

# Exposition individuelle et collective aux pollutions urbaines

D'après la conférence de Valérie Issarny

*Valérie Issarny est directrice de recherche chez Inria<sup>1</sup> (Institut national de recherche dédié au numérique). Elle coordonne une équipe scientifique autour du programme CityLab@Inria<sup>2</sup>, qui étudie l'application des sciences et technologies du numérique au cadre de la ville connectée, c'est-à-dire l'utilisation des nouvelles technologies dans l'urbain tout en promouvant la participation citoyenne. CityLab@Inria bénéficie de collaborations pluridisciplinaires franco-américaines au travers de l'Inria International Lab Inria@SiliconValley<sup>3</sup>, ce qui conduit notamment à mener des expérimentations transatlantiques.*

Ce chapitre présente les résultats de l'un des projets sur la ville connectée (**Figure 1**) mené au sein de CityLab@Inria. Le projet vise concrètement à favoriser la compréhension de l'exposition aux pollutions urbaines, en impliquant le citoyen tant dans la contribution que dans l'accès à l'information pertinente.

Dans cet ouvrage *La chimie et les grandes villes* (EDP Sciences, 2017), Carlos

Moreno montre que la ville intelligente, la « *smart city* », est avant tout une ville vivante qui favorise et améliore les échanges sociaux. Dans ce cadre, le numérique, avec l'aide d'une participation citoyenne relativement élevée, joue un rôle important pour mieux comprendre le fonctionnement des infrastructures.

La ville intelligente ne doit pas mettre l'humain de côté mais plutôt l'inclure dans la ville et faire en sorte qu'il devienne acteur de sa ville.

1. [www.inria.fr](http://www.inria.fr)

2. [citylab.inria.fr](http://citylab.inria.fr)

3. <https://project.inria.fr/silicon-valley/>



Figure 1

La ville connectée désigne une ville utilisant les technologies de l'information et de la communication (TIC) pour améliorer la qualité des services urbains ou encore réduire ses coûts.

## 1 Centre urbain et développement social durable

L'objectif est d'avoir des centres urbains qui encouragent un développement durable, c'est-à-dire des villes faites pour le bien de tous (Figure 2). Il est

largement montré dans cet ouvrage qu'il y a une croissance démographique urbaine, et il est important que tout le monde se sente bien en ville, quels que soient ses revenus et sa condition sociale.

Les risques liés aux pollutions sont un danger (Figure 3).

Figure 2

Le développement social durable des centres urbains correspond à une croissance du bien-être et de la participation citoyenne pour une meilleure connaissance des problèmes et de leurs solutions.

Sources : 123rf.



Pour trouver des solutions efficaces, il est important d'impliquer les citoyens dans la démarche de la compréhension de la pollution et des solutions possibles parce que les villes, telles qu'elles sont actuellement gérées, n'ont pas forcément une vision systémique des problèmes. Les citoyens vivant dans leurs villes peuvent avoir une meilleure connaissance ou en tout cas avoir connaissance de certains problèmes que les gouvernants n'auront pas forcément perçus, et ils peuvent aussi proposer ou tout au moins contribuer à apporter des solutions et mettre en avant d'autres priorités budgétaires.

Dans ce but, nous avons conçu le projet *UrbanCivics*<sup>4</sup> centré sur la démocratisation des données urbaines. Cette dernière repose sur la création d'une plateforme<sup>5</sup> permettant de centraliser et d'exploiter les différentes données urbaines qui contribuent au suivi de l'exposition à la pollution environnementale, incluant les données issues de la participation citoyenne.

### 1.1. Vers la démocratisation des données urbaines

La maîtrise du big-data (*Figure 4*), qui permet d'exploiter un grand nombre de données, est essentielle pour la démocratisation des don-

4. <http://urbancivics.com>

5. Plateforme : base de travail à partir de laquelle on peut écrire, lire, développer et utiliser un ensemble de logiciels. Une plateforme est un environnement permettant la gestion et/ou l'utilisation de services applicatifs.



Figure 3

La pollution dans les grandes villes constitue une nuisance voire un danger pour le citoyen, comme cela est notamment mis en avant par les études de l'OMS.



Figure 4

Le big-data décrit des ensembles de très gros volumes de données – à la fois structurées, semi-structurées ou non structurées –, qui peuvent être traitées et exploitées dans le but d'en tirer des informations intelligentes et pertinentes.

Sources : 123rf.

nées urbaines. L'IoTique<sup>6</sup>, qui permet l'intégration de données issues d'une multitude de capteurs physiques dans le monde virtuel, est en outre une source de données majeure de la plateforme. De même, les réseaux sociaux offrent une autre source importante de données qualitatives pour la plateforme.

L'objectif essentiel de la plateforme de démocratisation des données urbaines est ainsi de combiner, de la collecte à l'analyse, toutes les

6. IoT (Internet of Things ou Internet des objets, en français) : représente l'extension d'Internet à des choses et à des lieux du monde physique. L'Internet des objets est un réseau de réseaux qui permet, par des systèmes d'identifications complexes, de transmettre des données entre objets physiques et virtuels.

sources de données urbaines pertinentes afin d'offrir une meilleure connaissance de notre environnement. De manière tout aussi importante, la plateforme doit également inclure la notion de *feed-back loop*<sup>7</sup>, c'est-à-dire,

7. *Feedback loop* (FBL) ou boucle de rétroaction en français : système mis en place pour améliorer un produit, un procédé, etc., en recueillant et en réagissant aux commentaires des utilisateurs.

impliquer le citoyen dans la compréhension de la pollution environnementale, de ses effets aux solutions pour la réduire. Il faut aussi interpeler le gouvernant, qui idéalement mènera des actions en vue de réduire la pollution environnementale, bénéficiant notamment d'une meilleure connaissance de celle-ci.

La réalisation de la plateforme proposée s'appuie sur une infrastructure logicielle de type *Middleware*<sup>8</sup> (Figure 5), qui permet la collecte et l'intégration des différentes sources de données urbaines pertinentes combinant des solutions relevant de : big-data et moyens de communication pour récupérer les données issues des réseaux sociaux aussi bien que de l'IoT avec les données relevant du monde physique (capteurs). Citoyens et gouvernants sont en outre au cœur du dispositif en étant producteurs et consommateurs de la connaissance obtenue à partir de l'analyse des données ainsi agrégées.

Développer un tel système conduit à résoudre différents défis.

## 1.2. Les défis

### 1.2.1. L'hétérogénéité de l'IoT

Les sources de données utilisées dans l'IoT sont nombreuses et variées. Les cap-

8. *Middleware* ou *intergiciel* en français : un logiciel tiers qui crée un réseau d'échange d'informations entre différentes applications informatiques. Le réseau est mis en œuvre par l'utilisation d'une même technique d'échange d'informations dans toutes les applications impliquées à l'aide de composants logiciels.

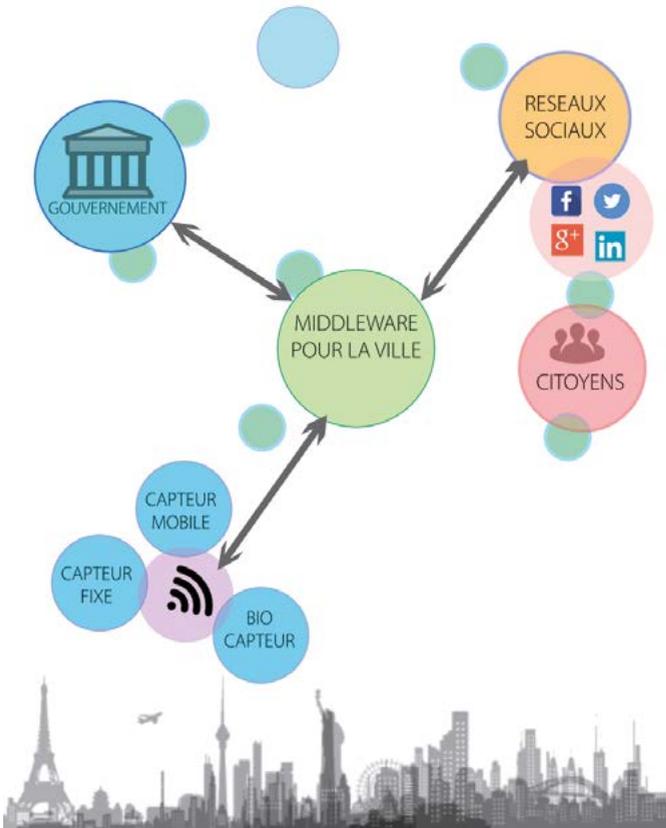


Figure 5

L'infrastructure logicielle *Middleware* permet de rassembler toutes les données provenant de différentes sources pour une meilleure compréhension de la ville.

Source : Ambiciti.

teurs physiques (mobiles, fixes et biocapteurs) sont eux-mêmes hétérogènes. De la même manière, les contributions issues des réseaux sociaux sont aussi hautement hétérogènes (Figure 6).

Intégrer et assimiler ces données pour faire la cartographie d'un phénomène au niveau urbain est par conséquent complexe.

Le défi de l'hétérogénéité de l'IoT est encore loin d'être résolu, comme l'illustre aussi le **Chapitre de R. Lacombe** dans *La chimie et les grandes villes* sur le diagnostic et le traitement de la pollution de l'air.

Une question essentielle est la capacité à mesurer la pollution environnementale au cours du temps sur une large couverture spatiale. L'émergence de capteurs de relativement bas coût et portables est une solution prometteuse mais souffre, à ce jour, de l'absence de capteurs d'une fiabilité suffisante. Toutefois, le développement de l'IoT et des technologies de capteurs associées laisse présager le déploiement croissant et massif de capteurs d'intérêt dans l'environnement urbain, qu'ils soient fixes ou mobiles.

Par ailleurs, les centres urbains déploient déjà des stations de mesure de la pollution environnementale et en particulier de la qualité de l'air. Par exemple, Airparif<sup>9</sup> déploie de l'ordre de soixante-dix stations de mesure en Ile-de-France (Figure 7). Ces stations ont l'inconvénient d'avoir un coût très élevé

9. [www.airparif.asso.fr](http://www.airparif.asso.fr)



Figure 6

Les différents réseaux sociaux peuvent être utilisés en tant que capteurs pour récupérer l'information.

Source : 123rf.

mais ont l'avantage de fournir des observations de qualité. Toutefois, le coût élevé fait que la couverture spatiale est limitée.

Aux difficultés des capteurs physiques qui donnent des informations quantitatives de plus ou moins grande qualité, s'ajoutent celles des capteurs sociaux, qui n'apportent que des informations qualitatives. Prenons l'exemple de la pollution sonore, potentiellement dangereuse pour la santé. Selon l'endroit et selon la personne, cette pollution peut être perçue comme une nuisance ou non ; par exemple, un spectateur d'un concert n'évoquera généralement pas une exposition à une pollution sonore. La difficulté est donc de gérer une information subjective et d'être à même de la coupler à une information quantitative issue de capteurs physiques. De plus, tant les



Figure 7

Le capteur physique déployé par Airparif permet d'avoir une grande précision mais à un coût élevé.

Source : Airparif.

capteurs physiques que les personnes ont des susceptibilités/sensibilités différentes, ce qui rend l'information fournie difficile à intégrer.

### 1.2.2. La modélisation de la pollution environnementale

Afin de pallier les limites des observations de la pollution urbaine au moyen de capteurs, on fait appel à la modélisation mathématique. Les incertitudes liées à cette modélisation peuvent ensuite être réduites par assimilation des données d'observations issues de capteurs, comme cela est schématisé sur la **Figure 8**. Toutefois, de nombreux défis restent posés. Cela inclut évidemment d'accroître les performances des capteurs et des modèles mais également de savoir intégrer des données qualitatives pour pouvoir bénéficier des données issues des réseaux sociaux. Il est également intéressant d'exploiter au mieux le couplage modélisation-observation en identifiant notamment les lieux où les incertitudes concernant la connaissance de la pollution environnementale sont

les plus grandes. Cela permet par exemple d'informer le déploiement de capteurs fixes.

### 1.2.3. La participation citoyenne

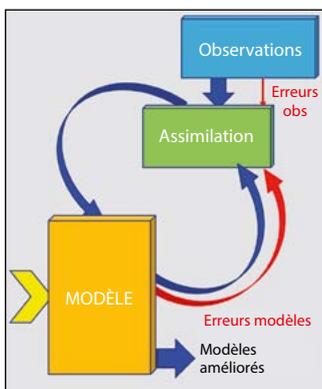
La démocratie participative et la démocratie directe reposent sur le renforcement de la participation du public à l'élaboration des décisions politiques, en opposition à la démocratie représentative<sup>10</sup>. Dans ce cadre, les outils numériques apparaissent comme favorisant la participation citoyenne.

À notre modeste niveau, nous voulons faciliter la participation citoyenne dans la compréhension de la pollution environnementale dans la ville et influencer la mise en œuvre de solutions pour la réduire. Concrètement, il s'agit de permettre à toute personne de contribuer, par simple utilisation de son *smartphone*, à la collecte d'observations relatives à la pollution afin de mieux informer mais également d'être informée de l'exposition aux pollutions environnementales et de ses effets sur la santé. Toutefois, un défi majeur consiste à effectivement inciter et encourager la participation (**Figure 9**).

Figure 8

Schéma de principe de la modélisation de la pollution environnementale urbaine.

Source : Ambiciti.



10. Démocratie directe : système dans lequel les citoyens exercent directement le pouvoir.

Démocratie participative : désigne l'ensemble des dispositifs et des procédures qui permettent d'augmenter l'implication des citoyens et d'accroître leur rôle dans les prises de décision.

Démocratie représentative : un système dans lequel le citoyen délègue son pouvoir à des représentants qui incarnent la volonté générale. Les représentants votent la loi.



Figure 9

La participation citoyenne dans les observations et la collecte des données de la pollution implique un intérêt à y participer.

Sources : 123rf.

## 2 La plateforme Ambiciti pour l'intégration des données environnementales

Issue du projet *UrbanCivics*, la plateforme *Ambiciti* (Figure 10) a, dans le domaine de la pollution environnementale, pour objectif de collecter les différentes données pertinentes afin de les exploiter pour produire une cartographie horaire de la pollution environnementale, incluant sa

prévision à deux jours, au niveau de la rue. La plateforme combine pour cela simulation numérique, étant donné les modèles mathématiques précédemment cités, et assimilation de données pour réduire les incertitudes à partir des observations des capteurs.

De manière complémentaire à la cartographie de la pollution, un autre objectif est de coupler ces données avec par exemple des études épidé-

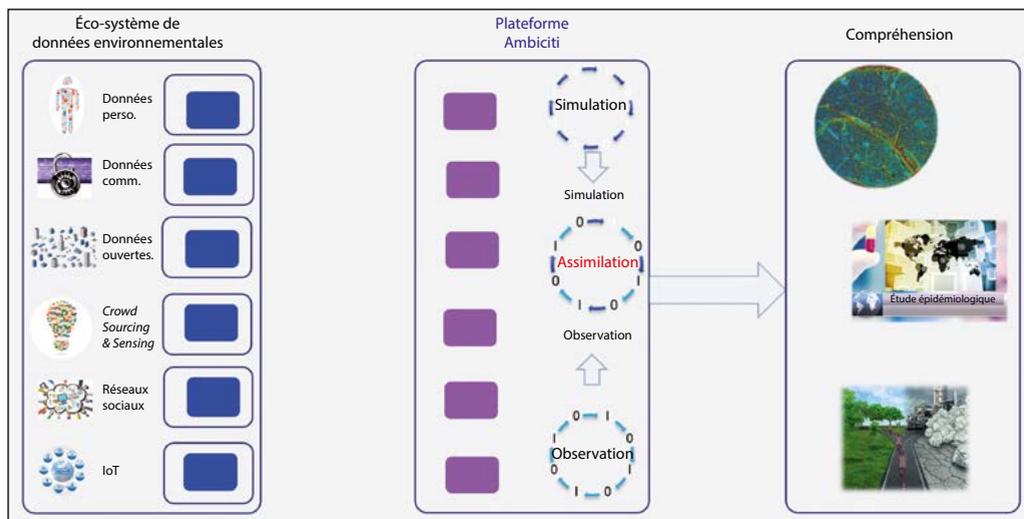


Figure 10

La plateforme Ambiciti combine toutes les sources d'informations disponibles pour une meilleure compréhension de la pollution de la ville.

Source : Ambiciti.

miologiques sur les aspects sanitaires pour contribuer à comprendre les impacts de la pollution sur la population. Nous avons initialement développé une première application de la plateforme *Ambiciti* au cadre de la pollution sonore (Figure 11). En effet, technologiquement, travailler sur la pollution



Figure 11

La pollution sonore est un élément de pollution important à prendre en compte.

Source : 123rf.

sonore était plus facile dès lors que l'on voulait favoriser la collecte d'observations par les citoyens eux-mêmes car, comme déjà évoqué, la disponibilité, et par conséquent la démocratisation, de capteurs portables pour la pollution atmosphérique reste encore à venir.

En revanche, le microphone d'un téléphone suffit à mesurer la pollution sonore à laquelle on est exposé. Par ailleurs, même si la pollution sonore a des effets sanitaires moindres qu'une mauvaise qualité de l'air, elle n'en est pas moins néfaste. De manière tout aussi importante pour l'incitation à la participation citoyenne, la population est fortement sensible à la pollution sonore, et par conséquent *a priori* encline à contribuer à toute action qui permettrait de la réduire.

### 2.1. Un cas d'étude : la pollution sonore à San Francisco

Afin de mieux évaluer la sensibilité de la population à la pollution sonore, nous avons mené une étude sur la ville de San Francisco. Nous avons précisément considéré la cartographie de la pollution sonore en journée de la ville de San Francisco, laquelle a été produite à partir d'un modèle mathématique qui calcule la pollution sonore à partir de différentes données comme l'information sur le trafic. Sur la carte de la **Figure 12**, on retrouve effectivement des quartiers de San Francisco connus pour être bruyants, mis en avant par les routes en rouge. Nous avons ensuite comparé ces données avec la localisation des plaintes émises sur les problèmes de pollution sonore à un numéro (qui s'appelle le 3-1-1<sup>11</sup>), qui sont représentées par les points bleus sur la **Figure 12**. Comme nous pouvons le constater, il y a une bonne corrélation entre les plaintes et la cartographie de la pollution sonore.

### 2.2. L'application Ambiciti et la pollution sonore

Ce premier travail sur la ville de San Francisco nous a conduits à développer l'application *Ambiciti* (**Figure 13**) en complément de la plateforme du même nom. *Ambiciti* permet d'intégrer la contribution du citoyen en matière d'information sur la pollution

11. Numéro 3-1-1 : un numéro d'appel non urgent permettant de joindre les services publics sans encombrer la ligne d'urgence.



**Figure 12**

Cartographie de la pollution sonore réalisée à San Francisco. Source : création UrbanCivics.



**Figure 13**

L'application *Ambiciti* permet de suivre l'exposition individuelle et collective aux pollutions environnementales et en particulier la pollution sonore. Source : Ambiciti.

environnementale, en complément de la cartographie initiale de celle-ci par simulation numérique. En contrepartie, l'utilisateur est informé de son exposition individuelle dans le temps, qu'il peut mettre en relation avec les recommandations de l'OMS.

### 2.3. La quantification de l'exposition au bruit

L'application *Ambiciti* permet, à partir du micro du téléphone, de quantifier l'exposition au bruit (*Figure 14*). Cependant, les différents capteurs des téléphones sont très largement hétérogènes et de qualité variable. Ainsi, pour une mesure du bruit effectuée au même moment et au même endroit, des téléphones différents retourneront des valeurs disparates.

Cette hétérogénéité peut être surmontée par l'étalonnage du téléphone. Nous organisons par conséquent des rencontres avec des utilisateurs d'*Ambiciti* pour l'étalonnage des téléphones (*Figure 15*). Nous avons en outre pu constater que l'étalonnage est le même pour un modèle donné de téléphone (*Figure 16*). Toutes les personnes qui possèdent un téléphone dont le modèle a été

étalonné peuvent ainsi bénéficier d'un étalonnage automatique, directement accessible depuis l'application.

L'application permet aussi de relier l'exposition individuelle à la pollution sonore avec des recommandations relatives à la santé. La *Figure 17* montre ainsi, au moyen du trait rouge, l'exposition maximale recommandée au cours de la journée en termes d'exposition au bruit ; de cette façon, chaque personne peut suivre son exposition personnelle au bruit et éventuellement prendre des mesures pour être moins exposée. Différentes statistiques sont par ailleurs proposées, toujours dans le but de contribuer à comprendre et éventuellement à diminuer son exposition à la pollution.

### 2.4. De l'exposition individuelle au bruit à l'exposition collective

Si les contributions individuelles concourent à cartographier la pollution environnementale, il est nécessaire de disposer d'une cartographie initiale produite par simulation numérique. En effet, il faudrait collecter un très grand nombre d'observations de qualité élevée pour être à même de produire une carte à l'échelle urbaine. La *Figure 18* représente la carte initiale de l'Agence d'Écologie Urbaine de la pollution sonore à Paris.

Les collectes individuelles de points d'observations sur le bruit sont ensuite exploitées pour corriger cette cartographie, à Paris notamment (*Figure 19*).

Figure 14

La quantification de l'exposition au bruit utilise le microphone des téléphones mobiles mais nécessite un étalonnage préalable.

Source : Ambiciti.

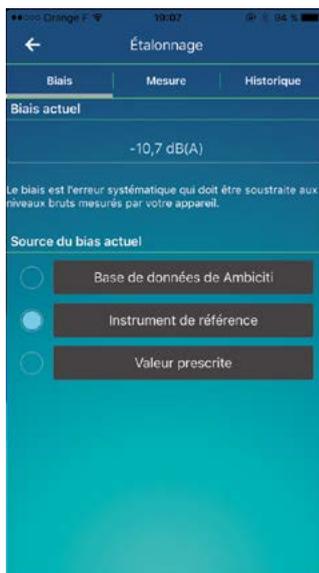




Figure 15

Des « Calibration Parties » sont organisées pour l'étalonnage des capteurs téléphoniques afin de mieux quantifier l'exposition au bruit.

Source : Inria.



Figure 16

Les différents modèles de téléphone n'ont pas le même biais et chacun requiert donc un étalonnage.

Phone	Bias
LGE Nexus 5 / 4	-6.12 / -0.58
Samsung GT I9505 / I9300 / I9305 / I9250 / I9195	-10.97 / -7.16 / -3.32 / -2.51 / -6.02
Samsung SM G901F / G900F / G800F / G850F	-11.34 / -7.59 / -10.13 / -10.03
Samsung SM C115 / A500H / A500FU	-18.97 / -6.8 / -7.7
OnePlus A0001	-14.75
Archos 45 Helium 4G	-9.2
LGE LG-D802 / LG-D855 / LG-H815	0.0 / -6.52 / -24.53
HUAWEI U8860 / P6-U06 / Y300-0100	-17.65 / -12.6 / -14.97
Motorola Nexus 6 / XT1092 / XT1068 / XT1032	-25.5 / -27.23 / -19.75 / -24.37
Sony C5303 / D5803 / D6503 / D6603 / LT22i	-20.73 / -10.37 / -20.9 / -7.89 / -18.37
TCL 6050Y	-29.7
HTC HTC One mini 2 / HTC HTC One X	-11.8 / -19.73

Figure 17

L'application s'appuie sur l'implication du citoyen, qui aura une meilleure connaissance sur son exposition individuelle à la pollution.

Source : Ambiciti.



Figure 18

Cartographie de la pollution sonore à Paris produite par l'Agence d'Écologie Urbaine de la ville de Paris.

Source : Ambiciti.

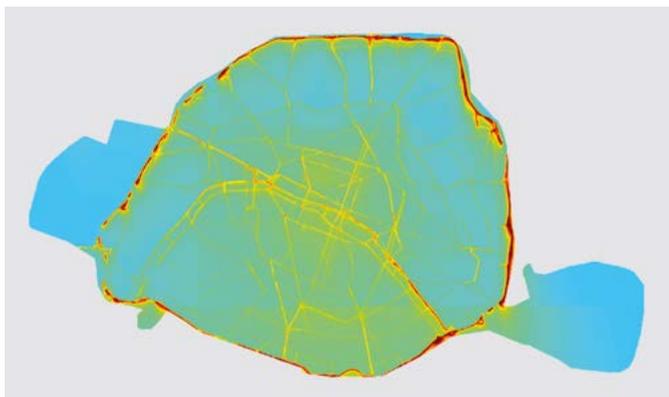
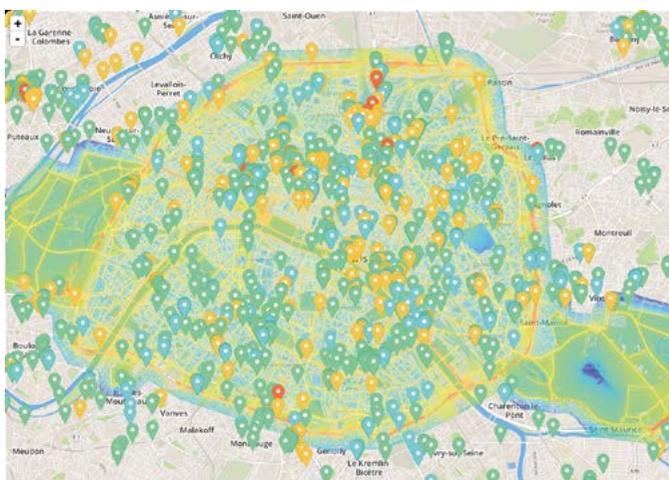


Figure 19

Les niveaux de bruits collectés avec l'application Ambiciti viennent enrichir la compréhension de la pollution sonore.

Source : Ambiciti.



### 3 La participation citoyenne au cœur du projet

Pour revenir à la dimension de la participation citoyenne, l'application *Ambiciti* permet, en fait, deux types de contributions. La première, mise en œuvre par défaut, consiste à mesurer périodiquement, en tâche de fond, la pollution sonore. L'avantage est ici que l'utilisateur n'a pas à se soucier de relever des observations et n'est donc pas dérangé. L'inconvénient est que la qualité des observations est très

disparate et seul un pourcentage réduit des observations communiquées à la plateforme peut être utilisé pour la cartographie de la pollution.

Prenons l'exemple du téléphone mis dans le sac à dos : la qualité d'observation sera typiquement moins bonne et ces données devront être filtrées. De même, si la localisation n'est pas suffisamment précise, elle ne peut pas être utilisée pour la cartographie. Dans tous les cas, il faut écarter les données qui ne sont pas pertinentes (**Figure 20**).



Figure 20

La qualité des observations collectées par les citoyens est variable. L'application doit pouvoir écarter les données non pertinentes.

Source : 123rf.

### 3.1. Le mode parcours et la science citoyenne

Afin de pouvoir collecter un plus grand nombre d'observations de qualité suffisante, l'application Ambiciti offre une fonctionnalité, « le mode parcours », qui s'appuie sur la notion de Science Citoyenne, où le citoyen s'engage pro-activement et consciemment

dans la collecte de données (Figure 21). Suivant le mode parcours, il est possible de définir la durée et la fréquence des échantillonnages afin d'accroître ainsi la qualité et la quantité des observations.

Nous organisons aussi des campagnes de collectes permettant de sensibiliser les

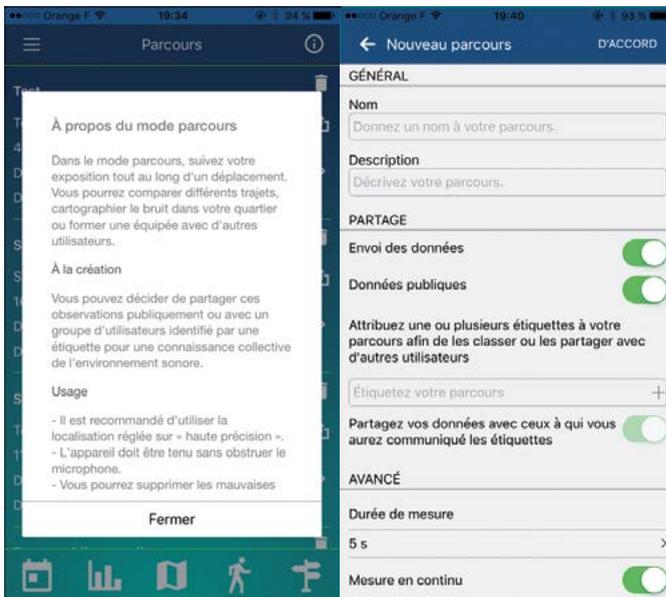


Figure 21

Avec le mode parcours, Ambiciti offre à l'utilisateur le moyen de procéder à une mesure intensive du bruit pour analyser un trajet ou cartographier son quartier, seul ou en groupe.

Source : Ambiciti.

personnes sur l'utilité du mode parcours, pour qu'elles puissent éventuellement organiser à leur tour des campagnes de collectes dans leurs quartiers (Figure 22).

Des cartes de pollution sonore obtenues après ces campagnes de collecte sont automatiquement générées et mises à disposition des participants (Figures 23 et 24).



Figure 22

Des campagnes de collecte sont organisées avec des balades de mesure collective et citoyenne.

Source : Inria/photo : C. Morel.

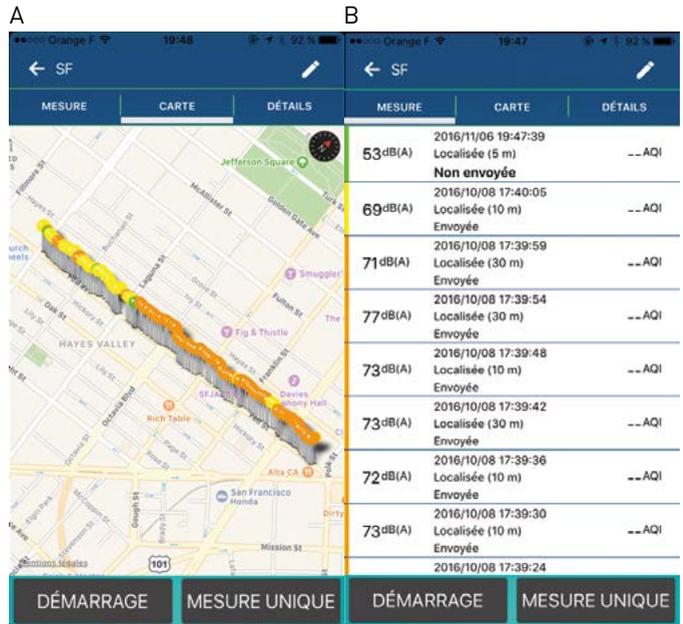


Figure 23

Exemple de résultats d'une campagne de collecte de pollution sonore par le système Ambiciti.

A) La mesure permet à une personne ou à un groupe d'évaluer la pollution sonore le long d'un trajet ou de cartographier un quartier ; B) l'application constitue un historique des mesures effectuées.

Source : Ambiciti.

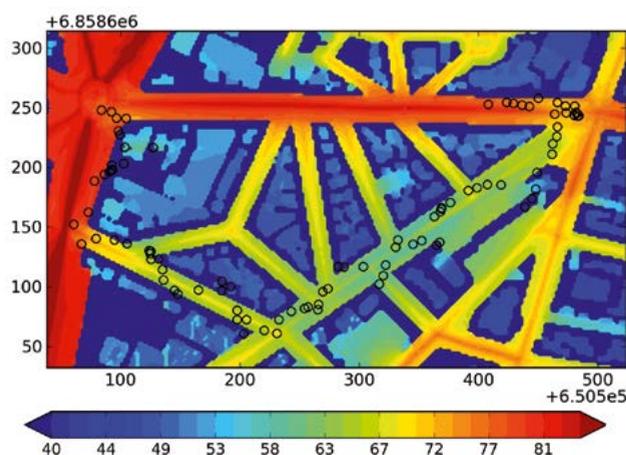


Figure 24

L'assimilation des données à partir des observations vise à reconstituer les niveaux de bruit dans une zone donnée.

Source : Ambiciti.

## La participation citoyenne à la connaissance de la pollution environnementale : encore des défis à relever

On observe une hétérogénéité de la participation citoyenne à la collecte d'observations relatives à la pollution environnementale, tant sur le plan qualitatif que quantitatif. Cela peut être vu comme un handicap à la mise en œuvre d'une solution basée sur la contribution citoyenne de par les difficultés techniques induites. Toutefois, parce qu'elles sont techniques, ces difficultés peuvent être palliées au moyen d'outils et méthodes s'appuyant sur la modélisation mathématique des phénomènes observés.

Il est par ailleurs essentiel de minimiser la consommation énergétique de l'application *Ambiciti* pour téléphone, car c'est un prérequis à son utilisation de masse. Cela oblige notamment à trouver un compromis énergie-temporalité approprié, ce qui inclut de limiter la fréquence des communications des observations à la plateforme.

L'analyse des observations collectées sur une période d'un an montre en outre que les usagers sont principalement statiques. Par conséquent, les observations fournies par une même personne couvrent des zones relativement limitées, d'où l'importance de collecter des observations par une grande diversité d'utilisateurs.

Enfin, si ce chapitre s'est concentré sur le cas de la pollution sonore, l'application *Ambiciti* traite à présent des pollutions sonores et atmosphériques. Toutefois, les informations de pollution atmosphériques sont à ce jour calculées par simulation numérique car les capteurs mobiles de qualité de l'air sont, comme nous l'avons déjà évoqué, encore en nombre limité (**Figure 25**).



**Figure 25**

*Ambiciti* fournit également des informations de son exposition à la pollution atmosphérique, laquelle est obtenue par simulation numérique.

Source : Ambiciti.

### Remerciements

Valérie Issarny tient à remercier Vivien Mallet, Pierre-Guillaume Raverdy, Fadwa Rebhi et Raphael Ventura pour leurs contributions aux travaux présentés dans ce chapitre.