. En effet, la moyenne n'est pas pertinente pour les variables qui évaluent l'intensité sonore des sources émergentes, car leur distribution n'est pas gaussienne. Ces variables sont très dépendantes de l'instant où la mesure a été effectuée, avec la présence ou non d'un événement sonore particulier. Sur ces médianes et interquartiles, une classification de Kohonen (méthode basée sur un réseau de neurones) [23] a été menée. Elle rassemble toutes les données très similaires sur un même neurone et regroupe aussi les données qui se ressemblent sur des neurones proches les uns des autres (Figure 7). Cette classification a permis de réduire dans un premier temps la centaine de points de mesures sur cinquante-quatre neurones. Une classification de Ward a ensuite été réalisée sur ces cinquante-quatre neurones pour en extraire six classes représentant six types d'environnements sonores perçus.

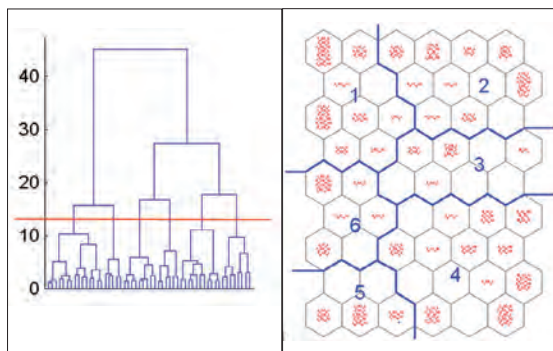


Fig. 7 : À gauche, dendrogramme sur six classes. À droite, carte de Kohonen rassemblant les objectifs de mesure sur les cinquante-quatre neurones

En observant la composition des différentes classes, on remarque que :

- La classe 1 se compose de rues, boulevards et intersections en période de soirée et nuit ;
- La classe 2 se compose de rues, boulevards et intersections en période de journée ;
- La classe 3 se compose d'espaces « atypiques » comme les zones de transitions, le square de la place Denfert-Rochereau... ;
- La classe 4 se compose des rues commerçantes, des rues de bars et de restaurants et des écoles pendant la période de récréation ;
- La classe 5 se compose des parcs et jardins ;
- La classe 6 est plus difficile à caractériser, elle se compose également d'endroits « atypiques » comme le cimetière, les passages, la place Jeanne d'Arc...

Dans un second temps, on peut ensuite analyser quelles sont les variables qui ont permis de construire les classes à partir de leurs valeurs dans les différentes classes (Figure 8).

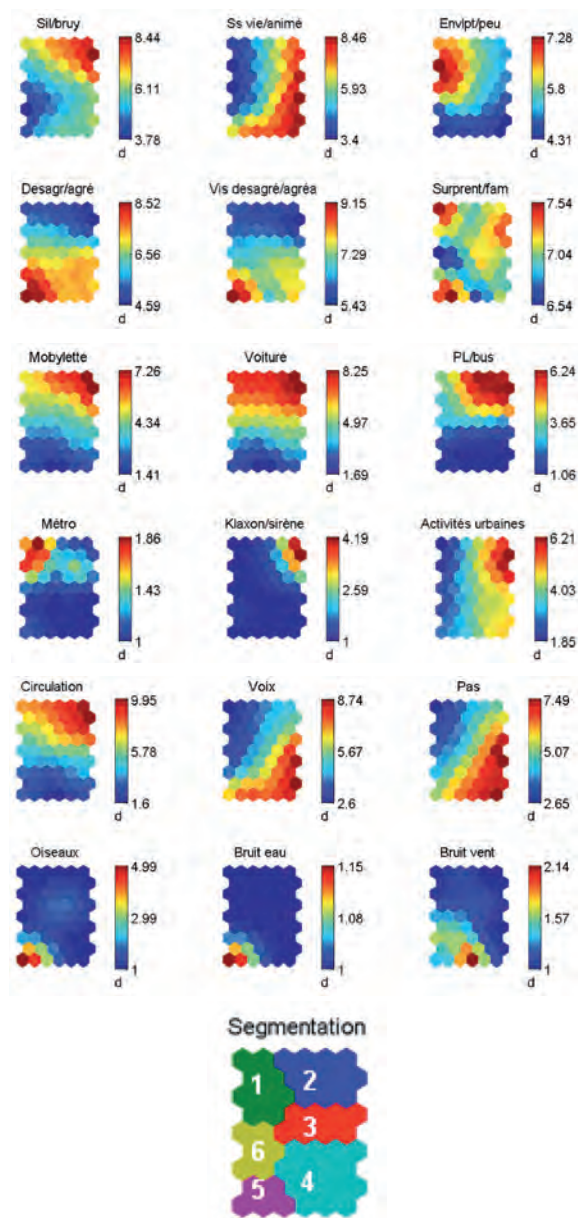


Fig. 8 : Segmentation des neurones dans les différentes classes (en bas) et répartition des valeurs des médianes des variables perceptives sur la carte de Kohonen

On remarque que les classes 1 et 2 sont jugées désagréables et bruyantes (surtout la classe 2). La différence entre la classe 1 et la classe 2 a été construite à partir des variables « sans vie » et « peu enveloppant ». La classe 2 se caractérise par une circulation continue avec une intensité forte des véhicules routiers (poids lourds, deux roues) et des klaxons qui y sont associés. La classe 1 (sans vie et peu enveloppante) se caractérise par la présence du métro, mais aussi par des variabilités fortes pour les bus et les deux roues. Ceci s'observe par des valeurs fortes des interquartiles (q3-q1) pour ces deux variables (Figure 9), et s'explique par le fait que les événements se remarquent bien dans les périodes de soirée où le bruit de fond est faible. Les émergences sont alors globalement plus faibles dans la classe 1 que dans la classe 2 (voir les valeurs médianes à la figure 8) mais plus variables puisqu'elles dépendent de l'instant de la mesure.

La classe 3 est caractérisée par la présence de tout type de sources. Elle comprend donc les zones de transition qui ne sont pas vraiment typées d'un point de vue urbanistique. Les classes 4 et 5 sont caractérisées respectivement par la présence de voix ou de pas et la présence des oiseaux, de bruit d'eau ou de vent. Enfin, la classe 6 correspond à des zones plutôt surprenantes, silencieuses, sans vie, avec parfois la présence de voitures. Cette classe rassemble des lieux où il ne se passe pas grand-chose d'un point de vue sonore.

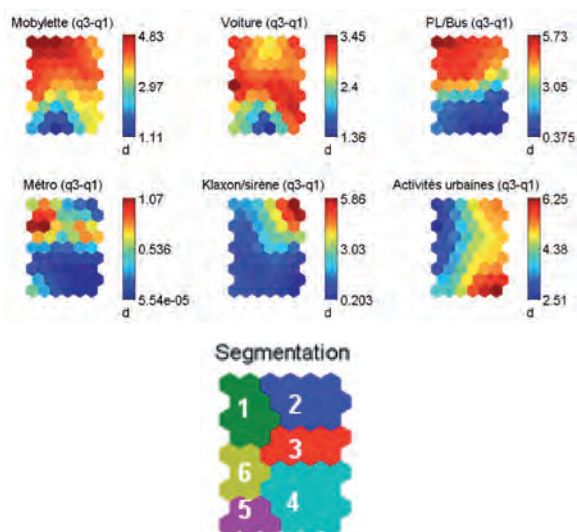


Fig. 9 : Segmentation des neurones dans les différentes classes (en bas) et répartition des valeurs interquartiles des variables perceptives (pour les sources émergentes seulement) sur la carte de Kohonen

Les classifications construites sur les mesures physiques et les classifications construites sur les évaluations perceptives aboutissent globalement aux mêmes conclusions. Il semble toutefois que les données perceptives montrent bien la différence entre les situations sonores de jour et celles de soirée (et de nuit). Un travail précis peut ensuite être réalisé pour définir les périodes homogènes.

### Définition des périodes temporelles homogènes

Pour réaliser l'étude du maillage temporel, six stations de mesures fixes ont été déployées sur Paris, quatre dans le XII<sup>e</sup> arrondissement et deux dans le V<sup>e</sup> arrondissement. Ce travail a été effectué dans le cadre du projet QUASOART<sup>3</sup>. Ces six points de mesures correspondent à des ambiances sonores *a priori* différentes (parc, boulevard, école, marché...).

À partir du niveau sonore équivalent  $L_{Aeq,1s}$  mesuré durant une période d'environ trois mois, vingt-et-un indicateurs ont été extraits sur des durées optimisées (dix minutes pour la majorité des sites, sauf pour l'école qui est rythmée par la durée des récréations et pour laquelle une durée de vingt minutes semble plus appropriée) :  $L_{Aeq}$ ,  $L_{Amax}$ ,  $L_{Amin}$ ,  $L_{A95}$ ,  $L_{A90}$ ,  $L_{A50}$ ,  $L_{A10}$ ,  $L_{A5}$ , Écart-type du  $L_{Aeq}$ ,  $L_{A10} - L_{A90}$ , TNI, Nombre d'événements dépassant un niveau  $L_{A\alpha}$  avec  $L_{A\alpha} = 75$  dB (A), 80 dB (A),  $L_{A10}$ ,  $L_{Aeq} + 10$  dB (A),  $L_{Aeq} + 15$  dB (A), et enfin le pourcentage de temps durant lequel le niveau  $L_{Aeq}$  dépasse le niveau  $L_{A\alpha}$ .

Les résultats montrent que le rythme de la journée impose différentes périodes à l'intérieur desquelles les mesures acoustiques sont similaires. Finalement, un nombre réduit de mesures acoustiques permet d'expliquer la formation des périodes homogènes :  $L_{Aeq}$ ,  $L_{A90}$ ,  $L_{A10}$ ,  $L_{A\alpha}$ , Nombre d'Événements  $> L_{Aeq} + 10$  ou Nombre d'Événements  $> L_{A10}$  [24]. Dans cette étude, seules les mesures de niveau en dB (A) ont été enregistrées, interdisant alors d'extraire des mesures spectrales.

Sur la figure 10, on voit clairement que les classes 1 et 2 concernent les périodes de nuit (avec une classe dédiée à la nuit profonde). La classe 4 correspond à la période de la journée caractérisée par l'animation de l'espace public. La classe 3 est une période de transition qui correspond au réveil et à l'endormissement de la ville pour le carrefour, tandis que pour la rue commerçante, cela correspond à l'ouverture et à la fermeture des magasins (avec une période de fermeture à midi pour certains).

3-QUASOART : « Indicateurs de qualité sonore en situation urbaine », Convention 07 66 C 0158 financée par l'ADEME.

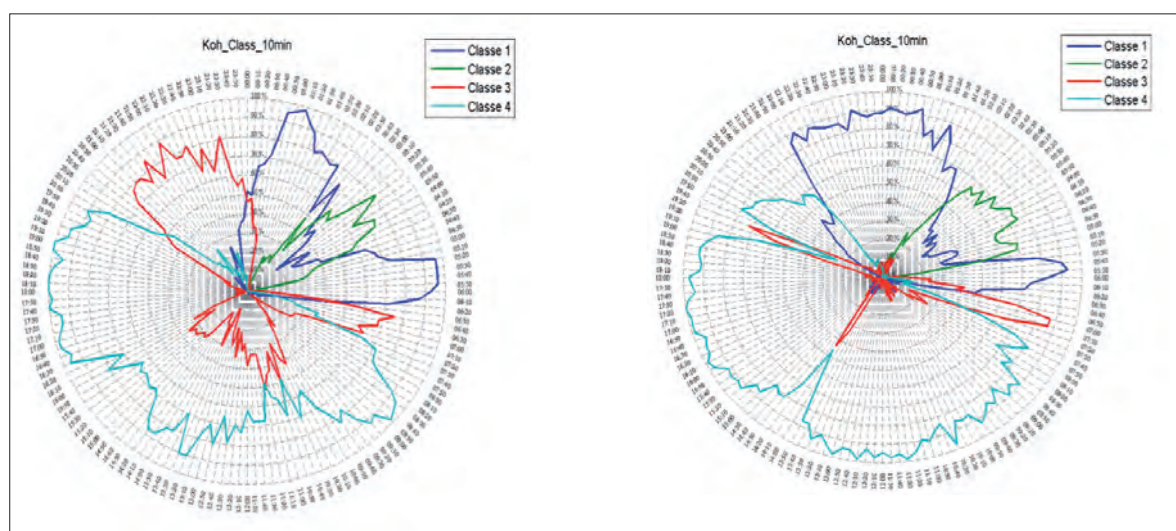


Fig. 10 : Gauche : Classification des périodes homogènes pour un carrefour.  
Droite : Classification pour une rue commerçante

## Conclusion

Cet article présente un ensemble de méthodes statistiques permettant de caractériser finement les environnements sonores urbains, en s'appuyant sur un recueil de mesures mobiles et un traitement statistique adapté. Cette approche s'impose comme une alternative efficace aux méthodes de cartographies du bruit plus conventionnelles, qui consistent en une évaluation des principales sources de bruit routières et un calcul de la propagation du son. En effet, en permettant une mesure aux endroits où l'estimation des niveaux de bruit est difficile, la mesure mobile affine la résolution spatiale à moindre coût. En outre, la sensibilité des mesures à l'intégralité des sources sonores présentes, permet une cartographie réaliste des niveaux sonores.

De plus, un traitement statistique des données recueillies permet d'affiner la description des environnements sonores. En particulier, une catégorisation spatiale des environnements permet de délimiter les zones homogènes du point de vue de l'environnement sonore. Cette catégorisation peut s'appuyer sur un recueil de données physiques, ou bien sur un recueil de données physiques et perceptives, les participants devant alors renseigner, en plus de la mesure effectuée, des champs relatifs à la perception qu'ils ont de l'environnement sonore. Les méthodes de catégorisation permettent également de souligner les périodes de la journée durant lesquelles les environnements sonores sont homogènes.

Ainsi, les méthodes développées dans cet article s'avéreront utiles pour caractériser et cartographier les environnements sonores urbains sur la base de mesures participatives. Toutefois, la représentativité et la robustesse des mesures collectées, qui peuvent être entachées d'erreurs de géolocalisation ou d'erreurs de mesure, devront pour cela être déterminées. Enfin, la complémentarité entre les méthodes de cartographies classiques s'appuyant sur une évaluation des principales sources de bruit routières et un calcul de la propagation du son, et les méthodes alternatives s'appuyant sur la mesure mobile, devra faire l'objet d'études.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) ainsi que l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) pour leur soutien financier.

## Références bibliographiques

- [1] Directive européenne 2002/49/CE du 25 juin 2002, relative à la gestion du bruit dans l'environnement, Official Journal of the European Communities, 2002
- [2] European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN) - Position Paper - Final Draft - Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure - Version 2, 13 janvier 2006
- [3] CERTU, Comment réaliser les cartes de bruit stratégiques en agglomération ? Mettre en œuvre la directive 2002/49/CE, RF05807, janvier 2007
- [4] N. Maisonneuve, M. Stevens & B. Ochab, Participatory noise pollution monitoring using mobile phones, *Information Polity*, 15, pp 51-71, 2010
- [5] E. D'Hondt, M. Stevens & A. Jobs, Participatory noise mapping works! An evaluation of participatory sensing as an alternative to standard techniques for environmental monitoring, *Pervasive and Mobile Computing*, 9 (5), pp 681-694, 2013
- [6] L. Dekoninck, D. Botteldooren & L. Int Panis, Guide for part noise sensing based on analysis of high quality mobile noise measurements, in *Proceedings of the 41st INTERNOISE*, New-York, USA, p. 12, 2012
- [7] A. Can, T. Van Renterghem & D. Botteldooren, Exploring the use of mobile sensors for noise and black carbon measurements in an urban environment in *Proceedings of ACOUSTICS2012*, Nantes, France, pp.1543-1548, 2012
- [8] A. Can, T. Van Renterghem, M. Rademaker, S. Dauwe, P. Thomas, B. De Baets & D. Botteldooren, Sampling approaches to predict urban street noise levels using fixed and temporary microphones, *J. Environ. Monitor.* 13, pp. 2710-2719, 2011
- [9] A. Can, L. Leclercq, J. Lelong & J. Defrance, Capturing urban traffic noise dynamics through relevant descriptors, *Applied Acoustics*, 69 (12), pp. 1270-1280, 2008
- [10] H.M.E. Miedema & H. Vos, Exposure-response relationships for transportation noise, *Journal of Acoustical Society of America*, 104, pp. 3432-3445, 1998
- [11] B. Berglund, P. Hassmén & A. Preis, Annoyance and spectral contrast are cues for similarity and preference of sounds, *J. Sound Vib.* 250 (1), pp. 53-64, 2002
- [12] C. Lavandier, A. Bidault, N. Chouard & S. Viollon, Auditory perception of road traffic noise, in *Proceedings of the 29th INTERNOISE*, Nice, France, pp. 2820-2823, 2000
- [13] A. Torija, D. P. Ruiz & A. F. Ramos-Ridao, A tool for urban soundscape evaluation applying Support Vector Machines for developing a soundscape classification model, *Sci. Total Environ*, pp. 482-483, pp. 440-451, 2014
- [14] M. Rychtarikova & G. Vermeir, Soundscape categorization on the basis of objective acoustical parameters, *Appl. Acoust.* 74, pp. 240-247, 2013
- [15] G. Bennett, E. King, J. Curn, V. Cahill, F. Bustamante & H.J. Rice, Environmental noise mapping using measurements in transit, in *Proceedings of ISMA2010 Including USD2010*, 2010
- [16] A. Can & B. Gauvreau, Describing and classifying urban sound environments with a relevant set of physical indicators, *Journal of Acoustical Society of America*, submitted for publication.
- [17] L. Dekoninck, D. Botteldooren & L. Int Panis, An instantaneous spatiotemporal model to predict a bicyclist's Black Carbon exposure based on mobile measurements, *Atmos Environ* 79, pp. 623-631, 2013
- [18] A. Can, L. Dekoninck & D. Botteldooren, Measurement network for urban noise assessment : Comparison of mobile measurements and spatial interpolation approaches, *Applied Acoustics*, Volume 83, pp. 32-39, September 2014
- [20] C. Kardous & P.B. Shaw, Evaluation of smartphone sound measurement, *J. Acoust. Soc. Am.* 135 (4), April 2014
- [21] C. Lavandier, P. Delaitre, E. D'Hondt, B.E. Gonzalez & K. Kambona, Urban sound quality assessment with mobile technology : the Cart Asur project in ACOUSTIS2013NEWDELHI, New Delhi, India, November 10-15, 2013
- [22] R. Rana, C.T. Chou, N. Bulusu, S. Kanhere & W. Hu, Ear-Phone : A Context-Aware Noise Mapping using Smart Phones, *Pervasive and Mobile Computing*, DOI : 10.1016/j.pmcj.2014.02.001, 2014
- [23] L. Brocolini, C. Lavandier, C. Marquis-Favre, M. Quoy, and M. Lavandier, Prediction and explanation of sound quality indicators, in *Proceedings of the ACOUSTICS2012*, Nantes, France, pp.2127-2132, 2012
- [24] T. Kohonen, *Self -Organization and Associative Memory*, Springer, 1989
- [25] L. Brocolini, C. Lavandier, M. Quoy, and C. Ribeiro, Measurement of acoustic environments for urban soundscapes : choice of homogeneous periods, optimization of durations, and selection of indicators, *J. Acoust. Soc. Am.* 134 (1), pp. 813-821, 2013