

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE – URBANISATION CULTURE SOCIÉTÉ

**LA QUALITÉ DES VOIES CYCLABLES À MONTRÉAL, LAVAL ET
LONGUEUIL :**

Construction d'indicateurs de diagnostic et d'aide à la planification

Par

Vincent JARRY

Bachelier ès sciences, B.Sc.

Mémoire présenté pour obtenir le grade de

Maître ès sciences, M.Sc.

Maîtrise en études urbaines

Programme offert conjointement par l'INRS et l'UQAM

Novembre 2021

Ce mémoire intitulé

**LA QUALITÉ DES VOIES CYCLABLES À MONTRÉAL, LAVAL ET
LONGUEUIL :**

Construction d'indicateurs de diagnostic et d'aide à la planification

et présenté par

Vincent JARRY

a été évalué par un jury composé de

Philippe APPARICIO, directeur de recherche, INRS

Sophie L. VAN NESTE, examinatrice interne, INRS

Geneviève BOISJOLY, examinatrice externe, Polytechnique Montréal

*à une page ou à une autre de votre journal, chaque jour,
on fait état d'un problème que le vélo pourrait contribuer à résoudre.*

Claire Morissette ([1994] 2009, 27)

RÉSUMÉ

L'augmentation de la part modale du vélo en ville génère de nombreux bénéfices à la fois individuels et collectifs. L'attractivité de la pratique du vélo dépend notamment de la présence d'infrastructures cyclables de qualité. Ce mémoire vise à proposer des indicateurs de qualité des voies cyclables, reposant sur une collecte de données primaires réalisée avec des vélos instrumentés (sonomètre, capteur de pollution, accéléromètre, caméra vidéo). Quatre dimensions de la qualité des voies cyclables sont évaluées : l'exposition au bruit, l'exposition à la pollution atmosphérique, l'état de la chaussée et la sécurité routière. Des modèles généralisés additifs sont construits pour prédire, à l'échelle de chaque tronçon, le niveau de bruit, la concentration de particules fines $PM_{2,5}$ et les probabilités de vivre un conflit avec un véhicule et avec un·e piéton·ne en fonction du type de voie cyclable. Le recours à une méthode de classification spatiale floue a permis de regrouper les tronçons ayant des caractéristiques communes. Les résultats révèlent quatre types empiriques de voies cyclables : 1) les pistes protégées de grandes rues caractérisés par des niveaux élevés de bruit et de pollution, une chaussée en mauvais état, une faible probabilité de conflit avec véhicule et une probabilité élevée de conflit avec un·e piéton·ne; 2) les bandes peinturées de grandes rues, soit des bandes cyclables au bruit et à la pollution élevée, avec une chaussée en bon état, une probabilité moyenne de conflit avec véhicule, et une très faible probabilité de conflit avec piéton·ne; 3) les peinturées de petites et moyennes rues, soit des bandes cyclables peu bruyantes, moyennement polluées, avec une chaussée en bon état, une probabilité élevée de conflit avec véhicule et une probabilité moyenne de conflit avec piéton·ne; et 4) les protégées de parcs et de petites et moyennes rues avec des niveaux bas de bruit et de pollution, une chaussée en piètre état, une faible probabilité de conflit avec véhicule, mais une probabilité élevée de conflit avec piéton·ne.

Mots-clés : infrastructures cyclables; exposition au bruit; exposition à la pollution; particules fines; état de la chaussée; auscultation de la chaussée; conflits de circulation; vélo instrumenté; collecte mobile de données; Montréal.

ABSTRACT

Increasing cyclists' modal share in cities brings numerous benefits to individuals and collectivities. However, urban cycling's attractiveness depends upon the availability of quality cycling facilities. The aim of this thesis is to propose cycling infrastructure quality indicators that are based on a primary mobile data collection using instrumented bicycles (noise dosimeter, pollution sensor, accelerometer, video camera). Three scopes are covered: noise and air pollution exposure, pavement condition and road safety. Generalized Additive Models are built to predict, for each road section, expected levels of noise intensity, particulate matter (PM_{2.5}) concentration, and conflict likelihood with a vehicle or with a pedestrian. A spatial fuzzy clustering algorithm is then used to group cycleway sections that share common characteristics. Results reveal four empirical cycleway types: 1) large roads protected bike paths, which are loud, polluted, with a poorly maintained pavement, a low likelihood of conflict with a vehicle and a high likelihood of conflict with a pedestrian; 2) large roads painted strips, which are loud and polluted, with a pavement in good condition, an average likelihood of conflict with a vehicle and a low likelihood of conflict with a pedestrian; 3) small and medium streets painted strips, which are quiet and averagely polluted, with a pavement in good condition, a high likelihood of conflict with a vehicle and an average likelihood of conflict with a pedestrian; 4) park and small and medium streets protected paths, which are quiet and not polluted, with a pavement in poor condition, a low likelihood of conflict with a vehicle, but a high likelihood of conflict with a pedestrian.

Keywords: cycling infrastructure; noise exposure; air pollution exposure; particulate matter; pavement condition; road survey; traffic conflict; instrumented bicycle; mobile data collection, Montreal.

AVANT-PROPOS

On utilise souvent le nombre de kilomètres de voies cyclables pour illustrer la progression de la convivialité vélo d'une ville. À Montréal, il y avait en 2016 un total de 732 km de voies cyclables, soit trois fois plus qu'en 1991. Cette progression fulgurante cache cependant un bémol : l'essentiel de la croissance a été réalisée en peignant des bandes cyclables au sol. Or, toutes les voies cyclables ne s'équivalent pas. Les cyclistes accordent généralement une grande importance aux caractéristiques des voies cyclables.

Ainsi, pour rendre l'utilisation du vélo en ville plus attrayante et accessible, il ne suffit pas de construire davantage de voies cyclables ; il faut en construire de meilleures. Certains outils permettent d'évaluer la qualité des tronçons en se basant sur des caractéristiques techniques des voies, comme la largeur de l'emprise, les débits moyens de véhicules, la présence de bande de stationnement, la présence de séparation physique avec le reste de la circulation, etc. S'ils permettent d'obtenir une bonne approximation indirecte de la qualité des tronçons cyclables, ils ne sont pas issus de données quantitatives récoltées par des capteurs sur le terrain.

On dispose actuellement de peu d'outils pour évaluer la qualité des voies cyclables de manière empirique. Les collectes de données à vélo réalisées dans plusieurs villes du monde par le Laboratoire d'équité environnementale recèlent un potentiel énorme pour mieux caractériser quantitativement les voies cyclables. Exploiter de manière combinée l'ensemble des données produites par ces collectes permettrait de répondre à des questions éminentes en planification des voies cyclables : quels types de voie cyclable exposent les cyclistes à des environnements bruyants et pollués, la chaussée desquelles est en piètre état, et lesquelles sont des terreaux fertiles pour les conflits de circulation ? Ce mémoire illustre le cas de Montréal, Laval et Longueuil, qui offrent un terrain d'étude caractérisé par une grande diversité de types de voies cyclables.

Notez que ce mémoire utilise un langage inclusif (méthode du point médian et néologismes), excepté dans les chapitres 3 et 4, qui sont des reproductions telles quelles d'articles soumis à des revues avec comité de lecture.

REMERCIEMENTS

Je tiens à reconnaître l'apport de plusieurs personnes et organismes dans la réalisation de ce mémoire.

Mes premiers remerciements se dirigent vers Philippe Apparicio, mon directeur de recherche, qui m'a soutenu du début à la fin de mon parcours à la maîtrise. C'est un professeur généreux, disponible, impliqué et rigoureux, qui m'a appris à surmonter les défis en recherche et à apprécier les réussites. Merci aussi aux membres du jury d'évaluation pour leurs commentaires judicieux.

Je garde de précieux souvenirs du travail au Laboratoire d'équité environnementale, au sein d'une équipe stimulante, diversifiée et amicale. Je suis particulièrement reconnaissant envers Jérémy Gelb, à qui je dois l'approvisionnement de nombreuses méthodes de gestion de données et d'analyse spatiale que je n'aurais jamais pensé mobiliser.

Je remercie également les personnes-ressources qui nous ont partagé leurs données de réseaux cyclables et qui nous ont offert des commentaires judicieux pour planifier notre collecte de l'été 2019 : Michel Bédard, conseiller en aménagement et chef d'équipe à la Ville de Montréal, Jean-Sébastien Audet, ingénieur en circulation et transport à la Ville de Laval, Carine Discazeaux, technicienne spécialiste en circulation et mobilité active à la Ville de Longueuil, et Jean-François Lagacé, chef de la division de transport et mobilité active à la Ville de Longueuil.

Merci aux participant·e·s qui ont prêté leurs jambes à la science en récoltant à vélo les données nécessaires à ce mémoire, ainsi qu'aux stagiaires et étudiant·e·s qui ont participé à la préparation des collectes et au codage des vidéos.

Je suis reconnaissant envers le Conseil de recherches en sciences humaines du Canada pour son soutien financier à travers ses nombreux programmes, notamment la Chaire de recherche du Canada sur l'équité environnementale et la ville, la subvention Savoir et la bourse d'études supérieures du Canada au niveau de la maîtrise.

Mes derniers remerciements concernent ma famille, qui m'a soutenu financièrement et moralement de la maternelle à la maîtrise, et mon amoureuse Lilie Corbeil, qui a été compréhensive, encourageante et bienveillante.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux	xii
Liste des figures	xiii
Liste des abréviations et des sigles	xv
Introduction	1
Chapitre 1 : Revue de littérature	3
1.1 Infrastructures cyclables et pratique du vélo : survol historique international.....	3
1.1.1 <i>La « vélorution » des transports urbains : intérêts et enjeux</i>	3
1.1.2 <i>Quantité, densité et qualité des voies cyclables : deux paradigmes</i>	7
1.2 Freins et leviers du vélo en ville	9
1.2.1 <i>Préférences des cyclistes</i>	9
1.2.2 <i>Différents types de cyclistes</i>	12
1.2.3 <i>Dimensions importantes de la qualité des voies cyclables</i>	13
1.3 Mesures de qualité des voies cyclables	14
1.3.1 <i>La sécurité routière</i>	14
1.3.2 <i>L'état de la chaussée</i>	20
1.3.3 <i>L'exposition au bruit et à la pollution</i>	22
1.3.4 <i>La qualité des voies cyclables : d'autres outils de mesure</i>	27
1.4 Problématique, pertinence, objectifs, question et hypothèses	30
1.4.1 <i>Problématique</i>	30
1.4.2 <i>Objectifs</i>	32
1.4.3 <i>Question et hypothèse de recherche</i>	33
1.4.4 <i>Organisation du mémoire de maîtrise</i>	34
1.4.5 <i>Pertinence de la recherche</i>	36
1.5 Conclusion	37
Chapitre 2 : Méthodologie	38
2.1 Territoire d'étude.....	38
2.2 Collecte extensive de données primaires	40

2.2.1	<i>Design de collecte</i>	40
2.2.2	<i>Matériel utilisé</i>	42
2.2.3	<i>Trois collectes</i>	46
2.3	Données secondaires	48
2.3.1	<i>Réseaux cyclables</i>	48
2.3.2	<i>Réseaux routiers</i>	50
2.3.3	<i>Interaction entre les réseaux</i>	51
2.4	Structuration des données	53
2.4.1	<i>Fusion des données primaires et secondaires</i>	53
2.4.2	<i>Structuration propre à chaque dimension</i>	54
2.5	Analyses	57
2.5.1	<i>Analyse propre à chaque dimension</i>	57
2.5.2	<i>Intégration des indicateurs de qualité</i>	63
Chapitre 3 : Exposition au bruit et types de voie cyclable		68
3.1	Introduction	72
3.2	Revue de littérature.....	73
3.2.1	<i>Le bruit environnemental : un enjeu de santé publique</i>	73
3.2.2	<i>L'exposition au bruit : de fortes variations temporelles, spatiales et selon les types d'axes empruntés</i>	73
3.3	Données et méthodes	74
3.3.1	<i>Territoire d'étude</i>	74
3.3.2	<i>Données sur les réseaux viaire et cyclable</i>	75
3.3.3	<i>Données primaires sur l'exposition au bruit collectées à vélo</i>	77
3.4	Structuration des données primaires sur les réseaux routier et cyclable	81
3.5	Analyses statistiques	82
3.6	Résultats.....	84
3.6.1	<i>Les niveaux d'exposition au bruit selon les trois sous-territoires : analyses descriptives et ANOVA</i>	84

3.6.2 <i>Les niveaux d'exposition selon les axes empruntés : les résultats du modèle GAMMAR</i>	85
3.7 Discussion	89
3.7.1 <i>L'apport des modèles généralisés additifs mixtes pour la modélisation de l'exposition des cyclistes au bruit</i>	89
3.7.2 <i>Positionnement des résultats et implications pour la planification</i>	90
3.8 Conclusion	95
Chapitre 4 : Risque de conflit et types de voie cyclable	97
4.1 Introduction	101
4.1.1 <i>Cycling Risk and Protection Factors</i>	102
4.1.2 <i>Research Objectives</i>	103
4.2 Materials and Methods	104
4.2.1 <i>Study Area: Montréal Agglomeration</i>	104
4.2.2 <i>Data</i>	104
4.2.3 <i>Data Reduction and Validation</i>	108
4.2.4 <i>Data Analysis</i>	109
4.3 Results	111
4.3.1 <i>Exploratory Data Analysis</i>	111
4.3.2 <i>Model Results</i>	113
4.4 Discussion	117
4.4.1 <i>Limitations</i>	117
4.4.2 <i>Contribution to Scholarly Knowledge</i>	117
4.4.3 <i>Implications for Decision Makers</i>	121
4.5 Conclusions	122
Chapitre 5 : Vers des indicateurs de qualité	124
5.1 Résultats de chaque dimension	124
5.1.1 <i>Bruit et pollution</i>	124
5.1.2 <i>État de la chaussée</i>	131

5.1.3 Conflits	133
5.2 Classification des tronçons cyclables	142
5.2.1 Choix des paramètres	142
5.2.2 Description des groupes	145
Chapitre 6 : Discussion.....	155
6.1 Positionnement dans la littérature	155
6.1.1 Bruit et pollution.....	155
6.1.2 État de la chaussée	158
6.1.3 Conflits	161
6.1.4 Qualité des voies cyclables	162
6.2 Implications de planification	163
6.2.1 Sur quelles rues construire de nouvelles voies cyclables ?.....	163
6.2.2 Quels types de voie cyclable privilégier ?	163
6.2.3 Retour historique	165
6.2.4 À chacun·e son type.....	165
6.2.5 Typologies formelle et empirique	167
6.2.6 Transfert de connaissances vers les partenaires.....	168
6.3 Limites des données et des méthodes	169
6.3.1 Structuration des données.....	169
6.3.2 Exposition au bruit et à la pollution	170
6.3.3 État de la chaussée	171
6.3.4 Sécurité routière	171
6.3.5 Qualité des voies cyclables	172
Conclusion.....	175
Bibliographie	178
Annexe 1 : Protocole de comptage des conflits de circulation.....	195

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Réseaux cyclables et tronçons échantillonnés – collectes de 2019	39
Tableau 2.1	Définition des types de voies cyclables.....	49
Tableau 2.2	Typologie des voies cyclables	50
Tableau 2.3	Définition des types de rues.....	51
Tableau 2.4	Typologie des routes	51
Tableau 2.6	Variables explicatives des modèles d'exposition au bruit et à la pollution	58
Tableau 2.7	Variables explicatives des modèles de conflit avec véhicule et piéton·ne	62
Tableau 2.8	Variables pour prédictions	65
Tableau 3.1	Temps passé sur les différentes combinaisons de types de voies cyclables et de rues	81
Tableau 3.2	Liste de variables indépendantes.....	84
Tableau 3.3	Statistiques descriptives des niveaux d'exposition au bruit	85
Tableau 3.4	Résultats du modèle généralisé additif mixte avec terme autorégressif (GAMMAR)	87
Table 4.1	Model specification.....	110
Table 4.2	Dataset description.....	112
Table 4.3	Model results.....	116
Table 4.4	Safety incidence rates of some cycling safety studies	118
Tableau 5.1	Distribution des valeurs d'exposition au bruit et à la pollution	125
Tableau 5.2	Résumé des modèles de bruit et de pollution	126
Tableau 5.3	Résumé du modèle de correction de la vitesse et du·de la participant·e.....	131
Tableau 5.4	Répartition des conflits par type de voie cyclable et par territoire.....	135
Tableau 5.5	Résumé des modèles de conflit avec piéton·ne et avec véhicule.....	137
Tableau 5.6	Centres de gravité des groupes de la classification	149
Tableau 5.7	Associations entre le type empirique et le type officiel	152
Tableau 5.8	Associations entre le type empirique et l'agglomération.....	154
Tableau 6.1	Champs du jeu de données transmis aux partenaires	169

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Instruments de collecte de données	44
Figure 2.2	Couvertures des collectes de données primaires.....	47
Figure 2.3	Assemblage des données	54
Figure 3.1	Part modale du vélo dans les déplacements domicile-travail par secteur de recensement dans la région métropolitaine de recensement de Montréal, 2016.	75
Figure 3.2	Illustration des quatre types de voies cyclables.	77
Figure 3.3	Réseaux cyclables sur le territoire d'étude et trajets réalisés à vélo.....	79
Figure 3.4	Comparaison de l'exposition sonore des cyclistes à Montréal, Laval et Longueuil	85
Figure 3.5	Effet de la journée et du moment de la journée sur l'exposition des cyclistes au bruit	86
Figure 3.6	Effet spatial sur l'exposition des cyclistes au bruit en dB(A).....	88
Figure 3.7	Doses de bruit des cyclistes en fonction de la région et du type d'axe emprunté	93
Figure 4.1	Cycleway and road types (interaction). Pictures taken from the video recordings of the handlebar camera.....	107
Figure 4.2	Secondary, primary, and processed data.....	113
Figure 4.3	Cyclist speed's marginal effect on conflict occurrence with (a) a vehicle and (b) a pedestrian.....	114
Figure 4.4	Vehicle conflicts on bike lanes located on collector streets	119
Figure 4.5	Pedestrian conflicts on off-street bike paths.....	120
Figure 5.1	Effets temporels et spatiaux sur l'exposition au bruit et aux PM _{2,5}	127
Figure 5.2	Prédictions de bruit et de pollution pour chaque tronçon cyclable	130
Figure 5.3	Effet de la vitesse du cycliste sur les vibrations enregistrées	132
Figure 5.4	Vibrations sur les réseaux cyclables	133
Figure 5.5	Effets de la vitesse, de l'heure de la journée et de l'espace sur la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule et avec un-e piéton-ne	139
Figure 5.6	Prédictions de la probabilité de conflit avec un véhicule et avec un-e piéton-ne pour chaque tronçon cyclable	141
Figure 5.7	Effet des paramètres sur les indicateurs de qualité de la classification	145
Figure 5.8	Appartenance des tronçons cyclables aux groupes de la classification	146
Figure 5.9	Distribution des variables au sein de chaque groupe	150
Figure 5.10	Exemples typiques des groupes de voies cyclables	151

Figure 6.1 Confort perçu selon le type de voie cyclable 159

Figure 6.2 Exemple de mauvais état de la chaussée..... 160

Figure 6.3 Cas d'exceptions : l'excellent et le mauvais état 167

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

AVCI	Années de vie corrigées de l'incapacité
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
GAMAR	Modèle généralisé additif avec terme autorégressif (<i>Generalized Additive Model with AutoRegressive term</i>)
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat des Nations Unies
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NACTO	<i>National Association of City Transportation Officials</i>
NO ₂	Dioxyde d'azote
OMS	Organisation mondiale de la santé
PM _{2,5}	Particules fines de diamètre inférieur à 2,5 µm
RSQA	Réseau de surveillance de la qualité de l'air

INTRODUCTION

La pratique utilitaire du vélo en ville connaît une recrudescence depuis trois décennies. Plusieurs personnes chargées de planifier les transports urbains considèrent désormais l'augmentation de la part modale des cyclistes comme un objectif à atteindre, et l'expansion des réseaux cyclables comme un moyen pour y parvenir (Pucher, Buehler et Seinen 2011). Les bénéfices de ce virage vélo sont déjà bien documentés. À l'échelle individuelle, les cyclistes ont le potentiel d'être en meilleure santé (Garrard, Rissel et Bauman 2012), de dépenser moins d'argent en transports et de consacrer moins de temps à se déplacer, à une époque où les ménages consacrent de plus en plus de temps et d'argent à leurs déplacements (Transports Canada 2019). À l'échelle collective, la société a le potentiel de réduire les dépenses en soins de santé, la pollution et le bruit en milieu urbain, les émissions de gaz à effet de serre (GES), la congestion et les coûts d'entretien des routes (Rojas-Rueda et al. 2011).

Malgré que ce virage vélo soit déjà bien amorcé, plusieurs défis demeurent. La part modale du vélo sur l'île de Montréal est de 3,3 %, ce qui est bien peu en comparaison à Amsterdam (21%), souvent considérée comme une référence en matière de convivialité vélo (Vélo Québec 2020b ; Harms et Maarten 2018). Les réseaux cyclables actuels ont connu une expansion fulgurante dans les dernières années : à Montréal, Laval et Longueuil, les réseaux sont passés de 495 km en 1991 à 1296 km en 2016. Par contre, cette expansion ne se matérialise pas de la même façon partout : à Laval et à Longueuil, on a misé sur les pistes sur rue et hors rue, tandis qu'à Montréal, l'essentiel de la croissance a été réalisée par l'ajout de bandes cyclables (Houde, Apparicio et Séguin 2018). Le déploiement des voies cyclables et les parts modales varient également au sein même de l'île de Montréal : sur le Plateau-Mont-Royal, là où la concentration de voies cyclables et la densité urbaine sont les plus fortes, la part modale de cyclistes (13,8%) est également beaucoup plus élevée qu'ailleurs dans la région (Vélo Québec 2020b).

Si on a mis beaucoup d'efforts dans les dernières années à accroître la quantité de voies cyclables et à évaluer leur connectivité, peu d'attention a été accordée à la qualité des tronçons cyclables, et à leur caractérisation par des indicateurs empiriques. Or, on sait que les cyclistes sont sensibles à plusieurs facteurs lors de leurs déplacements. Il faut notamment que l'itinéraire soit à l'écart des environnements bruyants et pollués, que la chaussée soit en bon état, et que le déplacement soit sécuritaire. L'effet des types de voies cyclables sur ces dimensions, pourtant très importantes pour les cyclistes, demeure méconnu. **Nous proposons donc, dans ce mémoire, d'évaluer**

quel est l'effet du type de rue et de voie cyclable empruntée sur l'exposition au bruit et à la pollution, sur l'état de la chaussée et sur la probabilité de vivre un conflit de circulation avec un véhicule et avec un-e piéton-ne. Cette évaluation prendra la forme d'indicateurs de qualité des voies cyclables selon ces trois dimensions. Ces indicateurs reposent sur une collecte de données primaires réalisée à Montréal, Laval et Longueuil, aux étés 2018 et 2019, à l'aide de vélos instrumentés.

Ce mémoire comprend deux articles de revue avec comité de lecture : le premier qui concerne l'exposition au bruit, est sous presse aux *Cahiers de géographie du Québec* tandis que le second, qui concerne la probabilité de vivre un conflit de circulation est publié dans la revue *Safety*. Ces articles constituent les chapitres des résultats de ce mémoire.

Le premier chapitre du mémoire présente la revue de la littérature, la problématique, les questions et les objectifs de recherche. Le second chapitre décrit les méthodes utilisées pour atteindre les objectifs, notamment, le territoire étudié, la structuration des données primaires et secondaires et les analyses statistiques mobilisées. Le troisième chapitre (article scientifique) présente les résultats de l'exposition au bruit des cyclistes pour la collecte de l'été 2018, à Montréal, Laval et Longueuil. Le quatrième chapitre (article scientifique) concerne les résultats de la probabilité de vivre un conflit de circulation pour la collecte de l'été 2019, à Montréal. Le cinquième chapitre présente, dans un premier temps, les résultats de chacun des indicateurs de qualité des voies cyclables (exposition au bruit et à la pollution, état de la chaussée, probabilité de conflit). Dans un deuxième temps, ce chapitre présente les résultats de la classification floue par agrégats (*c-means*) des tronçons de voies cyclables de Montréal, Laval et Longueuil, en fonction de leurs composantes sémantiques (performance selon chaque indicateur) et spatiale (relation de proximité entre les tronçons). Le sixième chapitre est une discussion de l'ensemble des résultats, qui inclut un positionnement par rapport aux autres études, des implications en termes de planification, et des limites du mémoire.

Notez qu'il y aura inévitablement un peu de redondance entre les deux premiers chapitres de ce mémoire et certaines sections des articles scientifiques — principalement la revue de la littérature et la méthodologie. En effet, dans un article scientifique, la revue de la littérature et la méthodologie sont souvent présentés de façon succincte. Nous souhaitons, dans les deux premiers chapitres, les décrire de façon plus détaillée, tel que demandé dans les procédures relatives au mémoire par articles en études urbaines à l'INRS.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE

Ce premier chapitre présente les différentes conceptualisations de la qualité des voies cyclables, les façons qu'il est possible de l'évaluer, ainsi que la problématique de ce mémoire. Dans un premier temps, nous expliquerons rapidement pourquoi plusieurs villes dans le monde montrent un intérêt grandissant pour les infrastructures cyclables urbaines. Nous décrivons les différentes approches de planification des voies cyclables, en Europe et en Amérique du Nord. Par la suite, nous nous intéresserons aux préférences des cyclistes en matière d'aménagement ; aux freins et leviers du choix du vélo comme mode de déplacement en ville. Il s'en dégage trois dimensions clés : la sécurité des déplacements, l'état de la chaussée et l'exposition aux polluants atmosphériques et sonore. Puis, on vise à identifier de quelle façon il est possible d'évaluer ces dimensions, en se basant sur la littérature existante. Le chapitre est clos en présentant la problématique qui guidera cette recherche, ainsi que ses objectifs particuliers.

1.1 Infrastructures cyclables et pratique du vélo : survol historique international

1.1.1 La « vélorution » des transports urbains : intérêts et enjeux

Plusieurs auteur·e·s s'entendent pour dire qu'on assiste présentement à une renaissance du vélo urbain en Amérique du Nord (Pucher, Buehler et Seinen 2011). Les réseaux cyclables de plusieurs villes sont en expansion ; en guise d'exemple, à Montréal, entre 1991 et 2016, le réseau cyclable a presque triplé en taille (Houde, Apparicio et Séguin 2018). Pourquoi cet intérêt grandissant envers le vélo, longtemps considéré comme un jouet, mais qui aujourd'hui apparaît comme une solution à plusieurs problèmes de mobilité urbaine ?

La pratique du vélo utilitaire en ville a plusieurs bénéfices individuels et collectifs. D'abord, sur un plan individuel, elle contribue à une meilleure santé et qualité de vie (Bassett et al. 2008 ; Oja, Vuori et Paronen 1998). Afin de demeurer en bonne santé, l'*American College of Sports Medicine* et l'*American Heart Association* recommandent de pratiquer 30 minutes d'activité physique modérée par jour (Haskell et al. 2007). Plusieurs études montrent que le risque relatif de mortalité est entre 20% et 35% plus bas chez les personnes qui atteignent ces seuils minimaux d'activité physique recommandés, comparativement à des personnes inactives (Bauman 2004 ; Lee et Skerrett 2001 ; Warburton, Nicol et Bredin 2006). Utiliser le vélo sur une base quotidienne pour

se rendre au travail permet généralement d'atteindre ces seuils recommandés d'activité physique par jour (De Hartog et al. 2010). On peut ainsi facilement profiter de tous ces bénéfices pour la santé individuelle, sans avoir à dégager du temps supplémentaire dans son horaire pour une autre activité sportive. Ce bénéfice pour la santé se matérialise notamment dans l'indice de masse corporelle (IMC), qui est plus élevé en moyenne chez les automobilistes que chez les cyclistes (Dons et al. 2018). Dans une vaste étude longitudinale sur 15 ans, Lusk et al. (2010) ont observé une perte de poids moyenne de 1,59 kg chez des femmes ayant augmenté de 30 minutes par jour le temps passé à faire du vélo. Également, le navettage en transport actif (marche et vélo) est associé avec une réduction de 11% du risque de développer une maladie cardiovasculaire (Hamer et Chida 2008). Par ailleurs, sans se concentrer spécifiquement sur le vélo, plusieurs études ont montré des bénéfices importants pour la santé mentale liés à la pratique d'activités physiques d'intensité modérée de manière régulière, notamment : l'amélioration et la prévention des symptômes de personnes dépressives (Mead et al. 2008 ; Lindwall, Larsman et Hagger 2011), l'amélioration des capacités cognitives chez les enfants (Aberg et al. 2009) et chez les personnes âgées (Angevaren et al. 2008).

Posséder et utiliser un vélo est très abordable : moins de 600\$ par année sont suffisants (Vélo Québec 2014, cité dans Bergeron 2014-08-20), alors qu'une voiture compacte moyenne coûte près de 7 000 \$ par année (CAA Québec 2020) lorsqu'on tient compte de toutes les dépenses (dépréciation de la valeur de la voiture, essence, assurances, immatriculation, permis de conduire, entretien général, etc.). Signalons qu'en milieu urbain, la plupart des déplacements courts (5 à 8 km) sont plus rapides à réaliser en vélo qu'en voiture et en transport collectif (Pietritsch et al. 2008, cités dans Fernandez-Heredia, Jara-Díaz et Monzón 2014). Une personne qui fait le saut de la voiture au vélo peut ainsi faire des gains considérables dans son budget d'argent et de temps et potentiellement les réinvestir dans d'autres sphères de sa vie. Cela est d'autant plus intéressant en sachant que le transport représente la deuxième dépense en importance des ménages canadiens (après le logement), et que la proportion des dépenses liées au transport ne cesse d'augmenter d'année en année (Transports Canada 2019).

Sur le plan collectif, l'utilisation répandue du vélo utilitaire présente également de nombreux bénéfices. D'abord, on a vu que les individus actifs sont en meilleure santé et ont moins de chances de souffrir de plusieurs types de maladies. En comparaison avec le cyclisme de loisir, le cyclisme utilitaire a un grand potentiel pour améliorer la santé physique des adultes d'une population, puisqu'il ne requiert pas de temps supplémentaire dans une journée (Garrard, Rissel et Bauman 2012). À l'échelle de la collectivité, cela se traduit par une réduction de la facture

publique de soins de santé (Rojas-Rueda et al. 2011). Des rues à l'échelle humaine, c'est-à-dire des rues où les principaux modes de déplacement sont la marche, le vélo et le transport collectif et où la voiture circule à basse vitesse, permettent plus d'interactions sociales entre voisins et alimentent un esprit de communauté (Litman et Doherty 2009, cités dans Garrard, Rissel et Bauman 2012). La promotion du vélo a également un potentiel de réduction des iniquités de santé au sein de la population. En effet, les groupes aisés financièrement participent à plus d'activités sportives récréatives que les groupes défavorisés. Cependant, ce n'est pas le cas pour les activités sportives utilitaires, comme le transport actif. Ainsi, des politiques de promotion du transport actif bénéficient à toutes les « strates » de la population (Garrard, Rissel et Bauman 2012).

Un autre bénéfice collectif issu d'un transfert modal de la voiture vers le vélo est la réduction de la pollution en milieu urbain (Garrard, Rissel et Bauman 2012). En effet, dans la plupart des grandes villes occidentales, les véhicules motorisés sont responsables d'une grande part des émissions de polluants (World Health Organization 2018b ; Garrard, Rissel et Bauman 2012). Au pays, Santé Canada estime que les émissions de véhicules diesel et à essence qui circulent en ville sont respectivement responsables de 320 et 700 décès prématurés par année (Brewer et al. 2016 ; Charman et al. 2017). La quasi-totalité de ces décès sont dus à deux polluants, soit le dioxyde d'azote (NO₂) et les particules fines (PM_{2,5}). Toutes sources anthropiques confondues, la pollution de l'air cause chaque année au Canada 14 400 décès prématurés (Jessiman et al. 2018).

Économiquement, il est possible de chiffrer ces bénéfices de santé publique en argent, en se basant sur la valeur statistique de la vie. En utilisant l'outil HEAT de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (*Health Economic Assessment Tool for Cycling*), Vélo Québec a estimé en 2015 que la pratique actuelle du vélo à Montréal aidait à prévenir 139 décès par année, ce qui équivaut à 940 millions de dollars (Vélo Québec 2015). Ce calcul se base uniquement sur la valeur statistique des vies sauvées grâce à l'activité physique ; ainsi on peut supposer qu'en tenant compte de la réduction des dépenses en santé découlant d'une meilleure santé physique des gens, ainsi que des décès évités par la réduction de la pollution ambiante, on pourrait dégager des bénéfices encore plus substantiels.

Un transfert modal de la voiture vers le vélo a également le potentiel de réduire le bruit environnemental. En effet, les véhicules à moteur qui circulent en ville sont une des principales sources de pollution sonore (Garrard, Rissel et Bauman 2012). Or, la pollution sonore a de

nombreux effets sur la santé, notamment la gêne, le stress, l'insomnie, l'hypertension, etc. (World Health Organization 2011). Elle est également souvent identifiée par les résidents comme étant une nuisance importante : dans un sondage australien sur la victimisation criminelle, le bruit routier excessif était le problème de quartier le plus souvent rapporté (Australian Bureau of Statistics 2010, cité dans Garrard, Rissel et Bauman 2012).

Un virage vélo a par ailleurs le potentiel de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Au Canada, le secteur des transports est le deuxième plus grand responsable d'émissions de GES (25%), tout juste derrière l'exploitation pétrolière et minière (laquelle est nécessaire à l'utilisation des véhicules motorisés) (Environnement Canada 2020). Au Québec, le transport est la première source d'émissions de GES (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques 2019). Même si récemment les émissions de ce secteur économique se sont stabilisées, celles-ci ont crû de 50% entre 1990 et 2017. De plus, le nombre de camions légers (VUS) sur la route a augmenté de façon fulgurante entre 1990 et 2017 (leur nombre a presque quadruplé) ; le seul élément semblant contenir une augmentation conséquente de leurs émissions de GES étant les avancées d'efficacité énergétique dans les moteurs et l'avènement des systèmes hybrides (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques 2019). Or, selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat des Nations Unies (GIEC), afin de limiter les dégâts des changements climatiques sur la planète et sur l'humanité, il faut réduire de façon drastique nos émissions dès 2030, pas seulement réduire leur taux d'accroissement ou les stabiliser comme c'est le cas actuellement dans le secteur des transports (GIEC 2018). L'utilisation plus répandue de la bicyclette plutôt que la voiture pour de nombreux déplacements urbains s'avère une solution prometteuse pour contribuer à réduire les émissions de GES du secteur des transports (Garrard, Rissel et Bauman 2012).

De nombreux autres bénéfices collectifs se dégagent de la promotion du vélo et de l'aménagement d'infrastructures cyclables. Plus de vélos et moins de voitures sur la route signifient moins de congestion (Buehler et Pucher 2012), moins d'usure de la chaussée (Vélo Québec 2019), moins de collisions (Jacobsen et Rutter 2012), entre autres choses.

Afin de profiter de tous les bénéfices individuels et collectifs mentionnés ci-dessus, plusieurs villes dans le monde ont amorcé une véritable « vélorution » des transports urbains. Pour y parvenir, des approches différentes ont été adoptées par les planificateurs. Certaines ont opté pour la construction de voies cyclables ségréguées de la circulation (en Europe), tandis que d'autres ont plutôt voulu intégrer les cyclistes à la circulation parmi les voitures (en Amérique du Nord) (Furth

2012). Dans les deux cas, l'objectif était d'offrir les meilleures conditions de circulation possible aux cyclistes, par contre on verra que l'une des deux approches a donné de bien meilleurs résultats que l'autre. La prochaine sous-section dresse un portrait comparatif des paradigmes de planification des infrastructures cyclables et des parts modales de vélo en Europe et en Amérique du Nord.

1.1.2 Quantité, densité et qualité des voies cyclables : deux paradigmes

Dill et Carr (2003) ont modélisé le taux de cyclisme en fonction de la densité de voies cyclables dans une cinquantaine de grandes villes américaines. Sans surprise, toutes choses étant égales par ailleurs, une forte association positive a été trouvée entre ces deux variables : une augmentation d'un mile de voies cyclables par mile carré concoure à une augmentation de près d'un point de pourcentage de part modale de cyclistes navetteur·euse·s. Le constat est similaire ailleurs dans le monde (Pucher, Dill et Handy 2010 ; Buehler et Dill 2016). Le manque d'infrastructures cyclables suffisantes serait d'ailleurs un obstacle à l'augmentation des parts modales cyclistes dans plusieurs villes canadiennes (Pucher et Buehler 2005).

Au-delà de la quantité de kilomètres de voies cyclables, les caractéristiques de ces infrastructures semblent occuper une place importante dans la décision d'utiliser le vélo ou non. Par exemple, les cyclistes sondé·e·s par Winters et Teschke (2010) à Vancouver ont montré une forte préférence pour les infrastructures ségréguées des autres moyens de transport (automobiles, piéton·ne·s, etc.). Cette préférence est d'autant plus flagrante pour les cyclistes inexpérimenté·e·s, les femmes et les ménages ayant des enfants. Or, deux visions de la planification des voies cyclables s'opposent.

Plusieurs pays d'Europe du Nord ont développé des réseaux cyclables séparés physiquement des voies pour véhicules motorisés. On pense notamment aux Pays-Bas, au Danemark et à l'Allemagne, où on compte plusieurs pistes au niveau du trottoir ou carrément en site propre, avec des intersections spécialement aménagées pour protéger les cyclistes (Furth 2012). À l'opposé, aux États-Unis, plusieurs militant·e·s cyclistes s'opposent de façon virulente à toute forme de ségrégation des usager·ère·s de la route. Les porteur·euse·s de l'idée du « cyclisme véhiculaire », avec Forester (2001) à leur tête, soutiennent que l'endroit le plus sécuritaire où circuler est la chaussée, parmi les véhicules motorisés, et que les pistes cyclables protégées seraient au contraire bien plus dangereuses que l'absence d'aménagement cyclable. La responsabilité de la

sécurité reviendrait alors au cycliste, qui doit prendre sa place sur la route, quitte à contrôler l'entièreté de la voie à certains moments, notamment aux intersections. Les aménagements cyclables protégés créeraient un faux sentiment de sécurité chez les cyclistes, qui baisseraient leur garde et seraient alors plus à risque d'une collision.

Cette théorie, qui ne repose sur aucune étude empirique valide et qui ignore toutes celles montrant clairement le gain de sécurité associé aux aménagements cyclables protégés (Harris et al. 2013 ; Reynolds et al. 2009 ; Teschke et al. 2012 ; Lusk et al. 2011), a longtemps guidé les politiques américaines d'inclusion des cyclistes sur la chaussée (Furth 2012). La *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) recommandait même, jusque dans leur guide de 1999, de ne pas aménager de voies cyclables physiquement protégées, sauf dans les situations où il n'y a pratiquement aucune intersection, par exemple le long d'une berge (AASHTO 1999). Les seules infrastructures qui demeurent recommandées sont les pistes en site propre (dans un parc par exemple) et les bandes cyclables peintes au sol.

Ainsi, en Amérique du Nord, on a privilégié l'aménagement de voies cyclables légères, c'est-à-dire des infrastructures peintes au sol, comme des chaussées désignées ou des bandes cyclables, alors que dans certains pays d'Europe du Nord (Pays-Bas, Danemark, etc.), le développement des réseaux s'est surtout fait par des pistes en site propre ou séparées physiquement de la circulation (Furth 2012). À travers les années, les autorités municipales montréalaises semblent avoir été influencées par ces deux courants, puisque son réseau cyclable semblerait être une sorte d'hybride entre les paradigmes nord-américain et européen (Houde, Apparicio et Séguin 2018). En effet, il est composé de plusieurs types de voies cyclables, surtout d'inspiration américaine (bandes cyclables et chaussées désignées), mais également européenne (pistes cyclables protégées physiquement de la circulation). Le résultat sur les parts modales est flagrant : à Copenhague, 41% des déplacements domicile-travail se font à vélo (City of Copenhagen 2017), alors que sur l'île de Montréal, nous sommes à 2,5% (Vélo Québec 2015). Cette part modale montréalaise est bien plus élevée que les moyennes canadienne (1,4%) et québécoise (1,5%), mais beaucoup plus faible que les moyennes néerlandaises (26%) et danoises (18%), par exemple (Buehler et Pucher 2012). Au Danemark, 55% des déplacements à vélo sont faits par des femmes, tandis qu'au Canada, ce sont à peine 30% (Garrard, Handy et Dill 2012).

En somme, on voit que la quantité de voies cyclables est certes importante, mais que plusieurs autres facteurs semblent avoir une influence forte sur la décision d'utiliser ou non le vélo pour un

déplacement. Les cyclistes semblent être sensibles à plusieurs paramètres lors de leurs déplacements et apprécier les voies cyclables physiquement séparées des voitures, comme en témoignent les parts modales de vélo en Europe. La prochaine section se concentrera sur les préférences des cyclistes, avec une attention particulière accordée aux préférences en matière d'aménagements cyclables.

1.2 Freins et leviers du vélo en ville

1.2.1 Préférences des cyclistes

Guinn et Paul (2014) ont utilisé un sondage réalisé en interceptant des piéton·ne·s et cyclistes dans les rues de Mount Pleasant à Vancouver, un quartier ayant des caractéristiques relativement bien adaptées au cyclisme. De leur échantillon de 417 questionnaires complétés, iels tirent quelques conclusions éclairantes. D'abord, les deux facteurs ayant le plus d'influence sur la décision d'utiliser un vélo ou pas sont intrinsèques aux individus ; il s'agit du désir de réaliser une activité physique et de préoccupations environnementales. Le troisième facteur en importance est lui-même composé de plusieurs composantes : un environnement visuellement attractif, une séparation du trafic automobile, la présence de voies cyclables, le sentiment de sécurité¹ et les économies d'argent. Le quatrième facteur est la distance à la destination, la présence de signalisation cycliste aux intersections et les conditions météorologiques. Le cinquième facteur est la facilité du trajet (dénivelé). Le sixième facteur contenait une seule variable : l'application de la loi et des différentes règles de conduite. Le septième facteur concernait la propreté du quartier et le huitième regroupe les opportunités de discuter avec des ami·e·s cyclistes.

L'étude révèle notamment que certains types de cyclistes sont plus sensibles à certains facteurs que d'autres. Par exemple, pour les personnes âgées, l'application stricte du Code de la route est un grand levier d'utilisation du vélo, alors que pour les jeunes ce l'est moins. Les propriétaires de voiture sont plus sensibles à la distance à parcourir que ceux qui n'en possèdent pas. Les femmes étaient quant à elles plus sensibles au sentiment de sécurité. Les auteur·e·s concluent en disant que les personnes sont influencées par une multitude de facteurs lorsque vient le temps de décider quel moyen de transport utiliser, et que ces influences varient en fonction des

¹ Le sentiment de sécurité, ici, a mal été défini : il est possible que certain·e·s répondant·e·s l'aient entendu au sens de protection contre les crimes (*security*), alors que d'autres l'aient compris comme étant la protection contre les collisions (*safety*).

caractéristiques sociodémographiques. Iels ajoutent également que les résultats de cette étude pourraient être très différents dans un autre contexte (si les infrastructures cyclables ne sont pas au rendez-vous, peut-être que ce facteur aurait une plus grande influence sur les cyclistes).

Cette étude comporte tout de même plusieurs limites. D'abord, elle utilise un échantillon non probabiliste ; on ne peut donc pas généraliser ses résultats à l'ensemble de la population de Mount Pleasant comme les auteur·e·s tentent de le faire. Ainsi, plusieurs cyclistes occasionnel·le·s n'ont probablement pas été sondé·e·s ; les opinions exprimées ne reflètent qu'une certaine partie de la population, probablement déjà très motivée à se déplacer à vélo.

Dans un sondage effectué auprès de cyclistes universitaires, Useche et al. (2019) se sont intéressés aux motivations derrière le choix de se déplacer à vélo. Iels ont trouvé que l'activité physique trônait au sommet du palmarès, loin devant les autres facteurs comme l'environnement et l'économie. À l'opposé, le risque perçu de collision était le facteur freinant le plus les personnes dans leurs élans cyclistes. De plus, les gens utilisant leur vélo pour des déplacements courts et réguliers avaient plus de chances d'avoir vécu une collision dans les cinq dernières années. Bien sûr, ce résultat est peu surprenant : puisqu'iels se déplacent plus, iels ont plus de chance de vivre une collision. Par contre, ce résultat met en lumière une forme d'iniquité entre les bénéfices que les cyclistes procurent à la société et les inconvénients qu'iels subissent. D'une part, les cyclistes contribuent à réduire la congestion, la pollution de l'air, le bruit, l'usure de la chaussée, etc. D'autre part, en comparaison aux automobilistes, les cyclistes sont plus à risque d'être victime d'une collision, moins d'espace sur la chaussée leur est alloué, et iels sont plus exposé·e·s aux polluants atmosphériques et sonores. Cela résume sommairement le concept d'équité en transport, tel que développé par Gössling (2016).

L'étude de Useche et al. (2019) a tout de même plusieurs limites. D'abord, son échantillon, non probabiliste, est formé de cyclistes universitaires enthousiastes, qui ont probablement des préoccupations différentes du reste de la population. De plus, les réponses des questionnaires viennent de participant·e·s dispersé·e·s sur trois continents, qui circulent assurément dans des conditions très diverses. Ainsi, leurs préoccupations varient probablement énormément d'une ville à l'autre, ce qui n'a pas été pris en compte dans l'étude.

L'étude de Winters et al. (2011) est relativement complète : en utilisant un échantillon probabiliste de 1 402 répondant·e·s, iels ont obtenu des réponses sur 73 questions influençant la perception de confort des cyclistes. Leur sondage a été réalisé en collaboration avec Translink, l'autorité planificatrice des transports collectifs dans la région métropolitaine de Vancouver. Pour analyser

leurs résultats, iels ont d'abord classé chacune des questions en fonction de la taille de leur effet sur la probabilité d'utiliser un vélo ou pas. Puis, iels ont réalisé une analyse factorielle pour tenter de dégager des vecteurs rassemblant plusieurs questions. De 73 questions, iels passent ainsi à 15 facteurs, parmi lesquels cinq facteurs (regroupant les sept plus grands éléments motivants et les sept plus grands éléments décourageants) expliquent une grande part de la variance du modèle : sécurité, facilité de circuler à vélo, mauvaises conditions météorologiques, conditions de route plaisantes et interactions avec les véhicules motorisés. Le facteur relatif à l'état de la chaussée arrive tout juste derrière (sixième position).

Le premier facteur, soit la sécurité, est surtout formé des questions relatives au risque d'entrer en collision avec des véhicules, mais également des questions sur le risque d'être victime d'un acte criminel (vol de vélo ou autre acte violent). Pour ce qui est de la facilité du déplacement, on parle surtout de routes qui ont un faible dénivelé et de distances à parcourir courtes. Les conditions météorologiques rassemblent les facteurs relatifs à l'enneigement de la chaussée et aux précipitations. Les routes aux conditions plaisantes sont celles qui sont loin des environnements bruyants et pollués et dont le paysage est attrayant. Les interactions avec les véhicules motorisés sont composées des questions sur l'achalandage en voitures, autobus et camions d'une rue, ainsi qu'à la vitesse à laquelle iels circulent. Le sixième facteur en importance, soit la surface de la chaussée, se concentre surtout sur le fait que la chaussée soit libre de débris, non glissante et libre de nids de poule et autres aspérités. Ici, il importe de rappeler que l'étude a été menée à Vancouver ; considérant l'état décrépit de plusieurs rues montréalaises (Ville de Montréal 2017), il est probable que ce facteur soit plus important pour les cyclistes de Montréal. Enfin, les auteur·e·s mentionnent également une série d'autres freins et leviers de l'utilisation du vélo, notamment l'intégration avec le transport collectif, le fait de devoir porter des charges lourdes (notamment l'épicerie), la présence de stationnement pour vélos, les équipements au lieu de destination (notamment les douches), la disponibilité d'information sur les voies cyclables (comme une carte du réseau) et d'incitatifs fiscaux, le marquage au sol et la signalisation.

Cette étude se démarque des autres mentionnées pour plusieurs raisons, notamment : elle est citée de nombreuses fois selon la base de données Scopus (232 fois en date du 17 février 2020) ; elle utilise un échantillon probabiliste de cyclistes potentiel·le·s et actuel·le·s ; elle est réalisée en contexte canadien dans une ville au potentiel cyclable comparable à celui de Montréal.

1.2.2 Différents types de cyclistes

Toutes les préférences de cyclistes énoncées à la sous-section précédente s'appliquent de façon différenciée pour chaque personne. En effet, il existe plusieurs types de cyclistes, qui sont plus sensibles à différents éléments que d'autres lorsque vient le temps de décider de prendre sa bicyclette ou pas pour effectuer un déplacement. Dill et McNeil (2013) ont évalué la typologie utilisée par la ville de Portland, qui comprend quatre types de cyclistes : les « fort·e·s et téméraires », les « enthousiastes et confiant·e·s », les « intéressé·e·s mais inquiet·ète·s », et les « jamais au grand jamais » (Dill et McNeil 2013, traduction libre). Les « fort·e·s et téméraires » n'ont pas besoin d'infrastructures cyclables pour circuler à vélo. Les « enthousiastes et confiant·e·s » aiment se déplacer à vélo, mais sont très sensibles à la présence d'infrastructures cyclables. Les « intéressé·e·s mais inquiet·ète·s » se déplacent déjà un peu à vélo, mais ne sont pas très à l'aise de circuler à moins d'être sur d'excellentes infrastructures cyclables. Certain·e·s d'entre elleux aimeraient d'ailleurs se déplacer davantage à vélo, si les infrastructures existaient. Enfin, les « jamais au grand jamais » n'ont presque aucune intention de se déplacer à vélo, peu importe les conditions. Selon leurs résultats, les femmes sont largement sous-représentées dans la catégorie des cyclistes « fort·e·s et téméraires » ; les auteur·e·s indiquent qu'elles semblent être plus sensibles à la présence et à la qualité des voies cyclables.

À Montréal, une évaluation similaire a été faite par Damant-Sirois, Grimsrud et El-Geneidy (2014). Cependant, à la différence de la typologie de Portland, celle-ci repose sur un sondage effectué auprès des cyclistes. La typologie est ensuite formée par méthode de classification par *k-means*, avec quatre groupes. Iels arrivent à des types qui s'apparentent fort à ceux de Portland, par contre leur méthode leur permet de discuter plus en profondeur des différentes valeurs des variables associées à chaque type de cycliste.

Les « cyclistes dévoué·e·s » sont très sensibles à la durée du déplacement, sa vitesse, sa flexibilité et sa prédictibilité. Iels sont moins à l'aise sur les voies cyclables ségréguées, et préfèrent parfois même circuler dans le trafic. La météo leur importe peu. Les « cyclistes de pistes cyclables » sont légèrement plus affecté·e·s par la météo que leurs collègues dévoué·e·s. Iels circulent à vélo par commodité et par plaisir, de préférence sur des voies cyclables séparées du trafic par une barrière physique. Les « utilitaires par beau temps » sont des utilisateur·rice·s circonstanciels. Iels n'hésitent pas à utiliser un autre moyen de déplacement lorsque la météo n'est pas au rendez-vous. La plupart ne se considèrent d'ailleurs pas comme des cyclistes. Les

« cyclistes du dimanche » se promènent à vélo par pur plaisir, et non pour accomplir des déplacements utilitaires.

Ces deux textes, ainsi que de nombreux autres, soulignent l'hétérogénéité de la population cycliste, à Montréal comme ailleurs. Malgré tout, il est possible de rassembler ces cyclistes en certains types partageant des caractéristiques communes. Il est également possible d'identifier des facteurs susceptibles d'encourager la pratique du vélo parmi les cyclistes qui se déplacent actuellement peu ou pas à vélo. Si les « cyclistes dévoué·e·s » se déplacent à vélo presque indépendamment des conditions routières et des infrastructures cyclables, les autres types de cyclistes sont très sensibles à leur présence continue tout au long du parcours et à leur qualité (Damant-Sirois, Grimsrud et El-Geneidy 2014).

Cette hétérogénéité au sein de la population cycliste est utilisée par l'AASHTO pour discréditer la construction de pistes cyclables. Selon cette association, une piste cyclable protégée et à l'écart du trafic automobile serait nécessairement moins efficace pour se déplacer à vélo qu'une artère majeure ; ainsi, elle ne répondrait pas aux besoins des cyclistes utilitaires confiant·e·s (AASHTO 1999). Or, Furth (2012) montre bien que le succès des pays ayant une part modale élevée d'utilisation du vélo, comme les Pays-Bas, repose justement sur des réseaux cyclables à la fois efficaces et sécuritaires. Le concept de perméabilité filtrée, opérationnalisé par Savaria, Apparicio et Carrier (2021), abonde dans le même sens : lorsque les véhicules et les cyclistes utilisent le même réseau routier, les véhicules se déplaceront presque toujours plus rapidement que les cyclistes. C'est plutôt en construisant des réseaux cyclables qui offrent un avantage comparatif aux cyclistes que plus de personnes choisissent d'en faire leur moyen de déplacement quotidien.

1.2.3 Dimensions importantes de la qualité des voies cyclables

Des deux sous-sections précédentes (préférences des cyclistes et types de cyclistes) se dégagent trois dimensions clés qui semblent influencer grandement les personnes dans leur choix d'utiliser un vélo ou pas. D'abord, la perception de sécurité ressort souvent dans les sondages parmi les premiers leviers du vélo en ville. Ensuite, l'état de la chaussée, quelques fois relevé par les cyclistes, prend une grande importance, surtout dans le contexte montréalais. Enfin, les conditions de circulation, comme l'exposition à des environnements pollués et bruyants, semblent jouer un rôle important.

Puisque ces dimensions influencent grandement les cyclistes (sections 1.2.1 et 1.2.2), il apparaît nécessaire d'y prêter attention pour que le plus grand nombre possible de personnes se sentent à l'aise de circuler à vélo, ce qui est dans l'intérêt des planificateur·rice·s urbains (section 1.1.1). Cependant, nous avons peu de données à Montréal sur l'état de ces différentes dimensions. Nous sentons donc un besoin pour développer des indicateurs de qualité des voies cyclables, qui permettraient de s'assurer que les voies cyclables répondent aux besoins des cyclistes de tout type. Dans la prochaine section, nous détaillons comment et avec quels résultats ces trois dimensions (sécurité, état de la chaussée et exposition aux polluants) ont déjà été étudiées.

1.3 Mesures de qualité des voies cyclables

Les trois sous-sections suivantes présentent en détail les trois dimensions importantes de la qualité des voies cyclables. La quatrième sous-section présente d'autres outils déjà utilisés pour mesurer la qualité des voies cyclables et d'autres façons de conceptualiser la qualité des voies cyclables.

1.3.1 La sécurité routière

1.3.1.1 Une responsabilité individuelle et collective

La sécurité des cyclistes peut être abordée comme une responsabilité individuelle. Le port du casque, par exemple, a fait l'objet de nombreuses recherches pour déterminer son efficacité à réduire les dommages causés par impact à la tête lors d'une collision. Les premières analyses montrent que les cyclistes portant le casque ont 90% moins de chances de mourir suite à une collision (Dorsch, Woodward et Somers 1987). En simulant des collisions en laboratoire, Fahlstedt, Halldin et Kleiven (2016) montrent que pour un impact similaire, lorsque le mannequin portait un casque, il avait 56% moins de chance d'avoir une commotion cérébrale que sans casque. Il ne fait aucun doute dans la littérature que sur une échelle individuelle, le fait de porter un casque offre une certaine protection à la tête ; cependant, à l'échelle d'une population, il est difficile de distinguer l'effet protecteur du casque du simple biais de sélection lié au fait que les cyclistes qui choisissent de le porter sont plus soucieux·ses de leur sécurité que ceux qui choisissent de ne pas le porter (Spaite et al. 1991). Par ailleurs, les juridictions qui ont décidé de rendre obligatoire le port du casque à vélo n'ont pas connu de baisse substantielle des blessures

à la tête dues à des collisions avec des véhicules (Robinson 2006). Pire encore, rendre obligatoire le port du casque aurait l'effet pervers de décourager plusieurs personnes d'utiliser le vélo sur une base régulière, puisque cela alimente la perception erronée que le cyclisme est intrinsèquement dangereux (Jacobsen, Racioppi et Rutter 2009). Cela prive ainsi plusieurs personnes, ainsi que la collectivité, de profiter de tous les bénéfices pour la santé liés à l'activité physique (Jacobsen et Rutter 2012). En réduisant le nombre de cyclistes sur la route (ou plutôt, en gardant faible ce nombre), on crée une situation d'autant plus dangereuse pour les cyclistes restant·e·s. En effet, selon le concept de « *safety in numbers* », plus la part modale de piéton·ne·s et cyclistes est grande, moins ceux-ci sont victimes de décès de la route, car les conducteur·rice·s sont plus attentif·ve·s et habitué·e·s à leur présence (Jacobsen 2003). Pour toutes ces raisons, sans s'opposer au port du casque sur une base individuelle et volontaire, plusieurs auteur·e·s considèrent désormais que faire la promotion du port du casque ou le rendre obligatoire a des effets majoritairement négatifs sur la santé générale d'une population (Jacobsen et Rutter 2012). Pour améliorer la santé et la sécurité des cyclistes, il faudrait plutôt prioriser d'autres types d'interventions. Les blessures et décès subis par les cyclistes étant presque toujours liés à des interactions avec des véhicules motorisés, les efforts devraient être concentrés à protéger les premiers des derniers (Jacobsen et Rutter 2012). Les relations entre la sécurité des cyclistes et l'environnement bâti gagneraient à être étudiées plus en profondeur.

Quelques études évaluant les relations entre le risque de collision et de blessure et l'environnement bâti ont déjà été menées ; dans une revue de littérature, Reynolds et al. (2009) en résumant 23. Le principal constat de leur revue est qu'en règle générale, les voies cyclables clairement désignées et réservées uniquement aux cyclistes (tous types confondus) sont plus sécuritaires pour les cyclistes comparativement à circuler sur la chaussée parmi les voitures ou sur des pistes polyvalentes hors rue avec les piéton·ne·s et autres usager·ère·s de tous types. Dans les deux sous-sous-sections suivantes, on traite des différents facteurs de risque et de protection pour les cyclistes, étudiés avec des méthodes traditionnelles (collisions et blessures) et alternatives (conflits et dépassements dangereux).

1.3.1.2 Mesures traditionnelles de sécurité

Les voies cyclables sont généralement associées avec un risque de blessure et de collision plus faible. En moyenne, que ce soit à une intersection ou au sein d'un tronçon, le risque de subir une collision est deux fois moins grand sur les infrastructures dédiées aux cyclistes que sur les routes

non aménagées pour les cyclistes (Reynolds et al. 2009). Plus particulièrement, les pistes protégées physiquement sont celles qui réduisent le plus le risque de blessure (Teschke et al. 2012). À Montréal, une étude arrive à un constat similaire : le risque relatif de blessure sur une piste cyclable séparée physiquement de la circulation est de 0,72 comparativement à circuler sur une rue de référence similaire (Lusk et al. 2011). Les bandes cyclables ont parfois un léger effet protecteur (Teschke et al. 2012), mais d'autres fois elles n'ont aucun effet (Harris et al. 2013).

Sans surprise, les rues locales sont souvent plus sécuritaires que les rues artérielles (Teschke et al. 2012). La présence de véhicules stationnés peut également concourir à augmenter le risque de collision et de blessure (Teschke et al. 2012), ainsi que la proximité à une intersection (Harris et al. 2013 ; Carvajal et al. 2020).

Les mesures traditionnelles de sécurité, comme les collisions et les blessures, ont certaines limites. D'abord, les données de collisions compilées par un service de police ne représentent qu'une fraction du nombre réel de collisions, puisque très peu de collisions sont rapportées aux autorités (Tin Tin, Woodward et Ameratunga 2013). De plus, les collisions rapportées sont souvent les plus graves, soit celles impliquant un véhicule motorisé, ainsi, les modèles de collisions sont aveugles aux risques du cyclisme pour lesquels il n'y a pas de véhicule motorisé impliqué (Schleinitz et al. 2015). Enfin, les modèles de collision reposent sur le fait qu'il y ait des collisions. Dans le cas où il y en a peu, cela veut dire devoir faire des études sur de grandes périodes de temps. Or, certains axes cyclables sont très peu achalandés ; ainsi, peu de collisions ont lieu. Cela ne veut pas dire pour autant qu'ils sont sécuritaires. Par ailleurs, les collisions évitées de près (*near-misses*) influencent parfois davantage la perception de danger des cyclistes que les collisions réelles, puisque les premières sont beaucoup plus fréquentes que les secondes (Sanders 2015). Ainsi, plusieurs auteur·e·s développent des méthodes alternatives pour mesurer la sécurité des cyclistes. Les deux qui seront abordées dans cette sous-sous-section sont les conflits de circulation et les dépassements non sécuritaires.

1.3.1.3 Mesures alternatives de sécurité

L'analyse des conflits de circulation permet d'étudier la sécurité des cyclistes en amont des collisions. On les définit comme toute « interaction entre au moins deux usager·ère·s de la route, au cours de laquelle au moins une des deux parties a dû changer de vitesse ou de direction pour éviter une collision probable » (Amundsen et Hydén 1977, cités dans van der Horst et al. 2014,

360). Dans leur définition de conflit, Angel-Domenech et al. (2014) tiennent également compte des obstacles qui ne sont pas des usager·ère·s de la route, comme des poubelles ou tout autre objet obstruant la circulation.

Aux Pays-Bas, van der Horst et al. (2014) ont utilisé des caméras fixes à deux endroits sur des pistes cyclables bidirectionnelles – un site à Eindhoven et un autre à Amsterdam – pour observer à leur insu des cyclistes avec la méthode DOCTOR (*Dutch Objective Conflict Technique for Operation and Research*). À Amsterdam, les conflits les plus fréquents impliquaient des piéton·ne·s qui traversent la piste cyclable, tandis qu'à Eindhoven, c'était plutôt des conflits avec d'autres cyclistes et scooters. Plus de manœuvres de dépassement dangereuses ont lieu à Amsterdam qu'à Eindhoven, car la piste est plus étroite (3,55 m contre 5,15 m). À Montréal, Stipancic et al. (2016) ont étudié la probabilité de vivre un conflit sur la piste cyclable du boulevard De Maisonneuve. D'abord, le fait de traverser l'intersection immédiatement après un feu rouge réduit la probabilité de conflit : après avoir passé un certain temps à l'arrêt, les automobilistes sont probablement plus conscients des cyclistes dans leur environnement. Ensuite, le fait d'être un homme réduit la probabilité de vivre un conflit dangereux. Cependant, les auteur·e·s notent que le niveau d'expérience du·de la cycliste n'a pas pu être pris en compte, ce qui est probablement un facteur confondant. Enfin, les vitesses du véhicule et du·de la cycliste augmentent la probabilité de conflit. Cette étude est très intéressante, puisqu'elle se concentre sur un axe cyclable montréalais très achalandé, souvent critiqué par les cyclistes et ayant déjà fait été identifié comme dangereux (Provost 2015-06-25). Elle met en lumière de nombreux conflits avec véhicules qui ont lieu sur une infrastructure cyclable protégée, pourtant installée avec l'intention d'augmenter la sécurité des cyclistes.

L'analyse de conflits requière souvent des professionnel·le·s expérimenté·e·s, qui codent une multitude d'événements à l'aide d'une grille en regardant des vidéos fixes à des endroits précis. Ce sont notamment les méthodes qui ont été utilisées dans les études décrites précédemment (la méthode DOCTOR, notamment). Afin d'élargir l'étude des conflits à des professionnel·le·s qui n'ont pas d'entraînement spécifique sur les techniques d'analyse de conflits, Casey et al. (2016) ont développé une méthode simplifiée d'analyse de conflits. Selon leur classification, il y a cinq types de conflits :

- Piéton·ne – véhicule
- Cycliste – véhicule
- Piéton·ne – cycliste
- Véhicule – cycliste (dépassement)

- Cycliste – piéton·ne (dépassement)

Pour chaque type de conflit, afin d'évaluer la gravité du conflit, les auteur·e·s proposent trois mesures : la sévérité de la manœuvre d'évitement, la distance entre les deux parties et la vitesse des véhicules. En utilisant ces deux paramètres, il est possible d'octroyer assez aisément une note de gravité (dangerosité) du conflit, allant de A à D (D étant le plus sécuritaire).

Rahman et al. (2019) ont utilisé cette méthode pour mener une étude participative avec une application mobile, en demandant aux participant·e·s de déclarer les conflits qu'ils rencontrent, ainsi que certaines caractéristiques nécessaires à l'évaluation de leur dangerosité. Ils ont ensuite comparé la localisation des sites de conflits avec les sites de collisions des cinq dernières années, ce qui leur a permis d'identifier quelques agrégats où il y avait correspondance entre les lieux de collisions et les lieux de conflits. Cependant, en raison du faible nombre de données, les auteur·e·s ne font pas d'analyses plus poussées.

Quelques études récentes se basent sur des collectes de données avec des cyclistes en mouvement, parfois contrôlées (assistant·e·s de recherche qui parcourent certaines routes prédéfinies), parfois naturalistiques (cyclistes qui vaquent à leurs occupations ordinaires). D'une part, plusieurs résultats issus des études de conflits concordent avec les connaissances établies par les études de collision et de blessure. Les intersections sont des lieux où plusieurs conflits surviennent (Dozza et Werneke 2014 ; Gustafsson et Archer 2013), surtout lorsque des véhicules s'engagent dans un virage à droite. Le risque d'incident est généralement plus faible sur les infrastructures cyclables (Hamann et Peek-Asa 2017). D'autre part, les études de conflits révèlent certains aspects de la sécurité routière moins connus.

Par exemple, à Valencia (Espagne), Angel-Domenech et al. (2014) ont étudié les conflits sur des pistes cyclables au niveau du trottoir en se basant sur des données collectées par des cyclistes en mouvement. Ces voies, censées protéger les cyclistes des automobilistes, les exposent plutôt à d'autres types de conflits, surtout avec des piéton·ne·s qui traversent les voies à tout endroit. La plupart des conflits survenaient à proximité des arrêts de bus, un endroit également identifié par Gustafsson et Archer (2013) comme étant source de conflits. Dans une étude réalisée à Chemnitz, en Allemagne, Schleinitz et al. (2015) rapportent également un ratio élevé d'incidents se produisant sur le réseau cyclable, principalement avec d'autres cyclistes et avec des piéton·ne·s. Enfin, le taux d'incidence des conflits aux intersections entre un sentier polyvalent et une route peut être plus élevé que sur des intersections entre deux routes sans infrastructures cyclables (Jestico et al. 2017). Ces incidents, absents des bases de données de blessures et de

collisions, jouent tout de même un rôle dans le sentiment de sécurité (Sanders 2015), et conséquemment dans la propension à utiliser un vélo pour se déplacer en ville (Winters et al. 2011) ; il est donc pertinent de mieux les documenter.

Une autre mesure alternative de sécurité concerne les manœuvres de dépassement des automobilistes pour contourner un·e cycliste. Ces études sont relativement récentes et connaissent un essor depuis l'introduction dans plusieurs pays de réglementations concernant la distance minimale de dépassement que les automobilistes doivent respecter envers les cyclistes. Celle de Beck et al. (2019) à Victoria (Australie) est particulièrement bien montée : 60 cyclistes ont roulé sur 5 302 km, sur leurs propres vélos équipés d'un télémètre permettant de mesurer la distance latérale entre les cyclistes et les voitures qui les dépassent. Leurs résultats montrent qu'en moyenne, les automobilistes passent plus près des cyclistes de 27 cm lorsque ceux-ci circulent sur une bande cyclable que lorsqu'ils circulent sur une rue sans aménagement cyclable. Cet effet est encore plus marqué lorsque la bande cyclable est adjacente à une rangée de stationnement : la distance de dépassement moyenne est 40 cm plus petite que sur les rues sans aménagement cyclable et sans rangée de stationnement. Dans leur discussion, les auteur·e·s expliquent que sur une rue sans aménagement cyclable, les automobilistes doivent effectuer une manœuvre de contournement pour dépasser le·la cycliste, tandis que lorsque qu'il y a une bande cyclable, les automobilistes, qui sont dans une voie différente des cyclistes, ne sentent pas le besoin de faire une manœuvre de contournement pour dépasser le·la cycliste. Ainsi, les bandes cyclables, aménagées dans l'intention d'offrir un espace sécuritaire aux cyclistes, auraient plutôt l'effet inverse : en rapprochant les automobilistes des cyclistes lors des dépassements, elles contribueraient à l'impression de dangerosité du vélo en ville et décourageraient plusieurs personnes d'utiliser le vélo (Heesch, Sahlqvist et Garrard 2011).

D'autres études ont été menées avec des résultats similaires. Au Royaume-Uni, les automobilistes offriraient entre 7 et 19 cm de moins aux cyclistes qui circulent sur une bande cyclable en comparaison avec une autre rue sans voie cyclable (Parkin et Meyers 2010). À Queensland, une étude utilisant des caméras cachées a conclu que les automobilistes étaient les plus conformes à la distance minimale de dépassement dans les zones où la limite de vitesse est de 60 km/h (Debnath et al. 2018). Les caractéristiques des cyclistes, telles que leur habillement ou leur genre, n'influençaient pas la distance de dépassement, ainsi, les auteur·e·s recommandent d'intervenir sur les caractéristiques des infrastructures plutôt que sur les comportements individuels (Debnath et al. 2018).

Bref, ces quelques études montrent que les conflits de circulation peuvent révéler des incidents qui sont absents des bases de données couramment utilisées pour mesurer la sécurité routière. Les risques de conflits peuvent être influencés par plusieurs facteurs, notamment des caractéristiques individuelles (vitesse des parties impliquées, genre, etc.) et des caractéristiques de l'environnement immédiat (type de voie cyclable, présence d'un arrêt d'autobus, proximité à une intersection, etc.).

1.3.2 L'état de la chaussée

La deuxième dimension importante qui se dégage de la revue des préférences des cyclistes est l'état de la chaussée. C'est une dimension qui est d'autant plus importante à Montréal, où la chaussée est en piètre état à plusieurs endroits (Ville de Montréal 2017). Bíl, Andrášik et Kubeček (2015) ont demandé à 43 cyclistes de circuler sur des pistes cyclables sur des vélos équipés d'accéléromètres. Un accéléromètre est un appareil qui mesure l'accélération, c'est-à-dire, les variations de vitesse dans le temps, selon un axe donné. Lorsqu'on circule à vélo, on vit de l'accélération selon trois axes. D'abord, l'axe des X, qui correspond à des gains ou à des pertes de vitesse de circulation, obtenus en augmentant la cadence ou en actionnant les freins ; ensuite, l'axe des Y, qui correspond à des variations de vitesse latérale, par exemple lors de virages ; enfin, l'axe des Z, qui correspond à des variations de vitesse verticale, par exemple lorsqu'on passe par-dessus un dos d'âne. Le principe est que si un·e cycliste circule sur une chaussée parfaitement plate, sa vitesse verticale reste nulle, puisqu'il reste à la même distance du sol ; on ne mesure donc aucune accélération verticale. Par contre, si un·e cycliste circule sur une chaussée en mauvais état, il subira plusieurs variations de vitesse verticale. Ces microvariations de vitesse, mesurées par l'accéléromètre dans l'axe des Z, peuvent être utilisées comme indicateur de rugosité ou de détérioration de la chaussée : plus les valeurs d'accélération verticale sont grandes, plus la chaussée est en mauvais état. Selon la formule de Bíl, Andrášik et Kubeček (2015), les valeurs d'accélération sont ensuite converties en indice de confort (DCI) selon la formule suivante :

$$DCI = \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2} \right)^{-1} \quad (1.1)$$

Ils ont par la suite demandé à ces cyclistes d'évaluer l'état de la chaussée dans un questionnaire, puis mesuré la corrélation entre cet indice de confort (DCI) et la satisfaction des cyclistes. La

corrélation entre les deux valeurs est très forte (-0,94), indiquant que l'indicateur représente bien l'expérience cycliste. Cet indice de confort (DCI) est par la suite cartographié pour identifier les tronçons en mauvais état, et ceux en bon état. Les auteur·e·s notent qu'il est possible de l'utiliser de deux façons différentes : soit en l'appliquant à un tronçon en entier, soit en s'attardant aux valeurs aberrantes (pics de vibrations) pour identifier les endroits les plus problématiques.

Le type de revêtement sur lequel roulent les cyclistes a également un grand effet sur l'efficacité du déplacement (Hölzel, Höchtl et Senner 2012). Cette étude montre d'abord, sans surprise, que certaines surfaces offrent une plus grande résistance de roulement que d'autres : un pendule simple (appareil communément utilisé pour mesurer la conservation d'énergie), fixé sur une paire de roues de vélo, oscille sur une distance de 22,1 mètres lorsque le système est posé sur une surface de béton, contre 19,8 mètres sur de l'asphalte et 10,2 mètres sur du gravier. En général, les surfaces offrant une faible résistance de roulement sont également celles sur lesquelles les vibrations mesurées par accéléromètre sont les plus faibles, sauf pour l'asphalte, qui malgré sa résistance de roulement légèrement plus grande que le béton, transmet moins de vibrations au·à la cycliste.

Zhu et Zhu (2019) ont tenté de modéliser un indice de confort légèrement différent du *dynamic comfort index* (DCI) de Bíl, Andrášik et Kubeček (2015). Les participant·e·s de l'étude visionnent des vidéos de trajets effectués à vélo, et on leur demande d'évaluer leur niveau de confort (1 étant inconfortable, 5 étant confortable). Par la suite, on tente de modéliser le niveau de confort en fonction de plusieurs caractéristiques du trajet. Pour chaque unité d'observation (segments de 20 secondes), on a donc les caractéristiques de la piste cyclable, notamment une mesure de vibrations (variables indépendantes) et la note de confort, évalué par les participant·e·s de l'étude (variable dépendante). Au total, iels ont 3 400 observations (34 segments de 20 secondes évalués chacun par 100 participant·e·s).

Les auteur·e·s entraînent deux modèles sur leurs données, un *probit* traditionnel et un autre utilisant l'apprentissage automatique (*machine learning*), puis iels comparent la qualité de prédiction des modèles. La variable « Pavement Type » est celle qui a la plus grande part explicative, suivie de près par la variable « Drainage Cover » (bouches d'égout). La variable « Pavement Condition » a également un bon pouvoir explicatif. Le modèle entraîné sur l'apprentissage automatique est celui qui prédit le mieux le confort des cyclistes.

De plus en plus d'études utilisent des mesures d'accélération verticale (soit les vibrations) pour représenter l'état de la chaussée. Dans Calvey et al. (2015), l'absence de vibrations est un des

facteurs les plus importants pour les répondant·e·s, qui sont invités à qualifier des segments de voies cyclables. Gao et al. (2019) ont identifié la correspondance entre certains seuils d'accélération et la réaction humaine : en deçà de $1,78 \text{ m/s}^2$ (très confortable), $1,78$ à $2,20 \text{ m/s}^2$ (confortable), $2,20$ à $3,19 \text{ m/s}^2$ (inconfortable). Dans Gao et al. (2018), on trouve également que le confort sur une piste cyclable est surtout influencé par les vibrations issues de la chaussée. En somme, ces études ont toutes en commun de permettre de mesurer l'état de la chaussée avec un simple accéléromètre monté sur un vélo. Ces mesures ont l'avantage de représenter les vibrations réelles vécues par les cyclistes, dont les vélos sont rarement équipés de suspensions, comme c'est le cas sur les voitures.

1.3.3 L'exposition au bruit et à la pollution

La troisième dimension importante identifiée est l'exposition au bruit et à la pollution. Sans que ce soit le facteur le plus important, l'étude de Winters et al. (2011) montre que les cyclistes préfèrent circuler loin des environnements bruyants et pollués. De plus, de nombreux bénéfices pour la santé peuvent être dégagés d'une réduction des expositions aux polluants. On débute donc par une sous-sous-section détaillant les effets sur la santé des expositions au bruit et à la pollution. Puis, on parle des compromis de risques et de bénéfices auxquels s'exposent les cyclistes. Enfin, on traite spécifiquement des manières dont varie l'exposition des cyclistes au bruit et à la pollution en milieu urbain, ainsi que de quelques façons de les mesurer.

1.3.3.1 Valeurs guides et effets sur la santé

Le bureau régional pour l'Europe de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) évalue que le bruit environnemental est responsable de la perte de nombreuses années de vie corrigées de l'incapacité (AVCI, ou DALY en anglais) (World Health Organization 2011) :

- 60 000 pour les maladies cardiovasculaires ;
- 45 000 pour les déficiences cognitives des enfants ;
- 21 000 pour les acouphènes ;
- 903 000 pour les troubles de sommeil ;
- et 587 000 pour les inconforts.

En combinant tous ces effets, l'OMS estime qu'entre 1,0 et 1,6 million d'AVCI sont perdues annuellement en Europe occidentale. Les sources de bruit environnemental en milieu urbain sont diverses. On pense bien sûr aux travaux de construction, aux transports aériens, aux transports ferroviaires et aux transports routiers. Les transports routiers sont ceux qui nous préoccupent le plus dans cette sous-section, car il s'agit des environnements dans lesquels évoluent les cyclistes tous les jours.

L'OMS recommande ainsi de garder les niveaux de bruit routier sous la barre des 53,3 dB(A) en moyenne sur une journée (L_{den}) (World Health Organization 2018a) ; dans le cas contraire, au moins 10% de la population serait fortement incommodée. À un niveau de 59,3 dB(A), le risque relatif de maladie cardiaque ischémique augmenterait de 5% (World Health Organization 2018a). Ces limites, bien sûr, sont définies pour la population générale, en tant que moyenne pondérée des expositions quotidiennes cumulées. Par exemple, le bruit nocturne est plus dommageable que le bruit le jour (World Health Organization 2018a). Également, il est rare d'être exposé à un bruit constant sur une longue période de temps ; souvent, le niveau sonore fluctue au fil des activités de la journée. Pour résumer les expositions variables d'une personne sur une plus grande période de temps, il ne suffit pas d'en faire la moyenne arithmétique, puisque le bruit se mesure de façon logarithmique sur l'échelle des décibels. Il est cependant possible d'utiliser l'équation proposée par Berger (2003), qui permet de mesurer la « dose » cumulée de bruit d'une personne en fonction de plusieurs mesures au cours d'une période donnée. Pour plus de détails sur cette méthode, se référer à la section 3.7.2.2.

Ces risques pour la santé s'appliquent à toute la population, au cours de leurs activités quotidiennes et de leur sommeil. Pour plusieurs personnes cependant, il est probable que l'essentiel de l'exposition au bruit ait lieu durant les déplacements domicile-travail. Cet enjeu n'est pris en compte dans la planification des transports que depuis peu de temps. La politique sur le bruit du Ministère des Transports du Québec date de 1998 (Ministère des Transports 1998). Dans cette politique, on reconnaît que la population souffre de plus en plus du bruit environnemental causé par l'utilisation des infrastructures routières ; ainsi, le Ministère doit tenir compte de cet enjeu dans la planification des prochaines infrastructures routières, et protéger les populations déjà touchées par l'enjeu (en installant des écrans antibruit, par exemple). Un transfert modal, on l'a vu à la sous-section 1.1.1, aurait l'avantage de réduire le niveau de bruit environnemental que subissent les résident·e·s de la ville. Cependant, en attendant ce transfert modal, les cyclistes sont exposé·e·s à des niveaux de bruit routier potentiellement dommageables pour leur santé.

L'exposition à la pollution de l'air est également dommageable pour la santé. L'OMS recommande de ne pas dépasser 200 µg/m³ de NO₂ d'exposition horaire personnelle (World Health Organization 2018b). La surexposition au NO₂ est associée, entre autres, à une diminution de la fonction pulmonaire et à une augmentation des symptômes bronchitiques chez l'enfant asthmatique (World Health Organization 2018b). De la même manière, l'OMS recommande de ne pas dépasser 25 µg/m³ de particules fines de diamètre inférieur à 2,5 µm (PM_{2,5}) sur 24 heures. Ce dernier polluant, bien plus nocif, est responsable de maladies cardiovasculaires, respiratoires et des cancers pulmonaires. Bien que l'OMS établisse des seuils à ne pas dépasser, l'Organisation note que dans la littérature, aucun seuil en bas duquel l'exposition était bénigne n'a été identifié – ce qui signifie que toute exposition, peu importe la concentration, est nocive.

Certaines activités contribuent plus que d'autres à l'exposition totale des individus au cours d'une journée. Malgré le temps relativement limité qu'ils occupent dans une journée, les déplacements domicile-travail sont responsables d'une grande partie de cette exposition, puisqu'ils ont lieu sur les infrastructures routières, dans des environnements beaucoup plus pollués que la moyenne (Kaur, Nieuwenhuijsen et Colvile 2005). Ces effets négatifs pour la santé, issus de l'exposition au trafic routier, sont de plus en plus étudiés. Le bureau régional européen de l'Organisation mondiale de la santé en fait une revue en 2005 (Krzyżanowski, Kuna-Dibbert et Schneider 2005).

Les effets sur la santé des polluants issus du trafic routier spécifiquement sont semblables à ceux des polluants en général : augmentation du risque de décès liés à des problèmes cardio-pulmonaires, augmentation du risque de maladies respiratoires d'origine allergique et non allergique, etc. Par contre, les navetteurs évoluent dans des environnements jusqu'à trois fois plus pollués que la moyenne ambiante (*background pollution*) (Krzyżanowski, Kuna-Dibbert et Schneider 2005). En effet, le long des artères de circulation achalandées, les niveaux moyens de dioxyde d'azote, de particules fines et d'ozone peuvent être très élevés. Ainsi, malgré que dans la plupart des villes occidentales les niveaux généraux de pollution soient conformes aux recommandations, localement, les navetteurs peuvent être exposés à des niveaux très élevés de pollution, et risquer d'en subir des effets négatifs pour leur santé. L'OMS semble être particulièrement préoccupée par l'augmentation des émissions de polluants dans les dernières années, malgré tous les progrès technologiques pour les émissions des moteurs à combustion. Ces nouvelles émissions sont dues, notamment, à la croissance de l'étalement urbain et à l'augmentation conséquente des distances et des temps de déplacement, ainsi qu'à la motorisation croissante des ménages. L'OMS identifie plusieurs pistes de recherche, parmi lesquelles on trouve « l'étude de l'exposition des populations [aux polluants de l'air issus du

transport routier], en tenant compte des variations spatio-temporelles des expositions des personnes et des micro-environnements dans lesquels elles vivent et travaillent » (Krzyżanowski, Kuna-Dibbert et Schneider 2005, 8, traduction libre).

1.3.3.2 Un compromis de santé favorable, mais non-négligeable

De par leur configuration physique et leur position sur la chaussée, les cyclistes sont peu protégé·e·s du bruit et de la pollution, et sont donc potentiellement plus à risque de subir les effets négatifs pour la santé découlant de leur exposition. Lors d'une étude faite à Montréal, sur des trajets typiques de navettage, les cyclistes étaient exposé·e·s en moyenne à 68,77 dB(A), soit 1,94 dB(A) de plus qu'un automobiliste (Apparicio et al. 2018), un niveau qui peut être qualifié d'« incommodant » (Ministère de la Santé et des Services sociaux 2016). Pour ce qui est du NO₂, en moyenne, les cyclistes étaient exposé·e·s à 120,94 µg/m³, soit un peu plus de la moitié de la dose maximale recommandée par l'OMS pour une exposition d'une heure. 95% du temps, les cyclistes restaient en dessous du seuil limite. Puisque les trajets en vélo duraient en moyenne moins de 40 minutes, les auteur·e·s concluent donc que ces niveaux ne sont pas dommageables pour la santé. Cependant, la ventilation a un grand effet sur la dose de pollution inhalée. En effet, les cyclistes inhalaient 3,29 fois plus de NO₂ que leurs collègues automobilistes (Apparicio et al. 2018). Ceci est préoccupant, car les valeurs guides de l'OMS ne tiennent pas compte de la ventilation des personnes ou de l'activité physique.

Dans une méta-analyse, De Hartog et al. (2010) évaluent les bénéfices et les inconvénients de la pratique du vélo en ville et simulent l'effet qu'aurait un transfert modal d'automobilistes vers des cyclistes aux Pays-Bas. De par leur exposition à la pollution et aux collisions routières, iels évaluent que les cyclistes perdraient en moyenne entre 0,8 et 40 jours et entre 5 et 9 jours d'AVCI respectivement, comparativement à un gain de 3 à 14 mois grâce à l'augmentation de l'activité physique. Cepeda et al. (2017) arrivent à un constat similaire : en comparant des automobilistes à des navetteurs actifs, iels concluent que les automobilistes perdent une année d'espérance de vie en lien avec leurs habitudes de déplacement, en tenant compte des expositions aux polluants et de l'activité physique. Cependant, malgré des niveaux de pollution plus élevés dans les habitacles des voitures que dans l'air ambiant, les navetteur·euse·s actifs (cyclistes et piéton·ne·s) inhalent des doses de polluants plus élevées que les automobilistes à cause de leur niveau de ventilation plus élevée.

Il est clair que les individus ont tout intérêt, pour leur santé, à utiliser le vélo plutôt que l'automobile. Cependant, malgré tous les bénéfices pour la santé, les effets négatifs de l'exposition au bruit et à la pollution sont bien réels. Ces effets peuvent être à court terme ou à long terme, comme en discutent Buregeya, Apparicio et Gelb (2020). À Montréal l'effet de l'exposition au bruit et à la pollution de l'air sur la variabilité cardiaque – un paramètre utilisé pour mesurer les effets à court terme sur la santé – est minime, puisque les niveaux de pollution et de bruit sont relativement faibles. Cependant, il n'en demeure pas moins qu'il s'agit d'un enjeu important pour les cyclistes (Winters et al. 2011). S'assurer d'offrir aux cyclistes des environnements peu bruyants et peu pollués apparaît donc comme un enjeu clé dans la planification des voies cyclables, ce qui n'est peu ou pas fait actuellement. Lors d'une modélisation réalisée par Minet et al. (2018) à Toronto, les niveaux de pollution étaient plus élevés sur le réseau cyclable planifié que sur le réseau cyclable existant.

1.3.3.3 Facteurs influençant l'exposition des cyclistes

Le portrait de l'exposition au bruit varie énormément d'une ville à l'autre dans le monde. Les travaux pionniers de Boogaard et al. (2009) rapportent des moyennes d'exposition au bruit allant de 63 à 66 dB(A) dans onze villes néerlandaises. Dans une comparaison de Copenhague, Montréal et Paris, Apparicio et Gelb (2020) ont mesuré des niveaux moyens d'exposition au bruit de 68,4, 70,7 et 73,4 dB(A). Ces niveaux de bruit dans les villes occidentales n'ont cependant rien à voir avec ceux mesurés dans le Sud : à Hô Chi Minh-Ville, lors d'une collecte similaire, la moyenne se situait plutôt à 78,8 dB(A) (Gelb et Apparicio 2019). Quelques constats demeurent constants pour les trois villes. D'abord, circuler sur une piste cyclable en site propre réduit l'exposition au bruit, tandis que circuler sur une chaussée désignée (voie partagée avec les véhicules motorisés) n'a pas d'effet sur l'exposition. De plus, même si les patrons spatiaux et temporels varient d'une ville à l'autre, dans tous les cas ils sont significatifs, ce qui souligne l'importance d'en tenir compte lors de la modélisation du bruit. Enfin, le nombre d'intersections croisées avaient un effet négatif sur le bruit à Montréal et à Copenhague, mais un effet positif à Paris (Apparicio et Gelb 2020).

Le type d'axe emprunté peut avoir une grande influence sur l'exposition au bruit et aux matières particulaires. À Toronto, lors d'une collecte intensive sur 270 km uniques de routes (entre 5 et 8 passages sur chaque route), Minet et al. (2018) ont mesuré que les cyclistes étaient exposés en moyenne à 72,7 dB(A). Dans leur modèle, la distance à l'artère majeure la plus proche réduit

significativement l'exposition au bruit et à la pollution. Les différences de bruit entre les types d'axes sont tout de même légères : 71 dB(A) sur une rue résidentielle ou un sentier polyvalent contre 73 dB(A) sur une artère majeure, une bande cyclable ou une piste en site propre. Par contre, les différences d'exposition aux particules ultrafines sont très grandes : circuler sur une piste en site propre expose les cyclistes à 30 000 part./cm³, alors que sur un sentier polyvalent l'exposition se situe plutôt à 14 000 part./cm³. D'autres études sur les particules fines arrivent à des constats similaires. À Montréal, le fait de circuler sur une voie cyclable séparée physiquement du trafic a pour effet de réduire l'exposition au carbone noir (*black carbon*), mais pas aux particules ultrafines (Farrell et al. 2015). Pour ces deux polluants, être sur une artère majeure augmente significativement l'exposition des cyclistes (Farrell et al. 2015).

L'exposition au bruit et au NO₂ est également élevée sur certains types de voies cyclables. En se basant sur une collecte à vélo extensive réalisée à Montréal, Aparicio et al. (2016) ont démontré que les cyclistes étaient aussi exposés au NO₂ lorsqu'ils circulaient sur une rue collectrice que sur une bande cyclable ou une chaussée désignée, alors que lorsqu'ils circulaient sur une piste sur rue, leur exposition était significativement plus faible. L'exposition au bruit varie fortement également : sur une rue locale, il est 2,4 dB(A) inférieur à ce qu'on mesure sur une collectrice. De plus, en ce qui concerne les pistes hors rue, la proximité à la rue joue un rôle important : plus on s'éloigne de la rue, plus on réduit l'exposition au bruit.

Bref, il semble émerger plusieurs facteurs pouvant influencer l'exposition des cyclistes au bruit et à la pollution. Concluons en rappelant que l'exposition personnelle aux pollutions diffère des études de concentration ambiante de pollution, puisqu'elle mesure la concentration dans la zone de respiration des personnes, soit près de la bouche. Il s'agit d'une mesure plus précise du risque auquel s'exposent les cyclistes, puisque souvent de fortes disparités sont observées entre les mesures des stations fixes et les mesures d'exposition personnelle (Kaur, Nieuwenhuijsen et Colvile 2007).

1.3.4 La qualité des voies cyclables : d'autres outils de mesure

Pour évaluer les voies cyclables et voir si elles correspondent aux attentes et aux préférences des cyclistes, quelques chercheur·euse·s et organismes ont créé des outils d'évaluation du « niveau de service cyclable ». Parks et al. (2013) ont évalué trois outils communément utilisés : le *Bicycle Level of Service (BLOS)* du *Highway Capacity Manual*, le *Danish Road Directorate*

BLOS et le *Bicycle Environmental Quality Index* de San Francisco. Pour tester la fiabilité des différents indices, iels ont réalisé un sondage de satisfaction auprès des cyclistes à propos de deux infrastructures cyclables dans la ville de Washington DC, puis iels ont testé, entre autres, la corrélation entre les résultats de satisfaction « prédits » par les trois indices et les résultats de satisfaction « avérée » des cyclistes (sondage). Tout d'abord, voici les trois indices et les critères qu'ils utilisent :

Critères du HCM BLOS

- Largeur de la rue
- Distance de traverse des intersections
- Nombre d'entrées de garage et de points d'accès
- Volumes de véhicules motorisés et vitesses
- Présence de véhicules lourds
- Stationnement sur rue
- État de la chaussée

Critères du Danish BLOS

- Volumes de véhicules motorisés
- Vitesses moyennes
- Type d'utilisation du sol
- Largeur de la rue
- Présence de trottoirs, mail de séparation des usager·ère·s, arrêt de bus et de végétation
- Nombre de voies de circulation
- Volumes de piéton·ne·s et de cyclistes
- Nombre de voitures stationnées

Critères du San Francisco BEQI

- Présence d'une infrastructure cyclable marquée au sol
- Connectivité du réseau
- Entrées de garage
- Mesures d'apaisement de la circulation
- Signalisation pour cyclistes
- Éclairage
- Végétation
- Stationnement pour vélo
- Largeur de l'infrastructure cyclable
- Type de revêtement
- Vitesse autorisée
- Volumes de véhicules motorisés
- Largeur de la rue
- Champ de vision

L'indice qui a eu la plus faible corrélation avec le niveau de satisfaction avérée des cyclistes est, paradoxalement, l'indice qui est le plus utilisé en Amérique du Nord, soit le *BLOS* du *Highway Capacity Manual*. Une des raisons qui expliquent cet écart est que cet indice ne distingue pas les types d'infrastructure cyclable, alors que dans les faits, entre une bande cyclable et une piste cyclable hors rue, il y a un monde de différences. De plus, le *HCM BLOS* est très sensible à l'état de la chaussée. Les cyclistes le sont aussi – comme le montrent les réponses à une question ouverte demandant les améliorations souhaitées (Parks et al. 2013) – mais apparemment pas autant, ou pas de la même façon que ne l'est le *HCM BLOS*. Les deux autres indices, cependant beaucoup moins répandus en Amérique du Nord, affichent une bien meilleure corrélation avec les résultats du sondage.

Pritchard, Frøyen et Snizek (2019) ont aussi évalué des indicateurs *BLOS*, cette fois-ci en comparant le trajet préféré par les cyclistes aux trajets optimaux créés en fonction de l'impédance de quatre *BLOS* différents : le *HCM BLOS* – également évalué par Parks et al. (2013) – le Bicycle Compatibility Index (BCI), le Level of Traffic Stress (LTS) et le Bicycle Stress Level (BSL). Le *HCM BLOS* a déjà été décrit dans les dernières lignes, on ne reviendra pas dessus. Les composantes utilisées pour les autres indicateurs sont présentées ici. Le BCI s'exprime par une fonction linéaire de neuf variables. Les deux derniers indicateurs se distinguent par leur simplicité : à peine trois ou quatre variables sont nécessaires pour calculer un indice de qualité.

Critères du Bicycle Compatibility Index (BCI)

- Présence d'une infrastructure cyclable marquée au sol ou d'un accotement asphalté
- Largeur de la bande cyclable
- Largeur de la voie de circulation extérieure
- Nombre de véhicules par heure de la voie de circulation extérieure, dans le même sens de circulation
- Nombre de véhicules par heure des autres voies de circulation, dans le même sens de circulation
- 85^e percentile de la vitesse des véhicules
- Présence d'une voie de stationnement occupée à plus de 30%
- Usage du sol adjacent à la voie de circulation (résidentiel ou autre)
- Facteur d'ajustement pour les volumes de véhicules lourds et le taux de roulement des voitures stationnées

Critères du Level of Traffic Stress (LTS)

- Limite de vitesse
- Nombre de voies
- Trafic routier journalier moyen (*AADT*)

- Présence d'infrastructure cyclable

Critères du Bicycle Stress Level (BSL)

- Limite de vitesse
- Trafic routier horaire moyen (AAHT)
- Largeur de la voie de circulation extérieure

Les résultats de Pritchard, Frøyen et Snizek (2019) montrent que les routes choisies par les cyclistes chevauchent entre 16% et 52% des trajets générés en optimisant chacun des indicateurs. Avec seulement huit variables, le BCI est celui qui génère les meilleurs résultats. Les deux derniers indicateurs (LTS et BSL), qui ont quatre et trois variables explicatives respectivement et qui ne sont pas calibrés sur des données empiriques de perception des cyclistes, donnent des résultats qui correspondent moins aux trajets avérés des cyclistes sondés. Les indicateurs qui ont les meilleures corrélations avec les préférences avérées des cyclistes sont ceux qui utilisent beaucoup de paramètres explicatifs (huit et plus) et qui sont calibrés sur des enquêtes auprès de cyclistes (Pritchard, Frøyen et Snizek 2019).

1.4 Problématique, pertinence, objectifs, question et hypothèses

1.4.1 Problématique

L'exposition des cyclistes aux pollutions atmosphérique et sonore a déjà été étudiée à Montréal comme dans plusieurs autres villes du Nord (Gelb et Apparicio 2021b). Cependant, aucune étude jusqu'à présent n'avait l'objectif de couvrir l'ensemble du réseau cyclable de Montréal, Laval et Longueuil. Cette logique extensive permet d'avoir un grand jeu de données, représentatif de l'ensemble des voies cyclables, pour en déduire des tendances selon le type d'axe emprunté, le moment de la journée, la localisation dans l'espace, etc.

Par ailleurs, à Montréal, la Ville ausculte tous les cinq ans sa chaussée (Ville de Montréal 2017), ce qui donne un très bon indice de l'état des rues. Cependant, cette auscultation n'a lieu que sur le réseau routier, ainsi on ne sait pas dans quel état sont les voies cyclables spécifiquement. Il existe plusieurs façons d'évaluer l'état de la chaussée en utilisant un accéléromètre (Bíl, Andrášik et Kubeček 2015), par contre, à ma connaissance, aucune étude du genre n'a été faite à Montréal, ni ailleurs dans le monde avec une telle logique extensive.

Également, il y a déjà eu des études sur le risque de collision (Lusk et al. 2011) et sur les conflits entre cyclistes et automobilistes à Montréal (Stipancic et al. 2016). Par contre, ces études ont été faites sur des intersections et des corridors précis. Il y a un manque dans la littérature pour des études extensives mettant l'accent spécifiquement sur les différences entre les types de voies et d'aménagements cyclables, ainsi que sur les corrélations entre les risques de collision et les risques de conflit.

À notre connaissance, aucune étude montréalaise n'a abordé simultanément la question des expositions aux polluants, de l'état de la chaussée et de la sécurité routière.

Les indices de qualité existants, dont plusieurs sont calibrés sur l'expérience qualitative des cyclistes, sont intéressants pour cartographier les préférences des cyclistes et prédire les trajets empruntés. Cependant, à notre connaissance, il n'y a pas d'indices de qualité des voies cyclables qui reposent sur des données quantitatives, collectées avec des capteurs par des cyclistes en déplacement. Conséquemment, les indices existants ne tiennent pas suffisamment compte des trois dimensions ci-dessus. D'abord, l'exposition des cyclistes au bruit et à la pollution de l'air est prise en compte seulement de manière indirecte, en incluant les volumes de véhicules dans le calcul des indices. C'est pourtant un facteur assez important pour les cyclistes sondés par Winters et al. (2011). Il en va de même pour la sécurité, qui est prise en compte en fonction d'éléments accidentogènes connus, comme la présence de stationnement pour voiture, les arrêts de bus, etc. Or, ces indices manquent de spécificité contextuelle : par exemple, la présence d'un arrêt de bus peut se traduire par plusieurs conflits dans une ville où les personnes entrent de manière désordonnée dans l'autobus, mais pas dans une autre où les personnes font la file pour attendre. C'est pourquoi il est pertinent d'évaluer, spécifiquement à Montréal, Laval et Longueuil, quels sont les facteurs qui influencent le plus la sécurité des cyclistes, et comment ces facteurs varient d'un type de voie cyclable à l'autre. L'état de la chaussée est pris en compte dans l'indice *BLOS* du *HCM*, mais de manière trop importante. Au contraire, dans les deux autres indices, la qualité de la chaussée est très peu prise en compte. La manière dont elle est prise en compte est aussi très importante. Puisque les cyclistes sont sensibles à l'état de la chaussée (Winters et al. 2011), et qu'à Montréal plusieurs rues sont en piètre état (Ville de Montréal 2017), il est important que la manière dont on la mesure soit centrée sur l'effet de l'état de la chaussée sur les cyclistes, comme les vibrations senties (Hölzel, Höchtl et Senner 2012 ; Bíl, Andrášik et Kubeček 2015 ; Zhu et Zhu 2019).

Bien sûr, la qualité d'une voie cyclable peut être évaluée d'une multitude de façons. On l'a vu avec les nombreux indices de qualité déjà existants. On aurait pu aussi tenter d'évaluer la qualité des voies cyclables avec d'autres indicateurs, comme la connectivité du réseau (Abad et van der Meer 2018 ; Boisjoly, Lachapelle et El-Geneidy 2019), l'accessibilité et l'équité (Flanagan, Lachapelle et El-Geneidy 2016 ; Houde, Apparicio et Séguin 2018), le sentiment de sécurité (Robartes et Chen 2018), les paysages et les ambiances (Černá et al. 2014), etc. D'abord, la connectivité est souvent utilisée pour justifier les nouveaux aménagements cyclables (Projet Montréal 2017), ou pour critiquer les incohérences cyclables (Cardinal 2015-07-21). Dans ce cas-ci, puisque nous évaluons la qualité des tronçons de voies cyclables, il serait hasardeux d'évaluer leur connectivité individuelle. Il est plus judicieux de qualifier la connectivité à l'échelle du quartier ou de l'ensemble du réseau, ce qui a déjà très bien été fait à Montréal (Boisjoly, Lachapelle et El-Geneidy 2019). Il en va de même pour l'accessibilité et l'équité (Houde, Apparicio et Séguin 2018). Puisque ce sont des indicateurs qui se calculent à l'échelle d'une population et d'une ville et que dans le cadre de ce mémoire nous nous attardons plutôt à évaluer la qualité des tronçons cyclables, nous n'en tiendrons pas compte dans nos analyses. Le sentiment de sécurité des cyclistes n'est pas utilisé dans notre recherche, car on s'attarde à qualifier les infrastructures cyclables, et non les cyclistes. Nous utilisons plutôt les préférences des cyclistes pour sélectionner les dimensions à retenir pour nos indicateurs. Enfin, les paysages et les ambiances ne sont pas retenus dans cette recherche, car ceux-ci ne représentent pas des dimensions clés d'un réseau cyclable utilitaire ; cela s'applique surtout à des réseaux cyclables récréotouristiques.

Nous avons choisi de retenir trois dimensions seulement (exposition aux pollutions, confort et sécurité), que l'on considère comme étant de bons proxys de la qualité générale d'une voie cyclable, susceptibles de plaire à une diversité de cyclistes et d'avoir des effets positifs sur la santé publique. Les dimensions de la connectivité, de l'accessibilité au réseau cyclable et l'équité ont été écartées car elles s'appliquent à l'ensemble du réseau et non à l'échelle du tronçon.

1.4.2 Objectifs

Ce mémoire a trois objectifs principaux, qui correspondent aux trois dimensions clés de la qualité des voies cyclables.

Le premier objectif de ce projet de recherche est d'évaluer l'exposition des cyclistes aux pollutions atmosphériques et sonores. On tentera d'abord de comprendre comment ces expositions varient

en fonction des caractéristiques de l'environnement urbain, mais surtout, comment elles varient en fonction du type de voie cyclable empruntée.

Le second objectif est d'évaluer le confort de roulement sur les voies cyclables. Il s'agit de cartographier l'état de la chaussée, d'analyser les différences de qualité du revêtement entre les quartiers de la ville et entre les types d'infrastructure et de mesurer la distribution dans l'espace des tronçons en mauvais état et de ceux en bon état.

Le troisième objectif est d'analyser la sécurité des déplacements faits à vélo. Le but ici est de comprendre quels facteurs améliorent la sécurité des cyclistes, et à l'opposé, quels types d'aménagement sont les plus dangereux pour les cyclistes.

Ultimement, l'objectif global de ce projet de recherche est de fournir des recommandations aux planificateurs des infrastructures cyclables, dans le but de minimiser les expositions combinées des cyclistes au bruit, à la pollution de l'air et aux dangers de circulation, ainsi que de leur fournir un réseau confortable et efficace pour circuler. Cela se matérialisera par la création d'indicateurs de qualité des voies cyclables, regroupant les trois dimensions importantes mentionnées précédemment.

1.4.3 Question et hypothèse de recherche

Bien qu'il existe déjà plusieurs indices de qualité des voies cyclables, la recension des écrits révèle un manque d'études utilisant des données empiriques, particulièrement en ce qui a trait à la pollution de l'air, au bruit, à l'état de la chaussée et aux conflits. Ainsi, cette étude sera guidée par la question de recherche suivante :

Quel outil de planification peut-on développer pour aider les décideurs à évaluer la qualité des voies cyclables à Montréal, Laval et Longueuil ?

On peut décliner cette question selon les trois dimensions auxquelles on s'intéresse dans ce mémoire :

- Comment varie l'exposition des cyclistes aux polluants atmosphériques et sonore en fonction des types de voies cyclables ?

Nous faisons l'hypothèse que les niveaux de bruit et de pollution seront plus élevés sur les voies cyclables sur rue, particulièrement celles qui se trouvent sur des artères, conformément à la

littérature existante sur le sujet (Apparicio et Gelb 2020 ; Minet et al. 2018 ; Farrell et al. 2015 ; Farrell et al. 2016 ; Apparicio et al. 2018 ; Gelb et Apparicio 2019 ; Apparicio et al. 2016).

- Comment varie l'exposition des cyclistes aux vibrations issues de la chaussée en fonction des types de voies cyclables ?

Nous faisons l'hypothèse que les voies cyclables des arrondissements d'Anjou, LaSalle, Rosemont–La-Petite-Patrie, Mercier–Hochelaga-Maisonneuve et Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce seront en moins bon état que le reste des voies cyclables, puisque ces arrondissements ont le plus haut pourcentage de rues en très mauvais état (Ville de Montréal 2017).

- Comment varie l'exposition des cyclistes aux conflits de circulation en fonction des types de voies cyclables ?

Nous faisons l'hypothèse que les voies cyclables protégées physiquement exposeront les cyclistes à moins de conflits de circulation avec des automobilistes, puisqu'à cet endroit le risque de collision est plus faible que sur des rues comparables sans voie cyclable (Lusk et al. 2011). On s'attend également à observer plus de conflits avec des piéton·ne·s aux abords des arrêts d'autobus lorsque les infrastructures cyclables se situent entre ceux-ci et la rue, tel qu'observé par (Angel-Domenech et al. 2014).

1.4.4 Organisation du mémoire de maîtrise

Ce mémoire de maîtrise est composé d'un chapitre sur les méthodes employées (chapitre 2), de deux articles scientifiques (chapitres 3 et 4), d'un chapitre de résultats intégrateurs (chapitre 5) et d'une discussion sur l'ensemble des résultats obtenus (chapitre 6). Dans cette sous-section, on présente brièvement comment s'organisent les différents chapitres de ce mémoire.

Chapitre 2 : Méthodologie

Ce chapitre présente d'abord le processus de collecte de données primaires. On aborde notamment la planification de la collecte de données, les mesures d'encadrement des cyclistes et les considérations d'éthique. On détaille ensuite les appareils utilisés ainsi que les principales manipulations à effectuer. Les données secondaires (réseaux viaires) sont par la suite présentées, avec une définition pour chaque type de voie cyclable et de rue. La manière dont sont structurées et intégrées les données est ensuite décrite pour chacune des dimensions, de même

que l'ensemble des analyses développées. On présente enfin les méthodes de classification mises en œuvre pour développer une typologie empirique des voies cyclables.

Chapitre 3 : Exposition au bruit et types de voies cyclables (1^{er} article)

Le premier article s'intéresse à l'exposition des cyclistes au bruit dans les trois principales agglomérations de la région métropolitaine de Montréal, soit Montréal, Laval et Longueuil. Le bruit environnemental a plusieurs effets néfastes sur la santé. Par contre, il existe peu de données sur l'exposition des cyclistes spécifiquement, et sur les facteurs qui font varier cette exposition. L'objectif de cet article est d'abord d'évaluer les différences de bruit environnemental entre Montréal, Laval et Longueuil, puis de modéliser l'exposition des cyclistes au bruit en fonction du type d'axe emprunté. Pour ce faire, on utilise des données primaires collectées à vélo à l'aide de sonomètres fixés sur le torse de quatre participant·e·s, qui servent à construire un modèle généralisé additif mixte avec terme autorégressif. Conformément à la littérature, on s'attend à ce que les niveaux de bruit soient plus faibles sur les pistes cyclables en site propre, et plus élevés sur les voies cyclables situées sur des artères (Apparicio et al. 2016 ; Apparicio et Gelb 2020 ; Apparicio et al. 2018 ; Gelb et Apparicio 2019 ; Minet et al. 2018).

Chapitre 4 : Risque de conflit et types de voies cyclables (2^e article)

Le deuxième article analyse la probabilité de vivre un conflit, uniquement sur l'île de Montréal. Les conflits de circulation représentent une méthode alternative pour étudier la sécurité des cyclistes, qui se concentre traditionnellement sur les collisions. On considère dans cet article les conflits avec véhicules et avec piéton·ne·s, dont on modélise la probabilité d'occurrence avec des modèles généralisés additifs. Les conflits avec véhicules auront probablement surtout lieu sur des rues sans infrastructure cyclable, ou sur des infrastructures cyclables non protégées physiquement, conformément aux études de collision (Teschke et al. 2012 ; Lusk et al. 2011). Les conflits avec piéton·ne·s seront probablement plus fréquents sur les voies cyclables (Schleinitz et al. 2015)

Chapitre 5 : Vers des indicateurs de qualité

Dans ce chapitre, nous évaluons les trois dimensions importantes de la qualité des voies cyclables pour en faire des indicateurs de qualité. D'abord, on étudie les conflits de circulation, afin de déterminer quels risques certaines voies cyclables posent aux cyclistes lors de leurs déplacements. Ensuite, on évalue l'état de la chaussée. Enfin, on détermine les facteurs

influençant l'exposition des cyclistes au bruit et à la pollution de l'air. Finalement, on propose une typologie des infrastructures cyclables en fonction de ces trois dimensions, construite à partir d'une classification floue spatiale (*fuzzy c-means*).

Chapitre 6 : Discussion

Ce chapitre fait la synthèse des résultats obtenus dans les deux articles et du chapitre 5. Nous positionnons d'abord les résultats de chaque dimension et de la classification par rapport aux études antérieures. Ensuite, nous discutons plus en profondeur des implications pour la planification des voies cyclables. Enfin, nous présentons les principales limites des données et des méthodes utilisées dans ce mémoire.

1.4.5 Pertinence de la recherche

La qualité inégale des voies cyclables participe à une iniquité dans la pratique du cyclisme en ville. En effet, puisque les femmes sont plus sensibles à la qualité des infrastructures cyclables, elles demeurent sous-représentées dans à peu près toutes les villes occidentales où les infrastructures cyclables font défaut. De plus, la pratique du vélo demeure inaccessible pour les personnes qui sont intéressées à faire du vélo sur une base quotidienne, mais qui sont réticentes pour toutes sortes de raisons (incluant l'exposition au trafic, le risque de collision, etc.), comme « les enthousiastes et confiant·e·s » et « les intéressé·e·s mais inquiet·ète·s » de la typologie de Portland (Dill et McNeil 2013). Puisque ces personnes représentent la grande majorité de la population, on n'atteindra des parts modales de cyclistes plus enviables que lorsqu'on parviendra à séduire ces catégories de personnes avec des infrastructures cyclables de bonne qualité. Il est donc primordial d'évaluer de manière rigoureuse la qualité des réseaux cyclables de Montréal, Laval et Longueuil. Les indicateurs qui existent déjà sont intéressants sur plusieurs aspects, cependant, il reste plusieurs angles morts à éclaircir.

Pour conclure, dans la plupart des villes occidentales, les bénéfices associés à la pratique du vélo surclassent largement les risques qui y sont associés (De Hartog et al. 2010). Cependant, les auteur·e·s notent tout de même qu'il y a certains risques non négligeables, notamment le risque de collision et le risque de développer des problèmes de santé issus de l'exposition au bruit et à la pollution de l'air. Plus les voies cyclables seront de qualité, plus de gens seront portés à les utiliser. En supposant que ces nouvelles personnes se déplaçaient en voiture auparavant, cela

signifie donc une réduction du trafic routier et ainsi une réduction des émissions de polluants et de bruit, ce qui est bénéfique pour tout le monde en ville.

1.5 Conclusion

Ce premier chapitre a d'abord détaillé les différentes tendances d'aménagement des voies cyclables. Plusieurs villes nord-américaines présentent un intérêt renouvelé pour le cyclisme urbain comme mode de transport utilitaire, puisqu'il permet d'améliorer la santé de la population tout en réduisant la congestion, les émissions de polluants et de GES, le bruit et l'usure de la chaussée. Cependant, de nombreux facteurs limitent les planificateurs dans leurs élans vélorutionnaires. Les cyclistes, qui forment un groupe hétérogène, ne sont pas prêts à enfourcher leur vélo à tout prix ; ils ont besoin d'avoir accès à des voies cyclables de qualité. Trois dimensions de la qualité des voies cyclables apparaissent comme étant particulièrement importantes et sous-étudiées : la sécurité, l'état de la chaussée et l'exposition aux polluants. Ce mémoire a donc pour objectif de mesurer la qualité des voies cyclables de Montréal, Laval et Longueuil, en fonction de ces trois dimensions, pour ensuite construire des indicateurs de qualité des voies cyclables. Le prochain chapitre détaillera les différentes méthodes utilisées pour traiter et analyser chacune des dimensions.

CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE

L'objectif de ce second chapitre est de décrire en détail les méthodes mises en œuvre pour analyser l'exposition au bruit (chapitre 3), les conflits de circulation (chapitre 4) et les indicateurs de qualité des voies cyclables (chapitre 5). Il y aura inévitablement un peu de redondance entre ce chapitre et les sections méthodologiques des deux articles (chapitres 3 et 4). En effet, dans un article scientifique, la méthodologie est souvent présentée de façon succincte. Nous souhaitons ici la décrire de façon plus détaillée.

D'abord, nous justifierons le choix du territoire d'étude et expliquons le processus de collecte à vélo de données primaires. Ensuite, nous présentons les données secondaires utilisées, soit les réseaux routiers et cyclables de Montréal, Laval et Longueuil. Enfin, nous détaillons de quelle façon les données sont analysées pour créer les indicateurs de qualité des voies cyclables.

Il est à noter que tant la structuration que l'analyse des données reposent sur des logiciels libres : QGIS (QGIS Development Team 2020) et Python (Python Software Foundation 2021) pour la structuration et R (R Core Team 2020) pour la modélisation et la cartographie des résultats.

2.1 Territoire d'étude

Avec 4,1 millions d'habitants en 2016, la région métropolitaine de recensement (RMR) de Montréal est la deuxième plus peuplée au Canada (Statistique Canada, 2016). Cette région est particulièrement intéressante pour y étudier le vélo, car elle compte plusieurs initiatives favorables au vélo. Tout récemment, Vélo Québec a attribué à la Ville de Montréal le niveau or de sa certification Vélosympathique, ce qui en fait la première au Québec (Vélo Québec 2020c), reconnaissant ainsi tous les efforts mis par les administrations successives pour augmenter la place du vélo dans la métropole. Son système de vélopartage, Bixi, en place depuis 2008, est très achalandé et en extension année après année (Fuller et al. 2013). La compagnie danoise Copenhagenize, qui publie tous les deux ans depuis 2011 un palmarès des villes cyclables dans le monde, place Montréal en tant que meilleure ville cyclable nord-américaine à chaque édition (Copenhagenize Design Co. 2019).

Les réseaux cyclables sont bien développés dans la région métropolitaine de Montréal : à Montréal, Laval et Longueuil, on compte 1805 km de voies cyclables en 2019, selon les données

fournies par les villes respectives (Tableau 2.1). Le réseau n'est cependant pas conçu de la même façon partout : à Longueuil, le type dominant de voies cyclables est la piste protégée, tandis qu'à Laval, il s'agit de la bande cyclable (parmi lesquelles un nombre important sont construites sur des rues artérielles). À Montréal en 2019, la piste protégée est dominante, malgré le développement soutenu de bandes cyclables dans les dernières années (Houde, Apparicio et Séguin 2018). 17% des pistes protégées montréalaises sont à proximité d'une rue artérielle, alors qu'à Longueuil, ce sont 26% des pistes.

Tableau 2.1 Réseaux cyclables et tronçons échantillonnés – collectes de 2019

Voie cyclable	Rue	Longueur (km)							
		Réseau				Échantillonné*			
		MTL	LVL	LON	Total	MTL	LVL	LON	Total
Chaussée désignée	Locale	186,7	37,4	32,8	256,9	70,0	16,1	20,7	106,9
	Collectrice	79,3	16,7	4,9	100,9	31,9	9,4	2,9	44,2
	Artérielle†	--	--	--	--	--	--	--	--
Bande cyclable	Locale	130,0	24,6	31,3	185,8	49,1	13,8	20,3	83,3
	Collectrice	124,1	108,9	17,8	250,8	63,2	65,7	9,7	138,6
	Artérielle	60,8	85,6	8,6	155,0	31,2	48,7	3,7	83,5
Piste protégée	Locale	65,2	5,2	62,0	132,4	24,7	2,3	31,2	58,1
	Collectrice	69,0	19,4	45,0	133,4	42,2	5,9	32,3	80,4
	Artérielle	66,8	65,0	85,8	217,6	41,0	35,7	67,6	144,3
	Hors rue	195,3	41,3	136,1	372,8	90,9	27,9	55,5	174,3
Aucune	Locale	3202,9	1083,4	1371,3	5657,6	321,0	31,9	61,8	414,7
	Collectrice	516,5	381,0	163,4	1060,9	171,6	45,8	22,5	240,0
	Artérielle	1329,2	577,8	660,9	2567,9	277,4	45,6	42,8	365,8
	Autre	142,8	2,0	19,0	163,8	12,2	0,7	2,1	14,9

MTL : Montréal. LVL: Laval. LON : Longueuil

* Ces chiffres correspondent aux kilomètres de voies cyclables pour lesquelles nous disposons de données. Les participant·e·s ont roulé sur beaucoup plus de kilomètres, car certains tronçons ont été parcourus plusieurs fois.

† Cette rare combinaison a été fusionnée aux chaussées désignées sur rues collectrices.

La région de Montréal semble donc tout indiquée pour y faire des études sur les voies cyclables. Pour cette recherche, le territoire se limite aux deux agglomérations de Montréal et Longueuil et à la ville de Laval qui regroupent plus des deux tiers (68%) de la population de la RMR. Plusieurs raisons justifient le choix de ce territoire d'étude. Premièrement, les parts modales du vélo pour des déplacements domicile-travail y sont les plus importantes. Deuxièmement, le réseau cyclable métropolitain utilitaire a surtout été développé dans ces trois régions. Troisièmement, une collecte

de plus grande envergure – incluant les municipalités des Laurentides, de Lanaudière et du reste de la Montérégie situées sur le territoire de la RMR – aurait nécessité plusieurs semaines sans pour autant ajouter des données intéressantes. En effet, les parts modales du vélo y sont quasi nulles, les niveaux de pollution et de bruit sont plus faibles, les volumes de trafic sont plus petits, ainsi, les risques auxquels s'exposent les cyclistes sont beaucoup plus faibles.

2.2 Collecte extensive de données primaires

2.2.1 Design de collecte

2.2.1.1 Planification des trajets

Les trajets suivis par les cyclistes durant la collecte de données ont été préalablement tracés par des membres de l'équipe du LAEQ à l'aide de l'application web Google MyMaps (Mountain View, CA, États-Unis d'Amérique). Cette application permet de tracer rapidement des itinéraires cyclables, de connaître leur distance et de les visionner sur une application mobile. Les trajets sont choisis en ayant en tête trois considérations principales.

Premièrement, on planifie entre 80 et 100 km par participant·e par jour, soit entre 40 et 50 km par matin et par après-midi. On prévoit une pause d'environ deux heures aux alentours de midi, pour permettre aux cyclistes de se reposer et pour recharger les batteries des instruments. Ce repos a lieu soit à l'INRS, soit dans une succursale de restauration rapide ayant des prises murales accessibles afin de recharger les appareils.

Deuxièmement, il faut avoir une bonne couverture spatiale et temporelle. Ainsi, les journées débutent aux alentours de 8h00 le matin, et se terminent vers 17h00, pour avoir des observations durant les périodes de pointe du matin et de l'après-midi. On s'assure également de couvrir la plus vaste portion possible du territoire d'étude (l'agglomération de Montréal, Laval et l'agglomération de Longueuil) et d'avoir une bonne densité d'observations sur tout le territoire, pour éviter d'avoir des secteurs non échantillonnés.

Troisièmement, il est important que les trajets parcourent une diversité de types de routes et de voies cyclables, pour que nous ayons suffisamment d'observations dans chaque catégorie. Plus

particulièrement, on a tenté de maximiser la couverture des réseaux cyclables, puisqu'il s'agit de l'objet de ce mémoire.

2.2.1.2 Éthique en recherche, encadrement des cyclistes et sécurité

Le consentement éclairé de chaque cycliste a été obtenu préalablement à leur participation à la recherche ; les formulaires, conservés sous clé, sont accessibles sur demande. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique en recherche de l'INRS (CER 19-509).

Les cyclistes recruté·e·s pour cette étude ont une bonne expérience de vélo en ville. Ainsi, en participant à notre étude, iels s'exposent à peu de risques supplémentaires par rapport à ceux auxquels iels s'exposent dans leur vie quotidienne. Une formation a été prodiguée au début de la collecte, pour rappeler les consignes de sécurité de base, les règles du Code de la sécurité routière à respecter, ainsi que les procédures pour arrêter un trajet à tout moment si les conditions routières mettent leur sécurité en danger. Un document résumant les informations données lors de la formation, qui inclut également les coordonnées des personnes-ressources pour le projet, a été remis à chaque participant·e.

Plusieurs mesures supplémentaires sont prises pour assurer la sécurité des cyclistes. D'abord, le port du casque est obligatoire tout au long de la collecte. De la crème solaire est fournie à toutes les demi-journées. Chaque participant·e a deux bouteilles d'eau, dont une avec électrolytes pour sportifs·ves (Nuun, Seattle, WA, États-Unis d'Amérique), remplies chaque matin et chaque après-midi. Le repas du midi et les collations sont offerts aux participant·e·s, selon leurs régimes alimentaires particuliers. Chaque participant·e a accès à un téléphone cellulaire avec forfait appels illimités, textos illimités et données (2 go). En plus de servir à la navigation durant la collecte, ce téléphone peut être utilisé en cas d'incident, pour appeler l'équipe de soutien du LAEQ ou pour contacter les services d'urgence. De plus, chaque participant·e est géolocalisé·e en temps réel par l'équipe du LAEQ grâce à une application installée sur leurs téléphones de collecte (Life 360, San Francisco, CA, États-Unis d'Amérique).

Les vélos fournis aux participant·e·s sont en parfait état mécanique. Une mise au point générale a été effectuée avant le début de la collecte, et des mises au point mineures ont été effectuées de manière continue durant la collecte, selon le besoin. Les pneus sont gonflés chaque matin à 85 psi, pour optimiser les efforts des cyclistes et pour uniformiser la réponse des vélos aux aspérités de la chaussée.

2.2.2 Matériel utilisé

Les appareils utilisés lors de la collecte sont présentés en deux temps. D'abord, on présente les équipements de base, qui servent de soutien à la collecte. Ensuite, on présente les instruments de mesure, qui permettent de récolter toutes les données nécessaires. L'ensemble des appareils est présenté de manière unifiée, à la Figure 2.1.

2.2.2.1 Équipements de base

Les vélos utilisés par les cyclistes sont fournis par l'équipe de recherche (no. I ;Rocky Mountain RC 10 Performance, Vancouver, BC, Canada). Il s'agit de vélos hybrides, c'est-à-dire, de vélos empruntant des caractéristiques aux vélos de route et aux vélos de montagne, permettant de rouler dans une grande variété de conditions routières. Ce type de vélo est très populaire en milieu urbain. En fournissant les vélos aux participant·e·s, on s'assure d'abord qu'ils soient en bon état mécanique. De plus, utiliser le même de vélo pour chaque participant·e permet d'homogénéiser le processus de collecte. En effet, les vibrations enregistrées par l'accéléromètre (dimension de l'état de la chaussée) et les comportements des cyclistes durant des conflits (dimension de la sécurité routière) pourraient être tous deux affectés par le type de vélo utilisé.

Un téléphone cellulaire (no. II ;Samsung Galaxy J7 Neo, Séoul, Corée du Sud), fixé au guidon des vélos à l'aide d'un support (no. III ;Getron GT-BSH131, s.l.), permet aux cyclistes de suivre les trajets préalablement tracés sur Google MyMaps par l'équipe du LAEQ. Une batterie externe (no. IV ; Duracell Powermat Powerbank, Bethel, CT, États-Unis d'Amérique) est branchée, en continu, aux caméras et au téléphone cellulaire.

Des bouteilles d'eau (no. V) sont fixées directement au cadre, et une pochette permet un accès facile à des collations énergisantes (no. VI ; Xact Nutrition, Montréal, QC, Canada). Les participant·e·s portent tous et toutes le même maillot identifié « INRS » (no. VII), ainsi qu'un casque protecteur (no. VIII).

2.2.2.2 Instruments de mesure

D'abord, la montre GPS (no. 1 ; Garmin Forerunner 920 XT, Olathe, KS, États-Unis d'Amérique) permet d'obtenir la position géographique à chaque seconde. Le bruit est mesuré par un

sonomètre (no. 2 ; Brüel & Kjær Type 4448, Nærum, Danemark), qui renvoie une mesure par minute (L_{Aeq} dB[A]). La pollution est mesurée par trois ensembles Aeroqual (no. 3 à 7 ; séries 500, Auckland, Nouvelle-Zélande), qui sont chacun composés de trois éléments : une tête, qui permet de capter la concentration dans l'air d'un type de polluant (en ppm ou en $\mu\text{g}/\text{m}^3$), thermomètre-hygromètre, qui mesure la température et l'humidité relative (en °C et en %, respectivement), et un moniteur, qui permet d'opérer le capteur et d'enregistrer toutes les mesures. Puisque nous mesurons trois polluants simultanément (NO_2 , O_3 et PM), nous avons trois ensembles Aeroqual complets. L'état de la chaussée est mesuré à l'aide des vibrations captées par l'accéléromètre intégré de la caméra d'action (no. 8a et 8b ; Garmin Virb XE, Olathe, KS, États-Unis d'Amérique). Cet appareil mesure 100 observations par seconde. Enfin, une fois la collecte terminée, les vidéos captées par la caméra servent à identifier les conflits de circulation. On se sert également des images de la caméra lors de l'appariement spatial (cartospondance), pour valider le type de voie empruntée.



No.	Utilisation	Appareil	Mesure	Résolution
I	Circulation	Vélo	--	--
II	Navigation	Téléphone	--	--
III	Navigation	Support à téléphone	--	--
IV	Énergie	Batterie	--	--
V	Hydratation	Bouteilles d'eau	--	--
VI	Nutrition	Collations	--	--
VII	Identification	Maillot INRS	--	--
VIII	Protection	Casque protecteur	--	--
1	Cartospondance	Montre GPS	long., lat.	1 obs. / sec
2	Bruit	Sonomètre	LAeq - dB(A)	1 obs. / min
3	Pollution	Moniteur d'enregistrement	--	--
4	Pollution	Capteur PM (tête)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 obs. / min
5	Pollution	Capteur O ₃ (tête)	ppm	1 obs. / min
6	Pollution	Capteur NO ₂ (tête)	ppm	1 obs. / min
7	Pollution	Thermomètre (t) et hygromètre (RH)	t (°C) et RH (%)	1 obs. / min
8a	État de la chaussée	Accéléromètre (intégré à la caméra)	Counts	100 obs. / sec
8b	Conflits ; cartospondance	Caméra d'action	--	30 fps ; 720p

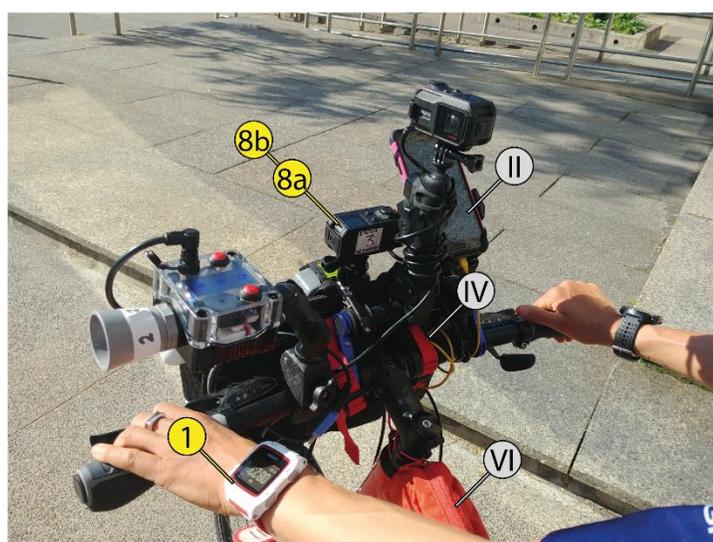


Figure 2.1 Instruments de collecte de données

2.2.2.3 Manipulation des appareils

La plupart des manipulations sont effectuées par des membres l'équipe du LAEQ ne roulant à vélos, avant et après les périodes d'échantillonnage. Cela permet une constance dans la récupération initiale des données et limite les erreurs humaines possibles.

D'abord, la veille d'une journée de collecte, chaque appareil est branché dans son adaptateur de courant pour que les batteries internes se chargent durant la nuit. Les batteries des téléphones et des caméras durent moins d'une demi-journée, ainsi, une fois installés sur les vélos, ces appareils

sont branchés à des batteries auxiliaires pour les alimenter en continu. Les batteries des capteurs de pollution durent entre six et huit heures. On profitera donc du repos du midi pour recharger les batteries de ces capteurs, ainsi que les batteries auxiliaires qui alimentent les téléphones et les caméras. Les batteries de la montre GPS et du sonomètre durent aisément plus d'une journée ; nul besoin de les recharger à mi-chemin.

Ensuite, chaque matin, l'horloge interne de chaque appareil est mise à jour. C'est une étape cruciale, puisqu'il s'agit de la clé de correspondance qui est utilisée pour apparier les données entre elles. Ainsi, chaque matin de collecte, on débute en mettant à jour l'heure de la montre GPS à partir de son signal satellite, ce qui se fait automatiquement en sortant la montre dehors et en la déverrouillant. Ensuite, on vérifie que l'heure de la montre GPS correspond à l'heure de l'ordinateur. Au besoin, on met à jour l'heure de l'ordinateur pour qu'elle corresponde à celle du GPS. Les capteurs de pollution et les sonomètres sont par la suite branchés à l'ordinateur, et à l'aide de leurs logiciels propriétaires respectifs, l'heure de l'horloge interne est mise à jour. Les horloges des caméras Virb XE sont synchronisées automatiquement grâce à leur GPS intégré.

Sur la route, les cyclistes sont responsables de deux manipulations : débiter un enregistrement, et terminer un enregistrement. Pour débiter un enregistrement, les cyclistes doivent d'abord s'assurer que la caméra et la montre GPS ont bien capté le signal du satellite, et que la montre GPS est bien en mode « vélo à l'extérieur ». Ensuite, il faut démarrer l'enregistrement à la fois sur la montre GPS et sur la caméra. Enfin, au bout d'environ 40 minutes, il faut arrêter et sauvegarder l'enregistrement de la montre et de la caméra. Le cycliste peut alors prendre une pause, ou continuer directement avec un autre bloc de 40 minutes. Le fait de segmenter les trajets en blocs de 40 minutes crée des fichiers de taille raisonnable, ce qui facilite la gestion des données.

Après chaque journée de collecte, l'ensemble des données sont vérifiées, récupérées et stockées dans un disque dur externe dédié. Pour les données de la montre, on utilise un script Python qui récupère l'ensemble des trajets de la journée. Les vidéos de la caméra sont copiées manuellement vers le disque dur. Les données des capteurs de pollution et des sonomètres sont récupérées à travers leurs logiciels propriétaires respectifs et sont enregistrées, en format .csv, dans le disque dur.

Tout au long des manipulations, il est important de ne pas mélanger les instruments d'un participant à l'autre. Ainsi, on identifie chaque instrument avec des étiquettes, et on collige dans un tableau les identifiants de chaque instrument avec chaque participant. Lors des manipulations au laboratoire (par exemple, lors de la récupération des données sur un ordinateur),

les appareils sont toujours regroupés par participant-e, dans des bacs de plastique, réduisant ainsi les risques de confusion. Avant le départ sur la route, le matin, les identifiants des capteurs sont vérifiés par l'équipe du LAEQ.

2.2.3 Trois collectes

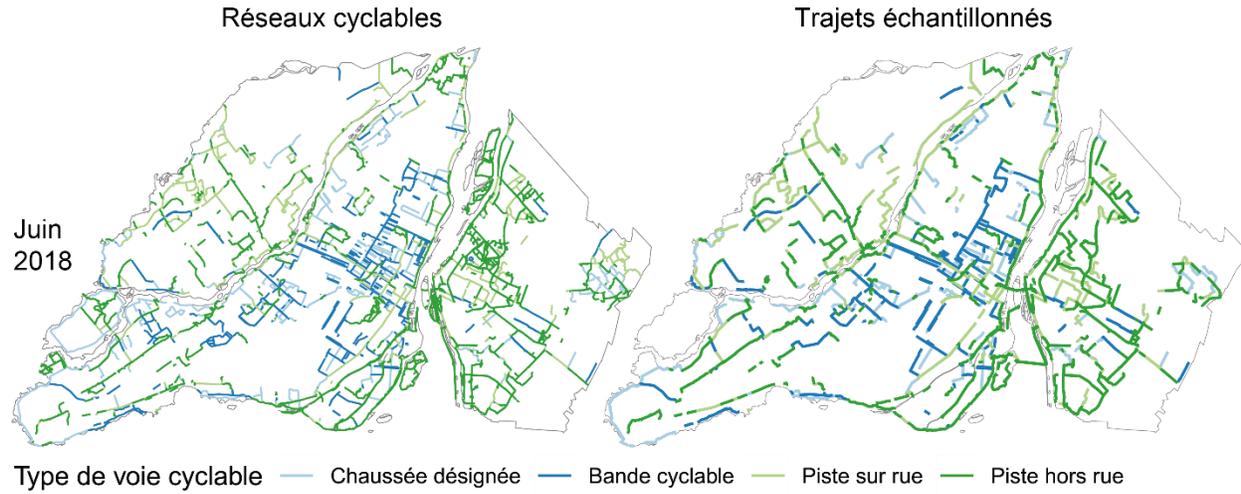
Une première collecte (1 257 km) a eu lieu en 2018 (4, 5, 7 et 8 juin 2018), sur les territoires de Montréal, Laval et Longueuil (Figure 2.2). Cette collecte a permis d'appliquer le protocole de collecte, déjà bien développé au LAEQ, de mesure d'exposition des cyclistes au bruit ; elle sert d'ailleurs d'assise pour le premier article de ce mémoire. Également, cette collecte a permis de tester d'autres capteurs et moyens de mesure, qui sont mis en œuvre de façon plus aboutie dans les deuxième et troisième collectes (juin et juillet 2019). Pour la collecte de juin 2018, deux différences sont à noter par rapport au protocole décrit ci-dessus. D'une part, plutôt que d'utiliser les vélos du LAEQ, les cyclistes ont utilisé leurs propres vélos. D'autre part, les capteurs étaient fixés directement sur les cyclistes à l'aide d'un harnais, plutôt que d'être fixés sur les vélos.

La deuxième collecte (juin 2019) devait initialement avoir lieu à Montréal, Laval et Longueuil. Cependant, des contraintes techniques et la coordination avec un autre projet de recherche reposant également sur cette collecte nous ont menés à scinder la collecte en deux : une première collecte (1 490 km), sur l'île de Montréal uniquement (12, 17, 18, 19, 21 juin 2019), et une deuxième, à Laval et Longueuil (16, 17 et 18 juillet 2019). La couverture de la première collecte est présentée au Tableau 3.1.

La troisième collecte (juillet 2019) concerne donc uniquement les territoires de Laval (393 km) et de Longueuil (492 km). Elle a été conçue de manière analogue à la collecte de juin 2019, c'est-à-dire, conformément à la description donnée aux sections 2.2.1 et 2.2.2. La couverture des deuxième et troisième collectes est présentée au Tableau 2.1

Notons que les trois collectes ont été réalisées avant la construction des premiers tronçons du Réseau express vélo (REV) à Montréal.

**COLLECTE 1 :
EXPOSITION AU BRUIT**



**COLLECTES 2 ET 3 :
EXPOSITION AU BRUIT ET À LA POLLUTION, ÉTAT DE LA CHAUSÉE ET PROBABILITÉ DE CONFLIT**

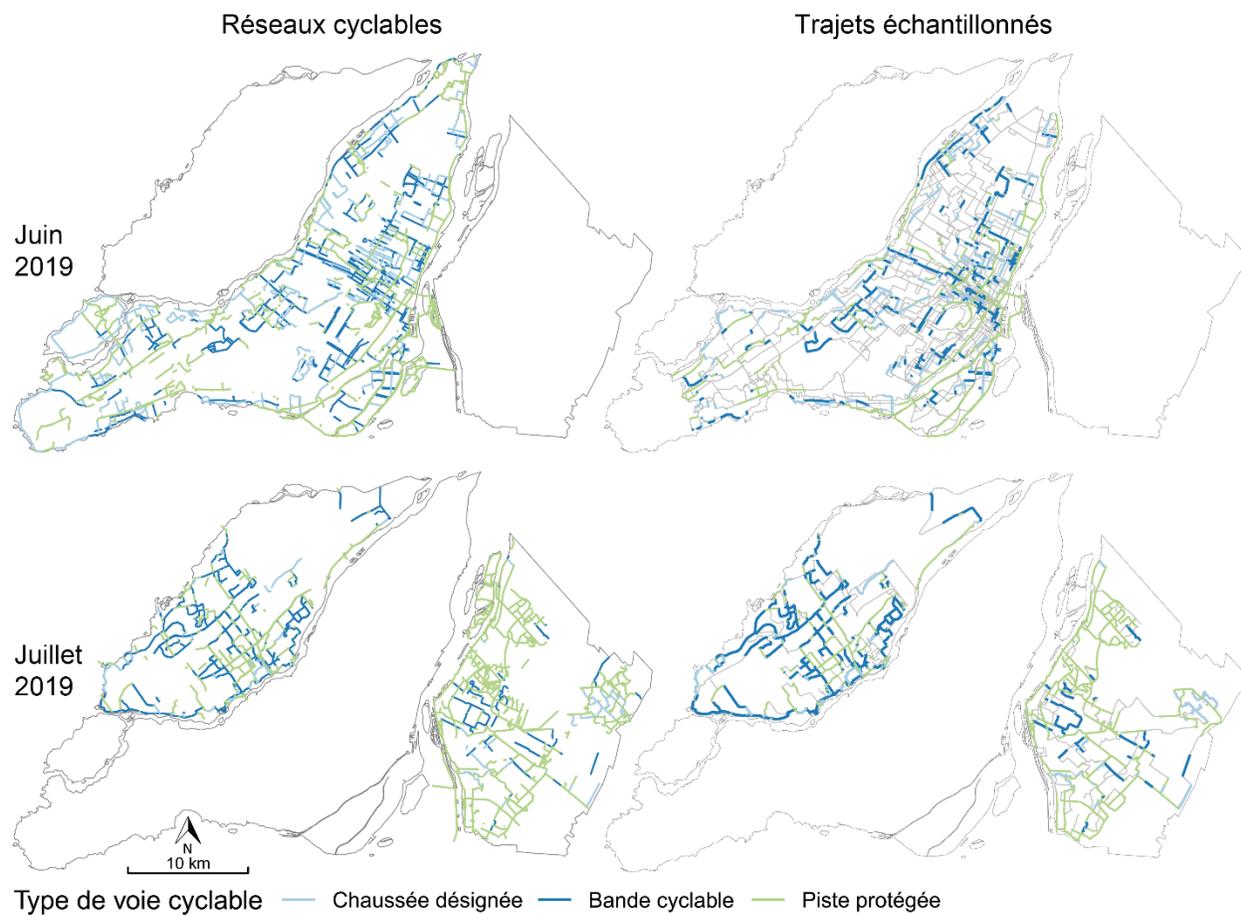


Figure 2.2 Couvertures des collectes de données primaires

2.3 Données secondaires

Les réseaux routiers et cyclables utilisés dans ce mémoire sont ceux fournis par les trois administrations concernées par notre étude (Agglomération de Montréal, Ville de Laval et Agglomération de Longueuil). Dans le cas de l'Agglomération de Montréal, les données disponibles au public sur le portail des données ouvertes sont directement utilisées. Il en va de même pour le réseau cyclable de Laval, par contre, nous ajoutons deux colonnes d'identifiants des tronçons, à partir d'un jeu de données interne reçu par courriel par notre partenaire à la Ville de Laval. Dans le cas de l'Agglomération de Longueuil, nous utilisons un jeu de données interne, fourni par notre partenaire.

Chaque administration a une classification de ses tronçons routiers et cyclables qui lui est propre. Pour les fins d'analyse de ce mémoire, il faut rassembler toutes les typologies de réseau routier et de réseau cyclable pour avoir une typologie cohérente et unique pour les trois territoires (Montréal, Laval et Longueuil). Dans les sections suivantes seront présentés chacun des réseaux utilisés, ainsi que les regroupements effectués.

Notez que dans le cas du premier article (basé sur la collecte de juin 2018), on utilise plutôt le réseau routier d'Adresses Québec et le réseau cyclable de Maxime Houde (2018). Puisque la classification utilisée est très semblable à celle utilisée par les organisations territoriales (Montréal, Laval et Longueuil), on ne donnera pas de détails supplémentaires sur ces réseaux dans la présente section. La personne intéressée peut se référer à la section 3.3.2 pour plus de détails sur ce choix méthodologique.

2.3.1 Réseaux cyclables

Le regroupement des différents types de voies cyclables a mené aux trois types suivants, présentés au Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Définition des types de voies cyclables

Type	Définition
Chaussée désignée	Dans la rue, une voie de circulation régulière où le partage de l'espace entre cyclistes et véhicules est encouragé, identifiée par du marquage au sol.
Bande cyclable	Dans la rue, une voie de circulation réservée aux cyclistes, identifiée par du marquage au sol. Peut être unidirectionnelle ou bidirectionnelle.
Piste protégée	Dans la rue, une voie de circulation réservée aux cyclistes, identifiée par du marquage au sol et par un élément physique (par exemple, des délinéateurs, un mail, des jerseys, une clôture, une surélévation). Hors de la rue, un chemin réservé aux cyclistes. Inclut également les sentiers polyvalents, que les piéton·ne·s sont autorisé·e·s à emprunter. Peut être unidirectionnelle ou bidirectionnelle.

Au Tableau 2.3 sont montrées les correspondances entre la typologie unifiée et les types de voies cyclables de chaque administration municipale.

Tableau 2.3 Typologie des voies cyclables

Originale Montréal		Laval		Longueuil		Unifiée	
#	Description	#	Description	#	Description	Code	Description
1	Chaussée désignée	-	Chaussée désignée	-	Chaussée désignée	Cdesignee	Chaussée désignée
8	Vélorue						
9	Voie partagée Bus-Vélo	-	Accotement asphalté	-	Accotement revêtu	Cbande	Bande cyclable
3	Bande cyclable (séparée par peinture ou NA)	-	Bande cyclable	-	Bande cyclable (bidirectionnelle, avec séparation)		
4	Piste cyclable sur rue (séparée par peinture ou NA)	-	Bande polyvalente cyclable - piétonnière	-	Bande cyclable (unidirectionnelle, avec séparation)		
3	Bande cyclable (séparée par délinéateur, mail, jersey, clôture, surélévation)	-	Piste cyclable	-	Bande cyclable (unidirectionnelle, avec séparation)	Cprotegee	Piste protégée
4	Piste cyclable sur rue (séparée par délinéateur, mail, jersey, clôture, surélévation)	-	Piste polyvalente cyclable - piétonnière	-	Bande cyclable (bidirectionnelle, avec séparation)		
5	Piste cyclable en site propre	-	Voie non déterminée	-	Piste cyclable (bidirectionnelle)		
6	Piste cyclable au niveau du trottoir			-	Piste cyclable (unidirectionnelle)		
7	Sentier polyvalent			-	Sentier polyvalent		

2.3.2 Réseaux routiers

Le regroupement des différents types de routes a mené aux trois types suivants (Tableau 2.4), que nous décrivons ici en utilisant respectivement les définitions et volumes de circulation typiques d'Adresses Québec et du Ministère des Transports du Québec. Bien que nos réseaux ne soient pas produits par ces deux organismes, leurs définitions sont utiles pour décrire notre jeu de données.

Tableau 2.4 Définition des types de rues

Type	Définition
Rue locale	« Voies qui ont pour fonction principale de desservir les zones résidentielles et de donner accès aux propriétés. » (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2019, 13). Généralement traversées par moins de 3 000 véhicules par jour (Ministère des Transports 2008).
Rue collectrice	« Voies servant habituellement à la circulation de transit, à la desserte de propriétés adjacentes, ou à l'accès à des équipements locaux importants (parcs industriels, aéroports locaux, CLSC, etc.) » (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2019, 13). Généralement traversées par plus de 1 000 véhicules par jour (Ministère des Transports 2008).
Rue artérielle	« Voies permettant la circulation de transit sur une longue distance [...] et des liens entre différents quartiers d'une agglomération. » (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2019, 13). Généralement traversées par 5 000 à 50 000 véhicules par jour (Ministère des Transports 2008).

Au Tableau 2.5 sont montrées les correspondances entre la typologie unifiée et les types de routes de chaque administration municipale.

Tableau 2.5 Typologie des routes

Originale			Unifiée			
Montréal		Laval	Longueuil		Code	Description
#	Description	#	Description	#	Description	
0	Rues locales	105	Locale	-	Locale	Rlocale Rue locale
1	Certaines voies piétonnières					
5	Collectrices	104	Collectrice	-	Collectrice	Rcollectrice Rue collectrice
6	Artères secondaires	102	Artère secondaire	-	Artère	Rartere Rue artérielle
7	Artères principales	101	Artère principale	-	Route nationale	
8	Autoroutes	103	Autoroute	-	Autoroute	
		106	Desserte	-	Voie de service	
				-	Voie de virage	
4	Privée	107	Autre	-	Chemin privé	Rautre Rue privée (catégorie fourre-tout)
				-	Terminus	

2.3.3 Interaction entre les réseaux

Il est important de créer des liens entre les réseaux routiers et cyclables, pour que nos modèles statistiques puissent prendre en compte l'effet combiné du type de route et de voie cyclable

emprunté sur les diverses variables dépendantes analysées dans le présent mémoire (exposition au bruit, exposition aux polluants, probabilité de vivre un conflit, etc.).

Pour ce faire, à Montréal, un lien est d'abord établi en utilisant l'identifiant unique de la géobase (ID_TRC_GEO). Cet identifiant, qui est unique pour chaque tronçon de la géobase, est également présent dans le fichier des voies cyclables lorsqu'elles sont situées sur une rue. La première étape consiste donc à joindre les attributs des tronçons cyclables aux tronçons routiers correspondants, en se basant sur l'identifiant unique de la géobase.

Les tronçons de réseau cyclable qui n'ont pas trouvé correspondance dans la jonction attributaire sont soit des pistes hors rue, ou des voies cyclables sur rue mais dont la valeur dans le champ 'ID_TRC_GEO' est erronée. Ainsi, dans un deuxième temps, on procède à une jonction spatiale des attributs routiers sur ces tronçons cyclables restants. En utilisant un script Python, chaque tronçon cyclable est associé au tronçon routier le plus près, dans un rayon de 15 mètres. Dans le cas où une piste cyclable s'approche et s'éloigne successivement d'un tronçon routier (par exemple, dans le cas de la piste cyclable adjacente à la rue Notre-Dame), le tronçon cyclable est découpé en plusieurs segments, de façon à joindre les attributs routiers aux tronçons cyclables uniquement lorsque la proximité de 15 mètres est respectée.

À Laval comme à Longueuil, il n'y a pas d'identifiant commun aux réseaux routiers et cyclables. Ainsi, les liens entre les deux bases de données doivent se faire uniquement en utilisant des critères spatiaux, que ce soit pour les voies cyclables sur rue ou hors rue. Il peut paraître étrange de voir deux tronçons de rue se côtoyer, l'un indiquant une bande cyclable et l'autre indiquant une rue locale, alors que ces deux tronçons font référence à deux attributs du même tronçon routier. Effectivement, lorsqu'applicable, un réseau propre et topologiquement correct utiliserait un seul segment géographique, auquel seraient associés deux attributs (une colonne sur le type de voie cyclable et une colonne sur le type de route).

Ceci étant dit, les segments en question sont proches géographiquement, ainsi, en appliquant le critère des 15 mètres pour associer les tronçons cyclables et routiers ensemble, sans faire de distinction entre les pistes sur rue et hors rue, on parvient tout de même à avoir, pour chaque tronçon cyclable, le type de rue sur lequel il se trouve, ou à proximité duquel il se trouve. Les tronçons cyclables et routiers sont par la suite découpés aux points où ils se rencontrent, de façon à représenter les intersections.

Ces réseaux servent ensuite de base sur laquelle appairier les points GPS captés par la montre. La personne chargée de l'appariement spatial a la responsabilité de choisir le bon tronçon routier et cyclable, en utilisant les images de la caméra pour valider le type d'axe emprunté. Ce processus est décrit à la section suivante.

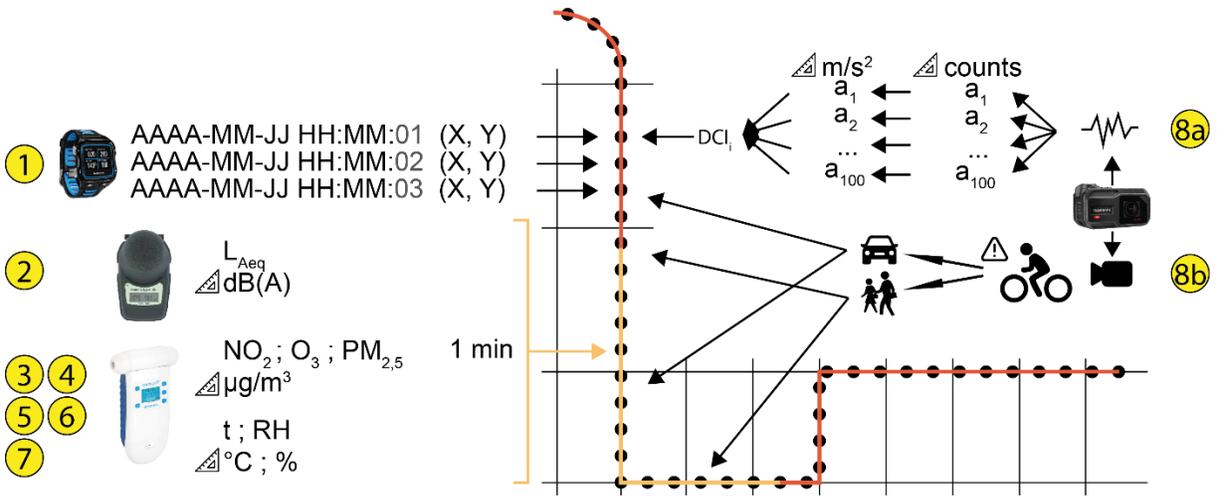
2.4 Structuration des données

2.4.1 Fusion des données primaires et secondaires

La première étape consiste à combiner toutes les observations des différents capteurs dans une seule base de données (Figure 2.3). Pour ce faire, on retient les observations de la montre GPS comme source de données principales. Un script Python, qui fait appel à une base SQLite, joint les tableaux de chaque capteur à celui de la montre GPS, en utilisant l'horodatage comme clé de jonction. On obtient ainsi, pour chaque seconde, l'ensemble des mesures récoltées sur le terrain, avec leur localisation géographique. Quelques étapes spécifiques supplémentaires sont nécessaires pour structurer chaque dimension ; elles sont détaillées à la section 2.4.2.

Les points GPS, qui contiennent les informations de chaque capteur, sont ensuite appariés au tronçon de réseau routier et cyclable correspondant. L'objectif de la manipulation est double. D'une part, pour chaque point GPS, on obtient l'information sur le type de rue et de voie cyclable empruntée. D'autre part, pour chaque tronçon cyclable, on associe les mesures des capteurs. La sélection des rues empruntées est faite manuellement, pour s'assurer de l'exactitude de la classification. Pour faciliter le travail d'appariement, une image issue de la caméra est associée à chaque point GPS, ce qui permet de rapidement valider le type de voie empruntée. Une fois les tronçons empruntés sélectionnés, un script Python permet d'accrocher chaque point sur le tronçon le plus près. Pour plus de détails sur le processus de *mapmatching*, se référer à Apparicio, Gelb et Mathieu (2019).

2.4.2 Structuration propre à chaque dimension



Les étiquettes correspondent aux numéros d'instruments, tels qu'illustrés à la Figure 2.1.
Figure 2.3 Assemblage des données

2.4.2.1 Bruit et pollution

Les capteurs de bruit et de pollution ont une résolution temporelle d'une minute, c'est-à-dire qu'ils enregistrent une observation à la minute. Pour que nos unités d'analyse soient cohérentes avec la résolution des capteurs, on découpe les trajets effectués par les participant·e·s en segments d'une minute. Pour chaque segment d'une minute, on calcule le temps passé sur chaque type d'axe ; c'est-à-dire, on obtient un tableau où chaque ligne représente un segment d'une minute de trajet, et où chaque colonne représente le temps, en secondes, passé sur un type de rue et de voie cyclable. Ainsi, la somme des valeurs en lignes vaut 60 secondes (soit 60 secondes sur un même type d'axe, ou 30 secondes sur un type d'axe et 30 secondes sur un autre, et ainsi de suite). Les valeurs en secondes sont par la suite converties en proportion de minute, pour faciliter l'interprétation des résultats de modélisation.

2.4.2.2 État de la chaussée

L'accéléromètre intégré de la caméra Virb XE renvoie 100 mesures d'accélération par seconde, selon trois axes : X, Y et Z. Dans le cadre du présent mémoire, on se concentre sur l'axe Z, soit

l'accélération verticale. Pour une explication des mesures d'accélération, la personne intéressée peut se référer à la section 1.3.2.

L'accéléromètre enregistre ses valeurs en 'counts', une unité de mesure dont la valeur dépend d'un ensemble de paramètres propres à chaque appareil. Il importe donc de convertir ces valeurs dans une unité de mesure d'accélération universelle, soit les mètres par seconde carrée (m/s^2). Pour ce faire, on utilise le Software Development Kit (SDK) fourni par le fabricant de la caméra, qui permet de convertir les fichiers .fit en .csv, puis de convertir les valeurs brutes en m/s^2 . Un code Python permet ensuite d'automatiser le processus, puisque nous travaillons avec de nombreux fichiers. Une fois les données brutes extraites et transformées en unités de force gravitationnelle ($1 g = 9,81 m/s^2$), on calcule la moyenne quadratique des valeurs d'accélération plus grandes que 1, parmi les 100 valeurs d'accélération prises pour chaque seconde. On obtient donc une moyenne des vibrations pour chaque seconde. Enfin, on en fait l'inverse pour obtenir le DCI (*Dynamic Comfort Index*, voir équation en page 20).

On ne prend que les observations plus grandes que 1 g pour deux raisons. Premièrement, 1 g représente l'accélération normale de la gravité. Ainsi, on considère toute accélération verticale supérieure à 1 g comme étant due à un choc. Deuxièmement, lorsqu'un choc survient, il y a d'abord une accélération supérieure à 1 g, puis une accélération inférieure à 1 g. Ainsi, le fait de retenir que les valeurs d'accélération supérieures à 1 g permet d'éviter de compter deux fois la même aspérité de chaussée (accélération positive lors du choc, puis négative après le choc). Le recours à la moyenne quadratique, plutôt que la moyenne arithmétique, permet de donner plus de poids aux valeurs extrêmes, ce qui nous intéresse ici.

Les valeurs de DCI sont ajustées en fonction de la vitesse de roulement, puisque celle-ci est connue pour influencer l'amplitude des vibrations mesurées (Bíl, Andrášik et Kubeček 2015). On doit également tenir compte du poids de la participant·e, car leur poids est susceptible de faire varier la mesure d'accélération. Pour ce faire, on calcule un modèle statistique qui prédit la valeur de DCI en fonction de la vitesse et du poids de la participant·e. Les résidus de ce modèle sont, par définition, l'écart entre la valeur prédite par le modèle et la valeur observée. Conséquemment, ces résidus représentent les vibrations qui ne sont expliquées ni par la vitesse, ni par le poids de la participant·e ; on déduit donc que ces vibrations sont principalement expliquées par l'état de la chaussée. En d'autres termes, selon le modèle statistique, un·e participant·e donné·e, qui circule à une vitesse donnée, peut s'attendre à vivre un certain nombre de vibrations. Si en réalité iel en vit moins que ce qui est prédit, c'est parce que la chaussée est en bon état ; à l'inverse, c'est parce que la

chaussée est en mauvais état. En somme, en utilisant les résidus du modèle, plutôt que les valeurs directement mesurées, on réduit les risques de biais de mesure qui auraient été liés à la vitesse et à la personne qui a échantillonné le tronçon. Pour cartographier le confort de roulement, on agrège les résultats (résidus de DCI) à l'échelle du tronçon, en retenant la moyenne des observations.

2.4.2.3 Sécurité routière

Pour cette dimension, il faut d'abord identifier les conflits de circulation, c'est-à-dire, des événements conformes à la définition donnée à la section 1.3.1.3. À titre de rappel, on les définit comme toute « interaction entre au moins deux usagers de la route, au cours de laquelle au moins une des deux parties a dû changer de vitesse ou de direction pour éviter une collision probable » (Amundsen et Hydén 1977, cités dans van der Horst et al. 2014, 360). Dans le cadre du mémoire, on limite l'analyse aux conflits ayant lieu avec des véhicules et avec des piétons, car suite à une analyse exploratoire du jeu de données, il s'agit des principaux partenaires de conflit. Pour assurer une rigueur dans l'identification de ces conflits, l'ensemble des vidéos sont visionnées par deux personnes, soit un stagiaire (étudiant de deuxième année au baccalauréat en urbanisme) et moi-même (auteur du mémoire). Pour faciliter le processus, on utilise le logiciel Vifeco (Apparicio, Maignan et Gelb 2021), développé au laboratoire, qui permet d'annoter directement sur les vidéos aux moments où surviennent les conflits.

D'abord, les deux compteurs sont formés pour reconnaître les conflits, en utilisant les cinq premières vidéos. Puis, chaque compteur visionne indépendamment 10 vidéos. Les deux compteurs repassent par la suite sur toutes les annotations inscrites, pour identifier les cas discordants et résoudre tout désaccord. Une troisième personne est également présente pour aider à trancher en cas de désaccord entre les deux compteurs. Ce processus de 'comptage indépendant – validation conjointe' est répété pour une autre série de huit vidéos, suite à quoi les compteurs se lancent chacun de leur côté dans le visionnement de l'ensemble des vidéos. Au fil du comptage, de façon périodique, la concordance entre les annotations des deux compteurs est vérifiée, et au besoin, les deux compteurs se rencontrent pour discuter de cas spécifiques. Enfin, une fois que les deux compteurs ont terminé de visionner les vidéos, chaque annotation est revalidée par les deux compteurs, pour décider si elle demeure ou pas dans le jeu de données final.

Les compteurs avaient pour consigne de s'en tenir à une interprétation stricte de la définition de conflit, ce qui ouvre la porte à identifier plusieurs conflits légers. Ceci étant dit, quelques exclusions ont été spécifiées, pour éviter d'inclure des manœuvres normales de circulation dans en tant que conflits :

- les interactions avec des piéton·ne·s qui circulent sur un sentier non pavé, sur un sentier sans marquage au sol, ou à un endroit où leur présence est explicitement permise, par exemple, lorsqu'un logo de piéton se trouve au sol ou affiché sur un panneau, à l'intérieur d'un cercle vert ;
- les interactions avec des véhicules et des piéton·ne·s qui se comportent de manière conforme à leurs devoirs et obligations en vertu du Code de la sécurité routière ;
- les manœuvres de courtoisie ou de prudence excessive.

Pour plus de détails sur le processus de comptage, la personne intéressée peut se référer au guide de comptage (Annexe 1 : en page 195).

2.5 Analyses

2.5.1 Analyse propre à chaque dimension

2.5.1.1 Bruit et pollution

L'objectif propre à cette dimension est de vérifier comment varie l'exposition des cyclistes au bruit et à la pollution en fonction du type d'axe emprunté. Pour y répondre, on calcule deux modèles statistiques distincts, l'un évaluant l'exposition au bruit, et l'autre évaluant l'exposition à la pollution. Selon la littérature, on s'attend à ce que les expositions varient de façon non linéaire en fonction de certains prédicteurs et qu'elles soient autocorrélées dans le temps ; ainsi, on utilisera des modèles généralisés additifs avec terme autorégressif, à partir du paquet 'mgcv' (Wood 2011).

Le bruit est une variable continue, suivant souvent une distribution normale avec plusieurs valeurs extrêmes (très faibles ou très fortes). Ainsi, on utilisera une distribution *t-scaled*. Pour la pollution (PM_{2,5}), on s'attend à une distribution marquée par un grand nombre de valeurs relativement faibles, et plusieurs observations très fortes, ayant tendance à tirer la moyenne vers le haut. Cela correspond plutôt à une famille de distribution Gamma.

Les variables incluses dans les modèles sont résumées au Tableau 2.6, et décrites avec leurs hypothèses respectives dans les lignes suivantes. À noter que les observations utilisées pour les modèles sont des segments d'une durée d'une minute, pour lesquelles nous connaissons l'intensité du bruit et la concentration de PM_{2,5} (variables dépendantes), le temps passé sur chaque type de voie cyclable et de rue durant ce segment d'une minute (variables indépendantes), ainsi que plusieurs autres variables de contrôle qui seront introduites dans les modèles pour permettre d'isoler l'effet du type d'axe emprunté.

Tableau 2.6 Variables explicatives des modèles d'exposition au bruit et à la pollution

Variable		Modèle			
Rôle	Nom	Type	Effet	Bruit Pollution	
Dépendante	Intensité du bruit ($L_{Aeq, 1 \text{ min}}$; dB[A])	Continue	N/A	•	
	Concentration de particules fines (PM _{2,5} ; µg/m ³)	Continue	N/A		•
Contrôle	Humidité	Continue	Fixe linéaire		•
	Identifiant du capteur	Catégorielle	Fixe linéaire		•
	Jour de collecte	Catégorielle	Fixe linéaire	•	•
	Nombre d'intersections croisées	Continue	Fixe linéaire	•	•
	Moment de la journée (minutes écoulées depuis 8h le matin)	Continue	Fixe non linéaire (<i>spline</i>)	•	•
	Localisation (x,y)	Continue	Fixe non linéaire (<i>spline</i>)	•	•
	Pollution d'arrière-plan RSQA	Continue	Fixe linéaire		•
Prédicteur	Temps passé sur chaque type de voie cyclable et de rue empruntée (minutes)	Continue	Fixe linéaire	•	•

Premièrement, pour le modèle d'exposition à la pollution, il est important de tenir compte de l'humidité relative, car les capteurs Aeroqual peuvent confondre des particules d'eau en suspension avec de la pollution (Deville Cavellin et al. 2016). Les capteurs Aeroqual sont également sensibles à la température, cependant, puisque les deux variables sont fortement corrélées dans notre jeu de données, on inclut uniquement l'humidité relative dans le modèle. Deuxièmement, on doit contrôler l'effet du capteur de pollution utilisé. Malgré que ceux-ci soient calibrés à l'usine Aeroqual, il s'agit tout de même de capteurs portatifs « abordables », qui peuvent répondre de façon légèrement différente à une même concentration de polluants (Gelb et Apparicio 2020). En effet, selon les spécifications du fabricant la précision de ce capteur de : $\pm (0,002 \text{ mg/m}^3 + 15\% \text{ de la mesure affichée})$.

Troisièmement, durant la semaine de collecte, il est possible que les niveaux de bruit et de pollution aient varié significativement d'une journée à l'autre (volumes de circulation variables par exemple) ; c'est pourquoi on l'inclut en tant que variable de contrôle. Quatrièmement, il est probable que le nombre d'intersections croisées ait un effet linéaire sur les niveaux d'exposition, pour lequel deux hypothèses peuvent être formulées. Les accélérations et décélérations des véhicules proches des intersections pourraient concourir à augmenter les niveaux de bruit et de pollution. À l'inverse, l'absence d'intersection pourrait permettre aux véhicules de circuler plus rapidement et augmenter ainsi les niveaux de bruit et de pollution.

Cinquièmement, des auteur·e·s ont démontré que les niveaux de bruit et de pollution varient de manière non linéaire tout au long de la journée (Gelb et Apparicio 2019 ; Lin et al. 2018 ; Gelb et Apparicio 2020) : par exemple, ils peuvent être très élevés durant la période de pointe du matin (de 8h à 10h), puis diminuer, et finalement remonter durant la période de pointe de soir (16h à 18h). Par conséquent, le temps, représenté en nombre de minutes écoulées depuis 8h le matin, est introduit en tant qu'effet non linéaire (*spline*). Sixièmement, l'espace risque d'avoir un effet non linéaire sur les niveaux de bruit mesurés. Indépendamment du type d'axe sur lequel le·la cycliste roule, il est possible qu'il·elle soit plus ou moins exposé·e au bruit et à la pollution en fonction de sa localisation. Par exemple, un·e cycliste roulant sur une bande cyclable située sur une rue artérielle d'un arrondissement central pourrait être plus exposé que s'il·elle circulait au même moment sur une bande cyclable située sur une rue artérielle dans l'ouest de l'île de Montréal. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à cet effet, particulièrement les activités humaines génératrices de bruit et de pollution (aéroport, chantiers, etc.) et surtout le trafic routier. Pour bien contrôler ce dernier facteur, il faudrait alors disposer de données sur le trafic en temps réel, ce dont nous ne disposons pas dans le cadre cette étude. À l'instar de Gelb et Apparicio (2019, 2020), pour contrer cette lacune, nous proposons alors d'inclure un terme spatial – les coordonnées géographiques (x,y) sous forme de *spline* – qui devrait capter ces variations intra-urbaines du bruit environnemental et de pollution d'arrière-plan.

Septièmement, pour la pollution uniquement, les données horaires enregistrées par les stations fixes du Réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec et de Montréal sont disponibles sur leurs portails de données ouvertes respectifs. On ajoute donc une variable représentant la pollution d'arrière-plan, obtenue en calculant la moyenne des valeurs de pollution enregistrées par les stations fixes pondérée par l'inverse de la distance au carré entre l'observation et chaque station fixe du territoire.

Huitièmement, il convient de contrôler la dépendance (autocorrélation) temporelle : deux observations qui se suivent ont plus de chance de se ressembler que deux observations prises au hasard dans le jeu de données, puisque le·la cycliste risque d'être dans le même environnement sonore et atmosphérique. Pour ce faire, il faut recourir à un terme autorégressif de type AR1 (Wood 2011).

Finalement, une fois tous ces facteurs contrôlés, on peut évaluer l'effet de rouler sur l'un des quatre types de voies cyclables (chaussée désignée, bande cyclable, piste protégée) aménagées à proximité ou sur les trois types de rues (locale, collectrice, artérielle). Nous supposons alors que le temps passé sur une piste cyclable protégée qui n'est pas à proximité d'une rue réduit l'exposition au bruit et à la pollution, puisque le·la cycliste y est le plus éloigné de la rue. Quel que soit le type d'aménagement cyclable, s'il est localisé sur une artère, les niveaux de bruit et de pollution risquent d'être plus élevés que sur une rue collectrice et plus encore que sur une rue locale. Aussi, pour un même type de rue (artérielle ou collectrice par exemple), on peut supposer que les bandes cyclables et les chaussées désignées présenteront des expositions légèrement plus fortes que les pistes sur rue. En effet, ces dernières sont surtout aménagées proche du trottoir et parfois séparées de la circulation par une rangée de voitures stationnées, alors que les autres aménagements placent le·la cycliste plus proche du trafic (bandes cyclables) voire carrément dans le trafic (chaussées désignées).

2.5.1.2 État de la chaussée

Dans le cadre de ce mémoire, l'état de la chaussée fait l'objet d'analyses descriptives et exploratoires uniquement. Le modèle de correction de la vitesse et des participant·e·s est présenté, ainsi que la distribution des valeurs de DCI avant et après correction. Les tronçons cyclables pour lesquels nous avons des données sont cartographiés.

2.5.1.3 Sécurité routière

L'objectif propre à cette dimension est de vérifier comment varie la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule et avec un·e piéton·ne en fonction du type d'axe emprunté. Pour y répondre, on calcule deux modèles statistiques distincts, l'un pour les conflits avec les véhicules et l'autre pour les conflits avec les piéton·ne·s. Puisqu'il s'agit de variables binomiales, on utilisera une

distribution logistique. Selon la littérature, on s'attend à ce que les probabilités de conflit varient de façon non linéaire en fonction de certains prédicteurs ; ainsi, on utilisera des modèles généralisés additifs avec le paquet 'mgcv' (Wood 2011). Les variables incluses dans les modèles sont résumées au Tableau 2.7, et décrites avec leurs hypothèses respectives dans les lignes suivantes.

Composition du jeu de données pour la modélisation

Pour modéliser la probabilité de vivre un conflit, on utilise les points à la seconde (points GPS) comme unité d'observation. Chaque conflit identifié par les compteurs est associé au point GPS correspondant. Le jeu de données est donc composé de conflits et d'événements de référence, c'est-à-dire tous les autres points dans le jeu de données où aucun conflit n'a eu lieu. Pour éviter d'avoir un déséquilibre trop important entre le nombre de conflits et le nombre d'événements de référence, on utilise une méthode de ré-échantillonnage qui consiste à tirer au hasard un certain nombre d'événements de référence parmi l'ensemble des observations. Conformément à Dozza et Werneke (2014), nous établissons le nombre d'événements de référence à tirer au hasard à deux fois le nombre de conflits. Un risque avec cette approche serait de sélectionner, par hasard, un échantillon non représentatif de l'ensemble des événements de référence. Pour éviter ce problème, le processus de tirage aléatoire des événements de référence et de calcul des modèles est répliqué 1 000 fois (*bootstrap*). On obtient donc 1 000 modèles, ou en d'autres termes, 1 000 versions du même modèle. Plutôt que d'analyser les paramètres d'un seul modèle, on analyse donc la distribution des paramètres des 1 000 versions du modèle, leurs moyennes, leurs percentiles, etc. On présente ensuite les rapports de cotes de chaque variable, obtenus en calculant l'exponentielle des coefficients. L'interprétation de ces résultats reste très similaire à celle d'un modèle logistique traditionnel : un rapport de cote représente l'effet multiplicatif d'une variable indépendante donnée sur la variable dépendante. Une variable est considérée comme significative si l'intervalle de confiance à 95% de son rapport de cotes ne contient pas la valeur 1 (ce qui correspond à n'avoir aucun effet, puisque le nombre 1 est l'élément nul de la multiplication).

Tableau 2.7 Variables explicatives des modèles de conflit avec véhicule et piéton·ne

Variable		Modèle			
Rôle	Nom	Type	Effet	Véhicule	Piéton·ne
Dépendante	Occurrence de conflit avec véhicule	Binomiale	N/A	•	
	Occurrence de conflit avec piéton·ne	Binomiale	N/A		•
Contrôle	Identifiant du·de la cycliste	Catégorielle	Fixe linéaire	•	•
	Jour de collecte	Catégorielle	Fixe linéaire	•	•
	Présence d'une intersection à moins de 15 m	Binomiale	Fixe linéaire	•	•
	Présence d'un arrêt d'autobus à moins de 15 m	Binomiale	Fixe linéaire	•	•
	Moment de la journée (minutes écoulées depuis 8h le matin)	Continue	Fixe non linéaire (<i>spline</i>)	•	•
	Localisation (x,y)	Continue	Fixe non linéaire (<i>spline</i>)	•	•
	Vitesse	Continue	Fixe non linéaire (<i>spline</i>)	•	•
Prédicteur	Type de voie cyclable et de rue empruntée	Catégorielle	Fixe linéaire	•	•

Premièrement, la probabilité de conflit peut être influencée par plusieurs caractéristiques individuelles, comme l'expérience de cyclisme, l'âge, le genre, les comportements de circulation, etc. (Stipancic et al. 2016 ; Schleinitz et al. 2015), qui ne peuvent pas toutes être intégrées aux modèles par souci de parcimonie et par manque d'observations par catégorie. On intègre donc une variable dans nos modèles pour chaque participant·e, pour résumer ces différences individuelles. Deuxièmement, on sait que les conditions de trafic peuvent varier au fil de la semaine, en fonction des conditions de circulation qui fluctuent d'une journée à l'autre (Carvajal et al. 2020). Puisqu'il est possible que cela influence la probabilité de vivre un conflit, on intègre le jour de la semaine en tant que variable de contrôle catégorielle. Troisièmement, on s'attend à ce que la proximité à une intersection et à un arrêt d'autobus soit associée à une augmentation de la probabilité de vivre un conflit, tel que suggéré par la littérature (Hamann et Peek-Asa 2017 ; Angel-Domenech et al. 2014). Quatrièmement, la probabilité de vivre un conflit pourrait varier en fonction de l'heure de la journée et de la position géographique. On s'attend à un plus grand nombre de conflits durant les périodes de pointe du matin et de l'après-midi, puisque ce sont les moments où les volumes de trafic sont les plus importants (Włodarek et Olszewski 2019 ; Schleinitz et al. 2015). Également, l'espace peut jouer un rôle dans la probabilité de vivre un conflit, car les conflits se distribuent souvent en agrégats plutôt qu'aléatoirement dans l'espace

(Rahman et al. 2019). Par ailleurs, les niveaux d'activité étant plus élevés dans les quartiers centraux, il est probable qu'un nombre plus important de conflits soient relevés. Conséquemment, l'heure de la journée (nombre de minutes écoulées depuis 8h00 le matin) et la position géographique (coordonnées X et Y) sont introduites en tant qu'effet fixe non linéaire (*splines*). Cinquièmement, à mesure que la vitesse du cycliste augmente, la probabilité de vivre un conflit pourrait augmenter aussi (Werneke, Dozza et Karlsson 2015). L'inclure sous forme de *spline* permet de tester si la variable a un effet non linéaire. À noter que l'inclinaison de la route n'est pas incluse spécifiquement, au contraire de quelques études de collision (Carvajal et al. 2020) et de conflit (Petzoldt et al. 2017). Le relief à Montréal est relativement plat, et la position géographique est déjà incluse dans le modèle, ce qui devrait couvrir une partie de l'effet qu'aurait pu avoir la pente.

2.5.2 Intégration des indicateurs de qualité

2.5.2.1 Un indicateur pour chaque dimension

L'objectif de cette sous-sous-section est de présenter la manière d'évaluer la qualité de chaque tronçon cyclable des réseaux de Montréal, Laval et Longueuil pour lesquels nous avons collecté des données, en fonction de chacune des trois dimensions du mémoire (exposition au bruit et à la pollution, état de la chaussée, sécurité routière). La dimension d'état de la chaussée est évaluée directement, c'est-à-dire que les données d'accélération verticale, converties en indice de confort (DCI) et contrôlées pour l'effet de la vitesse et du participant·e, sont associées au tronçon cyclable correspondant. Pour les dimensions d'exposition au bruit et à la pollution et de probabilité de vivre un conflit, il n'est pas possible de directement utiliser les données récoltées. En effet, à la différence des mesures d'accélération verticale utilisées pour l'état de la chaussée, les mesures de bruit et de pollution et les conflits observés sont grandement dépendants des conditions d'échantillonnage (heure, humidité, jour de la semaine, capteur utilisé, etc.), qui ne sont pas constantes d'un tronçon à l'autre. Ces conditions d'échantillonnage sont intégrées dans les modèles statistiques, présentés aux sous-sous-sections 2.5.1.1 et 2.5.1.3, en tant que variables de contrôle. Ainsi, pour ces deux dimensions, plutôt que d'associer directement les observations aux tronçons correspondants, on utilise les modèles statistiques pour prédire les expositions attendues au bruit et à la pollution et la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule et avec un·e piéton·ne.

Pour ce faire, on fournit aux modèles un nouveau jeu de données (les réseaux cyclables de Montréal, Laval et Longueuil), qui contient des valeurs pour chaque variable utilisée dans le modèle. Les variables de contrôle des modèles sont toutes fixées à une valeur constante, à l'exception de la position géographique, qu'on laisse varier avec le type de voie cyclable et de rue (Tableau 2.8). Ainsi, on obtient une valeur prédite pour chaque tronçon, selon chaque dimension, qui tient compte des conditions d'échantillonnage.

À noter que dans le cas des modèles d'exposition au bruit et à la pollution, la variable concernant le type d'axe emprunté se présente dans les modèles comme étant le temps passé sur chaque type d'axe. Puisque dans le cadre de cette section on fait des prédictions à l'échelle des tronçons, il faut d'abord réaliser un tableau disjonctif à partir de la variable catégorielle du type de voie cyclable et de rue. En d'autres termes, on crée une nouvelle colonne pour chaque type de voie cyclable et de rue (modalités), qui vaut 0 ou 1. Conceptuellement, cela revient à spécifier aux modèles de bruit et de pollution que l'on a passé une minute complète sur le type de voie cyclable et de rue du tronçon en question, et 0 minute sur tous les autres types.

Enfin, il faut exprimer toutes les dimensions selon une échelle commune, pour permettre les comparaisons entre elles et la classification par la suite. Pour ce faire, pour chaque observation, on soustrait la moyenne de la variable et on divise par l'écart-type de la variable. Cela nous donne donc des variables centrées réduites (cote z) : une augmentation d'une unité de la variable correspond à une augmentation d'un écart-type. Puisque toutes les mesures que nous prenons sont des caractéristiques négatives de la qualité des voies cyclables, une voie cyclable de bonne qualité obtiendra donc une cote négative, et à l'inverse, une voie cyclable de mauvaise qualité obtiendra une cote positive.

Tableau 2.8 Variables pour prédictions

Variable			Modèle				
État	Nom	Valeur	Bruit	Pollution	Conflit véhicule	Conflit piéton-ne	
Prédite	Intensité du bruit ($L_{Aeq, 1 \text{ min}}$; dB[A])	[0,+∞]	•				
	Concentration de particules fines (PM _{2,5} ; µg/m ³)]0,+∞]		•			
	Probabilité de vivre un conflit avec un véhicule	[0,1]			•		
	Probabilité de vivre un conflit avec un piéton-ne	[0,1]				•	
	Humidité	50%			•		
Fixe	Identifiant du capteur	ID1			•		
	Jour de collecte	12 juin 2019 à Montréal	•	•	•	•	
	Nombre d'intersections croisées	1	•	•			
	Présence d'une intersection à moins de 15 m	0			•	•	
	Présence d'un arrêt de bus à moins de 15 m	0			•	•	
	Heure de la journée (minutes écoulées depuis 8h le matin)	9h00 (120 min)	•	•	•	•	
	Pollution d'arrière-plan RSQA (inverse du log de la distance)	10 µg/m ³		•			
	Vitesse	15 km/h			•	•	
	Libre	Temps passé sur chaque type de voie cyclable et de rue empruntée (minutes)	[0,1]	•	•		
		Type de voie cyclable et de rue (facteur)	1 modalité parmi les 9 possibles ^a			•	•
Localisation (x,y)		Coordonnées du centroïde du tronçon	•	•	•	•	

^a Chaussée désignée sur rue locale ou collectrice ; bande cyclable sur rue locale, collectrice ou artérielle ; piste protégée sur ou à proximité de rue locale, collectrice ou artérielle ; piste protégée hors rue.

2.5.2.2 Classifier les tronçons selon leur performance par indicateur

L'objectif de cette sous-sous-section est de montrer comment on classifie les tronçons cyclables en fonction de leur performance selon les différents indicateurs de qualité développés à la sous-

sous-section précédente (2.5.2.1). On cherche ici à regrouper les tronçons de voies cyclables selon leur ressemblance, en fonction des dimensions du mémoire. Une fois les groupes créés, il est possible de les décrire, de les cartographier, et d'analyser comment ils se répartissent dans l'espace.

Pour faire la classification, on a recours au paquet 'geocmeans' (Gelb et Apparicio 2021a), qui permet de réaliser des classifications floues aspatiales et spatiales. L'intérêt des classifications floues par rapport aux classifications fixes est qu'en plus de rassembler les observations par groupe, elles renvoient la probabilité d'appartenance à chaque groupe, ce qui donne de précieuses informations sur la significativité de l'appartenance d'une observation à un groupe. L'intégration d'une dimension spatiale dans les algorithmes de classification permet de lisser le résultat, c'est-à-dire, d'obtenir une classification plus cohérente spatialement. Par exemple, cela permet d'éviter que deux observations voisines spatialement se retrouvent classifiées dans des groupes différents à cause de légères différences sémantiques (valeurs des variables utilisées pour la classification). Malgré que l'ajout d'une composante spatiale réduise inévitablement la qualité de la classification, elle permet de faciliter l'interprétation des résultats de la classification et de les rendre plus cohérents spatialement (Gelb et Apparicio 2021a).

Les algorithmes de classification de 'geocmeans' sont disponibles en version traditionnelle et en version généralisée, à la fois en mode aspatial et en mode spatial. La version généralisée est très semblable à la version traditionnelle, à la différence qu'elle intègre un paramètre supplémentaire permettant une mise à jour de la matrice d'appartenance à chaque itération, ce qui débouche normalement sur une convergence plus rapide et une classification moins floue.

Les algorithmes de classification spatiale dépendent de certains paramètres, notamment :

k	nombre de groupes
m	degré de flou
β	paramètre de généralisation
α	pois relatif de la composante spatiale par rapport à la composante sémantique
W	matrice de pondération spatiale

Le nombre de groupes (k) à créer doit être spécifié d'avance, à la différence des classifications ascendantes hiérarchiques (CAH). Le degré de flou (m) représente à quel point l'appartenance d'une observation à une classe peut être incertaine ; lorsque m vaut 1, la classification est stricte, puis à mesure que m augmente, on tend vers une classification complètement floue où tous les groupes sont homogènes. Le paramètre de généralisation (β), présent uniquement dans les versions généralisées des algorithmes de classification, contrôle la force de la modification de la

matrice d'appartenance. Le poids de la composante spatiale (α) doit également être ajusté : lorsqu'il vaut 0, l'espace ne joue aucun rôle dans la classification, lorsqu'il vaut 1, l'espace joue un rôle aussi important que la sémantique ; lorsqu'il vaut 2, l'espace joue un rôle deux fois plus important que la sémantique. Enfin, la matrice de pondération spatiale (W) définit de quelle façon on considère que deux observations sont voisines spatialement, et quel poids on leur accorde dans l'attribution des observations aux groupes. Dans le cas qui nous concerne, on utilisera le paquet 'spNetwork' (Gelb 2021), qui offre la fonction 'network_listw' permettant de définir une matrice de pondération spatiale en fonction de l'inverse de la distance réticulaire au carré.

Plusieurs indicateurs de qualité de la classification sont disponibles et permettent d'évaluer les paramètres optimaux à utiliser pour la classification. On retient ici quatre de ces indicateurs. Premièrement, la part de l'inertie expliquée (variant de 0 à 100%) indique la performance de la classification. Deuxièmement, l'indice de Xie et Beni (1991) représente le ratio entre la ressemblance des observations au sein d'un groupe et la différence entre les groupes ; un indice de Xie et Beni plus faible représente donc une meilleure classification. Troisièmement, le critère de silhouette mesure la non-superposition entre les groupes ; on cherche donc ici à maximiser sa valeur. Quatrièmement, le critère d'incohérence sémantico-spatiale fait référence au degré de ressemblance d'une observation avec ses voisins, autant en termes de proximité spatiale que sémantique (Gelb et Apparicio 2021a).

Une fois la classification finalisée, on peut décrire les groupes en fonction de leurs centres de gravité, c'est-à-dire, la valeur moyenne de chaque dimension au sein de chaque groupe. On peut ensuite vérifier les associations entre les types de voie cyclable et de rue et les groupes de la classification, ainsi qu'avec les trois territoires.

CHAPITRE 3 : EXPOSITION AU BRUIT ET TYPES DE VOIE CYCLABLE

Formulaire d'inclusion d'un article au mémoire de maîtrise

1. Identification de l'étudiant

Nom, Prénom : Jarry, Vincent

2. Description de l'article

Titre : L'exposition des cyclistes au bruit en fonction du type de voie cyclable empruntée à Montréal, Laval et Longueuil

Nom des auteur·e·s : Vincent Jarry et Philippe Apparicio

Revue avec comité de lecture : Les Cahiers de géographie du Québec

État du cheminement : Publié date de publication : _____
 Sous presse
 Accepté moyennant modifications
 Soumis

Résumé* Lors de leurs déplacements, les cyclistes utilitaires s'exposent à des niveaux de bruit ayant potentiellement des répercussions sur leur santé. L'objectif de cet article est d'analyser la variation de l'exposition des cyclistes au bruit à Montréal, Laval et Longueuil en fonction des types de voies cyclables. À partir de données primaires collectées en juin 2018 (1 257 km), un modèle de régression généralisé additif mixte avec terme autorégressif est construit pour prédire l'intensité sonore à laquelle s'exposent les cyclistes. Durant la collecte, la moyenne de bruit enregistrée est de 69,3 dB(A). Les résultats montrent que l'exposition au bruit est plus forte lorsque les voies cyclables sont aménagées sur une artère que sur une rue locale. Toutes choses étant égales par ailleurs, des écarts de 4 dB(A) sont mesurés entre les endroits les moins et les plus bruyants. De tels résultats pourraient guider les planificateurs lors de l'aménagement des voies cyclables.

* Si l'article est écrit dans une autre langue que le français, veuillez inclure également un résumé en français.

3. Contribution de chaque coauteur·e

Pour un article à plusieurs auteur·e·s, veuillez détailler la contribution de chacun.

Identification du coauteur·e·	Description de la contribution
Vincent Jarry	Revue de littérature, collecte et structuration des données, analyses statistiques dans R, structuration et rédaction de l'article.
Philippe Apparicio (directeur)	Collecte et révision des données, participation active à la structuration et aux analyses statistiques dans R, nombreuses révisions de l'article.

4. Déclaration

À titre de coauteur·e de l'article mentionné ci-haut, j'autorise Vincent Jarry à intégrer l'article dans son mémoire de maîtrise.

Coauteur·e	Signature	Date
Vincent Jarry		2021-06-17
Philippe Apparicio		2021-06-17

Titre : L'exposition des cyclistes au bruit en fonction du type de voie cyclable empruntée à Montréal, Laval et Longueuil

Revue : Les Cahiers de géographie du Québec

Auteurs et affiliations :

Vincent Jarry
Centre Urbanisation Culture Société
Institut national de la recherche scientifique

Philippe Apparicio
Centre Urbanisation Culture Société
Institut national de la recherche scientifique

Adresse de correspondance :

Philippe Apparicio
Laboratoire d'équité environnementale
Centre Urbanisation Culture Société
Institut national de la recherche scientifique
385 rue Sherbrooke Est
Montréal QC H2X 1E3 Canada
philippe.apparicio@ucs.inrs.ca

Référence complète de l'article :

Jarry, Vincent et Philippe Apparicio (sous presse). *L'exposition des cyclistes au bruit en fonction du type de voie cyclable empruntée à Montréal, Laval et Longueuil*. Les Cahiers de géographie du Québec.

L'exposition des cyclistes au bruit en fonction du type de voie cyclable empruntée à Montréal, Laval et Longueuil

Résumé

Lors de leurs déplacements, les cyclistes utilitaires s'exposent à des niveaux de bruit ayant potentiellement des répercussions sur leur santé. L'objectif de cet article est d'analyser la variation de l'exposition des cyclistes au bruit à Montréal, Laval et Longueuil en fonction des types de voies cyclables. À partir de données primaires collectées en juin 2018 (1 257 km), un modèle de régression généralisé additif mixte avec terme autorégressif est construit pour prédire l'intensité sonore à laquelle s'exposent les cyclistes. Durant la collecte, la moyenne de bruit enregistrée est de 69,3 dB(A). Les résultats montrent que l'exposition au bruit est plus forte lorsque les voies cyclables sont aménagées sur une artère que sur une rue locale. Toutes choses étant égales par ailleurs, des écarts de 4 dB(A) sont mesurés entre les endroits les moins et les plus bruyants. De tels résultats pourraient guider les planificateurs lors de l'aménagement des voies cyclables.

Mots-clés : vélo, bruit, voie cyclable, modèle généralisé additif, Montréal, Laval, Longueuil

Cyclists' exposure to road traffic noise across types of bikeway in Montreal, Laval and Longueuil

Abstract

While commuting, cyclists are exposed to levels of noise potentially harmful for their health. The objective of this paper is to analyse cyclists' noise exposure variations across bikeway types in Montreal, Laval and Longueuil (Quebec, Canada). Using primary data collected in June 2018 (1,257 km), a generalized additive mixed effects model with autoregressive term (GAMMAR) is built to predict noise intensity to which cyclists are exposed. During the collection, the mean noise level was 69.3 dB(A). Results show that noise exposure is higher when bikeways are located on arterial roads than on local streets. All other things being equal, a 4 dB(A) gap is measured between the noisiest and the quietest places. Such results could influence planners when designing future bikeway networks.

Keywords: bicycle, noise, bikeway, generalized additive model, Montreal, Laval, Longueuil.

3.1 Introduction

L'utilisation du vélo utilitaire dans les villes nord-américaines connaît un réel engouement dans les dernières années. Certains auteurs parlent même d'une renaissance du vélo en Amérique du Nord (Pucher, Buehler et Seinen 2011). À Montréal, entre 2008 et 2013, le nombre de déplacements quotidiens à vélo a augmenté de 57 % (Vélo Québec 2015). En outre, les planificateurs urbains considèrent désormais le vélo comme un moyen de transport actif permettant de réduire la congestion routière, la pollution de l'air et le bruit (Pucher, Buehler et Seinen 2011). Cela s'exprime d'ailleurs par la volonté d'étendre les réseaux cyclables à l'intérieur des villes, de même que par la mise en place de systèmes de partage de vélos. Montréal ne fait pas exception : entre 1991 et 2016, les réseaux cyclables de Montréal, Laval et Longueuil ont presque triplé en taille (Houde, Apparicio et Séguin 2018).

Les bénéfices de la pratique du vélo utilitaire sont aujourd'hui bien connus. Individuellement, elle contribue à une meilleure santé et qualité de vie (Bassett et al. 2008 ; Oja, Vuori et Paronen 1998) ; collectivement, elle contribue à réduire les coûts de santé, la congestion routière, le bruit et les émissions de gaz à effet de serre (Rojas-Rueda et al. 2011). Circuler à vélo en ville comporte également des risques. Outre les blessures et les décès associés aux collisions, les cyclistes sont exposés aux pollutions atmosphérique et sonore. Dans une récente revue de littérature comparant les expositions individuelles selon le moyen de transport, (Cepeda et al. 2017) concluent d'ailleurs que les cyclistes sont les plus exposés à ces deux nuisances. À Montréal, ce constat est corroboré par (Apparicio et al. 2018), qui ont montré que pour des trajets équivalents en heure de pointe, les cyclistes inhalent près de quatre fois plus de dioxyde d'azote que les automobilistes, mais aussi qu'ils sont exposés à des niveaux de bruit supérieurs de 1,94 dB(A). De plus, de nombreuses études ont montré que les niveaux d'exposition aux polluants atmosphériques varient significativement d'une ville à l'autre et au sein d'une même ville, et ce notamment, en fonction des types de rues et de voies cyclables empruntés (Bigazzi et Figliozzi 2014 ; Khan et al. 2018). Par contre, plus rares sont les études qui se penchent sur l'exposition au bruit (Apparicio et al. 2016 ; Apparicio et al. 2018 ; Boogaard et al. 2009 ; Minet et al. 2018). Par conséquent, cette étude vise à répondre à trois objectifs principaux : 1) évaluer les niveaux d'exposition au bruit des cyclistes dans le Grand Montréal; 2) vérifier si les niveaux d'exposition au bruit des cyclistes varient significativement entre Montréal, Laval et Longueuil; 3) vérifier si ces niveaux varient en fonction du type de voie cyclable empruntée.

3.2 Revue de littérature

3.2.1 Le bruit environnemental : un enjeu de santé publique

En raison des niveaux de bruit potentiellement élevés, les cyclistes s'exposent à des risques de santé. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) rappelle que la surexposition au bruit environnemental est associée, entre autres, à une augmentation du risque de maladies cardiovasculaires, de troubles cognitifs et d'acouphène. En combinant tous ces effets, l'OMS estime qu'entre 1,0 et 1,6 million d'années de vie corrigées de l'incapacité (AVCI, ou DALY en anglais) est perdu annuellement en Europe occidentale (World Health Organization 2011). Selon cette organisation, à 53,3 dB(A) sur 24 h (L_{den}), 10% de la population est fortement dérangée par le bruit tandis que la valeur 59,3 dB(A) est associée avec une augmentation de 5% du risque relatif de l'incidence de maladies cardiaques ischémiques (World Health Organization 2018b). Au Québec, le Ministère des Transports, dans sa Politique sur le bruit routier (Ministère des Transports 1998), reconnaît que les populations résidentes aux abords de son réseau ne devraient pas être exposées à plus de 65 dB(A) tout au long de la journée ($L_{Aeq, 24h}$). Or, à l'heure actuelle, malgré les risques pour la santé associés à l'exposition au bruit, tant les villes que le MTQ et l'INSPQ (Institut national de santé publique du Québec) ne semblent pas disposer de données sur l'exposition des cyclistes au bruit dans les villes québécoises.

3.2.2 L'exposition au bruit : de fortes variations temporelles, spatiales et selon les types d'axes empruntés

Les rares études qui ont analysé l'exposition des cyclistes au bruit en utilisant des sonomètres portatifs montrent que les niveaux varient énormément d'une ville à l'autre. Dans une vaste étude regroupant onze villes néerlandaises, (Boogaard et al. 2009) ont mesuré des niveaux moyens allant de 63 à 66 dB(A). À Toronto, des chercheur·euse·s ont mesuré en moyenne une exposition de 72,7 dB(A) (Minet et al. 2018). À Montréal, deux études récentes menées dans des contextes temporels différents ont mesuré une exposition moyenne de 68,8 dB(A) en heures de pointe (Apparicio et al. 2018) et de 70,5 dB(A) tout au long de la journée dans les quartiers centraux (Apparicio et al. 2016). Plus récemment, une étude comparative entre les villes nord-américaines et européennes réalisée avec le même protocole de recherche et les mêmes instruments de mesure a démontré que l'exposition des cyclistes varie significativement entre Copenhague,

Montréal et Paris (moyennes de bruit respectives de 68,4, 70,7 et 73,4 dB(A) $L_{Aeq, 1min}$) (Apparicio et Gelb 2020). À Hô Chi Minh-Ville, Gelb et Apparicio (2019) ont rapporté des niveaux particulièrement alarmants : en moyenne, les cyclistes ont été exposés à 78,8 dB(A). Outre ces variations entre villes, il existe de fortes variations en fonction du type d'axe emprunté au sein d'une même ville.

Comparativement à circuler sur une rue collectrice, les cyclistes de l'étude de Apparicio et al. (2016) étaient exposés à 1,1 dB(A) de moins lorsqu'ils circulaient sur une piste cyclable sur rue. Aucune différence significative n'a été relevée entre les moments où les cyclistes roulaient sur une bande cyclable, une chaussée désignée ou une rue collectrice. Cela démontre la nécessité de tenir compte des niveaux de bruit lors de la planification du réseau cyclable. Or, cet enjeu ne semble pas être pris en compte par les planificateurs à l'heure actuelle. Par exemple, à Toronto, Minet et al. (2018) démontrent que les niveaux mesurés sur le réseau planifié de voies cyclables étaient plus élevés que sur le réseau existant de voies cyclables. Une explication avancée par les chercheur·euse·s est que les pistes cyclables sont construites en fonction des besoins estimés de déplacements et là où l'espace est disponible, souvent à proximité des grandes artères, plus bruyantes. Cela souligne l'importance d'étudier les différences entre les types de voies cyclables, sur chaque type de rues.

3.3 Données et méthodes

3.3.1 Territoire d'étude

Avec 4,1 millions d'habitants en 2016, la région métropolitaine de recensement (RMR) de Montréal est la deuxième plus peuplée au Canada (Statistique Canada 2016). Pour cette étude, le territoire se limite aux deux agglomérations de Montréal et Longueuil et à la ville de Laval (Figure 3.1) qui regroupent plus des deux tiers (68%) de la population de la RMR. Plusieurs raisons justifient le choix de ce territoire d'étude. Premièrement, les parts modales du vélo pour des déplacements domicile-travail y sont les plus importantes (Figure 3.1). Deuxièmement, le réseau cyclable métropolitain utilitaire a surtout été développé dans ces trois régions. Troisièmement, une collecte de plus grande envergure – incluant les municipalités des Laurentides, de Lanaudière et du reste de la Montérégie situées sur le territoire de la RMR – aurait nécessité plusieurs semaines sans pour autant ajouter des données intéressantes. En effet, les

parts modales du vélo y sont quasi nulles et les niveaux sonores plus faibles, en raison de volumes de trafic plus limités que dans la partie centrale de la RMR.

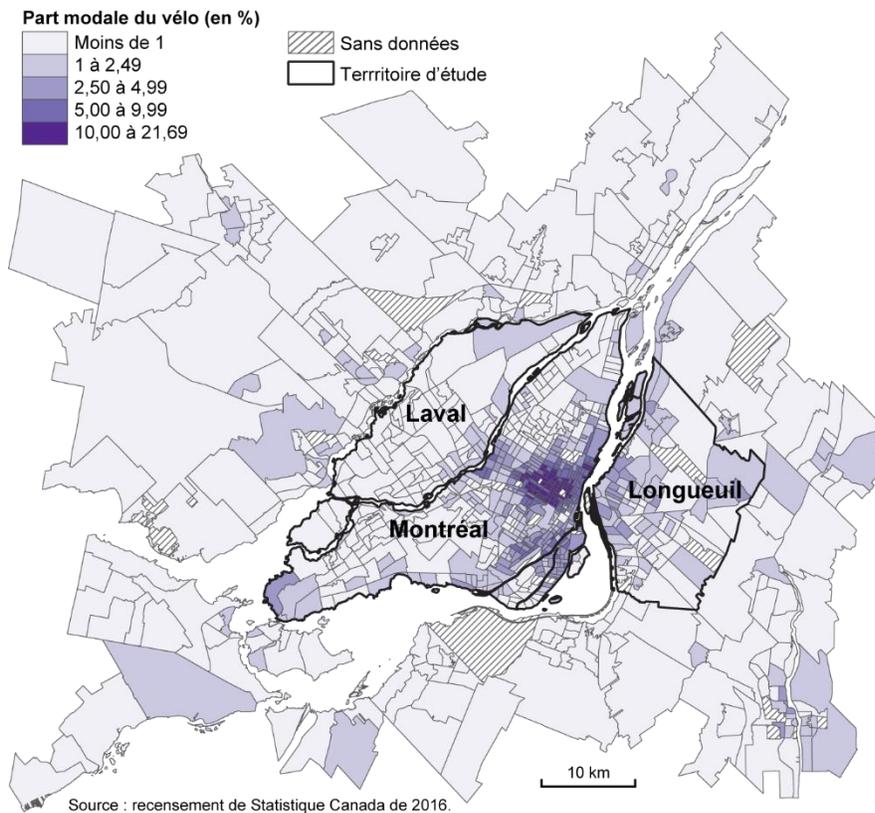


Figure 3.1 Part modale du vélo dans les déplacements domicile-travail par secteur de recensement dans la région métropolitaine de recensement de Montréal, 2016

3.3.2 Données sur les réseaux viaire et cyclable

Afin d'analyser comment varient les niveaux d'exposition au bruit en fonction des voies cyclables empruntées, il convient de construire préalablement un réseau unifié incluant les réseaux viaire et cyclable. Concernant le réseau viaire, nous avons recours à la typologie de routes d'Adresses Québec (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2019). À partir du champ *ClsRte* du produit AQ Réseau, nous avons identifié trois catégories de rues :

- La catégorie des *rues artérielles* qui regroupe les *artères* (par exemple, le boulevard Saint-Laurent) et deux types de voies moins présentes dans l'espace d'étude, soit les *routes nationales* (par exemple la rue Sherbrooke) et les *collectrices de transit* (par exemple l'avenue Souigny). Selon le guide d'utilisateur d'Adresses Québec, les artères « sont des

voies permettant la circulation de transit sur une longue distance [...] et sont des liens entre différents quartiers d'une agglomération » (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2019, 13) (MERN, 2019, 13);

- les *rues collectrices* (par exemple, l'avenue du Mont-Royal Est), qui sont définies comme « des voies servant habituellement à la circulation de transit, à la desserte des propriétés adjacentes ou à l'accès à des équipements locaux importants (parcs industriels, aéroports locaux, CLSC, etc.). » (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2019, 13);
- et finalement, les *rues locales*, soit des voies qui ont pour « fonction principale de desservir les zones résidentielles et de donner accès aux propriétés » (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2019, 13).

Concernant le réseau cyclable, il a été construit à partir des données de Houde, Apparicio et Séguin (2018) mises à jour en 2018 par le premier auteur. Il permet ainsi d'identifier quatre types de voies cyclables illustrés à la Figure 3.2 :

- Les *pistes cyclables hors rue* (dénommées aussi pistes en site propre) séparées physiquement de la circulation;
- les *pistes cyclables sur rue* avec ou sans séparateur physique (délinéateurs, bollards, terre-plein, etc.);
- les *bandes cyclables* peintes au sol;
- les *chaussées désignées* identifiées par des logos de cycliste chapeautés de chevrons peints au sol.



Figure 3.2 Illustration des quatre types de voies cyclables.

Les effets des types de voies cyclables et de route sur les niveaux d'exposition au bruit sont difficilement dissociables. Par exemple, les niveaux d'exposition des cyclistes roulant sur une bande cyclable risquent d'être plus élevés si cette dernière est aménagée sur une artère comparativement à une rue locale. Il en va de même pour les pistes cyclables sur rue et les chaussées désignées. Par conséquent, nous avons croisé les trois catégories de rues (artère, collectrice et locale) avec les pistes cyclables sur rue, les bandes cyclables et les chaussées désignées. Il est à noter que ce croisement est aussi réalisé avec les segments des pistes hors rue, lorsque ces derniers sont situés à moins de cinq mètres du réseau viaire. En effet, on peut supposer que le niveau de bruit sera plus faible sur la piste cyclable du canal de Lachine (très éloignée du réseau viaire), comparativement à la piste cyclable du parc Lafontaine (avant sa modification fin 2018) située à moins de cinq mètres de la rue. Bien que cette distance de cinq mètres puisse paraître arbitraire, elle permet d'identifier les segments étant réellement à proximité d'une rue.

3.3.3 Données primaires sur l'exposition au bruit collectées à vélo

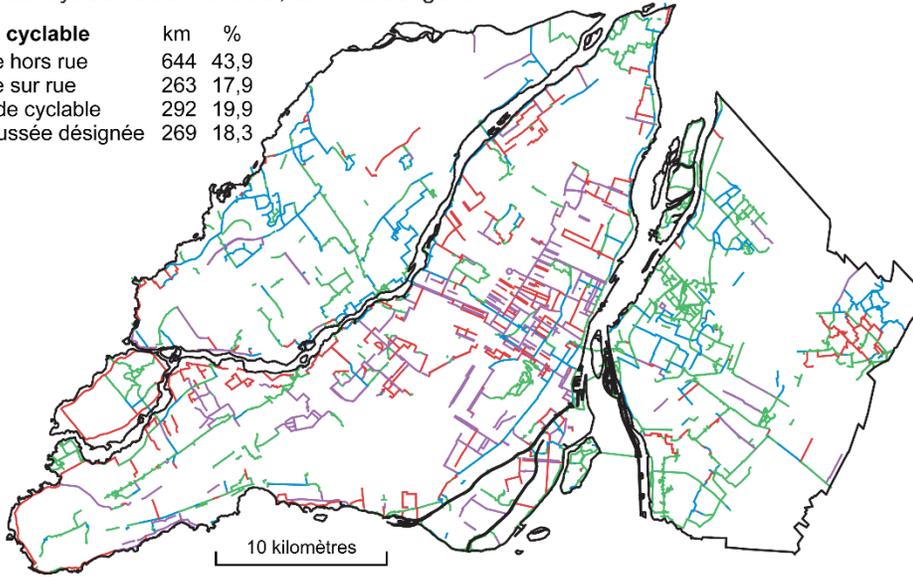
Quatre cyclistes (deux femmes et deux hommes dans la vingtaine, étudiants au deuxième cycle en études urbaines) ont roulé par temps sec (et donc sur chaussée sèche) durant quatre jours de

semaine de juin 2018 (lundi, mercredi, jeudi, vendredi). Les trajets ont été préalablement tracés sur Google MyMaps dans l'optique de maximiser la couverture des réseaux cyclables de Montréal, Laval et Longueuil. Chaque participant était équipé de quatre appareils : un sonomètre de classe 1 avec bonnette pare-vent (Brüel & Kjaer type 4448, calibré chaque matin à l'aide d'un calibre Brüel & Kjaer type 4231, avec une précision de $\pm 0,2$ dB) fixé sur le torse près de l'épaule (conformément à la recommandation du fabricant) rapportant la moyenne d'intensité sonore sur une minute ($L_{Aeq, 1 \text{ min}}$ exprimée en dB[A]), une montre GPS enregistrant la localisation géographique chaque seconde (Garmin Forerunner 910), une caméra d'action pour obtenir une vidéo de chaque trajet (Garmin Virb XE) et un téléphone cellulaire fixé sur le guidon pour suivre le trajet à partir de Google Maps. Mis à part les consignes courantes de sécurité, lors des périodes d'enregistrement, les cyclistes devaient rouler à un rythme habituel de circulation en ville (entre 10 et 20 km/h), ne pas parler et éviter de produire tout bruit non essentiel à l'opération d'une bicyclette, et arrêter puis redémarrer la montre GPS et la caméra d'action toutes les 45 minutes approximativement afin de faciliter la gestion des données (surtout celles des caméras). Au total, 1 257 kilomètres ont été parcourus durant plus de 72 heures sur les réseaux cyclables de Montréal, Laval et Longueuil, ainsi que sur certaines rues sans voie cyclable (nécessaire pour compléter les segments d'une minute sur certaines voies cyclables).

La Figure 3.3 présente le réseau cyclable de l'espace d'étude (a) et la couverture réalisée (b). Elle permet de constater rapidement que nous avons couvert plus de la moitié du réseau (56,8%). Certaines sections n'ont pas été couvertes, notamment les îles de Boucherville et L'Île-Bizard, d'une part, plus difficiles à atteindre, et d'autre part, destinées au vélo récréatif. Inévitablement, certains axes ont été collectés à plusieurs reprises afin que les participants puissent revenir au point de départ, ce qui explique que nous avons roulé 279 km sur des pistes cyclables sur rue, alors qu'il n'y a que 263 km de pistes sur rue sur le territoire.

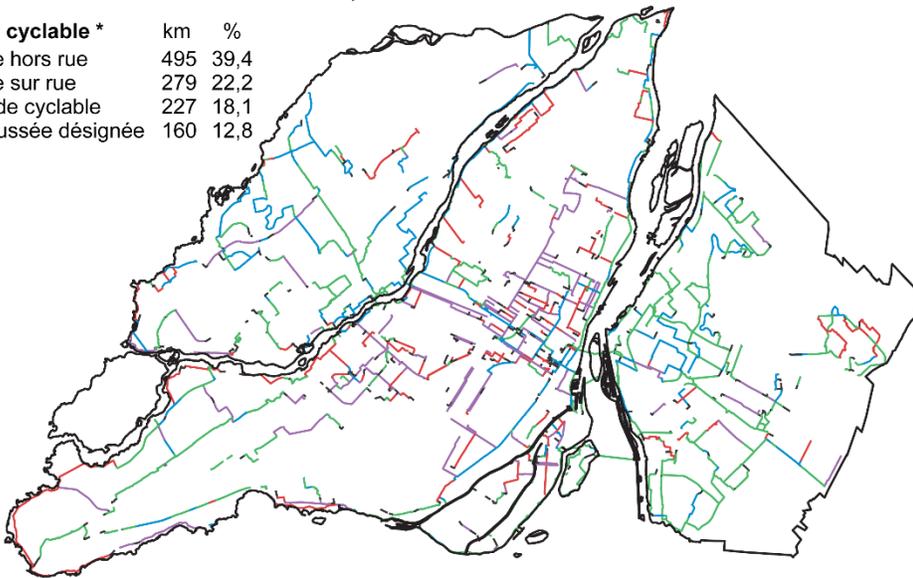
a. Réseaux cyclables de Montréal, Laval et Longueuil

Voie cyclable	km	%
Piste hors rue	644	43,9
Piste sur rue	263	17,9
Bande cyclable	292	19,9
Chaussée désignée	269	18,3



b. Couverture de la collecte de données primaires à vélo

Voie cyclable *	km	%
Piste hors rue	495	39,4
Piste sur rue	279	22,2
Bande cyclable	227	18,1
Chaussée désignée	160	12,8



* 95 km ont été parcourus sur des rues sans infrastructure cyclable, ce qui correspond à 7,6% du jeu de données.

Figure 3.3 Réseaux cyclables sur le territoire d'étude et trajets réalisés à vélo

Au Tableau 3.1 sont présentées les différentes combinaisons de types de voies cyclables et de rues parcourues par les participants. Ils ont emprunté la plupart du temps des pistes cyclables hors rue, soit à plus de cinq mètres d'une rue (22,8%), soit à moins de cinq mètres d'une rue (16,6%). Aussi, ils ont roulé respectivement 22,2%, 18,1% et 12,8% du temps sur des pistes cyclables sur rue, des bandes cyclables et des chaussées désignées. Rappelons que les observations sont des segments d'une minute puisque les sonomètres renvoient une valeur moyenne chaque minute. Par conséquent, pour certaines observations, le cycliste a circulé à la

fois sur les réseaux viaire et cyclable : par exemple vingt secondes sur une rue locale et quarante secondes sur une piste cyclable. Cela explique qu'au total les participants ont roulé 329 minutes (7,6%) à l'extérieur du réseau cyclable, c'est-à-dire sur des rues sans voie cyclable.

Lorsque les cyclistes ont roulé sur une piste cyclable à moins de cinq mètres du réseau viaire, elle était surtout située le long d'une artère (pont Jacques-Cartier : n=100; 2,3%, autre artère : n=352; 8,1%), puis sur une rue collectrice (n=207; 4,7%) et accessoirement sur une rue locale (n=63; 1,4%). Par contre, les observations sur les pistes cyclables sur rue sont également distribuées entre les trois types de rues : artérielle (7,7%), collectrice (7,4%) et locale (7,1%). Quant aux bandes cyclables parcourues durant la collecte, elles étaient avant tout tracées sur des rues collectrices (n=328; 7,5%) et locales (n=267; 6,1%), mais aussi artérielles (n=192; 4,4%). Sans surprise, aucune chaussée désignée parcourue durant la collecte n'était peinte sur une rue artérielle ; elles étaient majoritairement sur des rues locales (n=354; 8,1%) et collectrices (n=201; 4,6%).

Tableau 3.1 Temps passé sur les différentes combinaisons de types de voies cyclables et de rues

Voie cyclable	Rue	Minute	% _{total}	% _{type}
Aucune	Toutes les rues	329	7,6	--
Piste cyclable hors rue (à plus de 5 m d'une rue)	Aucune	993	22,8	--
Piste cyclable hors rue (à moins de 5 m d'une rue)	Toutes les rues	722	16,6	100,0
	Artérielle (pont Jacques-Cartier)	100	2,3	48,8
	Artérielle (autre)	352	8,1	13,9
	Collectrice	207	4,7	28,6
	Locale	63	1,4	8,7
Piste cyclable sur rue	Toutes les rues	967	22,2	100,0
	Artérielle	334	7,7	34,5
	Collectrice	323	7,4	33,3
	Locale	311	7,1	32,1
Bande cyclable	Toutes les rues	787	18,1	100,0
	Artérielle	192	4,4	24,4
	Collectrice	328	7,5	41,7
	Locale	267	6,1	33,9
Chaussée désignée	Toutes les rues	555	12,8	100,0
	Artérielle	0	0,0	0,0
	Collectrice	201	4,6	36,2
	Locale	354	8,1	63,8
Toutes les voies cyclables	Toutes les rues	4 353	100,0	--

%_{total} : pourcentage du temps passé sur chaque combinaison de types de voies cyclables et de rues parmi l'ensemble du jeu de données.

%_{type} : pourcentage du temps passé sur chaque type de rue en fonction de chaque type de voie cyclable.

3.4 Structuration des données primaires sur les réseaux routier et cyclable

Une fois la collecte terminée, les données de bruit et de position géographique sont importées dans une base de données SQLite à partir d'un code Python : elles sont couplées sur la base de l'heure précise (hh:mm:ss), obtenant ainsi pour chaque point de la trace GPS la mesure de bruit qui lui est associée ($L_{Aeq, 1 \text{ min}}$). Puis, chaque point est assigné au segment des réseaux routier (Adresses Québec) et cyclable correspondant. Un appariement spatial (*MapMatching*) automatique est d'abord réalisé dans QGIS 3.6 (QGIS Development Team 2020). Puis, cet appariement est validé et modifié au besoin manuellement en utilisant les vidéos enregistrées par les caméras, afin de s'assurer de l'exactitude du type de voie empruntée. Finalement, les trajets sont découpés en tronçons d'une minute (ce qui correspond à la résolution temporelle des sonomètres), pour lesquels sont calculés le nombre de secondes passées sur chaque type de voie ainsi que la valeur moyenne de bruit enregistrée durant cette minute. Pour plus de détails sur

la structuration des données collectées et les outils techniques mobilisés, on pourra consulter (Apparicio, Gelb et Mathieu 2019).

3.5 Analyses statistiques

Trois analyses sont réalisées dans R (R Core Team 2019). Pour répondre aux deux premiers objectifs – analyser les niveaux d'exposition et vérifier s'ils varient selon les trois sous-territoires (Montréal, Laval et Longueuil) –, nous avons recours à des statistiques descriptives et à une analyse de variance (ANOVA). Des graphiques en forme de violon permettront d'illustrer ces différences.

En lien avec le troisième objectif, nous proposons un modèle de régression particulier avec comme variable dépendante la moyenne d'intensité du bruit sur une minute ($L_{Aeq, 1 \text{ min}}$). À l'instar d'un travail récent sur la modélisation de l'exposition du bruit des cyclistes (Gelb et Apparicio 2019), nous avons recours à un modèle généralisé additif à effets mixtes avec un terme autorégressif (GAMMAR, *Generalized Additive Mixed Model with AutoRegressive term*) avec une distribution de Student (*t-scaled distribution*) de la variable dépendante (Wood, Pya et Säfken 2016). L'avantage de ce type de modèle, mis en œuvre dans R avec le paquet MGCV (Wood 2011), est qu'il nous permet d'introduire des effets aléatoires, des effets fixes et linéaires, des effets fixes non linéaires (*spline*) et un terme autorégressif (Tableau 3.2).

Durant la semaine de collecte, il est possible que les niveaux de bruit aient varié significativement d'une journée à l'autre (volumes de circulation variables par exemple); c'est pourquoi on l'inclut en tant qu'effet aléatoire. Des auteurs ont démontré que les niveaux de bruit varient de manière non linéaire tout au long de la journée (Gelb et Apparicio 2019 ; Lin et al. 2018) : par exemple, ils peuvent être très élevés durant la période de pointe du matin (de 8 à 10h), puis diminuer, et finalement remonter durant la période de pointe de soir (16h à 18h). Par conséquent, le temps en minutes écoulé depuis 8h le matin est introduit comme un effet non linéaire (*spline*).

De la même manière, l'espace risque d'avoir un effet non linéaire sur les niveaux de bruit mesurés. Indépendamment du type d'axe sur lequel le cycliste roule, il est possible qu'il soit plus ou moins exposé au bruit en fonction de sa localisation. Par exemple, un cycliste roulant sur une bande cyclable située sur une rue artérielle d'un arrondissement central pourrait être plus exposé que s'il circulait au même moment sur une bande cyclable située sur une rue artérielle dans l'ouest de l'île de Montréal. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à cet effet, particulièrement les activités

humaines génératrices de bruit (bruit aérien, chantiers, etc.) et surtout le trafic routier. Pour bien contrôler ce dernier facteur, il faudrait alors disposer de données sur le trafic en temps réel, ce dont nous ne disposons pas dans le cadre de cette étude. À l'instar de Gelb et Apparicio (2019), pour contrer cette lacune, nous proposons alors d'inclure un terme spatial – les coordonnées géographiques (x,y) sous forme de *spline* – qui devrait capter ces variations intra-urbaines du bruit environnemental. Notons que contrairement à l'ANOVA décrite précédemment, la variable catégorielle pour les trois sous-territoires n'est pas incluse dans ce modèle puisque nous tenons compte plus finement de l'espace avec la *spline* sur les coordonnées géographiques.

Il convient aussi de contrôler la dépendance (autocorrélation) temporelle : deux observations qui se suivent ont plus de chance de se ressembler que deux observations prises au hasard dans le jeu de données, puisque le cycliste risque d'être dans le même environnement sonore. Pour ce faire, il faut recourir à un terme autorégressif de type AR1 (Wood 2011).

Il est probable que le nombre d'intersections croisées ait un effet linéaire sur les niveaux d'exposition, pour lequel deux hypothèses peuvent être formulées. Les accélérations et décélérations proches des intersections pourraient concourir à augmenter les niveaux de bruit. À l'inverse, l'absence d'intersection pourrait permettre aux véhicules de circuler plus rapidement et augmenter ainsi les niveaux de bruit.

Finalement, une fois ces facteurs contrôlés – jour de la semaine, moment de la journée, position géographique, nombre d'intersections croisées et terme autorégressif –, on peut évaluer l'effet de rouler sur l'un des quatre types de voies cyclables (hors rue, sur rue, bande cyclable, chaussée désignée) aménagées à proximité ou sur les trois types de rues (artère, collectrice, locale). Nous supposons alors que le temps passé sur une piste cyclable hors rue réduit l'exposition au bruit, puisque le cycliste y est le plus éloigné de la rue. Quel que soit le type d'aménagement cyclable, s'il est localisé sur une artère, les niveaux de bruit risquent d'être plus élevés que sur une rue collectrice et plus encore que sur une rue locale. Aussi, pour un même type de rue (artérielle ou collectrice par exemple), on peut supposer que les bandes cyclables et les chaussées désignées présenteront des expositions légèrement plus fortes que les pistes sur rue. En effet, ces dernières sont surtout aménagées proche du trottoir et parfois séparées de la circulation par une rangée de voitures stationnées, alors que les autres aménagements placent le cycliste plus proche du trafic (bandes cyclables) voire carrément dans le trafic (chaussées désignées).

Notons que nous réservons un traitement particulier à la piste cyclable du pont Jacques-Cartier. Selon notre typologie, il s'agirait d'une piste hors rue à moins de cinq mètres d'une artère. Or,

puisque les niveaux de bruit sur cette piste risquent d'être particulièrement élevés et que nous avons suffisamment d'observations (n=100), nous avons décidé de ne pas l'inclure dans la même catégorie que les autres pistes hors rue à proximité d'une artère.

Tableau 3.2 Liste de variables indépendantes

Catégorie	Nom de la variable indépendante	Type
Contrôle	Jour de collecte	Intercepte aléatoire
	Moment de la journée (minutes écoulées depuis 8h le matin)	Effet fixe non linéaire (<i>spline</i>)
	Localisation (x,y)	Effet fixe non linéaire (<i>spline</i>)
	Nombre d'intersections croisées	Effet fixe linéaire
Prédicteur	Temps passé sur chaque type de voie cyclable croisé avec le type de rue (minutes)	Effet fixe linéaire

3.6 Résultats

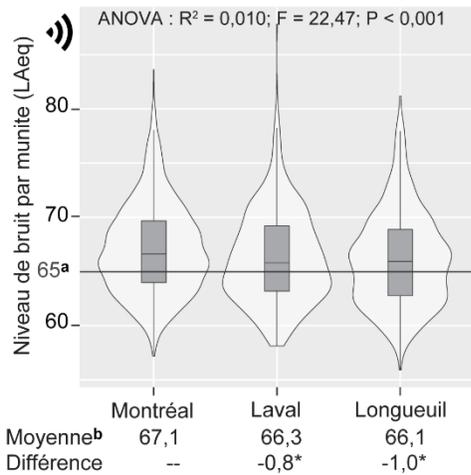
3.6.1 Les niveaux d'exposition au bruit selon les trois sous-territoires : analyses descriptives et ANOVA

Pour les 4 353 minutes collectées, la moyenne de bruit est de 69,3 dB(A) (Tableau 3.3), soit au-delà du niveau de bruit jugé problématique par le Ministère des Transports (1998) pour une exposition sur 24h. En outre, 62,95% des observations dépassent ce seuil. La moyenne de bruit est la plus élevée à Montréal (69,5 dB[A]). Bien que les différences avec celles de Laval (69,2 dB[A]) et de Longueuil (68,7 dB[A]) soient significatives ($p < 0,001$), elles restent relativement faibles (moins d'un décibel d'écart entre la région la plus bruyante et la moins bruyante) (Figure 3.4). La variation du bruit est relativement importante puisque l'écart interquartile pour l'ensemble du jeu de données s'élève à 5,89 dB(A). Cela signifie qu'entre le premier et le troisième quartiles, l'intensité sonore est de trois à quatre fois plus élevée (Institut national de santé publique du Québec 2015, 14). Bien entendu, le même constat s'applique aux trois sous-territoires puisque les boîtes à moustache sont de taille comparable.

Tableau 3.3 Statistiques descriptives des niveaux d'exposition au bruit

Catégorie	P5	P25	Médiane	P75	Moyenne arithmétique	Moyenne de bruit*	Écart-type de bruit*	P95
Total	60,6	63,6	66,4	69,5	66,7	69,3	8,3	74,6
Montréal	61,0	64,0	66,6	69,7	67,1	69,5	6,9	74,8
Laval	60,2	63,2	65,8	69,2	66,3	69,2	13,7	73,9
Longueuil	59,9	62,8	65,9	68,9	66,1	68,7	7,0	74,1

P5, P25, P75 et P95 : 5^e, 25^e, 75^e et 95^e percentiles. * Moyenne et écart-type obtenus avec le paquet *seewave* (Sueur, Aubin et Simonis 2008).



^a 65 dB(A): Valeur recommandée par le Ministère des Transports du Québec en bordure des voies de circulation

^b Moyenne arithmétique.

* Note: Différence significative avec $p < 0.001$ (test Tukey).

Figure 3.4 Comparaison de l'exposition sonore des cyclistes à Montréal, Laval et Longueuil

3.6.2 Les niveaux d'exposition selon les axes empruntés : les résultats du modèle GAMMAR

3.6.2.1 Qualité d'ajustement du modèle

Le modèle final est présenté au Tableau 3.4. Il est à noter qu'il intègre un terme d'autocorrélation temporelle AR1 (ϕ est estimé à 0,493, basé sur les résidus d'un premier modèle réalisé sans le terme d'autocorrélation temporelle). Concernant la qualité d'ajustement du modèle, le R^2 ajusté est de 0,309, ce qui est comparable à d'autres études réalisées dans le passé avec des méthodes

similaires (Apparicio et Gelb 2020 ; Gelb et Apparicio 2019). De plus, la distribution des résidus est très proche de la normalité (skewness = 0,436; kurtosis = 2,974).

3.6.2.2 Les variables de contrôle : analyse des effets aléatoires et non linéaires

Premièrement, la journée, introduite comme un effet aléatoire, est significative sur les niveaux d'exposition au bruit (edf = 1,95; $p = 0,029$). En effet, la Figure 3.5.a montre clairement que, toutes choses étant égales par ailleurs, les niveaux d'exposition ont été plus faibles au début (lundi et mercredi) qu'à la fin de la semaine (jeudi et vendredi).

Deuxièmement, le moment de la journée a un effet encore plus significatif (edf = 3,78; $p = 0,002$). À la Figure 3.5.b, la *spline* temporelle permet de distinguer clairement deux pics – correspondant globalement à la période de pointe du matin (8h et 9h) et un peu avant celle du soir (14h à 16h) – tandis que les niveaux de bruit sont beaucoup plus faibles entre 10h et midi et après 17h.

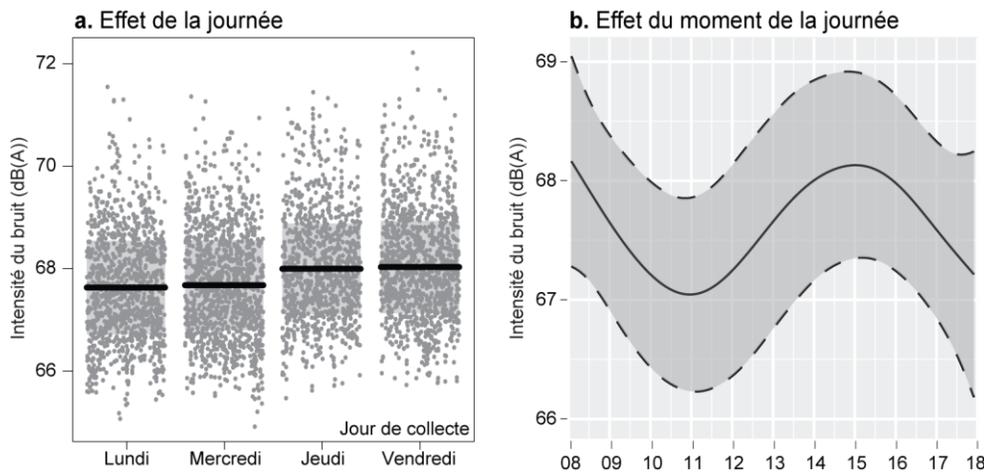


Figure 3.5 Effet de la journée et du moment de la journée sur l'exposition des cyclistes au bruit

Tableau 3.4 Résultats du modèle généralisé additif mixte avec terme autorégressif (GAMMAR)

Variable		Coef.	Erreur Std.	T	Pr(> T)
(Constante)		67,06	0,28	235,86	<0,001
Termes linéaires					
Nombre d'intersections rencontrées		-0,09	0,03	-2,85	0,004
Voie cyclable	Rue				
Aucune	Toutes les rues	Réf.	Réf.	Réf.	Réf.
Piste cyclable hors rue (à plus de 5 m d'une rue)	Aucune	-1,75	0,28	-6,25	<0,001
Piste cyclable hors rue (à moins de 5 m d'une rue)	Artérielle (pont Jacques-Cartier)	6,24	0,61	10,24	<0,001
	Artérielle (autre)	1,72	0,35	4,96	<0,001
	Collectrice	-0,57	0,40	-1,43	0,152
Piste cyclable sur rue	Locale	-0,55	0,61	-0,90	0,366
	Artérielle	1,37	0,34	4,10	<0,001
	Collectrice	0,12	0,35	0,34	0,734
Bande cyclable	Locale	-1,67	0,34	-4,88	<0,001
	Artérielle	1,74	0,42	4,14	<0,001
	Collectrice	0,47	0,35	1,33	0,184
Chaussée désignée	Locale	-1,39	0,37	-3,77	<0,001
	Collectrice	-0,73	0,42	-1,74	0,082
	Locale	-1,75	0,33	-5,35	<0,001
Termes non linéaires		edf*	Ref.df	F	Pr(> F)
s(Minutes depuis 07h00)		3,78	4,64	3,94	0,002
s(X, Y)		19,32	24,13	4,03	< 0,001
Effet aléatoire					
s(Jour de la semaine)		1,95	3,00	1,90	0,029

* edf (*effective degrees of freedom*) : degrés de liberté effectifs du terme non linéaire, ce qui représente l'ampleur de la non-linéarité de l'effet de la variable (Wood, 2011)

Troisièmement, l'effet spatial, soit la *spline* sur les coordonnées géographiques, est de loin le plus significatif (edf = 19,32; $p < 0,001$). Le patron spatial de l'exposition au bruit est cartographié à la Figure 3.6. Cette carte est générée dans R (R Core Team 2019) et habillée dans QGIS (QGIS Development Team 2020) en prédisant des valeurs de bruit pour des cellules de 100 mètres de côté du territoire à l'étude en fonction du modèle GAMMAR, après avoir figé toutes les autres variables indépendantes et soustrait la moyenne de bruit de l'ensemble du territoire. Elle représente donc l'effet marginal de l'espace sur l'exposition au bruit des cyclistes, une fois tous les autres facteurs contrôlés. En d'autres termes, cette figure ne représente pas une carte de concentration du bruit dans l'espace d'étude. Ce patron spatial peut plutôt être appréhendé comme une estimation du bruit environnemental résiduel qui a été capté par les sonomètres et qui présente une structure spatiale, mais non expliquée par les autres variables indépendantes

du modèle (Gelb et Apparicio 2019). Ainsi, toutes choses étant égales par ailleurs, les secteurs avec les niveaux d'exposition les plus forts sont situés dans les quartiers centraux, sur la Rive-Sud à Longueuil et près de l'aéroport dans l'ouest de l'île de Montréal. À l'inverse, les secteurs les moins bruyants sont localisés dans l'est de Longueuil, dans les extrémités est et ouest de l'île de Montréal, ainsi qu'au centre de Laval. Notons aussi que l'écart entre ces zones les plus et les moins bruyantes s'élève à 4 dB(A), ce qui correspond à une énergie sonore entre deux à trois fois plus grandes (Institut national de santé publique du Québec 2015, 14).

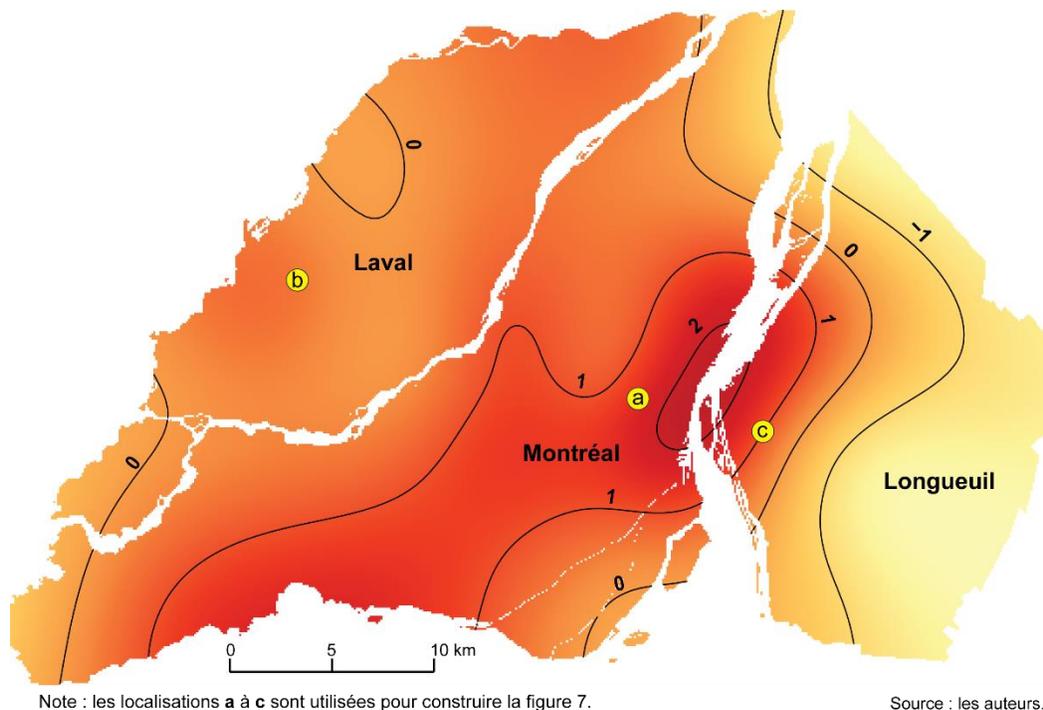


Figure 3.6 Effet spatial sur l'exposition des cyclistes au bruit en dB(A)

3.6.2.3 Les variables relatives au type d'axe emprunté : analyse des effets fixes

Le nombre d'intersections croisées durant un trajet d'une minute a un effet significatif, mais très limité ($-0,09$; $p = 0,004$). Par la suite, il est possible d'analyser l'effet de rouler sur chacune des combinaisons des types de voies cyclables et de rues. Pour ce faire, la catégorie de référence est le temps passé en minutes sur des rues sans voie cyclable.

Premièrement, lorsque les cyclistes empruntent des voies cyclables aménagées sur des rues locales, ils sont significativement moins exposés comparativement à des rues sans aménagement. Cette réduction s'observe davantage sur les chaussées désignées ($-1,75$) et les

pistes cyclables sur rue (-1,67) et dans une moindre mesure sur les bandes cyclables (-1,39). Par contre, rouler sur une piste cyclable hors rue à moins de cinq mètres d'une rue locale n'a étonnamment pas d'effet significatif sur l'exposition au bruit (-0,55; $p = 0,366$). Cela peut s'expliquer par la faible présence de cette combinaison dans le jeu de données ($n = 63$, voir Tableau 3.1).

Deuxièmement, lorsque les cyclistes roulent sur des voies cyclables aménagées sur des rues collectrices, les niveaux d'exposition ne sont pas significativement différents de ceux mesurés lorsqu'ils empruntent des rues sans aménagement cyclable.

Troisièmement, circuler sur des voies cyclables sur ou à proximité de rues artérielles fait significativement augmenter les niveaux d'exposition au bruit, et ce, particulièrement sur les bandes cyclables (1,74), sur les pistes hors rue à moins de cinq mètres d'une rue artérielle (1,72) et dans une moindre mesure, sur les pistes sur rue (1,37). Cet effet est d'autant plus marqué sur la piste cyclable du pont Jacques-Cartier : l'exposition au bruit est supérieure de 6,24 dB(A) par rapport aux rues sans voie cyclable.

Enfin, sur les pistes cyclables hors rue situées à plus de cinq mètres d'une rue, les cyclistes ont été exposés à 1,75 dB(A) de moins que la moyenne des rues sans voie cyclable, soit un effet similaire à celui de circuler sur une chaussée désignée de rue locale (-1,75).

3.7 Discussion

3.7.1 L'apport des modèles généralisés additifs mixtes pour la modélisation de l'exposition des cyclistes au bruit

Les résultats du modèle GAMMAR apportent plusieurs éclairages intéressants, tant du point de vue méthodologique qu'en termes de planification. D'abord, à l'instar des travaux de Gelb et Apparicio (2019), notre modèle GAMMAR a permis de mettre en évidence les variations non linéaires du bruit à la fois au fil de la journée et dans l'espace (effet temporel et patron spatial), ce qu'un modèle classique de régression ne permet pas de réaliser. On a démontré ainsi que les niveaux d'exposition au bruit sont plus importants lors des périodes de pointe du matin et du soir. Concernant le patron spatial, les secteurs où le bruit est plus élevé toutes choses étant égales par ailleurs correspondent aux endroits où les parts modales des cyclistes sont les plus élevées

(Figure 3.1), ce qui est préoccupant. Cela signifie que les planificateurs devraient porter une attention d'autant plus grande dans les arrondissements centraux des villes de Montréal et de Longueuil.

Concernant l'effet de la journée, nous avons montré que celles en début de semaine étaient moins bruyantes que celles en fin de cette semaine. Bien sûr, ce constat est valable uniquement pour la période de collecte et ne peut pas être généralisé à l'ensemble des semaines de l'année. Par contre, cela souligne la nécessité de contrôler l'effet de la journée dans un modèle d'exposition au bruit (ou à la pollution atmosphérique), afin d'obtenir des coefficients plus robustes pour les effets fixes.

3.7.2 Positionnement des résultats et implications pour la planification

3.7.2.1 Niveaux moyens d'exposition au bruit

Comparativement aux trois dernières études réalisées à Montréal (Apparicio et al. 2016 ; Apparicio et Gelb 2020 ; Apparicio et al. 2018), les niveaux de bruit mesurés sont plus faibles (moyennes arithmétiques de 70,5, 68,8 et 70,7 dB[A] *versus* 67,1 pour Montréal dans cette étude), ce qui n'est pas surprenant. La première (2016) portait sur les quartiers centraux où le patron spatial de notre modèle GAMMAR a confirmé des niveaux de bruit résiduels plus élevés. La seconde (2018) exploitait des trajets en heure de pointe, ce qui corrobore nos résultats de la *spline* temporelle. Enfin, à la différence de la troisième étude (Apparicio et Gelb 2020) qui portait sur tous les types d'axes à Montréal, la présente étude se concentre sur les voies cyclables, soit un jeu de données comptant beaucoup d'observations à des endroits peu bruyants (notamment des pistes hors rue).

Durant cette collecte de données qui s'est déroulée durant plus de 72 heures, les participants ont été exposés à des niveaux de bruit supérieurs à 65 dB(A) – le seuil retenu par le Ministère des Transports (1998) pour une exposition sur 24h – près des deux tiers du temps. Cela confirme que la dimension du bruit devrait être prise en compte lors de la planification des futures voies cyclables. Cet enjeu est d'ailleurs aussi important à Montréal, Laval et Longueuil, puisque les différences entre les moyennes d'exposition pour ces trois sous-territoires, bien que significatives, sont relativement faibles. Rappelons que malgré les niveaux d'exposition au bruit mesurés, à

Montréal comme dans la quasi-totalité des villes occidentales, les bénéfices de la pratique du vélo en ville surclassent très largement les risques (De Hartog et al. 2010).

3.7.2.2 Doses de bruit et effets potentiels pour la santé des cyclistes

Les niveaux de bruit mesurés durant la collecte sont-ils pour autant dommageables pour la santé des cyclistes ? Pour répondre à cette question, nous retenons les deux seuils pour le bruit routier rapportés par l'OMS pour une exposition de 24h (L_{den}) (World Health Organization 2018a) : 53,3 dB(A) – seuil auquel 10% de la population est fortement dérangé – et 59,3 dB(A) – seuil associé à une augmentation de 5% du risque relatif de l'incidence de maladies cardiaques ischémiques. Il n'est toutefois pas possible de comparer directement des valeurs moyennes de bruit sur une minute ($L_{Aeq, 1\ min}$) avec des valeurs moyennes journalières (L_{den}). Nous proposons alors de comparer ces valeurs en termes de dose à partir de l'équation proposée par Berger (2003, 189-190) :

$$D = \frac{100}{T_c} T_i 10^{\left(\frac{L_i - L_c}{q}\right)} \quad (3.1)$$

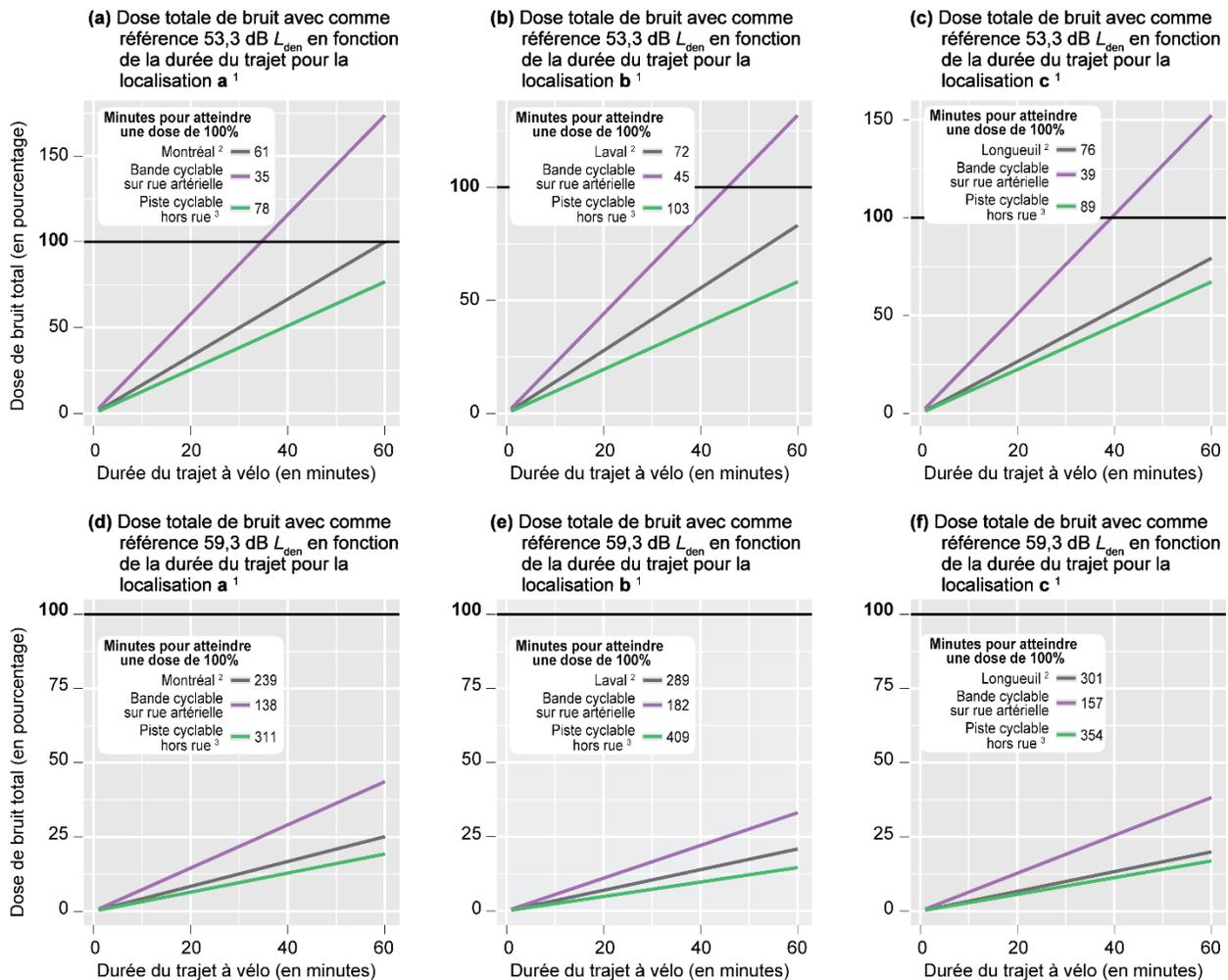
où D est la dose totale de bruit (en pourcentage), L_c est la valeur de bruit de référence (53,3 dB[A] par exemple) pour une durée T_c (24 heures par exemple), L_i est la valeur d'exposition mesurée durant une période T_i et q est le paramètre du taux d'échange (10 pour un taux d'échange de 3 dB).

Premièrement, cet exercice de comparaison est réalisé pour chacune des trois régions – Montréal, Laval, Longueuil –, en retenant leurs moyennes arithmétiques de bruit (67,1, 66,3 et 66,1 dB[A], voir les lignes grises à la Figure 3.7). Puis, nous avons sélectionné trois localisations : l'une dans l'arrondissement du Plateau-Mont-Royal (effet de l'espace de +1,510 dB[A]), l'autre à Laval (effet de l'espace de +0,478 dB[A]), et la dernière à Longueuil (effet de l'espace de +0,974 dB[A]) (voir la Figure 3.6). Pour ces trois localisations, nous avons prédit la dose de bruit à partir des résultats du modèle GAMMAR, et ce, à 9h du matin pour les types d'axes présentant les niveaux de bruit les plus élevés ou faibles (bande cyclable sur une rue artérielle et piste cyclable hors rue à plus de cinq mètres d'une rue).

À partir de ces estimations, on peut en conclure qu'un cycliste atteindrait en moyenne 100% de la dose 53,3 dB(A) L_{den} après avoir circulé 61 minutes à Montréal, contre 72 et 76 à Laval et

Longueuil (Figure 3.7). Bien entendu, cette situation varie en fonction du type d'axe emprunté. En effet, si un cycliste circule uniquement sur des bandes cyclables sur une rue artérielle, il atteindrait la dose de 100% beaucoup plus rapidement : 35, 45 et 39 minutes aux localisations a, b et c contre 78, 103 et 89 minutes sur une piste cyclable hors rue à plus de 5 m d'une rue. Sans surprise, avec une valeur de référence de 59,3 dB(A) L_{den} , il est très peu probable qu'un cycliste atteigne la dose de 100% dans les trois régions et pour les trois localisations, quel que soit le type d'axe emprunté.

Ces résultats démontrent qu'il est très peu probable que l'exposition au bruit des cyclistes utilitaires puisse être dommageable pour leur santé à Montréal, Laval et Longueuil. Par contre, une proportion non négligeable des cyclistes pourrait être fortement incommodée par le bruit, particulièrement sur les voies cyclables aménagées sur des rues artérielles. Aussi, cela pourrait avoir comme effet de dissuader certaines personnes à privilégier le vélo lors de leurs déplacements utilitaires.



¹ Voir les localisations a, b, c à la figure 6. ² Pour les régions de Montréal, Laval et Longueuil, les doses sont calculées avec les valeurs de leurs moyennes arithmétiques de 67,1, 66,3 et 66,1 dB(A) (voir tableau 3). ³ Piste cyclable hors rue à plus de 5 m d'une rue.

Figure 3.7 Doses de bruit des cyclistes en fonction de la région et du type d'axe emprunté

3.7.2.3 Différences entre les types de voies cyclables

Il convient ensuite de discuter d'un résultat qui peut sembler contre-intuitif : les cyclistes circulant sur une piste cyclable hors rue à moins de cinq mètres d'une artère sont plus exposés au bruit que lorsqu'ils empruntent une piste cyclable sur rue ou une bande cyclable aménagée sur une artère, qui placent pourtant le cycliste bien plus à proximité du trafic. Bien entendu, rien ne laisse croire que les pistes cyclables hors rue, par leur configuration physique, protègent moins les cyclistes du bruit. Cependant, il est probable que les pistes hors rue – beaucoup plus lourdes à aménager et offrant une meilleure protection physique des véhicules – soient aménagées en

priorité sur les routes à grand débit de circulation, là où l'espace est disponible et où la cohabitation avec les véhicules motorisés serait autrement plus difficile.

De la même manière, les chaussées désignées sur une rue locale exposent les cyclistes à moins de bruit que les bandes cyclables et les pistes sur rue. Habituellement, les chaussées désignées sont aménagées sur des voies de circulation ayant un faible débit de voitures et de véhicules lourds (Fortier, Lesage et Bégin 2009, 22) ; cela pourrait alors expliquer une plus faible exposition.

La piste cyclable du pont Jacques-Cartier est un cas à part. Lors de la collecte, l'emprunter a eu pour effet d'augmenter de 6,2 dB(A) l'exposition au bruit, ce qui correspond à une énergie sonore environ quatre fois plus grande que sur une rue sans voie cyclable (Fortier, Lesage et Bégin 2009, 14). Puisqu'elles sont des liens cyclables nécessaires et difficilement aménageables ailleurs, il ne s'agit pas ici de décourager la construction et l'utilisation de pistes cyclables sur les ponts à caractère autoroutier. On doit plutôt tenir compte de ces résultats pour protéger les pistes existantes et futures du bruit routier. Par exemple, King, Murphy et McNabola (2009) ont mesuré une réduction de 6 dB(A) de l'exposition de piétons marchant sur une promenade protégée par un écran antibruit en comparaison avec le trottoir adjacent à la route.

3.7.2.4 L'importance de la localisation des voies cyclables

Dans l'étude d'Apparicio et al. (2016), les niveaux mesurés sur des bandes cyclables et sur des chaussées désignées n'étaient pas significativement différents de ceux mesurés sur des rues collectrices. Nos résultats confirment ce constat, tout en le raffinant. Sur des rues collectrices, peu importe le type de voie cyclable, les niveaux de bruit sont similaires. Cependant, lorsqu'on distingue les types de routes, on constate que les niveaux varient énormément : on note clairement une augmentation des niveaux de bruit lorsque les trajets sont réalisés sur une rue artérielle plutôt que sur une rue collectrice, et plus encore sur une rue locale. Ces résultats corroborent d'ailleurs ceux de Minet et al. (2018) qui concluent que la distance à l'artère majeure la plus proche réduit significativement l'exposition au bruit des cyclistes à Toronto, et que les niveaux de bruit les plus faibles se trouvent sur les rues locales et les pistes hors rue. Cela démontre ainsi que c'est plutôt le type de route à proximité de laquelle ou sur laquelle on circule qui influence le plus l'exposition au bruit. Autrement dit, aménager une nouvelle voie cyclable sur une artère majeure risque d'augmenter l'exposition des cyclistes au bruit, à moins qu'elle ne s'accompagne de mesures d'apaisement de la circulation (réduction du débit et de la vitesse des

véhicules motorisés). Ces résultats se conjuguent très bien aux études sur les motivations des cyclistes : ces derniers sont en général encouragés par la présence de voies cyclables protégées (Winters et al. 2011) – lesquelles sont plus sécuritaires (Teschke et al. 2012) – et découragés par les environnements sonores et pollués. Pour favoriser le plus possible la pratique du vélo, et pour minimiser ses risques pour la santé (collisions, exposition au bruit, etc.), on a donc tout intérêt à ce que les prochaines voies cyclables soient à la fois protégées physiquement du trafic et à l'écart des environnements bruyants et pollués.

3.7.2.5 Référents d'ici et d'ailleurs

Un exemple probant d'hybride entre la voie cyclable protégée de grande artère et la chaussée désignée de rue locale est le réseau des *quietways* à Londres, qui a été planifié en ayant pour objectif de faire circuler les cyclistes dans des environnements sonores paisibles (Mayor of London 2018), en utilisant des obstacles physiques pour décourager la circulation automobile. Le principe des *bicycle boulevards* à Portland (Oregon) est similaire : il s'agit de faciliter le passage des cyclistes le long de rues résidentielles où la circulation véhiculaire est découragée à l'aide de mesures d'apaisement de la circulation et de perméabilité filtrée (intersections fermées aux automobilistes, mais ouvertes aux cyclistes et piétons) (Walker et al. 2009). Ce type d'initiative se trouve un peu sur Le Plateau-Mont-Royal, lorsque le trafic est redirigé vers les artères majeures pour éviter que les voitures utilisent les rues locales comme voies de transit, tout en permettant aux cyclistes de passer. La vélorue Saint-André semble être la première initiative formelle de ce genre (Radio-Canada 2018).

3.8 Conclusion

En somme, le type de voie cyclable ne semble pas avoir d'influence sur l'exposition des cyclistes au bruit. C'est plutôt le type de route à proximité de laquelle ou sur laquelle les cyclistes circulent qui fait varier les niveaux de bruit. Par conséquent, la tendance à construire les voies cyclables protégées à proximité ou sur les grandes artères sans mesure d'apaisement de la circulation doit être renversée si les planificateurs souhaitent diminuer l'exposition des cyclistes au bruit.

Le bruit n'est pas le seul élément négatif auquel s'exposent les cyclistes. La pollution de l'air, la sécurité des déplacements, l'état de la chaussée, pour ne nommer que celles-ci, sont d'autres

dimensions dont il faudrait tenir compte pour planifier un réseau cyclable propice à la pratique du vélo utilitaire dans des conditions favorables à la santé. Prévoir plus de voies cyclables évitant la cohabitation avec les véhicules motorisés – souvent impliqués dans les collisions et générateurs de bruit et de pollution atmosphérique – apparaît comme une solution à ces enjeux. C'est d'ailleurs l'approche que semblent privilégier les Pays-Bas, avec le succès qu'on leur connaît.

Pour conclure, la planification des voies cyclables est un enjeu complexe auquel doivent faire face les municipalités. Loin de nous l'idée de jeter la pierre aux planificateurs : ils doivent composer avec de nombreuses contraintes techniques (état des réseaux viaire et d'aqueduc, etc.) et sociales (résistance de la part de certains commerçants et automobilistes, etc.). À l'instar de travaux récents (Larsen, Patterson et El-Geneidy 2013 ; Su et al. 2010 ; Winters et al. 2013), la création d'indicateurs et d'outils facilitant l'évaluation multidimensionnelle de la qualité des voies cyclables et aidant à la planification du développement des réseaux, devrait faire l'objet de travaux ultérieurs rapidement, et ce d'autant plus que plusieurs villes canadiennes souhaitent étendre leurs réseaux cyclables.

Remerciements

Les auteurs remercient Jérémy Gelb, les évaluateurs et évaluatrices et Marie-Hélène Vandersmissen (rédactrice de la revue) pour leurs commentaires et suggestions sur la première version du manuscrit. Aussi, nous tenons à remercier les étudiants du Centre Urbanisation Culture Société de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) impliqués dans la collecte de données ; vous êtes de bons cyclistes avec de bonnes jambes ! Cette recherche a bénéficié du soutien financier de la Chaire de recherche du Canada sur l'équité environnementale et la Ville (950-230813) et a été approuvée par le Comité d'éthique de l'INRS (No CER-15-391).

CHAPITRE 4 : RISQUE DE CONFLIT ET TYPES DE VOIE CYCLABLE

Formulaire d'inclusion d'un article au mémoire de maîtrise

1. Identification de l'étudiant

Nom, Prénom : Jarry, Vincent

2. Description de l'article

Titre : Ride in Peace: How Cycling Infrastructure Types Affect Traffic Conflict Occurrence in Montréal, Canada

Nom des auteur·e·s: Vincent Jarry et Philippe Apparicio

Revue avec comité de lecture : Safety (MDPI)

État du cheminement : Publié date de publication : 9 septembre 2021

Sous presse

Accepté moyennant modifications

Soumis

Résumé* Le vélo en ville, de plus en plus populaire en Amérique du Nord, a le potentiel de réduire la congestion, la pollution de l'air et le bruit, tout en améliorant la santé de la population. Par contre, l'insécurité est souvent citée par des cyclistes potentiel·le·s comme étant le principal frein à la pratique du vélo. Cet article vise à évaluer l'effet du type de voie cyclable empruntée sur la probabilité de vivre un conflit. Quatre participant·e·s ont produit, à vélo, un total de 87 heures (1 199 km) de vidéo, qui ont par la suite été visionnées par des compteurs pour identifier et caractériser les conflits de circulation. Les 465 conflits relevés avec un véhicule et 209 conflits relevés avec un·e piéton·ne ont par la suite servi à construire des modèles généralisés additifs logistiques (GAM) répliqués aléatoirement (*bootstrap*). On constate que si circuler sur une piste cyclable hors rue réduit significativement la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule, cela augmente à l'inverse la probabilité de vivre un conflit avec un·e piéton·ne. Les bandes cyclables sont associées à une augmentation de la probabilité de conflit avec véhicule. La planification des réseaux cyclables devrait favoriser le développement d'infrastructures cyclables séparées physiquement et clairement identifiées.

* Si l'article est écrit dans une autre langue que le français, veuillez inclure également un résumé en français.

3. Contribution de chaque coauteur·e

Pour un article à plusieurs auteur·e·s, veuillez détailler la contribution de chacun.

Identification du coauteur·e	Description de la contribution
Vincent Jarry	Revue de littérature, collecte et structuration des données, identification des conflits, analyses statistiques dans R, structuration et rédaction de l'article.
Philippe Apparicio (directeur)	Collecte et révision des données, participation active à la structuration et aux analyses statistiques dans R, nombreuses révisions de l'article.

4. Déclaration

À titre de coauteur·e de l'article mentionné ci-haut, j'autorise Vincent Jarry à intégrer l'article dans son mémoire de maîtrise.

Coauteur·e	Signature	Date
Vincent Jarry		2021-06-17
Philippe Apparicio		2021-06-17

Titre : Ride in Peace: How Cycling Infrastructure Types Affect Traffic Conflict Occurrence in Montréal, Canada

Revue : Safety (MDPI)

Auteurs et affiliations :

Vincent Jarry
Centre Urbanisation Culture Société
Institut national de la recherche scientifique

Philippe Apparicio
Centre Urbanisation Culture Société
Institut national de la recherche scientifique

Adresse de correspondance :

Philippe Apparicio
Laboratoire d'équité environnementale
Centre Urbanisation Culture Société
Institut national de la recherche scientifique
385 rue Sherbrooke Est
Montréal QC H2X 1E3 Canada
philippe.apparicio@ucs.inrs.ca

Référence complète de l'article :

Jarry, Vincent et Philippe Apparicio (2021). *Ride in Peace: How Cycling Infrastructure Types Affect Traffic Conflict Occurrence in Montréal, Canada*. *Safety*, 7(3): 1-17,
<https://doi.org/10.3390/safety7030063>

Ride in Peace: How Cycling Infrastructure Types Affect Traffic Conflict Occurrence in Montréal, Canada

Urban cycling is increasingly common in many North American cities, and has the potential to address key challenges of urban mobility, congestion, air pollution and health. However, lack of safety is often cited by potential bike users as the most important deterrent to cycling. This study aims to evaluate the effect of cycling facility type on traffic conflict likelihood. Four participants recorded a total of 87 hours (1199 km) of video, which was reviewed by trained observers to identify and characterize traffic conflicts, yielding 465 conflicts with vehicles and 209 conflicts with pedestrians. Bootstrapped generalized additive logit regressions (GAM) were built to predict traffic conflict likelihood. Results show that while cycling on an off-street bike path effectively reduces the likelihood of conflict with a vehicle, it increases the probability of conflict with a pedestrian. Bike lanes were associated with an increase in the likelihood of a conflict with a vehicle. Decision makers should favor physically segregated and clearly marked cyclist-only facilities, to ensure safe and efficient conditions to commuter cyclists.

Keywords: traffic conflicts; quasinaturalistic cycling study; cycleways; cycling facilities; cycling safety; generalized additive model (GAM)

4.1 Introduction

While improving their individual health and reducing traffic and pollution, urban cyclists are vulnerable to many risks, such as air pollution and noise exposure, as well as injuries from collisions with other road users (Bassett et al. 2008 ; Oja et al. 2011 ; Rojas-Rueda et al. 2011 ; Dons et al. 2018 ; De Hartog et al. 2010 ; Garrard, Rissel et Bauman 2012). In the midst of an “urban cycling renaissance” in many North American cities, great attention is dedicated to improving cycling conditions (Pucher, Buehler et Seinen 2011). Lack of safety is one of the most common deterrents identified by potential bicycle users (Winters et al. 2011). Usual methods to evaluate safety include police-declared collisions and hospital admissions databases (Reynolds et al. 2009). However, these studies often suffer from underreporting bias, since most minor injuries and crashes are not reported to authorities (Tin Tin, Woodward et Ameratunga 2013).

Surrogate safety measures were developed to counteract the limitations inherent to crash and injury study designs. With traffic conflict analysis, it is possible to study interactions between road users and characterize them as normal or conflictual (Stipancic et al. 2016). Conflicts are conceptually close to collisions: they are defined as “an interaction between a bicyclist and another road user such that at least one of the parties has to change speed or direction to avoid a collision” (Reynolds et al. 2009, 4). Studying conflicts is proactive rather than reactive, which means that it does not rely on a crash to actually happen in order to conduct the study (Stipancic et al. 2016). Furthermore, noncollision safety events (conflicts), ranging from right-of-way encroachments to near-miss experiences, are known to play an important role in cycling motivation and perceived traffic risk (Sener, Eluru et Bhat 2009 ; Sanders 2015 ; Janeth et al. 2012); sometimes even more than collisions, since the former are far more frequent than the latter. Though traffic conflict analysis was mostly developed for car driving studies since the 1970s, its use to study cyclist interactions is increasing (van der Horst et al. 2014).

Methods to study traffic conflicts include fixed site observation (van der Horst et al. 2014 ; Włodarek et Olszewski 2019 ; Stipancic et al. 2016 ; Miranda-Moreno, Strauss et Morency 2011) and naturalistic cycling studies using instrumented bicycles (Dozza et Werneke 2014 ; Petzoldt et al. 2017 ; Johnson et al. 2010 ; Hamann et Peek-Asa 2017 ; Gustafsson et Archer 2013). Fixed-site observation with video camera offers an omniscient view on the interactions between the road users, thus allowing researchers to compute many traffic conflict indicators, such as postencroachment time (PET) and time-to-collision (TTC) (Stipancic et al. 2016 ; van der Horst et

al. 2014 ; Włodarek et Olszewski 2019). On the other hand, naturalistic cycling studies (or more generally, mobile data collections) offer the potential to cover a broad territory and a wide variety of urban contexts (Dozza et Werneke 2014 ; Gadsby et Watkins 2020).

4.1.1 Cycling Risk and Protection Factors

Factors influencing cycling safety are both individual and contextual. Individual factors are those specific to every cyclist. Some studies have shown that male cyclists are less likely to experience conflicts and collisions than their female counterparts are (Stipancic et al. 2016 ; Vilaça, Macedo et Coelho 2019). Level of cycling experience may also play a role in the ability to maneuver in complex cycling conditions (Stipancic et al. 2016 ; Hamann et Peek-Asa 2017). Older cyclists and cyclists that do not wear reflective clothing are more likely to experience severe injury or fatality (Chen et Shen 2016). When approaching at a higher speed, a cyclist risks experiencing a more severe conflict than when riding at a lower speed (Stipancic et al. 2016).

Contextual factors apply to every cyclist in a given environment. For example, in Valencia, it was found that bus stops were pedestrian conflict hotspots along a protected cycle track corridor (passengers either crossing the cycle track to enter or exit the bus, or standing in the cycle track waiting for the next departure) (Angel-Domenech et al. 2014). Riding on a slope can lead to an increase in crash or conflict occurrence and severity (Carvajal et al. 2020 ; Harris et al. 2013 ; Jestico et al. 2017 ; Reynolds et al. 2009). Time of day, day of the week and geographical position can also affect traffic risks for cyclists, since traffic conditions vary greatly across time (Carvajal et al. 2020 ; Hamann et Peek-Asa 2017 ; Harris et al. 2013 ; Gustafsson et Archer 2013) and space (Yiannakoulias, Bennet et Scott 2012 ; Rahman et al. 2019 ; Gustafsson et Archer 2013). Intersections are natural conflict and collision hotspots (Carvajal et al. 2020 ; Dozza et Werneke 2014 ; Gadsby et Watkins 2020 ; Gustafsson et Archer 2013 ; Hamann et Peek-Asa 2017 ; Harris et al. 2013 ; Jestico et al. 2017). Uneven or poorly maintained road surfaces can lead to crashes and conflicts (Carvajal et al. 2020 ; Dozza et González 2013 ; Gadsby et Watkins 2020 ; Gustafsson et Archer 2013).

Among contextual factors, those concerning the built environment, and more specifically, cycling facility type, are those upon which urban planners have the greatest leverage. It is generally accepted that bicycle-specific infrastructure has a protective effect on cyclists' safety (Reynolds et al. 2009 ; Teschke et al. 2012 ; Carvajal et al. 2020 ; Gustafsson et Archer 2013 ; Gadsby et

Watkins 2020 ; Hamann et Peek-Asa 2017 ; Harris et al. 2013). For example, in Montréal, it was found that relative risk of injury was lower on cycle tracks (on-street bicycle paths with physical protection) than on comparable reference streets without cycling facility (Lusk et al. 2011). However, this protective effect may not be consistent across all bicycle facility types. Harris et al. (2013) found that cycle tracks reduced the risk of injury, however, the same was not true for multi-use trails, bike lanes and shared lanes. In Vancouver, safety-relevant incidents were more common at intersections between a multi-use trail and roads than at reference intersections between two roads without bicycle-specific infrastructure (Jestico et al. 2017). Surprisingly, another study found a higher rate of safety-critical events when riding on a cycleway than when riding on a road without bicycle-specific treatment (Schleinitz et al. 2015). This apparent contradiction may be due to the relatively broad definition of bicycle infrastructure, which is not consistent from one study to another and from one jurisdiction to another. Incidentally, this calls for novel research and replication of existing study designs to disentangle the effects of the many bicycle-specific facility types on cyclists' safety (Reynolds et al. 2009 ; Carvajal et al. 2020).

4.1.2 Research Objectives

Although our understanding of contextual factors influencing cycling safety is improving, many variables remain underexplored. The effects of time and space on conflict occurrence have not yet been included as nonlinear effects in logit models. Many naturalistic cycling studies have been conducted in European settings (Angel-Domenech et al. 2014 ; Dozza et Werneke 2014 ; Gustafsson et Archer 2013 ; Schleinitz et al. 2015), however, to date, we have not found published results of such studies set in Canadian context, where urban fabric and road geometries are very different. More importantly, cycling infrastructure's effect on safety has been evaluated in a variety of ways, but in many occasions category definitions were too broad, and the interaction between cycleway and road types is yet to be tested. Consequently, the aim of this paper is to evaluate cycleway and road types' combined effect on conflict occurrence with vehicles and with pedestrians, after controlling for individual and contextual factors.

4.2 Materials and Methods

4.2.1 Study Area: Montréal Agglomeration

The Montréal agglomeration (2 million inhabitants in 2020) offers a unique case study, as it features both segregated and nonsegregated cycleways (Pucher et Buehler 2005), which could be considered a hybrid between the American and European cycleway paradigms described by Furth (2012). Although the commuter cyclist mode share (2,5% of all trips to work) (Vélo Québec 2015) is humble in comparison to the European cycling capitals such as Amsterdam (21% of all trips to work) (Harms et Maarten 2018), Montréal is among the most bike-friendly cities in North America, with a large and growing cycling network (Houde, Apparicio et Séguin 2018) and a longstanding bike share service (Fuller et al. 2013). In this vein, Vancouver and Montréal are the only North American cities to belong to the Copenhagenize 2019 Index (Copenhagenize Design Co. 2019).

4.2.2 Data

4.2.2.1 Primary Data: an Extensive Mobile Data Collection

This paper relies on a quasinalistic study design to evaluate conflicts experienced by specially instructed cyclists. Four participants were involved in the mobile data collection: four graduate students in Urban Studies (three male and one female, respectively 25, 28, 29 and 36 years old), selected by convenience, in good shape and with moderate urban cycling experience (more than two years of regular utilitarian cycling). All subjects gave their informed consent for inclusion before they participated in the study. The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and the protocol was approved by the Ethics Committee of Institut national de la recherche scientifique (project no. CER 19-509).

All participants wore the same cycling jersey and rode similar bicycles (regular bikes similar to those used in other studies; Rocky Mountain RC 10 Performance, Vancouver, BC, Canada) provided by the research team. Bicycles were equipped with all the mandatory reflective pieces in the province of Québec (yellow reflectors facing forward and backward on both pedals, yellow reflectors facing sideways on both wheels, white reflector on handlebar facing forward and red

reflector on the seatpost facing backward) and cyclists wore a protective helmet (not required by law). Primary data was collected during daytime hours (8 a.m. to 6 p.m.), on six dry weather weekdays of June 2019, using an action camera mounted on the handlebar of the bicycle (Virb XE, Garmin International, Inc., Olathe, KS, USA) and a GPS watch on the cyclist's wrist (Forerunner 920 XT, Garmin International, Inc., Olathe, KS, USA).

The participants cycled alone on predefined routes during 87 hours and for a total of 1,199 kilometres. This extensive mobile data collection allows us to maximize spatial coverage of the study area and ensure a diversity of urban settings (Gelb et Apparicio 2021b). All data collection days started and ended at the university, thus allowing researchers to stay in touch with the participants, provide support when needed, and supervise the data acquisition process closely. Cyclists were instructed to abide by the common traffic rules, ride at a safe speed for an urban context (between 15 and 20 km/h) and divide their routes into 40 min segments to simplify data processing.

4.2.2.2 Secondary Data: Road and Cycleway Networks

The cycleway and street networks used in this study are those publicly available through the open data platform of the City of Montréal (Ville de Montréal 2020b, 2020a). For each network, types were grouped in order to have enough observations per category for bootstrapped statistical modelling (a minimum of 30 observations per category after undersampling, see Section 4.2.4.2). Grouped cycleway types correspond approximately to the four levels of cyclist separation presented by Furth (2012):

- *Shared lane*: regular street with no specific right-of-way for cyclists, designated by a 'sharrow' (bicycle marking) on the tarmac to identify recommended bike routes;
- *Bike lane*: one-way dedicated lane for cyclists, separated by roadway striping;
- *On-street bike path*: two-way cyclist-only right-of-way located on the road. In Montréal, 73% of these paths are physically separated from vehicles by bollards, a jersey, a median or a fence (Ville de Montréal 2020b);
- *Off-street bike path*: standalone path, in an independent right-of-way, dedicated to cyclists only (multiuse trail used by pedestrians and cyclists are excluded from the dataset).

Road types include:

- *Local street*: road with a volume of less than 3,000 vehicles per day (Ministère des Transports 2008), whose main function is access to residences (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2019).
- *Collector street*: road with a volume of more than 1,000 vehicles per day (Ministère des Transports 2008), which allows for transit on short distances, access to buildings of local importance, and links between local and arterial roads (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2019).
- *Arterial road*: large road with a volume of between 5,000 and 50,000 vehicles per day (Ministère des Transports 2008), that connects several neighborhoods together and allows for transit on relatively long distances (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2019).

Cycleway and road types are then coupled to create interaction variables (Figure 4.1).

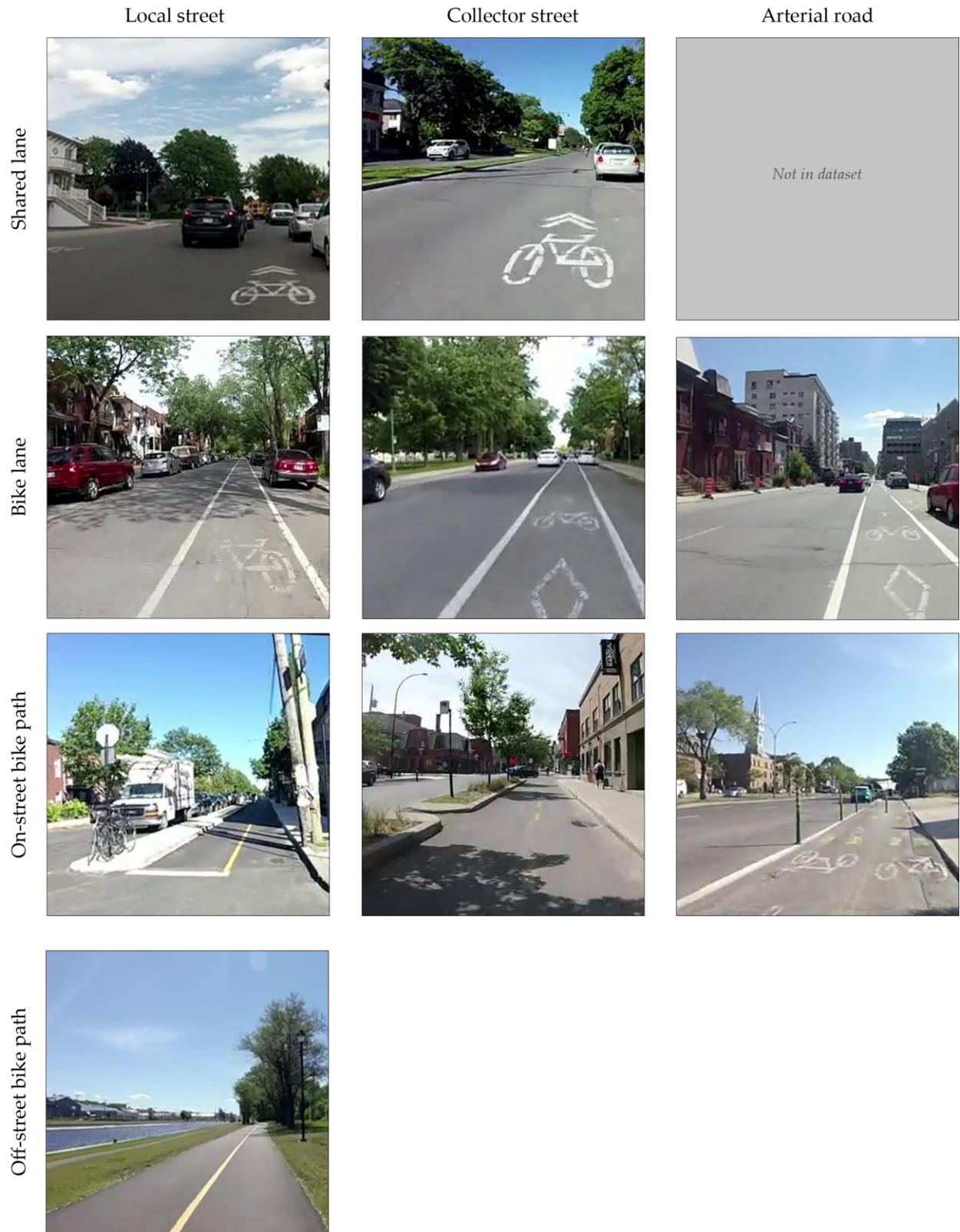


Figure 4.1 Cycleway and road types (interaction).
 Pictures taken from the video recordings of the handlebar camera.

4.2.3 Data Reduction and Validation

Each GPS point recorded by the watch was snapped to the nearest road link. The results were then validated by members of the research team using video clips, to ensure the most accurate cycleway and road type classification. Two independent trained observers reviewed every video file recorded by the cameras through Vifeco, an open-source software developed in-house that allows observers to annotate several features directly on videos (Apparicio, Maignan et Gelb 2021). Conflict counts were performed using an iterative approach to ensure data quality and consistency. First, using twenty-three videos, the two observers were trained together to identify conflictual interactions with a pedestrian or a motorized vehicle (according to the traffic conflict definition mentioned in the introduction). Second, each observer individually annotated the rest of the videos. Observers then watched together all the potential annotations to decide whether or not to include them in the final dataset.

Agreement between the annotations of the two independent observers reached 80%. Two factors could explain this apparently low rate. First, many nonsevere conflicts may be arduous to distinguish from normal driving maneuvers or courteous behaviors. Second, all videos were reviewed blindly by two observers, meaning that each observer did not have access to the annotations of their colleague. In comparison, far from undermining their results, other studies relied on a data reduction process done by only one video observer (Włodarek et Olszewski 2019 ; van der Horst et al. 2014) or by two video observers without reporting agreement statistics (Gustafsson et Archer 2013 ; Schleinitz et al. 2015). Subsequently, the two observers watched together the discordant events to decide whether or not to include them in the final dataset, consulting a third expert (second author) when needed.

Conflicts with pedestrians that occurred on multiuse trails (that is, where pedestrians are allowed to walk), conflicts caused by our participant, and conflicts that result from road users complying with traffic rules and signage (for example, legitimately parked cars) were excluded from the final dataset.

4.2.4 Data Analysis

4.2.4.1 Variables and Hypotheses

Data analysis was conducted in R version 4.0.3 (R Core Team 2020). First, conflict frequency (i.e., number of conflicts) and ratios per time and distance units were broken down by cycleway and road type. Second, using package 'mgcv' (Wood 2011), Generalized Additive Models (GAM) with logit distributions were fitted separately for vehicle and pedestrian conflict likelihood of occurrence as the outcome variable (i.e. likelihood of a conflict event to happen). Vehicle and pedestrian conflicts were separated for the analysis, since they represent very different threats to cyclists and are not likely to follow the same patterns.

Several control variables are included in the models as a means to obtain unbiased coefficients (Table 4.1). First, traffic conflict likelihood is influenced by many individual factors, such as level of cycling experience, age, gender, riding habits, etc. (Stipancic et al. 2016 ; Schleinitz et al. 2015), which could not all be included in our models for parsimony reasons and for lack of sufficient observations per category. Thus, participant ID is included as a way to account for individual variability among the four collectors. Second, the likelihood of conflict can differ from one day to another, since traffic conditions are known to vary throughout the week (Carvajal et al. 2020). The day of the week is thus introduced as a categorical linear effect. Third, we expect proximity to an intersection and to a bus stop to be positively associated with traffic conflict occurrence, as suggested by literature (Angel-Domenech et al. 2014 ; Hamann et Peek-Asa 2017). Fourth, likelihood of conflict could vary according to both time of day and space. We expect a greater number of traffic conflicts during peak traffic periods, namely, the morning and afternoon rush hours (Schleinitz et al. 2015 ; Włodarek et Olszewski 2019). Also, geographical position is likely to have a significant effect on traffic conflict occurrence, since many authors have shown that they are distributed in clusters rather than randomly (Rahman et al. 2019). Consequently, the time of day (number of minutes since 08:00) and geographical coordinates (X, Y) are introduced as splines (nonlinear effects). Fifth, as speed of participant increases, traffic conflict occurrence is likely to increase as well (Werneke, Dozza et Karlsson 2015). Furthermore, including it as a spline allows to test if this effect is linear or not. Readers should note that slope is not controlled specifically, as was done in some collision (Carvajal et al. 2020) and conflict (Petzoldt et al. 2017) studies. Terrain in Montréal is relatively flat, and geographical position is already included in the model, which should encompass some of the effect that slope could potentially have.

Table 4.1 Model specification

Type of variable	Variable	Family	Effect
Outcome	Pedestrian conflict occurrence	Binomial	-
	Vehicle conflict occurrence	Binomial	-
Control	Participant ID	Categorical	Linear
	Day of collection	Categorical	Linear
	Presence of an intersection within 15 metres	Binomial	Linear
	Presence of a bus stop within 15 metres	Binomial	Linear
	Time of day	Continuous	Smooth
	Geographical position	Continuous	Smooth
	Speed	Continuous	Smooth
Predictor	Cycleway and road type (interaction)	Categorical	Linear

After controlling these factors, we expected cycleway and road type to significantly affect traffic conflict likelihood. For both vehicle and pedestrian conflicts, we did not expect shared lanes and bike lanes to reduce conflict likelihood (Harris et al. 2013); in fact, bike lanes could even foster vehicle conflicts, as was noted by Beck et al. (2019) in a motor vehicle passing distance study. For vehicle conflicts, we expected on-street and off-street bike paths to reduce vehicle conflict likelihood (Lusk et al. 2011). However, we expected conflict likelihood with a pedestrian to be higher on off-street bike paths (Werneke, Dozza et Karlsson 2015 ; Angel-Domenech et al. 2014). Including road type as an interaction with cycleway type should reveal nuances in the associations between cycleway type and conflict likelihood. Indeed, one could reasonably expect a given cycling facility type to have a reduced protective effect when located on a street with more vehicular danger (i.e., an arterial road) than on a quieter street (i.e., a local street).

We did not include variables that directly evaluate vehicular traffic danger (such as traffic volumes and speeds and presence of heavy vehicles), even though they are known to increase conflict likelihood (Włodarek et Olszewski 2019). Real-time traffic indicators could be calculated using dynamic traffic counts on the videos captured by the handlebar camera, however, this process would add to the already labor-intensive video reviewing process. Nevertheless, as far as the models in this study are concerned, the temporal and spatial control variables as well as the road type interaction variable are likely to serve as proxies for vehicular traffic danger indicators.

4.2.4.2 Dataset Composition for Logit Modelling

Our dataset was composed of conflict events and baseline events, i.e., random points in the dataset where no conflict occurred (Dozza et Werneke 2014). In order to avoid the class imbalance

problem in our dataset (very large number of baseline events in comparison to conflict events), we used a resampling technique of undersampling (reducing the number of baseline events, for it to correspond to approximately two times the number of conflict events) (Dozza et Werneke 2014 ; Vilaça, Macedo et Coelho 2019). In other words, first, two datasets were produced: one with vehicle conflicts, and one with pedestrian conflicts. Then, to these two separate datasets, we appended a certain number of baseline events, corresponding to twice the number of conflicts, randomly drawn from the rest of the dataset. One problem with this sampling method is the risk of randomly selecting a nonrepresentative sample of baseline events, hence introducing bias in the estimation of the model parameters. To overcome this problem, we bootstrapped the sampling and model fitting process (1,000 iterations), and then extracted mean and percentiles (2.5 and 97.5%, to form a 95% confidence interval) from the parameters (i.e. coefficients, fit statistics, etc.). Reported model results are, thus, distributions of parameters, rather than a single estimate for each predictor. Interpretation is, however, similar to that of a regular logit model, in the sense that predictors are considered significant when their odds-ratio upper and lower confidence interval limits are both greater or less than 1.

4.3 Results

4.3.1 Exploratory Data Analysis

This study relies on 5208 minutes of on-street and off-street cycling, for a total of 1199 km (Table 4.2). Most of the riding took place in the central districts, nevertheless, the data collection covers the whole island of Montréal (Figure 4.2). Video reviewers identified 465 conflicts with vehicles and 209 conflicts with pedestrians. For the major part, cyclists rode on regular streets without cycling facility (3213 min, 61.7%). The most frequent cycling facility type taken by the participants is the off-street bike path (541 min, 10.4%).

For vehicle conflicts, on nonprotected cycling facilities (shared lane and bike lane), we measured rates ranging from 4.0 conflicts per 60 min for a shared lane on a local street, to 13.0 conflicts per 60 min for a bike lane on a collector street. These high rates contrast with those of on-street bike paths located on local streets (2.9 conflicts per 60 min), collector streets (3.0 conflicts per 60 min) and arterial roads (1.3 conflicts per 60 min). The picture is just as compelling for off-street bike paths: notwithstanding the participants' high exposure to this facility type (541 min, 10.4%), they experienced very few conflicts (13 conflicts, 2.8%), leading to the second lowest rate of conflicts

(1.4 conflicts per 60 min). Readers should note that although it may seem surprising to experience a conflict with a vehicle on an off-street facility, the situation may arise when cyclists are approaching a road intersection or a driveway entrance, for example.

Pedestrian conflict rates follow an opposite trend. Although most conflicts occurred on streets without cycling facility (82 conflicts; 39.2%), it is much less than one could have expected if conflict occurrence corresponded with exposure (3,213 min, 61.7%). Nonprotected facilities (shared lanes and bike lanes) display low rates of pedestrian conflicts. The most eloquent example is the shared lane on a collector street: cyclists from our data collection only experienced 1.1 conflict per 60 min. On-street bike paths have much higher rates of conflicts with pedestrians: on collector streets, cyclists from the data collection were subject to 6.1 conflicts per 60 min. While accounting for 10.4% of cyclists' total exposure in minutes, 29.2% of the conflicts with pedestrians took place on off-street bike paths, making it the infrastructure with the highest number of conflicts per 60 min (6.8 conflicts).

Table 4.2 Dataset description

Cycleway and road type ¹	Cyclists' exposure				Conflict frequency				Pedestrian			
	Minutes		Kilometres		Vehicle		per per				per per	
	n	%	n	%	n	%	60 min	100 km	n	%	60 min	100 km
01 Street without cycling facility (ref.)	3,213	61.7	791	66.0	290	62.4	5.4	36.7	82	39.2	1.5	10.4
02 Shared lane - Local street	286	5.5	70	5.8	19	4.1	4.0	27.1	11	5.3	2.3	15.7
03 Shared lane - Collector street	110	2.1	32	2.7	9	1.9	4.9	28.1	2	1.0	1.1	6.2
04 Bike lane - Local street	203	3.9	48	4.0	35	7.5	10.3	72.9	5	2.4	1.5	10.4
05 Bike lane - Collector street	254	4.9	57	4.8	55	11.8	13.0	96.5	10	4.8	2.4	17.5
06 Bike lane - Arterial road	174	3.3	29	2.4	28	6.0	9.7	96.6	4	1.9	1.4	13.8
07 On street bike path - Local street	103	2.0	18	1.5	5	1.1	2.9	27.8	6	2.9	3.5	33.3
08 On street bike path - Collector street	138	2.6	25	2.1	7	1.5	3.0	28.0	14	6.7	6.1	56.0
09 On street bike path - Arterial road	186	3.6	20	1.7	4	0.9	1.3	20.0	14	6.7	4.5	70.0
10 Off street bike path	541	10.4	109	9.1	13	2.8	1.4	11.9	61	29.2	6.8	56.0
Total	5,208	100.0	1,199	100.0	465	100.0	5.4	38.8	209	100.0	2.4	17.4

¹ Shared lane on arterial road, a very rare type, is absent from our dataset.

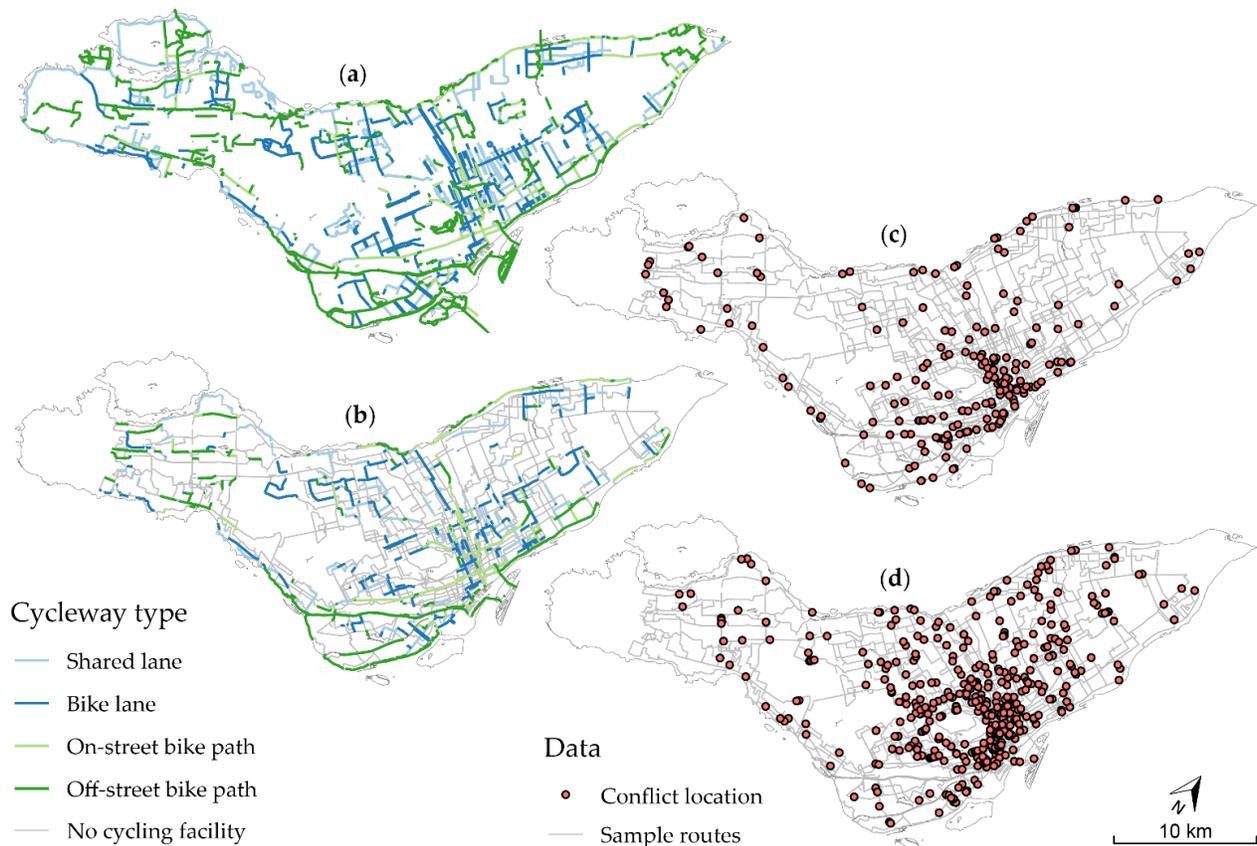


Figure 4.2 Secondary, primary, and processed data.

(a) Montréal's cycling network; (b) Mobile data collection (sample routes); (c) Pedestrian conflict locations; (d) Vehicle conflict locations

4.3.2 Model Results

Model results are reported in Table 4.3. Fit statistics show that the models explain only a small proportion of the total variance (Vehicle: $R^2=0.16$, CI [95%] = 0.14—0.19; Deviance explained=0.16, CI [95%] = 0.14—0.18. Pedestrian: $R^2=0.16$, CI [95%] = 0.12—0.20; Deviance explained=0.16, CI [95%] = 0.13—0.20). This reflects the fact that conflict likelihood depends upon a broad spectrum of factors that are not modelled here. However, these statistics do not undermine the ability of the models to reveal significant associations between cycleway type (predictor variable) and conflict likelihood (outcome variable), which is the main objective of this paper.

4.3.2.1 Control Variables

Participant and day of collection are significant for the vehicle and the pedestrian models. Proximity to an intersection and to a bus stop did not significantly influence likelihood of conflict during our collection, although one can notice that the odds-ratio of the intersection variable are almost significant for both models. Time of day is almost significant for the vehicle model, and geographical position is significant for both models, which means that conflict likelihood did follow nonlinear temporal and spatial trends during our data collection. Such results stress the importance of including these control variables when modelling traffic conflict likelihood, nevertheless, one must be careful with their interpretation. While having the potential to significantly influence traffic conflict likelihood, their results cannot be generalised beyond the scope of this data collection.

Although speed was initially included as a control variable in the model, it yields results worth analyzing by themselves (Figure 4.3). Below 10 km/h, speed is associated with a lower conflict likelihood. As speed increases, its risk-reducing effect evaporates, until conflict likelihood reaches a stability point, approximately at 15 km/h for the vehicle model and 20 km/h for the pedestrian model. Beyond these thresholds, conflict likelihood is constant and hovers around zero, which means that speed no longer has a significant effect. However, our results do not show the severity of the conflict, which is known to be associated with cyclist speed (Stipancic et al. 2016).

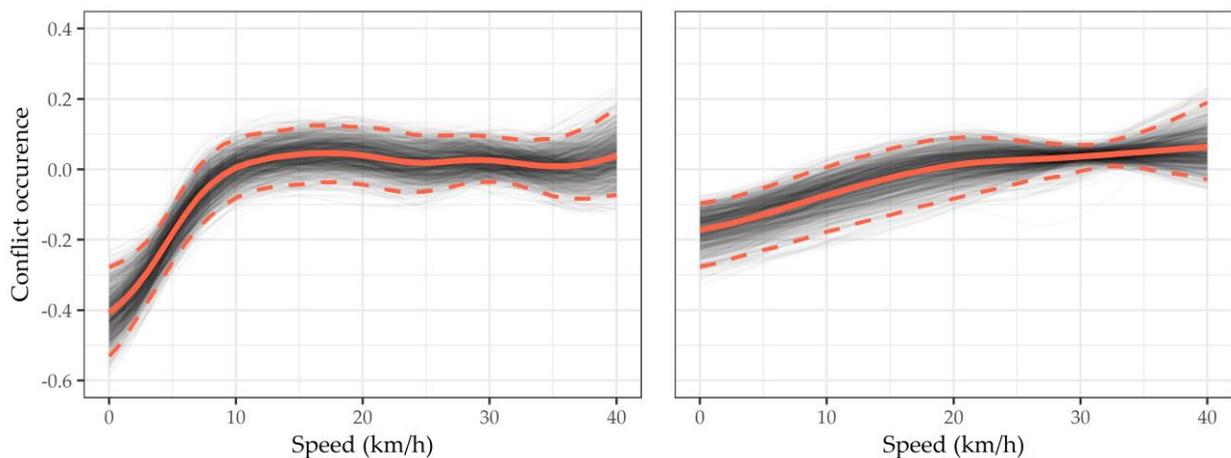


Figure 4.3 Cyclist speed's marginal effect on conflict occurrence with (a) a vehicle and (b) a pedestrian.

In other words, this graph depicts the independent contribution of cyclist's speed on the response variable (conflict occurrence, 0 – 1) centered on zero, once controlled for all the other independent variables. A negative conflict occurrence can thus be interpreted as a negative effect on the likelihood of conflict. The

solid red line represents the mean of all model splines, dashed red lines represent the confidence interval (95%), and the translucent black lines in the background represent each individual spline (n=1,000).

4.3.2.2 Vehicle Conflict Likelihood Predictors

Model results show that some, but not all, cycleway types significantly influence vehicle conflict likelihood (Table 4.3). Cycling on a shared lane had no significant effect on conflict likelihood. When located on a local (OR = 2.10; CI [95%] = 1.44—3.20) or a collector street (OR = 2.66; CI [95%] = 1.93—3.80), cyclists on a bike lane were more than twice as likely to experience a conflict with a vehicle than when cycling on a reference street without cycling facility. However, when the bike lane was located on an arterial road, that effect was not significant. On the other hand, cycling on an on-street bike path is associated with a significantly lower probability of conflict with a vehicle, no matter the type of street on which they are located: local street (OR = 0.50; CI [95%] = 0.30—0.99), collector street (OR = 0.44; CI [95%] = 0.28—0.70) and arterial road (OR = 0.19; CI [95%] = 0.12—0.33). Not surprisingly, the same is true for off-street bike paths (OR = 0.30; CI [95%] = 0.23—0.39).

4.3.2.3 Pedestrian Conflict Likelihood Predictors

Conflict likelihood with a pedestrian also varies according to infrastructure type (Table 4.3). Cycling on a shared lane on a local street (OR = 1.64; CI [95%] = 1.07—2.70) or on a bike lane on a collector street (OR = 1.64; CI [95%] = 1.04—2.94) has a slightly significant increasing effect on conflict likelihood. When located on other types of roads, this effect is not significant, meaning that the probability of experiencing a conflict with a pedestrian is no different on those facilities than on a reference street without cycling facility. On-street bike paths are associated with higher likelihoods of conflict: when located on a collector street (OR = 3.43; CI [95%] = 1.81—7.75) or on an arterial road (OR = 2.63; CI [95%] = 1.43—5.58), they expose cyclists to a probability of traffic conflict higher than the reference level. However, that effect is not significant when the on-street bike path is located on a local street. Off-street bike paths show an even greater association: when cycling on such facilities, cyclists from our data collection were 3.95 (CI [95%] = 2.75—6.12) times more likely to experience a conflict with a pedestrian than when cycling on a street without cycling facility (reference).

Table 4.3 Model results

Parameter	Vehicle			Pedestrian		
	Odds-Ratio (OR)			Odds-Ratio (OR)		
	Mean	CI (95%) ^a		Mean	CI (95%) ^a	
(Intercept)	0.58	0.47	0.71	0.42	0.31	0.60
Control variables						
<i>Linear terms</i>						
Participant 1	Ref.			Ref.		
Participant 2	0.70	0.56	0.90	0.75	0.54	1.04
Participant 3	0.90	0.72	1.16	0.55	0.39	0.79
Participant 4	0.91	0.73	1.13	0.70	0.49	1.01
Wednesday, June 12	Ref.			Ref.		
Monday, June 17	0.99	0.78	1.29	0.97	0.67	1.37
Tuesday, June 18	0.90	0.71	1.15	1.45	1.02	2.06
Wednesday, June 19	1.19	0.89	1.54	0.90	0.60	1.33
Friday, June 21	1.37	1.01	1.86	0.72	0.44	1.15
Intersection within 15m	1.12	0.93	1.33	1.28	0.97	1.67
Bus stop within 15m	1.04	0.82	1.36	0.68	0.47	1.01
<i>Smooth terms (splines)</i>						
Time of the day (edf ^b)	5.11	2.21	6.65	1.31	1.00	3.04
Time of the day (p-value)	0.04	0.00	0.41	0.58	0.12	0.98
Geographical position (edf ^b)	10.98	8.68	13.56	7.79	5.11	10.37
Geographical position (p-value)	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.25
Speed (edf ^b)	4.85	4.15	5.84	2.33	1.34	3.03
Speed (p-value)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Predictor variables						
01 Street without cycling facility	Ref.			Ref.		
02 Shared lane - Local street	0.76	0.56	1.06	1.64	1.07	2.70
03 Shared lane - Collector street	1.28	0.81	2.24	1.15	0.52	3.80
04 Bike lane - Local street	2.10	1.44	3.20	1.07	0.61	1.98
05 Bike lane - Collector street	2.66	1.93	3.80	1.64	1.04	2.94
06 Bike lane - Arterial road	1.21	0.82	1.92	0.78	0.42	1.62
07 On-street bike path - Local street	0.50	0.30	0.99	1.68	0.83	4.85
08 On-street bike path - Collector street	0.44	0.28	0.70	3.43	1.81	7.75
09 On-street bike path - Arterial road	0.19	0.12	0.33	2.63	1.43	5.58
10 Off-street bike path	0.30	0.23	0.39	3.95	2.75	6.12
Fit statistics						
R squared (adjusted)	0.16	0.14	0.19	0.16	0.12	0.20
Deviance explained	0.16	0.14	0.18	0.16	0.13	0.20

^a CI: confidence interval. Statistically significant values are shown in bold. ^b edf: estimated degrees of freedom, i.e. number of knots (inflection points) in the spline. Consequently, a higher edf value means a greater spline variability and a greater influence on the response variable. Regarding the smooth terms, confidence intervals represent edf and p-value variations among the 1,000 models. Thus, a spline is deemed significant when its p-value is below or equal to 0.05, 95% of the time.

4.4 Discussion

4.4.1 Limitations

Conflict severity has not been evaluated in this study, however, it could bring relevant nuances to our conclusions in a future research. Participants involved in this study are all graduate students in Urban Studies, which is not a representative sample of the cyclist population. Nonetheless, using a small and rather homogeneous sample of cyclists on schematically allocated routes has the advantage of reducing variance attributable to riding styles and route sampling frequency (Gustafsson et Archer 2013). Other studies asked their participants to identify traffic conflicts themselves, eliminating researcher bias in the identification of the conflicts (Dozza et Werneke 2014). However, our approach has the advantage of standardizing conflict identification among all participants.

4.4.2 Contribution to Scholarly Knowledge

This paper is a novel attempt at modelling cyclists' exposure to traffic conflict risk using an extensive mobile data collection. The dataset used in this study includes many nonsevere events, which are often disregarded in other studies that focus on critical events (Dozza et Werneke 2014 ; Schleinitz et al. 2015). Moreover, it brings nuances to the generally accepted statement that cycling infrastructure is safer for cyclists (Reynolds et al. 2009). Indeed, its protective effect depends upon cycleway type (in interaction with road type) and conflict partner (vehicle and pedestrian).

4.4.2.1 Safety Incidence Rates (SIR) Among Other Conflict Studies

Table 4.4 shows an overview of the incidence rates presented by other studies. While most studies measured rates below 1 event per 60 min and 5 events per 100 km, one paper used a broader definition of conflict (encompassing all traffic violations) and measured 3 and 17 events per 60 min and 100 km (Hamann et Peek-Asa 2017). The present study measured high incidence rates (5 and 2 conflicts with vehicles and pedestrians per 60 min, see Table 4.2 for further details). Directly comparing incidence rates from one paper to another is challenging due to the variety of

geographical contexts (e.g., country and city size) and of conflict definitions used by the authors. Among other factors, higher rates in our study may reflect that notwithstanding its strong cycling community and rapidly evolving cycling infrastructure, Montréal is still a North American metropolis with large vehicle and pedestrian flows, as well as many car-oriented street designs (Pucher, Buehler et Seinen 2011).

Table 4.4 Safety incidence rates of some cycling safety studies

Select cycling safety studies	Area	Dataset size			Safety incidence rates	
		Events (n)	min	km	per 60 min	per 100 km
Johnson et al. (2010)	Melbourne, Australia	54	7,658	--	0.42*	--
Gustafsson et Archer (2013)	Stockholm, Sweden	220	14,400	4,910	0.92*	4.48*
Dozza et Werneke (2014)	Gothenburg, Sweden	63	6,840	1,549	0.55*	4.07*
Schleinitz et al. (2015)	Chemnitz, Germany	77	22,320	5,280	0.21*	1.44
Hamann et Peek-Asa (2017)	Iowa City, USA	180	3,436*	1,078*	3.14	16.70

* Rates derived from other data presented in the paper.

4.4.2.2 Nonprotected Bike Lanes: Not the Thought That Counts

Bike lanes not only fail to prevent conflicts with vehicles, but also seem to foster them. In this study, bike lanes were often illegally occupied by motorists as if it were a residual space to perform numerous tasks that cannot be done in the moving vehicle lane. The most frequent example is the vehicle parked in the bike lane (Figure 4.4.a). Lack of physical separation also makes it easy for car drivers to partially encroach on the bike lane when engaging in some maneuvers, such as turning right at an intersection (Figure 4.4b). In line with the residual space-use of the bike lane, motorists often take advantage of it to enter and exit their vehicle away from moving motorized traffic (Figure 4.4.c). All these situations force cyclists to swerve away from the encroachment point, towards the center of the street (when the conflict stems from a parked vehicle) or towards the curb or the parking lane (when the conflict is caused by a vehicle in the moving lane). This is particularly worrisome when analyzed in conjunction with the findings from Beck et al. (2019): In their study analyzing motor vehicle passing distance with cyclists, they found that bike lanes were associated with significantly shorter passing distances than regular streets without cycling facility. This association between safety events and bike lanes (more conflicts and shorter passing distance) may seem harmless in itself, since most collision and injury studies do not report similar significant associations (Harris et al. 2013 ; Teschke et al. 2012). However, when experienced

repeatedly, these events may have an effect on cycling motivation, especially for safety-conscious individuals (Dill et McNeil 2013), and may lead in some cases to minor crashes, which are often absent from collision and injury databases due to underreporting bias (Tin Tin, Woodward et Ameratunga 2013).

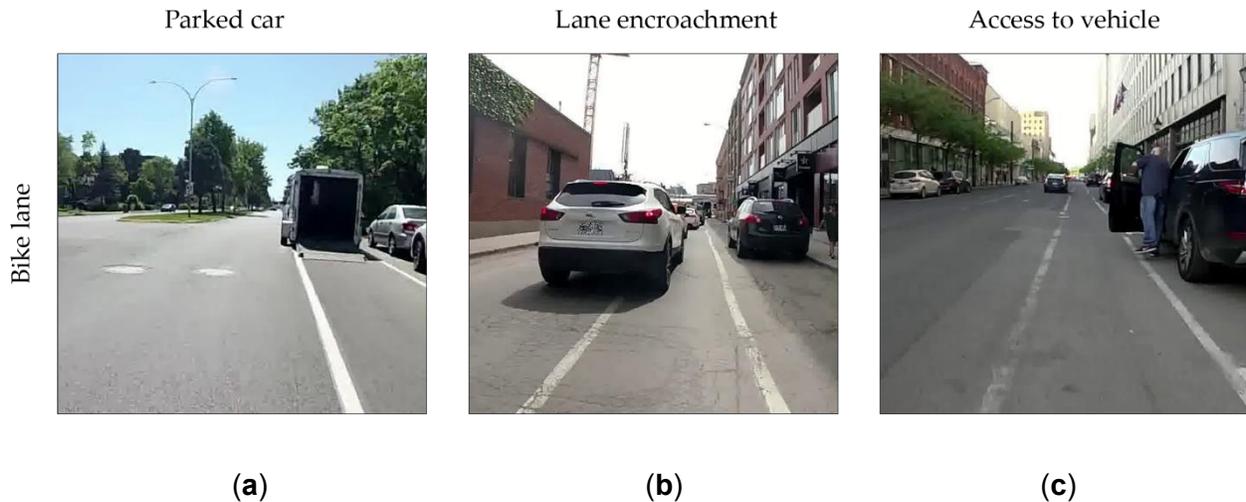


Figure 4.4 Vehicle conflicts on bike lanes located on collector streets

4.4.2.3 *The Backfiring Effect of Physically Separated Cycling Facilities*

On-street and off-street bike paths strongly decrease vehicle conflict likelihood. This comforts previous Canadian studies that found lower relative risks of injury on protected cycle tracks than on reference streets without cycling facility (Lusk et al. 2011 ; Teschke et al. 2012). However, this protective effect seems to attract more than just cyclists.

Other vulnerable road users (mostly pedestrians) often seek refuge in the bike path, even if a dedicated sidewalk is available nearby. In the example shown in Figure 4.5.a, the pedestrians choose to walk on the bike path probably because the sidewalk is much closer to the road, i.e., to vehicular danger and its associated noise and air pollution. Among pedestrians, many conflict partners were joggers (Figure 4.5.b), for whom the bike path is a much more comfortable infrastructure than the sidewalk’s uneven surface. Bike paths are also used as a residual space by neighbours for their garbage collection bins (Figure 4.5.c). Note that although bins in themselves were not counted as conflicts, pedestrians manipulating them were. Such findings seem congruent with those of Schleinitz et al. (2015) who measured higher safety incidence rates

(SIR) of conflicts with other cyclists and pedestrians on cycling infrastructure than on regular roads.

One result that may seem surprising at first glance is the slightly higher likelihood of conflict with a pedestrian on shared lanes that are located on a local street, and on bike lanes that are located on a collector street. First, for both predictors, this effect is much smaller than it is for on-street and off-street bike paths. Second, as for shared lanes, it may reflect that the lower traffic volumes increase pedestrians' confidence to walk in the street rather than on the sidewalk. Third, as for bike lanes, this effect is likely related to the presence or absence of physical separation features. Indeed, while bollards were present in only 3% of the baseline events located on collector street bike lanes, they were present in 20% of the conflicts with pedestrians that occurred on collector street bike lanes.

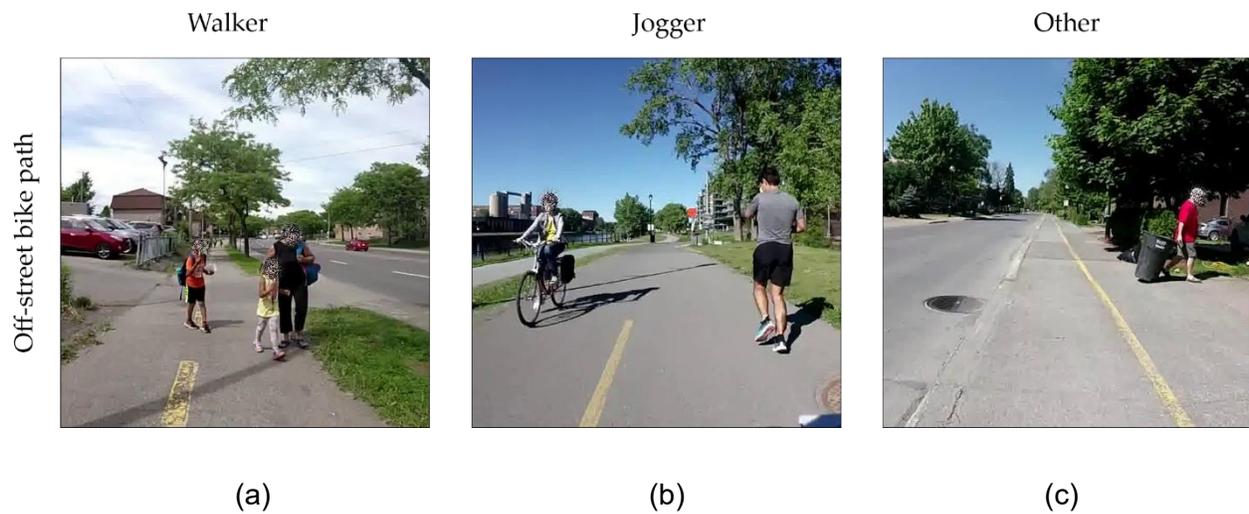


Figure 4.5 Pedestrian conflicts on off-street bike paths

4.4.2.4 The Relevance of Cycleway and Road Type Interaction Variables

Cycling facilities do not have the same effect on conflict likelihood depending on the type of road on which they are located. Such interaction variables are seldom found in the literature. In the vehicle model, bike lanes increase conflict likelihood when located on local and collector streets, however, this effect is not significant for bike lanes located on arterial roads. Higher traffic flows and the more transit-focused nature of these roads may explain why fewer vehicles park in the bike lane for a quick stop. As for pedestrians, conflict likelihood is higher on on-street bike paths that are located on arterial and collector roads, however, this effect is not significant when the bike

path is located on a local street. This may be linked to the lower pedestrian volumes typically measured on local streets.

Note that one must be cautious with the interpretation of the interaction variable coefficients: we do not recommend installing bike lanes on arterial roads. Even if our results show that vehicle conflict likelihood is lower when the bike lane is located on an arterial road than on a collector or local street, conflict and collision severity may be higher on arterial roads, due to the higher traffic volumes and speeds, as well as the presence of heavy vehicles. In this vein, bike lanes on arterial roads could prove to be more dangerous overall than bike lanes on collector streets.

4.4.3 Implications for Decision Makers

4.4.3.1 Cycleway Design Considerations

Understanding the combined effect of cycleway and road type on conflict likelihood could be relevant to urban planners when 1) identifying which cycling facility type to build along a given corridor, and 2) anticipating potential conflicts and installing protection features.

Public guidelines in Québec recommend to allocate shared lanes only on streets with low vehicle flows (Fortier, Lesage et Bégin 2009). Although not contradicting this recommendation, our results prove that likelihood of conflict with a vehicle is no different on streets with or without a 'sharrow', which may raise questions on the merits of such a facility type.

Bike lanes that are not physically segregated from traffic should be avoided, especially on streets where parking demand is high in comparison to the available spots and where car drivers may be tempted to temporarily park the vehicle in the bike lane to run an errand. This implies the use of physical separation features, be they simple solutions like bollards, larger investments like medians, or any element more substantial than paint.

On on-street and off-street bike paths, the few vehicle conflicts experienced by the cyclists from this data collection were intersection- or driveway-related, which are locations where the physical separation is breached. This stresses the need for better integration of cycling facilities at intersections, to ensure that the safe cycling conditions are continuous throughout cycling routes (Sener, Eluru et Bhat 2009). It also supports current provincial guidelines, which discourage planners from designing on-street two-way bike paths specifically because of the potential conflicts

at driveways and intersections (Fortier, Lesage et Bégin 2009). Urban planners could, for instance, extend the cycleway protection into the intersection, by building a corner island that gives turning vehicles a better sight of crossing cyclists (NACTO 2019).

Planners must nevertheless be sensitive to the backfiring effect that physically protected designs may have, i.e., pedestrians using them. This effect is only briefly addressed in current public guidelines (Fortier, Lesage et Bégin 2009). First, planners could accommodate pedestrians by providing them with comfortable infrastructure further away from traffic than the bike path, eliminating in the first place the comparable advantage of walking on the bike path rather than the footpath. Second, clear, frequent and highly visible road marking and signage must be placed to designate cyclist-only right-of-ways. Signage is especially important in northern cities like Montréal, where snowplowing and application of strong abrasives, which are necessary to maintain the roads during the harsh winter months, can rapidly fade away the road markings.

4.4.3.2 Education

Pedestrians (especially those wearing headphones) could use bike paths in a safer manner by walking or running in the opposite direction of cyclist traffic, making it easier to yield the way to oncoming cyclists. Education programs and awareness-raising patrols could help pedestrians and cyclists to better share the paths. However, such programs must not replace provision of decent infrastructure for both pedestrians and cyclists.

4.5 Conclusions

The aim of this study was to evaluate cycleway and road types' combined effect on cycling conflict occurrence with vehicles and with pedestrians. Bootstrapped generalized additive models (GAM) results show that not all cycleway types are created equal when it comes to protecting its users from conflicts. Bike lanes are more vehicle-conflict prone than regular streets, which is counterproductive. Securing them with simple physical features, like bollards, could discourage their use as a residual space for vehicles. On-street and off-street bike paths offer protection from conflicts with vehicles (except at driveways or at intersections), which is consistent with the literature about cycling safety. However, they fail to protect cyclists from conflicts with pedestrians. While the former may have more severe outcomes than the latter, urban planners must not neglect

the dissuasive effect that experiencing frequent nonsevere conflicts can have on cycling motivation. Indeed, having to avoid many pedestrians while cycling may translate into a higher level of stress, and a less efficient commute. Finally, including road type as an interaction variable revealed the different effects on conflict likelihood that a given cycleway type can have, whether it is located on a local street, a collector street or an arterial road. Future research could evaluate the severity of the conflicts experienced by the cyclists, and perform cross-analyses with collision and injury databases to further detail the relations between conflicts, collisions, and safety.

Author Contributions: Conceptualization, V.J. and P.A.; Methodology, data validation and statistical analyses, V.J. and P.A.; writing—original draft preparation, V.J. and P.A.; writing—review and editing, V.J. and P.A.; supervision, project administration, funding acquisition: P.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study was financially supported by the Social Sciences and Humanities Research Council of Canada (SSHRC) through an Insight Grant (435-2019-0796) and through the Canada Graduate Scholarship – Master’s program (first author).

Institutional Review Board Statement: This study has been approved by the Research Ethics Board of Institut national de la recherche scientifique (project no. CER 19-509, date of approval: May 28, 2019).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Acknowledgments: Special thanks to the four courageous cyclists who were involved in the data collection, to Jérémy Gelb for his insights on statistical modelling, to Jennifer Ma-O for her support organizing the data collection, and to Louis-Philippe Huard for his work in the video reviewing process.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

CHAPITRE 5 : VERS DES INDICATEURS DE QUALITÉ

L'objectif de ce cinquième chapitre est de présenter les résultats de la classification spatiale floue des tronçons de voie cyclable de Montréal, Laval et Longueuil. Pour y parvenir, on présente d'abord brièvement les résultats de chacune des dimensions. Les résultats de la classification sont ensuite étayés, en commençant par une présentation des paramètres utilisés, suivie d'une description des groupes obtenus.

5.1 Résultats de chaque dimension

5.1.1 Bruit et pollution

La moyenne de bruit pour l'ensemble des collectes se situe à 72,51 dB(A) (Tableau 5.1), ce qui est bien au-delà du seuil jugé problématique par le Ministère des Transports (1998) pour une exposition sur 24h. Ce sont des niveaux qui sont également problématiques selon l'OMS : pour rappel, au-delà de 53,3 dB(A) (L_{den}), 10% de la population est fortement incommodée, et au-delà de 59,3 dB(A) (L_{den}), le risque relatif de maladie cardiaque ischémique augmente de 5% (World Health Organization 2018a).

Pour les particules fines, nous avons enregistré une moyenne de 4,49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2,5}$ (Tableau 5.1). De prime abord, ces niveaux ne sont pas préoccupants : l'OMS recommande de maintenir l'exposition aux $\text{PM}_{2,5}$ en dessous de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne annuelle) et 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne quotidienne). Cependant, les cyclistes en déplacement ont une ventilation plus élevée que les autres navetteurs·ses, ainsi, il est possible qu'ils atteignent ou dépassent ces normes (Apparicio et al. 2018).

Durant les deux périodes d'échantillonnage, les valeurs moyennes de bruit et de pollution ont été relativement semblables pour Montréal (72,83 dB[A] et 4,60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et Laval (72,84 dB[A] et 4,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), tandis qu'à Longueuil, le bruit a été légèrement plus faible, et la pollution légèrement plus élevée (70,97 dB[A] et 5,88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Il faut cependant rappeler que ces différences et ces ressemblances sont peut-être simplement dues à la période d'échantillonnage (juin 2019 pour Montréal et juillet 2019 pour Laval et Longueuil).

Tableau 5.1 Distribution des valeurs d'exposition au bruit et à la pollution

	Région	P05	P25	Médiane	Moyenne	Moyenne de bruit ¹	P75	P95
Bruit ($L_{Aeq,1\text{ min}}$)	Montréal	64,70	68,24	70,69	70,76	72,83	73,26	76,88
	Laval	64,07	68,41	70,74	70,84	72,84	73,39	77,48
	Longueuil	62,70	66,17	68,86	68,88	70,97	71,30	75,28
	Total	64,03	67,80	70,35	70,39	72,51	72,97	76,74
PM _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Montréal	1,00	2,00	3,00	4,60	--	5,03	11,40
	Laval	3,00	5,00	6,00	4,27	--	6,58	8,93
	Longueuil	2,00	3,00	4,33	5,88	--	5,29	6,95
	Total	1,12	2,40	4,00	4,49	--	5,96	10,25

¹ La moyenne de bruit, obtenue avec le paquet 'seewave', tient compte du caractère logarithmique de l'échelle des décibels (Sueur, Aubin et Simonis 2008).

Les modèles finaux de bruit et de pollution sont présentés au Tableau 5.2. Il est à noter que les deux modèles intègrent un terme d'autocorrélation temporelle AR1 (ϕ est estimé à 0,592 pour le modèle de bruit et à 0,515 pour le modèle de pollution), basé sur les résidus de deux premiers modèles réalisés sans les termes d'autocorrélation temporelle. Ces deux modèles sont moyennement bien ajustés aux données (R^2 ajusté de 0,180 et de 0,491). Pour le bruit, cette valeur inférieure à d'autres études réalisées dans le passé (Apparicio et Gelb 2020 ; Gelb et Apparicio 2019), pour la pollution, cette valeur se compare avantageusement à d'autres études réalisées dans le passé (Gelb et Apparicio 2020 ; Farrell et al. 2015). Les résidus sont presque normalement distribués pour le modèle de bruit (skewness = 0,101, kurtosis = -0,002) et pour le modèle de pollution (skewness = 0,607, kurtosis = 1,392).

Les variables de contrôle sont significatives, ce qui souligne la pertinence de les inclure dans les modèles de prédiction. Le nombre d'intersections croisées au cours d'une minute réduit l'exposition au bruit (-0,132, $p < 0,001$), par contre, c'est sans effet pour l'exposition aux PM_{2,5}. L'humidité relative présente dans l'air affecte significativement la réponse des capteurs, par contre, cet effet est de très petite ampleur (0,008 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $p < 0,001$). Les différents capteurs de pollution utilisés répondent différemment à une même concentration de polluants : les têtes no. 2 (0,111, $p < 0,001$), no. 3 (0,070, $p < 0,001$) et no. 4 (0,054, $p < 0,001$) mesurent systématiquement de plus grandes concentrations que la tête no. 1 (ces variations sont normales lorsque des capteurs Aeroqual sont employés, voir section 2.5.1.1). Enfin, les niveaux de bruit et de pollution ont varié significativement d'une journée d'échantillonnage à l'autre, mais pas nécessairement de la même façon pour les deux dimensions. Par exemple, toutes choses étant égales par ailleurs, les niveaux de bruit ont été 0,694 dB(A) plus élevés le 21 juin à Longueuil, tandis que les niveaux de particules fines ont été 0,336 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ plus faibles lors de cette même journée.

Tableau 5.2 Résumé des modèles de bruit et de pollution

Variables	L_{Aeq}			$PM_{2,5}$		
	Coeff.	Err. std.	p	Coeff.	Err. std.	p
(Intercept)	71,543	0,183	0,000	-6,136	0,064	0,000
Variabes de contrôle						
<i>Termes linéaires</i>						
Nombre d'intersections croisées	-0,132	0,032	0,000	-0,001	0,004	0,852
Humidité relative				0,008	0,001	0,000
Capteur ID1				<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>
Capteur ID2				0,111	0,016	0,000
Capteur ID3				0,070	0,015	0,000
Capteur ID4				0,054	0,019	0,005
Montréal 12 juin - mercredi	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>
Montréal 17 juin - lundi	-0,662	0,174	0,000	-0,225	0,028	0,000
Montréal 18 juin - mardi	-0,112	0,162	0,490	0,534	0,027	0,000
Montréal 19 juin - mercredi	-0,221	0,177	0,213	0,379	0,030	0,000
Montréal 21 juin - jeudi	0,694	0,194	0,000	-0,336	0,030	0,000
Laval 16 juillet - mardi	0,271	0,327	0,407	0,764	0,046	0,000
Laval 18 juillet - jeudi	0,803	0,366	0,028	0,352	0,049	0,000
Longueuil 17 juillet - mercredi	-0,807	0,438	0,065	0,277	0,061	0,000
Longueuil 18 juillet - jeudi	-1,962	0,463	0,000	-0,110	0,062	0,077
<i>Termes non linéaires</i>						
s(PassedMin)	6,974		0,000	7,625		0,000
s(X,Y)	23,599		0,000	23,825		0,000
Prédicteurs						
Sans voie cyclable – toutes rues confondues	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>
Chaussée désignée - rue locale	-2,448	0,206	0,000	-0,105	0,027	0,000
Chaussée désignée - rue collectrice	-1,928	0,328	0,000	-0,265	0,044	0,000
Bande cyclable - rue locale	-2,218	0,218	0,000	-0,170	0,028	0,000
Bande cyclable - rue collectrice	-2,124	0,183	0,000	-0,123	0,024	0,000
Bande cyclable - rue artérielle	0,883	0,210	0,000	-0,073	0,027	0,007
Piste protégée - rue locale	-1,854	0,262	0,000	-0,183	0,033	0,000
Piste protégée - rue collectrice	-1,224	0,200	0,000	-0,201	0,025	0,000
Piste protégée - rue artérielle	0,986	0,157	0,000	-0,097	0,020	0,000
Piste protégée - hors rue	-2,597	0,163	0,000	-0,275	0,022	0,000
Qualité d'ajustement						
R ² ajusté	0,180			0,491		
Déviante expliquée	17,6%			51,5%		

Note : les valeurs en gras sont significatives au seuil de 5%.

Les termes non linéaires temporels et spatiaux des modèles de bruit et de pollution (Tableau 5.2) sont tous significatifs ($p < 0,001$). Les niveaux de bruit connaissent un creux vers 10h00 et un pic vers 16h00 (Figure 5.1), tandis que pour les particules fines, les niveaux décroissent de manière quasi continue tout au long de la journée, avant de connaître un léger regain vers 17h00 (Figure 5.1). Le patron spatial du bruit montre que les niveaux sont particulièrement élevés (1,0 à 1,5 dB[A] de plus que la moyenne) dans l'ouest des îles de Montréal et de Laval (Figure 5.1). Pour les particules fines, le portrait met plutôt en évidence les quartiers centraux de Montréal ainsi que l'agglomération de Longueuil comme étant légèrement plus pollués que la moyenne (entre 0,1 et 0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ supplémentaires) (Figure 5.1).

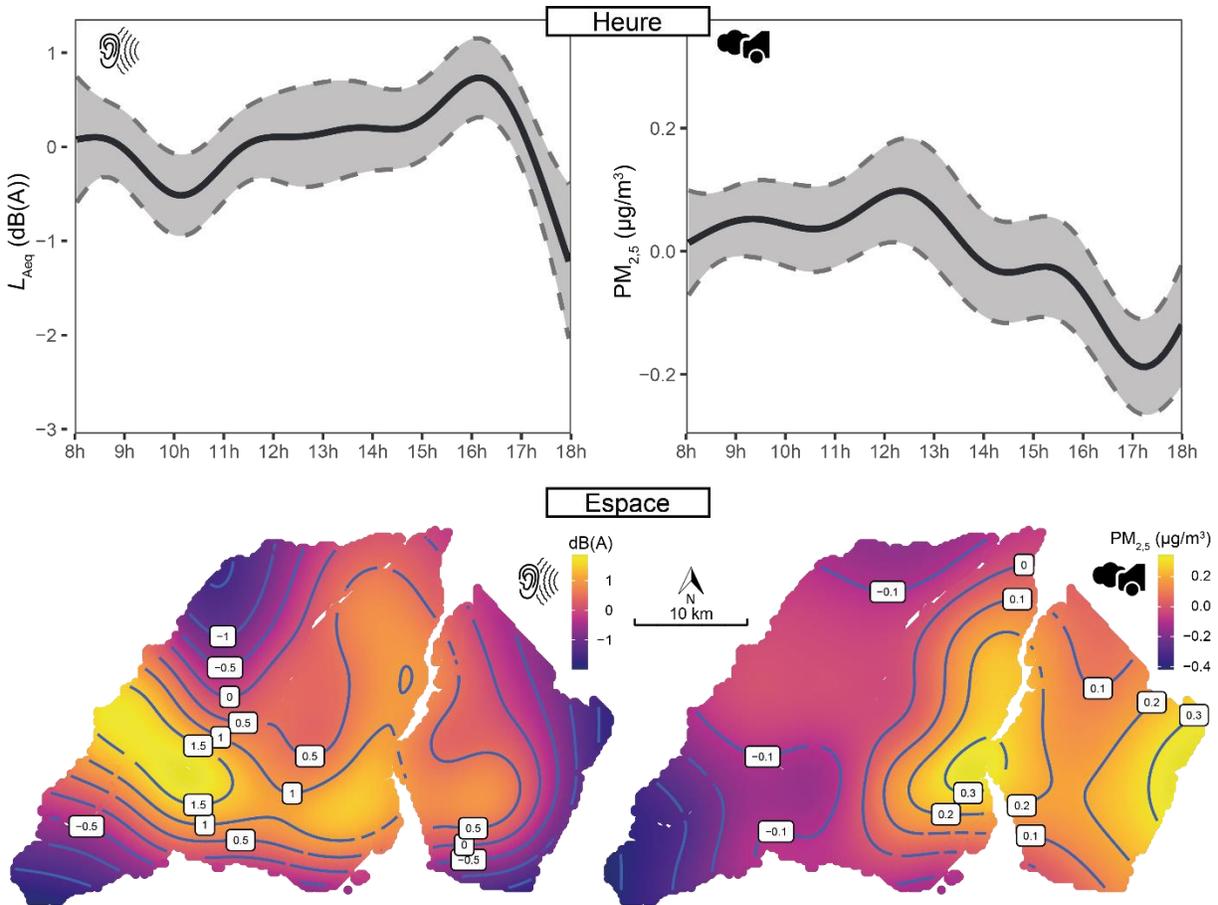


Figure 5.1 Effets temporels et spatiaux sur l'exposition au bruit et aux PM_{2,5}

Les variables explicatives montrent très bien que les niveaux d'exposition au bruit varient d'un type d'axe à l'autre (Tableau 5.2). Signalons d'emblée que tous les types de rues sans aménagement cyclable représentent la catégorie de référence. D'abord, pour le bruit, le modèle montre que circuler sur une chaussée désignée de rue locale et collectrice réduit l'exposition de 2,448 dB(A) ($p < 0,001$) et 1,928 dB(A) ($p < 0,001$). Les bandes cyclables de rues locales et collectrices ont un effet similaire : les cyclistes sont exposé·e·s à 2,218 dB(A) ($p < 0,001$) et 2,124 dB(A) ($p < 0,001$) de moins par rapport à circuler sur une rue sans infrastructure cyclable. Par contre, si la bande cyclable est sur une rue artérielle, l'exposition au bruit est 0,883 dB(A) ($p < 0,001$) plus élevé que sur une rue sans voie cyclable. Les pistes protégées contribuent elles aussi à réduire l'exposition au bruit, mais l'effet est de moindre ampleur : sur ou à proximité d'une rue locale, la réduction s'élève à 1,854 dB(A) ($p < 0,001$) et sur une rue collectrice, la réduction est de 1,224 dB(A) ($p < 0,001$). Les pistes protégées qui sont situées sur ou à proximité d'une artère exposent leurs utilisateur·rice·s à davantage de bruit qu'en dehors du réseau cyclable

(0,986 dB[A], $p < 0,001$). Les plus fortes réductions d'exposition au bruit sont attribuables aux pistes protégées hors rue (-2,597, $p < 0,001$).

Du côté des particules fines $PM_{2,5}$, le portrait est davantage homogène : tous les types de pistes cyclables contribuent à réduire l'exposition aux $PM_{2,5}$ par rapport à circuler sur une rue sans voie cyclable ; par contre, certains types réussissent mieux que d'autres (Tableau 5.2). Les plus fortes réductions s'observent pour les pistes protégées hors rue (-0,275 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $p < 0,001$) et sur rues locales et collectrices (-0,183 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $p < 0,001$; -0,201 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $p < 0,001$), ainsi que pour les voies cyclables non protégées de petites et moyennes rues, comme les chaussées désignées de rue collectrice (-0,265 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $p < 0,001$) et les bandes cyclables de rues locales (-0,170 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $p < 0,001$). À l'opposé, les réductions sont beaucoup plus modestes sur les voies cyclables de rue artérielle, qu'il s'agisse de bandes cyclables (-0,073 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $p = 0,007$) ou de pistes protégées (-0,097 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $p < 0,001$). Dans tous les cas, soulignons que les coefficients sont de petite ampleur : ils font varier l'exposition aux particules fines de moins de 0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, alors que les normes de l'OMS varient entre 10 et 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Par la suite, ces modèles statistiques sont utilisés pour prédire, pour chaque tronçon, une valeur attendue d'exposition au bruit et à la pollution. Pour rappel, on obtient ces prédictions en fournissant aux modèles d'exposition un jeu de données dans lequel toutes les variables sont fixées (c'est-à-dire qu'elles ont la même valeur pour tous les tronçons), sauf la variable concernant le type d'axe emprunté et la variable concernant la localisation (Tableau 2.8). Ainsi, la prédiction représente la valeur d'exposition à laquelle on s'attend, toutes choses étant égales par ailleurs. Il est important d'utiliser les prédictions, plutôt que les valeurs mesurées, puisque ces dernières sont très dépendantes des conditions d'échantillonnage (ce qui n'est pas le cas avec les valeurs prédites, puisque les variables concernant les conditions d'échantillonnage sont fixées).

Les prédictions obtenues pour le bruit mettent surtout en lumière la hiérarchie des réseaux routiers (Figure 5.2) : les bandes cyclables de rues artérielles et les pistes protégées de rues artérielles sortent clairement du lot avec des niveaux prédits allant de 72 à 75 dB(A), alors que les voies cyclables situées sur des rues moins achalandées ont plutôt des distributions d'observations dont la plupart des valeurs sont inférieures à 70 dB(A) (à l'exception des pistes protégées sur rue collectrice, dont la médiane se situe approximativement à 70 dB[A]). Cette tendance semble être présente autant à Montréal qu'à Laval et à Longueuil : sur les trois territoires, on trouve des voies cyclables peu bruyantes et fortement bruyantes.

Du côté des particules fines, les distinctions entre types de voies cyclables sont beaucoup moins claires : malgré qu'on puisse observer certains types de voies cyclables ayant des prédictions plus élevées (bandes cyclables sur rues artérielles) et d'autres ayant des prédictions plus faibles (chaussées désignées sur rues collectrices), les distributions des observations sont très étendues et sont nombreuses à se chevaucher. La dépendance spatiale des observations est beaucoup plus dominante et reflète la force du patron spatial du modèle de $PM_{2,5}$ (Figure 5.1), qui montre des niveaux de pollution plus élevés dans les quartiers centraux de Montréal et dans l'agglomération de Longueuil. En effet, ce polluant est beaucoup mieux décrit par des tendances régionales que par des variations locales de type d'axe emprunté.

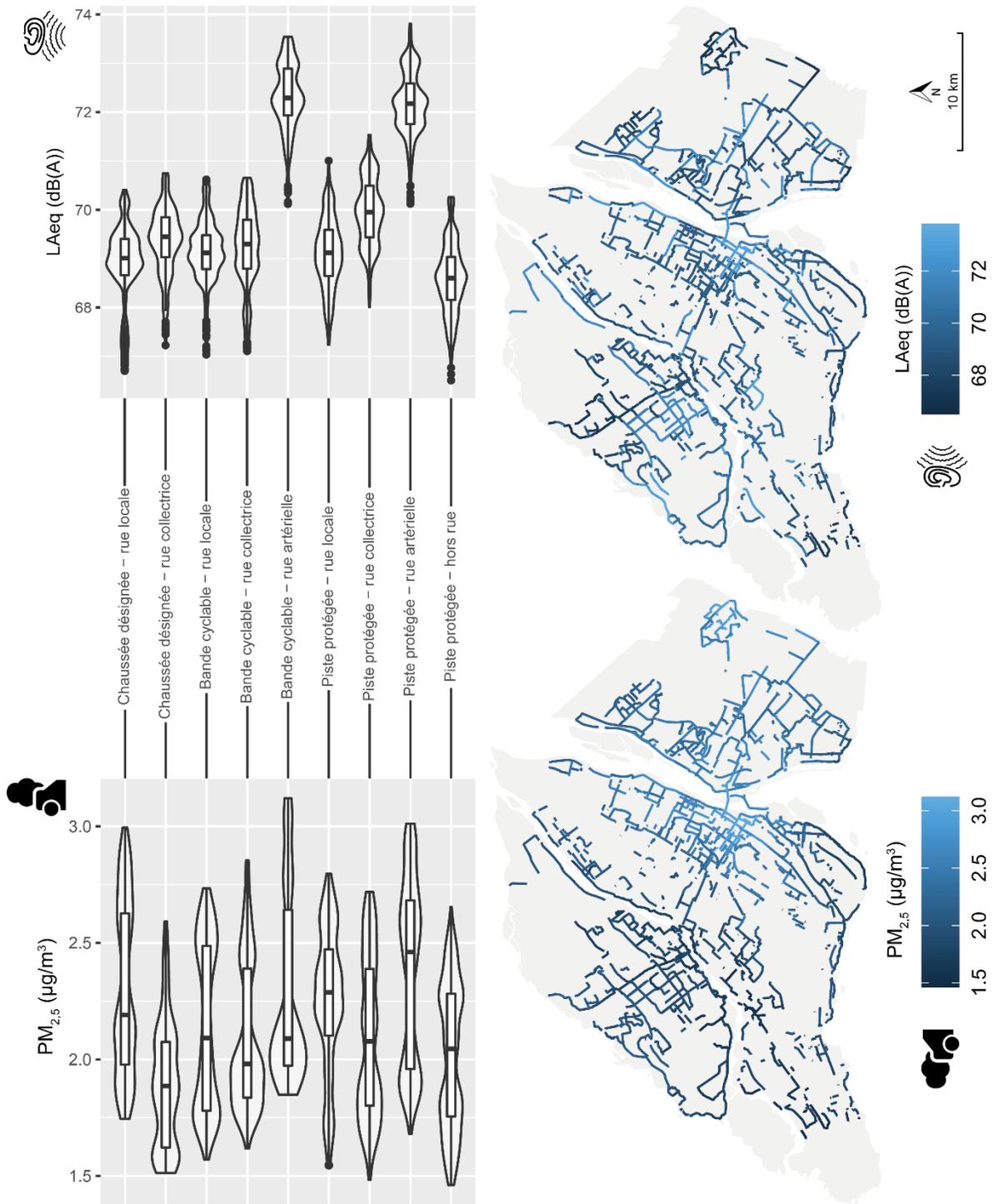


Figure 5.2 Prédications de bruit et de pollution pour chaque tronçon cyclable

5.1.2 État de la chaussée

Le modèle de prédiction des vibrations issues de la chaussée permet de contrôler la variance due aux différences de gabarit et de style de conduite des participant·e·s (Tableau 5.3). On observe, par exemple, que les participant·e·s ID2 (0,042, $p < 0,001$) et ID3b (0,077, $p < 0,001$) ont enregistré davantage de vibrations que le·la participant·e ID1a, une fois la vitesse contrôlée. Les participant·e·s ID3a et ID4 ont enregistré moins de vibrations que le·la participant·e ID1a, par contre, ces effets sont de très petite ampleur (-0,003, $p = 0,038$; -0,005, $p < 0,001$). Sans surprise, la vitesse a un effet très significatif sur les vibrations mesurées. Sur la Figure 5.3, on voit qu'à mesure que la vitesse augmente, les vibrations enregistrées par l'accéléromètre augmentent elles aussi, de manière non linéaire. L'effet de la vitesse sur les valeurs de DCI est d'abord quadratique négatif entre 5 et 15 km/h, puis atteint un plateau autour de 20 km/h, avant de reprendre une ascension quasi linéaire entre 25 et 40 km/h. En somme, bien que le modèle de correction des vibrations n'explique que 2,19% de la déviance, il permet d'avoir des données de vibrations moins biaisées par les conditions d'échantillonnage.

Tableau 5.3 Résumé du modèle de correction de la vitesse et du de la participant·e

Variables	Coefficients	Erreur std.	p
(Constante)	1,383	0,001	<0,001
Terme linéaire			
Participant·e ID1a	Réf.	Réf.	Réf.
Participant·e ID1b	0,009	0,002	<0,001
Participant·e ID2	0,042	0,001	<0,001
Participant·e ID3a	-0,003	0,002	0,038
Participant·e ID3b	0,077	0,002	<0,001
Participant·e ID4	-0,005	0,001	<0,001
Terme non linéaire			
Vitesse	8,687	--	<0,001
Qualité d'ajustement			
R ² ajusté	0,027		
Déviance expliquée	2,19%		

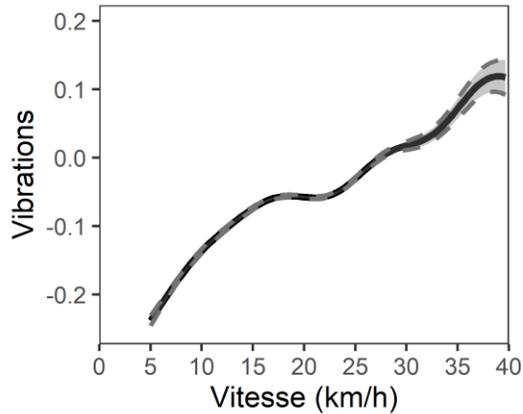


Figure 5.3 Effet de la vitesse du de la cycliste sur les vibrations enregistrées

Les distributions des valeurs de vibrations (Figure 5.4) révèlent de légères différences significatives d'un type d'axe à l'autre (ANOVA : $F = 73,19$, $p < 0,001$). Bien que la plupart des distributions selon le type d'axe se chevauchent, on remarque que les pistes protégées ont tendance à faire vivre plus de vibrations, tandis que les voies cyclables peinturées sur rue ont des valeurs plus faibles. Sur la carte de la Figure 5.4, certaines pistes cyclables se distinguent pour leur mauvais état, notamment celle du canal de L'Aqueduc, à LaSalle. D'autres, par contre, sont en bien meilleur état : la bande cyclable du boulevard Dagenais, à Laval, en fait office.

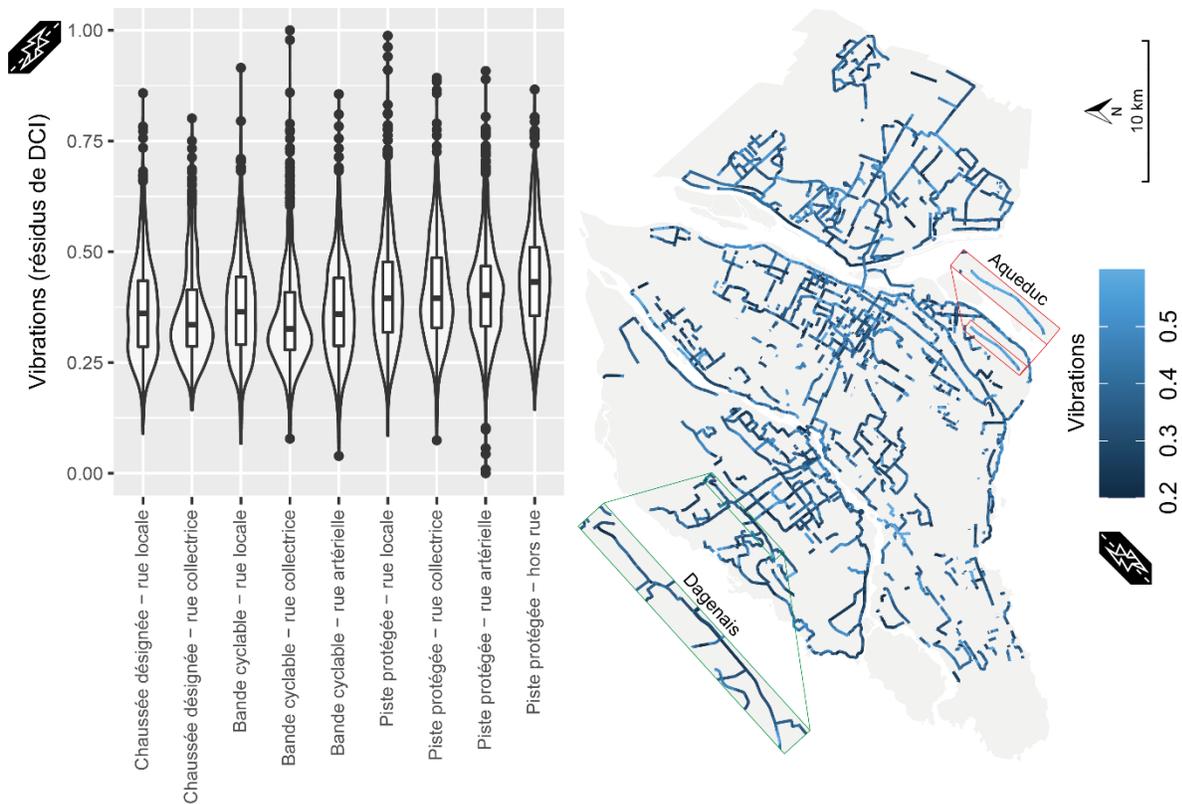


Figure 5.4 Vibrations sur les réseaux cyclables

5.1.3 Conflits

Tout d'abord, il convient d'analyser les statistiques descriptives des conflits, soit leur fréquence par type de voie cyclable et par territoire (Tableau 5.4). Nous nous contenterons de souligner les faits saillants uniquement, puisqu'une analyse similaire a déjà été présentée dans l'article sur les conflits à Montréal (section 4.3.1) et que l'analyse du modèle de régression logistique à la fin de la présente section décrit les mêmes tendances, mais plus en profondeur.

Premièrement, tous types de voies cyclables confondus, la fréquence de conflits avec véhicules est bien plus élevée pour la collecte de Montréal (5,4 conflits par 60 min) que pour les collectes de Laval (2,9 conflits par 60 min) et Longueuil (2,4 conflits par 60 min). Ces disparités sont beaucoup moins prononcées du côté des conflits avec piétons (pour les trois territoires, entre 1,4 et 2,4 conflits par 60 min). Deuxièmement, les conflits avec véhicules sur bandes cyclables de rues collectrices sont beaucoup plus fréquents à Montréal (11,1 conflits par 60 min) qu'à Laval et Longueuil (5,2 conflits par 60 min pour les deux territoires), ceci étant dit, dans tous les cas, il

s'agit d'un type très fréquent. Troisièmement, pour Montréal et Laval, les conflits avec piétons sont beaucoup plus fréquents sur les pistes protégées (respectivement 5,4 conflits par 60 min et 4,0 conflits par 60 min) que sur tous les autres types d'infrastructures. Cependant, à Longueuil, la fréquence de conflit est à peine plus grande sur les pistes protégées (2,5 conflits par 60 min) que sur les chaussées désignées de rues locales (2,4 conflits par 60 min).

Tableau 5.4 Répartition des conflits par type de voie cyclable et par territoire

Type de voie cyclable et de rue ¹	Exposition des cyclistes				Fréquence de conflits							
	Minutes		Kilomètres		Véhicule				Piéton-ne			
	n	%	n	%	n	%	par 60 min	par 100 km	n	%	par 60 min	par 100 km
Montréal ²												
Rue sans voie cyclable (réf.)	3230	61,7	868	60,7	297	63,6	5,5	34,2	88	42,1	1,6	10,1
Chaussée désignée - rue locale	286	5,5	81	5,7	19	4,1	4,0	23,5	11	5,3	2,3	13,6
Chaussée désignée - rue collectrice	109	2,1	33	2,3	8	1,7	4,4	24,2	2	1,0	1,1	6,1
Bande cyclable - rue locale	208	4,0	59	4,1	34	7,3	9,8	57,6	5	2,4	1,4	8,5
Bande cyclable - rue collectrice	266	5,1	78	5,5	52	11,1	11,7	66,7	13	6,2	2,9	16,7
Bande cyclable - rue artérielle	180	3,4	50	3,5	28	6,0	9,3	56,0	4	1,9	1,3	8,0
Toutes pistes protégées	956	18,3	261	18,3	29	6,2	1,8	11,1	86	41,1	5,4	33,0
Total	5235	100	1430	100	467	100	5,4	32,7	209	100	2,4	14,6
Laval												
Rue sans voie cyclable (réf.)	423	34,8	132	34,7	11	19,0	1,6	8,3	10	22,2	1,4	7,6
Chaussée désignée - rue locale	53	4,4	16	4,2	6	10,3	6,8	37,5	3	6,7	3,4	18,8
Chaussée désignée - rue collectrice	26	2,1	9	2,4	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
Bande cyclable - rue locale	59	4,8	18	4,7	8	13,8	8,1	44,4	3	6,7	3,1	16,7
Bande cyclable - rue collectrice	196	16,1	65	17,1	17	29,3	5,2	26,2	9	20,0	2,8	13,8
Bande cyclable - rue artérielle	175	14,4	54	14,2	6	10,3	2,1	11,1	1	2,2	0,3	1,9
Toutes pistes protégées	285	23,4	86	22,6	10	17,2	2,1	11,6	19	42,2	4,0	22,1
Total	1217	100	380	100	58	100	2,9	15,3	45	100	2,2	11,8
Longueuil												
Rue sans voie cyclable (réf.)	477	42,8	139	43,0	13	29,5	1,6	9,4	4	15,4	0,5	2,9
Chaussée désignée - rue locale	75	6,7	22	6,8	2	4,5	1,6	9,1	3	11,5	2,4	13,6
Chaussée désignée - rue collectrice	10	0,9	3	0,9	1	2,3	6,0	33,3	0	0,0	0,0	0,0
Bande cyclable - rue locale	106	9,5	33	10,2	7	15,9	4,0	21,2	3	11,5	1,7	9,1
Bande cyclable - rue collectrice	46	4,1	14	4,3	4	9,1	5,2	28,6	0	0,0	0,0	0,0
Bande cyclable - rue artérielle	21	1,9	6	1,9	1	2,3	2,9	16,7	0	0,0	0,0	0,0
Toutes pistes protégées	379	34,0	106	32,8	16	36,4	2,5	15,1	16	61,5	2,5	15,1
Total	1114	100	323	100	44	100	2,4	13,6	26	100	1,4	8,0
Territoire entier												
Rue sans voie cyclable (réf.)	4129	54,6	1,139	53,4	321	56,4	4,7	28,2	102	36,4	1,5	9,0
Chaussée désignée - rue locale	414	5,5	119	5,6	27	4,7	3,9	22,7	17	6,1	2,5	14,3
Chaussée désignée - rue collectrice	144	1,9	46	2,2	9	1,6	3,8	19,6	2	0,7	0,8	4,3
Bande cyclable - rue locale	374	4,9	110	5,2	49	8,6	7,9	44,5	11	3,9	1,8	10,0
Bande cyclable - rue collectrice	508	6,7	157	7,4	73	12,8	8,6	46,5	22	7,9	2,6	14,0
Bande cyclable - rue artérielle	375	5,0	109	5,1	35	6,2	5,6	32,1	5	1,8	0,8	4,6
Toutes pistes protégées	1621	21,4	453	21,2	55	9,7	2,0	12,1	121	43,2	4,5	26,7
Total	7565	100	2133	100	569	100	4,5	26,7	280	100	2,2	13,1

¹ Les chaussées désignées sur rues artérielles, très rares, ne font pas partie de notre jeu de données.

² Le·la lecteur·trice remarquera de légères différences entre le Table 4.2, issu de l'article, et la section montréalaise du présent tableau. En effet, suite à la réanalyse du jeu de données, et durant le processus d'uniformisation avec Laval et Longueuil, de petites modifications ont dû être effectuées. Cependant, ces modifications ne sont pas d'ampleur à modifier le sens de l'analyse que les données alimentent.

Les résultats des modèles de probabilité de vivre un conflit sont présentés au Tableau 5.5. On y voit tout d'abord que les modèles de prédiction des conflits avec véhicules et piéton·ne·s expliquent une petite proportion de la variance ($R^2 = 0,147$, IC [95%] = 0,126—0,170 ; $R^2 = 0,138$, IC [95%] = 0,106—0,173). Cela témoigne que la probabilité de vivre un conflit dépend d'un large éventail de facteurs qui ne sont pas modélisés ici. Malgré tout, ces statistiques n'ébranlent pas les modèles dans leur capacité à révéler des associations significatives entre les types de voies cyclables et les probabilités de conflit, ce qui correspond au troisième sous-objectif de ce mémoire.

Plusieurs variables de contrôle sont significatives. Par exemple, le·la participant·e ID2 a vécu moins de conflits avec véhicule et avec piéton·ne que ses collègues, toutes choses étant égales par ailleurs (RC = 0,744, IC [95%] = 0,586—0,935 ; RC = 0,694, IC [95%] = 0,497—0,965). La probabilité de vivre un conflit avec un véhicule a été plus élevée lors de la journée du 21 juin à Montréal que lors du 12 juin à Montréal (RC = 1,430, IC [95%] = 1,054—1,953), ce qui n'est pas le cas pour les conflits avec piéton·ne. La proximité à une intersection augmente significativement la probabilité de vivre un conflit avec un·e piéton·ne (RC = 1,420, IC [95%] = 1,144—1,777), mais pas avec un véhicule.

Tableau 5.5 Résumé des modèles de conflit avec piéton·ne et avec véhicule

Paramètres	Véhicule			Piéton·ne		
	Rapport de cotes (RC)			Rapport de cotes (RC)		
	Moyenne	IC (95%)		Moyenne	IC (95%)	
(Constante)	0,524	0,416	0,661	0,452	0,326	0,648
Variabes de contrôles						
<i>Termes linéaires</i>						
Participant·e ID1a	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>		<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	
Participant·e ID1b	0,890	0,610	1,335	0,712	0,408	1,211
Participant·e ID2	0,744	0,586	0,935	0,694	0,497	0,965
Participant·e ID3a	0,759	0,475	1,183	0,641	0,347	1,177
Participant·e ID3b	0,850	0,683	1,065	0,551	0,396	0,791
Participant·e ID4	0,892	0,711	1,116	0,664	0,464	0,956
Montréal 12 juin - mercredi	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>		<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	
Montréal 17 juin - lundi	1,000	0,761	1,309	0,934	0,635	1,384
Montréal 18 juin - mardi	0,931	0,720	1,182	1,359	0,950	1,930
Montréal 19 juin - mercredi	1,214	0,926	1,602	0,838	0,553	1,231
Montréal 21 juin - jeudi	1,430	1,054	1,953	0,756	0,487	1,205
Laval 16 juillet - mardi	0,706	0,436	1,142	0,802	0,414	1,527
Laval 18 juillet - jeudi	0,384	0,198	0,751	1,311	0,512	3,354
Longueuil 17 juillet - mercredi	0,470	0,274	0,840	0,204	0,100	0,423
Longueuil 18 juillet - jeudi	0,856	0,492	1,557	0,354	0,176	0,718
Intersection à moins de 15m	1,145	0,965	1,345	1,420	1,144	1,777
Arrêt d'autobus à moins de 15m	0,987	0,801	1,206	0,996	0,747	1,375
<i>Termes non linéaires</i>						
Heure de la journée (edf)	4,939	3,081	6,217	1,239	1,000	2,926
Heure de la journée (p)	0,029	0,000	0,189	0,588	0,135	0,986
Position géographique (edf)	12,960	10,502	15,656	9,859	7,168	12,348
Position géographique (p)	0,000	0,000	0,000	0,057	0,001	0,273
Vitesse (edf)	4,963	4,229	6,148	2,858	2,268	3,406
Vitesse (p)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Prédicteurs						
Rue sans voie cyclable	<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>		<i>Réf.</i>	<i>Réf.</i>	
Chaussée désignée - rue locale	0,987	0,726	1,337	1,875	1,259	3,000
Chaussée désignée - rue collectrice	1,116	0,686	1,868	0,810	0,396	2,027
Bande cyclable - rue locale	2,083	1,547	2,929	1,616	1,028	2,737
Bande cyclable - rue collectrice	2,296	1,787	3,026	1,887	1,286	2,935
Bande cyclable - rue artérielle	1,178	0,864	1,624	0,530	0,335	0,873
Toutes pistes protégées	0,519	0,430	0,632	3,052	2,368	3,982
Qualité d'ajustement						
R carré (ajusté)	0,147	0,126	0,170	0,138	0,106	0,173
Déviante expliquée	0,136	0,119	0,155	0,145	0,117	0,174

Note : les valeurs en gras sont significatives au seuil de 5%.

La position géographique (Figure 5.5) affecte significativement la probabilité de conflit uniquement avec un véhicule (edf = 12,960, $p < 0,001$) : la probabilité de conflit est à son sommet dans les quartiers centraux (0,25), puis diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne en banlieue (-0,22). Enfin, il est intéressant de s'attarder à l'effet de la vitesse sur la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule et avec un·e piéton·ne (edf = 4,963, $p < 0,001$; edf = 2,858, $p < 0,001$). En dessous de

10 km/h, la vitesse est associée avec une probabilité de conflit plus petite. À mesure que la vitesse augmente, son effet réducteur s'évapore, jusqu'à ce que la probabilité de conflit atteigne un niveau stable, approximativement à 15 km/h pour les conflits avec véhicule et 20 km/h pour les conflits avec piéton. Au-delà de ces seuils, l'effet de la vitesse sur la probabilité de vivre un conflit est constant et oscille autour de zéro, ce qui signifie que la vitesse n'a plus un effet significatif sur la probabilité de vivre un conflit. Ceci étant dit, nos résultats ne concernent pas la gravité des conflits, une variable que l'on sait influencée par la vitesse du cycliste (Stipancic et al. 2016).

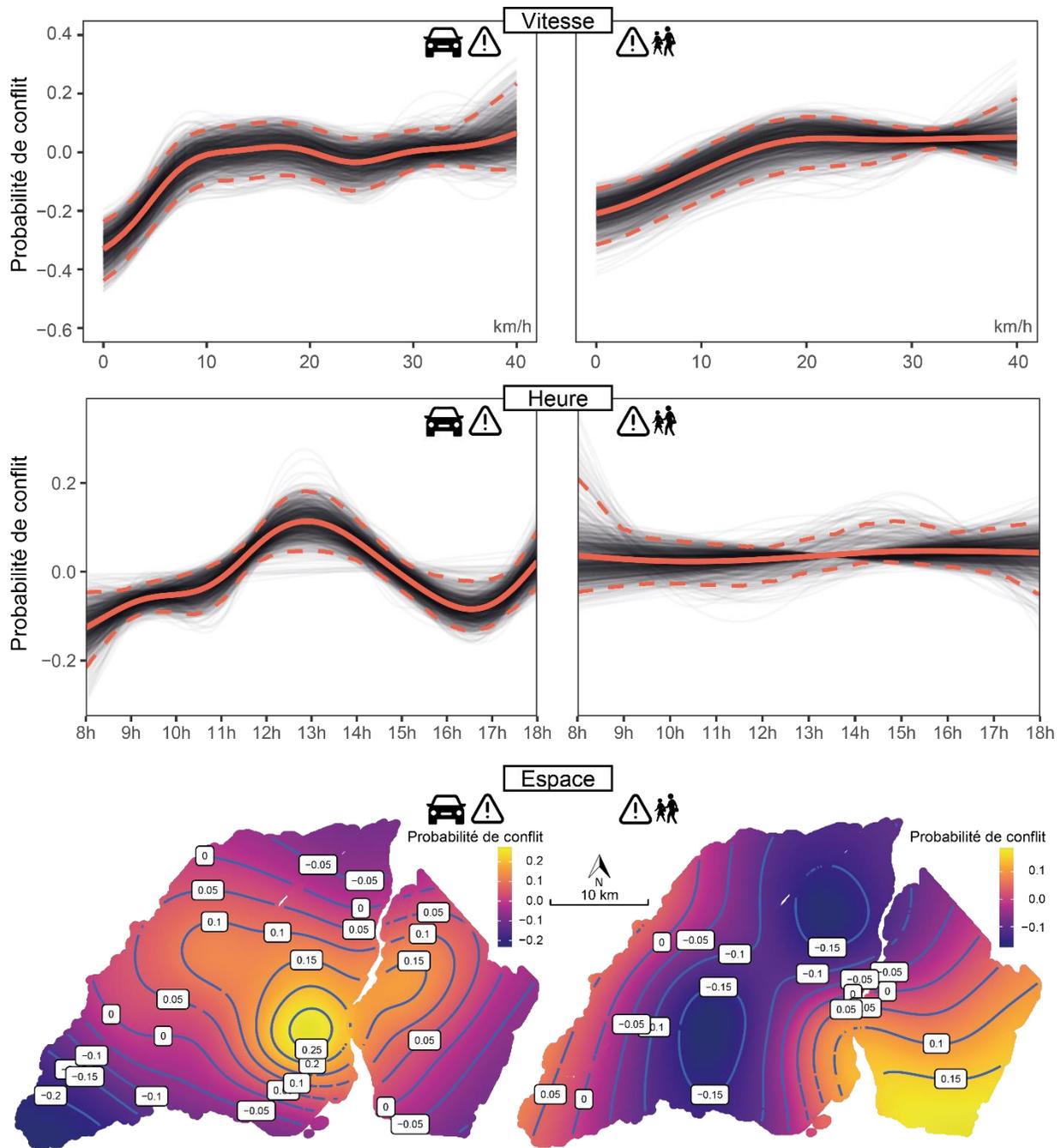


Figure 5.5 Effets de la vitesse, de l'heure de la journée et de l'espace sur la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule et avec un-e piéton-ne

Les modèles montrent que certains types de voie cyclable influencent significativement la probabilité de vivre un conflit (Tableau 5.5). Circuler sur une chaussée désignée sur rue locale ou collectrice n'a pas d'effet sur la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule. Par contre, si la chaussée désignée est située sur une rue locale, la probabilité de conflit avec piéton-ne est plus

élevée (RC = 1,875, IC [95%] = 1,259—3,000). Sur une bande cyclable de rue locale ou collectrice, la probabilité de conflit est plus de deux fois plus élevée que sur une rue sans voie cyclable (RC = 2,083, IC [95%] = 1,547—2,929 ; RC = 2,296, IC [95%] = 1,787—3,026). La probabilité de conflit avec un·e piéton·ne y est également plus élevée, mais l'effet est de moindre ampleur (RC = 1,616, IC [95%] = 1,028—2,737 ; RC = 1,887, IC [95%] = 1,286—2,935). Sur une bande cyclable de rue artérielle, la probabilité de conflit avec véhicule n'est pas différente d'une rue sans voie cyclable, par contre, la probabilité de conflit avec piéton·ne est approximativement deux fois plus faible (RC = 0,530, IC [95%] = 0,335—0,873). Enfin, les pistes protégées ont un effet paradoxal : la probabilité de conflit avec un véhicule y est grandement réduite (RC = 0,519, IC [95%] = 0,430—0,632), par contre, cela se fait au prix d'une probabilité de conflit avec un·e piéton·ne plus de trois fois plus élevée (RC = 3,052, IC [95%] = 2,368—3,982).

Les modèles de conflit servent ensuite à prédire la probabilité de conflit avec véhicule et avec piéton·ne pour chaque tronçon, de manière analogue à ce qui a été fait pour le bruit et pour la pollution. Du côté des conflits avec véhicules, les bandes cyclables de rues locales et collectrices se distinguent avec de fortes probabilités de conflit (Figure 5.6). À l'inverse, sur les pistes protégées, les probabilités de conflit sont beaucoup plus faibles. Sur la carte, on remarque que plusieurs des tronçons ayant une probabilité élevée de conflit se trouvent dans les quartiers centraux de Montréal.

Les prédictions de conflit avec piéton·ne présentent une tendance inverse à celle des conflits avec véhicule (Figure 5.6). Sur une chaussée désignée de rue collectrice et sur une bande cyclable de rue artérielle, les niveaux y sont à leur plus faible. Par contre, sur les pistes protégées, la probabilité de vivre un conflit est très élevée. La carte fait ressortir l'agglomération de Longueuil comme ayant plusieurs voies cyclables avec une forte probabilité de conflit avec piéton·ne.

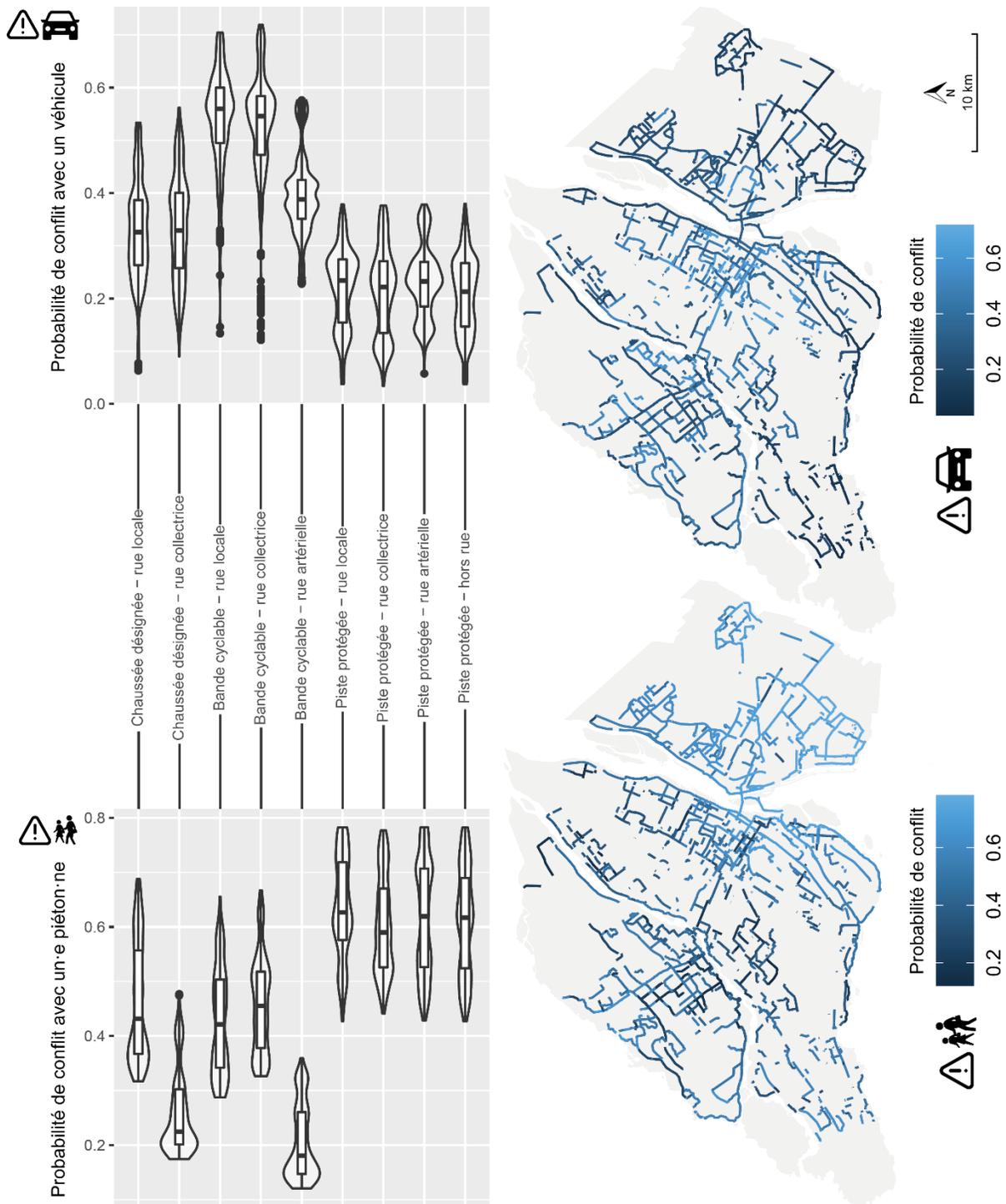


Figure 5.6 Prédications de la probabilité de conflit avec un véhicule et avec un-e piéton-ne pour chaque tronçon cyclable

5.2 Classification des tronçons cyclables

5.2.1 Choix des paramètres

À titre de rappel, pour mettre en œuvre une classification spatiale floue, il convient de spécifier les paramètres suivants :

k	nombre de groupes
m	degré de flou
α	poids relatif de la composante spatiale par rapport à la composante sémantique
β	paramètre de généralisation
W	matrice de pondération spatiale

Ces paramètres peuvent avoir une influence sur la qualité de la classification, qui peut se mesurer à l'aide de plusieurs indicateurs. Premièrement, la part de l'inertie expliquée (variant de 0 à 100%) indique la performance de la classification. Deuxièmement, l'indice de Xie et Beni (1991) représente le ratio entre la ressemblance des observations au sein d'un groupe et la différence entre les groupes ; un indice de Xie et Beni plus faible représente donc une meilleure classification. Troisièmement, le critère de silhouette mesure la non-superposition entre les groupes ; on cherche donc ici à maximiser sa valeur. Quatrièmement, le critère d'incohérence sémantico-spatiale fait référence au degré de ressemblance d'une observation avec ses voisins, autant en termes de proximité spatiale que sémantique (Gelb et Apparicio 2021a).

Pour identifier les paramètres optimaux, nous avons testé plusieurs combinaisons de paramètres et vérifié leur effet sur les indicateurs de qualité de la classification. Ci-dessous sont présentés et décrits les résultats de ces tests (Figure 5.7).

Nombre de groupes ($k=4$)

Le but de notre classification est de résumer la plus grande part d'inertie possible avec le moins de groupes possible. Dans un certain sens, notre jeu de données comporte déjà des groupes, qui correspondent aux couples « type de rue et type de voie cyclable » (neuf groupes). On tente ainsi de regrouper certains tronçons de voies cyclables, qui au-delà de leur groupe initial (couple « type de rue et type de voie cyclable »), partagent des caractéristiques communes avec d'autres tronçons de voies cyclables, en ce qui a trait à leur performance selon les dimensions évaluées dans ce mémoire (exposition au bruit et à la pollution, état de la chaussée, probabilité de conflit avec véhicule et avec piéton·ne). Ainsi, nous avons retenu $k = 4$ pour notre classification, ce qui

permet de résumer 39,8% de la variance, tout en réduisant considérablement le nombre de groupes (qui est passé de neuf à quatre).

Degré de flou ($m=1,50$)

Le degré de flou permet de spécifier à quel point la distinction entre les groupes est marquée ou diffuse. Après avoir testé plusieurs valeurs, nous avons retenu $m = 1,5$ pour notre classification, ce qui donne un bon équilibre entre le pouvoir explicatif et la facilité d'interprétation.

Poids de la composante spatiale ($\alpha=0,60$)

La composante spatiale peut avoir un poids plus ou moins grand dans la création des groupes selon le paramètre α . Pour l'inertie expliquée, l'indice de silhouette et le critère de Xie et Beni, les meilleurs résultats sont obtenus lorsque $\alpha < 1,0$. L'augmentation du α a pour effet de réduire l'incohérence spatiale, par contre, l'essentiel du gain est réalisé à partir d'un α à 0,6. Ainsi, c'est cette valeur que l'on retiendra pour notre classification finale.

Paramètre de généralisation ($\beta=0,85$)

La version dite « généralisée » des algorithmes de classification spatiale floue, introduite par Gelb et Apparicio (2021a), permet d'améliorer la qualité de la classification en modifiant la façon dont la matrice d'appartenance est mise à jour entre chaque itération. En utilisant un β à 0,85, on obtient un indice de silhouette à 0,460, ce qui est légèrement inférieur à celui obtenu avec la version non généralisée de la classification spatiale (0,503). Par contre, cela permet d'améliorer considérablement plusieurs autres indicateurs, notamment l'indice de Xie et Beni, qui passe de 0,838 à 0,679, l'inertie expliquée, qui passe de 0,328 à 0,398, et l'incohérence spatiale, qui passe de 0,214 à 0,095.

Matrice de pondération spatiale (W)

La matrice de pondération spatiale permet de lisser spatialement les résultats de la classification. Ainsi, l'appartenance à un groupe d'un tronçon dont la classification est incertaine sera influencée par la classe à laquelle appartiennent ses voisins. Cela permet entre autres de réduire l'incohérence sémantico-spatiale, c'est-à-dire lorsque deux tronçons voisins appartiennent à deux classes différentes à cause de légères différences sémantiques. Dans le cas de notre classification, l'espace est déjà pris en compte lors des prédictions faites à l'aide des modèles statistiques (*spline* spatiale). L'information que l'on souhaite rajouter n'est donc pas relative aux

tendances régionales, mais bien uniquement aux voisinages locaux. On utilise donc une matrice de 'quasi-contiguïté', dans le sens où le voisinage est établi en fonction de la distance réseau au carré, jusqu'à un maximum de 20 mètres. Cela permet ainsi de tenir compte de certaines erreurs de numérisation du réseau, par exemple de voies cyclables, qui traversent un boulevard avec un terre-plein, mais dont le tronçon qui relie les deux voies du boulevard n'est pas codé comme étant une voie cyclable. Notez que la distance entre deux tronçons est calculée à partir de leurs extrémités, et que deux tronçons parfaitement contigus se voient attribuer une distance de 0,001 mètre, pour éviter des problèmes de division par zéro.

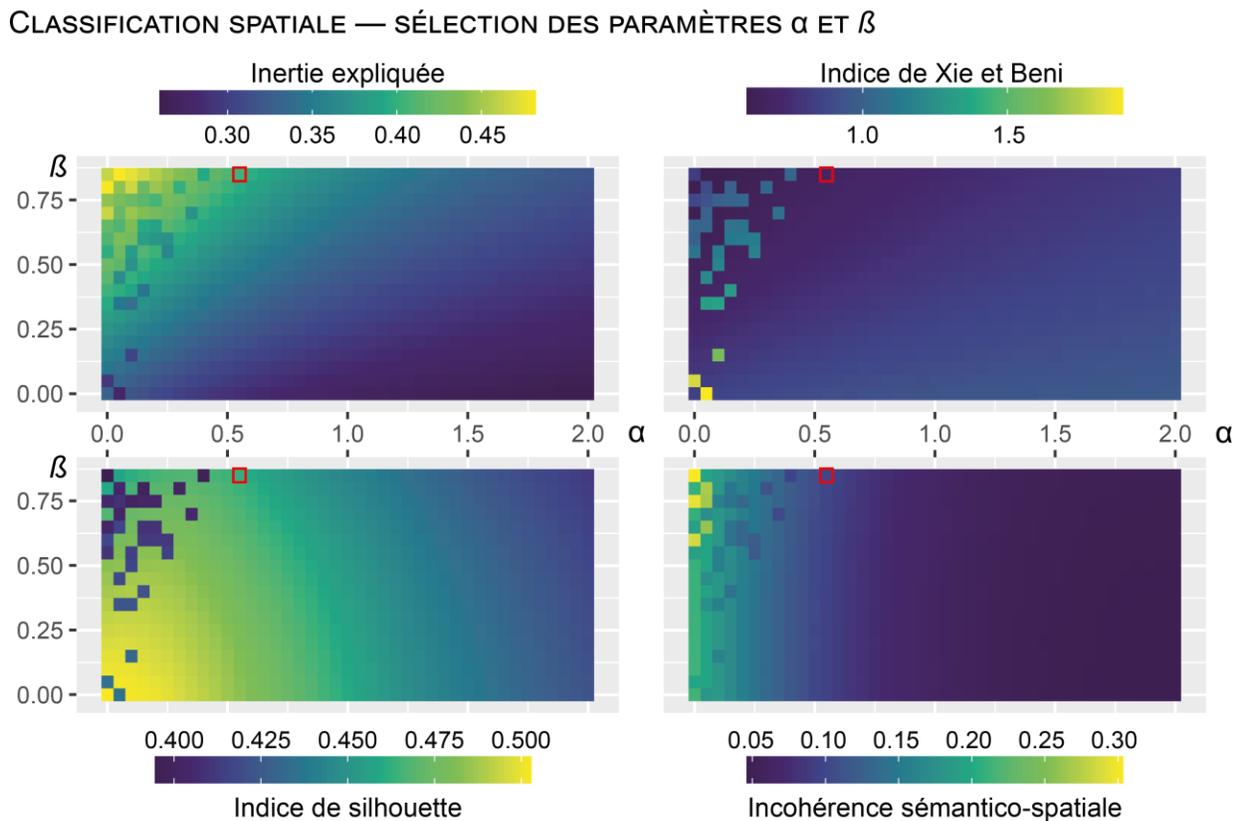
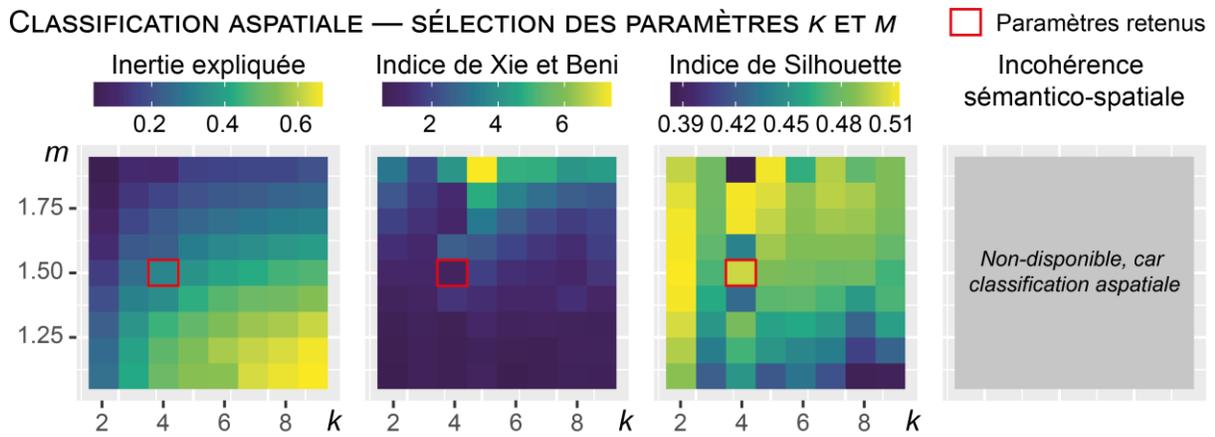


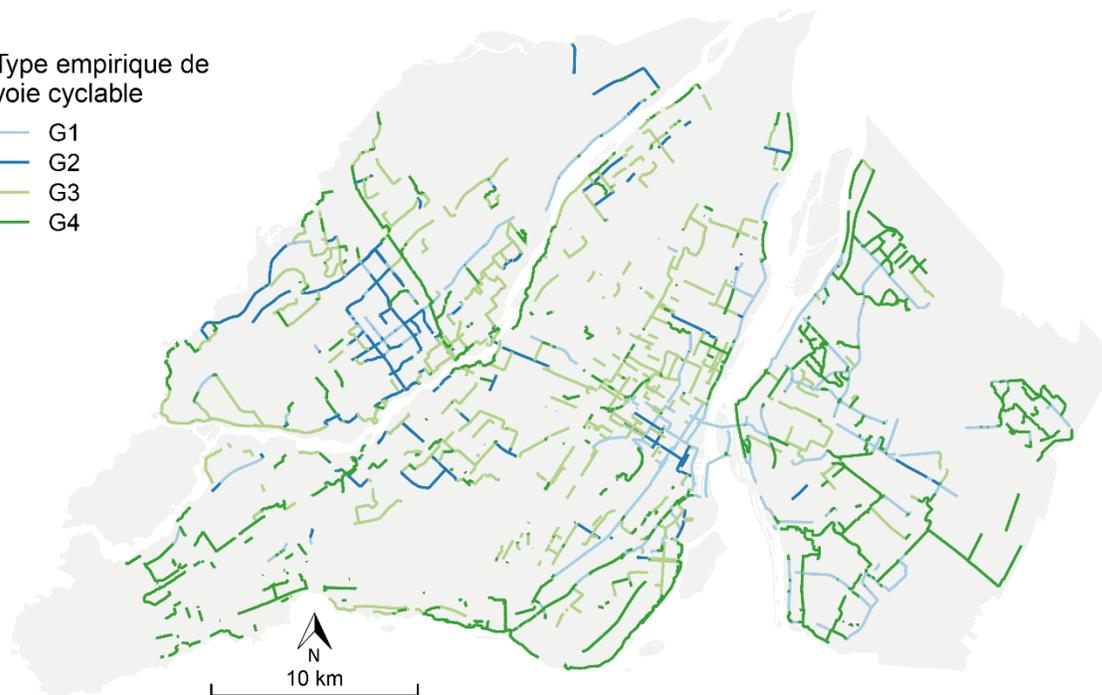
Figure 5.7 Effet des paramètres sur les indicateurs de qualité de la classification

5.2.2 Description des groupes

La Figure 5.8 montre les résultats de la classification spatiale floue : le groupe auquel chaque tronçon a le plus de chances d'appartenir (il s'agit d'une dichotomisation de la classification floue) et la probabilité d'appartenance de chaque tronçon à chaque groupe.

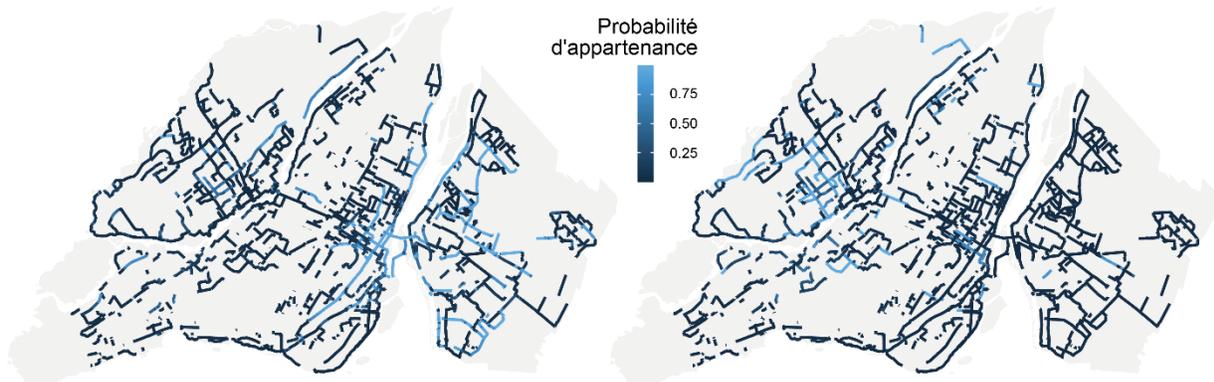
Type empirique de
voie cyclable

- G1
- G2
- G3
- G4



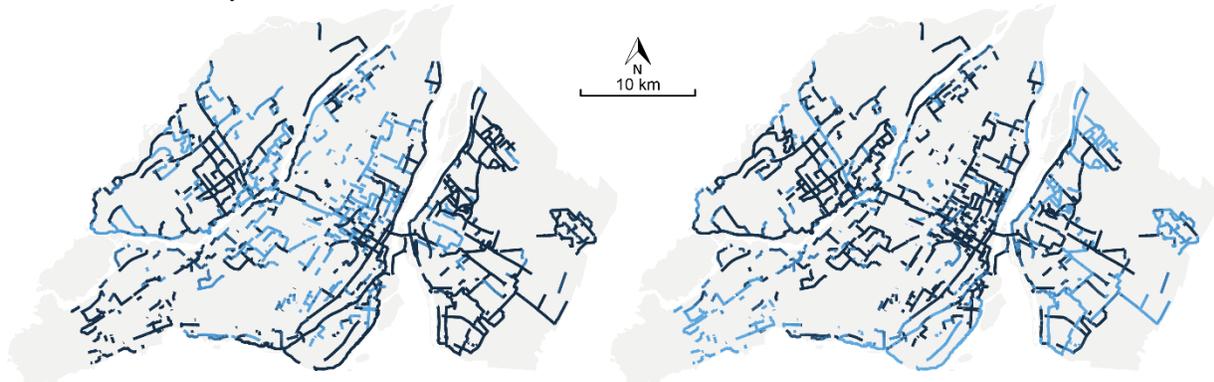
G1 : Les protégées de grandes rues

G2 : Les peinturées de grandes rues



G3 : Les peinturées de petites et
moyennes rues

G4 : Les protégées de parcs et
de petites et moyennes rues



Note : le carton du haut représente le groupe le plus probable de chaque tronçon cyclable. Les quatre cartons du bas représentent la probabilité de chaque tronçon d'appartenir à chaque groupe.

Figure 5.8 Appartenance des tronçons cyclables aux groupes de la classification

Groupe 1 : les protégées de grandes rues

On trouve dans ce groupe les pistes cyclables protégées physiquement du reste de la circulation qui se trouvent sur une artère ou sur certaines collectrices, ainsi que les pistes cyclables aménagées dans une emprise qui leur est propre mais qui se trouvent à moins de 15 mètres d'une rue importante (Tableau 5.7; 86,2% des pistes protégées sur artère appartiennent à ce groupe, contribution au χ^2 de 3341,6). Ce groupe est surreprésenté à Longueuil (Tableau 5.8; 567 tronçons appartiennent à ce groupe, alors qu'on se serait attendu à en observer 369 selon le hasard), mais il est aussi présent à Montréal et peu à Laval. Un exemple particulièrement parlant se trouve le long du boulevard de Rome à Brossard, ainsi que le long du boulevard de Maisonneuve ou de l'avenue Christophe-Colomb à Montréal (Figure 5.10).

La proximité à une grande artère expose les cyclistes à des niveaux élevés de bruit (0,49 écarts-types supérieurs à la moyenne) et de $PM_{2,5}$ (0,37 écart-type supérieur à la moyenne) (Tableau 5.6 et Figure 5.9). La chaussée de ces voies cyclables est en mauvais état (0,27 écart-type supérieur à la moyenne), tout comme c'est le cas pour l'autre groupe comportant des pistes protégées (groupe 4). La probabilité de conflit avec un véhicule est plus faible qu'ailleurs sur le réseau (0,36 écart-type inférieur à la moyenne), signe que la protection physique réussit à garder les véhicules en dehors de ces voies cyclables. Par contre, ces pistes attirent d'autres usagers de la route : la probabilité de conflit avec un·e piéton·ne est plus importante que sur les tronçons des autres groupes (0,88 écart-type supérieur à la moyenne).

Groupe 2 : les peinturées de grandes rues

Ce groupe rassemble la quasi-totalité des bandes cyclables sur artères (97,3%, contribution au χ^2 de 4965,2). Plusieurs de ces voies sont localisées à Laval (Tableau 5.8) ; la bande cyclable du boulevard Dagenais en est un bon exemple. On en trouve également quelques-unes à Montréal, par exemple, la bande cyclable de la rue Lajeunesse. Saint-Urbain fait également partie de ce groupe, par contre ses valeurs de bruit, de pollution et de probabilité de conflit avec un véhicule sont effarantes par rapport aux autres tronçons de son groupe.

La localisation de ces bandes cyclables sur des routes achalandées entraîne des niveaux de bruit très élevés (0,96 écart-type supérieur à la moyenne), davantage même que sur les tronçons du premier groupe. Les niveaux de particules fines ne le sont pas autant par contre ; pour la plupart

des voies cyclables qui appartiennent à cette catégorie, l'exposition aux $PM_{2,5}$ est inférieure à la moyenne (-0,43 écart-type). Ce n'est pas le cas des bandes cyclables sur artères de zones particulièrement polluées, par exemple, celle sur Saint-Urbain.

Les voies cyclables de ce groupe ont une chaussée généralement en bon état (0,23 écart-type inférieur à la moyenne), comme c'est le cas pour l'autre groupe de voies cyclables sur rue (groupe 3) (Figure 5.9 et Figure 5.10). La probabilité de conflit avec un véhicule est légèrement au-dessus de la moyenne (0,29 écart-type) : puisque la voie cyclable n'est pas protégée physiquement, certains véhicules l'utilisent illégalement pour effectuer certaines manœuvres, par contre, ce phénomène n'est pas aussi important que sur les bandes cyclables de rues locales et collectrices, là où on trouve de nombreux véhicules stationnés pour quelques instants (groupe 3). La probabilité de conflit avec un·e piéton·ne est quasi nulle (1,46 écart-type inférieur à la moyenne) ; peu de piéton·ne·s trouvent avantageux de circuler dans de telles conditions alors qu'un trottoir se trouve à proximité. Pour rappel, la proximité à un arrêt d'autobus est contrôlée dans les prédictions des modèles statistiques, ainsi, elle n'influence pas la présente classification.

Groupe 3 : les peinturées de petites et moyennes rues

Ce groupe est composé à 97,5% de tronçons de voies cyclables sans protection physique (c'est-à-dire, des chaussées désignées et des bandes cyclables) le long de rues locales et collectrices. On les trouve dans les quartiers centraux de Montréal (par exemple, sur le boulevard Édouard-Montpetit), mais également à Laval et à Longueuil.

Ces voies cyclables sont peu bruyantes (1,53 écart-type inférieur à la moyenne) et peu polluées (0,40 écart-type inférieur à la moyenne), malgré que certaines rues commerciales fassent figure d'exceptions dans ce groupe (Figure 5.9 et Figure 5.10). Leur chaussée est en bon état (0,32 écart-type inférieur à la moyenne), ce qui concorde avec les autres infrastructures cyclables sur rue (groupe 2). Par contre, la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule est très élevée (1,02 écart-type supérieur à la moyenne). Ce sont, par exemple, des bandes cyclables sur lesquelles plusieurs véhicules s'arrêtent momentanément pour effectuer des commissions, ou pour charger et décharger un véhicule – un phénomène qu'on observe moins fréquemment sur les tronçons du groupe 2, dont le contexte est moins favorable à ce type de manœuvre. La probabilité de conflit avec un·e piéton·ne se situe sous la moyenne (-0,46 écart-type), ceci étant dit, elle est plus élevée que sur les tronçons du groupe 2, lesquels se prêtent moins bien à la circulation piétonne hors trottoir.

Groupe 4 : les protégées de parcs et de petites et moyennes rues

Ce groupe est principalement composé de pistes protégées sur rues locales et collectrices, ainsi que de pistes protégées qui sont à plus de 15 mètres d'une rue (94,5% des pistes hors rue font partie de ce groupe, contribution au χ^2 de 1330,0). Un exemple typique est la piste du canal Lachine à Montréal, ainsi que plusieurs pistes protégées dans les parcs de Laval (contribution au χ^2 de 196,4) et de Longueuil (contribution au χ^2 de 330,5, soit la deuxième plus importante contribution du Tableau 5.8).

Les environnements dans lesquels se trouvent ces pistes cyclables sont beaucoup moins bruyants que la moyenne (-1,92 écart-type) ; l'exposition aux particules fines est légèrement sous la moyenne (-0,54) (Figure 5.9 et Figure 5.10). La probabilité de vivre un conflit avec un véhicule est très faible (0,71 écart-type inférieur à la moyenne), ce qui est logique vu la forme physique de ces voies cyclables. Le portrait est cependant gâché par deux éléments : la chaussée est en mauvais état (0,23 écart-type supérieur à la moyenne), et la probabilité de vivre un conflit avec un·e piéton·ne est très élevée (0,56 écart-type supérieur à la moyenne).

Tableau 5.6 Centres de gravité des groupes de la classification

Groupe	Bruit	PM2,5	Vibrations	Conflits avec véhicule·s	Conflits avec piéton·ne·s
1	0,49	0,37	0,27	-0,36	0,88
2	0,96	-0,43	-0,23	0,29	-1,46
3	-1,53	-0,40	-0,32	1,02	-0,46
4	-1,92	-0,54	0,23	-0,71	0,56

Les variables ont été centrées-réduites. Les valeurs affichées représentent donc des écarts-types par rapport à la moyenne (0).

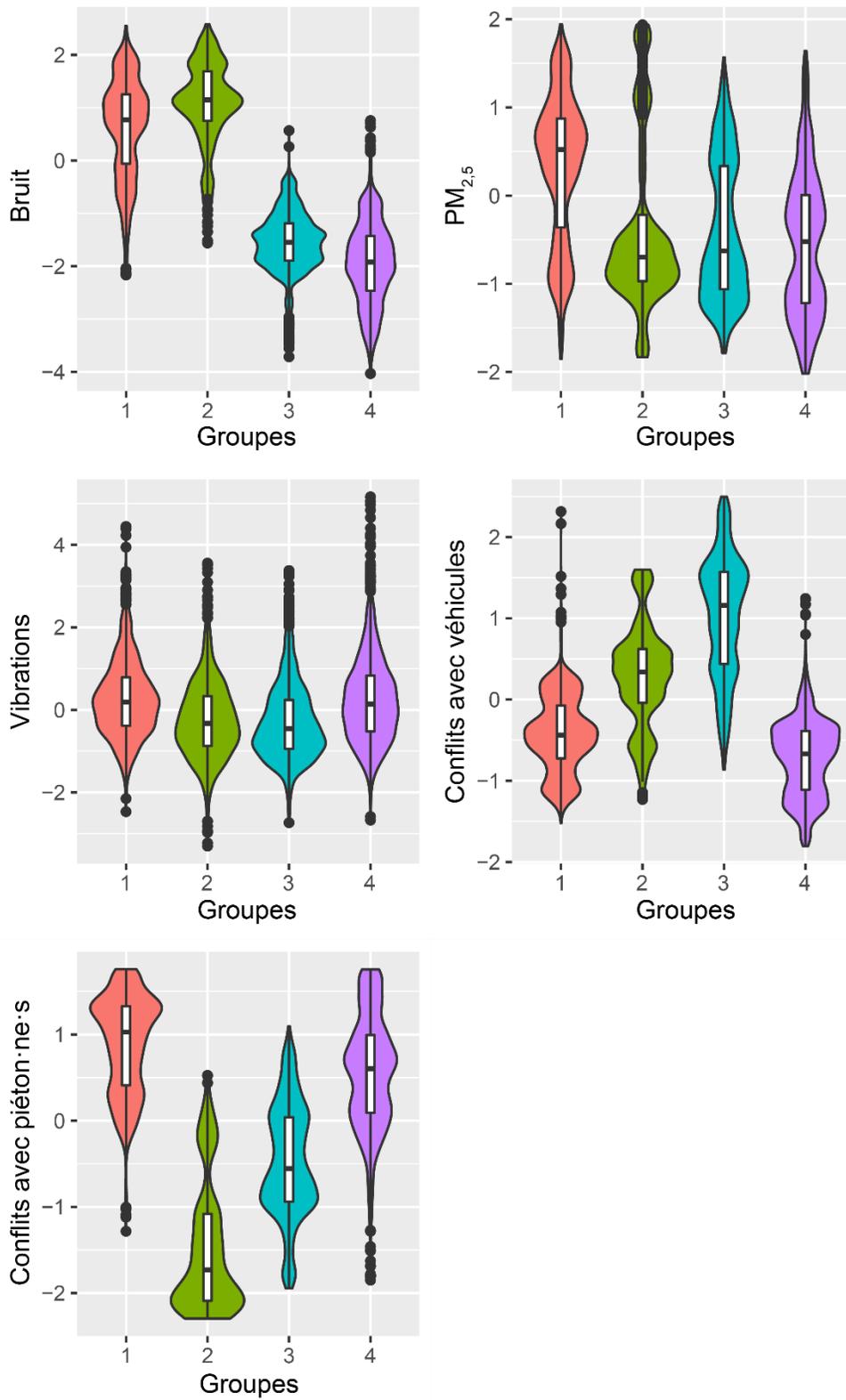
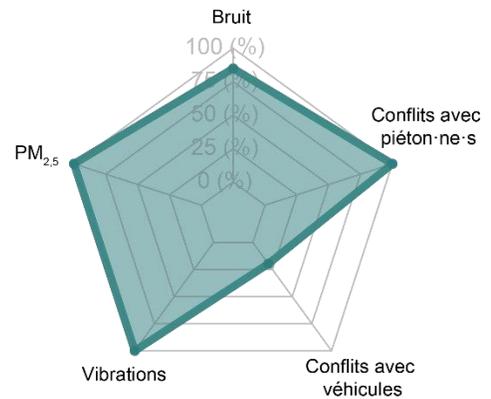
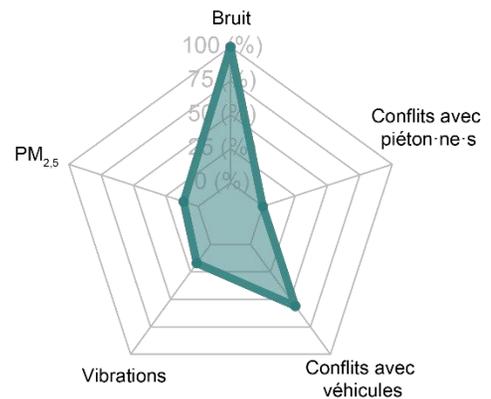


Figure 5.9 Distribution des variables au sein de chaque groupe

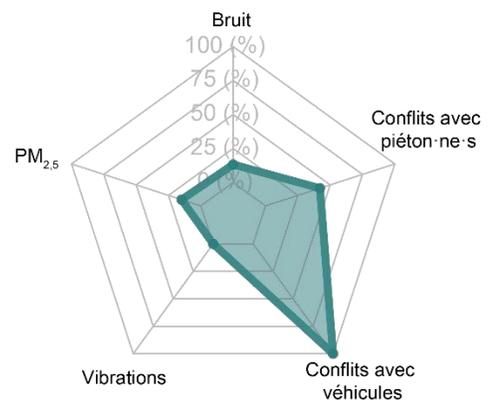
G1 : Les protégées de grandes rues



G2 : Les peinturées de grandes rues



G3 : Les peinturées de petites et moyennes rues



G4 : Les protégées de parcs et de petites et moyennes rues

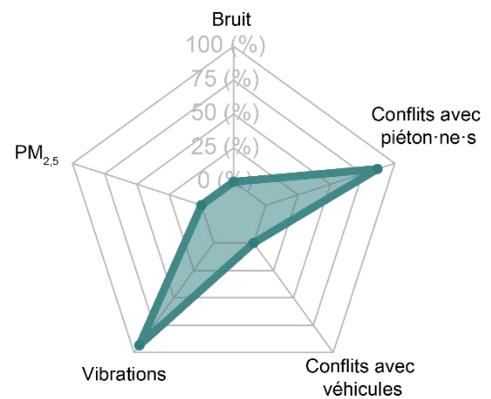


Figure 5.10 Exemples typiques des groupes de voies cyclables

Tableau 5.7 Associations entre le type empirique et le type officiel

Contenu d'une cellule

N
N attendu
Contribution au Khi carré
Proportion en ligne
Proportion en colonne
Proportion totale

Type officiel	Type empirique				Total (ligne)
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	
Bande cyclable sur artère	10	819	13	0	842
	151,419	103,192	291,576	295,812	
	132,08	4965,293	266,156	295,812	
	0,012	0,973	0,015	0,000	0,096
	0,006	0,764	0,004	0,000	
	0,001	0,094	0,001	0,000	
Piste protégée sur artère	1114	158	0	21	1293
	232,524	158,465	447,753	454,257	
	3341,586	0,001	447,753	413,228	
	0,862	0,122	0,000	0,016	0,148
	0,708	0,147	0,000	0,007	
	0,127	0,018	0,000	0,002	
Bande cyclable sur collectrice	1	8	1191	79	1279
	230,007	156,750	442,905	449,339	
	228,011	141,158	1263,58	305,228	
	0,001	0,006	0,931	0,062	0,146
	0,001	0,007	0,393	0,026	
	0,000	0,001	0,136	0,009	
Chaussée désignée sur collectrice	1	58	304	72	435
	78,227	53,312	150,636	152,824	
	76,24	0,412	156,141	42,746	
	0,002	0,133	0,699	0,166	0,05
	0,001	0,054	0,100	0,023	
	0,000	0,007	0,035	0,008	

Piste protégée sur collectrice	280	5	20	528	833
	149,801	102,089	288,46	292,65	
	113,162	92,334	249,846	189,269	
	0,336	0,006	0,024	0,634	0,095
	0,178	0,005	0,007	0,172	
	0,032	0,001	0,002	0,060	
Bande cyclable sur locale	1	16	801	31	849
	152,678	104,05	294	298,271	
	150,685	74,511	874,314	239,493	
	0,001	0,019	0,943	0,037	0,097
	0,001	0,015	0,264	0,010	
	0,000	0,002	0,092	0,004	
Chaussée désignée sur locale	14	6	661	404	1085
	195,119	132,974	375,725	381,183	
	168,123	121,244	216,6	1,366	
	0,013	0,006	0,609	0,372	0,124
	0,009	0,006	0,218	0,131	
	0,002	0,001	0,076	0,046	
Piste protégée sur locale	90	0	30	685	805
	144,766	98,658	278,764	282,813	
	20,718	98,658	221,992	571,948	
	0,112	0,000	0,037	0,851	0,092
	0,057	0,000	0,010	0,223	
	0,010	0,000	0,003	0,078	
Piste protégée hors rue	62	2	9	1253	1326
	238,459	162,510	459,181	465,851	
	130,579	158,534	441,357	1330,047	
	0,047	0,002	0,007	0,945	0,152
	0,039	0,002	0,003	0,408	
	0,007	0	0,001	0,143	
Total (colonne)	1573	1072	3029	3073	8747
	0,180	0,123	0,346	0,351	

$\text{Khi}^2_{\text{total}} = 6427,348 ; p < 0,001.$

Tableau 5.8 Associations entre le type empirique et l'agglomération

Contenu d'une cellule

N
N attendu
Contribution au Khi carré
Proportion en ligne
Proportion en colonne
Proportion totale

Agglomération	Type empirique				Total (ligne)
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	
Longueuil	567	39	238	1210	2054
	369,377	251,731	711,28	721,612	
	105,731	179,773	314,917	330,541	0,235
	0,276	0,019	0,116	0,589	
	0,360	0,036	0,079	0,394	
	0,065	0,004	0,027	0,138	
Laval	254	637	967	398	2256
	405,703	276,487	781,231	792,579	
	56,726	470,075	44,174	196,438	0,258
	0,113	0,282	0,429	0,176	
	0,161	0,594	0,319	0,130	
	0,029	0,073	0,111	0,046	
Montréal	752	396	1824	1465	4437
	797,919	543,782	1536,489	1558,809	
	2,643	40,162	53,799	5,645	0,507
	0,169	0,089	0,411	0,330	
	0,478	0,369	0,602	0,477	
	0,086	0,045	0,209	0,167	
Total (colonne)	1573	1072	3029	3073	8747
	0,180	0,123	0,346	0,351	

$Khi^2_{total} = 1800,625 ; p < 0,001.$

CHAPITRE 6 : DISCUSSION

Ce mémoire avait pour objectif d'évaluer la qualité des voies cyclables de Montréal, Laval et Longueuil. Cette discussion propose une interprétation plus approfondie des résultats et conclusions présentées dans les articles (chapitres 3 et 4) et dans le chapitre 5. D'abord, nous positionnons les résultats de chaque dimension par rapport à la littérature pertinente. Ensuite, nous comparons les typologies empiriques (obtenue par classification) et officielles (obtenues par le portail des données ouvertes) des voies cyclables. Nous traitons par ailleurs des implications de nos résultats en termes de planification urbaine. Enfin, nous évoquons les limites du projet de recherche.

6.1 Positionnement dans la littérature

6.1.1 Bruit et pollution

6.1.1.1 Exposition au bruit

Du côté du bruit, il convient tout d'abord de comparer les niveaux de bruit de la première collecte (2018, exploitée au chapitre 3) à ceux des deuxième et troisième collectes (juin et juillet 2019, exploitées au chapitre 5). Les niveaux moyens de bruit la collecte de 2018 (69,3 dB[A]) sont bien plus bas que ceux de la collecte de 2019 (72,5 dB[A]), ce qui est normal, vu que la collecte de 2018 a eu lieu presque exclusivement sur des voies cyclables.

Pour les modèles statistiques, la modalité de référence est dans les deux cas la moyenne des rues sans infrastructure cyclable (2018 : Tableau 3.4, 2019 : Tableau 5.2). Cependant, tel que spécifié ci-dessus, la moyenne de bruit de cette modalité de référence est bien plus faible pour la collecte de 2018 que pour les collectes de 2019. Ainsi, l'ensemble des coefficients sont décalés, cependant, la tendance qui s'en dégage n'en est pas affectée.

Les modèles reposant sur les données de 2018 et de 2019 montrent tous deux qu'au-delà du type de voie cyclable empruntée, c'est surtout le type de rue sur laquelle ou à proximité de laquelle le cycliste se trouve qui affecte l'exposition au bruit. En effet les niveaux de bruit les plus faibles se trouvent sur les chaussées désignées de rues locales (2018 : -1,75, $p < 0,001$; 2019 : -2,45,

$p < 0,001$) et sur les pistes protégées hors rue (2018 : -1,75., $p < 0,001$; 2019 : -2,60, $p < 0,001$). À l'inverse, les bandes cyclables sur artère (2018 : 1,74. $p < 0,001$; 2019 : 0,88, $p < 0,001$) et les pistes protégées sur artère (2018 [piste hors rue à proximité d'une artère] : 1,72, $p < 0,001$; 2019 : -2,597, $p < 0,001$) sont celles qui exposent les cyclistes aux plus forts niveaux de bruit.

Les patrons temporels semblent suivre la même tendance en 2018 (Figure 3.5) et en 2019 (Figure 5.1) : on distingue, dans les deux cas, un creux en milieu de matinée, vers 10h00-11h00, et un pic en après-midi (entre 15h00 et 16h00 pour la collecte de 2018, et entre 16h00 et 17h00 pour la collecte de 2019). Les patrons spatiaux diffèrent légèrement entre 2018 (Figure 3.6) et 2019 (Figure 5.1). En 2018, les plus hauts niveaux se trouvent dans les quartiers centraux de Montréal et au niveau du pont Jacques-Cartier, tout en ayant des niveaux plus élevés que la moyenne dans l'ouest de l'île de Montréal. En 2019, c'est plutôt au nord-ouest de la région que l'espace a le plus grand effet, malgré que les quartiers centraux de Montréal demeurent plus bruyants que les autres, toutes choses étant égales par ailleurs. Autant en 2018 qu'en 2019, les niveaux les plus faibles se trouvent aux franges du territoire étudié : à l'est de Longueuil, aux extrémités est et ouest de Montréal, et au nord de Laval. Enfin, sur une note plus générale, les deux modèles soulignent l'importance de contrôler les effets temporels et spatiaux pour mieux prédire l'exposition au bruit. Pour le reste de la discussion, nous ferons référence au modèle de 2019.

Les résultats du présent mémoire s'inscrivent en continuité de ceux rapportés dans le reste de la littérature et permettent d'apporter des nuances pertinentes. En effet, Apparicio et al. (2016) n'ont pas relevé de différences significatives entre les niveaux de bruit sur les chaussées désignées, les bandes cyclables et les rues collectrices. Cependant, l'ajout du type de rue en tant que variable d'interaction avec le type de voie cyclable, tel que réalisé dans le présent mémoire, permet de raffiner ce constat. En effet, les niveaux de bruit sur une chaussée désignée et sur une bande cyclable sont très dépendants du type de rue sur laquelle ces voies cyclables sont aménagées. Par exemple, sur une bande cyclable de rue locale, l'exposition au bruit est 2,22 dB(A) ($p < 0,001$) plus bas que sur une rue sans voie cyclable ; par contre, si la même bande cyclable est située sur une rue artérielle, l'exposition au bruit serait au contraire 0,88 dB(A) ($p < 0,001$) plus élevée que sur une rue sans voie cyclable.

Dans Apparicio et Gelb (2020), les plus grandes réductions d'exposition au bruit sont associées aux pistes protégées de la classification d'OpenStreetMap : à Montréal, ces réductions s'élèvent à -6,32 dB(A) sur une *track or path* et -4,01 dB(A) sur une *cycleway*, par rapport à circuler sur une

rue artérielle. Les mêmes tendances s'observent pour les deux autres villes comparées dans l'article, soit Copenhague et Paris. Nos résultats confirment également ceux obtenus par Minet et al. (2018), qui indiquent que l'exposition des cyclistes au bruit augmente à mesure que l'on se rapproche d'une artère majeure. Les niveaux les plus faibles rapportés dans leur étude se situent d'ailleurs sur des pistes hors rue et sur des rues locales.

6.1.1.2 Exposition à la pollution

Du côté de la pollution, les résultats du présent mémoire nous montrent essentiellement que l'exposition aux particules fines $PM_{2,5}$ est généralement plus faible sur le réseau cyclable que sur des rues sans voie cyclable. Par contre, certaines voies cyclables réussissent mieux que d'autres à réduire cette exposition : les pistes protégées hors rue et sur rues locales et collectrices, ainsi que les voies cyclables non protégées (chaussées désignées et bandes cyclables) sur petites et moyennes rues réduisent d'environ $0,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la concentration de $PM_{2,5}$, tandis que les voies cyclables situées sur des rues artérielles réduisent d'à peine environ $0,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à une rue sans voie cyclable.

Ces résultats concordent avec ceux présentés ailleurs dans la littérature. À Montréal, Apparicio et al. (2016) ont montré que les pistes sur rue ont pour effet de réduire significativement l'exposition au NO_2 par rapport aux rues collectrices. Cet effet est presque significatif pour les pistes hors rue également. Dans leur étude à Boston, MacNaughton et al. (2014) ont mesuré des niveaux plus faibles de NO_2 et de carbone noir (*black carbon*) sur les pistes cyclables hors rue que sur des bandes cyclables sur la chaussée. Kendrick et al. (2011) ont comparé en temps réel des mesures de particules ultrafines (UFP) prises de part et d'autre de véhicules stationnés : une mesure à gauche de la bande de stationnement, dans la rue, et une autre mesure à droite de la bande de stationnement, dans la piste cyclable. Leurs résultats montrent que la concentration de particules ultrafines est significativement plus faible du côté de la piste cyclable que du côté des autres voies de circulation. La même tendance est rapportée par Farrell et al. (2015) : les sentiers polyvalents et les rues locales réduisent significativement les concentrations de particules ultrafines et de carbone noir, et les pistes séparées (l'équivalent, dans ce mémoire, des pistes protégées sur rue ou à moins de 15 mètres d'une rue) réduisent significativement la concentration de carbone noir uniquement. Dans une étude menée à Toronto, les niveaux de particules ultrafines et de carbone noir les plus faibles sont également sur des sentiers polyvalents, qui sont souvent situés à l'écart des artères (Minet et al. 2018). Par contre, les niveaux les plus élevés se trouvent sur les pistes

protégées sur rue. Les auteur·e·s expliquent ce résultat par la localisation de ces pistes, souvent aménagées à proximité d'importantes artères. De plus, la séparation physique de ces pistes est souvent minimaliste (délinéateurs, légère surélévation de la voie, etc.) et ne permet donc pas de réduire l'exposition comme pourrait le faire une rangée de véhicules stationnés (Kendrick et al. 2011).

6.1.2 État de la chaussée

L'état de la chaussée, dans ce mémoire, est une version ajustée et inversée du DCI présentée par Bíl, Andrášik et Kubeček (2015) : ajustée, car elle tient compte de la vitesse du·de la cycliste lors de l'échantillonnage, et inversée, pour qu'elle représente l'inconfort plutôt que le confort, de manière à ce que l'échelle soit cohérente avec celles des autres indicateurs de qualité des voies cyclables présentés dans ce mémoire.

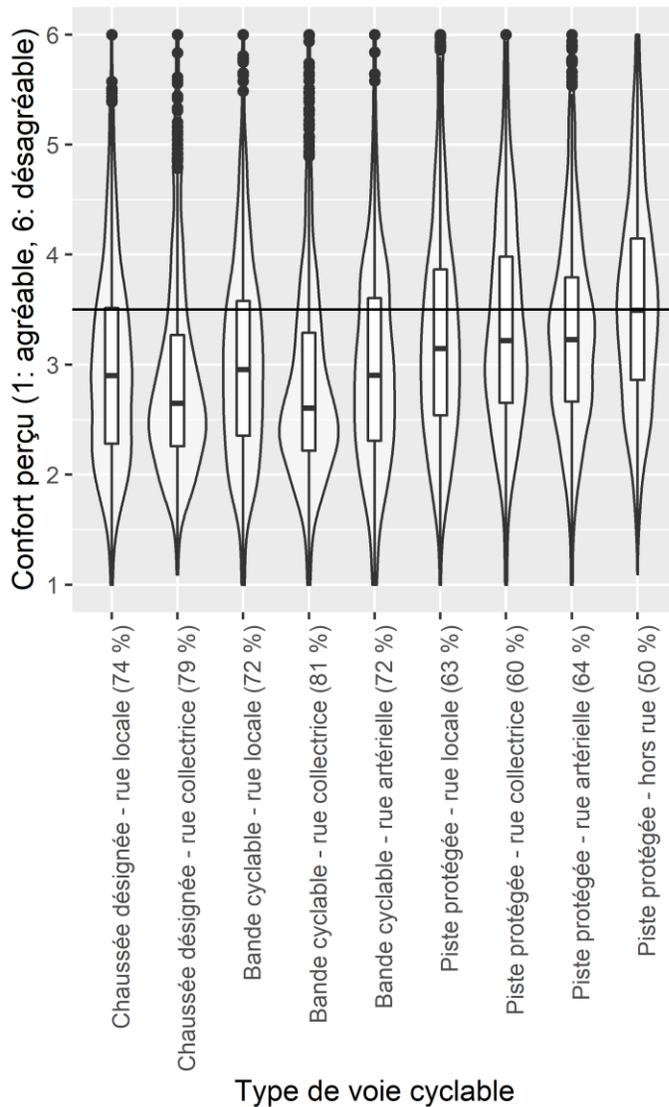
D'abord, le modèle de contrôle de la vitesse et de l'effet du·de la participant·e est cohérent avec la modélisation de l'effet de la vitesse sur les valeurs de DCI par Bíl, Andrášik et Kubeček (2015) : plus la vitesse augmente, plus les vibrations enregistrées sont importantes, ce qui conduit à une diminution de l'indicateur d'état de la chaussée (DCI). Bíl, Andrášik et Kubeček (2015) ont utilisé un modèle linéaire, tandis que nous avons utilisé un modèle additif. Cela nous a permis d'identifier des variations non linéaires de l'effet de la vitesse sur le DCI, cependant, ces variations sont minimales et suivent globalement une tendance linéaire. L'utilisation d'un modèle de correction de l'effet de la vitesse et du·de la participant·e a l'avantage de pouvoir réaliser une collecte de données avec plusieurs participant·e·s et d'utiliser les données de vibrations peu importe la vitesse de circulation, plutôt que de contraindre les personnes qui échantillonnent à circuler à une vitesse fixe — ce qui est peu réaliste en milieu urbain.

Ensuite, dans l'élaboration de leur indicateur d'état de la chaussée (DCI), Bíl, Andrášik et Kubeček (2015) ont comparé leurs résultats de DCI avec des réponses à un sondage de perception de confort des cyclistes. Il est donc possible de traduire les mesures de vibrations observées en expérience perçue de confort cycliste selon la formule suivante :

$$y = 8,2196 - 8,3166x \quad (6.1)$$

y étant le degré d'accord avec l'énoncé suivant : « Circuler à vélo sur ce tronçon cyclable a été plaisant », sur une échelle allant de 1 (complètement d'accord) à 6 (complètement en désaccord),

x étant la médiane de DCI sur un tronçon donné. Nous avons donc exploré, pour chaque tronçon cyclable échantillonné lors de notre collecte, quelle aurait été la satisfaction des cyclistes selon la formule proposée par Bíl, Andrášik et Kubeček (2015). Puis, nous avons regroupé ces résultats par type de voie cyclable.



Notes : les mesures de confort perçu, allant de 1 (agréable) à 6 (désagréable), sont obtenues en utilisant la formule proposée par Bíl, Andrášik et Kubeček (2015), qui permet de faire la correspondance entre les mesures de DCI et la perception de confort d'un échantillon de cyclistes. Dans les cas où la valeur obtenue se situait en deçà de 1 ou au-delà de 6, la valeur a été ramenée à la borne la plus proche. La ligne horizontale représente le point d'équilibre, soit un état de la chaussée pour lequel les cyclistes ne trouveraient ni agréable, ni désagréable de circuler à vélo. Les pourcentages en parenthèses représentent la proportion de tronçons cyclables qui seraient considérés comme étant agréables par les cyclistes.

Figure 6.1 Confort perçu selon le type de voie cyclable

On voit d’abord que la majorité des tronçons cyclables de Montréal, Laval et Longueuil ont des niveaux qui seraient jugés satisfaisants par des cyclistes (68% des tronçons obtiennent une valeur de satisfaction inférieure à 3,5). Cependant, le portrait varie grandement d’un type de voie cyclable à l’autre. 81% des bandes cyclables de rues collectrices seraient jugées satisfaisantes, tandis que seulement 50% des pistes protégées hors rue restent en dessous de 3,5. Cela signifie que la moitié des pistes protégées hors rue ont une chaussée en si mauvais état que l’on s’attend à ce qu’un·e cycliste sur deux trouve désagréable d’y circuler à vélo. On comprend donc que les personnes qui choisissent d’emprunter ces voies cyclables le font un peu par dépit, ou en d’autres termes, pour satisfaire d’autres besoins que celui de circuler sur une chaussée en bon état. Les raisons qui peuvent expliquer ce mauvais état sont nombreuses et touchent probablement autant le génie civil et l’architecture de paysage (conception) que l’urbanisme (planification de l’entretien). Sans être exhaustive, la Figure 6.2 montre quelques exemples d’une piste en mauvais état.

Fissures, dommages et autres aspérités de la chaussée sur la piste des berges de Lachine



Figure 6.2 Exemple de mauvais état de la chaussée

On peut penser, notamment, aux besoins de se sentir en sécurité, et d’évoluer dans des environnements peu bruyants et pollués, qui sont effectivement comblés par plusieurs pistes « protégées de parcs et de petites et moyennes rues ». À l’inverse, on voit que les chaussées désignées et bandes cyclables ont plus de 70% de leurs tronçons qui devraient satisfaire les

cyclistes moyenne·e·s. Ainsi, ces voies cyclables sont plus attractives que les pistes protégées pour les personnes en quête de performance et d'efficacité, par contre, cela se fait au détriment des autres dimensions du mémoire (par exemple une probabilité de conflit plus élevée avec des véhicules, et dépendamment des caractéristiques des tronçons routiers à proximité, des niveaux de bruit et de pollution plus élevés).

6.1.3 Conflits

Il convient d'abord de comparer les modèles présentés dans l'article (chapitre 4, Table 4.3) et dans le mémoire (chapitre 5, Tableau 5.5). Même s'ils sont très similaires — la principale différence étant l'inclusion de la collecte de 2019 à Laval et Longueuil au jeu de données — quelques ressemblances et différences méritent d'être discutées.

D'une part, dans les deux modèles, la probabilité de conflit avec véhicule n'est pas affectée par la présence de chaussée désignée. Par contre, les chaussées désignées sur rues locales semblent être le théâtre de plus de conflits avec piéton·ne·s que les rues sans aménagement cyclable. La probabilité de conflit avec véhicule est plus grande sur les bandes cyclables de rues locales et collectrices, mais pas sur les rues artérielles. Dans le modèle du chapitre 4, la probabilité de conflit avec piéton·e est plus grande sur les bandes cyclables de rues collectrices. C'est également le cas dans le modèle du chapitre 5, à la différence que le coefficient est plus fort (chapitre 4 : 1,64, chapitre 5 : 1,89) et que les bandes cyclables de rues locales sont également significatives. Les bandes cyclables sur rues artérielles du modèle du chapitre 5 ont un effet dissuasif sur les piéton·ne·s, ce qui n'est pas le cas dans le modèle du chapitre 4. Ces différences observées dans les coefficients des bandes cyclables sont probablement dues à la configuration des bandes cyclables et à l'aménagement des rues à Laval et à Longueuil. En effet, plusieurs bandes cyclables se trouvent sur des rues locales sans trottoir, ce qui implique que les piéton·ne·s qui désirent circuler sur la chaussée doivent nécessairement emprunter la bande cyclable.

D'autre part, la classification des voies cyclables est légèrement différente : dans le chapitre 4, on distingue les pistes sur rue et hors rue, tandis que dans le chapitre 5, on a regroupé les pistes sur rue et hors rue en un seul groupe, soit les pistes protégées. Ce regroupement est dû aux différences de typologies utilisées dans les réseaux de Montréal, Laval et Longueuil. Cependant, aucune information ne semble être perdue dans ce regroupement : dans le modèle présenté au Table 4.3, toutes les variables de pistes sur rue et hors rue ont sensiblement le même effet sur la

probabilité de vivre un conflit avec un véhicule (entre 0,19 et 0,50) et avec un·e piéton·ne (entre 2,63 et 3,95). Au Tableau 5.5, la variable « toutes pistes protégées », qui rassemble les pistes sur rue et hors rue, a un effet similaire sur la probabilité de conflit avec véhicule (0,52) et avec piéton·ne (3,05). Ainsi, à la différence de l'exposition au bruit et à la pollution qui dépend surtout du type de rue et de la localisation géographique, la probabilité de conflit est surtout influencée par la présence de protection physique.

À noter que pour éviter des répétitions excessives, on ne reviendra pas sur les notions déjà abordées au chapitre 4. Pour plus de détails sur le positionnement de notre étude dans la littérature, sur l'utilisation des bandes cyclables par les automobilistes en tant qu'espace résiduel et sur la cohabitation parfois difficile avec les piétons sur les pistes protégées, la personne intéressée peut se référer à la section 4.4. À la section 6.2, on discutera des implications de planification urbaine de manière intégrée avec les autres dimensions.

En somme, les résultats de l'analyse des conflits mettent en évidence le paradoxe des pistes protégées : elles tiennent à l'écart les véhicules motorisés, mais elles attirent les piéton·ne·s. Ces pistes cyclables sont donc bien adaptées aux cyclistes qui souhaitent se balader de manière récréative, par contre, pour les cyclistes utilitaires — groupe que les planificateur·rices souhaitent voir croître — devoir contourner fréquemment des piéton·ne·s peut réduire considérablement l'efficacité des déplacements, et conséquemment l'attractivité de ce moyen de déplacement en ville.

6.1.4 Qualité des voies cyclables

Les outils existants d'évaluation de la qualité des voies cyclables permettent, en fonction des caractéristiques formelles des infrastructures (largeur de la chaussée, présence de stationnement, débits journaliers moyens annuels [DJMA], etc.) de prédire la qualité d'une voie ou d'un itinéraire cyclable (Parks et al. 2013 ; Pritchard, Frøyen et Snizek 2019). Notre approche se distingue des précédentes en intégrant des données issues de capteurs sur vélos instrumentés, pour produire des indicateurs très près de l'expérience des cyclistes.

D'autres auteur·e·s développent présentement des outils de ce type (Oliveira et al. 2020). Ce dernier article est celui qui ressemble le plus à notre approche, ceci étant dit, plusieurs éléments les différencient. D'abord, dans Oliveira et al. (2020), le concept a peu été opérationnalisé. Les données utilisées lors de la mise en œuvre sont issues de sources variées, qui ne sont pas

directement en lien avec l'expérience cycliste. Par exemple, les niveaux moyens de pollution utilisés sont ceux mesurés par des stations fixes avoisinantes, or on sait bien que les niveaux mesurés par des stations fixes sont souvent bien différents de ceux mesurés au niveau de la rue (Kaur, Nieuwenhuijsen et Colvile 2007). Il en va de même pour les niveaux de bruit. De plus, l'indice utilise plusieurs dimensions qui sont probablement plus propices aux villes des Suds que des villes comme Montréal, Laval et Longueuil, notamment l'indice de radiation UV, la luminosité et le taux de criminalité (Oliveira et al. 2020). Enfin, plutôt que de créer un indicateur synthétique, nous proposons dans ce mémoire une nouvelle typologie des voies cyclables, basée sur une méthode de classification floue avec composantes sémantique et spatiale.

6.2 Implications de planification

6.2.1 Sur quelles rues construire de nouvelles voies cyclables ?

Les résultats d'exposition au bruit et aux particules fines de ce mémoire, ainsi que ceux d'autres études (Minet et al. 2018 ; Farrell et al. 2015) montrent l'importance d'aménager les voies cyclables à l'écart des axes majeurs de circulation automobile, soit sur des rues locales ou en dehors du réseau routier. Alternativement, des aménagements cyclables peuvent être réalisés sur des artères s'ils s'accompagnent de mesures d'apaisement de la circulation (réduction du nombre de voies, de la vitesse permise, etc.). Lorsque le contexte s'y prête (par exemple, dans le cas des pistes protégées sur pont à caractère autoroutier, comme le pont Jacques-Cartier et le pont Champlain), des mesures de mitigation du bruit pourraient être installées pour améliorer l'expérience cycliste. Par exemple, sur le pont Champlain, l'écran antibruit qui est installé entre la piste polyvalente et les voies automobiles au niveau de l'île des Sœurs pourrait être prolongé pour protéger les cyclistes du bruit sur toute la longueur du pont. Par exemple, un aménagement similaire a mené à une réduction de 6 dB(A) sur une promenade pour piétons (King, Murphy et McNabola 2009). Il est possible que cela ait également l'effet de réduire les niveaux de pollution, comme l'ont observé Kendrick et al. (2011) de part et d'autre d'une rangée de stationnement.

6.2.2 Quels types de voie cyclable privilégier ?

Les pistes protégées sont souvent les préférées des cyclistes (Winters et al. 2011). Ce sont également celles qui ont fait la réputation de plusieurs villes cyclables nord-européennes (Furth

2012), et qui réduisent le plus les risques de collision (Teschke et al. 2012). Si elles sont bien aménagées, elles ont tout le potentiel de former un réseau cyclable de qualité et attrayant pour les cyclistes. Or, selon notre étude, les pistes protégées sont loin d'être des paradis. Quelques considérations s'imposent donc. Premièrement, nous avons montré que plusieurs pistes protégées sont localisées dans des environnements bruyants et pollués, ce qui est à éviter. Deuxièmement, plusieurs pistes protégées ont une chaussée en mauvais état. Ainsi, il importe de s'assurer, dès les premières étapes de planification, que l'entretien périodique de la chaussée soit prévu dans le financement. Troisièmement, nous avons montré que les pistes protégées sont efficaces pour réduire la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule. Cependant, les quelques conflits avec véhicule sur pistes protégées ont surtout eu lieu dans le contexte d'une intersection, là où la séparation physique est interrompue. Ainsi, il est primordial de s'attarder au traitement des intersections, pour que les conditions sécuritaires soient continues tout au long de la voie cyclable (NACTO 2019). Quatrièmement, la probabilité de vivre un conflit avec un·e piéton·ne est à son paroxysme sur ce type de voie cyclable. Conséquemment, il faut prévoir cet usage et s'assurer que l'aménagement d'une piste cyclable protégée s'accompagne d'une infrastructure pour piéton·ne·s et d'une signalisation claire sur la répartition de l'espace.

Les chaussées désignées et bandes cyclables, qui ne contiennent aucune séparation physique du reste de la circulation, ont quand même un rôle à jouer dans les réseaux cyclables. Premièrement, dans un contexte de vélorue (*bicycle boulevard*), il n'est pas nécessaire que les cyclistes aient un espace qui leur soit réservé (Walker et al. 2009). En effet, dans ce type d'aménagement, seuls les véhicules des riverain·ne·s peuvent circuler sur la rue, ainsi, les volumes de trafic sont minimales et ne justifieraient pas la construction d'infrastructures lourdes.

Enfin, l'intégration plutôt que la ségrégation des moyens de transport sur la chaussée est parfois préférable dans les contextes où la rue est un espace de vie plutôt qu'un espace de transit. Par exemple, les aménagements de type '*woonerf*' (rares en Amérique du Nord) donnent la priorité aux piéton·ne·s et permettent l'utilisation de l'espace de la rue pour d'autres fonctions que les déplacements, par exemple, le jeu, la socialisation et l'animation (Gharehbaglou et Khajeh-Saeed 2018). À Montréal, le programme des rues piétonnes et partagées est ce qui pourrait se rapprocher le plus de ce concept ; cependant, ce sont des aménagements surtout événementiels et saisonniers (Ville de Montréal 2021).

6.2.3 Retour historique

L'hétérogénéité des types de voies cyclables est d'abord le reflet des paradigmes successifs et concourants de planification des voies cyclables. La première piste cyclable de l'île de Montréal, construite en 1970 le long du canal Lachine (Houde, Apparicio et Séguin 2018), avait surtout des visées récréatives. Ainsi, elle a été construite à l'écart de la circulation automobile dans un environnement paisible. Des pistes cyclables similaires ont plus tard été construites sur certaines rues, par exemple, la piste cyclable du boulevard Maisonneuve, inaugurée en 2007 (Laforge 2017). Un autre courant influent a été celui des bandes cyclables peintes au sol : ce sont les infrastructures qui ont connu la plus importante croissance entre 1991 et 2016 et qui sont maintenant dominantes à Montréal (Houde, Apparicio et Séguin 2018).

Ainsi apparaissent certains groupes de voies cyclables : les pistes protégées de la première vague de planification (groupe 4, par exemple la piste du canal de l'Aqueduc) réussissent certes à éviter les conflits avec les véhicules et à faire évoluer les cyclistes dans des environnements peu bruyants et peu pollués, cependant, elles attirent également des piétons, qui souhaitent profiter de ces oasis urbaines, et faute d'entretien régulier malgré le temps qui passe, leur chaussée commence à être en mauvais état. Les pistes protégées qui ont été construites le long de grandes artères (groupe 1, par exemple le boulevard Maisonneuve et l'avenue Christophe-Colomb) souffrent des mêmes problèmes que les pistes de la première vague, en plus d'exposer leurs utilisateur·rice·s à des niveaux de bruit et de pollution élevés. Viennent ensuite les bandes cyclables sur petites et moyennes rues (groupe 3), qui ont l'effet pervers d'attirer encore plus de voitures à se stationner en double que s'il n'y avait pas de voie cyclable, tout en exposant les cyclistes à des niveaux moyens de bruit et de pollution. Les bandes cyclables de grandes rues (groupe 2) sont le théâtre de peu de conflits avec piéton·ne·s, leur chaussée est en bon état et les niveaux de pollution sont relativement faibles, par contre, le risque de conflit avec véhicule est moyen (mais non statistiquement significatif selon le modèle de prédiction présenté au Tableau 5.5) et les niveaux de bruit sont élevés.

6.2.4 À chacun·e son type

Aucun groupe de voies cyclables ne représente un idéal vers lequel tendre : chaque type empirique de voie cyclable présente ses avantages et ses inconvénients. Certains sont pollués mais peu bruyants, certains réussissent bien à protéger des conflits avec automobilistes, mais

cela se fait au détriment d'une augmentation des conflits avec piétons et d'une chaussée de moins bonne qualité. Les différents types de voie cyclable continueront d'exister et de répondre aux attentes de certaines personnes.

Par exemple, les cyclistes « intéressé·e·s mais inquiet·ète·s » de la classification de Portland (Dill et McNeil 2013), les « cyclistes de pistes cyclables » et certains « cyclistes du dimanche » de la classification de Damant-Sirois, Grimsrud et El-Geneidy (2014) seront peut-être heureux·ses à cohabiter avec de nombreux piéton·ne·s sur des pistes cyclables dont la chaussée est en mauvais état, mais qui sont séparées des voitures et dans des environnements peu bruyants et peu pollués. Certain·ne·s cyclistes dévoué·e·s auront peut-être envie d'emprunter ces pistes cyclables, lors d'une sortie à vélo avec des enfants durant la fin de semaine, même si durant leurs trajets de navettage iels n'emprunteront jamais ces pistes.

Au contraire, les « fort·e·s et téméraires », les « enthousiastes et confiant·e·s » (Dill et McNeil 2013) et les « cyclistes dévoué·e·s » (Damt-Sirois, Grimsrud et El-Geneidy 2014) vont peut-être privilégier des voies cyclables bruyantes et polluées, mais dont la chaussée est en bon état et qui répondent à leurs attentes d'efficacité des déplacements (dimension non évaluée dans ce mémoire). Il est également probable que ces cyclistes empruntent simplement la chaussée, en dehors du réseau cyclable, lorsque ces trajets sont plus efficaces, ou de manière systématique, dans certains cas où les voies cyclables sont congestionnées.

L'aménagement de pistes cyclables qui répondent aux attentes d'une grande diversité de cyclistes demeure néanmoins possible et souhaitable. Certains tronçons du Réseau express vélo (REV), à Montréal, en sont un bel exemple. Sur la rue Saint-Denis, de larges voies cyclables, séparées du reste de la circulation par des délinéateurs et par des mails de béton à certains endroits, permettent à des cyclistes de rouler à la fois rapidement et sécuritairement. Bien que la rue sur laquelle ces voies cyclables sont aménagées demeure une artère majeure pour Montréal, deux voies de circulation ont été retranchées pour l'aménagement du REV, ce qui contribue à réduire les niveaux potentiels d'exposition au bruit et à la pollution. Notons toutefois qu'il est important de prévoir un budget pour l'entretien de cette piste cyclable, pour éviter que sa chaussée ne devienne en mauvais état à l'instar de plusieurs autres pistes protégées.

Dans le même ordre d'idée, certains tronçons cyclables que nous avons échantillonnés se distinguent de leurs pairs. En effet, les groupes sont loin d'être homogènes. Par exemple, la nouvelle piste cyclable sur Donegani, juste à l'est du boulevard Des Sources, appartient au groupe des « protégées de parcs et de petites et moyennes rues ». Ce groupe est caractérisé par une

chaussée en mauvais état et une probabilité élevée de conflit avec piéton·ne. Or, la piste Donegani, qui vient juste d'être pavée, a une chaussée en excellent état, et par sa position géographique et sa configuration physique, une probabilité de conflit avec piéton·ne raisonnable. À l'opposé, la piste protégée de la rue Notre-Dame cadre très bien dans son groupe et représente bien l'archétype de la « protégée de grandes rues », dans un environnement très bruyant et pollué, avec une chaussée en état lamentable, et une probabilité de conflit avec piéton·ne élevée.



Figure 6.3 Cas d'exceptions : l'excellent et le mauvais état

6.2.5 Typologies formelle et empirique

Les typologies formelles des voies cyclables, produites principalement par les municipalités et les organismes de promotion du vélo, se basent généralement sur la forme des infrastructures cyclables. En d'autres termes, elles tiennent compte de l'ampleur de la séparation avec les véhicules (peinture ou élément physique) et de la cohabitation avec d'autres usager·ère·s. Par exemple, on trouve typiquement dans les classifications une chaussée désignée (cohabitation avec véhicules, pas de séparation), une bande cyclable ou une piste cyclable (aucun·e autre usager·ère permis·e, séparation avec peinture ou avec élément physique) et un sentier polyvalent (cohabitation avec piéton·ne·s, séparé physiquement).

Ces typologies donnent certes une idée de ce à quoi ressemble une infrastructure cyclable donnée. Or, il est probable qu'une description d'un tronçon cyclable basée uniquement sur sa forme reflète mal l'expérience du·de la cycliste lorsqu'iel emprunte ce tronçon, puisque la qualité d'une voie cyclable est influencée par de nombreux facteurs. La typologie empirique des tronçons de voie cyclable, telle que présentée dans ce mémoire, permet de mieux décrire les tronçons, en rassemblant entre eux les tronçons qui partagent des caractéristiques semblables sur le plan de

dimensions évaluées empiriquement, et en intégrant les caractéristiques de la rue sur laquelle ou à proximité de laquelle la voie cyclable est installée. Cette évaluation empirique de la qualité des voies cyclables est inédite et apporte une information précieuse pour les personnes impliquées dans la planification des réseaux cyclables.

Par exemple, dans la classification empirique présentée dans ce mémoire, les pistes protégées ne se trouvent pas toutes dans le même groupe : celles qui sont à proximité ou sur une rue artérielle appartiennent au groupe des « protégées de grandes rues », tandis que celles qui sont sur une rue locale ou à plus de 15 mètres de tout tronçon routier sont dans la catégorie des « protégées de parcs et de petites et moyennes rues ». Cela permet d'effectuer une distinction importante entre les tronçons de piste cyclable situés le long de Christophe-Colomb (catégorie empirique des « protégées de grandes rues ») et les tronçons de piste cyclable situés le long du canal Lachine (catégorie empirique des « protégées de parcs et de petites et moyennes rues »), qui se trouvent pourtant dans la même catégorie formelle (« piste cyclable ou sentier polyvalent ») selon la carte des voies cyclables du Grand Montréal de Vélo Québec (2020a). À l'inverse, la classification empirique permet de regrouper dans une même catégorie empirique des tronçons appartenant à des types distincts selon la typologie officielle. Par exemple, plusieurs tronçons de chaussées désignées sur rue locale (catégorie officielle « voie cyclable sur rue »), surtout ceux dans les municipalités de banlieue, et plusieurs pistes protégées situées à plus de 15 mètres d'une rue (catégorie officielle « piste cyclable ou sentier polyvalent ») pourraient se trouver dans la même catégorie empirique de voies cyclables (les « protégées de parcs et de petites et moyennes rues »), puisqu'elles offrent un environnement de déplacement similaire aux cyclistes, soit peu de conflits avec véhicules, peu de bruit, peu de pollution, mais une probabilité de conflit avec un piéton plus élevée que la moyenne, surtout dans le cas des pistes protégées.

Bref, qu'elle soit utilisée à l'externe pour aider les cyclistes à mieux choisir leurs itinéraires, ou à l'interne pour aider à mieux planifier les extensions et réfections de réseau cyclable, la typologie empirique des voies cyclables présentée dans ce mémoire permet de mieux comprendre les éléments qui composent la qualité d'une voie cyclable.

6.2.6 Transfert de connaissances vers les partenaires

L'ensemble des résultats produits dans le cadre de ce mémoire seront transférés aux partenaires des villes de Montréal, Laval et Longueuil. Le fichier transféré aux partenaires est un fichier de

formes (*shapefile*) de lignes, contenant l'ensemble des tronçons cyclables échantillonnés. Ce format de fichier a été retenu, car il est peut être facilement manipulé dans R et dans n'importe quel logiciel de système d'information géographique (QGIS et ArcGIS entre autres). Le tableau des attributs contient donc, en lignes, chaque tronçon cyclable, et en colonnes, des identifiants (pour faire le lien avec les bases de données des partenaires), chaque indicateur de qualité des voies cyclables, ainsi que les résultats de la classification spatiale floue (typologie empirique des voies cyclables) (Tableau 6.1). Une activité de transfert de connaissances sera également organisée pour s'assurer que les partenaires s'approprient bien le jeu de données.

Tableau 6.1 Champs du jeu de données transmis aux partenaires

Champ	Description
Identifiants	
IDQ	Identifiant unique créé pour ce projet.
ID2020	Identifiant des voies cyclables à Montréal et Longueuil
ID_TRC	Identifiant des tronçons routiers à Montréal, Laval et Longueuil
OID_LVL	Identifiant principal des voies cyclables à Laval
GID_LVL	Identifiant alternatif des voies cyclables à Laval
Indicateurs de qualité	
d1_bruit	Prédiction de bruit
d1_PM25	Prédiction de particules fines PM _{2,5}
d2_vib	Mesure de vibrations (état de la chaussée)
d3_veh	Prédiction de probabilité de conflit avec véhicule
d3_pie	Prédiction de probabilité de conflit avec piéton·ne
Classification	
p1_PrGR	Probabilité d'appartenir au groupe 1 : « protégées de grandes rues »
p2_PeGR	Probabilité d'appartenir au groupe 2 : « peinturées de »
p3_PePMR	Probabilité d'appartenir au groupe 3 : « protégées de petites et moyennes rues »
p4_PrPPMR	Probabilité d'appartenir au groupe 4 : « protégées de parcs et de petites et moyennes rues »
type_emp	Groupe le plus probable, ou type empirique de voie cyclable

6.3 Limites des données et des méthodes

6.3.1 Structuration des données

Certaines imprécisions et incohérences demeurent dans les réseaux numériques de voies cyclables. Premièrement, les aménagements cyclables différenciés selon le sens de la circulation ont été intégrés selon le type dominant inscrit dans les fichiers de données ouvertes. Par exemple, sur l'avenue Laval, à Montréal, on circule dans un sens sur une chaussée désignée, et dans l'autre sur une bande cyclable. Pour nos analyses, ce tronçon est uniquement codé en tant que bande cyclable. Deuxièmement, les réseaux et typologies utilisés ne sont pas uniformes : pour la collecte

de 2018, nous avons utilisé la typologie de Adresses Québec, avec le réseau cyclable structuré par Houde, Apparicio et Séguin (2018), tandis que pour la collecte de 2019, nous avons utilisé les réseaux cyclables fournis par les trois villes. Ce choix, qui permet certes une meilleure transférabilité des données vers les administrations des villes, limite les comparaisons que l'on peut réaliser entre les villes et entre les collectes. Troisièmement, la nomenclature varie d'une région à l'autre en ce qui a trait à la signification des types de voies cyclables. Par exemple, une voie cyclable bidirectionnelle peinte au sol sur l'emprise d'une rue porte le nom de « piste sur rue » à Montréal, et de « bande cyclable » à Longueuil. Pour corriger ces problèmes, pour la collecte de 2019, nous avons recodé les types de voie cyclable en fonction de caractéristiques physiques ; malgré tout, il est certain que des erreurs de nomenclature subsistent.

6.3.2 Exposition au bruit et à la pollution

La résolution temporelle des sonomètres est d'une minute, ce qui limite considérablement les analyses que nous pouvons réaliser. En effet, il serait intéressant de vérifier les événements très bruyants et de courte durée (des bruits forts mais brefs), qui sont probablement plus dérangeants qu'un bruit uniforme. De plus, les fréquences sonores n'ont pas toutes le même effet sur l'ouïe.

Il en va de même pour les capteurs de pollution Aeroqual pour particules fines (PM), dont la résolution ne peut aller en deçà d'une observation par minute. De même, de nombreux autres facteurs auraient pu être intégrés à nos modèles d'exposition aux polluants. Par exemple, plusieurs auteurs ont utilisé des comptages de véhicules — en temps réel ou annualisés — dans leurs modèles (Kendrick et al. 2011 ; Hatzopoulou et al. 2013 ; Boogaard et al. 2009). Cependant, le pouvoir explicatif de ces variables de comptage est très limité, comme le constatent les auteurs mêmes de ces études. En effet, au-delà des volumes de trafic, la composition du trafic (par exemple, les motocyclettes, les automobiles, les camions légers, les véhicules lourds, etc.), le vent et les autres conditions météorologiques peuvent influencer grandement les concentrations mesurées de particules fines. Dans notre étude, nous avons intégré le type de rue (locale, collectrice, artérielle), la position géographique et l'heure de la journée, qui se sont révélés des proxys relativement bons et facilement accessibles des volumes de trafic. Une prochaine étude pourrait consacrer des ressources à la création d'indicateurs de trafic en temps réel, déclinés selon les types de véhicules, en utilisant les vidéos enregistrées par les caméras des cyclistes.

6.3.3 État de la chaussée

L'analyse des vibrations effectuée dans ce mémoire a été très sommaire. Il aurait été intéressant de vérifier plus en profondeur comment se répartissent spatialement les tronçons en mauvais état ; bref, à quels endroits prioriser les réfections de la chaussée, pour améliorer l'expérience des cyclistes et l'équité de l'accès à des voies cyclables en bon état. Ces analyses pourraient faire l'objet d'un article en soi, par contre dans le cadre de ce mémoire, l'intégration de l'état de la chaussée en tant que composante de la qualité globale des voies cyclables est bien suffisante. Il serait également possible de réaliser des collectes se concentrant spécifiquement sur l'état de la chaussée, en comparant l'efficacité de plusieurs méthodes de mesures. Par exemple, il serait intéressant de comparer différents types d'accéléromètres (notamment ceux des téléphones intelligents), à la manière de Litzenberger et al. (2018). D'autres technologies pourraient également être explorées, comme la détection par laser (LIDAR) qui permettrait d'obtenir des profils très précis des routes tenant compte de toute la largeur de la voie, et non uniquement de l'endroit où la roue du·de la participant·e a roulé (Guan et al. 2016). Enfin, tel que réalisé dans Bíl, Andrášik et Kubeček (2015), comparer les différentes mesures quantitatives d'état de la chaussée à des mesures qualitatives de perception du confort permettrait de mieux comprendre les éléments de l'état de la chaussée qui sont importants pour les cyclistes.

6.3.4 Sécurité routière

La gravité des conflits n'a pas été évaluée dans ce mémoire, malgré qu'elle pourrait ajouter des nuances précieuses à notre analyse de la sécurité routière. Dans ce mémoire, nous nous sommes attardés à l'occurrence des conflits, peu importe leur gravité, ce qui laisse certains angles morts. Par exemple, dans notre analyse, le fait de circuler sur une piste protégée réduit significativement la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule, ce qui suggère qu'elles sont plus sécuritaires que les autres voies cyclables. Or, nos données sont muettes sur la gravité des conflits. Ainsi, on ne peut écarter la possibilité que ces pistes cyclables soient dangereuses, car il existe la possibilité que les quelques conflits relevés sur ces pistes soient plus graves (par exemple, potentiel de blessure plus important, probabilité de collision plus élevée, etc.) que les nombreux conflits légers relevés sur les autres types de voie cyclable.

Dans notre étude, les conflits ont été identifiés par des compteurs indépendants qui ont visionné les vidéos enregistrées par les cyclistes. D'autres chercheur·se·s ont plutôt demandé aux cyclistes

d'identifier elleux-mêmes les conflits sur-le-champ (à l'aide d'un bouton installé sur le guidon), en plus d'attirer des compteur-se-s indépendant-e-s au visionnement de l'ensemble des vidéos a posteriori et de consulter les cyclistes si une interaction donnée méritait d'être considérée comme un conflit (Dozza et Werneke 2014). Cette approche a l'avantage de réduire les erreurs d'interprétation des manœuvres des cyclistes, en ayant accès aux intentions des cyclistes. Ces méthodes mériteraient d'être considérées pour de prochaines collectes à vélo, tout en restant réalistes quant à la charge mentale imposée sur les cyclistes, qui doivent avant tout penser à leur sécurité.

6.3.5 Qualité des voies cyclables

Tout d'abord, la période d'échantillonnage constitue une limite : elle permet de caractériser les réseaux cyclables en période de beau temps estival, qui correspond certes aux périodes où les voies cyclables sont les plus achalandées, mais qui ne représente qu'une partie de l'ensemble des conditions dans lesquelles les cyclistes évoluent à Montréal. En effet, certaines pistes cyclables sont parfois inondées, que ce soit dû à des fortes pluies ou aux crues printanières. De plus, les cyclistes sont de plus en plus nombreux·ses à continuer de se déplacer à vélo durant les mois hivernaux. L'absence de données concernant l'état des réseaux cyclables en période de pluie et en hiver est présentement due à des limites matérielles, puisque les appareils que nous possédons ne résistent pas à l'eau et au gel. De nouveaux appareils pourraient combler ce manque de connaissances. Par exemple, une étude récente a évalué les conditions routières pour cyclistes, en contexte hivernal, en Norvège (Fenre et Klein-Paste 2021).

D'autres dimensions relatives aux tronçons pourraient être intégrées dans des indicateurs de qualité des voies cyclables. Notamment, la température est susceptible de varier fortement d'une rue à l'autre et d'affecter le confort des cyclistes. En effet, en période de fort ensoleillement, le·la cycliste devra fournir un effort beaucoup plus intense s'iel circule sur une rue large et dépourvue de végétation (îlot de chaleur urbain) que s'iel circule sur une rue plus étroite et bénéficiant d'une canopée généreuse (Oliveira et al. 2020). Il serait également possible d'évaluer le pourcentage de canopée autour de chaque tronçon cyclable à l'aide d'indicateurs tels que le NDVI, souvent utilisé pour évaluer la couverture végétale de certains secteurs (Apparicio et al. 2013). Le taux de criminalité dans le quartier serait aussi une dimension à intégrer pour certaines villes, où les enjeux de sécurité vont au-delà des risques de conflit et de collision (Oliveira et al. 2020), ce qui n'est pas le cas dans la région montréalaise (Conroy et al. 2020). De plus, des variables relatives

aux débits, aux vitesses et aux types de véhicules motorisés (véhicules légers et lourds) pourraient être intégrées à de futurs indicateurs de qualité des voies cyclables, tout en s'assurant de ne pas créer de problèmes de multicollinéarité excessive avec les variables relatives au type d'axe et à la localisation géographique.

Ensuite, la qualité des intersections devrait être intégrée à toute démarche d'évaluation de la qualité des infrastructures cyclables. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons pu constater que les pistes protégées réduisent significativement la probabilité de conflit avec véhicule. Cependant, les quelques conflits observés avaient surtout lieu aux intersections. Ainsi, il serait intéressant de tester l'effet de la configuration des intersections sur la probabilité de vivre un conflit. Par exemple, Stipancic et al. (2016) notent que les intersections de pistes bidirectionnelles avec une rue sont compliquées à manœuvrer autant pour les cyclistes que pour les automobilistes, car elles impliquent de vérifier la présence d'usager·ère·s de la route à des endroits où l'on n'a pas l'habitude de regarder. À noter que puisque les intersections conformes au guide de la NACTO sont rares à Montréal, Laval et Longueuil, il faudrait s'assurer, lors de la planification de la collecte, de récolter suffisamment de données sur ce type d'infrastructure pour avoir assez d'observations pour la modélisation.

Notre étude évalue la qualité des voies cyclables à l'échelle du tronçon, ce qui est certes pertinent pour analyser les caractéristiques physiques et de localisation à considérer dans la conception et dans l'entretien des voies cyclables, mais qui n'informe pas sur la performance des voies cyclables à l'échelle du réseau. Or, des tronçons en excellent état peuvent se révéler inutiles s'ils sont mal connectés aux réseaux. Il serait intéressant d'analyser comment les tronçons de voie cyclables sont distribués, et comment ils s'articulent en réseau. Par exemple, il est probable que les pistes protégées du groupe 4 (les « protégées de parcs et de petites et moyennes rues ») soient peu connectées aux grands pôles et autres destinations populaires, et qu'elles ne contribuent pas à l'accessibilité, et qu'à l'opposé, les « peinturées de petites et moyennes rues », et les « peinturées de grandes rues », malgré tous leurs défauts, soient localisées dans des axes efficaces pour les cyclistes utilitaires (c'est-à-dire des axes reliant les principaux points d'origine et de destination des résident·e·s).

En amont de la qualité finale d'une voie cyclable, le processus ayant mené à sa construction, de la planification à la conception, peut affecter la qualité perçue d'une voie cyclable. Par exemple, à Portland, le plan de développement du réseau cyclable a fait l'objet d'une vaste entreprise de participation publique (City of Portland Bureau of Transportation 2010). À Montréal, le REV a fait

l'objet d'une maigre consultation publique de deux soirées (Ville de Montréal 2018), ce qui est tout de même davantage que l'absence de consultation à laquelle le public est habitué en matière de planification des infrastructures cyclables.

Enfin, la qualité de l'expérience cycliste regroupe des éléments qui vont bien au-delà des infrastructures cyclables. Il serait intéressant d'évaluer la corrélation entre un sondage réalisé auprès de cyclistes sur leur perception de qualité avec les indicateurs de qualité développés dans le présent mémoire. Aussi, plusieurs cyclistes trouveront leur compte dans des itinéraires sans voie cyclable mais qui répondent à d'autres besoins. Dans le même ordre d'idée, il est irréaliste de prévoir que chaque rue comporte un espace réservé pour cyclistes : certains types de rues se prêtent mieux à des aménagements de cohabitation qu'à des aménagements de ségrégation. Il est donc important de s'assurer que l'ensemble des voies routières soient, à un certain degré, praticables par des cyclistes, que ce soit par des mesures incitatives (éducation des automobilistes), réglementaires (distances minimales de dépassement, priorités de passage) et d'aménagement (conception de rues qui incite à partager la chaussée et à circuler à basse vitesse).

CONCLUSION

Ce mémoire avait pour objectif de déterminer comment varie l'exposition au bruit et à la pollution, l'état de la chaussée et la probabilité de vivre un conflit en fonction du type de voie cyclable empruntée, à Montréal, Laval et Longueuil.

Pour y parvenir, nous avons effectué trois collectes de données : une à l'été 2018 et deux à l'été 2019. Ces collectes sont effectuées par des cyclistes sur des vélos instrumentés, qui sont équipés de sonomètres, de capteurs de pollution, d'accéléromètres et de caméras vidéos.

Premièrement, les données de bruit et de pollution ont servi à construire des modèles généralisés additifs, qui permettent d'évaluer, toutes choses étant égales par ailleurs, l'intensité sonore et la concentration de polluants pour chaque tronçon cyclable du territoire d'étude. Deuxièmement, les données de vibrations, récoltées par l'accéléromètre, ont servi de base à la création d'un indice d'état de la chaussée pour chaque tronçon cyclable. Troisièmement, les conflits identifiés sur les vidéos enregistrées ont servi à la construction de modèles généralisés additifs qui permettent de prédire la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule et avec un·e piéton·ne.

Le modèle d'exposition au bruit a révélé que les niveaux varient surtout en fonction du type de rue sur laquelle ou à proximité de laquelle la voie cyclable se trouve. Les réductions les plus marquées sont du côté des pistes protégées hors rue et des chaussées désignées et bandes cyclables sur rues locales. À l'opposé, lorsque sur une bande cyclable ou une piste protégée de rue artérielle, le·la cycliste est davantage exposé·e au bruit que sur la moyenne des rues sans aménagement cyclable. Du côté des particules fines, l'exposition des cyclistes est surtout dépendante de la position géographique. Ceci étant dit, les voies cyclables ont quand même un effet significatif : elles contribuent toutes à réduire significativement l'exposition aux particules fines, certaines plus que d'autres. Les plus fortes réductions se trouvent du côté des pistes protégées hors rue, des chaussées désignées sur rues collectrices et des pistes protégées sur rues collectrices. Les bandes cyclables et les pistes protégées de rues artérielles réduisent elles aussi l'exposition aux particules fines, mais cet effet est de très petite ampleur.

L'analyse exploratoire de l'état de la chaussée a révélé plusieurs tronçons cyclables en particulièrement piètre état. Nous avons identifié que les pistes protégées sont en moins bon état que les bandes cyclables et que les chaussées désignées, ce qui est peut-être témoin d'un retard en matière d'entretien.

Du côté des conflits, les modèles ont révélé que la probabilité de vivre un conflit avec un véhicule est plus élevée sur les bandes cyclables que sur les rues sans aménagement cyclable. C'est un effet qui est surtout marqué sur les bandes cyclables de rues collectrices. Les pistes protégées sont efficaces pour réduire les conflits avec véhicule, par contre, elles augmentent grandement la probabilité de vivre un conflit avec un·e piéton·ne. Pour les cyclistes qui sont particulièrement sensibles aux conflits avec piéton·ne, l'endroit indiqué pour rouler est la bande cyclable de rue artérielle.

Enfin, une analyse intégrée de ces trois dimensions a été réalisée pour voir l'effet combiné des voies cyclables sur toutes ces dimensions. Pour ce faire, une méthode de classification floue avec composantes sémantique et spatiale a été appliquée à l'ensemble des tronçons cyclables de Montréal, Laval et Longueuil, pour lesquels nous avons une valeur attendue d'exposition au bruit et à la pollution, une valeur observée d'état de la chaussée, et une valeur attendue de probabilité de vivre un conflit avec un véhicule et avec un·e piéton·ne.

Cette classification a permis de distinguer quatre groupes, ou types empiriques, de voies cyclables. Les protégées de grandes rues se caractérisent par des niveaux élevés de bruit et de pollution, une chaussée en mauvais état, une faible probabilité de conflit avec véhicule et une probabilité élevée de conflit avec un·e piéton·ne. Les peinturées de grandes rues sont des bandes cyclables au bruit et à la pollution élevée, avec une chaussée en bon état, une probabilité moyenne de conflit avec véhicule, et une très faible probabilité de conflit avec piéton·ne. Les peinturées de petites et moyennes rues sont des bandes cyclables peu bruyantes, moyennement polluées, avec une probabilité élevée de conflit avec véhicule et une probabilité moyenne de conflit avec piéton·ne. Enfin, les « protégées de parcs et de petites et moyennes rues » ont des niveaux bas de bruit et de pollution, une chaussée en piètre état, une faible probabilité de conflit avec véhicule et une probabilité élevée de conflit avec piéton·ne.

Caractériser une voie cyclable n'est pas chose simple. Parmi les nombreuses dimensions que nous aurions pu évaluer, nous en avons retenu trois (exposition au bruit et à la pollution, état de la chaussée, probabilité de conflit). Aucun type de voie cyclable n'est parfait : certains réduisent significativement la probabilité de conflit avec véhicule, mais cela se fait au détriment d'une probabilité plus élevée de conflit avec piéton, d'une chaussée en moins bon état, et parfois même, d'une exposition plus grande au bruit et à la pollution. À l'inverse, d'autres réduisent la probabilité de conflit avec piéton·ne et ont une chaussée en bon état, par contre, cela se fait au détriment de niveaux élevés de bruit, et d'une probabilité plus élevée de conflit avec un véhicule. Ce constat

ne devrait toutefois pas nous laisser sombrer dans le cynisme : au-delà des groupes de voies cyclables, qui rassemblent les pistes selon des caractéristiques communes, certaines voies cyclables se démarquent.

La qualité des voies cyclables, évaluée de manière ponctuelle dans le cadre de ce mémoire, devrait faire l'objet de révisions périodiques, en intégrant d'autres dimensions au besoin. C'est une condition cruciale pour la démocratisation du vélo en ville.

BIBLIOGRAPHIE

- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). 1999. *Guide for the Development of Bicycle Facilities*. Washington, DC: AASHTO.
- Abad, Lorena et Lucas van der Meer. 2018. « Quantifying bicycle network connectivity in Lisbon using open data. » *Information (Switzerland)* 9 (11). Article. doi: 10.3390/info9110287.
- Aberg, Maria A. I., Nancy L. Pedersen, Kjell Torén, Magnus Svartengren, Björn Bäckstrand, Tommy Johnsson, Christiana M. Cooper-Kuhn, N. David Aberg, Michael Nilsson et H. Georg Kuhn. 2009. « Cardiovascular fitness is associated with cognition in young adulthood. » *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (49): 20906-20911. doi: 10.1073/pnas.0905307106.
- Angel-Domenech, Antonio, Alfredo García, Fernando Agustin-Gomez et Carlos Llorca. 2014. *Traffic conflict analysis using an instrumented bicycle on cycle tracks of Valencia*.
- Angevaren, Maaïke, Geert Aufdemkampe, Harald J. J. Verhaar, André Aleman et Luc Vanhees. 2008. « Physical activity and enhanced fitness to improve cognitive function in older people without known cognitive impairment. » *Cochrane Database of Systematic Reviews* (3). doi: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD005381.pub3>.
- Apparicio, Philippe, Mathieu Carrier, Jérémy Gelb, Anne-Marie Séguin et Simon Kingham. 2016. « Cyclists' exposure to air pollution and road traffic noise in central city neighbourhoods of Montreal. » *Journal of Transport Geography* 57: 63-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.09.014>.
- Apparicio, Philippe et Jérémy Gelb. 2020. « Cyclists' Exposure to Road Traffic Noise: A Comparison of Three North American and European Cities. » *Acoustics* 2 (1): 73-86. doi: 10.3390/acoustics2010006.
- Apparicio, Philippe, Jérémy Gelb, Mathieu Carrier, Marie-Ève Mathieu et Simon Kingham. 2018. « Exposure to noise and air pollution by mode of transportation during rush hours in Montreal. » *Journal of Transport Geography* 70: 182-192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.06.007>.
- Apparicio, Philippe, Jérémy Gelb et Marie-Ève Mathieu. 2019. « Un atlas-web pour comparer l'exposition individuelle aux pollutions atmosphérique et sonore selon le mode de transport. » *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Apparicio, Philippe, David Maignan et Jérémy Gelb. 2021. « VIFECO: An Open-Source Software for Counting Features on a Video. » *Journal of Open Research Software* 9 (1).

- Apparicio, Philippe, Thi-Thanh-Hiên Pham, Anne-Marie Séguin et Shawn Landry. 2013. « Équité environnementale et distribution spatiale de la végétation à l'intérieur et autour des îlots résidentiels à Montréal : une double iniquité ? » *Cahiers de géographie du Québec* 57 (161): 215-237. doi: <https://doi.org/10.7202/1024902ar>.
- Bassett, David R., John Pucher, Ralph Buehler, Dixie L. Thompson et Scott E. Crouter. 2008. « Walking, Cycling, and Obesity Rates in Europe, North America, and Australia. » *Journal of Physical Activity and Health* 5 (6): 795-814. doi: 10.1123/jpah.5.6.795.
- Bauman, Adrian E. 2004. « Updating the evidence that physical activity is good for health: an epidemiological review 2000–2003. » *Journal of Science and Medicine in Sport* 7 (1, Supplement 1): 6-19. doi: [https://doi.org/10.1016/S1440-2440\(04\)80273-1](https://doi.org/10.1016/S1440-2440(04)80273-1).
- Beck, Ben, Derek Chong, Jake Olivier, Monica Perkins, Anthony Tsay, Adam Rushford, Lingxiao Li, Peter Cameron, Richard Fry et Marilyn Johnson. 2019. « How much space do drivers provide when passing cyclists? Understanding the impact of motor vehicle and infrastructure characteristics on passing distance. » *Accident Analysis & Prevention* 128: 253-260.
- Berger, Elliott H. 2003. *The noise manual*. : Aiha.
- Bergeron, Ulysse. 2014-08-20. « Vélo, métro, boulot: combien ça coûte? » *La Presse*. <https://www.lapresse.ca/affaires/finances-personnelles/201408/19/01-4792885-velo-metro-boulot-combien-ca-coute.php>.
- Bigazzi, Alexander Y. et Miguel A. Figliozzi. 2014. « Review of Urban Bicyclists' Intake and Uptake of Traffic-Related Air Pollution. » *Transport Reviews* 34 (2): 221-245. doi: 10.1080/01441647.2014.897772.
- Bíl, Michal, Richard Andrášik et Jan Kubeček. 2015. « How comfortable are your cycling tracks? A new method for objective bicycle vibration measurement. » *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 56: 415-425. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.05.007>.
- Boisjoly, Geneviève, Ugo Lachapelle et Ahmed El-Geneidy. 2019. « Bicycle network performance: Assessing the directness of bicycle facilities through connectivity measures, a Montreal, Canada case study. » : 1-15.
- Boogaard, Hanna, Frank Borgman, Jaap Kamminga et Gerard Hoek. 2009. « Exposure to ultrafine and fine particles and noise during cycling and driving in 11 Dutch cities. » *Atmospheric Environment* 43 (27): 4234-4242.
- Brewer, Kimberley, Marika Egyed, Ling Huang, Benny Ling, Carlyn Matz et Mathieu Rouleau. 2016. Évaluation des risques pour la santé humaine des gaz d'échappement des moteurs diesel. sous la dir. de Bureau de la qualité de l'eau et de l'air. Ottawa: Santé Canada. <http://publications.gc.ca/site/fra/9.810908/publication.html>.

- Buehler, Ralph et Jennifer Dill. 2016. « Bikeway Networks: A Review of Effects on Cycling. » *Transport Reviews* 36 (1): 9-27. doi: 10.1080/01441647.2015.1069908.
- Buehler, Ralph et John Pucher. 2012. « International Overview: Cycling Trends in Western Europe, North America, and Australia. » In *City cycling*, sous la dir. de John Pucher et Ralph Buehler. Cambridge, MA: MIT Press.
- Buregeya, Jean-Marie, Philippe Apparicio et Jérémy Gelb. 2020. « Short-Term Impact of Traffic-Related Particulate Matter and Noise Exposure on Cardiac Function. » *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17: 1220. doi: 10.3390/ijerph17041220.
- CAA Québec. 2020. *Coûts d'utilisation d'un véhicule*. <https://coutsdutilisation.caa.ca/fr>.
- Calvey, James C., John P. Shackleton, Mark D. Taylor et Richard Llewellyn. 2015. « Engineering condition assessment of cycling infrastructure: Cyclists' perceptions of satisfaction and comfort. » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 78: 134-143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.031>.
- Cardinal, François. 2015-07-21. « Les aberrations du réseau cyclable de Montréal. » *La Presse*. <https://www.lapresse.ca/debats/201507/18/01-4886511-les-aberrations-du-reseau-cyclable-de-montreal.php>.
- Carvajal, Germán A., Olga L. Sarmiento, Andrés L. Medaglia, Sergio Cabrales, Daniel A. Rodríguez, D. Alex Quistberg et Segundo López. 2020. « Bicycle safety in Bogotá: A seven-year analysis of bicyclists' collisions and fatalities. » *Accident Analysis & Prevention* 144: 105596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105596>.
- Casey, Colleen, Stephen P. Mattingly, Jianling Li et James Williams. 2016. « Developing public health performance measures to capture the effects of transportation facilities on multiple public health outcomes. ». Tech Report. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/31585>.
- Cepeda, Magda, Josje Schoufour, Rosanne Freak-Poli, Chantal M. Koolhaas, Klodian Dhana, Wichor M. Bramer et Oscar H. Franco. 2017. « Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review. » *The Lancet Public Health* 2 (1): e23-e34. doi: [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(16\)30021-4](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(16)30021-4).
- Černá, Anna, Jan Černý, Federico Malucelli, Maddalena Nonato, Lukáš Polena et Alessandro Giovannini. 2014. Designing optimal routes for cycle-tourists. In *Transportation Research Procedia*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84959360939&doi=10.1016%2fj.trpro.2014.10.064&partnerID=40&md5=07c281a3c78d1bfa55d4dd21935096ef>.
- Charman, Nick, Nigel Edmonds, Marika Egyed, Liane Eng, Benny Ling, Carlyn Matz et Mathieu Rouleau. 2017. Évaluation des risques pour la santé humaine des gaz d'échappement des

- moteurs à essence. sous la dir. de Bureau de la qualité de l'eau et de l'air. Ottawa: Santé Canada. <http://publications.gc.ca/site/eng/9.846462/publication.html>.
- Chen, Peng et Qing Shen. 2016. « Built environment effects on cyclist injury severity in automobile-involved bicycle crashes. » *Accident Analysis & Prevention* 86: 239-246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.11.002>.
- City of Copenhagen. 2017. *Copenhagen City of Cyclists: Facts and Figures*. http://www.cycling-embassy.dk/wp-content/uploads/2017/07/Velo-city_handout.pdf.
- City of Portland Bureau of Transportation. 2010. Portland Bicycle Plan for 2030. Portland, OR. <https://www.portlandoregon.gov/transportation/44597>.
- Conroy, Shana, Cristine Rotenberg, Haringa McKenzie et Sarah Johnston-Way. 2020. *Série de profils sur les villes sûres : principaux indicateurs par région métropolitaine de recensement*. Ottawa: Statistique Canada. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/fr/pub/85-002-x/2020001/article/00001-fra.pdf?st=o4725RAr>.
- Copenhagenize Design Co. 2019. *The 2019 Index*. Consulté le 2021-03-29. <https://copenhagenizeindex.eu/>.
- Damant-Sirois, Gabriel, Michael Grimsrud et Ahmed El-Geneidy. 2014. « What's your type: A multidimensional cyclist typology. » *Transportation* 41 (6): 1153-1169.
- De Hartog, Jeroen Johan, Hanna Boogaard, Hans Nijland et Gerard Hoek. 2010. « Do the health benefits of cycling outweigh the risks? » *Environmental health perspectives* 118 (8): 1109-1116.
- Debnath, Ashim Kumar, Narelle Haworth, Amy Schramm, Kristiann C. Heesch et Klaire Somoray. 2018. « Factors influencing noncompliance with bicycle passing distance laws. » *Accident Analysis & Prevention* 115: 137-142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.03.016>.
- Deville Cavellin, Laure, Scott Weichenthal, Ryan Tack, Martina S. Ragetti, Audrey Smargiassi et Marianne Hatzopoulou. 2016. « Investigating the Use Of Portable Air Pollution Sensors to Capture the Spatial Variability Of Traffic-Related Air Pollution. » *Environmental Science & Technology* 50 (1): 313-320. doi: 10.1021/acs.est.5b04235.
- Dill, Jennifer et Theresa Carr. 2003. « Bicycle Commuting and Facilities in Major U.S. Cities: If You Build Them, Commuters Will Use Them. » *Transportation Research Record* 1828 (1): 116-123. doi: 10.3141/1828-14.
- Dill, Jennifer et Nathan McNeil. 2013. « Four types of cyclists? Examination of typology for better understanding of bicycling behavior and potential. » *Transportation Research Record* 2387 (1): 129-138.

- Dons, Evi, David Rojas-Rueda, Esther Anaya-Boig, Ione Avila-Palencia, Christian Brand, Tom Cole-Hunter, Audrey de Nazelle, Ulf Eriksson, Mailin Gaupp-Berghausen, Regine Gerike, Sonja Kahlmeier, Michelle Laeremans, Natalie Mueller, Tim Nawrot, Mark J. Nieuwenhuijsen, Juan Pablo Orjuela, Francesca Racioppi, Elisabeth Raser, Arnout Standaert, Luc Int Panis et Thomas Götschi. 2018. « Transport mode choice and body mass index: Cross-sectional and longitudinal evidence from a European-wide study. » *Environment International* 119: 109-116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.06.023>.
- Dorsch, Margaret M., Alistair J. Woodward et Ronald L. Somers. 1987. « Do bicycle safety helmets reduce severity of head injury in real crashes? » *Accident Analysis & Prevention* 19 (3): 183-190. doi: [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(87\)90002-9](https://doi.org/10.1016/0001-4575(87)90002-9).
- Dozza, Marco et Nieves Pañeda González. 2013. « Recognising safety critical events: Can automatic video processing improve naturalistic data analyses? » *Accident Analysis & Prevention* 60: 298-304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.02.014>.
- Dozza, Marco et Julia Werneke. 2014. « Introducing naturalistic cycling data: What factors influence bicyclists' safety in the real world? » *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 24: 83-91. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.04.001>.
- Environnement Canada. 2020. *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Émissions de gaz à effet de serre*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre.html>.
- Fahlstedt, Madelen, Peter Halldin et Svein Kleiven. 2016. « The protective effect of a helmet in three bicycle accidents—A finite element study. » *Accident Analysis & Prevention* 91: 135-143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.02.025>.
- Farrell, William, Scott Weichenthal, Mark Goldberg et Marianne Hatzopoulou. 2015. « Evaluating air pollution exposures across cycling infrastructure types: Implications for facility design. » *Journal of Transport and Land Use* 8 (3): 131-149.
- Farrell, William, Scott Weichenthal, Mark Goldberg, Marie-France Valois, Maryam Shekarrizfard et Marianne Hatzopoulou. 2016. « Near roadway air pollution across a spatially extensive road and cycling network. » *Environmental Pollution* 212: 498-507. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.041>.
- Fenre, Mathis Dahl et Alex Klein-Paste. 2021. « Bicycle rolling resistance under winter conditions. » *Cold Regions Science and Technology* 187: 103282. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103282>.
- Fernandez-Heredia, Alvaro, Sergio Jara-Díaz et Andrés Monzón. 2014. « Modelling bicycle use intention: the role of perceptions. » *Transportation* 43: 1-23. doi: 10.1007/s11116-014-9559-9.

- Flanagan, Elizabeth, Ugo Lachapelle et Ahmed El-Geneidy. 2016. « Riding tandem: Does cycling infrastructure investment mirror gentrification and privilege in Portland, OR and Chicago, IL? » *Research in Transportation Economics* 60: 14-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2016.07.027>.
- Forester, John. 2001. « The bicycle transportation controversy. » *Transportation Quarterly* 55 (2).
- Fortier, David, Dominique Lesage et Claude Bégin. 2009. *Les aménagements cyclables: un cadre pour l'analyse intégrée des facteurs de sécurité*. : Direction développement des individus et des communautés, Institut national
- Fuller, Daniel, Lise Gauvin, Yan Kestens, Mark Daniel, Michel Fournier, Patrick Morency et Louis Drouin. 2013. « Impact Evaluation of a Public Bicycle Share Program on Cycling: A Case Example of BIXI in Montreal, Quebec. » *American Journal of Public Health* 103 (3): e85-e92. doi: 10.2105/ajph.2012.300917.
- Furth, Peter G. 2012. « Bicycling infrastructure for mass cycling: a trans-Atlantic comparison. » In *City cycling*, 105-140. : MIT Press Cambridge, MA.
- Gadsby, April et Kari Watkins. 2020. « Instrumented bikes and their use in studies on transportation behaviour, safety, and maintenance. » *Transport Reviews* : 1-22. doi: 10.1080/01441647.2020.1769227.
- Gao, Jie, Aimin Sha, Yue Huang, Liqun Hu, Zheng Tong et Wei Jiang. 2018. « Evaluating the cycling comfort on urban roads based on cyclists' perception of vibration. » *Journal of Cleaner Production* 192: 531-541. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.275>.
- Gao, Jie, Aimin Sha, Yue Huang, Zhuangzhuang Liu, Liqun Hu, Wei Jiang, Di Yun, Zheng Tong et Zhenjun Wang. 2019. « Cycling comfort on asphalt pavement: Influence of the pavement-tyre interface on vibration. » *Journal of Cleaner Production* 223: 323-341. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.153>.
- Garrard, Jan, Susan Handy et Jennifer Dill. 2012. « Women and Cycling. » In *City cycling*, sous la dir. de John Pucher et Ralph Buehler. Cambridge, MA: MIT Press.
- Garrard, Jan, Chris Rissel et Adrian Bauman. 2012. « Health benefits of cycling. » In *City cycling*, sous la dir. de John Pucher et Ralph Buehler. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gelb, Jérémy. 2021. geocmeans: Implementing Methods for Spatial Fuzzy Unsupervised Classification. <https://github.com/JeremyGelb/spNetwork>.
- Gelb, Jérémy et Philippe Apparicio. 2019. « Noise exposure of cyclists in Ho Chi Minh City: A spatio-temporal analysis using non-linear models. » *Applied Acoustics* 148: 332-343. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.12.031>.

- . 2020. « Modelling cyclists' multi-exposure to air and noise pollution with low-cost sensors- The case of Paris. » *Atmosphere* 11 (4). Article. doi: 10.3390/ATMOS11040422.
- . 2021a. « Apport de la classification floue c-means spatiale en géographie: essai de taxinomie socio-résidentielle et environnementale à Lyon. » *Cybergeog: European Journal of Geography*.
- . 2021b. « Cyclists' exposure to atmospheric and noise pollution: a systematic literature review. » *Transport Reviews* : 1-24. doi: 10.1080/01441647.2021.1895361.
- Gharehbaglou, Minou et Farnaz Khajeh-Saeed. 2018. « Woonerf; A Study of Urban Landscape Components on Living Streets. » *MANZAR, the Scientific Journal of landscape* 10 (43): 42-51. doi: 10.22034/manzar.2018.68625.
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2018. « Summary for Policymakers. » *Global Warming of 15°C*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf.
- Gössling, Stefan. 2016. « Urban transport justice. » *Journal of Transport Geography* 54: 1-9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.05.002>.
- Guan, Haiyan, Jonathan Li, Shuang Cao et Yongtao Yu. 2016. « Use of mobile LiDAR in road information inventory: A review. » *International Journal of Image and Data Fusion* 7 (3): 219-242.
- Guinn, Jeffery et Stangl Paul. 2014. « Pedestrian and bicyclist motivation: an assessment of influences on pedestrians' and bicyclists' mode choice in Mt. Pleasant, Vancouver. » *Urban, Planning and Transport Research* 2 (1): 105-125. doi: 10.1080/21650020.2014.906907.
- Gustafsson, Louise et Jeffery Archer. 2013. « A naturalistic study of commuter cyclists in the greater Stockholm area. » *Accident Analysis & Prevention* 58: 286-298. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.06.004>.
- Hamann, Cara J. et Corinne Peek-Asa. 2017. « Examination of adult and child bicyclist safety-relevant events using naturalistic bicycling methodology. » *Accident Analysis & Prevention* 102: 1-11. Article. doi: 10.1016/j.aap.2017.02.017.
- Hamer, Mark et Yoichi Chida. 2008. « Active commuting and cardiovascular risk: A meta-analytic review. » *Preventive Medicine* 46 (1): 9-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2007.03.006>.
- Harms, Lucas et Kansen Maarten. 2018. *Cycling Facts*. <https://www.government.nl/binaries/government/documents/reports/2018/04/01/cycling-facts-2018/Cycling+facts+2018.pdf>.

- Harris, M. Anne, Conor C. O. Reynolds, Meghan Winters, Peter A. Cipton, Hui Shen, Mary L. Chipman, Michael D. Cusimano, Shelina Babul, Jeffrey R. Brubacher, Steven M. Friedman, Garth Hunte, Melody Monro, Lee Vernich et Kay Teschke. 2013. « Comparing the effects of infrastructure on bicycling injury at intersections and non-intersections using a case–crossover design. » *Injury Prevention* 19 (5): 303-310. doi: 10.1136/injuryprev-2012-040561.
- Haskell, William L., I-Min Lee, Russell R. Pate, Kenneth E. Powell, Steven N. Blair, Barry A. Franklin, Caroline A. Macera, Gregory W. Heath, Paul D. Thompson et Adrian Bauman. 2007. « Physical Activity and Public Health: Updated Recommendation for Adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. » *Medicine & Science in Sports & Exercise* 39 (8): 1423-1434. doi: 10.1249/mss.0b013e3180616b27.
- Hatzopoulou, Marianne, Scott Weichenthal, Hussam Dugum, Graeme Pickett, Luis Miranda-Moreno, Ryan Kulka, Ross Andersen et Mark Goldberg. 2013. « The impact of traffic volume, composition, and road geometry on personal air pollution exposures among cyclists in Montreal, Canada. » *Journal Of Exposure Science And Environmental Epidemiology* 23: 46. Original Article. doi: 10.1038/jes.2012.85.
- Heesch, Kristiann C., Shannon Sahlqvist et Jan Garrard. 2011. « Cyclists' experiences of harassment from motorists: Findings from a survey of cyclists in Queensland, Australia. » *Preventive Medicine* 53 (6): 417-420. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2011.09.015>.
- Hölzel, Christin, Franz Höchtel et Veit Senner. 2012. « Cycling comfort on different road surfaces. » *Procedia Engineering* 34: 479-484. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.082>.
- Houde, Maxime, Philippe Apparicio et Anne-Marie Séguin. 2018. « A ride for whom: Has cycling network expansion reduced inequities in accessibility in Montreal, Canada? » *Journal of Transport Geography* 68: 9-21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.02.005>.
- Institut national de santé publique du Québec. 2015. *Avis sur une politique québécoise de lutte au bruit environnemental : pour des environnements sonores sains.* https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2048_politique_lutte_bruit_environnemental.pdf.
- Jacobsen, Peter L. 2003. « Safety in numbers: more walkers and bicyclists, safer walking and bicycling. » *Injury Prevention* 9 (3): 205-209. doi: 10.1136/ip.9.3.205.
- Jacobsen, Peter L., Francesca Racioppi et Harry Rutter. 2009. « Who owns the roads? How motorised traffic discourages walking and bicycling. » *Injury Prevention* 15 (6): 369-373. doi: 10.1136/ip.2009.022566.
- Jacobsen, Peter L. et Harry Rutter. 2012. « Cycling Safety. » In *City cycling*, sous la dir. de John Pucher et Ralph Buehler. Cambridge, MA: MIT Press.

- Janeth, Mosquera, C. Parra Diana, Gomez Luis Fernando, Sarmiento Olga, Schmid Tom et Jacoby Enrique. 2012. « An Inside Look at Active Transportation in Bogotá: A Qualitative Study. » *Journal of Physical Activity and Health* 9 (6): 776-785. doi: 10.1123/jpah.9.6.776 10.1123/jpah.9.6.776.
- Jessiman, Barry, Marika Egyed, Mathieu Rouleau, Michael Donohue, Phil Blagden et Serge Lamy. 2018. *Les impacts sanitaires de la pollution de l'air au Canada : une estimation des décès prématurés*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/bise/les-impacts-sanitaires-de-la-pollution-de-l-air-au-canada-une-estimation-des-deces-prematures>.
- Jestico, Ben, Trisalyn A. Nelson, Jason Potter et Meghan Winters. 2017. « Multiuse trail intersection safety analysis: A crowdsourced data perspective. » *Accident Analysis & Prevention* 103: 65-71. Article. doi: 10.1016/j.aap.2017.03.024.
- Johnson, Marilyn, Judith Charlton, Jennifer Oxley et Stuart Newstead. 2010. « Naturalistic cycling study: identifying risk factors for on-road commuter cyclists. » *Annals of advances in automotive medicine Association for the Advancement of Automotive Medicine Annual Scientific Conference* 54: 275-283. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21050610>
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3242541/>.
- Kaur, Surbjit, Mark J. Nieuwenhuijsen et Roy N. Colville. 2005. « Personal exposure of street canyon intersection users to PM_{2.5}, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK. » *Atmospheric Environment* 39 (20): 3629-3641. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.02.046>.
- . 2007. « Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. » *Atmospheric Environment* 41 (23): 4781-4810. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.02.002>.
- Kendrick, Christine M., Adam Moore, Ashley Haire, Alexander Bigazzi, Miguel Figliozzi, Christopher M. Monsere et Linda George. 2011. « Impact of Bicycle Lane Characteristics on Exposure of Bicyclists to Traffic-Related Particulate Matter. » *Transportation Research Record* 2247 (1): 24-32. doi: 10.3141/2247-04.
- Khan, Jibrán, Matthias Ketzler, Konstantinos Kakosimos, Mette Sørensen et Steen Solvang Jensen. 2018. « Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques. » *Science of the Total Environment* 634: 661-676. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.374>.
- King, Eoin A., Enda Murphy et Aonghus McNabola. 2009. « Reducing pedestrian exposure to environmental pollutants: A combined noise exposure and air quality analysis approach. » *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14 (5): 309-316. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.03.005>.

- Krzyżanowski, Michał, Birgit Kuna-Dibbert et Jürgen Schneider. 2005. *Health effects of transport-related air pollution*. : WHO Regional Office Europe.
- Laforge, Monique. 2017. *Montréal ville cyclable, hier et aujourd'hui*. <https://ville.montreal.qc.ca/memoiresdesmontrealais/montreal-ville-cyclable-hier-et-aujourd'hui>.
- Larsen, Jacob, Zachary Patterson et Ahmed El-Geneidy. 2013. « Build It. But Where? The Use of Geographic Information Systems in Identifying Locations for New Cycling Infrastructure. » *International Journal of Sustainable Transportation* 7 (4): 299-317. doi: 10.1080/15568318.2011.631098.
- Lee, I-Min et Patrick J. Skerrett. 2001. « Physical activity and all-cause mortality: what is the dose-response relation? » *Medicine & Science in Sports & Exercise* 33 (6): S459-S471. https://journals.lww.com/acsm-msse/Fulltext/2001/06001/Physical_activity_and_all_cause_mortality_what_is.16.aspx.
- Lin, Ming-Yeng, Yi-Xin Guo, Yu-Cheng Chen, Wei-Ting Chen, Li-Hao Young, Kuo-Jung Lee, Zhu-You Wu et Perng-Jy Tsai. 2018. « An instantaneous spatiotemporal model for predicting traffic-related ultrafine particle concentration through mobile noise measurements. » *Science of the Total Environment* 636: 1139-1148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.248>.
- Lindwall, Magnus, Pernilla Larsman et Martin Hagger. 2011. « The Reciprocal Relationship Between Physical Activity and Depression in Older European Adults: A Prospective Cross-Lagged Panel Design Using SHARE Data. » *Health psychology : official journal of the Division of Health Psychology, American Psychological Association* 30: 453-462. doi: 10.1037/a0023268.
- Litzenberger, Stefan, Troels Christensen, Otto Hofstätter et Anton Sabo. 2018. Prediction of Road Surface Quality during Cycling Using Smartphone Accelerometer Data. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*.
- Lusk, Anne C., Peter G. Furth, Patrick. Morency, Luis F. Miranda-Moreno, Walter C. Willett et Jack T. Dennerlein. 2011. « Risk of injury for bicycling on cycle tracks versus in the street. » *Injury Prevention* 17 (2): 131-135. doi: 10.1136/ip.2010.028696.
- Lusk, Anne C., Rania A. Mekary, Diane Feskanich et Walter C. Willett. 2010. « Bicycle riding, walking, and weight gain in premenopausal women. » *Archives of internal medicine* 170 (12): 1050-1056. doi: 10.1001/archinternmed.2010.171.
- MacNaughton, Piers, Steven Melly, Jose Vallarino, Gary Adamkiewicz et John D. Spengler. 2014. « Impact of bicycle route type on exposure to traffic-related air pollution. » *Science of the Total Environment* 490: 37-43. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.04.111.

- Mayor of London. 2018. 15km of new Quietway cycle routes opened across London. <https://www.london.gov.uk/press-releases/mayoral/15km-of-new-quietway-cycle-routes-opened>.
- Mead, Gillian E., Wendy Morley, Paul Campbell, Carolyn A. Greig, Marion McMurdo et Debbie A. Lawlor. 2008. « Exercise for depression. » *Cochrane Database of Systematic Reviews* (4). doi: 10.1002/14651858.CD004366.pub3.
- Minet, Laura, Jonathan Stokes, James Scott, Junshi Xu, Scott Weichenthal et Marianne Hatzopoulou. 2018. « Should traffic-related air pollution and noise be considered when designing urban bicycle networks? » *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 65: 736-749. Article. doi: 10.1016/j.trd.2018.10.012.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. 2019. Adresses Québec : guide de l'utilisateur. https://adressesquebec.gouv.qc.ca/pdf/guide_utilisateurs.pdf.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 2019. Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990. sous la dir. de Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission. Québec: Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
- Ministère de la Santé et des Services sociaux. 2016. *Exemples de sources de bruit et de réactions humaines selon le niveau de bruit*. <http://publications.msss.gouv.qc.ca/msss/document-001664/>.
- Ministère des Transports. 1998. *Politique sur le bruit routier*. https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/Documents/politique_bruit.pdf.
- . 2008. Classification fonctionnelle. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/acces-information-renseignements-personnels/documents-reglement-diffusion/demande-acces/Documents/2017/03/lai-2016-2017-374-classification-fonctionnelle.pdf>.
- Miranda-Moreno, Luis F., Jillian Strauss et Patrick Morency. 2011. « Disaggregate Exposure Measures and Injury Frequency Models of Cyclist Safety at Signalized Intersections. » *Transportation Research Record* 2236 (1): 74-82. doi: 10.3141/2236-09.
- Morissette, Claire. 2009. *Deux roues, un avenir: le vélo en ville*. Montréal: Éditions Écosociété.
- NACTO. 2019. Don't Give Up at the Intersection. <https://nacto.org/publication/dont-give-up-at-the-intersection/>.
- Oja, Pekka, Silvia Titze, Adrian Bauman, Bas De Geus, Peter Krenn, Bill Reger-Nash et T. Kohlberger. 2011. « Health benefits of cycling: a systematic review. » *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 21 (4): 496-509. doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01299.x.

- Oja, Pekka, Ilkka Vuori et Olavi Paronen. 1998. « Daily walking and cycling to work: their utility as health-enhancing physical activity. » *Patient Education and Counseling* 33: S87-S94. doi: [https://doi.org/10.1016/S0738-3991\(98\)00013-5](https://doi.org/10.1016/S0738-3991(98)00013-5).
- Oliveira, Franklin, Daniel G. Costa, Cristian Duran-Faundez et Anfranserai Dias. 2020. « BikeWay: A Multi-Sensory Fuzzy-based Quality Metric for Bike Paths and Tracks in Urban Areas. » *IEEE Access*. Article. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3046017.
- Parkin, John et Ciaran Meyers. 2010. « The effect of cycle lanes on the proximity between motor traffic and cycle traffic. » *Accident Analysis & Prevention* 42 (1): 159-165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.07.018>.
- Parks, Jamie, Alison Tanaka, Paul Ryus, Christopher M. Monsere, Nathan McNeil et Mike Goodno. 2013. « Assessment of Three Alternative Bicycle Infrastructure Quality-of-Service Metrics. » *Transportation Research Record* 2387 (1): 56-65. doi: 10.3141/2387-07.
- Petzoldt, Tibor, Katja Schleinitz, Sarah Heilmann et Tina Gehlert. 2017. « Traffic conflicts and their contextual factors when riding conventional vs. electric bicycles. » *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 46: 477-490. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.06.010>.
- Pritchard, Ray, Yngve Frøyen et Bernhard Snizek. 2019. « Bicycle level of service for route choice—A GIS evaluation of four existing indicators with empirical data. » *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8 (5). Article. doi: 10.3390/ijgi8050214.
- Projet Montréal. 2017. *Valérie Plante s'engage à créer un réseau express vélo sécurisé à Montréal*. http://www.projetmontreal.org/reseau_express_velo.
- Provost, Anne-Marie. 2015-06-25. « La piste cyclable Maisonneuve est dangereuse : selon les cyclistes. » *TVA Nouvelles*. <https://www.tvanouvelles.ca/2015/06/25/la-piste-cyclable-maisonneuve-est-dangereuse>.
- Pucher, John et Ralph Buehler. 2005. « Cycling Trends and Policies in Canadian Cities. » *World Transport Policy and Practice* 11.
- Pucher, John, Ralph Buehler et Mark Seinen. 2011. « Bicycling renaissance in North America? An update and re-appraisal of cycling trends and policies. » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45 (6): 451-475. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.03.001>.
- Pucher, John, Jennifer Dill et Susan Handy. 2010. « Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling: An international review. » *Preventive Medicine* 50: S106-S125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2009.07.028>.
- Python Software Foundation. 2021. Python Language Reference. <http://www.python.org>.

- QGIS Development Team. 2020. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team. 2019. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- . 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- Radio-Canada. 2018. *Priorité au vélo sur Saint-André*. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1090850/velorue-saint-andre-plateau-mont-royal-luc-ferrandez>.
- Rahman, Ziaur, Stephen P. Mattingly, Rahul Kawadgave, Dian Nostikasari, Nicole Roeglin, Colleen Casey et Taylor Johnson. 2019. « Using crowd sourcing to locate and characterize conflicts for vulnerable modes. » *Accident Analysis & Prevention* 128: 32-39. Article. doi: 10.1016/j.aap.2019.03.014.
- Reynolds, Conor C. O., M. Anne Harris, Kay Teschke, Peter A. Cipton et Meghan Winters. 2009. « The impact of transportation infrastructure on bicycling injuries and crashes: a review of the literature. » *Environmental Health* 8 (1): 47. doi: 10.1186/1476-069X-8-47.
- Robartes, Erin et T. Donna Chen. 2018. « Crash histories, safety perceptions, and attitudes among Virginia bicyclists. » *Journal of Safety Research* 67: 189-196. Article. doi: 10.1016/j.jsr.2018.10.009.
- Robinson, Dorothy L. 2006. « Do enforced bicycle helmet laws improve public health. » *British Medical Journal* 332 (7543): 722-722.
- Rojas-Rueda, David, Audrey de Nazelle, Marko Tainio et Mark J. Nieuwenhuijsen. 2011. « The health risks and benefits of cycling in urban environments compared with car use: health impact assessment study. » *British Medical Journal* 343: d4521. doi: 10.1136/bmj.d4521.
- Sanders, Rebecca L. 2015. « Perceived traffic risk for cyclists: The impact of near miss and collision experiences. » *Accident Analysis & Prevention* 75: 26-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.11.004>.
- Savaria, Maxime, Philippe Apparicio et Mathieu Carrier. 2021. « Assessing filtered permeability around the globe: The unknown beloved principle of cycling cities. » *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 97: 102964. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102964>.
- Schleinitz, Katja, Tibor Petzoldt, Luise Franke-Bartholdt, Josef F. Krems et Tina Gehlert. 2015. « Conflict partners and infrastructure use in safety critical events in cycling – Results from a naturalistic cycling study. » *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 31: 99-111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.002>.

- Sener, Ipek N., Naveen Eluru et Chandra R. Bhat. 2009. « An analysis of bicycle route choice preferences in Texas, US. » *Transportation* 36 (5): 511-539. doi: 10.1007/s11116-009-9201-4.
- Spaite, Daniel W., Mark Murphy, Elizabeth A. Criss, Terence D. Valenzuela et Harvey W. Meislin. 1991. « A prospective analysis of injury severity among helmeted and nonhelmeted bicyclists involved in collisions with motor vehicles. » *The Journal of trauma* 31 (11): 1510-1516. doi: 10.1097/00005373-199111000-00008.
- Statistique Canada. 2016. *Profil du recensement, Recensement de 2016*. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>.
- Stipancic, Joshua, Sohail Zangenehpour, Luis Miranda-Moreno, Nicolas Saunier et Marie-Axelle Granié. 2016. « Investigating the gender differences on bicycle-vehicle conflicts at urban intersections using an ordered logit methodology. » *Accident Analysis & Prevention* 97: 19-27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.033>.
- Su, Jason G., Meghan Winters, Melissa Nunes et Michael Brauer. 2010. « Designing a route planner to facilitate and promote cycling in Metro Vancouver, Canada. » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 44 (7): 495-505. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.015>.
- Sueur, Jérôme, Thierry Aubin et Caroline Simonis. 2008. « Seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis. » *Bioacoustics* 18 (2): 213-226.
- Teschke, Kay, M. Anne Harris, Conor C. O. Reynolds, Meghan Winters, Shelina Babul, Mary Chipman, Michael D. Cusimano, Jeff R. Brubacher, Garth Hunte, Steven M. Friedman, Melody Monro, Hui Shen, Lee Vernich et Peter A. Cripton. 2012. « Route Infrastructure and the Risk of Injuries to Bicyclists: A Case-Crossover Study. » *American Journal of Public Health* 102 (12): 2336-2343. doi: 10.2105/ajph.2012.300762.
- Tin Tin, Sandar, Alistair Woodward et Shanthi Ameratunga. 2013. « Completeness and accuracy of crash outcome data in a cohort of cyclists: a validation study. » *BMC Public Health* 13 (1): 420. doi: 10.1186/1471-2458-13-420.
- Transports Canada. 2019. *Les transports au Canada 2018 : un survol*. https://www.tc.gc.ca/documents/Les_Transports_au_Canada_2018.pdf.
- Useche, Sergio A., Luis Montoro, Jaime Sanmartin et Francisco Alonso. 2019. « Healthy but risky: A descriptive study on cyclists' encouraging and discouraging factors for using bicycles, habits and safety outcomes. » *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 62: 587-598.
- van der Horst, A. Richard A., Maartje de Goede, Stefanie de Hair-Buijssen et Rob Methorst. 2014. « Traffic conflicts on bicycle paths: A systematic observation of behaviour from video. »

Accident Analysis & Prevention 62: 358-368. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.04.005>.

Vélo Québec. 2015. L'état du vélo à Montréal en 2015. http://www.velo.qc.ca/files/file/expertise/VQ_EDV2015_Mtl.pdf.

———. 2019. À vélo en milieu urbain : trucs et conseils. <https://www.velo.qc.ca/wp-content/uploads/2020/05/a-velo-en-milieu-urbain-trucs-conseils.pdf>.

———. 2020a. Carte des voies cyclables du Grand Montréal. <https://www.velo.qc.ca/boite-a-outils/carte-des-voies-cyclables-du-grand-montreal-2020/>.

———. 2020b. L'état du vélo à Montréal en 2020. <https://www.velo.qc.ca/wp-content/uploads/2021/06/vq-edv2020-montreal.pdf>.

———. 2020c. *Les collectivités et organisations certifiées*. <https://velosympathique.velo.qc.ca/les-certifiees/>.

Vilaça, Mariana, Eloísa Macedo et Margarida C. Coelho. 2019. « A Rare Event Modelling Approach to Assess Injury Severity Risk of Vulnerable Road Users. » *Safety* 5 (2): 29. <https://www.mdpi.com/2313-576X/5/2/29>.

Ville de Montréal. 2017. *Indicateurs de condition des chaussées du réseau routier*. <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/condition-chaussees-reseau-routier>.

———. 2018. Rapport de synthèse de la consultation publique : Réseau Express Vélo. Montréal. https://s3.ca-central-1.amazonaws.com/ehq-production-canada/documents/attachments/8cd4511bcb7f44945b201aa2d6fa48a09f2475f3/000/012/165/original/Rapport_Synth%C3%A8se_Consultation_publique_VF.pdf?1539973915.

———. 2020a. « Géobase - réseau routier. ». <https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/geobase>.

———. 2020b. « Réseau cyclable. ». <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/pistes-cyclables>.

———. 2021. *Rues piétonnes*. Consulté le 2021-08-25. <https://montreal.ca/sujets/rues-pietonnes>.

Walker, Lindsay, Mike Tresidder, Mia Birk, Lynn Wiegand et Jennifer Dill. 2009. « Fundamentals of bicycle boulevard planning & design. » *Portland: Initiative for Bicycle and Pedestrian Innovation: Center for Transportation Studies, Portland State University*.

Warburton, Darren E.R., Crystal Whitney Nicol et Shannon S.D. Bredin. 2006. « Health benefits of physical activity: the evidence. » *Canadian Medical Association Journal* 174 (6): 801-809. doi: 10.1503/cmaj.051351.

- Werneke, Julia, Marco Dozza et MariAnne Karlsson. 2015. « Safety–critical events in everyday cycling – Interviews with bicyclists and video annotation of safety–critical events in a naturalistic cycling study. » *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 35: 199-212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.10.004>.
- Winters, Meghan, Michael Brauer, Eleanor M. Setton et Kay Teschke. 2013. « Mapping Bikeability: A Spatial Tool to Support Sustainable Travel. » *Environment and Planning B: Planning and Design* 40 (5): 865-883. doi: 10.1068/b38185.
- Winters, Meghan, Gavin Davidson, Diana Kao et Kay Teschke. 2011. « Motivators and deterrents of bicycling: comparing influences on decisions to ride. » *Transportation* 38 (1): 153-168.
- Winters, Meghan et Kay Teschke. 2010. « Route Preferences among Adults in the near Market for Bicycling: Findings of the Cycling in Cities Study. » *American Journal of Health Promotion* 25 (1): 40-47. doi: 10.4278/ajhp.081006-QUAN-236.
- Włodarek, Paweł et Piotr Olszewski. 2019. « Traffic safety on cycle track crossings–traffic conflict technique. » *Journal of Transportation Safety and Security*. Article. doi: 10.1080/19439962.2019.1622615.
- Wood, Simon N. 2011. « Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. » *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 73 (1): 3-36. doi: 10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x.
- Wood, Simon N., Natalya Pya et Benjamin Säfken. 2016. « Smoothing parameter and model selection for general smooth models. » *Journal of the American Statistical Association* 111 (516): 1548-1563.
- World Health Organization. 2011. « Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. » In *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*.
- . 2018a. « Environmental noise guidelines for the European region. ».
- . 2018b. *Qualité de l'air ambiant et santé*. [http://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- Xie, Xuanli Lisa et Gerardo Beni. 1991. « A validity measure for fuzzy clustering. » *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13 (8): 841-847. doi: 10.1109/34.85677.
- Yiannakoulias, Nikolaos, Scott A. Bennet et Darren M. Scott. 2012. « Mapping commuter cycling risk in urban areas. » *Accident Analysis & Prevention* 45: 164-172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.12.002>.

Zhu, Siying et Feng Zhu. 2019. « Cycling comfort evaluation with instrumented probe bicycle. »
Transportation Research Part A: Policy and Practice 129: 217-231. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.08.009>.

ANNEXE 1 : PROTOCOLE DE COMPTAGE DES CONFLITS DE CIRCULATION

Le protocole de comptage des conflits de circulation a été utilisé à Montréal, à l'automne 2020, et à Laval et Longueuil, à l'hiver 2021. Le comptage a été effectué en deux phases : d'abord, l'identification des conflits, ensuite, la caractérisation des conflits. Dans le cadre de ce mémoire, nous n'avons utilisé que les données de la première phase de comptage (identification des conflits).

PHASE 1 IDENTIFIER UN CONFLIT

DÉFINITION Toute interaction avec un piéton ou un véhicule (ci-après, « l'autre partie »), au cours de laquelle notre cycliste a dû changer de vitesse ou de direction pour éviter une collision probable.

Piéton Personne se déplaçant à pied, avec ou sans aide à la mobilité (chaise roulante, fauteuil électrique), en trottinette, en planche à roulettes, patins à roues alignées.

Véhicule Tout véhicule motorisé, peu importe le nombre de roues (motocyclette, voiture, camion, etc.). Toute personne interagissant avec un véhicule (par exemple, qui actionne la portière ou un autre élément d'un véhicule).

EXCLUSIONS

CSR Les événements où l'autre partie impliquée se comporte de manière conforme à générales ses devoirs et obligations communes en vertu du Code de la sécurité routière (CSR) et des autres règlements municipaux d'utilisation de la chaussée signalés.

Priorité Notre cycliste cède le passage ou contourne un piéton qui traverse à un endroit où il-elle a la priorité.

Intersection Notre cycliste attend derrière une autre voiture immobilisée à une intersection.

Stationnement Notre cycliste contourne une voiture stationnée en bordure de rue, à moins d'indication claire que ce stationnement n'est pas légitime (pancarte d'interdiction d'arrêt ou de stationnement sans restrictions d'heures, empiètement sur la voie cyclable, par exemple).

Construction Notre cycliste contourne un chantier de construction dont l'espace empiétant sur la chaussée qu'occuperait notre cycliste est signalé par des cônes, pancartes ou signaleur routier.

- N.B. Il est tout de même possible de vivre des conflits au sein d'un chantier. Par exemple, lorsqu'un ouvrier ou autre usager de la route occupe la chaussée illégitimement au-delà de ce qui est signalé par les cônes, panneaux ou gyrophares.

Éboueurs Notre cycliste contourne des éboueurs qui sont en train d'effectuer leur travail.

Autobus Notre cycliste contourne un autobus qui embarque ou descend des personnes à un arrêt ou autre endroit prévu (dans le cas des autobus de transport adapté et des autobus scolaires, l'endroit n'est pas nécessairement un arrêt).

Responsabilité Les conflits causés par notre cycliste, c'est-à-dire, lorsque notre cycliste ne se comporte pas de manière conforme à ses devoirs et obligations communes en

vertu du Code de la sécurité routière et des autres règlements municipaux d'utilisation de la chaussée signalés. Par exemple :

- Notre cycliste circule à vélo sur le trottoir et doit contourner des piétons ;
- Notre cycliste circule à gauche de la chaussée pour gagner une position plus avantageuse dans le trafic ;

Terr. piéton Les conflits vécus en territoire piéton clairement identifiables sur la vidéo, c'est-à-dire, les voies de circulation où les piétons ont le droit de circuler. Par exemple :

- Notre cycliste circule sur une voie en terre battue ou en pierre concassée ;
- Notre cycliste circule sur une voie avec marquage au sol ou panneau signalant la présence permise des piétons ;
 - N.B. En l'absence de signalisation claire de la présence des piétons, sur une piste hors-rue avec marque jaune au milieu de la chaussée, on considère que c'est une piste cyclable uniquement, donc on compte les conflits avec les piétons.

Man. normales Les manœuvres de circulation faites par notre cycliste dans le cadre de sa conduite normale (par exemple, se balancer légèrement de gauche à droite), par excès de prudence, ou par courtoisie.

Les manœuvres de circulation faites par notre cycliste de son propre chef pour gagner une position plus avantageuse dans le trafic.

Urgence Les manœuvres faites pour éviter ou contourner un véhicule d'urgence ou de service dont les feux d'urgence ou d'avertissement (gyrophares jaunes, blancs, rouges ou bleus, flèche jaune clignotante ou fixe) sont actionnés. L'utilisation de simples clignotants n'est pas suffisante.

Effet Les infractions au CSR qui n'ont pas d'effet sur notre cycliste, c'est-à-dire qu'il-elle peut continuer son chemin normalement sans faire de manœuvre d'évitement (freiner ou changer de direction).

PHASE 2 CARACTÉRISER LES CONFLITS

Pour chacun des conflits identifiés dans la base de données fournie, ajouter les annotations des catégories suivantes. S'assurer de placer toutes les annotations exactement à la même position temporelle dans la vidéo.

Action de l'autre usager

Véhicule et piéton

-  **Mouvement** À un moment de l'interaction avec notre cycliste, l'autre partie bouge, que ce soit légèrement ou grandement.
-  **Arrêt** Durant la totalité de l'interaction avec notre cycliste, l'autre partie est immobile.

Manœuvre d'évasion

Véhicule

-  **Légère** Léger changement de vitesse, sans changement de direction.
-  **Moyenne** Arrêt normal ou changement de vitesse modéré, sans changement de direction.
-  **Grande** Arrêt sec, ou changement de direction contrôlé.
-  **Urgence** Changement de direction soudain et incontrôlé.

Piéton

-  **Légère** Contourner le piéton en changeant légèrement de direction.
-  **Moyenne** Décélération modérée mais contrôlée, souvent accompagnée d'un changement de direction.
-  **Grande** Décélération sèche, moins contrôlée, sans changement de direction.
-  **Urgence** Décélération soudaine et incontrôlée, sans changement de direction.

Distance de séparation

Véhicule

-  **Grande** Plus de 6 m.
-  **Moyenne** De 3 m à 6 m.
-  **Petite** Moins de 3 m.

Piéton

-  **Grande** Plus de 3 m.
-  **Moyenne** De 1,5 m à 3 m.
-  **Petite** Moins de 1,5 m.

Autres annotations

Véhicule et piéton

-  **Construction** Tous les travaux routiers ou autres chantiers de construction, qui sont visibles à l'écran pendant le conflit, ou dans les cinq secondes précédant ou suivant le conflit.
-  **Autre** Tout élément valant la peine d'être réexaminé.

Résumé des raccourcis

~	! 1	@ 2	# 3	\$ 4	% 5	^ 6	& 7	* 8	(9) 0	- =	← Backspace	
Tab	Q	W	E	R	T	Y	U	I	O	P *	{ }	\	
Caps Lock	A	S !	D !!	F !!!	G	H	J	K	L	:	"	Enter	
Shift	Z	X	C	V	B	N	M	<	>	?	Shift	↵	
Ctrl	Win Key	Alt	ESPACE					Alt	Win Key	Menu	Ctrl		

Précisions

Portière Dans le cas d'une personne qui interagit avec un véhicule (par exemple, ouverture d'une portière), on s'intéresse au mouvement des roues du véhicule. Donc, on classe comme « arrêt ».

Manœuvre Autant pour les conflits avec un véhicule que pour les conflits avec un piéton, dans les trois premiers niveaux de manœuvre d'évasion (légère, moyenne, grande), notre cycliste demeure en contrôle de sa conduite. Dans le dernier niveau (urgence), notre cycliste n'est pas en contrôle.

Si notre cycliste fait plusieurs manœuvres, on retient celle de plus grande ampleur.

Distance Autant pour les conflits avec un véhicule que pour les conflits avec un piéton, on évalue la distance de séparation entre notre cycliste et l'autre partie au moment où la manœuvre d'évasion de notre cycliste débute.

Pour donner une idée, une voie de circulation mesure entre 3 et 3,5 mètres de largeur environ.

Construction Dès qu'il y a des cônes oranges, une pancarte indiquant des travaux, des ouvriers, de la machinerie lourde, que le chantier soit en fonction ou pas, on le compte comme un chantier.

Exception : lorsque des pancartes oranges indiquent simplement le passage d'un détour sur notre chemin, qui n'a pas rapport avec un chantier visible sur la caméra, on ne compte pas comme un chantier.

Les éboueurs comptent comme des travaux routiers.