

Assimilation d'observations participatives issues de l'application mobile Ambiciti

Vivien Mallet, Raphaël Ventura,
Valérie Issarny, Pierre-Guillaume Raverdy
INRIA
2, rue Simone Iff
CS 42112
75589 Paris CEDEX 12
E-mail : vivien.mallet@inria.fr

Résumé

L'application mobile Ambiciti permet à ses utilisateurs de suivre leurs expositions à la pollution sonore et à la pollution de l'air. L'exposition au bruit est estimée par des mesures du microphone du téléphone portable. Une procédure d'étalonnage est appliquée pour corriger les biais de mesure. Les utilisateurs volontaires peuvent partager de manière anonyme leurs mesures, et ainsi participer à une meilleure estimation de la pollution sonore. Les techniques d'assimilation de données, très utilisées en météorologie, permettent de fusionner une carte de bruit simulée et des observations mobiles. Elles tiennent compte des erreurs de simulation et des erreurs d'observation (erreur instrumentale, erreur de représentativité temporelle, erreur de géolocalisation) pour effectuer une fusion équilibrée et produire une nouvelle carte de bruit d'erreur minimale.

Abstract

The mobile application Ambiciti informs people about their exposure to noise and air pollutions. The exposure to noise pollution is estimated based on mobile phone audio recordings. A calibration procedure is in place to correct measurement bias. The users can anonymously share their measurements so as to participate in a collective estimation of noise pollution. Data assimilation techniques, widely used in meteorology, can merge a simulated noise map and mobile observations. They take into account the errors in the simulated map and in the observations (measurement error, temporal representativeness error, location error) for a balanced merging, and they produce a new noise map with minimal error.

La surveillance de l'environnement s'appuie traditionnellement sur l'observation des variables décrivant cet environnement, et sur la simulation numérique des phénomènes physiques. L'observation permet de récolter des mesures de certaines variables, en différents points de l'espace et à différents temps. Selon les capteurs et leurs conditions d'utilisation, les mesures peuvent être fidèles et constituer une solide source d'information. Elles ne donnent cependant qu'une image partielle de la réalité, notamment du fait du nombre limité de points de mesure. La simulation numérique présente l'avantage de calculer la plupart des variables d'intérêt, potentiellement partout et à tout instant. Le développement de modèles libres [1, 2] témoigne de l'intérêt porté aux méthodes numériques. Néanmoins, la modélisation d'un système environnemental est complexe, et les données nécessaires aux simulations sont mal connues. Les simulations numériques sont alors entachées d'erreurs, parfois très élevées.

Les observations sont souvent utilisées pour évaluer les performances des simulations, voire pour les améliorer par des ajustements successifs, réalisés et testés par le modélisateur.

Pour réduire les erreurs de simulation de manière plus automatique, parfois en temps réel, des techniques dites d'assimilation de données [3] se sont développées. Elles exploitent conjointement l'information apportée par les observations et celle produite par les simulations, et elles produisent une analyse. Cette analyse fournit autant d'information qu'une simulation, c'est-à-dire qu'elle décrit les mêmes variables, aux mêmes endroits et aux mêmes dates. Elle est cependant rendue plus fiable grâce aux observations, et pas uniquement aux endroits observés. L'assimilation de données s'est beaucoup développée en météorologie où son apport a été majeur dans les progrès récents des prévisions. Des techniques similaires se sont progressivement répandues dans les autres domaines de l'environnement, y compris en milieu urbain. L'acoustique environnementale peut en bénéficier, et cet article en est une illustration.

Nous nous appuyons sur les cartes stratégiques de bruit, dont les grandes villes européennes sont aujourd'hui dotées, sous l'effet de la Directive européenne 2002/49/CE. Ces cartes sont issues de simulations numériques.

Elles sont imparfaites du fait de multiples incertitudes, par exemple sur les volumes exacts du trafic et de ses émissions, en particulier dans les petites rues dépourvues de boucles de comptage. Certaines villes disposent d'un réseau de mesure du bruit qui fournit des mesures de qualité au cours du temps, mais qui est souvent peu dense. Afin de bénéficier de mesures ayant une couverture spatiale supérieure, au prix d'une moindre précision, nous avons décidé d'exploiter des mesures issues de téléphones portables et nous avons développé l'application mobile Ambiciti avec une dimension de mesure participative. L'utilisation de téléphones portables comme instrument de mesure est expérimentée depuis bientôt une décennie [4], et une revue circonstanciée peut être trouvée dans l'article [5].

Présentation de l'application mobile Ambiciti

L'application mobile Ambiciti a été lancée par Inria, l'institut national de recherche sur les sciences du numérique, sous le nom de SoundCity [6] en juillet 2015, avec le soutien de la Ville de Paris et sa mission « ville intelligente et durable ». L'application est aujourd'hui disponible gratuitement en anglais et en français sur Google Play et sur l'App Store. Ambiciti a été récompensée, dans le concours du Décibel d'Or 2016, par un Décibel d'Argent décerné à Inria et à la Ville de Paris par le Conseil national du bruit.

L'objectif de l'application est de permettre à l'utilisateur de suivre son exposition personnelle à la pollution sonore et à la pollution atmosphérique. Les niveaux de pollution sonore sont mesurés grâce au microphone du téléphone. Les niveaux de pollution atmosphérique sont calculés grâce à la simulation de la qualité de l'air à l'endroit où se situe l'utilisateur. Avec le consentement de l'utilisateur, l'application met en place un suivi des expositions par le déclenchement d'une mesure de bruit et d'une géolocalisation toutes les 5 minutes. Le niveau de qualité de l'air est fourni par les serveurs Ambiciti selon la géolocalisation. L'application stocke ainsi toutes les 5 minutes le niveau de qualité de l'air et le niveau de bruit.

Les niveaux de qualité de l'air sont disponibles partout dans le monde, sur le passé, le présent et sur les quelques jours à venir. Ils sont issus de simulations numériques de la qualité de l'air extérieur, prenant notamment en compte les conditions météorologiques, les émissions des polluants (trafic, industrie, secteur résidentiel, biogéniques), leur transport et leurs réactions chimiques. Sur quelques villes dans le monde, dont Paris, les niveaux de qualité de l'air sont calculés à la résolution de la rue. Tout comme pour le bruit, les variations spatiales de la pollution urbaine sont importantes du fait des différences de trafic d'une rue à l'autre. La résolution de la rue est donc importante pour un bon suivi de l'exposition.

L'estimation de l'exposition au bruit repose uniquement sur la mesure. Lorsque le suivi de l'exposition est activé, une mesure de 5 secondes est réalisée toutes les 5 minutes. Il s'agit d'un niveau LAeq. Le dernier niveau mesuré est affiché sur l'écran d'accueil de l'application. Il est accompagné du niveau de qualité de l'air qui est aussi mis à jour régulièrement.



Fig. 1: Écran d'accueil d'Ambiciti avec la pollution atmosphérique locale et le bruit ambiant (à gauche), et les statistiques d'exposition (à droite).
Ambiciti home screen with local air pollution and ambient noise (left), and exposure statist (right)

L'historique de ces niveaux permet de constituer une évaluation de l'exposition de l'utilisateur aux pollutions. Les moyennes horaires et journalières sont consultables pour le bruit et l'air. La répartition des niveaux d'exposition est affichée sous forme de camembert. La figure 1 l'illustre.

En plus du suivi automatique qui échantillonne le niveau de pollution toutes les 5 minutes, l'application permet la mesure manuelle du bruit, afin que l'utilisateur puisse s'informer du niveau de bruit ambiant à un instant précis. Des écrans d'aide sont accessibles partout dans l'application pour informer l'utilisateur sur les pollutions sonores et atmosphériques. L'aide explicite les effets des pollutions, pointe leurs sources et les risques associés. L'objectif est de faire progresser la compréhension des pollutions environnementales chez les utilisateurs du grand public.

Étalonnage des téléphones

Pour obtenir des mesures de bruit fiables, un étalonnage est nécessaire. Sans cet étalonnage, la plupart des téléphones sous-estiment les niveaux de bruit. En moyenne sur l'ensemble des téléphones, l'écart constaté entre la mesure d'un téléphone sans étalonnage et le niveau réel est de -9 dB(A). Cet écart varie beaucoup d'un téléphone à l'autre: on constate généralement qu'il peut prendre une valeur entre -32,5 dB(A) et 6,9 dB(A). L'écart s'explique par la qualité du microphone, qui a notamment des difficultés à capter les basses fréquences, et par les traitements du système d'exploitation. Un étalonnage est absolument nécessaire pour la plupart des téléphones.

L'étalonnage consiste à corriger l'écart de mesure constaté sur un bruit rose. Un bruit rose est émis par des enceintes en face desquelles un sonomètre de classe 1 et le téléphone sont placés (cf. figure 2). Des mesures de 5 secondes sont prises à différentes intensités sonores, dans une plage adaptée aux capacités de mesure du téléphone. Cette plage varie d'un téléphone à l'autre, et elle couvre au moins l'intervalle [50 dB(A), 70 dB(A)], et souvent plus. Comme nous l'avons vérifié sur une centaine de téléphones, l'écart entre le téléphone et le sonomètre est toujours le même,

quel que soit le niveau sonore dans la plage choisie. Il est donc possible de corriger le niveau mesuré par le téléphone en retirant systématiquement cet écart, appelé biais. Ce biais, très souvent négatif, s'applique sur une plage suffisamment large pour capter les principales variations du bruit dans la journée de l'utilisateur. Ambiciti enregistre cet écart et le retire des mesures passées et futures du téléphone.



Fig. 2 : Procédure d'étalonnage: le téléphone et un sonomètre sont placés en face d'enceintes qui émettent un bruit rose. Des mesures de 5 secondes sont prises à différentes intensités sonores pour estimer le biais du téléphone. Calibration procedure: the cellphone and sound level meter are placed in front of loud speakers that emit a pink noise. 5-second measurements are taken at different sound intensities in order to estimate the cellphone bias.

Dans les cas où le bruit ambiant est faible, par exemple la nuit, le téléphone aura tendance à renvoyer des niveaux trop bas, même après soustraction du biais. On en déduit alors que le bruit est très faible, sans savoir le quantifier avec précision. Généralement, un téléphone montre cette limite en dessous de 40 dB(A). Lorsque le bruit est trop élevé, le téléphone sature et renvoie des niveaux de bruit sous-estimés. Le décrochage s'observe souvent autour de 85 dB(A).

Grâce notamment aux événements de mesure participative, une centaine de téléphones sous Android et iOS ont été étalonnés. Les modèles de téléphone et les biais observés ont été conservés. Les biais des téléphones d'un même modèle sont souvent très similaires.

Lorsqu'un utilisateur installe Ambiciti, l'application utilise par défaut le biais observé pour le modèle du téléphone, s'il est connu.

Par ailleurs, les mesures de bruit sont stockées avec des informations complémentaires telles que la date, la localisation, la précision de la localisation ou encore l'état du capteur de proximité du téléphone. Ce dernier permet notamment de déterminer si le téléphone est dans une poche ou un sac. Ces informations sont utilisées lors du traitement des mesures.

Fonctionnalités complémentaires et avancées

L'utilisateur peut consulter ses mesures de bruit. Celles qui sont géolocalisées sont affichées sur une carte. Cette carte propose aussi le niveau de dioxyde d'azote, à l'échelle mondiale et à l'échelle urbaine avec résolution de la rue pour plusieurs villes (actuellement, Helsinki, Paris et la partie nord de la baie de San Francisco). Ces cartes sont fournies par la PME NUMTECH. La figure 3 l'illustre.

Grâce aux cartes de pollution à la résolution de la rue, l'application Ambiciti fournit un service d'itinéraire. L'application propose un chemin qui minimise l'exposition à la pollution de l'air ou à la pollution sonore. Le service est disponible pour le bruit, l'air ou les deux, selon la disponibilité des cartes de pollution sur les villes. La population couverte est d'environ 30 millions d'habitants, avec Amsterdam, Hambourg, Helsinki, Paris, Grand Londres, Grand Lyon, San Francisco, les villes suisses, etc. La figure 4 donne deux exemples.

Un mode de mesure, dit « de parcours », permet de réaliser des mesures intensives, seul ou en groupe. L'objectif est de permettre la cartographie d'un quartier par des mesures nombreuses et bien contrôlées. Dans ce mode, l'utilisateur choisit la fréquence et la durée des mesures. Les mesures peuvent être prises en continu, ce qui est l'utilisation la plus courante. Le téléphone est tenu par l'utilisateur qui veille à prendre des mesures de qualité. Il peut supprimer manuellement des mesures qui auraient été entachées d'erreurs. La figure 5 illustre le mode « parcours ».

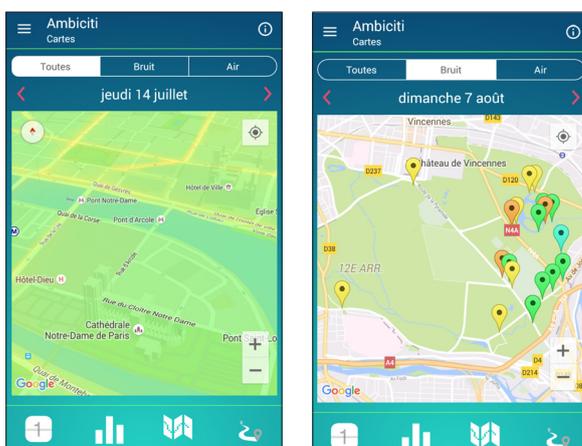


Fig. 3 : Carte de pollution atmosphérique à la résolution de la rue (à gauche), et mesures géolocalisées de bruit (à droite). Air pollution map at street resolution (left), and localized noise measurements (right).

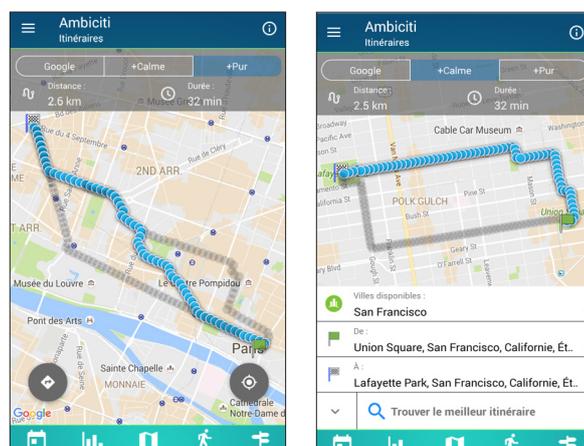


Fig. 4: Service d'itinéraire, ici sur Paris et San Francisco. Ambiciti routing service, here in Paris and San Francisco.

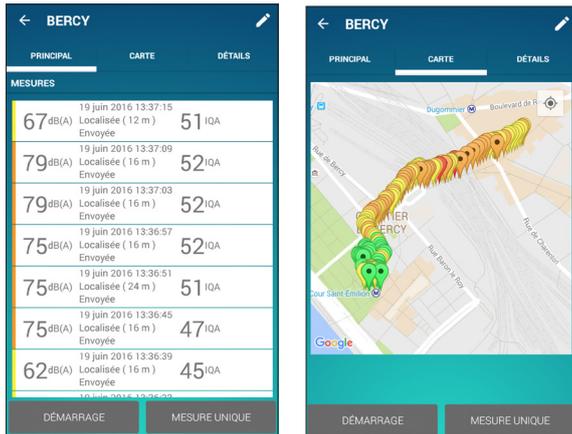


Fig. 5 : Mesures d'un parcours. Ces mesures sont collectées de façon à cartographier un quartier. Measurements from the so-called "journey mode" may be used to map the noise in a neighborhood.

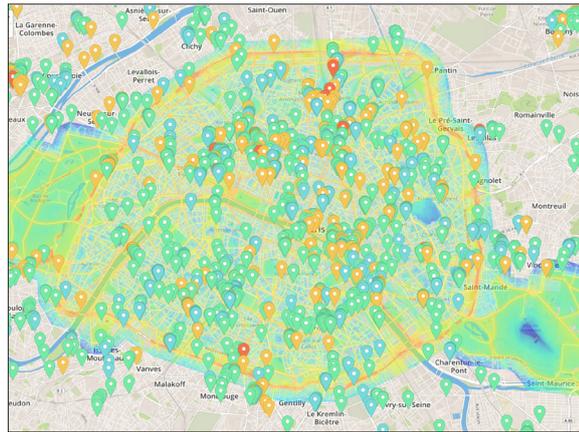


Fig. 6 : Mesures géolocalisées et collectées à Paris sur une période de 8 heures. Localized measurements, collected in Paris during a time period of 8 hours.

Gestion des données

Aucun enregistrement sonore n'est conservé ou envoyé; seul le niveau sonore est enregistré. L'utilisateur peut décider si l'application réalise ou non des mesures automatiques tout au long de la journée. Il peut accepter ou refuser d'envoyer ses mesures de manière anonyme pour analyse par l'équipe Ambiciti. Dans tous les cas, il conserve un accès à ses mesures directement sur le téléphone et peut les exporter dans un fichier pour ses propres analyses. Si l'utilisateur accepte de partager ses mesures de bruit, elles sont communiquées aux serveurs Ambiciti par le téléphone, contribuant ainsi à la mesure participative (« crowdsensing » en anglais). Des informations de contexte sont aussi envoyées. Un identifiant unique, mais anonyme, du téléphone est notamment envoyé pour le suivi au cours du temps sans toutefois révéler l'identité du contributeur.

Mesure participative

Beaucoup d'utilisateurs acceptent de partager leurs mesures collectées automatiquement par Ambiciti. Cette participation apporte un grand nombre de mesures. La figure 6 montre des mesures géolocalisées et collectées dans Paris sur une période de 8 heures. En mai 2017, 84 millions de mesures de 5 secondes avaient déjà été collectées. Cependant, beaucoup de mesures ne sont pas exploitables pour améliorer les cartes de bruit. Certaines sont réalisées alors que le téléphone est dans un sac ou une poche. D'autres ne sont pas géolocalisées. Il faut aussi être capable de distinguer les mesures prises en intérieur de celles prises en extérieur. Le traitement de ces mesures automatiques est donc un sujet difficile.

Toutefois, le mode « parcours » permet d'obtenir des mesures de meilleure qualité car elles sont généralement réalisées avec l'objectif de cartographier un voisinage. Les mesures sont prises en extérieur, les participants prennent soin d'activer une géolocalisation précise et les téléphones sont tenus en main. On constate en pratique que l'ensemble des mesures est de bonne qualité.

Des personnes isolées réalisent des parcours, par exemple pour tester différents trajets entre leur domicile et leur travail. Des associations organisent spontanément des parcours de mesure avec des habitants d'un quartier. L'équipe Ambiciti tient à disposition un protocole pour une réalisation du parcours dans les meilleures conditions.

D'autres parcours ont été organisés par l'équipe Ambiciti, notamment avec la Ville de Paris. Un exemple est la journée sans voitures 2016. Un parcours a été organisé le dimanche précédent cette journée, et un autre le dimanche en question. Ce type d'événement peut attirer des dizaines d'habitants qui souhaitent s'informer sur la pollution sonore. Les parcours sont précédés d'un étalonnage des téléphones des participants, et cette étape est aussi précieuse dans la constitution de la base de biais.

Les occasions d'organiser des parcours ont été multiples: forum ouvert au grand public (Futur en Seine), inauguration d'un lieu (canopée des Halles), journée de sensibilisation (journée sans voitures), lancement de l'application mobile dans une ville (Helsinki, avec Forum Virium), etc. Ces mesures, par leur qualité, sont appropriées pour être assimilées.

Principes de l'assimilation de données

L'assimilation des observations peut prendre plusieurs formes. Une approche répandue est appelée « estimation d'état ». Elle vise à estimer les niveaux de bruit, qui sont généralement simulés par un modèle sur tout un quartier, en fusionnant les résultats de simulation et les observations disponibles. Le résultat est une carte de bruit améliorée, obtenue aux mêmes points que la simulation. Ni la simulation, ni les observations ne sont parfaites; elles sont entachées d'erreurs dont il faut quantifier la plage de variation. La carte produite par l'assimilation, appelée analyse, est construite pour réduire ces erreurs de manière optimale [3]. Une introduction à certains principes de l'assimilation de données est proposée ci-dessous.

Prenons l'exemple en un point unique, par exemple dans un parc, où nous souhaitons estimer le niveau de bruit moyen sur une heure.

D'une part, une simulation numérique fournit une valeur « v ». Cette valeur peut être erronée parce que le trafic routier autour du parc est mal connu, ou encore parce que la végétation crée une barrière qui est mal représentée dans le modèle. Estimons que l'erreur est une variable aléatoire normale (gausienne) d'écart type « σ »; cela signifie en particulier que le vrai niveau de bruit est dans l'intervalle « $[v - 2 \times \sigma, v + \times \sigma]$ » avec une probabilité de 95% environ. D'autre part, une observation « m » (mesure de sonomètre) est relevée sur une durée de 5 minutes. L'instrument de mesure n'est pas parfait. De plus, une mesure de 5 minutes ne représente pas exactement la valeur du bruit sur une heure. Des éléments inhabituels ont pu perturber la mesure, comme un groupe de personnes très bruyantes ou des klaxons dans une congestion momentanée du trafic. Supposons que l'erreur de la mesure soit aussi une variable aléatoire normale avec un écart type « ε ». Ni « v », ni « m » ne sont exacts, mais nous pouvons construire une meilleure estimation avec l'analyse « $a = s + \sigma^2 / (\sigma + \varepsilon)^2 (m - s)$ ». Si nous avons peu confiance dans la simulation (par rapport à l'observation), alors « $\sigma \gg \varepsilon$ » et l'analyse sera très proche de l'observation « $a \approx m$ ». À l'inverse, si la confiance est très faible dans l'observation, avec « $\varepsilon \gg \sigma$ », « $a \approx v$ ». La valeur de l'analyse est une combinaison linéaire de la simulation et de l'observation, avec des poids qui dépendent de la confiance relative accordée aux deux sources d'information.

L'analyse est calculée pour avoir une erreur minimale dans le sens suivant. Si les erreurs de la simulation et de l'observation sont indépendantes, on peut calculer que l'intervalle de confiance à 95% de l'analyse est « $[a - 2 \times \varepsilon \times \sigma / (\varepsilon + \sigma), a + 2 \times \varepsilon \times \sigma / (\varepsilon + \sigma)]$ ». L'écart type « $\varepsilon \times \sigma / (\varepsilon + \sigma)$ » de l'erreur de l'analyse est plus petit que celui de l'erreur de simulation et que celui de l'erreur d'observation. Ces résultats peuvent se démontrer grâce au théorème de Bayes où la simulation est le niveau de bruit *a priori* et l'analyse représente le niveau de bruit (*a posteriori*) connaissant l'observation. Il est possible de généraliser au cas où plusieurs simulations ou plusieurs observations sont disponibles simultanément. La confiance dans l'analyse augmente toujours avec le nombre de sources d'information, à condition de bien connaître la confiance (via l'écart type de l'erreur) qui peut être accordée à chacune de ces sources.

Pour estimer une carte de bruit, on dispose généralement d'une simulation qui couvre toute la carte et des observations en certains points. Pourtant, il est possible de produire une analyse, meilleure que la simulation seule, aux endroits qui ne sont pas observés. Reprenons notre exemple du parc. Nous cherchons cette fois le niveau de bruit à deux endroits du parc. Au premier endroit, la simulation nous donne toujours « v » et nous observons « m ». Au second endroit, la simulation nous indique une valeur de bruit « w » et nous n'y effectuons pas de mesure. Supposons que la simulation est de la même qualité pour « w » que pour « v »: l'écart type de son erreur est toujours « σ ». De plus, l'erreur commise par la simulation sur « v » et celle commise sur « w » sont en partie liées. Par exemple, une erreur dans l'estimation des émissions du trafic autour du parc aura des répercussions dans le même sens pour les deux valeurs (une sous-estimation ou une sur-estimation). Il y a donc une corrélation « α » entre les deux erreurs. Alors, si on corrige en partie cette erreur sur « v » grâce à l'observation « m », comme nous avons vu précédemment,

nous pouvons aussi corriger partiellement l'erreur sur « w ». Au second point, il est en effet possible de calculer cette analyse: « $b = w + \alpha \times \sigma^2 / (\sigma + \varepsilon)^2 (m - s)$ ». S'il n'y a pas de corrélation entre les erreurs (« $\alpha = 0$ »), aucune correction n'est effectuée. Si la corrélation est maximale (« $\alpha = 1$ »), la même correction est effectuée aux deux endroits. À condition de correctement modéliser ou calculer les corrélations spatiales entre les erreurs, il est ainsi possible d'utiliser des observations ponctuelles pour corriger une carte de bruit simulée. Les corrélations spatiales peuvent être estimées par des études d'incertitudes (en propageant notamment les incertitudes sur les sources dans le modèle de simulation) ou par de la modélisation reposant sur des statistiques.

Application de l'assimilation de données

Mettons maintenant en pratique la démarche pour produire une carte horaire de bruit qui fusionne un résultat de simulation numérique et des observations collectées par le « mode parcours » de l'application mobile Ambiciti. La simulation est la carte de bruit stratégique de la ville de Paris, fournie par l'agence d'écologie urbaine de la Ville (direction des espaces verts et de l'environnement, DEVE) et calculée avec le logiciel CadnaA pour le bruit routier. Cette carte a d'abord été temporalisée pour obtenir une estimation du bruit entre 9h et 10h dans un petit quartier du 12^e arrondissement de Paris. Notons que cette étape de temporalisation est une des sources d'erreur de la carte utilisée.

L'étape fondamentale de l'assimilation est la spécification des écarts types des erreurs (de simulation et d'observation) et des corrélations spatiales entre les erreurs. Les erreurs de simulation sont d'abord calculées aux points du réseau Rumeur de Bruitparif, sur l'ensemble de la ville de Paris. Nous en déduisons un écart type d'environ 4 dB(A) pour l'erreur ponctuelle de notre carte horaire.



Fig. 7 : Observations collectées dans un petit quartier du 12^e arrondissement de Paris. Les mesures ont été réalisées avec le mode « parcours » d'Ambiciti. Chaque point représente une mesure de 5 secondes.
Measurements collected in a small neighborhood in Paris 12^e arrondissement (France). These measurements were collected using the journey mode of Ambiciti. Each dot represents a 5-second measurement.

La corrélation spatiale entre les erreurs est modélisée par des produits d'exponentielles, dont une exponentielle décroissante fonction de la distance entre les points le long du réseau routier. Cette partie de la corrélation tient compte de l'influence de l'erreur dans l'estimation du trafic routier: lorsqu'une erreur est commise sur le trafic à un endroit (sous-estimation ou sur-estimation), on suppose qu'elle se retrouve dans le voisinage de ce point. Cette modélisation des corrélations est inspirée de l'assimilation de données à l'échelle urbaine pour la pollution atmosphérique [7].

Les erreurs d'observation sont décomposées en erreur instrumentale, erreur de représentativité et erreur de localisation. L'erreur instrumentale provient des limitations de la mesure du téléphone en extérieur, même après étalonnage. Des comparaisons avec les mesures d'un sonomètre de classe 1 ont permis d'évaluer cette erreur instrumentale. Son écart type est environ de 1,5 dB(A). L'erreur de représentativité provient de l'écart potentiel entre une mesure de 5 secondes et la moyenne du bruit sur une heure. Elle est évaluée en étudiant la variabilité temporelle des niveaux de bruit extérieur. Son écart type vaut environ 5 dB(A). Enfin, l'erreur de localisation tient compte de l'imprécision du positionnement GPS du téléphone. Ce problème de localisation peut attribuer les niveaux mesurés aux mauvais endroits et ainsi dégrader l'assimilation des mesures. L'erreur de localisation varie fortement spatialement. Elle est nulle dans un endroit où le bruit est homogène: on ne commet alors pas d'erreur à utiliser en un point la mesure provenant en réalité d'un autre endroit (puisque les niveaux de bruit y sont identiques). Lorsque les gradients de bruit sont élevés, l'écart type de l'erreur de localisation peut monter à 5 dB(A).

La figure 7 montre les observations collectées par l'application mobile Ambiciti dans le quartier sélectionné. Visuellement, on distingue déjà les différences de niveau entre les rues. Les imprécisions de la localisation apparaissent aussi clairement. La figure 8 montre la carte de bruit simulée et l'analyse, résultat de l'assimilation des observations. La structure de la carte est préservée, en particulier les différences marquées entre les rues, et les

gradients de bruit dans la direction perpendiculaire aux rues. Les niveaux de bruit sont globalement plus faibles après assimilation.

Des mesures sur une durée de 10 minutes ont été réalisées avec un sonomètre de classe 1 dans le quartier. En comparant les résultats à ces observations, on constate que l'erreur quadratique moyenne passe de 4,5 dB(A) pour la simulation à 3,1 dB(A) pour l'analyse. Une même expérience a été réalisée entre 18h et 19h. Dans ce cas, l'erreur est passée de 3,7 dB(A) à 2,6 dB(A). L'assimilation des mesures mobiles permet donc d'améliorer une carte de bruit, parfois très significativement. D'autres tests ont été réalisés pour s'assurer de la qualité des résultats (validation croisée, tests statistiques pour évaluer les écarts types choisis); ils feront l'objet d'une publication scientifique dans un journal de la communauté.

Conclusion

L'application mobile Ambiciti vise à suivre l'exposition individuelle et collective à la pollution sonore et à la pollution de l'air. Elle fournit les niveaux de qualité de l'air partout dans le monde, à la résolution de la rue dans un nombre croissant de villes. Elle propose des services innovants tels le calcul d'itinéraires minimisant l'exposition aux pollutions. L'exposition à la pollution sonore s'appuie sur la mesure du microphone du téléphone et un étalonnage adapté. L'application propose la mesure de bruit manuelle, automatique (à intervalle régulier dans la journée) ou intensive lors d'un parcours. L'utilisateur a la possibilité de contribuer à l'amélioration des cartes de bruit s'il accepte de partager ses mesures.

L'amélioration des cartes repose sur une technique d'assimilation de données, qui fusionne une carte simulée et des observations. La fusion prend en compte la confiance qu'on peut accorder à ces deux sources d'information. Les corrections apportées par les observations sont spatialisées grâce à l'identification de corrélations spatiales entre les erreurs de simulation. Des travaux de recherche autour de la quantification d'incertitude seront menés

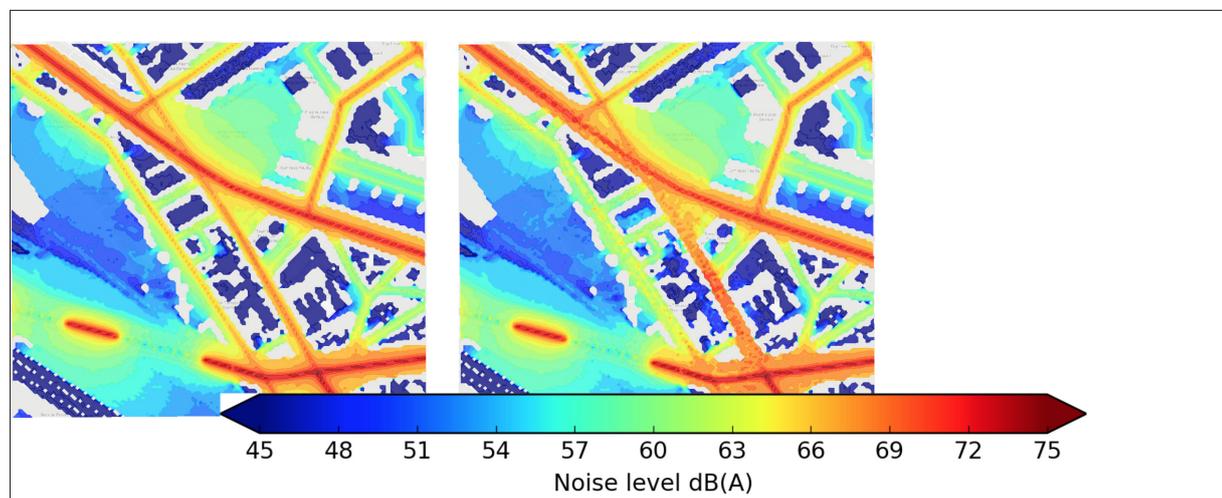


Fig. 8: Carte de bruit simulée (à gauche) et analyse (donc, après assimilation des observations mobiles, à droite).
Simulated noise map (left) and corrected noise map after the assimilation of mobile observations (right).

pour mieux quantifier ces corrélations spatiales, dans le cadre du projet ANR CENSE, porté par le Laboratoire d'Acoustique Environnementale de l'IFSTTAR.

L'application mobile a été développée par Inria, l'institut national de recherche sur les sciences du numérique, avec le soutien de la Ville de Paris, le soutien financier d'EIT Digital et l'expertise en qualité de l'air de la PME NUMTECH. Une startup, aussi appelée Ambiciti, a été créée pour pérenniser les travaux et développer l'infrastructure de fourniture des cartes de pollution à la résolution de la rue à l'échelle mondiale. L'ensemble des partenaires sont répartis dans la recherche, les associations, les collectivités locales et les entreprises. Les travaux progressent sur une implication citoyenne plus forte, avec l'identification des modes de participation les plus efficaces. La question du suivi de l'exposition au bruit au travail fait aussi partie des activités en développement.

Références bibliographiques

- [1] N. Fortin, E. Bocher, J. Picaut, G. Petit et G. Dutilleux. An opensource tool to build urban noise maps in a GIS. Open Source Geospatial Research and Education Symposium (OGRS), Yverdon-les-Bains, Switzerland, 2012
- [2] J. Gulliver, D. Morley, D. Vienneau, F. Fabbri, M. Bell, P. Goodman, S. Beevers, D. Dajnak, F. J. Kelly et D. Focht. Development of an open-source road traffic noise model for exposure assessment. *Environmental Modelling & Software*, 74, pp. 183-193, 2015
- [3] F. Bouttier et P. Courtier. *Data Assimilation Concepts and Methods*, Meteorological Training Course Lecture Series, ECMWF, 1999.
- [4] N. Maisonneuve, M. Stevens, M. E. Niessen et L. Steels. NoiseTube: Measuring and mapping noise pollution with mobile phones. *Information technologies in environmental engineering*, pp. 215-228, 2009
- [5] G. Guillaume, A. Can, G. Petit, N. Fortin, S. Palominos, B. Gauvreau, E. Bocher et J. Picaut. Noise mapping based on participative measurements. *Noise Mapping*, 3(1), pp. 140-156, 2016
- [6] S. Hachem, V. Mallet, V. Raphaël, P.-G. Raverdy, A. Pathak, V. Issarny et R. Bhatia. Monitoring noise pollution using the Urban Civics middleware. *IEEE BigDataService 2015*, San Francisco, 2015.
- [7] A. Tilloy, V. Mallet, D. Poulet, C. Pesin and F. Brocheton. BLUE-based NO data assimilation at urban scale. *Journal of Geophysical Research*, 118(4), pp. 2,031-2,040, 2013.