

## Introduction

Les cyclistes sont des usagers de la route vulnérables, particulièrement exposés aux pollutions atmosphériques et sonores. Ceci est notamment dû à la proximité immédiate des cyclistes au trafic routier qui est aujourd'hui une source majeure de ces deux nuisances en ville. À cela s'ajoute leur niveau d'activité physique plus élevé qui augmente leur ventilation et, mécaniquement, la quantité de pollution atmosphérique absorbée. Cet état de fait constitue une forme d'iniquité environnementale en transport puisque les cyclistes sont surexposés à des nuisances qu'ils ne génèrent pas et qu'ils contribuent même à réduire (Gössling, 2016).

Les études portant sur la concentration de ces pollutions en ville ont notamment montré qu'elles variaient significativement spatialement. Ceci a notamment été illustré par le développement d'outils de cartographie de ces nuisances ainsi que par l'utilisation des *Land Use Regression* (LUR) (Ryan et LeMasters, 2007). À une échelle plus micro, des études sur l'exposition des cyclistes ont également montré qu'elle varie sensiblement en fonction des caractéristiques de l'environnement urbain (Apparicio *et al.*, 2016; Betancourt *et al.*, 2017; Cole-Hunter *et al.*, 2012; Dekoninck *et al.*, 2013). Plusieurs facteurs comme la densité du bâti, la présence de végétation, l'organisation des tissus urbains, la proximité des axes majeurs, la perméabilité au vent et la présence de certaines activités peuvent contribuer à réduire ou à augmenter l'exposition des cyclistes. Il est intéressant de noter que les deux échelles d'analyse se croisent. Une partie de l'exposition des cyclistes aux pollutions atmosphérique et sonore s'explique par des éléments structurels (relief, flux pendulaires, présence d'activité polluante, météorologie etc.), on parle alors de pollution d'arrière-plan. Une autre partie de l'exposition des cyclistes s'explique au niveau micro du fait d'événements ponctuels ou de caractéristiques de l'environnement proche (passage d'un véhicule lourd, configuration de la rue, présence de végétation, éloignement de l'aménagement cyclable etc.), il s'agit de la pollution immédiate.

**L'objectif principal** de l'étude est d'identifier les facteurs influençant l'exposition des cyclistes au bruit et à la pollution atmosphérique en milieu urbain, en explorant le cas parisien.

## Méthodologie : données primaires et modélisation

L'étude repose sur une collecte de données primaires réalisée à Paris durant quatre jours (du 4 au 7 septembre 2017) par trois participants (un professeur et deux étudiants). Chaque participant a parcouru à vélo environ 100 kilomètres par jour en suivant des trajets prédéterminés. Au total, 1 393 kilomètres ont été parcourus, soit près de 64 heures de collecte (N=3822). Le but de cette collecte de données était d'obtenir une couverture maximale de la ville dans une logique extensive plutôt qu'intensive (répétition des mesures sur un seul axe). Cette approche permet notamment de mieux capter la variation spatiale des nuisances à travers la ville. En effet, comparativement à l'utilisation de stations fixes ou à une méthode intensive, l'approche utilisée permet ici de maximiser la variation des différentes caractéristiques environnementales à l'étude.

La collecte de données repose sur quatre appareils. Premièrement, à chaque minute du trajet, un capteur portatif Aeroqual 500 mesure la concentration moyenne de dioxyde d'azote ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$  NO<sub>2</sub>), ainsi que l'humidité relative (%) et la température (C°). Deuxièmement, pour la même résolution temporelle, un dosimètre Brüel & Kjær (type 4448) enregistre la valeur moyenne de bruit (dB(A)). Troisièmement, un vêtement biométrique Hexoskin mesure la fréquence cardiaque moyenne et la ventilation (litres d'air par minutes). Quatrièmement, une montre de triathlon (Garmin Forrunner 920 XT) enregistre la position et la vitesse à chaque seconde.

Les traces GPS sont ensuite ajustées (*map-matching*) au réseau routier OSM et enfin découpées en segments d'une minute. Puis, une batterie d'indicateurs relatifs aux caractéristiques

de l'environnement urbain sont construits à partir de données secondaires telles que l'empreinte au sol du bâti, les données météorologiques d'archives, le relief, l'occupation du sol, des cartes de végétation, la localisation des zones de vitesse limitées à 30km/h, etc. Ces données proviennent majoritairement du site des données ouvertes de Paris, mais également des données ouvertes de l'Atelier Parisien d'urbanisme et de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île de France.

Pour répondre à notre objectif de recherche, un modèle de régression multivarié ( $y_1$  : concentration de  $\text{NO}_2$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $y_2$  : intensité sonore en  $\text{dB(A)}$ ) généralisé additif à effet mixte incluant un terme d'autocorrélation temporel de type Moving Average (MA) a été construit. Ce type de modèle permet notamment de tenir compte des effets induits par les participants, les jours de collecte (effets aléatoires), des relations non linéaires entre les prédicteurs et les variables dépendantes, mais également de la dépendance spatio-temporelle induite par la méthode de collecte. La liste des variables indépendantes du modèle est reportée au tableau ci-dessous.

Dimension	Nom de la variable indépendante	Type
Environnement direct	Température (en $^{\circ}\text{C}$ )	Effet fixe linéaire
	Temps passé sur chaque type de routes (en minutes)	Effet fixe linéaire
	Temps passé sur chaque type d'infrastructures cyclables (en minutes)	Effet fixe linéaire
	Temps passé dans une zone 30 (variable muette)	Effet fixe linéaire
	Nombre d'intersections croisées	Effet fixe linéaire
	Pente moyenne du segment (en %)	Effet fixe linéaire
	Vitesse moyenne du cycliste sur le segment (km/h)	Effet fixe linéaire
	Interaction entre la vitesse du vent (km/h) et l'exposition au vent (en %)	Effet fixe interaction
	Pourcentage du ciel visible ( <i>sky view factor index</i> )	Effet fixe linéaire
	Secteur d'activité dans un rayon de 50m (en %)	Effet fixe linéaire
Pollution d'arrière-plan	Sur une piste cyclable, distance à la rue majeure la plus proche	Effet non-linéaire (spline)
	Moment de la journée (minutes écoulées depuis 7h le matin)	Effet non-linéaire (spline)
	Localisation (x,y)	Effet non-linéaire (spline)
Influences externes	Jour de collecte	Intercepte aléatoire
	Participant	Intercepte aléatoire

## Résultats

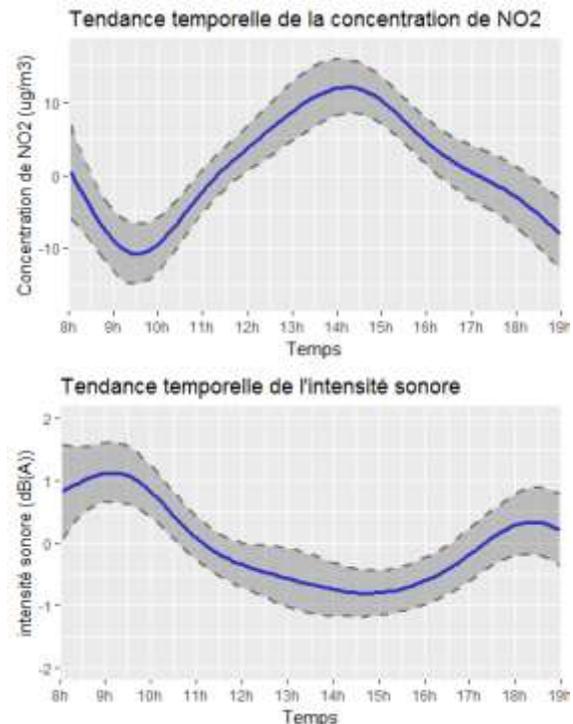
Les moyennes de  $\text{NO}_2$  et de  $\text{dB(A)}$  sont respectivement de  $163.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $161.9\text{-}164.3^1$ ) et  $71.51 \text{dB(A)}$  ( $71.38\text{-}71.63$ ). Dans les deux cas, il s'agit de valeurs relativement fortes, supérieures à ce qui a été enregistré à Montréal dans des conditions expérimentales similaires (Apparicio et al., 2016). Il est également important de noter que 14,5% des observations ont une valeur de concentration de  $\text{NO}_2$  supérieure à  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (seuil limite d'exposition moyenne horaire recommandé par l'OMS). Pour le bruit, 16,2% des observations dépassent le seuil de  $75 \text{dB(A)}$  qui correspond à un niveau de gêne prononcé.

Le modèle de régression construit offre une qualité de prédiction plus que raisonnable compte tenu de la forte variabilité des données collectées (Bayes  $R^2 = 0,52$  pour la concentration de  $\text{NO}_2$  et  $0,44$  pour l'intensité sonore).

<sup>1</sup> Intervalle de confiance à 95% obtenus par *bootstrapping* avec 4000 réplifications.

Concernant les facteurs explicatifs, le type d'axe emprunté par le cycliste a un impact à la fois sur son exposition au NO<sub>2</sub> et au bruit. Cet effet est plus prononcé pour le bruit que le NO<sub>2</sub>. Ainsi, passer une minute sur un axe résidentiel réduit en moyenne l'exposition d'un cycliste au NO<sub>2</sub> de 2,48 µg/m<sup>3</sup> et de 4,39 dB(A) comparativement au fait de passer une minute sur un axe primaire. L'exposition au vent est un facteur bien plus important de la réduction de l'exposition au NO<sub>2</sub>. Dans une rue orientée dans le sens du vent, cette réduction peut atteindre 10 µg/m<sup>3</sup> et chaque km/h supplémentaire de sa vitesse contribue également à réduire l'exposition au NO<sub>2</sub> de 1 µg/m<sup>3</sup>. Ces paramètres n'ont en revanche aucun impact sur l'exposition au bruit. Il est intéressant de noter que le fait de se situer dans une zone où la vitesse de circulation est limitée à 30 km/h réduit significativement l'exposition des cyclistes au bruit (-0.56 dB(A)) et au NO<sub>2</sub> (-2.19 µg/m<sup>3</sup>).

Enfin, les patrons spatiaux des pollutions atmosphérique et sonore d'arrière-plan sont davantage corrélés que les mesures directes d'exposition (0.33, p<0,001). Du point de vue temporel, les deux expositions suivent des tendances complètement différentes (-0,60, p<0,001). Le bruit est marqué par deux périodes d'exposition plus intenses, une le matin et une en fin d'après-midi, calquées sur les périodes des flux pendulaires automobiles. Le NO<sub>2</sub> quant à lui voit sa concentration augmenter et atteindre un pic aux alentours de 13-14h, avant de diminuer de nouveau. Ce comportement s'explique notamment par le degré d'ensoleillement qui, lorsqu'il augmente, favorise la formation d'O<sub>3</sub>. Ce dernier oxyde le NO dans les milieux où il est fortement concentré, et contribue ainsi à une formation secondaire de NO<sub>2</sub>.



## Bibliographie

- Apparicio, P., Carrier, M., Gelb, J., Séguin, A.-M. et Kingham, S. (2016). Cyclists' exposure to air pollution and road traffic noise in central city neighbourhoods of Montreal. *Journal of Transport Geography*, 57: 63-69.
- Betancourt, R. M., Galvis, B., Balachandran, S., Ramos-Bonilla, J. P., Sarmiento, O. L., Gallo-Murcia, S. M. et Contreras, Y. (2017). Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments. *Atmospheric Environment*, 157: 135-145.
- Cole-Hunter, T., Morawska, L., Stewart, I., Jayaratne, R. et Solomon, C. (2012). Inhaled particle counts on bicycle commute routes of low and high proximity to motorised traffic. *Atmospheric Environment*, 61 : 197-203.
- Dekoninck, L., Botteldooren, D. et Int Panis, L. (2013). An instantaneous spatiotemporal model to predict a bicyclist's Black Carbon exposure based on mobile noise measurements. *Atmospheric Environment*, 79 : 623-631.
- Gössling, S. (2016). Urban transport justice. *Journal of Transport Geography*, 54: 1-9.
- Ryan, P. H. et LeMasters, G. K. (2007). A review of land-use regression models for characterizing intraurban air pollution exposure. *Inhalation toxicology*, 19: 127-133.