

Modélisation et représentation de la qualité des environnements sonores en ville et pour le piéton

Catherine Lavandier

ETIS - UMR 8051
Université de Cergy-Pontoise Saint-Martin
2, avenue Adolphe Chauvin
95032 Cergy Pontoise CEDEX
France
E-mail : catherine.lavandier@u-cergy.fr

Pierre Aumond, Arnaud Can

IFSTTAR
DAME/LAE
Route de Bouaye
CS 4
44341 Bouguenais
France
E-mail : pierre.aumond@ifsttar.fr et arnaud.can@ifsttar.fr

Carlos Ribeiro

Bruitparif
Axe Pleyel 4 B104
82, boulevard Ornano
93200 Saint Denis
E-mail : carlos.ribeiro@bruitparif.fr

L'objectif des projets de recherche présentés dans cet article était de proposer des indicateurs de qualité sonore, à l'échelle du quartier ou de la ville, en croisant des données acoustiques, perceptives et géographiques. Le recueil des données acoustiques et perceptives a été réalisé soit par l'intermédiaire de téléphones mobiles dans le cadre du projet Cart_ASUR, soit, dans le cadre du projet GRAFIC, par l'intermédiaire de capteurs fixes de faibles coûts installés en façades d'immeubles ainsi que par l'intermédiaire de ces mêmes capteurs mais mobiles. Les données ont été recueillies dans les 13^e et 14^e arrondissements de Paris, retenus car ils présentaient une grande variété de topologies urbaines. De nombreuses données acoustiques et perceptives ont ainsi été analysées. Les résultats des questionnaires perceptifs seuls montrent que l'agrément sonore perçu en un lieu par des piétons peut être expliqué par l'intensité sonore perçue à cet endroit, mais aussi par le temps de présence perçu de sources sonores telles que la circulation, les voix (qui traduisent la présence des êtres humains), et les oiseaux (qui traduisent la présence de la nature en ville). Ces quatre variables expliquent entre 80 et 90% de la variance des réponses sur l'agrément sonore, moyennées en chacun des points évalués, sur l'ensemble des personnes questionnées. Si l'on souhaite expliquer l'agrément sonore moyen à l'aide de la mesure acoustique, le L_{A50} explique à lui seul environ 80% de la variance. Il a aussi été montré que cet indicateur est très bien corrélé à la notion d'intensité sonore perçue (meilleure corrélation qu'avec l'indicateur réglementaire L_{Aeq}). L'analyse a montré que pour améliorer la modélisation, il faut avoir accès à la variabilité du signal ($L_{A10} - L_{A90}$) ou, mieux encore, au spectre du signal afin de discriminer les différents types de sources sonores. Enfin, il est aussi possible de modéliser les variables perceptives en analysant les données géographiques que les grandes villes possèdent dans leurs bases de données au sein de Systèmes d'Information Géographiques (SIG), telles que la présence de parcs, magasins, trafic routier, etc. Une régression linéaire multiple basée sur l'utilisation de ces données a permis de modéliser l'agrément sonore moyen avec une variance expliquée de 68%. Ces différentes approches de modélisation de l'agrément sonore moyen à l'aide de ces types de données ont alors permis de proposer des cartes de qualité sonore urbaine.

Les cartes de bruit des agglomérations, construites aujourd'hui pour répondre à la Directive européenne 2002/49/CE [1], sont calculées principalement à partir d'un recensement du trafic des infrastructures de transports. Elles affichent des indicateurs moyens comme les L_{den} (moyenne énergétique pondérée des niveaux jour, soirée et nuit). Les niveaux sonores ainsi représentés ne tiennent compte ni de sources telles que les oiseaux ou les voix, ni des émergences sonores liées par exemple aux deux roues, qui influent néanmoins sur la perception de la qualité des environnements sonores. Pour proposer des cartes de qualité sonore de l'espace public, et non plus uniquement de bruit de trafic, il est

nécessaire d'intégrer toutes ces dimensions qui interviennent dans le ressenti des citoyens.

Un premier indicateur de qualité sonore a été proposé en 2012 dans le cadre du projet Quasoart (Indicateurs de qualité sonore en situation urbaine) suite à une enquête de terrain réalisée dans Paris et Lyon auprès de 320 personnes. Cet indicateur modélise l'agrément des environnements sonores ressenti par les piétons en ville (les mots « agrément » ou « agrément sonore » sont souvent utilisés par extension pour décrire le caractère agréable d'un environnement sonore). Il est construit à partir de 13 variables perceptives indépendantes (Tableau 1, page suivante) [2].

Variables	Identifiants	Extrémités de l'échelle sémantique	
Agrément Sonore	AS	Désagréable	Agréable
Animation	A	Sans vie	Animé
Enveloppement	E	Enveloppant	Peu enveloppant
Intensité Sonore Globale	IS	Faible	Fort
Intensité sonore des 2 roues	I2R	Faible	Fort
Intensité sonore des véhicules légers	IVL	Faible	Fort
Intensité sonore des poids lourds/bus	IPL	Faible	Fort
Intensité sonore des klaxons/sirènes	IK	Faible	Fort
Temps de présence de la circulation	TCI	Rarement présent	Continuellement présent
Temps de présence de la voix	TVO	Rarement présent	Continuellement présent
Temps de présence des oiseaux	TOI	Rarement présent	Continuellement présent
Temps de présence de l'eau	TEA	Rarement présent	Continuellement présent
Agrément Visuel	AV	Désagréable	Agréable
Familiarité Sonore	F	Surprenant	Familier

Tabl. 1: Variables influentes pour la modélisation de l'agrément sonore

Bien que le nombre de personnes interrogées fût assez limité (mais suffisant pour effectuer une étude statistique robuste) l'enquête a duré un an environ. Afin de recueillir plus de données et ainsi consolider le modèle, un nouveau projet, nommé Cart_ASUR (Représentations cartographiques de la qualité des ambiances sonores urbaines), a été réalisé entre 2012 et 2015 dans les 13^e et 14^e arrondissements de Paris, en s'appuyant sur la collecte de données à partir de la téléphonie mobile. Il s'agissait alors de recueillir à la fois des données perceptives grâce à la participation de citoyens impliqués, mais aussi de recueillir des données acoustiques grâce au microphone d'un téléphone mobile, dédié et préalablement calibré. Cette fois-ci, plus de 3 400 données perceptives et acoustiques ont pu être recueillies sur un an. Les données acoustiques recueillies via les téléphones portables ne permettaient cependant pas d'avoir accès à la composition spectrale du bruit, ne mesurant que l'évolution temporelle des niveaux de bruit en dB(A). Aussi, en 2014 a démarré le projet GRAFIC (Cartographie fine et continue de la qualité sonore des lieux et des parcours dans l'espace urbain), qui s'est intéressé plus spécifiquement à la caractérisation physique de l'environnement sonore urbain, en installant pendant un an des capteurs sonores de qualité sur les façades de 23 appartements parisiens du 13^e arrondissement, et en installant des capteurs mobiles dans des sacs à dos portés par quelques marcheurs dans ce quartier. Ce projet est aujourd'hui en cours de finalisation.

Ces projets ont permis de proposer des indicateurs de qualité sonore, construits sur des variables perceptives, acoustiques ou géographiques. Des représentations cartographiques de ces indicateurs, qui se devaient d'être compréhensibles par la majorité des citoyens, ont également été proposées et évaluées. Dans cet article, nous allons présenter une synthèse de ces deux derniers projets de recherche vis-à-vis de la modélisation de l'agrément sonore en ville pour le piéton, et de sa représentation cartographique.

Zones d'étude

Lieux évalués à l'aide de téléphones mobiles - Cart_ASUR

Pour mener à bien le recueil des données perceptives et acoustiques dans le cadre du projet Cart_ASUR, il a fallu choisir des lieux et des périodes de mesures pour lesquels l'environnement sonore est relativement homogène. Ces zones correspondent généralement à de grandes formes urbaines telles que des parcs, des boulevards, des places, etc. Leur environnement sonore est constitué en général d'un type de sources prédominantes. Entre deux zones homogènes, il existe une zone de transition, plus difficile à caractériser. Ces zones de transition s'étalent sur une distance de 50m environ, c'est-à-dire 25m de part et d'autre des limites géographiques des espaces urbains typés (parcs, boulevards, etc.) [3]. La variabilité temporelle des environnements sonores est aussi un élément important à prendre en considération, notamment à travers le rythme des journées. Par exemple, l'environnement sonore d'un parc les samedis et dimanches de 15h à 18h est relativement homogène, mais très différent de l'environnement sonore de ce même parc un jour de semaine vers 16h [4]. Ainsi, divers lieux et créneaux horaires ont été définis, pour lesquels l'environnement sonore évalué est homogène. Au total, 31 lieux ont été sélectionnés dans les 13^e et 14^e arrondissements de Paris. Ces arrondissements ont été choisis car ils intègrent une grande variété de typologies urbaines, tout en gardant une zone d'étude de taille acceptable. Au total, dix typologies de lieux ont été étudiées : deux passages (petites rues très peu passantes), 4 rues, trois boulevards, deux rues commerçantes, deux écoles, deux rues de restaurants, deux marchés, 4 carrefours ou places, un cimetière, six jardins et trois zones de transition (Figure 1). Pour chacun de ces lieux, des périodes homogènes ont également été définies. Ces périodes correspondent à des périodes de jour, soirée, nuit. Malheureusement, seules quatre évaluations ont été réalisées de nuit (entre 0h et 2h du matin) par les personnes enquêtées.

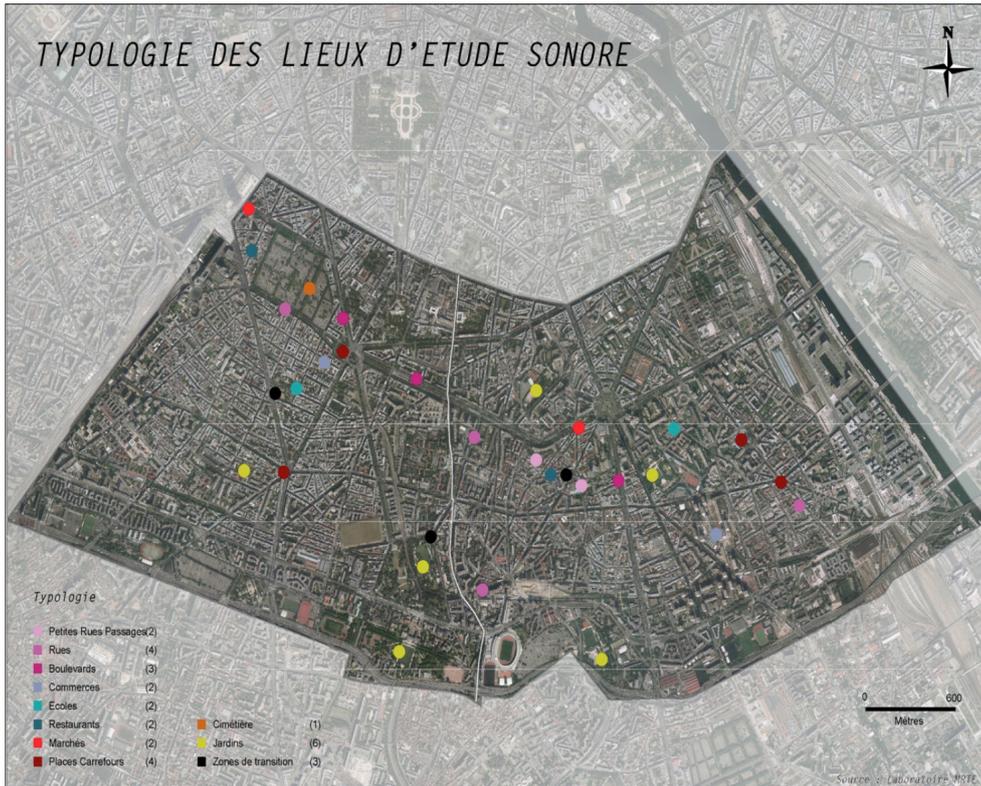


Fig. 1 : Localisation des points d'évaluation du projet Cart_ASUR dans le 13^e et le 14^e arrondissement de Paris

Finalement, le protocole de mesure a regroupé une centaine d'objectifs (un objectif correspondait à un lieu pour un créneau horaire donné). La majorité des lieux ont été évalués plusieurs fois, à des créneaux horaires différents.

Lieux mesurés à l'aide de capteurs acoustiques - GRAFIC

Dans ce projet, des capteurs fixes ont été installés pendant un an sur 23 façades donnant sur les rues du 13^e arrondissement de Paris. Les accès à l'alimentation électrique et à la connexion internet offerts par les participants volontaires ont permis de mesurer en continu pendant un an, entre septembre

2014 et septembre 2015, un grand nombre d'indicateurs acoustiques énergétiques, temporels et spectraux. Pendant ce temps, cinq stations de mesures mobiles ont été utilisées par les chercheurs pour sillonner le quartier où étaient installés les capteurs fixes. L'idée était de parcourir toutes les rues du quartier environ cinq fois pour les petites rues, et trois fois pour les boulevards et grandes rues circulées, afin de recueillir des mesures représentatives des environnements sonores aux endroits et aux périodes enregistrées. Seules des périodes de journées relativement homogènes ont été mesurées : entre 8h et 12h et entre 14h et 18h.

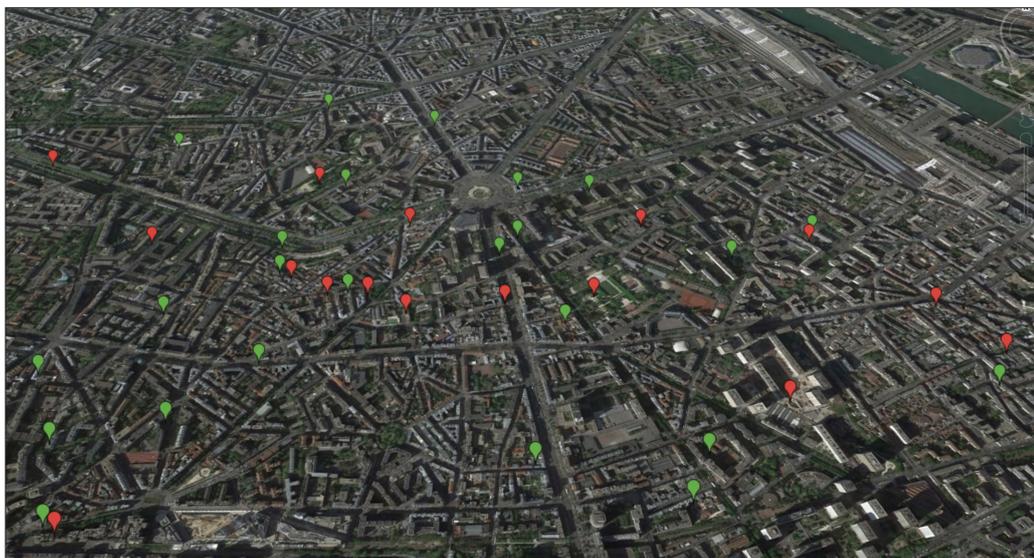


Fig. 2 : Localisation des points de mesures fixes du projet GRAFIC (en vert) et rappel des points d'évaluation du projet Cart_ASUR dans la même zone (en rouge)

Collecte des données

Projet Cart_ASUR

Pour recueillir les données perceptives et acoustiques sur chaque objectif, 60 participants ont été recrutés [5]. Ils devaient réaliser 51 mesures en période "chaude" (d'avril 2012 à septembre 2013) et refaire les 51 mêmes mesures en période "froide" (d'octobre 2013 à mars 2014). Le téléphone portable leur était offert, de manière à ce que tous les participants aient le même modèle et ainsi faciliter la calibration des appareils. L'abonnement d'un an à la connexion mobile 3G leur a aussi été offert.

Pour la réalisation des évaluations, une application mobile fonctionnant sous Android, l'application Cart-ASUR, a été spécialement développée par l'équipe BrusSense de l'Université libre de Bruxelles (VUB). L'application est une extension de l'application NoiseTube [6], qui permet d'enregistrer les niveaux sonores en dB(A) à partir du microphone des téléphones portables [7]. L'application Cart-ASUR vient compléter ces données acoustiques par des données perceptives, grâce à un questionnaire renseigné par les participants sur chacun des objectifs.

Chaque mesure s'est déroulée ainsi: Le niveau sonore était enregistré durant 10 minutes (évolution de $L_{Aeq,1s}$), puis un questionnaire perceptif était complété (Figure 3).

Projet GRAFIC

Dans le cadre du projet GRAFIC, l'expérimentation a consisté en des mesures acoustiques réalisées par des capteurs mobiles, en parallèle desquelles un parcours spécifique a été évalué par une quarantaine de personnes à l'aide de questionnaires (Figure 4).

Pour l'étude des parcours, trois questions ont été rajoutées afin d'évaluer l'environnement sonore des trajets entre les différents points d'évaluations, mais aussi de l'ensemble ou d'une partie du parcours global.

Indicateurs acoustiques

Les mesures acoustiques ont été effectuées par les participants via leur téléphone mobile pour le projet Cart_ASUR. Elles ont été effectuées après un calibrage des téléphones mobiles distribués. Le choix du téléphone s'est porté sur le HTC One X qui avait une sensibilité et une réponse en fréquence de bonne qualité entre les fréquences 125Hz et 5000 Hz, et adaptée aux niveaux classiques rencontrés en contexte urbain [7]. Pour le projet GRAFIC, les mesures ont été effectuées à l'aide de capteurs développés par la société ASAsense¹, calibrés en laboratoire et installés sur les façades des immeubles à une hauteur maximum correspondant au 5^{ème} étage.

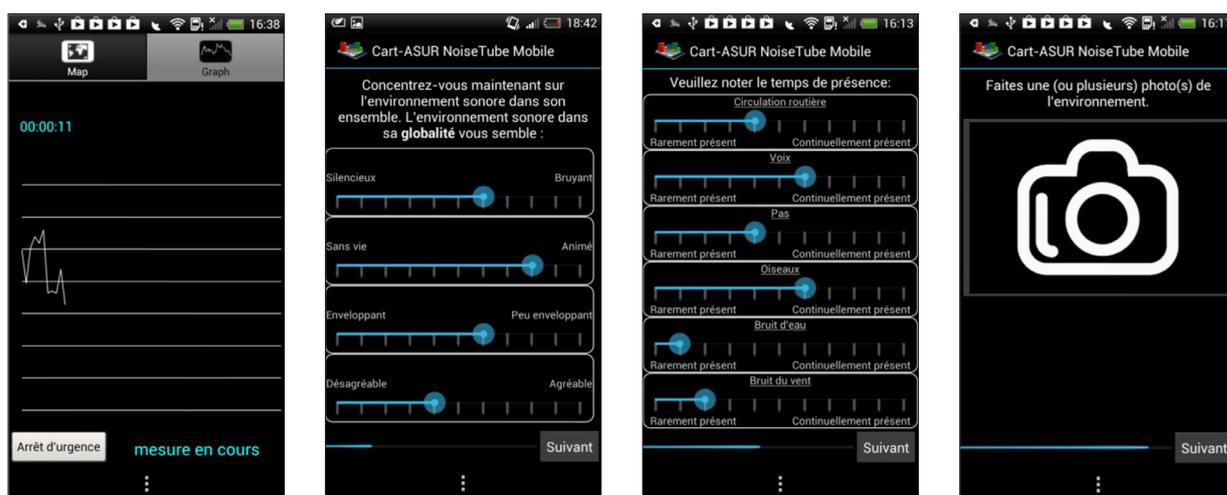


Fig. 3 : Exemples de capture d'écran du questionnaire utilisé pour recueillir les données perceptives sur les téléphones

Le questionnaire se composait de trois grandes parties reprenant dans l'ensemble les variables retenues précédemment dans le projet Quasoart (Tableau 1) :

- Une évaluation globale de l'environnement : conditions météorologiques, agrément sonore, agrément visuel... ;
- Une évaluation de l'intensité sonore pour les sources émergentes, de 1 (faible) à 11 (fort) ;
- Une évaluation du temps de présence pour les sources qui n'émergent pas beaucoup du bruit de fond, de 1 (rarement présent) à 11 (continuellement présent).

A la fin de chaque mesure, le participant était invité à prendre une ou plusieurs photos du lieu évalué.

Ainsi, dans le cadre de ce projet, 3 409 mesures complètes ont pu être recueillies au cours d'une année complète (3 409 * 10 * 60 niveaux sonores de 1s + 3 409 * 15 données perceptives + 3 409 photos au moins).

Ces mêmes capteurs ont aussi été utilisés pour recueillir les données acoustiques mobiles, synchronisées avec des traces GPS. Ces derniers capteurs ont permis de mesurer des indicateurs spectraux qui n'avaient pas pu être mesurés avec l'application Cart_ASUR.

Le "Time and Frequency Second Derivative" (TFSD) est un indicateur développé spécialement dans le cadre du projet GRAFIC. Il représente les variations la fois en temps et en fréquence de l'énergie sonore (Eq.1).

$$TFSD(f, t) = \frac{\left| \frac{d^2 L(f, t)}{df dt} \right|}{\sum_{f=16kHz}^{f=31,5Hz} \left| \frac{d^2 L(f, t)}{df dt} \right|} \quad (1)$$

où f les bandes d'octave comprises entre 31,5 Hz à 16 kHz.

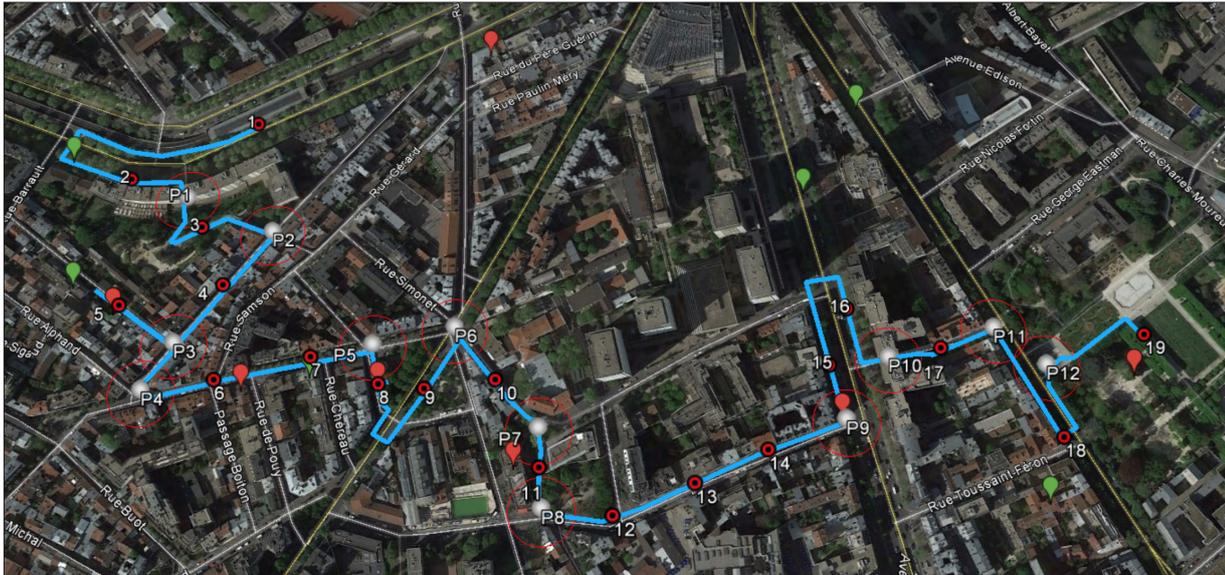


Fig. 4 : Visualisation cartographique des parcours. En goutte verte, les stations fixes de mesures de bruit du projet GRAFIC ; en goutte rouge les points d'évaluation du projet Cart_ASUR ; en rond gris les transitions connues a priori ; les points rouges numérotés correspondent aux 19 points d'évaluation des parcours

Le "Spectral Flatness Deviation" (SFD) est un indicateur (Eq.2) qui caractérise les voix dans un enregistrement sonore [8]

$$SFD(t) = \frac{e^{\left(\frac{\sum_{f=16\text{kHz}}^{31,5\text{Hz}} \ln(L(f,t))}{10} \right)}}{\sum_{f=16\text{kHz}}^{31,5\text{Hz}} \ln(L(f,t))} \quad (2)$$

Modélisation de l'agrément sonore

Trois types de données sont utilisés pour modéliser l'agrément sonore moyen perçu par un piéton en ville : des données perceptives, des données acoustiques, ou des données géographiques.

Modélisation de l'agrément à partir des données perceptives

Un travail préalable sur la classification des situations urbaines a montré que 6 classes principales d'environnements sonores se dégagent sur les 13^e et 14^e arrondissements [9] :

- Les boulevards où la circulation est continue ;
- Les petites rues où les passages de véhicules sont entendus et émergent du bruit de fond. Les boulevards en période de soirée et la nuit se retrouvent naturellement dans cette classe ;
- Les rues commerciales où les voix des passants dominent ;

- Les parcs et jardins où les sources naturelles comme les chants d'oiseaux composent le paysage sonore ;
- Les lieux de transition où toutes les sources sont présentes (entrée d'un parc le long d'une artère circulée par exemple) ;
- Les lieux où l'environnement sonore est très pauvre en sources (rue piétonne l'hiver par exemple).

Il est possible d'établir un lien entre l'agrément sonore et les variables explicatives pour chacune de ces 6 classes, mais dans une approche de modélisation de l'agrément sonore, cela impliquerait tout d'abord de devoir classer chaque lieu, ce qui peut s'avérer difficile a priori. Dans la suite de cet article, tous les lieux ont donc été regroupés dans une seule et même classe. Le modèle général proposé dans le cadre du projet Cart_ASUR relie alors l'agrément sonore en ville et les variables perceptives qui ont une influence significative sur l'agrément sonore (Eq.3). Notons que les variances expliquées (la mesure de la variance permet de quantifier la qualité des modèles proposés) sont toutes calculées à partir des R^2 ajustés des modèles. Les modèles sont construits sous la forme de régressions linéaires multiples, construites pas-à-pas. Dans le projet Cart_ASUR, la modélisation proposée de l'agrément sonore, sur la base de variables perceptives, permet d'expliquer 34% de la variance des 3409 réponses individuelles des participants. La variance expliquée atteint 80% si l'on prend les moyennes des réponses des participants sur les 204 situations différentes (31 lieux à différents moments de la journée et à deux saisons différentes).

Variables	Identifiants	Extrémités de l'échelle sémantique	
Agrément sonore du trajet	AST	Désagréable	Agréable
Changement d'environnement sonore	CAM	Identique	Très différente
Rapidité du changement d'environnement sonore	RCAM	Brusque	Progressif

Tabl. 2: Variables supplémentaires à celles déjà présentées dans le tableau 1, permettant la modélisation de l'agrément sonore dans le cadre du projet GRAFIC

Indicateurs	Description
L_{Aeq}	Niveau sonore équivalent pondéré A $L_{Aeq,T}$ calculé sur une période de 10 minutes à partir des $L_{Aeq,1s}$ $L_{Aeq,\Delta t} = 10 \log \left(\sum_{t=1}^T 10^{\frac{L_{Aeq,1s}(t)}{10}} \right)$
L_{Amax}	Niveau $L_{Aeq,1s}$ maximum sur la période de 10 minutes
L_{Amin}	Niveau $L_{Aeq,1s}$ minimum sur la période de 10 minutes
L_{AX}	Niveau dépassé X% du temps par rapport à la durée d'analyse pour des valeurs de X = 5, 10, 50, 90 et 95
σ	Ecart type calculé sur les 10 minutes, à partir du $L_{Aeq,1s}$, où N est le nombre de valeurs $L_{Aeq,1s}$ $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L_{Aeq,1s} - \bar{L}_{Aeq,1s})^2}$ avec $\bar{L}_{Aeq,1s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_{Aeq,1s}$
$L_{A10} - L_{A90}$	Différence entre les niveaux L_{A10} et L_{A90} caractérisant la dynamique des niveaux sonores observés
TNI	Traffic Noise Index, noté $TNI = 4 (L_{A10} - L_{A90}) + L_{A90} - 30$
Harmonica	$Harmonica = 0,2 * (L_{A95} - 30) + 0,25 * (L_{Aeq} - L_{A95})$

Tabl. 3: Indicateurs acoustiques calculés dans le projet Cart-ASUR sur la période des 10 minutes d'enregistrement, à partir du stockage du niveau sonore en dB(A) avec une résolution temporelle de 1 seconde.

Ce résultat montre qu'une part importante de la variance pourrait être potentiellement expliquée par des variables inhérentes à l'individu (qui correspond à une partie du passage de la variance expliquée de 34% à 80%), et que le modèle proposé pour prédire l'agrément sonore moyen d'un lieu à une période donnée a un fort pouvoir explicatif.

Le modèle proposé dans le cadre du projet Cart_ASUR, est le suivant :

$$AS = 8.11 - 0.38 * (IS) + 0.20 * (TVO) + 0.15 * (TOI) - 0.14 * (TCI) \quad (3)$$

Où AS décrit l'agrément sonore (note entre 1 et 11), IS est l'intensité sonore perçue, TVO le temps de présence des voix, TOI le temps de présence des oiseaux, et TCI le temps de présence de la circulation. Les coefficients positifs ou négatifs sont cohérents du point de vue perceptif :

- l'intensité sonore IS a la plus forte influence négative sur la qualité sonore ;
- le temps de présence de la circulation TCI renforce cet effet négatif de la présence du trafic routier ;
- la présence des voix TVO est perçue positivement, la présence humaine en ville étant plutôt appréciée des participants ;
- la présence des chants d'oiseaux TOI améliore l'agrément sonore.

Dans le projet GRAFIC, le modèle calculé sur les 19 points évalués seulement dans la période de jour par les 40 participants est très similaire, et explique 90% de la variance des moyennes des réponses due à la variabilité des lieux :

$$AS = 9.70 - 0.47 * (IS) + 0.12 * (TVO) + 0.09 * (TOI) - 0.21 * (TCI) \quad (4)$$

Enfin, si l'on croise les différents lieux évalués de jour uniquement dans le cadre des deux projets (31 lieux différents pour le projet Cart_ASUR dont 4 lieux ont été mesurés deux fois dans la journée et 19 lieux différents pour le projet GRAFIC), la régression correspond alors à l'équation 5. Dans ce cas, la variable "Intensité Sonore" est corrélée à la variable "Temps de présence

de la Circulation", et une seule de ces deux variables est donc présente dans le modèle retenu. La variance expliquée est alors de 88%.

$$AS = 8.80 - 0.75 * (IS) + 0.32 * (TVO) + 0.18 * (TOI) \quad (5)$$

Ces différentes analyses montrent que les modèles proposés sont robustes. En effet, même si les deux projets partagent la même zone d'étude, ils sont espacés de plus de deux ans, et les méthodes de collecte de données étaient différentes. Les modèles construits mettent en évidence également les quatre variables perceptives principales qui permettent d'expliquer l'agrément sonore moyen ressenti par le piéton dans l'espace public en ville.

Modélisation de l'agrément à partir d'indicateurs acoustiques

Les indicateurs acoustiques mesurés dans les différents projets ont été croisés avec l'agrément sonore des lieux. Pour le projet Cart_ASUR, le meilleur modèle entre agrément sonore et indicateurs acoustiques correspond à l'équation 6.a et explique 60% de la variance des réponses moyennes d'agrément. Il faut noter que la variance expliquée par le L_{50} seul est de 46%. Ce L_{50} est l'indicateur qui explique au mieux la notion d'intensité sonore moyenne perçue, puisque leur corrélation atteint 0,82 tandis que la corrélation entre l'intensité sonore et le L_{Aeq} n'est que de 0,76.

$$AS = 16,92 - 0,15 * L_{A50} - 0,06 * L_{A10} - L_{A90} \quad (6.a)$$

Il est possible de transformer l'agrément sonore estimé sur l'échelle de 1 à 11 en désagrément sonore (Désagrément DES = 11 - Agrément AS). Le modèle prend alors la forme suivante :

$$DES = -5,9 + 0,15 * L_{A50} + 0,06 * L_{A10} - L_{A90} \quad (6.b)$$

Il est intéressant de noter que ce modèle est très similaire à l'indicateur Harmonica [10], qui caractérise la gêne des riverains, et se base également sur des indicateurs énergétiques (Eq. 7).

Description		Unité
Niveaux équivalents		
	L_{Aeq}	dB(A)
	L_{Ceq}	dB(C)
Valeurs extrêmes		
	L_{Amax}, L_{Amin}	dB(A)
	L_{Cmax}, L_{Cmin}	dB(C)
Niveaux percentiles		
	$L_{A01}, L_{A05}, L_{A10}, L_{A50}, L_{A90}, L_{A95}, L_{A99}$	dB(A)
	$L_{C01}, L_{C05}, L_{C10}, L_{C50}, L_{C90}, L_{C95}, L_{C99}$	dB(C)
Indicateurs dynamiques		
	Ecart type des $L_{Aeq,1s}$	dB(A)
	$L_{A10} - L_{A90}$	dB(A)
Indicateurs d'événements		
	Nombre d'événements dépassant 55, 60, 65, 70, 75 ou 80 dB(A)	/
	Nombre d'événements dépassant $L_{A10}, L_{A50}, L_{A50+3}, L_{A50+10}, L_{A50+15}, L_{A50+20}$	/
	Nombre d'événements dépassant $L_{Aeq}+10, L_{Aeq}+15$	/
	MIL (mask index), temps cumulé pendant lequel les seuils précédents sont dépassés	s
Indicateurs temporels		
	ML (Music-likeness) : indicateur basé sur la transformée de Fourier des $L_{Aeq,1s}$, décrivant le caractère musical du signal sonore	/
	Soudaineté (i.e. valeur moyenne des $\delta L_{Aeq,1s}$), où $\delta L_{Aeq,1s}$ est la valeur absolue de la différence entre deux $L_{Aeq,1s}$ consécutifs	dB(A)
	Valeurs percentiles des $\delta L_{Aeq,1s}$	dB(A)
	F_{max} (fréquence où la densité spectrale dans l'enveloppe est maximale)	Hz
	IR (fraction d'énergie en 1/3 d'octave autour de la fréquence F_{max})	/
Indicateurs spectraux		
	Centre de gravité spectrale dans les bandes [20Hz, 20kHz], [20Hz,8kHz], [125Hz, 8kHz]	Hz
	Tonalité 1/3 d'octave	/
Indicateurs psychoacoustiques		
	Sonie moyenne N de Zwicker	Sone
	Valeurs percentiles des sonies : $N_{01}, N_{05}, N_{10}, N_{50}, N_{90}, N_{95}, N_{99}$	Sone
	Acuité moyenne S (selon les modèles de Zwick et de Fastl)	Acum
	Valeurs percentiles des acuités : $S_{01}, S_{05}, S_{10}, S_{50}, S_{90}, S_{95}, S_{99}$	Acum
Indicateurs agrégés		
	Traffic Noise Index TNI	dB(A)
	Noise Pollution Level NPL	dB(A)
	Harmonica Index	/
Autres indicateurs		
	Time and Frequency Second Derivative (TFSD), Spectral Flatness Deviation SFD	/

Tabl. 4 : Indicateurs acoustiques calculés toutes les 10 minutes dans le projet GRAFIC pendant 1 an, à partir des mesures de niveaux sonores enregistrés en 1/3 d'octaves avec une résolution temporelle de 125 ms

$$HI = 0,2 * (L_{A95}-30) + 0,25 * (L_{Aeq}-L_{A95}) = -6 + 0,25 * L_{Aeq} - 0,05 * L_{A95} \quad (7)$$

Les résultats obtenus lors du projet GRAFIC montrent que si l'on introduit des indicateurs spectraux qui permettent de discriminer différentes sources sonores, comme l'indicateur TFSD_{500Hz}, qui est corrélé au temps de présence perçu des voix ($r=0,53$), ou le TFSD_{4KHz}, qui est corrélé au temps de présence perçu des oiseaux ($r=0,76$), le modèle permet alors d'expliquer 85% de la variance [11]. Il faut noter néanmoins que dans le projet GRAFIC, et par la construction même de l'expérience (il y avait moins de lieux à évaluer, davantage d'évaluations pour un même évènement sonore et une meilleure qualité de mesure que dans le projet Cart_ASUR), le L_{50,1KHz} apporte à lui seul 82% de la variance expliquée.

$$AS = 16,48 - 0,25 * L_{50,1KHz} + 15,82 * TFSD_{500Hz} + 16,82 * TFSD_{4KHz} \quad (8)$$

Quoi qu'il en soit, les parts de variance expliquées sont inférieures à celles des modèles perceptifs. On peut alors émettre l'hypothèse qu'à l'aide d'outils de reconnaissance de sources ou d'objets sonores plus performants que de simples indicateurs acoustiques, le pouvoir explicatif de modèles basés sur des signaux sonores pourrait encore augmenter. Cet effort de recherche est en cours, réalisé dans le cadre du projet ANR CENSE dont le terrain d'étude est la ville de Lorient. Des capteurs sonores seront installés sur des lampadaires avec un maillage spatial très fin, de l'ordre de 40m. Des études perceptives et la mise en place de tels outils devraient donc permettre d'améliorer ces modèles [12].

Modélisation de l'agrément sonore à partir de données géographiques

Nous avons vu que l'identification des sources sonores permet d'affiner la modélisation de l'agrément sonore en ville. Dans le cadre des projets Cart_ASUR et GRAFIC, le temps de présence perçu des différents types de sources a été modélisé à l'aide de données géographiques disponibles dans les bases de données des villes.

Densités de sources sonores calculées à partir des données cartographiques

Les données géographiques sont généralement des données vectorielles, ponctuelles ou linéaires. Pour pouvoir calculer une valeur associée à chacune des variables géographiques en tous les points de la ville, il faut transformer ces données vectorielles en données sur chaque pixel de la carte (ou raster). Pour ce faire, l'outil "densité de noyau" a été utilisé [13]. L'idée ici est donc de distribuer l'influence d'une donnée ponctuelle (par exemple les coordonnées géographiques des bars de l'arrondissement) sur une zone alentour dont la valeur va décroître en fonction de la distance (qui correspondra à la densité des bars pour chacun des endroits de ville). La distribution de l'influence suit dans notre cas une loi Gaussienne [14]. La valeur s'annule au-delà de la fenêtre de lissage (ou rayon de recherche R). La Figure 5 montre un exemple de création de carte de densité pour un noyau (ou élément urbain) d'une valeur de 10 avec un rayon de recherche de 3 pixels.

Tout au long de ces travaux, le service de la Direction des Espaces Verts et de l'Environnement (DEVE) de la mairie de

Paris a mis à disposition des chercheurs un grand nombre de données géo-référencées (par exemple, la position des arbres, le trafic moyen journalier par rue, ou encore les surfaces de pelouse). Ces données ont donc été utilisées afin de calculer des densités de ces objets géographiques à partir desquels il est possible de chercher la meilleure combinaison pour modéliser des variables perceptives comme le temps de présence de la circulation, des voix ou des oiseaux.

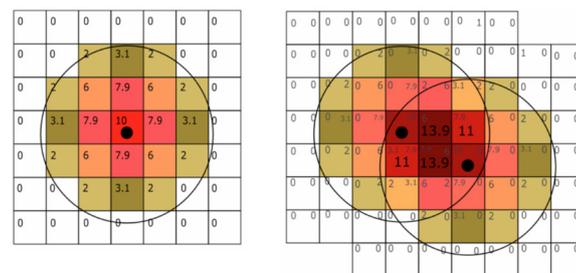


Fig. 5 : A gauche, distribution de la valeur 10 en une densité de noyau sur les pixels alentour (rayon de recherche R = 3 pixels), à droite, addition des densités sur des points consécutifs

Densité de trafic routier

Il s'agit de transformer les données de trafic utilisées pour les cartographies classiques (trafic moyen journalier annuel) en données ponctuelles. Le processus s'appuie sur la création de points sur les lignes de trafic en définissant une distance constante entre chaque point. La valeur affectée à chacun des points a été choisie comme le nombre de véhicules par heure sur le tronçon. L'équidistance ainsi que le rayon ont été optimisés en calculant la corrélation pour les 89 points entre la moyenne des temps de présence de circulation perçus et la densité de circulation, appelée D_Circulation, calculée à l'aide de la densité de noyau (Tableau 5).

DC 10_200	DC 10_100	DC 10_75	DC 10_50	DC 10_25
0,611	0,792	0,838	0,800	0,556

Tabl. 5 : Corrélations entre temps de circulation perçu et densités de trafic. Nomenclature des cartes de densité (D_Circulation) : DC (équidistance entre points)_ (rayon de recherche)

Un rayon de recherche de 75m est optimal : il permet de prendre en compte la distance de propagation du bruit de trafic dans l'espace public tout en évitant de prendre en compte les phénomènes de réflexion et de masquage qui arrivent lorsque les ondes sonores rencontrent un bâtiment, souvent autour de ces 75m par rapport à la position de la source.

Densité des jardins

La carte de densité des jardins, appelée D_Jardins, a été créée dans le but de modéliser en tout point de la carte le temps de présence perçu des oiseaux, en supposant que la corrélation entre ces deux grandeurs est grande. Les données de la couche "jardins" de la base de données BD TOPO® de l'IGN ont été utilisées. Il s'agit d'une couche vectorielle polygonale. Une transformation particulière a été proposée pour montrer que la densité est faible sur le pourtour, de plus en plus forte à l'intérieur du jardin, avec une densité maximale sur la zone centrale du jardin.

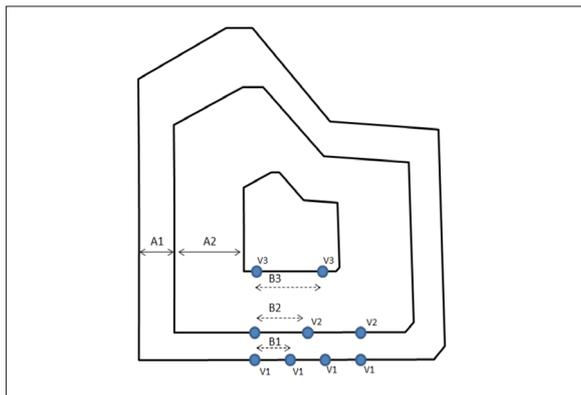


Fig. 6 : Construction des valeurs ponctuelles des jardins, à partir du contour des jardins

La figure 6 montre la transformation du polygone en anneaux successifs dont les valeurs des points respectent trois paramètres. Quand on progresse vers l'intérieur du jardin :

- Les distances entre les anneaux successifs (A1, A2, etc.) sont de plus en plus grandes ;
- L'équidistance entre les points sur les anneaux (B1, B2, etc.) est de plus en plus longue ;
- La valeur de chaque noyau en fonction de sa position dans le jardin (V1, V2, etc.) est de plus en plus grande.

De la même manière que pour la densité de trafic, l'optimisation des paramètres de densité de jardin s'opère en corrélant ces densités avec le temps de présence des oiseaux sur les 89 points évalués perceptivement. Le rayon de recherche est limité à 50m cette fois-ci, légèrement plus faible que celui de 75m utilisé pour la circulation. Cela peut être expliqué car le niveau d'émission sonore des oiseaux est plus faible que celui de la circulation routière. Après avoir testé plusieurs valeurs, les valeurs utilisées qui offrent la meilleure corrélation ($r=0,76$) avec les variables perceptives sont présentées dans le Tableau 6.

Distances entre anneaux (A1, A2...)	0m*	10m	30m	60m
Equidistances (B1, B2...)	15m	20m	25m	30m
Valeurs (V1, V2...)	2	5	10	20

Tabl. 6 : Paramètres de construction des points pour le calcul de la densité de jardin (* bord du jardin)

Densités liées aux voix

Cette carte est créée à partir de plusieurs sources d'information, en cherchant toutes les activités urbaines qui pourraient générer des voix dans l'espace urbain. Cinq éléments ont été pris en compte :

- Les commerces d'alimentation (boulangeries, poissonneries, etc.), (Base BD COM 2001 – APUR)
- Les bars, cafés et restaurants, (Base BD COM 2001 – APUR)
- Les écoles et les zones de sport, (Base BD TOPO®)
- Les marchés (données linéaires construites à partir des données du site Internet de la mairie de Paris)
- Les aires de jeux, (Base BD TOPO®)

Une fois que tous les éléments urbains susceptibles d'être sources de bruit sont transformés en géométrie ponctuelle, ils sont inclus dans une même couche pour créer une seule carte de densité d'objets géographiques liés aux voix appelée D_Voix. Le rayon de recherche optimal est de 50 mètres.

Commerces d'alimentation et restaurants

Ces données sont ponctuelles. Aucune transformation n'est donc nécessaire, mais la localisation se fait à partir des géocodes basés sur l'adresse officielle du commerce. Pour éviter quelques problèmes d'adressages, un outil de "nettoyage" a été employé pour ne laisser qu'un point sur les lieux d'accumulation de commerces.

Ecoles et zones de sport

L'information sur les écoles provient de deux couches : la surface des écoles et celle des bâtiments. Il n'y a aucune information sur la localisation des sorties des écoles (idem pour les espaces sportifs), mais il est possible de localiser la zone de récréation (ou la zone sportive) où les voix sont principalement présentes. Pour localiser la zone de récréation, on peut directement enlever de la surface des écoles tous les bâtiments. On considère que dans les bâtiments le niveau de voix est faible car les élèves suivent leurs cours. Puis, sur cette surface libre, on crée un tampon intérieur d'une distance de 4 mètres, précisant ainsi qu'une surface inférieure à 16 mètres carrés ($4m \times 4m$) n'est pas susceptible d'être lieu de récréation. Finalement, sur les bords de ces surfaces intérieures on crée des points avec une équidistance de 10 mètres (Figure 7).

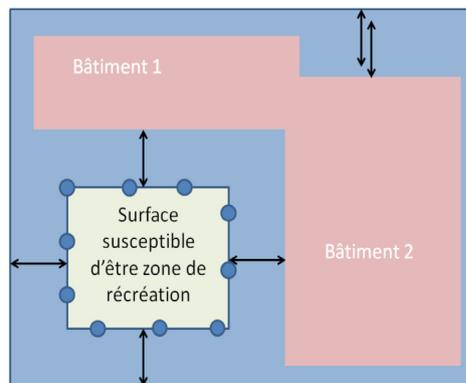


Fig. 7 : Construction des points sources pour la présence des voix d'enfants dans les écoles au moment de la récréation

Les marchés

La couche des marchés a été numérisée à partir de l'information donnée par la mairie de Paris. Cette information détaille les marchés existants pour chaque arrondissement. La numérisation se fait d'abord sous forme linéaire puis ponctuelle. L'équidistance entre les points est de 10 mètres.

Les aires de jeux

La couche "aires_jeux" de la BD TOPO® est une couche vectorielle ponctuelle. Aucune transformation n'est nécessaire pour intégrer cette donnée dans le calcul de la densité de ces aires.

Modèle résultant de l'agrément sonore à partir de données géographiques

À partir de toutes les variables de densités que nous avons à notre disposition, nous pouvons construire la régression linéaire suivante :

$$AS = 11,3 - 1,62 * \log(D_Circulation_10_75) + 0,02 * D_jardins + 0,01 * D_Voix \quad (9)$$

Cette régression, analogue à la régression basée sur des variables perceptives (Eq.5) explique 68% de la variance de l'agrément sonore moyen en chacun des points évalués [15].

Représentations cartographiques

Sur l'ensemble de ces projets, différentes représentations cartographiques ont été proposées et évaluées. Une première représentation s'est intéressée à l'agrément sonore à l'échelle du quartier en s'appuyant sur la dernière régression (Eq. 9). Elle permet de modéliser la qualité sonore de l'espace public (Figure 8), et les valeurs d'agrément sonore ainsi prédites peuvent être représentées sur un plan de quartier.

Une représentation plus détaillée permet, à partir des densités des différentes sources, de montrer l'importance de celles-ci dans l'espace urbain. Deux exemples sont montrés dans la figure 9.

Enfin, dans le cadre du projet GRAFIC, un modèle a été proposé pour décrire l'agrément sonore global d'un trajet (AST, voir Tableau 2) en fonction des mesures physiques recueillies sur celui-ci [11]. Les résultats de GRAFIC ont montré que pour l'évaluation perceptive d'un parcours sur des trajets courts (d'une durée de moins de 5 minutes), les lieux traversés à la fin ont plus de poids sur l'évaluation globale du parcours que les lieux traversés au début de celui-ci. Mais nos observations montrent aussi que ce phénomène perceptif, connu sous le nom d'effet de récence, tend à disparaître sur des parcours plus longs [16]. Ainsi, l'agrément sonore global d'un parcours peut être modélisé par la moyenne arithmétique des agréments sonores des lieux traversés.

Le modèle linéaire trouvé expliquant la plus large part de la variance (54%) est basé sur l'indicateur de niveau sonore $L_{50,1kHz}$. Il s'écrit comme suit :

$$AST = 21.5 - 0.24 * L_{50,1kHz} \quad (10)$$

A partir de ce modèle et à l'aide d'un algorithme d'optimisation du meilleur chemin (algorithme Dijkstra implémenté dans le logiciel OrbisGis [17]), une première version d'un outil a été proposée pour permettre à un piéton de connaître non seulement le chemin le plus court sur un trajet donné, mais aussi le moins bruyant ou le plus agréable (indicateur AST).

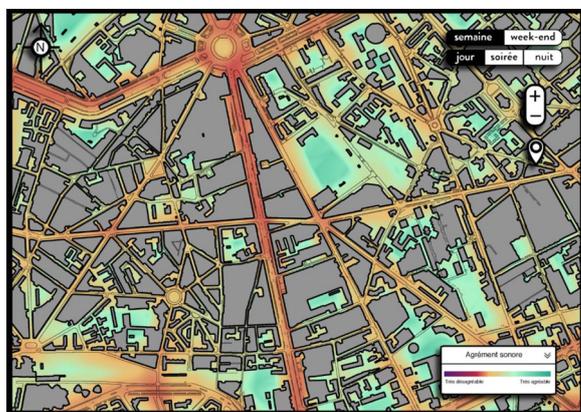


Fig. 8 : Représentation cartographique de la qualité sonore dans l'espace public à l'échelle du 13ème arrondissement pour une période de jour en semaine



Fig. 9 : Détails de la composition des ambiances sonores au jardin Brassai (en haut) et dans la rue de la Butte aux Cailles (en bas)

L'utilisateur peut également ajuster le compromis entre ces deux critères : le chemin sélectionné diffère alors en fonction du poids retenu pour chacun des deux critères (en fonction du paramètre alpha présenté dans la Figure 10). Dans cet exemple, donner beaucoup de poids à l'agrément sonore (forte valeur de α), tend à augmenter la distance parcourue en privilégiant les rues calmes et le parc.

Conclusion

Grâce aux nouvelles méthodologies de collecte de données (téléphones mobiles et participation des citoyens ou capteurs sonores installés en réseaux), et grâce aux études perceptives qui peuvent être conjointement menées, il est possible de mieux appréhender comment les environnements sonores urbains sont perçus. À l'aide des données recueillies en nombre, ces projets ont montré qu'il est possible de modéliser l'agrément sonore moyen perçu par un piéton en ville.

Ces travaux ouvrent de nombreuses pistes de recherche. Par exemple, l'identification de sources sonores de façon automatique permettra de pouvoir calculer les temps de présence de ces sources dans l'environnement directement à partir du signal sonore. Comme cela a été montré, outre le niveau sonore, ces variables ont une influence significative sur l'agrément sonore. Savoir les identifier et les mesurer améliorerait très probablement les modèles de la qualité sonore urbaine. Un travail est aussi nécessaire pour répliquer la construction de ces modèles de régressions linéaires sur d'autres villes que Paris, et ainsi évaluer leur robustesse.

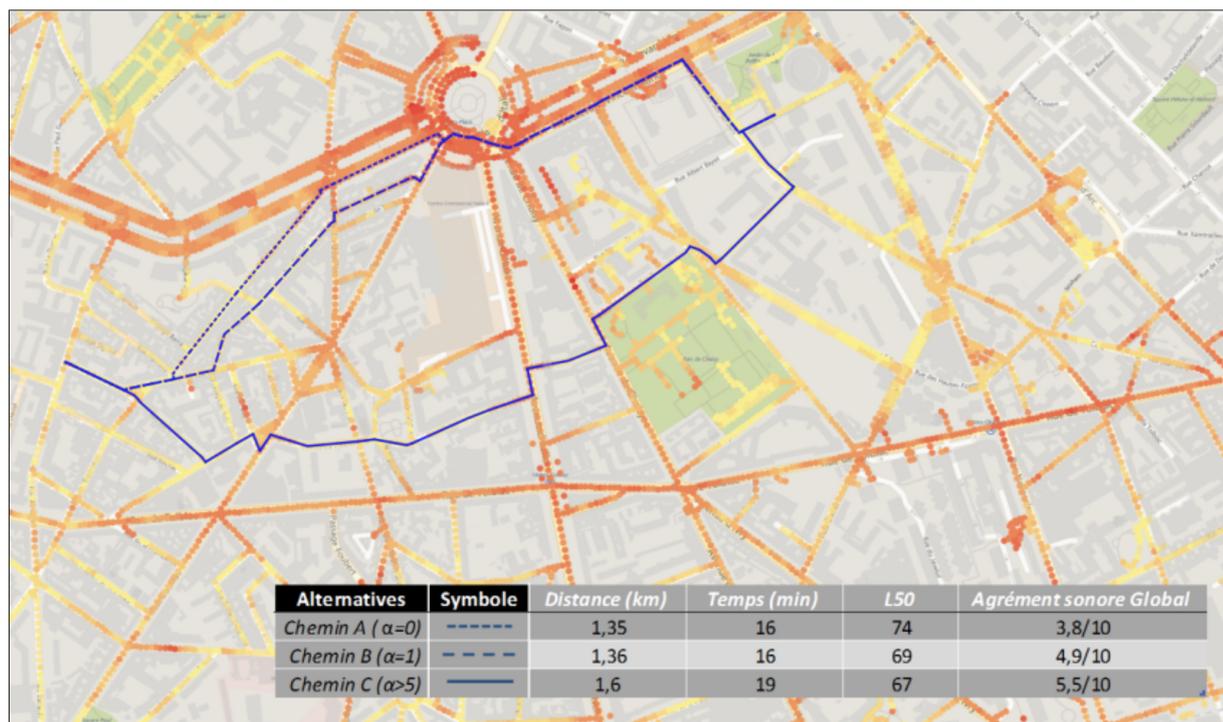


Fig. 10 : Choix d'itinéraires en fonction de l'exposition à différents environnements sonores : le facteur α permet de préciser la demande: plus α est grand, plus l'agrément sonore est recherché ($\alpha=0$ pour l'itinéraire le plus court)

Remerciements

Les auteurs remercient l'ADEME qui a financé les projets de recherche QUASOART (convention n°07 66 C 0158), Cart_ASUR (convention n°12 17 C 0035) et GRAFIC (convention 13 17 C 0028) présentés dans cet article. Les auteurs remercient tous les participants au projet Cart_ASUR (Catherine Dominguès, Saul Gomez et Jean-François Gleyze de l'IGN, Kamal Serrhini et Gaétan Palka de l'Université de Tours, Wolfgang De Meuter, Ellie D'Hondt, Elisa Gonzales Boix et Kennedy Kambona de la Vrije Universiteit Brussel) ainsi que les participants au projet GRAFIC (Bert de Coensel et Dick Botteldooren de l'Université de Gand, Matthieu Sineau et Philippe N'Guyen de Bruitparif). Ils remercient le soutien actif de Kevin Ibtaten et de Philippe Mercier de la mairie de Paris. Un grand merci à Pauline Delaitre de l'Université de Cergy Pontoise et aux stagiaires Sven Michel et Guiral Desnos de l'Ifsttar.

Références bibliographiques

[1] European Parliament and Council, Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise, Official Journal of the European Communities L 189.45, pp. 12-26, 2002

[2] Brocolini L., Caractérisation de l'environnement sonore urbain: proposition de nouveaux indicateurs de qualité, Thèse de l'Université de Cergy Pontoise, 2012

[3] Brocolini L., Lavandier C., Quoy M., Ribeiro C., Discrimination of urban soundscape through Kohonen map, Euro Noise2009, EN09-291, 9 pages, Edinburgh, Ecosse, 2009

[4] Brocolini L., Lavandier C., Quoy M., and Ribeiro C., Measurements of acoustic environments for urban soundscapes: choice of homogeneous periods, optimization of durations and selection of indicators, Journal of the Acoustical Society of America, 134 (1), Pt. 2, 813-821, 2013

[5] Lavandier C., Delaitre P., D'Hondt E., Gonzalez Boix E., Kambona K., Urban sound quality assessment with mobile technology: The Cart-ASUR project, ACOUSTICS2013, New Delhi, India, 2013

[6] D'Hondt E., Stevens M., Jacobs A., Participatory noise mapping works! An evaluation of participatory sensing as an alternative to standard techniques for environmental monitoring, Journal on Pervasive and Mobile Computing: Special Issue on Pervasive Urban Applications. 9(5), pp. 681-694, 2013

[7] Aumond P., Lavandier C., Ribeiro C., Gonzalez Boix E., Kambona K., D'Hondt E., Delaitre P., A study of the accuracy of mobile technology for measuring urban noise pollution in large scale participatory sensing campaigns, Applied Acoustics, Vol. 117 pp. 219-226, 2016

[8] Venkatesha Prasad R., Sangwan A., Jamadagni H. S., Chiranth M. C., Sah R., Gaurav V.: Comparison of voice activity detection algorithms for VoIP. Proceedings ISCC 2002 Seventh International Symposium on Computers and Communications, pp. 530-535, 2002

[9] Ricciardi P., Delaitre P., Lavandier C., Torchia F., Aumond P., "Sound quality indicators for urban places in Paris cross-validated by Milan data", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 138 (4), pp. 2337-2348, Octobre 2015

[10] Miettlicki F., Miettlicki C., Ribeiro C., Gaudibert P., Vincent B., "www.noiseineu.eu: New tools to inform the public about environmental noise in cities and to assist decision-making", Euro Noise 2015, Maastricht, 2015

[11] 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 Acustica united with Acustica, Vol. 103(3), pp. 430-443, 2017

[12] Picaut J., Can A., Ardouin J., Crépeaux P., Dhorne T., Ecotière D., Lagrange M., Lavandier C., Mallet V., Paboeuf M., Characterization of urban sound environments using a comprehensive approach combining open data, measurements, and modeling, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 141(5), pp. 3808, 2017

[13] Silverman B.W., Density Estimation, Chapman and Hall editors, London, 1986

[14] Di Salvo M., Gadais M., Roche-Woillez G., L'estimation de la densité par la méthode du noyau, Notice analytique du DERTU, 2005

[15] Lavandier C., Aumond P., Gomez S., Dominguès C., Urban soundscape maps modelled with geo-referenced data, Noise Mapping Journal, Volume 3(1), pp. 278-294, 2016

[16] Aumond P., Can A., De Coensel B., Ribeiro C., Botteldooren D., Lavandier C., "Global and Continuous Pleasantness Estimation of the Soundscape Perceived during Walking Trips through Urban Environments", Applied Science, Vol. 7(2), n°144, pp.1-16, 2017

[17] Bocher E., Petit G. ORBISGIS: Geographical Information System Designed by and for Research. Wiley. Innovative Software Development in GIS, 2013, 9781848213647.