



Déploiement et ordonnancement de réseaux de capteurs sans fil pour le suivi de la pollution de l'air

Ahmed Boubrima¹

Ahmed Boubrima a soutenu sa thèse² en mars 2019. Celle-ci a été préparée au laboratoire CITI (INSA-Lyon) sous la direction de Walid Bechkit et Hervé Rivano, et a été financée par Inria et le labex IMU de l'université de Lyon dans le cadre du projet Urpolsens³. Ahmed est actuellement chercheur postdoctoral à Rice University, aux États-Unis, où il gère le projet ASTRO⁴.



La pollution de l'air est l'un des principaux problèmes auxquels sont confrontées nos villes développées qui, en essayant de fournir des services publics améliorés, augmentent considérablement l'urbanisation et l'industrialisation et ainsi nuisent à la qualité de l'air. Les effets nocifs de la pollution atmosphérique sur la santé humaine ont été largement établis dans plusieurs études qui ont montré que l'exposition à de fortes concentrations de polluants atmosphériques pouvait entraîner de nombreuses maladies telles que le cancer,

1. <http://www.ahmed-boubrima.xyz/>

2. <https://hal.inria.fr/tel-02446568v1>

3. <https://imu.universite-lyon.fr/bilan-2015/urpolsens-wireless-sensor-networks-for-urban-pollution-monitoring-2015/>

4. <http://astro.rice.edu/>

l'asthme et les maladies de la peau. Outre les effets néfastes de la pollution de l'air sur la santé humaine, l'environnement subit également les effets des polluants atmosphériques. On peut citer notamment le changement climatique, les pluies acides et la réduction de la visibilité en extérieur.

La première étape dans la lutte contre la pollution atmosphérique consiste à assurer une surveillance efficace et fine des polluants nocifs. En effet, grâce à un suivi efficace de la pollution atmosphérique, le gouvernement et les collectivités locales peuvent utiliser les données de pollution pour identifier les quartiers où la pollution devrait être réduite. Traditionnellement, la surveillance de la pollution atmosphérique est effectuée par les autorités environnementales régionales et gouvernementales. Ces agences utilisent des stations de mesure conventionnelles équipées de technologies de détection de haute qualité leur permettant d'obtenir des mesures précises des concentrations de pollution de l'air. Cependant, ces stations sont massives, inflexibles et très coûteuses à déployer à l'échelle du quartier. Outre la surveillance traditionnelle basée sur les mesures, les cartes de la pollution de l'air peuvent également être obtenues à l'aide des modèles physiques qui simulent le phénomène de dispersion de la pollution de l'air. Les données d'entrée des modèles physiques sont généralement moyennées dans l'espace et dans le temps, ce qui rend difficile l'estimation précise et fine des concentrations de pollution.

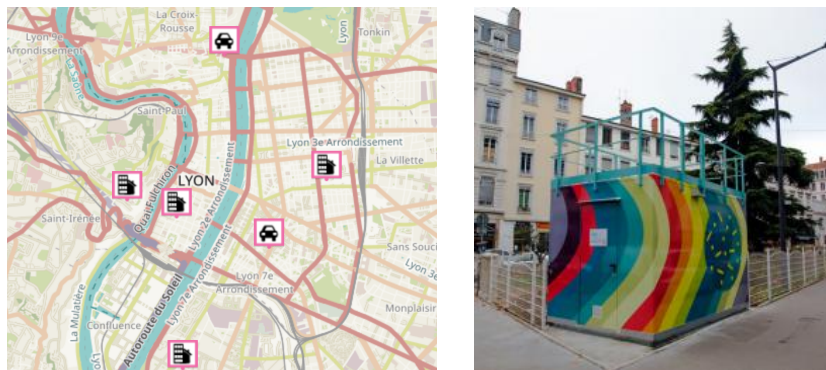


FIGURE 1. De gauche à droite : (a) les stations de mesure situées dans la ville de Lyon ; (b) un zoom sur la station située sur l'avenue Jean Jaurès à Lyon.

Les limitations des solutions de surveillance traditionnelles ont poussé les industriels à construire une solution plus flexible grâce à l'utilisation de mini capteurs de pollution qui sont moins précis mais plus petits que les stations et surtout moins coûteux. Ces capteurs sont conçus pour être déployés en grand nombre dans une ville

donnée et communiquent généralement en sans-fil, formant ainsi ce que nous appelons un réseau de capteurs sans fil (RCSF). Les réseaux de capteurs sans fil présentent de nombreux avantages par rapport aux solutions traditionnelles de surveillance de la pollution atmosphérique. En effet, le rapport coût-efficacité des nœuds capteurs par rapport aux stations traditionnelles permet des déploiements à échelle plus fine et améliore donc la granularité spatiale des méthodes de surveillance actuelles. La granularité spatiale peut également être améliorée en fixant les capteurs sur des véhicules mobiles grâce à la petite taille des nœuds. Les capteurs peuvent également être fixés sur des drones pour la surveillance de la pollution en 3D, ce qui est une limite importante des solutions traditionnelles.



FIGURE 2. Des mini sondes de détection de la pollution atmosphérique développées par la société Alphasense.

Dans ma thèse, nous nous sommes intéressés aux problèmes de déploiement et d'ordonnancement de RCSF. Le problème de déploiement consiste à déterminer les positions optimales des nœuds capteurs et des puits de manière à couvrir le phénomène physique et à assurer la connectivité du réseau tout en minimisant les coûts de déploiement. Une fois le déploiement effectué, le problème d'ordonnancement, quant à lui, vise à déterminer les nœuds capteurs qui peuvent être éteints afin d'économiser leur énergie.

Urpolsens : une plateforme de suivi de la qualité de l'air à bas coût et à basse consommation d'énergie

Avant de s'attaquer aux travaux théoriques, et suivant les efforts des projets existants utilisant les RCSF pour la surveillance de la pollution atmosphérique, nous avons d'abord réalisé une partie expérimentale en concevant une plate-forme de mesure de la qualité de l'air. Dans notre premier prototype, les nœuds capteurs mesurent le dioxyde d'azote (NO_2) en plus de la température et de l'humidité et transmettent les données à une passerelle en sans-fil. Le nœud passerelle communique les données au centre de décision via une connexion 4G. Chaque nœud capteur est alimenté par une batterie lui permettant de fonctionner pendant au moins deux mois grâce à notre conception économe en énergie et basée sur des composants à faible consommation. Les capteurs sont également équipés de panneaux solaires afin de prolonger leur durée de vie lorsque leurs batteries sont épuisées. Avec l'aide du Grand Lyon et

de Atmo-AURA, nous avons déployé notre plate-forme dans le centre-ville de Lyon pendant quatre mois à compter de mi-juillet 2018, et les résultats obtenus montrent que nos capteurs fournissent de très bonnes mesures tout en étant économes en énergie.

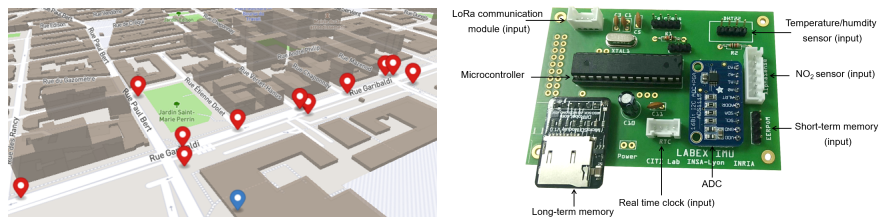


FIGURE 3. De gauche à droite : (a) la carte des 12 capteurs (rouge) et de la passerelle (bleue) que nous avons déployés au centre-ville de Lyon ; et (b) un zoom sur le circuit principal de nos nœuds capteurs.

Optimisation du coût financier et énergétique de suivi de la qualité de l'air

La partie expérimentale de ma thèse nous a permis de comprendre les spécificités des capteurs de pollution de l'air que nous avons intégrées par la suite dans la conception de nos solutions d'optimisation du déploiement et de l'ordonnancement du réseau de capteurs. Au début, nous avons conçu un modèle de programmation linéaire en nombres entiers afin d'assurer la cartographie de la qualité de l'air. Nous avons formulé la contrainte de la couverture de la qualité de l'air en nous basant sur des méthodes d'interpolation afin de déterminer les positions optimales des capteurs permettant de mieux estimer les concentrations de pollution aux positions où aucun capteur n'est déployé. Nous avons utilisé le concept de flot pour formuler la contrainte de connectivité qui nous permet de garantir que les capteurs déployés peuvent envoyer leurs données de pollution à au moins un nœud puits. Nous avons également proposé un algorithme de résolution basé sur la relaxation linéaire et la recherche dichotomique.

Outre nos modèles d'optimisation de la cartographie de pollution, nous nous sommes également intéressés à la détection de dépassement de seuil des concentrations des polluants nocifs. Dans cette partie de ma thèse, nous nous sommes basés sur les modèles physiques de dispersion atmosphérique tout en utilisant l'inventaire des émissions de pollution. Nous avons montré l'efficacité de notre modèle de détection de seuil sur un jeu de données de la ville de Londres.

Enfin, et dans la troisième partie théorique de ma thèse, nous avons considéré un nouveau cas d'application où le but est d'assurer le suivi de la qualité de l'air par une correction efficace des modèles physiques de la pollution de l'air. À cette fin, nous

avons conçu un modèle d'optimisation basé sur des techniques d'assimilation de données. En d'autres termes, nous avons proposé de trouver les positions optimales des capteurs qui corrigent au mieux les estimations des modèles physiques. Nous avons évalué cette approche en utilisant un jeu de données de pollution de la ville de Lyon et nos résultats ont montré que l'utilisation de l'assimilation de données permet de surpasser les méthodes de déploiement basées sur l'interpolation.

Références

- [1] Ahmed Boubrima, Walid Bechkit and Hervé Rivano. Optimal WSN Deployment Models for Air Pollution Monitoring. In IEEE transactions on wireless communications, 2017.
- [2] Ahmed Boubrima, Walid Bechkit and Hervé Rivano. On the Deployment of Wireless Sensor Networks for Air Quality Mapping : Optimization Models and Algorithms. In IEEE/ACM Transactions on Networking, 2019.
- [3] Ahmed Boubrima, Walid Bechkit and Hervé Rivano. On the Optimization of WSN Deployment for Sensing Physical Phenomena : Applications to Urban Air Pollution Monitoring. In the Springer's Edited Textbook "The Philosophy of Mission-Oriented Wireless Sensor Networks", 2019.
- [4] Ahmed Boubrima, Azzedine Boukerche, Walid Bechkit and Hervé Rivano. WSN Scheduling for Energy-Efficient Correction of Environmental Modelling. In the 15th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE MASS 2018), Chengdu, China.
- [5] Ahmed Boubrima, Walid Bechkit, Hervé Rivano and Lionel Soulhac. Leveraging the Potential of WSN for an Efficient Correction of Air Pollution Fine-Grained Simulations. In the 27th IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2018), Hangzhou, China.