
Introduction

Le vélo constitue un moyen de transport de plus en plus populaire dans de nombreuses villes nord-américaines et européennes. Malgré des retombées positives tant individuellement que collectivement, rouler à vélo en ville est aussi associé à des risques pour la santé dus à des niveaux d'exposition à la pollution atmosphérique, au bruit et au trafic routier potentiellement élevés. Par conséquent, un corpus d'études s'intéresse tout particulièrement aux caractéristiques du trajet réalisé à vélo qui concourent à faire augmenter ou diminuer significativement les niveaux d'exposition au bruit et à la pollution atmosphérique des cyclistes. Ces facteurs peuvent être classifiés en quatre catégories : 1) conditions météorologiques, 2) jour et période de la journée, 3) caractéristiques de l'environnement urbain et 4) axes empruntés et intensité du trafic. Concernant la dernière catégorie, il est largement admis que la proximité de la piste cyclable par rapport aux axes de circulation, le type d'axe routier ou d'aménagement cyclable emprunté, le nombre de voies de circulation, le nombre de camions lourds et le nombre de voitures croisées peuvent avoir un impact significatif sur les niveaux d'exposition à la pollution atmosphérique et au bruit.

Par contre, rares sont les études qui intègrent des mesures de trafic en temps réel pour modéliser les niveaux d'exposition des cyclistes. La plupart d'entre elles ont plutôt recours à des proxys du trafic relatifs à la typologie des axes (par exemple, routes primaires, secondaire, tertiaire, résidentielle, etc.). Par exemple, on postule alors que le cycliste va croiser plus de véhicules sur une route primaire que sur une route résidentielle. **L'objectif principal** de cette étude est de comparer la performance des indicateurs de typologie des axes et des mesures de trafic en temps réel pour modéliser les niveaux d'exposition à la pollution atmosphérique et au bruit. Autrement dit, il s'agit de répondre à la question de recherche suivante : les mesures de trafic en temps réel sont-elles plus performantes que les indicateurs classiques relatifs à la typologie des axes pour estimer les niveaux d'exposition au bruit et à la pollution des cyclistes en milieu urbain?

Territoire d'étude et données primaires collectifs

L'étude repose sur une collecte de données réalisée à vélo dans la ville de Mexico durant une semaine (du 27 février au 3 mars 2017). Après nettoyage des données, 19 trajets ont été retenus représentant 11 heures et 137 kilomètres. 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 (NO_2 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Deuxièmement, pour la même résolution temporelle, un *dosimètre Brüel & Kjør* (type 4448) enregistre la valeur moyenne de bruit (dB(A)). Troisièmement, une montre Garmin Forerunner 920 XT enregistre la position et la vitesse à chaque seconde. Les traces GPS sont ensuite rattachées au réseau routier *Open Street Map* (OSM) et finalement, découpées en segments d'une minute. À partir de la clé *highway* d'OSM, pour chaque minute du trajet, il est alors possible de calculer le nombre de secondes parcourues sur les différents types d'axes : voie rapide ou express (*trunk*), route majeure (*primary*), secondaire (*secondary*), tertiaire (*tertiary*), résidentielle (*residential*), piétonne (*pedestrian* ou *footway*), piste cyclable (*cycleway*). À partir de la balise *cycleway* d'OSM, il est aussi possible d'estimer le temps parcouru sur les bandes cyclables (*bike lanes*) et les chaussées désignées (*designated*).

Quatrièmement, une caméra d'action *Garmin Virb* est attachée au guidon du vélo. L'analyse des vidéos nous permet d'estimer précisément le nombre de véhicules croisés à chaque minute. Pour réaliser les comptages, nous utilisons un logiciel développé au sein de notre laboratoire. Cet outil, assez simple d'utilisation, permet à un utilisateur de regarder une vidéo et de cliquer dessus lorsque des événements particuliers se produisent. À partir d'un raccourci clavier prédéfini, l'utilisateur peut ainsi distinguer plusieurs catégories d'événements (par exemple, voiture, véhicule lourd et motocyclette, en mouvement ou à l'arrêt). L'heure et l'emplacement sur la vidéo des

événements sont enregistrés dans un fichier *json*. Pour s'assurer d'obtenir des comptages précis, chaque vidéo est comptée par deux étudiants. Des tests statistiques sont ensuite réalisés pour s'assurer d'une bonne concordance entre les comptages des deux étudiants.

Modèles statistiques

Pour répondre à notre objectif de recherche, nous avons construit six modèles bayésiens de régression à effets mixtes : trois (A, B, et C) avec comme variable dépendante l'exposition au NO₂ (µg/m³) et trois autres (A, B, C) avec l'exposition au bruit (dB(A)). Pour contrôler l'autocorrélation temporelle, nous avons inclus un terme de type *moving average* (avec $q=3$). Signalons d'emblée que ces modèles sont à effets mixtes puisque la journée est introduite comme un effet aléatoire. Les variables de contrôle (effets fixes) sont 1) le moment de la journée; 2) le nombre d'intersections croisées; 3) le temps passé sur une piste cyclable (en minutes); 4) le temps passé sur une bande cyclable (en minute); 3) des variables muettes pour vérifier si la piste cyclable est située à moins de 25 mètres d'un axe autoroutier, d'une voie rapide, d'une route primaire et d'une route secondaire. Finalement, dans les modèles A, nous ajoutons deux variables indépendantes pour estimer l'influence, à savoir 1) le nombre de voitures croisées (x10) et 2) et le nombre de véhicules lourds croisés (x10) durant la minute. Pour les modèles B, nous ajoutons le temps passé sur chacun des types d'axes routiers (voie rapide, primaire, secondaire, tertiaire, résidentielle, piétonne), afin d'estimer l'influence du type d'axe emprunté sur les niveaux de bruit et de pollution. Finalement, dans les modèles C, nous ajoutons à la fois les variables de trafic et de typologie des axes. La comparaison des modèles A et B permet de vérifier si les mesures de trafic en temps réel sont plus performants que ceux relatifs à la typologie des axes empruntés pour estimer les niveaux d'exposition au bruit et d'exposition et d'inhalation du dioxyde d'azote.

Résultats

Les résultats des modèles bayésiens pour les expositions au bruit et à la pollution atmosphérique sont respectivement reportés aux tableaux 1 et 2. Pour l'exposition au bruit, à la lecture des valeurs du WAIC, le modèle A avec les mesures du trafic en temps réel semble être plus performant que celui avec la typologie des axes. Sans surprise, plus le nombre de véhicules croisés augmente, plus le niveau de bruit augmente. Cela est particulièrement important pour les véhicules lourds. Pour le modèle B, comparativement au temps passé sur une voie rapide ou express (*trunk*), les niveaux d'exposition sont plus faibles pour les autres types d'axes. Par contre, pour l'exposition à la pollution atmosphérique, les modèles A et B sont très comparables en termes de performance. D'ailleurs tant les mesures de trafic en temps réel que les types d'axes empruntés s'avèrent peu significatifs.

Conclusion

Les mesures d'intensité du trafic se comportent différemment pour la pollution sonore que pour la pollution atmosphérique. Pour l'exposition au NO₂, le nombre de véhicules rencontrées ne semble pas significatif ni dans le modèle A, ni dans le modèle C, ce qui peut paraître contre-intuitif. À l'inverse, ces mesures le sont très fortement pour l'exposition au bruit. Cela s'explique notamment par le fait que le bruit est une pollution immédiate, qui se disperse dans l'air directement après son émission. À l'inverse, la pollution atmosphérique est capable de s'accumuler dans le temps ce qui contribue à relativiser l'importance des variables du trafic en temps réel. En d'autres termes, ce qui est important du point de vue de l'exposition au NO₂ sur un axe, ce n'est pas le nombre de véhicules croisés pendant une minute, mais bien le nombre de véhicules qui sont déjà passés par cet axe depuis le début de la journée.

Tableau 1. Résultats des modèles bayésiens à effets mixtes pour l'exposition au bruit (dBA(A)).

	Modèle A		Modèle B		Modèle C	
	Coef.	HDI (95%)	Coef.	HDI (95%)	Coef.	HDI (95%)
Intercepte	70,89	[69,42 72,18]	76,74	[73,98 79,27]	74,57	[72,11 77,08]
Moment de la journée (8h-9h)	Réf.		Réf.		Réf.	
10h à 12h	-1,18	[-2,33 0,08]	-0,49	[-1,75 0,71]	-0,75	[-1,95 0,40]
13h à 15h	-1,06	[-2,27 0,14]	-0,67	[-1,86 0,57]	-0,90	[-2,04 0,30]
16h à 17h	-1,91	[-3,61 -0,22]	-0,84	[-2,58 0,89]	-1,26	[-2,89 0,45]
Nombre d'intersections croisées	0,14	[-0,01 0,30]	0,05	[-0,11 0,21]	0,10	[-0,05 0,26]
Nombre de voitures (x10)	0,41	[0,24 0,60]	--	--	2,62	[1,14 4,11]
Nombre de véhicules lourds (x10)	3,25	[1,66 4,69]	--	--	0,35	[0,17 0,51]
Voie rapide (min.)	Réf.		Réf.		Réf.	
Route primaire (min.)	--	--	-2,42	[-4,68 -0,13]	-1,94	[-4,10 0,15]
Route secondaire (min.)	--	--	-5,33	[-7,61 -2,87]	-4,46	[-6,65 -2,18]
Route tertiaire (min.)	--	--	-4,96	[-7,36 -2,54]	-4,13	[-6,38 -1,85]
Rue résidentielle (min.)	--	--	-6,77	[-9,16 -4,55]	-5,26	[-7,41 -3,01]
Rue piétonne (min.)	--	--	-8,18	[-12,92 -3,37]	-6,58	[-11,18 -2,02]
Piste cyclable (min.)	-0,42	[-1,96 1,02]	-5,20	[-7,61 -2,53]	-3,96	[-6,29 -1,56]
Bande cyclable (min.)	-1,21	[-3,15 0,98]	-0,39	[-2,61 1,84]	-0,33	[-2,36 1,82]
Axe majeur à moins de 25 m. de la piste cyclable						
Autoroute (variable muette)	0,42	[-1,52 2,60]	1,32	[-0,59 3,44]	0,54	[-1,55 2,47]
Voie rapide (var. muette)	2,29	[0,63 3,93]	2,29	[0,76 3,92]	2,15	[0,67 3,79]
Route primaire (var. muette)	0,06	[-1,10 1,25]	0,43	[-0,66 1,68]	-0,04	[-1,21 1,07]
Route secondaire (var. muette)	0,29	[-1,00 1,59]	0,97	[-0,34 2,26]	0,52	[-0,71 1,76]
Ajustement du modèle						
WAIC	3449		3462		3411	
ICC	0,04	[0,00 0,18]	0,05	[0,00 0,26]	0,04	[0,00 0,29]
R ² bayésiens	0,307	[0,260 0,352]	0,3200	[0,270 0,366]	0,369	[0,322 0,411]

Tableau 2. Résultats des modèles bayésiens à effets mixtes pour l'exposition au NO₂ (µg/m³).

	Modèle A		Modèle B		Modèle C	
	Coef.	HDI (95%)	Coef.	HDI (95%)	Coef.	HDI (95%)
Intercepte	193,72	[151,18 236,41]	198,01	[158,23 240,88]	198,73	[157,26 240,95]
Moment de la journée (8h-9h)	Réf.		Réf.		Réf.	
10h à 12h	5,04	[-5,37 15,73]	5,04	[-4,91 16,07]	5,15	[-5,27 15,90]
13h à 15h	57,18	[46,97 68,27]	56,51	[45,89 67,45]	56,62	[45,96 67,48]
16h à 17h	36,37	[23,16 49,98]	36,07	[22,78 49,75]	36,03	[22,54 49,01]
Nombre d'intersections croisées	0,24	[-0,52 1,05]	0,26	[-0,53 1,02]	0,26	[-0,56 1,04]
Nombre de voitures (x10)	-0,07	[-1,04 0,91]	--	--	0,07	[-0,90 0,98]
Nombre de véhicules lourds (x10)	-2,27	[-10,08 5,36]	--	--	-2,65	[-10,24 4,90]
Voie rapide (min.)	Réf.		Réf.		Réf.	
Route primaire (min.)	--	--	-6,07	[-15,76 3,73]	-6,07	[-16,11 3,16]
Route secondaire (min.)	--	--	-8,39	[-18,63 1,30]	-8,54	[-18,86 0,99]
Route tertiaire (min.)	--	--	-1,73	[-11,69 9,13]	-1,72	[-12,62 8,20]
Rue résidentielle (min.)	--	--	-0,63	[-10,18 9,27]	-0,89	[-10,56 9,24]
Rue piétonne (min.)	--	--	-2,41	[-19,37 15,08]	-2,34	[-20,91 13,74]
Piste cyclable (min.)	8,93	[0,45 17,03]	5,93	[-3,91 16,25]	5,84	[-4,04 16,58]
Bande cyclable (min.)	-4,68	[-16,67 7,39]	-3,78	[-16,48 8,30]	-3,46	[-15,99 9,53]
Axe majeur à moins de 25 m. de la piste cyclable						
Autoroute (variable muette)	4,95	[-4,52 14,29]	5,11	[-4,28 14,61]	5,16	[-4,15 14,86]
Voie rapide (var. muette)	15,3	[5,49 24,15]	15,01	[5,23 24,00]	14,95	[5,18 24,72]
Route primaire (var. muette)	1,96	[-4,42 8,34]	1,58	[-4,91 7,83]	1,65	[-4,71 7,93]
Route secondaire (var. muette)	-1,73	[-8,48 4,81]	-2,10	[-8,89 4,62]	-1,83	[-8,41 4,93]
Ajustement du modèle						
WAIC	5756		5755		5758	
ICC	0,73	[0,50 0,94]	0,73	[0,49 0,94]	0,73	[0,50 0,94]
R ² bayésiens	0,852	[0,842 0,861]	0,853	[0,843 0,862]	0,853	[0,843 0,862]