

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

DÉPASSEMENTS DANGEREUX DES CYCLISTES À MONTRÉAL :
Analyse des facteurs influençant leur sécurité

Par

Carlos Andres HENAO FLOREZ

Baccalauréat en ingénierie – génie mécanique

Mémoire pour obtenir le grade de

Maître ès sciences, M.Sc.

Maîtrise en études urbaines

Programme offert conjointement par l'INRS et l'UQAM

Décembre 2021

© Andres HENAO, 2021

Ce mémoire intitulé

DÉPASSEMENTS DANGEREUX DES CYCLISTES À MONTRÉAL :
Analyse des facteurs influençant leur sécurité

et présenté par

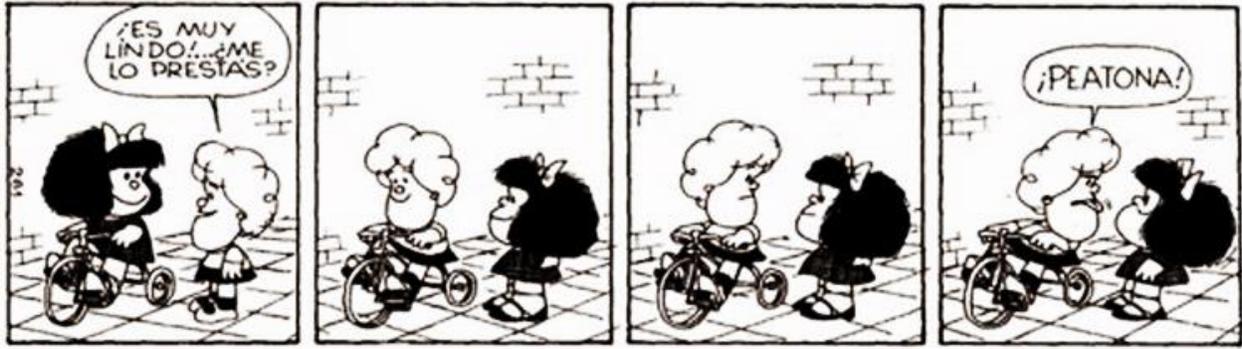
Carlos Andres HENAO FLOREZ

a été évalué par un jury composé de

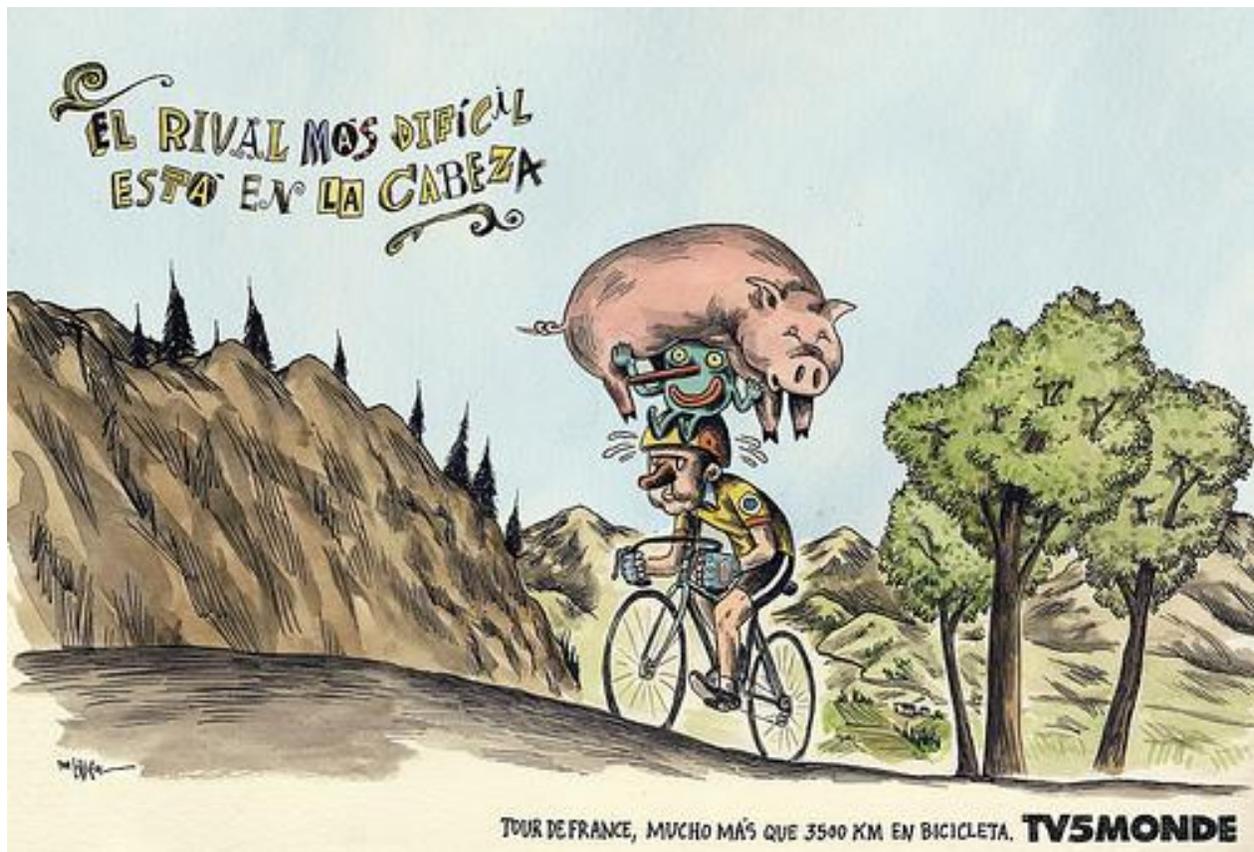
Philippe APPARICIO, directeur de recherche, INRS

Marie-Soleil CLOUTIER, examinatrice interne, INRS

Patrick MORENCY, examinateur externe, Université de Montréal



Quino (1932 – 2020)



Ricardo Siri / Liniers (1973 -)

À ma famille,

RÉSUMÉ

Ce mémoire s'intéresse à la distance latérale de dépassement (DLD) des cyclistes par des véhicules motorisés en milieu urbain. Il s'organise autour de deux articles scientifiques.

Dans le premier article, l'objectif est d'identifier les facteurs de l'environnement urbain, du trafic et des cyclistes qui influencent la DLD et la durée de dépassement à Montréal. Pour ce faire, nous utilisons les données d'une collecte extensive réalisée à vélo et couvrant 1689 km à travers l'île de Montréal. Au total, 3 591 dépassements ont été enregistrés avec une distance moyenne de 176 cm ; 111 dépassements se sont produits à des distances inférieures à un mètre, soit un événement dangereux tous les 32 dépassements. Un modèle généralisé additif logistique a été construit pour analyser la probabilité qu'un·e cycliste subisse un dépassement dangereux (inférieur à 1 mètre). Cette probabilité augmente s'il ou elle circule sur un axe majeur, sur un axe avec la présence de véhicules stationnés et plus la durée de dépassement est longue. Toutefois, les participant·e·s, le type de véhicule ou la présence d'une piste cyclable n'ont pas d'effet significatif. Ces résultats confirment l'importance de séparer les cyclistes du trafic routier.

L'objectif du second article est de décrire un capteur *open source* à faible coût appelé *one metre plus (1m+)* capable de mesurer la DLD, d'enregistrer la position géographique et une vidéo du trajet. Les plans, les codes et la conception schématique sont ouverts et donc facilement accessibles à la communauté scientifique. Dans cet article, nous décrivons en détail le processus de conceptualisation, les composants et les caractéristiques de l'appareil. Aussi, nous réalisons une évaluation du produit et une description des fonctionnalités de l'appareil et de son domaine d'application. Ce projet vise à démocratiser la recherche sur la DLD et à développer une plateforme/projet participatif qui offre des outils aux chercheur·se·s du monde entier, afin de standardiser le partage des connaissances et de faciliter la comparabilité des résultats dans divers contextes.

Mots-clés : Vélo; sécurité des cyclistes; vélos instrumentés; distance latérale de dépassement; manœuvre de dépassement; capteur, modèles généralisés additifs; Montréal.

ABSTRACT

This study explores the lateral passing distance (LPD) of cyclists by vehicles in urban areas. It is organized around two articles.

The first article aims to identify the characteristics of the road network and traffic influencing the LPD and duration of overtaking. Using bicycles equipped with distance sensors, GPS, and cameras, four cyclists covered 1,689 km in Montréal. Hence, 3,591 overtakings were identified with an average distance of 176 cm ; 111 overtaking manoeuvres took place at distances less than 1 m, resulting in an unsafe event for every 32 overtakings. A generalized additive logit model (GAM) is built to predict the likelihood of a dangerous lateral passing (less than 1 m). The results show that taking a major road, the presence of parked vehicles and the time required for overtaking significantly increase the probability of experiencing a dangerous overtaking. However, the participant, type of vehicle, or presence of a bike lane have no significant effect. Therefore, the results demonstrate the importance of keeping cyclists isolated from traffic.

The objective of the second article is to describe a low-cost open source sensor called 'one metre plus (1m+)' capable of measuring lateral passing distance, registering the geographical position of the cyclist, and video-recording the trip. The plans, codes, and schematic design are open and therefore easily accessible for the scientific community. This study describes in detail the conceptualization process, the characteristics of the device, and the materials from which they are made. The study also provides an evaluation of the product and describes the sensor's functionalities and its field of application. The objective of this project is to democratize research and develop a platform/participative project that offers tools to researchers worldwide, in order to standardize knowledge sharing and facilitate the comparability of results in various contexts.

Keywords: Bicycle; Cyclist safety; Instrumented bikes; Lateral passing distance; Overtaking distance; Overtaking manoeuvre; Sensors, Generalized Additive Model (GAM); Montréal.

RESUMEN

Esta tesis se centra en la distancia lateral de adelantamiento (DLA) de vehículos motorizados a los ciclistas en un ambiente urbano. Se organiza en torno a dos artículos científicos.

En el primer artículo, los objetivos son identificar los factores del entorno urbano, del tráfico y de los ciclistas que influyen en la DLA y analizar la duración de los adelantamientos en Montreal. Para ello, utilizamos los datos de una amplia colecta móvil con bicicletas equipadas que abarca 1689 km en toda la isla de Montreal. En total, se registraron 3 591 adelantamientos con una distancia media de 176 cm; 111 adelantamientos se produjeron a distancias inferiores a un metro, es decir, un evento peligroso cada 32 adelantamientos. Se construyó un modelo logístico aditivo generalizado para analizar la probabilidad de que un ciclista sufra un adelantamiento peligroso (a menos de 1 metro). Esta probabilidad aumenta si se circula por una carretera principal, por una vía con vehículos estacionados y cuanto más larga sea la duración del adelantamiento. Sin embargo, los participantes, el tipo de vehículo o la presencia de una ciclorruta no tuvieron un efecto significativo. Estos resultados confirman la importancia de separar a los ciclistas del tráfico vehicular.

El objetivo del segundo artículo es describir un dispositivo de código abierto de bajo costo denominado *one metre plus* (1m+) capaz de medir la DLA, registrar la posición geográfica y el vídeo del trayecto del ciclista. Los planos, los códigos y el diseño esquemático son abiertos, por lo cual son fácilmente accesibles para la comunidad científica. En este artículo describimos en detalle el proceso de conceptualización, los componentes y las características del aparato. Además, realizamos una evaluación del producto y una descripción de las funcionalidades del dispositivo, incluyendo el campo de aplicación. Este proyecto pretende democratizar la investigación sobre la DLA y desarrollar una plataforma/producto participativo que ofrezca herramientas a los investigadores del mundo, con el fin de estandarizar el intercambio de conocimiento y facilitar la comparabilidad de los resultados entre los diversos contextos.

Palabras clave: Bicicleta, seguridad de ciclista, bicicletas equipadas, distancia lateral de adelantamiento, maniobra de adelantamiento, sensor, modelo aditivo generalizado, Montreal.

AVANT-PROPOS

Le vélo m'a permis de découvrir et d'aimer ma ville natale, Bogotá. Pendant les années où j'ai transité dans cette immense ville, j'ai découvert des endroits fascinants, mais j'ai aussi été témoin de la vitesse et de l'imprudence de plusieurs usager·ère·s de la route. Le désir fondamental d'atteindre nos destinations masque trop souvent notre responsabilité de préserver et de protéger la vie des usager·ère·s de la route plus vulnérables, particulièrement les cyclistes. Ma curiosité pour la mobilité, les modes de transport alternatifs et le vélo m'a amené à Montréal pour rejoindre l'équipe du Laboratoire d'équité environnementale (LAEQ).

Le vélo est un moyen de transport aux multiples avantages pour les individus et la société, d'où l'intérêt des autorités de promouvoir la transition modale vers cette forme active de déplacement. Cependant, l'un des grands défis est de garantir la sécurité et le bien-être des cyclistes dans les environnements urbains, où divers facteurs affectent leur sécurité. Ma contribution à la recherche est basée sur une analyse des facteurs environnementaux qui influencent la sécurité des cyclistes dans la ville de Montréal. Plus spécifiquement, l'objectif principal de cette étude est d'analyser les dépassements dangereux des cyclistes par des véhicules motorisés à Montréal, en utilisant des données collectées avec des vélos instrumentés à l'été 2019. Au cours de cette collecte, nous avons identifié plusieurs limites associées aux dispositifs disponibles sur le marché, motivant le développement d'un capteur gratuit à faible coût, capable de répondre aux exigences des études avec des vélos équipés. Dans un premier temps, ce mémoire s'intéresse à l'analyse de la sécurité des cyclistes en fonction de la distance latérale de dépassement. Dans un second temps, il se prolonge par le développement d'un dispositif *open source* comme outil visant à favoriser la recherche sur les dépassements dangereux et à permettre à la communauté scientifique d'échanger des connaissances de manière standardisée. J'espère que ce travail inspirera des étudiant·e·s et des chercheur·se·s d'autres latitudes à développer leurs projets en lien avec la sécurité des cyclistes et à promouvoir l'utilisation du vélo en ville comme une alternative durable.

Recherche dans le contexte de la COVID-19

Comme plusieurs étudiant·e·s de 2^e et 3^e cycle, mon projet de recherche a été chamboulé avec l'arrivée de la COVID-19. Initialement, il portait sur *l'exposition des cyclistes à la pollution et au bruit à Bogotá*. Durant le cours intitulé *projet de mémoire*, j'ai donc écrit une revue de littérature et développé une méthodologie en lien avec ce sujet de recherche. En septembre 2020, soit après une année de scolarité à la maîtrise, mon directeur de recherche et moi avons décidé de changer

de sujet de recherche, puisque les voyages à l'étranger étaient interdits pour des raisons sanitaires. Par conséquent, ce travail a été réalisé en une seule année et non en deux années tel qu'habituellement.

Ce mémoire a été rédigé en suivant les directives du guide de rédaction inclusive de l'INRS.

REMERCIEMENTS

*« J'ai vu plus loin que les autres parce que
je me suis juché sur les épaules de géants »
Newton*

Ce mémoire est possible grâce aux efforts de différentes personnes, qui m'ont accompagné tout au long de ce voyage. Je souhaite tout d'abord remercier Philippe Apparicio, qui m'a fait confiance en tant que membre du LAEQ et m'a donné l'opportunité d'explorer et de développer mes compétences dans ce projet. Son soutien inconditionnel, sa rigueur et ses commentaires ont été fondamentaux pour la réalisation de ce travail.

Je voudrais remercier les membres de famille pour leur support, spécialement mes parents Luzmila Florez et Carlos Henao et ma sœur Monica Henao, pour leur patience et soutien inconditionnel au cours de toutes les années d'études ; leur volonté et leur caractère m'ont appris que même dans les conditions les plus difficiles, il ne faut jamais cesser de rêver.

D'autre part, je voudrais remercier les membres de l'équipe du LAEQ, particulièrement : Vincent Jarry pour le temps qu'il a consacré à répondre à mes questions incessantes et ses commentaires pendant l'évaluation du capteur, Jérémy Gelb pour son soutien dans la structuration et le traitement des données en R, David Maignan pour sa contribution à la programmation du capteur et son incroyable patience pour répondre aux questions les plus différentes et détaillées. Je tiens également à remercier Victoria Jepson et Jennifer Ma-O pour leurs commentaires sur le guide de comptage et le processus d'analyse vidéo, et finalement tous les membres du LAEQ et de l'INRS.

Finalement, les plus grands remerciements s'adressent à mon épouse Isabelle Boisvert-Chastenay. Merci pour ta patience pendant ces deux longues années imprévisibles, ton regard toujours objectif m'a aidé dans les moments cruciaux, ta persévérance est toujours une de plus grandes sources d'inspiration et ton sens de l'humour, souvent cynique, me remplit toujours de bonheur.

Gracias a tod@s!

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux	xiv
Liste des figures	xv
Liste des abréviations et des sigles	xvii
Introduction	1
Chapitre 1 : Revue de littérature et problématique	5
1.1 Les vélos équipés dans la recherche	5
1.1.1 Études sur les vélos électriques	6
1.1.2 Études sur les conflits.....	14
1.1.3 Études sur la détection automatique de véhicules avec des vélos équipés.....	20
1.1.4 Études sur la distance latérale de dépassement.....	21
1.2 Problématique, question et objectifs de recherche	30
1.2.1 Problématique	30
1.2.2 Objectifs	32
1.2.3 Question et hypothèses	32
1.2.4 Pertinence de la recherche.....	33
Chapitre 2 : Méthodologie	35
2.1 Territoire d'étude.....	35
2.2 Les données primaires.....	39
2.2.1 Design de la collecte extensive à vélo et définition des trajets.....	39
2.2.2 Équipements utilisés durant les trajets à vélo	39
2.3 Structuration des données primaires et fusion avec les données secondaires	41
2.3.1 Identification et caractérisation des dépassements et DLD.....	41
2.3.2 Fusion avec les données secondaires d'OpenStreetMap	44
2.3 Modélisation des dépassements	46
Chapitre 3: Article 1 – One metre is not enough! Dangerous overtaking of cyclists in Montréal	48
3.1 Introduction	52

3.1.1 Factors associated to characteristics of the road network.....	53
3.1.2 Factors associated to traffic.....	54
3.1.3 Factors associated to cyclists.....	55
3.1.4 Research objectives.....	56
3.2 Materials and Methods.....	57
3.2.1 Study area and primary data collection.....	57
3.2.2 Operational definition of overtaking.....	58
3.2.3 Structuring of data.....	60
3.2.4 Modelling.....	61
3.3 Results.....	62
3.3.1 Descriptive statistics.....	62
3.3.2 Results of the generalized additive logit regression.....	65
3.3.3 Control variables effects.....	66
3.3.4 Effects off factors associated to characteristics of the road network.....	66
3.3.5 Effects of factors associated to traffic.....	66
3.3.6 Effects of factors associated to cyclists.....	67
3.4 Discussion.....	67
3.4.1 Limits of the study.....	67
3.4.2 Contribution to academic knowledge.....	67
3.4.3 Implications for decision-makers.....	68
3.5 Conclusion.....	69
Chapitre 4: Article 2 – One metre plus (1M+): a multifunctional open source sensor for bicycles based on raspberry pi.....	71
4.1 Introduction.....	75
4.2 Review of Instrumented Bicycles for Measuring Lateral Distance Passing.....	76
4.2.1 Why develop an open source product?.....	76
4.2.2 Devices for measuring lateral passing distance: a brief overview.....	77
4.3 Materials and Methods.....	80

4.3.1 Preliminary assessment.....	80
4.3.2 Electronic devices.....	80
4.3.3 Connection diagram	82
4.3.4 Software	84
4.3.5 Product design and 3D modeling.....	85
4.3.6 User interface	86
4.3.6 Data collection.....	88
4.4 Results.....	89
4.4.1 Spatial observations	90
4.4.2 Camera resolution	92
4.4.3 Distance mesures by vehicule	92
4.4.4 Technical Data – Product characteristics.....	93
4.5 Discussion	94
4.5.1. Comparison with Previous Devices.....	94
4.5.2 Limits of the sensor and potential improvements	95
4.5.2 Contribution to research	96
4.6 Conclusion.....	96
Chapitre 5 : Discussion des résultats.....	98
5.1 Bénéfices et limites d'une collecte mobile quasi-naturalistique extensive.....	98
5.2 Limites de l'étude : les facteurs partiellement ou non explorés de la DLD	100
5.3 Retour sur les principaux résultats	101
5.4 Pistes de recherches futures.....	103
5.5 Recommandations	105
Conclusion.....	106
Bibliographie	107
Annexe 1 : Guide de comptage	115
Annexe 2 : Detailed list of products - 1M+.....	132
Annexe 3 : Plans – 1M+.....	134
Annexe 4 : Connection diagram – 1M+	144

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Synthèse des études sur les vélos électriques équipés d'appareils.	8
Tableau 1.2 : Synthèse des études sur les conflits avec des vélos équipés d'appareils.	16
Tableau 1.3 : Exemples de réglementation sur la distance latérale de dépassement d'un·e cycliste dans quelques pays.	22
Tableau 1.4 : Synthèse des études sur la DLD avec des vélos équipés d'appareils.	25
Tableau 2.1 : Spécification du modèle.	46
Table 3.1 : Model specifications.	61
Table 3.2 : Frequency of overtaking	63
Table 3.3 : Duration of lateral passings (dangerous or not) in seconds.	64
Table 3.4 : Results of the generalized additive logit model.	65
Table 4.1 : Summary of instrumented bikes by devices in studies on lateral passing distance. .	78
Table 4.2 : Summary of electronic devices for the sensor one meter plus (1m+)	81
Table 4.3 : 3D parts specifications.	85
Table 4.4 : Files specifications.	90
Table 4.5: Technical specifications one metre plus (1m+)	93
Table 4.6: Comparison between one metre plus (1m+) and other devices.	94

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 : Pyramide de sécurité des cyclistes	2
Figure 1.1 : Types d'appareils utilisés dans les études portant sur les vélos électriques	7
Figure 1.2 : Types d'appareils utilisés dans les études portant sur conflits	15
Figure 1.3 : Types d'appareils utilisés dans les études portant sur la DLD	24
Figure 1.4 : Cadre théorique : facteurs influençant la DLD et pouvant concourir ou non à un dépassement dangereux	31
Figure 2.1 : Part des déplacements domicile-travail réalisés à vélo, région métropolitaine de Montréal, 2016	36
Figure 2.2 : Les huit types d'infrastructures cyclables à Montréal	38
Figure 2.3 : Les appareils utilisés pour la collecte de données.	41
Figure 2.4 : Cas considérés comme des dépassements : (a) et (b) dépassement avec changement de voie ; (c) dépassement en l'absence de ligne de séparation ; (d) dépassement le long d'une bande cyclable ; (e) à (h) dépassement en présence de véhicules stationnés.....	42
Figure 2.5 : Cas non considérés comme dépassements. (a) dépassement sur une piste bidirectionnelle ; (b) dépassement avec une voie séparant le-la cycliste du véhicule ; (c) dépassement le long de véhicules stationnés ; (d) dépassement le long d'une piste cyclable protégée.	43
Figure 2.6 : Caractérisation de dépassements sur Vifeco : (a) début du dépassement aligné sur l'appareil de mesure de distance ; (b) fin du dépassement.	43
Figure 2.7 : Typologie d'OSM à Montréal.	45
Figure 3.1 : Data collected (a) Trips completed by the four participants; (b) dangerous overtakings or not.....	57
Figure 3.2 : The devices used for collection, attached to the bicycle.....	58
Figure 3.3 : Cases considered to be overtakings. (a) and (b) overtaking by switching lanes; (c) overtaking in the absence of a dividing line; (d) overtaking along a bike lane; (e) to (h) overtaking in the presence of parked vehicles.	59
Figure 3.4 : Cases not considered as overtakings (a) overtaking in a bidirectional lane; (b) overtaking with a lane separating the cyclist from the vehicle; (c) overtaking alongside parked cars; (d) overtaking alongside a protected bicycle lane.....	59
Figure 3.5 : Characterization of a lateral passing on Vifeco. (a) beginning of passing aligned with the device for distance measurement; (b) end of passing.....	60
Figure 3.6 : Overtaking in distance and time.....	64

Figure 3.7 : Different overtakings according to types of vehicles and LPD..... 69

Figure 4.1 : Schematic connection diagram..... 83

Figure 4.2 : One metre plus (1m+) sensor, distances in mm..... 84

Figure 4.3 : Integration of the one metre plus sensor to the bicycles 86

Figure 4.4 : Graphical user interface. (a) main page; (b) Configuration page activated by the button Setup. (c) Delete page activated by the button Delete. (d) Format page activated by the button Format..... 87

Figure 4.5 : Recording page 87

Figure 4.6 : Characterization of overtakings on Vifeco. (a) beginning of overtaking aligned with cyclist's handlebars; (b) end of overtaking..... 89

Figure 4.7 : Characteristics of the trip (a) predefined trip; (b) data collected by the 1m+ sensor; (c) detailed view of data collected by the 1m+ sensor..... 91

Figure 4.8 : Data collected with dangerous overtakings (less than 100 cm)..... 91

Figure 4.9 : Different resolutions of the 1m+ camera sensor (a) 920 x 540 px (b) 720 x 405 px (c) 480 x 270 px..... 92

Figure 4.10 : Overtaking by vehicles according to minimal distance in centimetres. 93

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
CNC	Computer Numerical Control
DLD	Distance latérale de dépassement
ECS	Événements Critiques pour la Sécurité
FPS	Frame per Second
LAEQ	Laboratoire d'équité environnementale
Lidar	Laser Imaging Detection and Ranging
LPD	Lateral Passing Distance
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OSPD	Open Source Product Development
RC, 95% IC	Rapport de cote et intervalle et de confiance à 95%.
RMR	Région métropolitaine de recensement
SCE	Safety Critical Events
SPVM	Service de police de la Ville de Montréal
WHO	World Health Organization

INTRODUCTION

L'objet de la recherche : les dépassements dangereux des cyclistes par des véhicules motorisés

Les bénéfices individuels et collectifs de la pratique du vélo sont aujourd'hui bien connus et rapportés dans plusieurs revues de littérature systématiques (De Hartog et al. 2010 ; Oja et al. 2011 ; Oja, Vuori et Paronen 1998 ; Rojas-Rueda et al. 2011). Selon Garrard et al. (2012), les bénéfices individuels peuvent être regroupés en trois catégories : l'amélioration de l'état de santé due à l'augmentation de l'activité physique, les bénéfices psychosociaux pour la santé mentale et les bénéfices collectifs (réduction des émissions de gaz à effets de serre, du bruit routier, de la congestion routière). Malgré ces bénéfices, les cyclistes sont aussi exposé·e·s à des risques : blessures et mortalité dues aux accidents, surtout avec les véhicules motorisés (Beck et al. 2016; O'Hern et Oxley 2018).

Dans le cadre de ce mémoire, on s'intéresse particulièrement à la sécurité des cyclistes en milieu urbain. Pour ce faire, nous proposons ici une pyramide sur la sécurité des cyclistes (figure 0.1), basée sur les travaux de Hamann et Peek-Asa (2017) et de Heinrich (1941). À la lecture de cette pyramide, les événements impliquant des cyclistes peuvent être classifiés en quatre groupes :

- 1) les collisions (décès, blessures graves, blessures mineures et dommages matériels);
- 2) les conflits (événements critiques pour la sécurité, collisions évitées de près, conflits légers);
- 3) les actes dangereux (dépassements dangereux par des véhicules motorisés et autres manœuvres illégales);
- 4) et les interactions de circulation normale.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons spécifiquement aux dépassements dangereux des cyclistes par des véhicules motorisés en milieu urbain, soit les événements lors d'une manœuvre de dépassement où la distance latérale entre le·la cycliste et le véhicule est inférieure à un mètre. Pour plusieurs chercheur·se·s, cet évènement est considéré comme l'un des plus critiques pour la sécurité des cyclistes (Beck et al. 2016; Sikic et al. 2009).

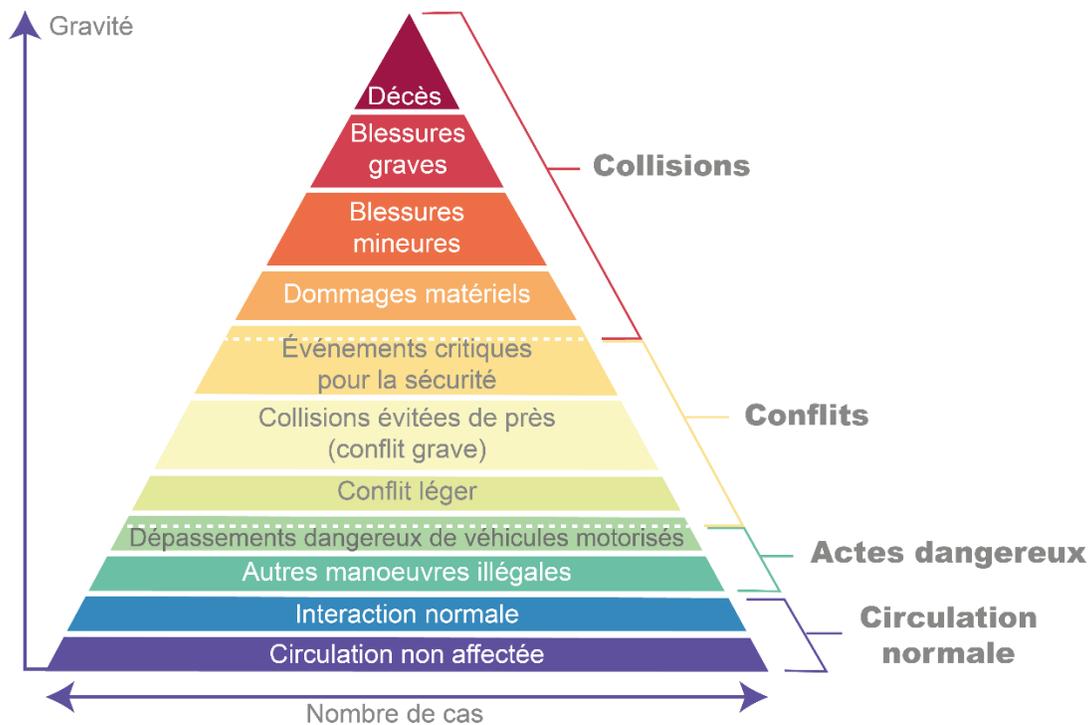


Figure 0.1 : Pyramide de sécurité des cyclistes

L'approche méthodologique mobilisée : une étude quasi-naturaliste extensive

Au plan méthodologique, trois principales approches sont utilisées pour évaluer la sécurité des cyclistes dans l'environnement urbain : l'utilisation de données secondaires, l'observation naturaliste fixe, et l'observation naturaliste mobile avec des vélos équipés.

Premièrement, les données secondaires telles que les rapports d'accidents (O'Hern et Oxley 2018; Grzebieta, McIntosh et Chong 2011; Lusk et al. 2011), les rapports d'hospitalisation (Meuleners et al. 2020; Sikic et al. 2009; Beck et al. 2016) et les rapports de traumatisme des hôpitaux (Bil et al. 2018; Høye 2018) sont largement utilisés pour documenter les accidents impliquant les cyclistes. Ils se concentrent ainsi principalement sur les collisions à l'origine de blessures et de décès des cyclistes (Figure 0.1).

Deuxièmement, l'observation naturaliste fixe permet aux chercheurs de mener des études intensives en observant directement les comportements et les interactions des cyclistes à des lieux spécifiques, surtout à des intersections (Poppinga et al. 2014; Hosford, Cloutier et Winters 2020). D'autres chercheurs vont utiliser des caméras fixes pour enregistrer des vidéos et les analyser postérieurement (par exemple, une caméra à une intersection) (Debnath et al. 2018;

Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Ledezma-Navarro, Miranda-Moreno et Saunier 2021; Nabavi Niaki, Saunier et Miranda-Moreno 2019).

La troisième approche se base aussi sur de l'observation, mais cette fois-ci mobile et non fixe. Dans ce courant, les chercheur·se·s ont recours à des vélos équipés de divers dispositifs pour collecter des informations du point de vue des cyclistes (minimalement une caméra). On distingue deux types de collectes mobiles avec vélos équipés :

- 1) les études naturalistiques (en anglais, *naturalistic cycling studies*) dans lesquelles sont recruté·e·s des participant·e·s pour évaluer leur sécurité le long de leurs trajets habituels. Pour ce faire, les chercheur·se·s fournissent et installent tous les équipements pour la collecte des données. Pendant la collecte, les cyclistes n'ont habituellement aucune condition prédéfinie de conduite (Beck et al. 2019; Chuang et al. 2013).
- 2) les études quasi-naturalistiques (en anglais, *semi-naturalistic cycling studies*), dans lesquelles les chercheur·se·s participent à la collecte avec un nombre réduit de cyclistes (Stewart et McHale 2014; Dozza et al. 2016; Shackel et Parkin 2014; Mehta, Mehran et Hellinga 2015; Walker, Garrard et Jowitt 2014; Parkin et Meyers 2010; Love et al. 2012), ou dans de rares occasions font appel à des cyclistes professionnels pour réaliser les trajets (Llorca et al. 2017). Dans ce type d'études, les règles de conduite des cyclistes, les itinéraires, la vitesse voire la distance au trottoir sont généralement prédéfinis (Dozza et al. 2016; Llorca et al. 2017; Mehta, Mehran et Hellinga 2015; Parkin et Meyers 2010; Shackel et Parkin 2014; Walker, Garrard et Jowitt 2014).

Au niveau de l'observation mobile naturalistique ou quasi-naturalistique, il convient de souligner deux caractéristiques additionnelles de la méthode. D'une part, les **études intensives** consistent à analyser en détail une ou plusieurs sections de route particulières, en réalisant des trajets répétés plusieurs fois avec des vélos équipés. D'autre part, les **études extensives** visent à augmenter la couverture spatiale et à diversifier les itinéraires empruntés par les cyclistes avec des vélos équipés; l'objectif principal étant de comprendre les variations spatiales et temporelles de certains facteurs.

Le projet de recherche de ce mémoire s'inscrit dans une approche quasi-naturalistique extensive — avec une collecte extensive de données avec des vélos équipés — afin d'analyser les facteurs concourant à augmenter ou diminuer la probabilité qu'un·e cycliste subisse un dépassement dangereux par un véhicule motorisé à Montréal (Canada).

L'organisation du mémoire

Le mémoire s'organise autour de deux articles scientifiques, l'un en cours d'évaluation et l'autre publié :

1. HENAO Andres et Philippe APPARICIO (**soumis le 25-06-2021**). 1 metre is not enough! Dangerous overtaking of cyclists in Montréal. *Safety*.
2. HENAO Andres, Philippe APPARICIO et David Maignan (**2021**). One metre plus (1M+): A multifunctional open-source sensor for bicycles based on Raspberry Pi. *Sensors*, 21(5821): 1-18, <https://doi.org/10.3390/s21175812>

Dans le premier chapitre, nous présenterons une revue de littérature sur l'utilisation des vélos équipés, ainsi que la problématique, les objectifs et la question de recherche. Le second chapitre décrit la méthodologie mise en œuvre pour répondre à la question de recherche. Les troisième et quatrième chapitres reprennent intégralement les deux articles mentionnés plus haut. Finalement, dans le cinquième chapitre, nous proposons une discussion des résultats par rapport aux études antérieures, de leurs limites et de leurs implications en termes de sécurité pour les cyclistes et de planification.

Inévitablement, il risque d'y avoir quelques répétitions dans la revue de littérature, la méthodologie (chapitres 1 et 2) et les deux articles scientifiques (chapitres 3 et 4) puisque ces derniers comprennent aussi une revue de littérature et une description de la méthodologie. Toutefois, dans les deux premiers chapitres, la revue de littérature et la méthodologie seront présentées de manière beaucoup plus détaillée que dans les deux articles scientifiques, tel que requis selon les procédures relatives au mémoire par articles en études urbaines à l'INRS.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE

Dans ce premier chapitre, nous discutons des principales études basées sur l'utilisation de vélos équipés pour analyser le comportement des cyclistes et leur sécurité lors de leurs déplacements en milieu urbain. Cette revue de littérature met l'accent particulièrement sur la distance latérale de dépassement, qui constitue le sujet central du mémoire. Par la suite, nous formulerons la problématique, les objectifs et la question de recherche qui guideront ce mémoire.

1.1 Les vélos équipés dans la recherche

Au cours des dix dernières années, les vélos équipés sont devenus un outil fondamental dans les études naturalistique ou quasi-naturalistique sur la sécurité des cyclistes, tel qu'en témoignent deux récentes revues systématiques de la littérature (Gadsby et Watkins 2020; Rubie et al. 2020).

En effet, à partir de différents dispositifs, les vélos se transforment en véritables laboratoires mobiles, capables de recueillir des informations en temps réel relatives à l'environnement dans lequel circulent les cyclistes et à leur comportement de conduite. Les caractéristiques concernées de l'environnement urbain sont variées et incluent l'exposition au bruit et à la pollution de l'air (Gelb et Apparicio 2021), l'état de la chaussée (Bil et al 2015) et la sécurité routière (Gadsby et Watkins 2020). Puisque le présent mémoire porte principalement sur les enjeux de sécurité des cyclistes lors de déplacements, nous présenterons dans les sous-sections suivantes uniquement les études faisant partie des quatre courants de recherche suivants : 1) les études sur les vélos électriques, 2) les études sur les conflits vécus par les cyclistes, 3) les études sur la détection des véhicules approchant les cyclistes, 4) les études sur la distance latérale de dépassement.

Pour chacun des quatre courants, il s'agira de répertorier les types de dispositifs utilisés pour les vélos, de décrire les objectifs de recherche visés, les principaux résultats obtenus ainsi que leur apport en termes de sécurité et de planification des infrastructures de transport. Plus spécifiquement, pour chaque courant, cet exercice s'appuiera sur une illustration du vélo avec l'ensemble des appareils utilisés, un tableau comprenant les principales études avec les types d'équipements utilisés, et finalement une discussion des résultats.

1.1.1 Études sur les vélos électriques

Depuis une dizaine d'années, on assiste à une popularité croissante des vélos électriques en ville (Fishman et Cherry 2016; Fyhri et Fearnley 2015). Signalons d'emblée qu'il existe une distinction importante entre les vélos à assistance électrique et les vélos motorisés (avec un moteur électrique). Les premiers, appelés aussi *Pedelecs* dans certains pays, transmettent de l'énergie au moteur en fonction de l'intensité du pédalage. Leur vitesse maximale ne dépasse généralement pas 25 km/h. Autrement dit, si le·la cycliste ne pédale pas, aucune assistance électrique n'est fournie. Les seconds disposent d'un moteur autonome pouvant être utilisé même lorsque le·la cycliste ne pédale pas. Ce type de véhicule peut atteindre des vitesses comprises entre 25 et 45 km/h. La réglementation pour son utilisation varie d'un pays à l'autre (SAAQ 2021a; Scott bikes 2021). Comparativement aux vélos traditionnels, ces deux types de vélos présentent habituellement des vitesses et des accélérations plus élevées. Cela explique l'émergence d'un nouveau champ de recherche sur la sécurité des cyclistes utilisant les vélos électriques.

Tel qu'illustré à la figure 1.1, dans les études sur les vélos électriques équipés, plusieurs types d'appareils peuvent être utilisés :

1. un GPS pour enregistrer la localisation géographique et éventuellement la vitesse (Langford, Chen et Cherry 2015; Huertas-Leyva, Dozza et Baldanzini 2018; Lopez et al. 2017; Vlakveld et al. 2015; Twisk et al. 2013; Kováčsová et al. 2016; Petzoldt et al. 2017);
2. un compteur de vitesse pour vélo pour mesurer la vitesse et la distance des trajets¹ (Vlakveld et al. 2015; Twisk et al. 2013; Petzoldt et al. 2017);
3. des potentiomètres pour évaluer les caractéristiques du freinage (Huertas-Leyva, Dozza et Baldanzini 2018);
4. la position et l'équilibre du ou de la cycliste à partir d'accéléromètres et de gyroscopes (Vlakveld et al. 2015; Twisk et al. 2013; Kováčsová et al. 2016);
5. les variations de la position du guidon avec des capteurs d'angle de braquage (Vlakveld et al. 2015; Twisk et al. 2013; Kováčsová et al. 2016);
6. des caméras pour décrire l'environnement autour du ou de la cycliste lors du trajet (Langford, Chen et Cherry 2015; Huertas-Leyva, Dozza et Baldanzini 2018; Vlakveld et al. 2015; Twisk et al. 2013; Kováčsová et al. 2016; Petzoldt et al. 2017).

¹ Il est à noter que l'utilisation d'un compteur de vitesse est plus précise pour mesure la vitesse et la distance parcourue qu'un GPS, sans fournir la localisation.



Figure 1.1 : Types d'appareils utilisés dans les études portant sur les vélos électriques

Au tableau 1.1, nous proposons une synthèse des études avec des vélos électriques équipés de différents appareils. Globalement, quatre principaux champs de recherche sont explorés : les habitudes de mobilité, la comparaison entre les vélos traditionnels et électriques, les analyses de comportements de conduite et les analyses sur les conflits vécus par les utilisateur·rice·s de vélos électriques. Dépendamment des travaux, ces quatre champs de recherche ne sont pas exclusifs ; autrement dit, plusieurs d'entre eux peuvent être explorés dans un même article.

Tableau 1.1 : Synthèse des études sur les vélos électriques équipés d'appareils.

Auteur-e-s	Ville (pays)	Type d'appareils								Champ de recherche			
		GPS	Compteur de vitesse	Potentiomètre	Accéléromètre	Gyroscopie	Capteur d'angle	Caméra	Bouton poussoir	Habitudes de de mobilité	Comparaison ^a	Comportement ^b	Conflits ^c
Lopez et al. (2017)	Flandre (Belgique)	✓								✓			
Langford et al. (2015)	Knoxville (États-Unis)	✓								✓	✓		
Twisk et al. (2013)	Leidschendam (Pays-Bas)	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
Vlakveld et al. (2015)	La Haye (Pays-Bas)	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
Schleinitz et al. (2017)	Chemnitz (Allemagne)		✓						✓	✓			
Kováčsová et al. (2016)	La Haye (Pays-Bas)	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓	
Petzoldt et al. (2017)	Chemnitz (Allemagne)	✓	✓						✓		✓		✓
Huertas-Leyva et al. (2018)	Gothengurg (Suède)	✓		✓	✓	✓			✓	✓			✓

^a Comparaison entre les vélos traditionnels et électriques, ^b Analyses des comportements de conduite, ^c Analyse des conflits.

Les études sur les habitudes de mobilité

Premièrement, puisque les cyclistes en vélos électriques constituent un nouveau groupe d'utilisateur-s de la route, plusieurs auteur-e-s tentent simplement de documenter leurs habitudes de mobilité, notamment les distances parcourues, le nombre et les motifs de déplacements, leur vitesse moyenne (Lopez et al. 2017; Langford, Chen et Cherry 2015; Schleinitz et al. 2017; Huertas-Leyva, Dozza et Baldanzini 2018). Par conséquent, ces études sont très souvent descriptives.

En guise d'exemple, Lopez et al. (2017) ont analysé les habitudes de mobilité de 61 propriétaires de vélos électriques en Flandre (Belgique). Les vélos étaient équipés uniquement d'un GPS permettant de collecter des informations sur leurs déplacements sur une période de trente semaines. Les traces GPS ont été ensuite appariées spatialement sur le réseau routier d'OpenStreetMap (Fondation OpenStreetMap 2021). Au total, environ 10 000 trajets ont été enregistrés entre mars 2014 et août 2015. Les auteur-e-s ont ensuite analysé la fréquence des déplacements, la distance parcourue, les caractéristiques d'utilisation pendant les jours de

semaine et de fin de semaine, l'influence de la météo sur les déplacements, le type d'axe emprunté par les cyclistes et la vitesse moyenne des déplacements. Leurs résultats permettent de mettre en lumière plusieurs constats intéressants sur les pratiques d'utilisation du vélo électrique. Premièrement, les participant·e·s ont tendance à effectuer des trajets plus longs en semaine comparativement à la fin de semaine, ce qui suggère aux auteur·e·s que les vélos électriques sont principalement utilisés pour des trajets domicile-travail. Deuxièmement, la grande majorité des trajets (83%) étaient inférieurs à 13 kilomètres, avec des moyennes de 6,6 kilomètres et 23,7 minutes. Troisièmement, 61% des trajets ont été effectués dans des conditions météorologiques favorables et seulement 9% sous la pluie. Quatrièmement, l'analyse de la vitesse des trajets signale une distribution bimodale avec deux groupes, l'un au-dessus de 10 km/h et l'autre entre 25 et 30 km/h (en moyenne 16,7 km/h pour l'ensemble des participant·e·s). Cela pourrait correspondre aux trajets réalisés dans les quartiers centraux *versus* ceux dans les zones périphériques. Cinquièmement, concernant les motifs de déplacement, le vélo électrique semble être majoritairement utilisé pour des trajets domicile-travail, avec deux pics d'utilisation le matin (de 6 à 8 h) et l'après-midi (de 15 à 18 h). Sixièmement, la distance parcourue est corrélée positivement avec la vitesse, c'est-à-dire que les déplacements les plus longs (plus de 13 km) étaient effectués à une vitesse moyenne plus élevée (21 km/h). Finalement, les axes préférés des cyclistes sont les pistes cyclables et les routes secondaires (respectivement à hauteur de 43,9% et 27,1%). Bien que très intéressante, il est dommage que cette étude n'inclue pas un échantillon de cyclistes avec des « vélos traditionnels », ce qui aurait permis de vérifier si les constats émis concernant la pratique du vélo électrique sont statistiquement différents de celles du vélo traditionnel.

Les études comparatives entre les vélos traditionnels et électriques

Puisque les cyclistes de vélos électriques sont de nouveaux entrants, il n'est pas étonnant que plusieurs études tentent de comparer leurs habitudes de mobilité et leurs comportements de conduite avec ceux des « cyclistes traditionnels » (Langford, Chen et Cherry 2015; Vlakveld et al. 2015; Twisk et al. 2013; Schleinitz et al. 2017; Kováčsová et al. 2016). D'une part, certaines études comparatives sur les habitudes de mobilité visent principalement à vérifier si les cyclistes de vélos électriques roulent plus vite ou non. D'autre part, d'autres études comparatives sur les comportements de conduite visent à vérifier l'existence d'enjeux de sécurité spécifiques aux vélos électriques. Aussi, les personnes âgées (65 ans et plus) étant un segment important de la clientèle visée pour la vente de vélos électriques, certaines études comparatives se focalisent particulièrement sur ce groupe de population (Vlakveld et al. 2015; Twisk et al. 2013).

L'étude naturalistique allemande de Schleinitz et al. (2017) est un exemple typique de comparaison des habitudes de mobilité. Les chercheurs ont comparé trois types de cyclistes avec des vélos traditionnels (n=28), électriques avec une vitesse limitée à 25 km/h (dénommés pedelecs) (n=48) et électriques à grande vitesse (soit jusqu'à 45 km/h, dénommés S-pedelecs) (n=9). Chaque participant·e devait rouler avec leur propre vélo durant quatre semaines entre juillet et novembre 2012 (4327 déplacements pour un total de 16 873 kilomètres). Leur vélo était équipé d'un système d'acquisition de données comprenant un capteur de vitesse, une caméra pour enregistrer le trajet et une autre pour enregistrer le·la cycliste. Trois dimensions comparatives sont explorées : la vitesse, la relation entre la vitesse et l'infrastructure, et l'accélération. Premièrement, sans surprise, les cyclistes avec des vélos électriques à grande vitesse (s-pedelec) ont des vitesses moyennes plus élevées : 24,5 km/h contre 17,4 (pedelec) et 15,3 (vélos traditionnels). Aussi, 80% de leurs trajets ont été réalisés à plus de 20 km/h et 34% à plus de 30 km/h, soit des vitesses assez élevées en milieu urbain qui augmentent probablement les risques de blessures en cas de collision. Deuxièmement, les s-pedelec circulent toujours plus vite quel que soit le type d'axe emprunté. Toutefois les écarts sont particulièrement importants sur les pistes cyclables : vélos traditionnels (moy. = 16,7 km/h; ET = 4,0), pedelec (moy. = 18,4 km/h; ET = 4,7) et s-pedelec (moy. = 23,6 km/h; ET = 2,3). Selon les auteurs, il est fort probable que tels écarts de vitesse et d'accélération génèrent des conflits entre les vélos s-pedelec et traditionnels, principalement sur les infrastructures cyclables. Troisièmement, les participant·e·s avec un vélo s-pedelec accélèrent plus fortement : après 2,5 secondes écoulées depuis l'arrêt, ils·elles roulent à une vitesse de 2 km/h supérieurs à celle des deux autres types de vélos ; cette différence atteint même 5 km/h après cinq secondes.

À Knoxville (Tennessee, États-Unis), Langford et al. (2015) ont comparé les comportements de conduite de cyclistes de vélos électriques *versus* ceux traditionnels. Les chercheurs ont équipé 12 vélos avec un GPS (7 vélos électriques de type Pedelecs et 6 vélos traditionnels) à partir d'un projet pilote de vélopartage à l'Université du Tennessee. Chaque appareil enregistrait les coordonnées géographiques avec la date, l'heure, l'altitude et la vitesse des cyclistes. Quatre dimensions ont été analysées dans l'étude : 1) la vitesse de déplacement, 2) le respect du sens de circulation, 3) le respect de la signalisation aux intersections avec un panneau d'arrêt, 4) le respect de la signalisation aux intersections avec un feu de circulation. Les résultats de l'étude démontrent que les cyclistes de vélos électriques circulent à des vitesses plus élevées : en moyenne, 2,9 km/h de plus que les vélos traditionnels. Concernant les trois autres dimensions, les deux groupes de cyclistes ont des taux de non-respect de la signalisation très élevés, sans

pourtant qu'ils soient statistiquement plus forts pour un groupe en particulier. Autrement dit, les deux types de cyclistes ont des comportements de conduite similaires, excepté une vitesse plus élevée pour les participant·e·s se déplaçant en vélo électrique. Les auteur·e·s suggèrent donc d'élaborer des stratégies éducatives et technologiques pour assurer le respect des règles de circulation, spécialement les limites de vitesse pour les vélos électriques. Cette étude est pionnière dans l'utilisation des nouvelles technologies pour évaluer la sécurité des cyclistes. Toutefois, afin de mieux décrire et analyser le comportement des cyclistes en milieu urbain dans toute leur complexité, il convient de recourir à d'autres dispositifs, autre qu'un GPS.

À La Haye (Pays-Bas), Kováčsová et al. (2016) ont analysé la performance de deux groupes de cyclistes (30 à 45 ans, n = 30; 65 ans et plus, n = 31) avec vélos traditionnels et électriques (Pedelects – 250 W). Pour ce faire, les participant·e·s ont effectué quatre types d'exercice sur une distance de 3,5 km avec les deux types de vélos : 1) conduite à basse vitesse, 2) accélération au-dessus de 17 km/h, puis freinage, 3) indication de changement de direction et vérification de présence de voiture au-dessus de l'épaule, et 4) montée et descente du vélo. Les vélos étaient équipés de nombreux dispositifs : un potentiomètre d'angle pour mesurer l'angle du guidon, un dynamomètre pour mesurer la force de préhension sur le guidon, un capteur à un axe pour mesurer le temps et la vitesse nécessaires pour que le·la cycliste atteigne l'équilibre et un compteur de vitesse (les dispositifs décrits enregistraient les données à 50 Hz). Également, les chercheur·se·s ont placé sur le guidon une caméra pour enregistrer une vidéo des cyclistes et un écran pour afficher leur vitesse instantanée. Il ressort de cette étude plusieurs résultats intéressants relatifs aux comportements de conduite. Premièrement, lors des déplacements à faible vitesse et des changements de direction, le groupe plus âgé a effectué plus de mouvements du guidon afin d'atteindre l'équilibre que le groupe d'âge moyen. Deuxièmement, le groupe d'âge moyen appuyait sur le dynamomètre de manière significativement plus forte que le groupe plus âgé. Troisièmement, lors des tests d'accélération et de conduite, les deux groupes d'âge ont affirmé avoir mieux exécuté les exercices sur les vélos électriques que sur les vélos traditionnels. Parmi les conclusions les plus importantes, les auteur·e·s soulignent l'importance de prendre en compte l'âge des usager·ère·s au moment de planifier les infrastructures pour cyclistes. Ils suggèrent des zones plus larges ou l'aménagement de barrières physiques aux intersections pour augmenter la sécurité des cyclistes moins expérimenté·e·s ou plus âgé·e·s. En effet, ces dernier·ère·s ont plus de difficulté à atteindre l'équilibre en phase de démarrage et sont donc plus susceptibles de subir une chute ou un accident avec un·e autre usager·ère de la route. Il est clair que les vélos électriques offrent un avantage mécanique aux utilisateur·trice·s, cependant, les

limites de vitesse et le temps de réaction des cyclistes doivent être pris en compte pour assurer leur sécurité.

Dans la ville de Leidschendam, Twisk et al. (2013) et Vlaveld et al. (2015) ont comparé le comportement et la charge mentale de deux groupes de cyclistes (65 ans et plus *versus* 30 à 45 ans) utilisant des vélos électriques et traditionnels. Les 58 participant·e·s devaient parcourir 3,5 km à vélo en traversant des zones résidentielles et une piste cyclable hors rue avec les deux types de vélos. Au niveau méthodologique, les chercheur·se·s ont utilisé deux approches pour mesurer la charge mentale : la variabilité de la fréquence cardiaque et la *periferal detection task* (PDT), soit le champ visuel. Concernant la fréquence cardiaque, les chercheur·se·s supposent qu'elle risque d'augmenter rapidement pour des manœuvres qui peuvent être plus difficiles pour certain·e·s participant·e·s (par exemple, virage à gauche, virage à droite, accélération, équilibre). Concernant la PDT, ils·elles supposent que durant un effort mental important, le champ visuel diminue. Pour mesurer la réponse du champ visuel, les auteur·e·s proposent une procédure comprenant trois étapes. Premièrement, une diode électroluminescente (DEL) positionnée sur le casque du ou de la cycliste était allumée durant cinq secondes à des localisations spécifiques du trajet de 3,5 km. Deuxièmement, le·la cycliste devait alors appuyer aussi vite que possible sur un bouton avec la main gauche. Troisièmement, la réponse du champ visuel est mesurée avec deux indicateurs : le temps de réponse en millisecondes et le taux de réponse (nombre de cas où le bouton est actionné sur le nombre total d'allumage de la DEL). Pour ce faire, les vélos étaient équipés de huit appareils : 1) un compteur de vitesse, 2) un potentiomètre pour mesurer le mouvement du guidon, 3) un GPS, 4) une caméra pour enregistrer le·la cycliste, 5) une autre caméra sur le casque du ou de la cycliste pour enregistrer le trajet, 6) un accéléromètre, 7) un gyroscope et 8) le système de mesure de la réaction PDT (DEL et bouton poussoir). Plusieurs résultats intéressants de cette étude méritent d'être énoncés. Sans surprise, la vitesse moyenne pour le parcours était plus élevée dans les deux groupes utilisant le vélo électrique ; le groupe le plus âgé se déplaçait environ 3,6 km/h plus vite sur le vélo électrique que sur le vélo conventionnel. Toutefois, les cyclistes plus âgés se déplacent à des vitesses inférieures à celles des cyclistes d'âge moyen, et au-delà de la vitesse, les deux groupes ont des comportements de conduite très similaires. Concernant la charge mentale, le temps de réponse des cyclistes âgés était plus élevé dans toutes les conditions, comparativement au groupe de cyclistes d'âge moyen. Cependant, pour chaque groupe, les temps de réponse ne varient pas en fonction du type de vélo. En ce qui concerne la relation entre la vitesse et la charge mentale, la corrélation est négative, c'est-à-dire qu'une vitesse plus élevée est associée à un temps de réponse PDT plus

grand, indépendamment du groupe d'âge ou du type de vélo. Cette étude illustre bien la complexité de la mesure de la charge mentale lors de la conduite d'un vélo selon le type et l'âge des cyclistes et dans des conditions de trafic variées, puisqu'elle repose sur une multitude de capteurs fixés sur le vélo ou le-la cycliste.

Les études sur les conflits avec vélos électriques

Puisqu'il est désormais admis que les cyclistes de vélos électriques ont généralement des vitesses et des accélérations plus élevées (Vlakveld et al. 2015; Twisk et al. 2013; Schleinitz et al. 2017; Langford, Chen et Cherry 2015), il n'est pas étonnant que plusieurs chercheur·se·s tentent de vérifier si l'occurrence de conflits est plus élevée pour ces cyclistes comparativement à ceux et celles se déplaçant avec un vélo traditionnel.

Dans une étude naturalistique menée à Chemnitz (Allemagne), Petzoldt et al. (2017) comparent les taux d'occurrence et les facteurs associés aux conflits, entre 31 cyclistes avec des vélos traditionnels et 49 autres avec des vélos électriques de type pedelec. Chaque cycliste était muni·e de plusieurs appareils : deux caméras FlyCamOne eco V2 (ACME, Delbrück, Allemagne) (l'une pour filmer le trajet et l'autre pour filmer le torse des cyclistes), un capteur de vitesse magnétique de roue (2 Hz), un GPS et un système des batteries. Chaque participant·e a effectué ses déplacements quotidiens pendant quatre semaines, soit en moyenne 189 kilomètres. Quatre principaux résultats sont avancés. Premièrement, l'âge des participant·e·s est corrélé à la vitesse : le groupe le plus âgé (65 ans et plus) étant significativement plus lent que le groupe le plus jeune (moins de 40 ans). Deuxièmement, la vitesse moyenne de tou·te·s les participant·e·s était de 1 à 4 km/h plus élevée pour les vélos électriques comparés aux vélos traditionnels, ce qui corrobore les résultats des études discutées antérieurement. Troisièmement, la vitesse juste avant un conflit était plus élevée pour les vélos électriques que pour les vélos conventionnels. Quatrièmement, il n'existe pas de différences marquées entre les deux types de vélo en ce qui concerne leur implication dans les conflits de circulation, sauf pour les intersections où la probabilité d'être impliqué dans un conflit était deux fois plus élevée pour les vélos électriques que les vélos conventionnels (RC : 1,966, 95% IC : 1,098-3,519). Finalement, il convient de signaler que les auteur·e·s concluent leur article en mentionnant que la rapidité des développements technologiques, associée à une diminution des prix des appareils, favorisera la réalisation de futures études naturalistiques avec des échantillons plus importants.

Huertas-Leyva et al. (2018) ont analysé les changements de comportement de six cyclistes en utilisant des vélos traditionnels, puis des vélos électriques à Gothengurg (Suède). Les vélos

étaient équipés de divers capteurs afin de comparer la vitesse et le comportement de freinage : un GPS (10 Hz), deux unités de mesure inertielle, un capteur de freinage pour chaque roue (100 Hz), une caméra frontale (30 fps) et un enregistreur de données (*data logger*). Leurs résultats montrent que : 1) les cyclistes roulaient en moyenne de 1,5 à 5 km/h plus rapidement sur un vélo électrique ; 2) le risque d'être confronté à un conflit lors d'un freinage inattendu était plus élevé sur un vélo électrique que sur un vélo traditionnel (29% contre 14%) ; 3) le risque de collision serait plus élevé sur les vélos électriques en raison de la fréquence plus élevée des conflits. Sur la base de ces résultats, les auteur·e·s suggèrent qu'il conviendrait de réglementer et de réduire la vitesse des vélos électriques afin de diminuer les risques de collision pour les cyclistes. Aussi, d'autres mesures pourraient être mises en place, comme la délivrance de permis pour les utilisateur·rice·s de vélos électriques et des campagnes de sensibilisation et d'éducation sur les risques et les avantages des vélos électriques.

1.1.2 Études sur les conflits

Le deuxième courant d'études avec des vélos équipés porte sur les conflits et les événements critiques pour la sécurité (ECS) (*Safety-critical events* en anglais) vécus par les cyclistes, qu'il convient d'emblée de définir. Selon Reynolds et al. (2009), les conflits sont définis comme « une interaction entre un·e cycliste et un·e autre usager·ère de la route telle qu'au moins une des parties doit changer de vitesse ou de direction pour éviter une collision » (traduction libre, p. 04). Les ECS sont, selon Bagdadi (2013), « les situations (y compris les chocs) qui nécessitent une manœuvre de déviation soudaine pour éviter un impact ou pour corriger des actes dangereux commis par le·la conducteur·rice lui·elle-même ou par d'autres usager·ère·s de la route » (traduction libre, p. 118). Selon ces deux définitions, l'ECS inclut les collisions mineures alors que les conflits ne le font pas. Dans la plupart des études, ces termes se superposent, faisant référence à des événements où les cyclistes ont dû changer de vitesse ou de direction, car leur sécurité était menacée ou pour éviter une collision imminente.

La comparaison des figures 1.1. et 1.2 permet de constater que ces études sur les conflits vont mobiliser des appareils semblables à ceux décrits pour les vélos électriques, c'est-à-dire un GPS, une caméra, un compteur de vitesse, des accéléromètres, des gyroscopes, des potentiomètres et un bouton poussoir. À cela s'ajoutent deux nouveaux appareils :

1. un microphone pour enregistrer les commentaires du ou de la cycliste relativement à son expérience (Angel-Domenech et al. 2014);
2. un capteur de distance pour mesurer la séparation entre les différents usagers de la route (Angel-Domenech et al. 2014).

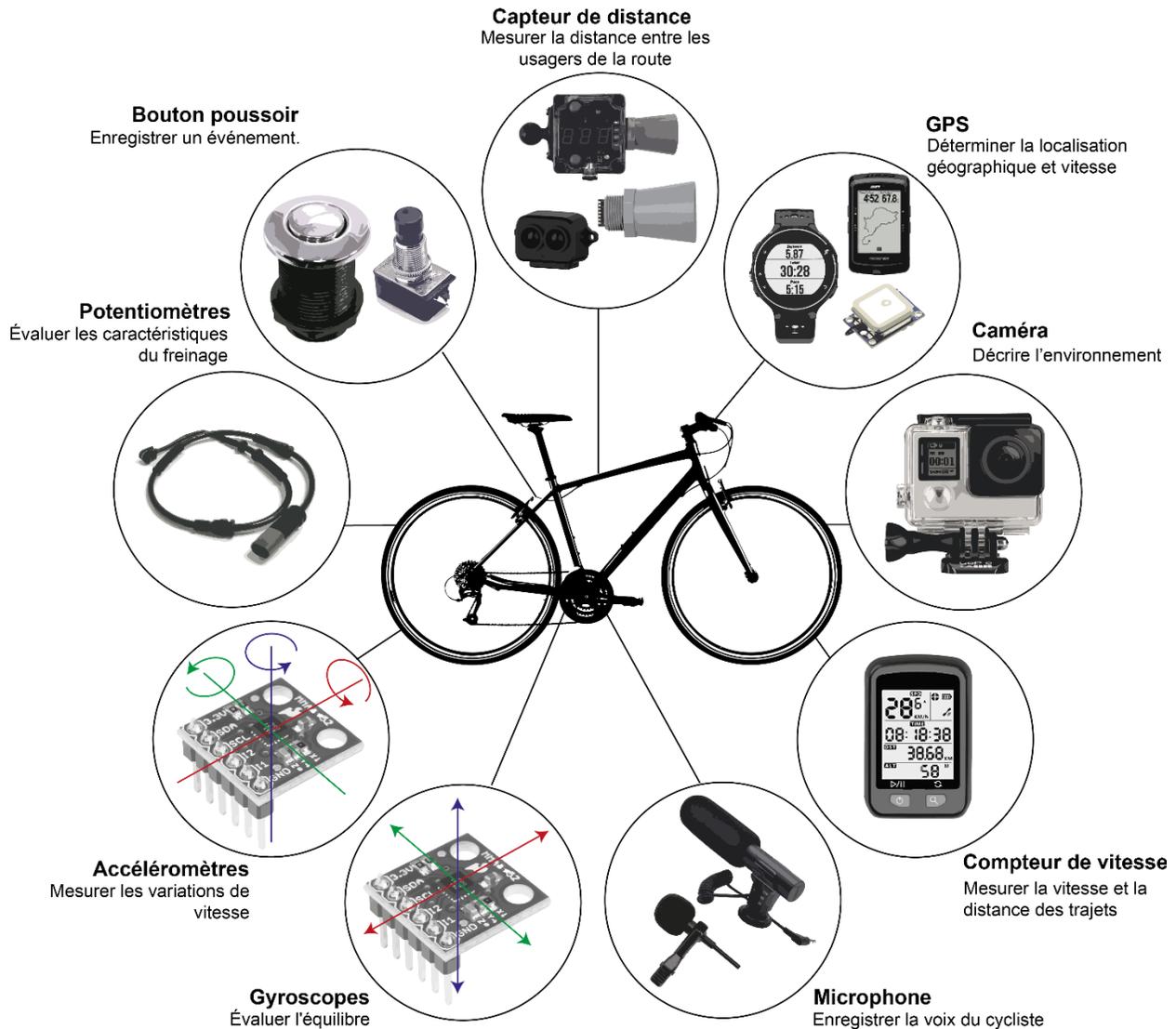


Figure 1.2 : Types d'appareils utilisés dans les études portant sur conflits

Au tableau 1.2, nous proposons une synthèse des principales études sur les conflits vécus par les cyclistes avec des vélos équipés de différents appareils. À la lecture de ce tableau, on constate que quatre principaux champs de recherche sont explorés : l'expérience des cyclistes et la caractérisation des conflits (Gustafsson et Archer 2013; Werneke, Dozza et Karlsson 2015; Schleinitz et al. 2015; Dozza et Werneke 2014), l'analyse des conflits sur pistes cyclables (Angel-

Domenech et al. 2014), l'analyse des conflits aux intersections et les risques d'emportierage (Lawrence et al. 2018).

Tableau 1.2 : Synthèse des études sur les conflits avec des vélos équipés d'appareils.

		Type d'appareils								Champ de recherche				
		GPS	Compteur de vitesse	Potentiomètre	Accéléromètre	Gyroscopie	Bouton poussoir	Microphone	Capteur de distance	Caméra	Expérience et caractérisation des conflits	Conflits sur pistes cyclables	Conflits aux intersections	Risque d'emportierage
Auteur·e·s	Ville (pays)													
Gustafsson et Archer (2013)	Stockholm (Suède)	✓							✓	✓				
Schleinitz et al. (2015)	Chemnitz (Allemagne)	✓	✓						✓	✓				
Werneke, et al. (2015)	Göteborg (Suède)	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓				
Dozza et Werneke (2014)	Göteborg (Suède)	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓				
Angel-Domenech et al. (2014)	Valence (Espagne)	✓						✓	✓		✓	✓		
Lawrence et al. (2018)	Melbourne (Australie)	✓							✓					✓

Les études sur l'expérience et la caractérisation des conflits

La recherche de Gustafsson et Archer (2013) constitue certainement l'un des travaux précurseurs sur la description et l'analyse des conflits vécus par les cyclistes. Pour ce faire, elle mobilise 16 cyclistes ayant effectué 17 trajets prédéfinis (de 6 à 20 kilomètres, et ce, une vingtaine de fois) pendant les heures de pointe du matin et de l'après-midi dans la ville de Stockholm (Suède). Elle représente ainsi une étude quasi-naturalistique (et non naturalistique), puisque les participant·e·s ne réalisent pas leurs trajets habituels. Technologiquement parlant, on notera que cette étude est relativement facile à mettre en œuvre puisqu'uniquement deux appareils sont utilisés, soit un GPS (GPS type DG100, GlobalSat, Taipei, Taïwan) enregistrant les coordonnées géographiques chaque seconde (1Hz) et une caméra (ATC 5K, Oregon Scientific, Portland, Oregon, USA) pour filmer les trajets. Aussi, à la fin de chaque trajet, les participant·e·s devaient consigner dans un journal de bord les problèmes rencontrés relatifs à leur sécurité² ou à leur mobilité³. Les

² Conflits de sécurité en fonction du type d'utilisateur avec lequel-laquelle il a lieu (bus sur la route, bus à l'arrêt, voiture, autre cycliste, tram, etc.).

³ Axe barré, congestion routière, travaux de construction, voiture stationnée, signalisation, etc.

chercheur·se·s ont ainsi identifié 506 événements, soit 220 conflits et 286 problèmes de mobilité. Concernant les conflits de sécurité avec un·e autre usager·ère, 41% ont eu lieu avec une voiture, 19% avec un·e autre cycliste, 13% avec un bus et 9% avec un·e piéton·ne. De manière plus détaillée grâce à l'analyse des journaux de bord, les conflits de sécurité vélo-véhicule se sont produits aux intersections, principalement quand un véhicule tournait à droite sans céder le passage au·à la cycliste. Quant aux interactions vélo-vélo, les manœuvres de dépassement de cyclistes dans une piste bidirectionnelle étaient considérées comme un événement très dangereux lorsqu'un·e cycliste était présent·e en sens opposé. Aussi, plusieurs problèmes ont été rapportés par les cyclistes, comme le manque de continuité des pistes cyclables entre le centre et la périphérie, le manque de signalisation et de démarcation pour les cyclistes aux arrêts de bus, la durée jugée trop longue de certains feux de circulation et la mauvaise synchronisation des feux de circulation le long d'un itinéraire cyclable. En résumé, cette étude démontre la pertinence de combiner un GPS et un journal de bord rempli à la fin du trajet et l'analyse des vidéos pour repérer et caractériser, relativement aisément, les conflits en fonction du type d'usager·ère impliqué·e et du type d'aménagement.

L'étude de Schleinitz et al. (2015) s'inscrit dans la même veine que celle de Gustafsson et Archer (2013) puisqu'elle vise à identifier avec quel·le autre usager·ère le conflit a lieu. On note toutefois trois différences. Premièrement, elle représente une étude naturalistique puisque les 31 participant·e·s recruté·e·s réalisent leurs trajets habituels. Deuxièmement, elle retient uniquement les événements critiques pour la sécurité (ECS). Troisièmement, elle mobilise un peu plus d'appareils : un GPS, deux caméras (FlyCamOne eco V2, ACME, Delbrück, Allemagne) (l'une pour filmer le trajet, l'autre pour filmer le·la cycliste), un capteur de vitesse magnétique de roue (2 Hz) et un système de batteries pour recharger les appareils. L'analyse des conflits repose sur l'annotation des deux vidéos par trajet en trois étapes : identification du conflit, du partenaire du conflit⁴ et du type d'axe emprunté⁵ par le·la cycliste. Au total, 77 événements critiques pour la sécurité ont été répertoriés, dont 33 avec des véhicules motorisés, 22 avec des piéton·ne·s et 16 avec d'autres cyclistes. Le fait que près de la moitié des conflits aient eu lieu avec des véhicules motorisés souligne l'importance d'aménager des infrastructures cyclables séparant les cyclistes du trafic routier.

⁴ Piéton·ne, cycliste, deux roues motorisés, voiture, camion, autobus, train, autre véhicule motorisé, partenaires de conflit multiples.

⁵ Route, infrastructure cyclable, rue piétonne, rue non pavée, autre.

Dans deux études naturalistiques à Göteborg (Suède), Dozza et Werneke (2014) et Werneke, et al. (2015) explorent la même collecte de données pour analyser respectivement les conflits et événements critiques pour la sécurité (ECS). Comparativement aux deux études précédemment décrites (Schleinitz et al. 2015; Gustafsson et Archer 2013), le repérage des conflits est plus complexe puisqu'elle repose à la fois sur des données objectives (analyse des vidéos et des données de deux capteurs de pression des freins et deux unités de mesure inertielle) et subjectives (bouton poussoir activé par les participant·e·s et un journal de bord). Sans surprise, comme pour les travaux précédents, les conflits plus fréquents ont lieu avec des véhicules motorisés, puis avec des piéton·ne·s et des cyclistes. L'originalité de ces deux études est d'identifier différents scénarios selon le·la partenaire du conflit. Premièrement, pour les conflits vélo-véhicules, les trois scénarios les plus fréquents sont des véhicules roulant à grande vitesse sans remarquer leur présence, des véhicules bloquant le passage de cyclistes et des véhicules ne respectant pas le droit de passage des cyclistes à l'intersection. Deuxièmement, les scénarios de conflits entre cyclistes sont principalement lorsque deux cyclistes se croisent à grande vitesse dans une intersection (p. ex. en raison de l'obstruction visuelle causée par des bâtiments), lorsque les cyclistes roulent dans le sens inverse de la circulation et lorsque les cyclistes zigzaguent sans vérifier la présence des cyclistes derrière eux. Troisièmement, le principal scénario de conflits entre cyclistes et piéton·ne·s renvoie à la situation suivante : un·e ou plusieurs piéton·ne·s traversant une piste cyclable sans contact visuel avec le·la cycliste.

En résumé, ce type d'études souligne la pertinence d'analyser la perception des cyclistes combinée avec des mesures objectives mesurées par différents appareils. Parmi les recommandations formulé·e·s par les auteur·e·s pour augmenter la sécurité des cyclistes figurent l'entretien des infrastructures routières et cyclables, l'amélioration de l'éclairage et de la visibilité pour les infrastructures cyclables, le développement de capteurs et systèmes pour informer les cyclistes de la proximité des autres usager·ère·s de la route. Mais surtout et avant tout, les auteur·e·s soulignent l'importance de concevoir des infrastructures cyclables séparées du trafic routier.

Les études sur des conflits spécifiques (pistes cyclables directionnelles et emportières)

À Valence (Espagne), Angel-Domenech et al. (2014) ont mené une étude naturalistique dans le but de comptabiliser et d'analyser les conflits dans les pistes cyclables bidirectionnelles. Dans cette ville, ce type d'infrastructure est surtout aménagé entre le trottoir et les places de stationnement des véhicules. Les vélos utilisés dans l'étude étaient équipés de quatre caméras

vidéo pour enregistrer tous les angles du parcours, un pointeur laser pour garantir que le cycliste roule toujours à la même distance du trottoir, un GPS (10 Hz), un microphone pour enregistrer la perception du risque des cyclistes (sur une échelle de Likert de 1 à 5) et un *data logger* pour sauvegarder les données. Étant donné la complexité des instruments de mesure, un seul vélo a été utilisé. Six pistes bidirectionnelles de 1 à 3 km ont été sélectionnées pour l'étude, dont quatre situées sur le trottoir. De la sorte, 648 conflits ont été répertoriés sur un total de 130 kilomètres parcourus. Les partenaires de conflit étaient principalement des piéton·ne·s (71%) et des véhicules motorisés (14%). L'analyse de la distribution spatiale des conflits et des vidéos révèle, sans surprise, que la plupart des interactions ont lieu aux intersections piétonnières et aux arrêts de bus. Bien que très intéressante, cette étude mobilise de nombreux appareils très performants et très coûteux, sans pour autant analyser en profondeur les données collectées.

Finalement, dans une étude naturalistique impliquant 25 participant·e·s à Melbourne (Australie), Lawrence et al. (2018) ont analysé les risques d'emportiage qui se produisent lorsqu'un·e conducteur·rice ouvre subitement la portière de son véhicule motorisé sans céder le passage aux cyclistes circulant dans la voie adjacente. Pour ce faire, seules deux caméras (vues avant et arrière) et un GPS (localisation et vitesse) sont utilisés. La collecte de données s'est déroulée seulement durant quatre heures sur une distance totale de 84 kilomètres. L'intérêt d'une telle approche est qu'elle permet de caractériser plusieurs situations selon leur dangerosité :

1. un véhicule stationné (1166 évènements par heure, soit 55 par kilomètre);
2. un véhicule stationné avec un conducteur·trice cédant le passage au cycliste (*give-way events* en anglais) (6,9 évènements par heure, soit 0,3 par kilomètre);
3. un évènement dangereux sans collision (*obstruction event* en anglais) (2,3 évènements par heure, soit 0,1 par kilomètre);
4. et finalement un emportiage (heureusement aucun emportiage n'a été répertorié durant leur collecte).

Bien qu'intéressante, en raison du faible volume de données collectées (en termes d'heures et de kilomètres parcourus), il convient d'analyser avec prudence les chiffres reportés ci-dessus.

En résumé, les études sur les conflits avec des vélos équipés sont très utiles pour documenter les conflits en fonction de l'usager·ère impliqué·e et des types d'axe routiers ou cyclables, et ce, afin de prévenir les risques d'accident. À cet égard, la quasi-totalité des études préconise de séparer les cyclistes du trafic routier.

1.1.3 Études sur la détection automatique de véhicules avec des vélos équipés

Dans cette section, nous discutons d'un axe de recherche émergent sur les vélos équipés, ce qui explique que peu d'articles ont été répertoriés. Comme exposé précédemment, l'interaction avec les véhicules motorisés représente un grand enjeu de sécurité pour les cyclistes. Certaines études développent des modèles et des techniques visant à détecter les véhicules en temps réel avec comme objectifs : d'une part, informer les cyclistes sur les risques potentiels à proximité, et d'autre part, identifier rapidement les partenaires du conflit.

Dans l'étude de Jeon et Rajamani (2018), les chercheur·se·s ont développé un dispositif de détection automatique pour repérer et suivre les véhicules qui s'approchent par l'arrière d'un·e cycliste en mouvement, en proposant un algorithme d'IMM (*Interacting multiple model*). Ce dispositif repose sur trois appareils fixés sur la roue arrière du vélo : une caméra, un moteur rotatif sur lequel est fixé un capteur de distance de type LIDAR. Lorsque le véhicule s'approche trop près du ou de la cycliste, le système déclenche une alarme pour avertir le·la cycliste. À l'aide d'un capteur de distance (jusqu'à 25 mètres) situé sur une plateforme rotative, les chercheur·se·s ont mis au point un système qui prédit en temps réel la trajectoire d'un véhicule lors d'un dépassement et enregistre la plus petite distance entre la roue arrière du vélo et le véhicule. Les chercheur·se·s décrivent quatre types d'approches de véhicule qui sont ensuite testés sur un circuit expérimental :

1. le véhicule s'approche du·de la cycliste par l'arrière;
2. le véhicule change sa trajectoire de conduite vers la gauche pour dépasser le·la cycliste (éloignement);
3. le véhicule change de voie de circulation pour se placer à l'arrière du·de la cycliste (rapprochement);
4. le véhicule dépasse le·la cyclistes sur la voie adjacente.

Les résultats expérimentaux ont montré que le dispositif a suivi les véhicules pendant les quatre scénarios, en faisant une prédiction précise de la position du véhicule (comparativement à l'analyse visuelle de la vidéo du trajet). Cependant, les auteur·e·s rapportent deux principales limites à leur dispositif. Par exemple, les véhicules situés en dehors du rayon de braquage du capteur ou roulant très vite n'ont pas été détectés. De plus, si le·la cycliste change aussi sa trajectoire, il devient plus difficile de bien identifier les quatre scénarios. Aussi, le temps de réponse est crucial pour éviter les accidents. Sur les routes urbaines à faible vitesse, leur dispositif est capable d'informer le·la cycliste de la proximité d'un véhicule en moins de 1,85 seconde ; ce temps variant en fonction de la distance minimale à laquelle est détectée le véhicule et de sa

vitesse. Concrètement, ce type de dispositif permettrait ainsi à un·e cycliste d'être informé·e de l'approche d'un véhicule, de sa trajectoire et de sa distance et de lui envoyer au besoin une alerte en cas de danger. Des solutions commerciales ont été proposées récemment, comme le Garmin Varia™ RTL510 (Olathe, États-Unis).

Une autre approche méthodologique pour détecter les véhicules lorsqu'un·e cycliste est en mouvement est basée sur l'utilisation d'outils d'analyse d'images, avec des techniques comme YOLO (*you only look once*). Ces techniques reposent sur des algorithmes permettant d'identifier des caractéristiques précises dans des vidéos. Les chercheur·se·s peuvent ainsi entraîner des algorithmes pour identifier en temps réel la présence de véhicules, de deux-roues motorisés, de personnes, d'autres vélos ou de n'importe quel objet de l'environnement urbain (G. Li, Song et Fu 2018; Redmon et al. 2016). Initialement, ces outils ont été et sont toujours largement utilisés pour analyser des vidéos de caméras fixes, surtout à des intersections (Ledezma-Navarro, Miranda-Moreno et Saunier 2021; Nabavi Niaki, Saunier et Miranda-Moreno 2019). Récemment, ils ont aussi été utilisés pour analyser des vidéos de caméra fixée sur un vélo, soit en temps réel, soit en post-traitement (Gandhi 2018; Asmara et al. 2020). Leur utilisation peut être aussi très pertinente pour construire des indicateurs de densité trafic en temps réel durant un trajet réalisé en vélo (Asmara et al. 2020).

1.1.4 Études sur la distance latérale de dépassement

Le dernier courant d'études avec des vélos équipés porte sur les dépassements dangereux. Plusieurs auteur·e·s signalent que le moment le plus critique pour la sécurité des cyclistes se produit lors d'une manœuvre de dépassement par un véhicule motorisé (Beck et al. 2016; Sikic et al. 2009). Définie comme étant le plus petit écart mesuré entre un véhicule motorisé et un·e cycliste lorsque le premier dépasse le·la second·e, la distance latérale de dépassement (DLD) représente ainsi la mesure la plus fréquemment utilisée par les chercheur·se·s pour évaluer la sécurité des cyclistes lors d'une telle manœuvre (Beck et al. 2019). Plus cette distance est réduite, plus la sécurité des cyclistes est compromise. Par conséquent, il n'est pas étonnant que plusieurs pays aient ajouté à leur Code de la sécurité routière de nouvelles règles relatives à la DLD, et ce, pour favoriser le partage de la route entre les véhicules motorisés et les cyclistes (tableau 1.3). En guise d'exemple, au Québec, la distance minimale lors d'un dépassement d'un vélo par un véhicule est de 1 mètre dans une zone de 50 km/h ou moins et de 1,5 mètre dans une zone de plus de 50 km/h (RLRQ c. C-24.2).

Tableau 1.3 : Exemples de réglementation sur la distance latérale de dépassement d'un-e cycliste dans quelques pays.

Pays ou région	Réglementation	Référence
Province de Québec	1 mètre dans une zone de 50 km/h ou moins. 1,5 mètre zone de plus de 50 km/h.	RLRQ c. C-24.2, Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ 2021b).
France	1 mètre en agglomération 1,5 mètre hors agglomération	Article R414-4 du Code de la route français.
Espagne	1,5 mètre	Décret législatif 6/2015, ministère espagnol de l'Intérieur.
Colombie	1,5 mètre	Loi 1811 de 2016, ministère colombien des Sports.
État de New York	3 pieds (non adopté à ce jour)	Projet de loi n° A00547, Assemblée de l'État de New York.
Cote d'Ivoire	1 mètre en agglomération 1,5 mètre hors agglomération	Code de la route, ministère ivoirien des Transports.
Australie	1 mètre dans une zone de 60 km/h ou moins. 1,5 mètre zone de plus de 60 km/h.	Code de la circulation routière 2000, Commission de la sécurité routière australienne.

Nous avons répertorié une douzaine d'articles sur la DLD utilisant des vélos équipés de différents appareils (tableau 1.4). Nous discuterons de ces études en deux temps. Dans un premier temps, nous décrirons les différentes approches technologiques et méthodologiques mobilisées. Il s'agira notamment de discuter de la complexité de mesurer et d'évaluer la DLD dans une étude naturalistique en milieu urbain. Dans un second temps, nous nous attarderons aux résultats mis en évidence dans ces articles. Il s'agit alors de décrire les différents facteurs concourant à augmenter ou à diminuer la DLD en milieu urbain, notamment les facteurs associés aux caractéristiques du réseau routier, relatifs au trafic routier et finalement aux caractéristiques des cyclistes.

Approches technologiques et méthodologiques

Dans un premier temps, nous proposons de décrire les différentes approches technologiques utilisées dans les études sur la DLD (figure 1.4 et tableau 1.4). Cinq groupes d'études mobilisant les combinaisons d'appareils ont ainsi été répertoriés :

1. Trois études utilisent **uniquement des caméras** (Stewart et McHale 2014; Parkin et Meyers 2010; Love et al. 2012), représentant ainsi l'approche technologique la plus simple à mettre en œuvre. En l'absence d'un capteur de distance, la DLD est mesurée

directement à partir d'une image du dépassement extraite de la vidéo enregistrée par une caméra latérale. Bien qu'intéressante, cette approche est peu précise et par conséquent largement délaissée dans les études subséquentes.

2. Le second groupe d'études combine à la fois **une caméra et un capteur de distance de type sonar** (Walker 2007; Walker, Garrard et Jowitt 2014). L'ajout du capteur de distance permet de mesurer beaucoup plus précisément la DLD pour les dépassements repérés ou validés avec les vidéos.
3. Le troisième groupe d'études inclut aussi une **caméra et un capteur de distance de type sonar ou Lidar et ajoute un GPS** (Mehta, Mehran et Hellinga 2015; Dozza et al. 2016; Llorca et al. 2017; Beck et al. 2019). L'utilité du GPS est double. D'une part, elle permet de connaître la vitesse du ou de la cycliste lors du dépassement (cela peut être aussi fait avec un compteur de vitesse) afin de vérifier si elle a ou non un effet significatif sur la DLD (ou sur le fait de subir un dépassement dangereux). D'autre part, elle permet de localiser le dépassement. Combiné à des données secondaires d'un réseau routier, il est alors possible d'identifier sur quel type d'axe routier a eu lieu le dépassement.
4. Shackel et Parkin (2014) utilisent une **caméra, un capteur de distance et un microphone**. L'intérêt de cette approche est de pouvoir documenter les perceptions des cyclistes lors du dépassement. Il serait ainsi possible d'ajouter un bouton poussoir que les cyclistes pourraient activer lors d'un dépassement considéré comme dangereux. On pourrait alors comparer des mesures objectives et subjectives sur la DLD ou plus spécifiquement les dépassements dangereux.
5. Finalement, une seule étude mobilise une **multitude d'appareils : GPS, capteur d'angle, accéléromètre, gyroscope, capteur de distance et caméra** (Chuang et al. 2013). L'objectif est ainsi de mesurer la DLD et de caractériser le comportement de conduite du ou de la cycliste durant le dépassement. Il est à noter toutefois que l'exploitation combinée des données de l'ensemble de ces appareils est très complexe.

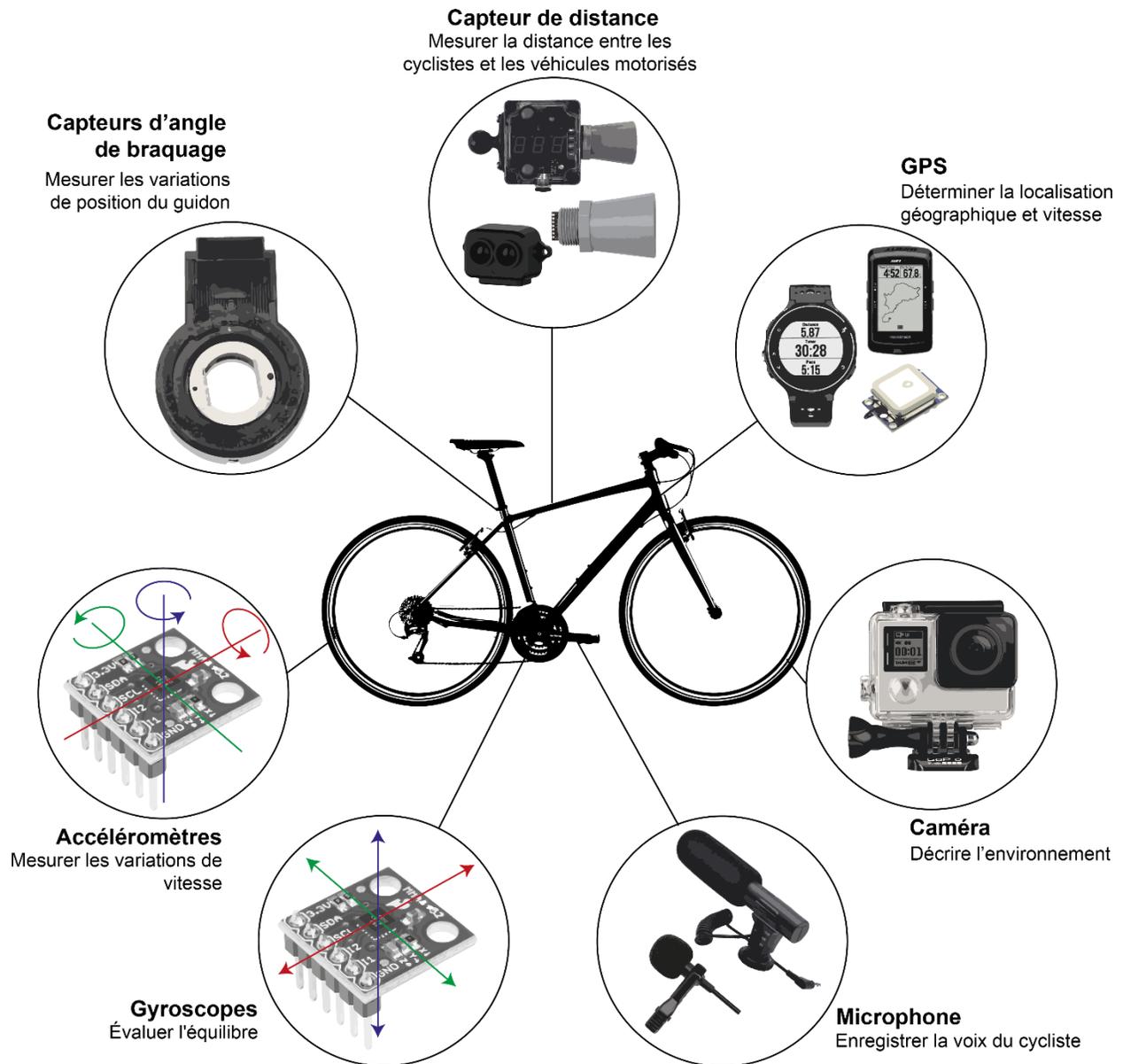


Figure 1.3 : Types d'appareils utilisés dans les études portant sur la DLD

Tableau 1.4 : Synthèse des études sur la DLD avec des vélos équipés d'appareils.

Auteur·e·s	Ville (pays)	Facteurs contribuant à la DLD explorés dans l'étude																		
		Type d'appareils						Réseau routier			Trafic			Cycliste						
		GPS	Capteur d'angle	Accéléromètre	Gyroscope	Microphone	Capteur de distance	Caméra	Largeur de route	Bande cyclable	Véhicules stationnées	Densité du trafic	Limite de vitesse	Vitesse des véhicules	Type de véhicule	Véhicules en sens inv.	Genre	Expérience	Vitesse	Apparence
Love et al. (2012)	Maryland (États-Unis)							✓				✓	✓					✓		
Stewart et McHale (2014)	Édimbourg (Écosse)							✓			✓	✓	✓		✓				✓	
Parking et Meyers (2010)	Lancashire (Angleterre)							✓			✓		✓		✓					
Walker et al. (2014)	Salisbury et Bristol (Angleterre)						✓	✓							✓				✓	✓
Walker (2007)	Salisbury et Bristol (Angleterre)						✓	✓							✓			✓	✓	
Mehta et al. (2015)	Kitchener-Waterloo (Canada)	✓						✓	✓		✓	✓			✓					
Dozza et al. (2016)	Göteborg (Suède)	✓						✓	✓						✓					
Llorca et al (2017)	Valence (Espagne)	✓						✓	✓						✓					
Beck et al. (2019)	Victoria (Australie)	✓						✓	✓		✓	✓			✓					
Shackel et Parkin (2014)	Liverpool (Angleterre)							✓	✓	✓					✓					
Chuang et al. (2013)	<i>Ville non mentionnée</i> (Taiwan)	✓	✓	✓	✓			✓	✓						✓			✓	✓	

À la lecture du tableau 1.4, il est clair que les études sur la DLD utilisent une grande variété de dispositifs pour analyser l'influence de divers facteurs sur la distance latérale de dépassement d'un·e cycliste par un véhicule motorisé. Les approches sont donc loin d'être standardisées d'une étude à l'autre. À cela s'ajoute d'autres différences méthodologiques importantes. Premièrement, tel qu'indiqué au tableau 1.4, elles sont réalisées dans des pays et des villes avec des contextes géographiques et culturels variés. On peut supposer que les comportements de conduite sont

bien différents à Liverpool (Angleterre) qu'à Göteborg (Suède) ou encore qu'à Valence (Espagne) ou à Victoria (Australie). Ils risquent même de varier au sein d'un même pays; en guise d'exemple, il est probable qu'ils soient bien différents à Kitchener-Waterloo qu'à Toronto, à Montréal ou à Vancouver. Deuxièmement, le design des collectes de données primaires à vélo varie fortement d'une étude à l'autre en termes du nombre de participant·e·s impliqué·e·s, d'heures et de jours de collecte. Certaines collectes sont plutôt intensives (empruntant uniquement quelques axes à répétition) (Llorca et al. 2017; Dozza et al. 2016; Shackel et Parkin 2014; Mehta, Mehran et Hellinga 2015) et d'autres, extensives (en diversifiant au maximum les types d'environnement traversés par les cyclistes et la couverture spatiale de la ville) (Chuang et al. 2013; Beck et al. 2019). Certaines collectes sont réellement des études naturalistiques (mobilisant de nombreux participant·e·s réalisant leurs trajets habituels) (Beck et al. 2019), tandis que d'autres sont plutôt quasi-naturalistiques (souvent moins de cinq participant·e·s appartenant à l'équipe de recherche ayant mené l'étude) (Stewart et McHale 2014; Llorca et al. 2017; Dozza et al. 2016; Shackel et Parkin 2014; Walker 2007; Walker, Garrard et Jowitt 2014).

Ces différences technologiques et méthodologiques pour mesurer la DLD et relatives au design des collectes font en sorte que les résultats d'une étude à l'autre sont parfois difficilement comparables. Malgré tout, nous proposons ici une discussion des facteurs influençant DLD, en les regroupant en trois grands groupes (réseau routier, trafic et facteurs individuels). Lors de cet exercice, nous tenterons de vérifier s'il se dégage ou non un consensus sur l'impact de ces facteurs à travers les différentes études (Walker, Garrard et Jowitt 2014; Stewart et McHale 2014).

Facteurs associés aux caractéristiques des réseaux routier et cyclable influençant la DLD

Plusieurs auteur·e·s ont constaté que la DLD est en moyenne plus importante sur les routes à deux voies ou plus comparativement à celles à une seule voie (Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Mehta, Mehran et Hellinga 2015; Shackel et Parkin 2014). Ce n'est pas étonnant : un axe routier qui compte plusieurs voies offre plus d'espace aux conducteur·rice·s pour dépasser les cyclistes. Par contre, ces auteur·e·s rapportent aussi que plus la largeur et le nombre de voies sont importants, plus la vitesse du véhicule lors du dépassement est élevée (Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Mehta, Mehran et Hellinga 2015; Shackel et Parkin 2014), concourant à la fois à augmenter la probabilité d'une collision et le risque de blessures graves en cas de collision et à réduire le sentiment de sécurité des cyclistes (Apasnore, Ismail et Kassim 2017).

Le type d'aménagement cyclable peut aussi avoir un impact sur la DLD. Concernant la présence d'une bande cyclable, les résultats diffèrent très largement d'une étude à l'autre. À Victoria

(Australie) (Beck et al. 2019), Lancashire (Angleterre) (Parkin et Meyers 2010) et Ann Arbor (Michigan, États-Unis) (Feng et al. 2018), circuler sur une bande cyclable semblerait diminuer significativement la DLD (comparativement à une voie sans cet aménagement). Comment expliquer un tel résultat ? Il est probable que certain·e·s automobilistes considèrent à tort la ligne de la bande cyclable comme une mesure de protection des cyclistes. Ils et elles n'hésitent donc pas à les frôler et à réaliser ainsi des dépassements dangereux. À l'inverse, à Kitchener-Waterloo (Ontario, Canada), Mehta et al. (2015) concluent que la DLD augmente sur les routes avec deux voies et une bande cyclable par rapport à celles sans bande cyclable. Dans la même veine, à Taiwan, Chuang et al. (2013) rapportent une augmentation de la DLD sur les routes (avec une limite de vitesse de 50 km/h) avec une bande cyclable.

La présence de véhicules stationnés sur la route est une variable considérée dans plusieurs études (Apsanore, Ismail et Kassim 2017; Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018). Selon Beck et al. (2019), la DLD serait réduite de 30 à 40 cm en présence de véhicules stationnés. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les cyclistes s'éloignent des véhicules stationnés afin de réduire le risque d'emportierage, se rapprochant ainsi des véhicules en circulation dans la voie directement adjacente.

Facteurs associés aux conditions du trafic routier influençant la DLD

Parmi les facteurs associés au trafic, la densité du trafic est certainement celui le plus exploré dans la littérature (Apsanore, Ismail et Kassim 2017; Dozza et al. 2016; Feng et al. 2018; Llorca et al. 2017; Shackel et Parkin 2014; Walker, Garrard et Jowitt 2014). Il est évalué soit avec des variables de substitution (*proxy variables* en anglais, par exemple des débits journaliers moyens annuels – DJMA) (Parkin et Meyers 2010), soit avec les mesures de trafic en temps réel (Apsanore, Ismail et Kassim 2017). Dans cette dernière étude, les chercheur·se·s constatent qu'une augmentation de la densité du trafic entraîne une réduction de la DLD.

Les limites de vitesse sont également prises en compte dans plusieurs études bien qu'elle ne correspond pas nécessairement à la vitesse de dépassement du véhicule (Parkin et Meyers 2010). Là encore, les résultats diffèrent : certaines études rapportant une valeur inférieure de la DLD (Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018; Shackel et Parkin 2014) et d'autres une valeur supérieure (Parkin et Meyers 2010) sur des routes avec des limites de vitesse élevées.

Plusieurs auteur·e·s ont mesuré la vitesse des véhicules lors du dépassement (avec un capteur de vitesse) (Dozza et al. 2016; Llorca et al. 2017) ou l'ont estimé (à partir des vidéos ou de la

fréquence de capture de capteur de distance) (Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Mehta, Mehran et Hellinga 2015). Certain·e·s concluent que la vitesse n'a pas eu d'influence significative sur la DLD (Dozza et al. 2016; Mehta, Mehran et Hellinga 2015), contrairement à Apasnore et al. (2017) rapportant qu'elle est positivement corrélée à la DLD. Llorca et al. (2017) ont réalisé une analyse quantitative de la perception des cyclistes lors du dépassement. Bien que les chercheur·se·s n'aient pas trouvé de relation significative entre la vitesse et la DLD, la perception du danger pour le·la cycliste était très élevée lors d'une manœuvre de dépassement à grande vitesse (supérieure à 80 km/h).

La DLD pourrait aussi varier significativement selon le type de véhicule. Bien que la classification utilisée diffère d'une étude à l'autre, l'hypothèse de départ reste la même, à savoir que les véhicules de plus grand volume (bus, camion, camionnette) ont tendance à diminuer la DLD par rapport aux voitures plus petites (voiture, taxi, SUV). Plusieurs études confirment cette hypothèse (Beck et al. 2019; Chuang et al. 2013; Debnath et al. 2018; Parkin et Meyers 2010).

Finalement, il semblerait que la DLD diminue avec la présence de véhicules en sens inverse (Dozza et al. 2016; Feng et al. 2018; Llorca et al. 2017; Shackel et Parkin 2014). Paradoxalement, Dozza et al. (2016) constatent que la vitesse des véhicules effectuant la manœuvre de dépassement diminue en présence de véhicules circulant dans les voies adjacentes (même sens ou sens inverse).

Facteurs associés aux cyclistes influençant la DLD

Plusieurs facteurs individuels pourraient concourir à diminuer ou augmenter significativement la DLD, particulièrement le genre, l'expérience, l'apparence et la vitesse des cyclistes.

Premièrement, certain·e·s chercheur·se·s ont tenté d'évaluer l'influence du genre des cyclistes sur la DLD. Selon Debnath et al. (2018), ce facteur individuel n'aurait aucune influence significative dans l'état du Queensland en Australie. Au contraire, Chuang et al. (2013) ont montré que les conducteur·trice·s ont tendance à accorder plus d'espace aux femmes qu'aux hommes à Taiwan. Il importe de souligner que les hommes ayant participé à l'étude avaient plus d'expérience à vélo que les femmes participantes. Ces résultats sont corroborés par Walker (2007) dans les villes de Salisbury et Bristol (Angleterre) à partir d'une approche plutôt originale, soit la comparaison de la DLD offerte par les automobilistes à un cycliste masculin selon qu'il circule avec ses cheveux courts non altérés ou qu'il porte une perruque aux cheveux longs (afin d'imiter

une apparence souvent associée au genre féminin). Il rapporte ainsi que la DLD était plus élevée pour le cycliste lorsqu'il portait la perruque (Walker 2007).

Deuxièmement, l'expérience du ou de la cycliste pourrait avoir un impact sur la DLD (Chuang et al. 2013; Walker 2007; Walker, Garrard et Jowitt 2014). Pourtant, à notre connaissance cet élément n'est pas pris en compte dans les études quasi-naturalistes. En effet, certaines études impliquent des participant·e·s avec des niveaux d'expérience différents sans pourtant inclure les identifiants des participant·e·s comme variables explicatives ou de contrôle dans leurs modèles (Beck et al. 2019; Chuang et al. 2013; Llorca et al. 2017). D'autres études vont préférer imposer aux participant·e·s une distance prédéfinie entre le vélo et le trottoir durant les trajets (habituellement de 0,3 m à 1 m) (Dozza et al. 2016; Llorca et al. 2017; Mehta, Mehran et Hellinga 2015; Parkin et Meyers 2010; Shackel et Parkin 2014; Walker, Garrard et Jowitt 2014). Par conséquent, il semble difficile d'établir si l'expérience ou le type de conduite a un effet significatif ou non sur la DLD.

Troisièmement, la vitesse plus élevée des cyclistes semblerait être associée avec une réduction de la DLD (Apasnore, Ismail et Kassim 2017). Selon cette étude, les automobilistes considéreraient les cyclistes rapides plus expérimenté·e·s et donc moins vulnérables lors d'un dépassement à faible distance latérale.

Quatrièmement, l'apparence du ou de la cycliste ne semble pas avoir d'impact significatif (Debnath et al. 2018; Walker, Garrard et Jowitt 2014). En guise d'exemple, Walker et al. (2014) ont comparé sept types d'habillement cyclistes associés avec le niveau d'expérience des cyclistes, dont l'un comprenait une veste sur laquelle était inscrit « *Novice cyclist. Pass Slowly* » et un autre avec le mot « *Police* ». Seul ce dernier est associé avec une différence significative sur la DLD, d'environ 8 cm plus grands par rapport aux autres types de vêtements.

DLD et durée de dépassement

La durée de dépassement pourrait avoir aussi un impact sur la DLD. Selon Dozza et al. (2016), elle peut être considérée comme le temps total pour effectuer les quatre phases : approche du véhicule, éloignement, dépassement latéral et retour sur l'axe. Dozza et al. (2016) ont trouvé que le temps moyen de la phase du dépassement latéral – durant laquelle le·la cycliste est particulièrement exposé·e – est de 1,65 seconde ($\pm 0,61$), avec une distance moyenne de 2,03 mètres ($\pm 0,28$). Aussi, selon Chuang et al. (2013), la DLD sera significativement plus faible lors de dépassements rapides (0,1 à 0,4 seconde) par rapport à ceux dont la durée est supérieure

à 0,4 seconde. Les liens entre DLD, temps du dépassement et sécurité sont donc encore très peu explorés.

1.2 Problématique, question et objectifs de recherche

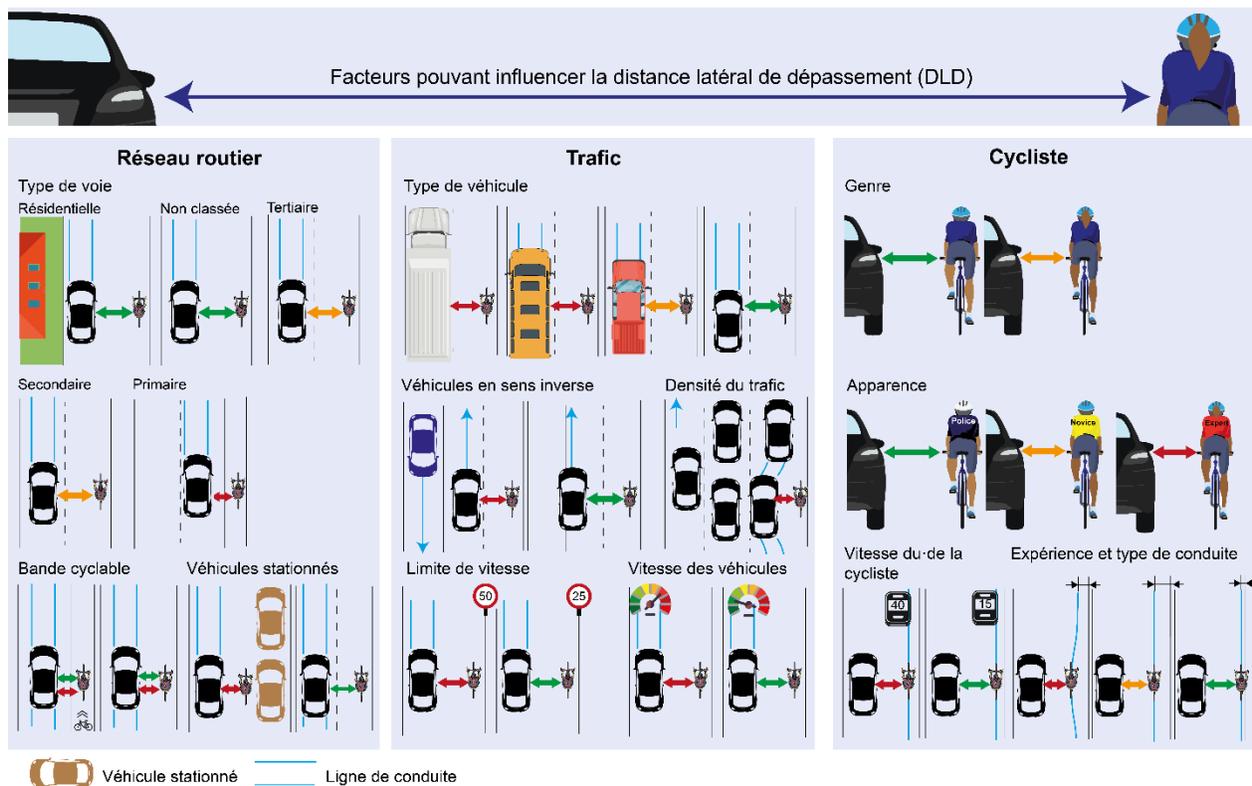
1.2.1 Problématique

Dans la province du Québec, la réglementation du Code de la sécurité routière fixe des distances minimales pour assurer la sécurité des cyclistes, soit 1 mètre dans les zones de 50 km/h ou moins et 1,5 mètre pour les zones de plus de 50 km/h (RLRQ c. C-24.2) (SAAQ 2021b; SAAQ 2021c). Bien qu'il y a une réduction du nombre de cyclistes blessé·e·s au Québec dans des collisions avec des véhicules (1385 en 2019 contre 1257 en 2020) (Vélo Québec 2020), ces collisions restent l'un des principaux facteurs de risque pour les cyclistes au Québec. À l'échelle des villes, Montréal fait office d'exemple avec une « culture du vélo » très développée, tel qu'en témoignent les programmes de vélo-stations (Bixi), les lignes de bus avec support à vélo, le Festival Go vélo et les programmes d'éducation (par exemple, le programme Cycliste averti) (Vélo Québec et Montréal 2020). Aussi, la Ville de Montréal dispose de plus de 1000 kilomètres de voies cyclables, avec toutefois uniquement 27% du réseau cyclable correspondant à des voies réservées exclusivement aux cyclistes (séparées du trafic) (Vélo Québec et Montréal 2020, 11). Les cyclistes doivent alors partager une grande partie de leurs trajets avec des véhicules motorisés. Cela se traduit par un nombre d'accidents élevé avec 1385 accidents impliquant des cyclistes, dont 11% des accidents se sont produits sur les bandes cyclables (infrastructures non protégées) et 60% dans des voies de circulation (Ville de Montréal 2020).

Nous avons vu dans la revue de la littérature que la distance latérale de dépassement (DLD) est un enjeu important de sécurité pour les cyclistes et qu'elle peut être influencée par de nombreux facteurs regroupés en trois grandes dimensions, tels qu'illustrés à la figure 1.4 :

- les caractéristiques du réseau routier (largeur et types de voies, présence d'une bande cyclable, présence de véhicules stationnés) ;
- les conditions de trafic (densité, types de véhicules, limite de vitesse autorisée, véhicules en sens inverse) ;
- les caractéristiques des cyclistes (genre, apparence, vitesse, expérience et type conduite).

Rappelons toutefois que plusieurs facteurs ne font pas consensus dans la littérature, et ce, en fonction des approches méthodologiques et des villes à l'étude. Concernant les approches méthodologiques, peu d'études reposent sur une collecte de données extensive à travers l'ensemble de la ville ; la plupart se concentrent sur certains types de tronçons. Or, à notre avis, l'exploration simultanée de l'ensemble des facteurs influençant la DLD nécessite de maximiser à la fois la variété d'environnements traversés par les cyclistes et la couverture de la ville. Concernant les villes étudiées, la plupart sont européennes – Angleterre (Parkin et Meyers 2010; Shackel et Parkin 2014; Walker 2007; Walker, Garrard et Jowitt 2014), Écosse (Stewart et McHale 2014), Suède (Dozza et al. 2016) et Espagne (Llorca et al. 2017) – et secondairement australienne (Beck et al. 2019) et taiwanaise (Chuang et al. 2013). À notre connaissance, la question de la DLD a été peu explorée dans les villes canadiennes, à l'exception de Kitchener-Waterloo (Mehta, Mehran et Hellinga 2015), soit une ville de taille moyenne. Par conséquent, explorer la DLD dans une grande ville comme Montréal risque d'apporter un éclairage nouveau sur le sujet.



* Note : ces facteurs ne font pas tous consensus dans les études sur la DLD.

Figure 1.4 : Cadre théorique : facteurs influençant la DLD et pouvant concourir ou non à un dépassement dangereux

1.2.2 Objectifs

Plusieurs facteurs relatifs au réseau routier, au trafic et aux cyclistes peuvent ainsi avoir un impact sur la DLD et augmenter ou diminuer ainsi la probabilité qu'un·e cycliste subisse un dépassement dangereux. Un autre facteur encore peu exploré est la durée de dépassement dont la relation avec la DLD n'ait pas encore clairement établie. En conséquence, l'objectif principal de cette étude est d'analyser les facteurs concourant à augmenter ou diminuer la probabilité d'un dépassement dangereux à Montréal (Canada) à partir d'une méthode de collecte quasi-naturalistique et extensive. Le second objectif est d'explorer les liens existant ou non entre le DLD et la durée de dépassement. Le premier article soumis à *Safety* vise à répondre à ces deux objectifs (chapitre 3).

Dans la section de la revue de littérature sur la DLD (1.1.4), nous avons vu qu'une multitude de solutions technologiques – reposant sur des combinaisons de capteurs variées – a été proposée pour mesurer la DLD. Toutefois, ces approches méthodologiques et technologiques sont loin d'être standardisées d'une étude à l'autre. Par conséquent, le deuxième article a pour objectif développer une solution technologique *open source* à faible coût pour mesurer la DLD, enregistrer la position géographique et une vidéo du trajet. L'article publié dans *Sensors* vise à répondre spécifiquement à cet objectif (chapitre 4).

1.2.3 Question et hypothèses

Le projet de recherche sera ainsi guidé par la question suivante : **quels sont les facteurs qui influencent significativement la probabilité qu'un·e cycliste subisse un dépassement dangereux sur l'île de Montréal ?** Relativement à cette question de recherche, nous formulons les hypothèses suivantes, basées, entre autres, sur les résultats des études antérieures sur la DLD :

- Le jour de la semaine, le moment de la journée et la localisation géographique sont des facteurs bien connus pour avoir un impact sur les conditions de trafic (Włodarek et Olszewski 2020; Carvajal et al. 2020; Rahman et al. 2019; Schleinitz et al. 2015). Par conséquent, il est probable que certains jours de la semaine (par exemple jeudi et vendredi), les heures de pointe (du matin et du soir) et les quartiers centraux de la ville, habituellement caractérisés par des densités de trafic plus élevées, soient associés avec des probabilités plus importantes de dépassement dangereux.

- Il est aussi possible que la probabilité d'observer un dépassement soit influencée par les caractéristiques des cyclistes, particulièrement la vitesse à laquelle il ou elle circule. À l'instar d'Apasnore et al. (2017), il est probable que les cyclistes rapides soient considéré·e·s comme plus expérimenté·e·s par les conducteur·rice·s de véhicules motorisés, et donc plus sujets à subir un dépassement dangereux.
- Une fois ces facteurs contrôlés, on s'attend à ce que circuler sur un axe majeur, tel que les routes primaires et secondaires, augmente la probabilité d'observer des dépassements dangereux comparativement à une rue résidentielle (Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018; Llorca et al. 2017; Shackel et Parkin 2014).
- Concernant le type de véhicule, on prévoit une augmentation de la probabilité d'observer un dépassement dangereux en présence de véhicules volumineux (bus, camion et dans une moindre mesure, camionnette [pick-up]) comparativement à une voiture (Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018), puisqu'ils et elles ont moins d'espace pour réaliser un dépassement.
- La présence d'une bande cyclable pourrait soit augmenter la probabilité d'observer un dépassement dangereux (Beck et al. 2019; Feng et al. 2018; Parkin et Meyers 2010) ou à l'inverse, la diminuer (Chuang et al. 2013; Mehta, Mehran et Hellinga 2015). Il est en effet possible que certain·e·s conducteur·trice·s de véhicules motorisés considèrent, à tort, que la ligne de démarcation de la bande cyclable protège les cyclistes.
- Il est possible que la durée des dépassements dangereux soit plus courte (Chuang et al. 2013).

1.2.4 Pertinence de la recherche

À notre avis, la pertinence de la recherche est double. Premièrement, elle apportera un éclairage nouveau sur la DLD, en explorant le cas d'une grande ville nord-américaine où les cyclistes doivent souvent partager la route avec des véhicules motorisés. Deuxièmement, aucune donnée ou statistique sur la DLD ne semble être actuellement disponible à Montréal. Pourtant, le Service de police de la Ville de Montréal (SPVM) a acquis plusieurs Codaxus C3FT, soit un appareil

permettant de mesurer la DLD. Deux articles de journaux⁶ signalent d'ailleurs que des patrouilleurs à vélo du SPVM pourraient avoir utilisé ces dispositifs durant le printemps 2019. Nos résultats permettront ainsi de révéler l'ampleur des dépassements dangereux à Montréal, mais aussi d'identifier les facteurs les plus importants y contribuant.

⁶ <https://www.24heures.ca/2019/01/07/le-spvm-calculera-la-distance-entre-les-automobilistes-et-les-cyclistes-1> et <https://journaldesvoisins.com/le-spvm-surveillera-le-depassement-securitaire-des-cyclistes/>

CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE

L'objectif de ce second chapitre est de décrire la méthodologie mise en œuvre pour explorer les facteurs influençant la distance latérale de dépassement (DLD) des cyclistes sur le territoire de l'île de Montréal. Plus spécifiquement, nous présenterons le territoire à l'étude, la collecte de données extensive réalisée à vélo (trajets et équipements utilisés), la structuration et la modélisation des données sur la distance latérale de dépassement (DLD).

2.1 Territoire d'étude

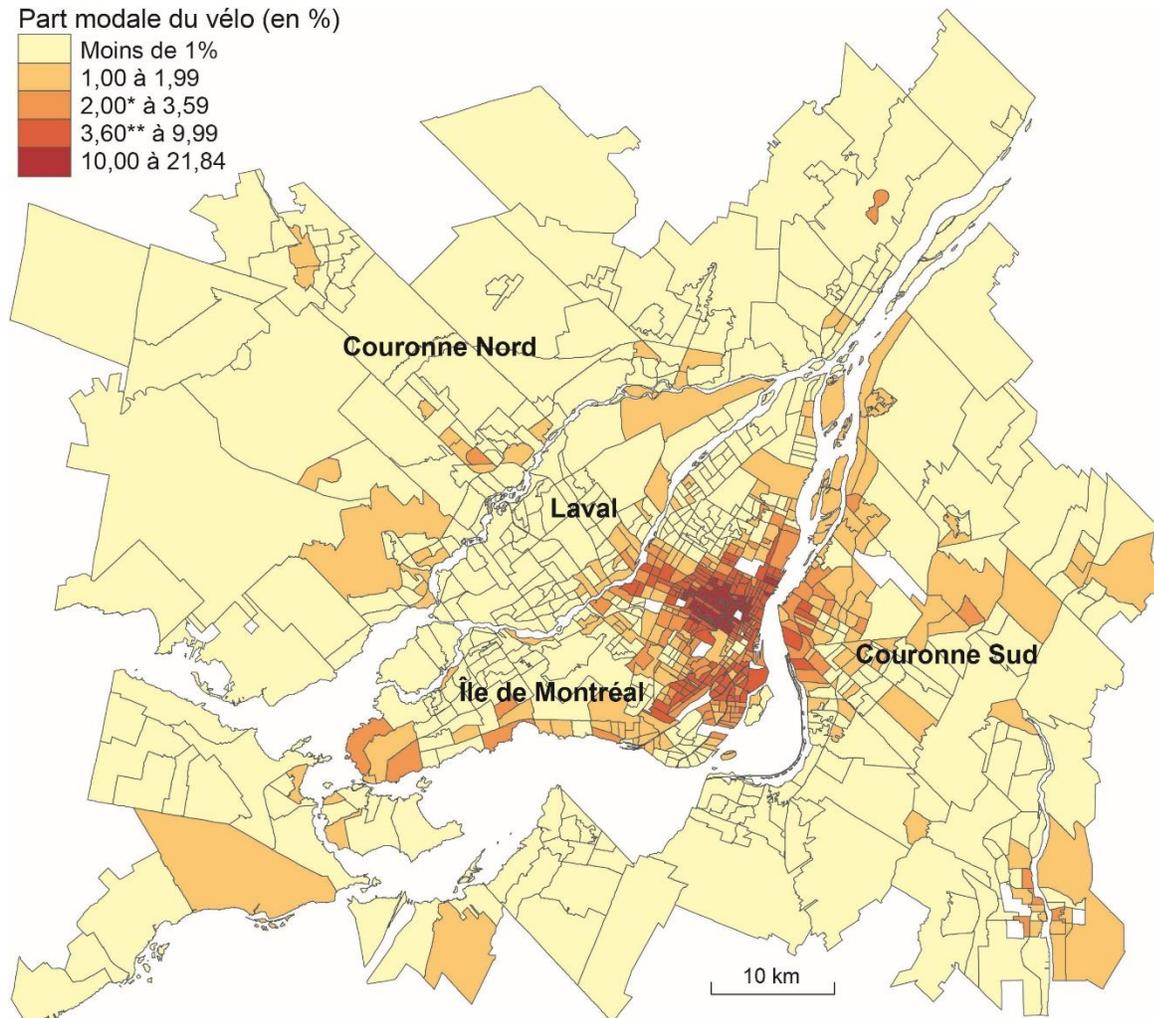
L'étude est réalisée sur l'île de Montréal⁷ qui compte les 19 arrondissements de la Ville de Montréal et 16 municipalités, avec une superficie totale de 483 km². En 2020, ce territoire compte 1,94 million d'habitants en 2020, dont 350 000 ont utilisé leur vélo au moins une fois par semaine (Vélo Québec et Montréal 2020, 21). La Ville de Montréal se classe d'ailleurs au 18^e rang au classement de 2019 du *Copenhagenize Index*, visant à identifier les vingt villes du monde les plus favorables à la pratique vélo (Copenhagenize 2019). À égalité avec Vancouver, elles sont d'ailleurs les deux seules villes nord-américaines à faire partie de ce prestigieux classement.

En termes de pratique et d'utilisation de la bicyclette, selon la dernière édition de *L'état du vélo à Montréal* (Vélo Québec et Montréal 2020), les cyclistes montréalais·e·s pédalent 4,1 heures par semaine et sont actif·ve·s en moyenne 5,5 mois par an. Toujours selon cette édition, le nombre de cyclistes adultes varie significativement selon la période de l'année : environ 260 000 en automne, 880 000 en été, 475 000 au printemps et 60 000 en hiver (Vélo Québec et Montréal 2020). Bien ses chiffres peuvent sembler impressionnants à la première lecture, la part modale du vélo reste faible comparativement aux autres modes de transport. En effet, elle est passée de 2,8 à 3,3 sur l'île de Montréal entre 2013 et 2020 (Vélo Québec et Montréal 2020), signalant une popularité certes croissante, mais limitée de ce mode de transport actif.

Nous avons décidé de nous limiter au territoire de l'île de Montréal et non celui de la région métropolitaine de recensement (RMR) ou encore celui de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) pour deux raisons principales. Premièrement, les parts modales du vélo sont

⁷ Les territoires de l'île de Montréal et l'agglomération ou région de Montréal sont quelque peu différents. L'agglomération de Montréal comprend plusieurs autres îles – Bizard, Dorval, des Sœurs, Saint-Hélène et Notre Dame (les deux dernières formant le parc Jean-Drapeau) – sur lesquelles aucun trajet à vélo n'a été réalisé.

beaucoup plus faibles à Laval et dans les couronnes nord et sud (figure 2.1). Deuxièmement, puisque la méthodologie repose sur une collecte extensive à vélo, il aurait été très chronophage de réaliser une collecte couvrant le territoire de la RMR ou celui de la CMM.



* Part modale du vélo dans l'ensemble de la RMR de Montréal.

** Part modale du vélo dans l'agglomération de Montréal (division de recensement).

Source : Statistique Canada, recensement de 2016.

Figure 2.1 : Part des déplacements domicile-travail réalisés à vélo, région métropolitaine de Montréal, 2016

Relativement à l'étendue de son réseau cyclable, l'île de Montréal dispose de 1001 kilomètres de voies cyclables, dont 287 km de pistes en sites propres (hors rues), 104 km de pistes cyclables sur rue, 334 km de bandes cyclables et 276 km de chaussées désignées (Vélo Québec et Montréal 2020, 11). Cette typologie décrit ainsi les quatre principaux types d'infrastructures cyclables à Montréal. Cependant, il est possible d'utiliser une typologie plus détaillée comprenant

huit types d'infrastructures cyclables (figure 2.2). Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons principalement aux voies routières sans infrastructure cyclable (route primaire, secondaire, tertiaire et rue résidentielle selon la terminologie d'OpenStreetMap) et aux infrastructures cyclables (piste cyclable sans protection, bande cyclable, chaussée désignée et voie partagée avec bus) sur lesquelles les cyclistes peuvent faire l'objet d'un dépassement de la part d'un véhicule motorisé. Autrement dit, nous ne retenons pas les pistes cyclables hors rue, les pistes protégées sur rue, les sentiers multiusages et les sentiers de parc.

1. Pistes cyclables à usage exclusif

1.1 Piste cyclable hors rue



1.2 Piste cyclable sur rue (avec protection)



1.3 Piste cyclable sur rue (sans protection)



2. Voies cyclables sur rue

2.1 Bande cyclable



2.2 Chaussée designée



2.3 Voie réservée bus-vélo



3. Pistes et sentiers multiusages hors rue

3.1 Piste multiusage



3.2 Sentier de parc



Inclus dans l'étude



Non inclus dans l'étude

Figure 2.2 : Les huit types d'infrastructures cyclables à Montréal

2.2 Les données primaires

2.2.1 Design de la collecte extensive à vélo et définition des trajets

La collecte de données a été réalisée sur le territoire de l'île de Montréal par quatre étudiant·e·s ayant chacun·e parcouru de 80 à 100 km par jour pendant cinq jours en juin 2019 (12, 17-19, 21). Au total, 1 689 km ont été parcourus. Le projet a été approuvée par le comité d'éthique de l'INRS (CER 19-509) et le consentement éclairé à participer au projet a été préalablement obtenu auprès de chaque participant·e. Pendant la collecte, les participant·e·s portaient le même maillot de cyclisme, un casque de vélo et les accessoires obligatoires selon la réglementation québécoise (RLRQ c. C-24.2) (réflecteur avant blanc, réflecteur arrière rouge, réflecteur jaune sur chaque pédale, réflecteurs sur les roues). De la crème solaire, deux gourdes d'eau et des capsules d'électrolytes (Nuun, Seattle, WA, États-Unis d'Amérique) leur étaient fournies au début de la matinée et de l'après-midi d'une journée de collecte. Les participant·e·s avaient comme consigne de respecter les règles du Code de la sécurité routière.

Des trajets de 40 à 50 kilomètres le matin et autant l'après-midi pour chacune des journées ont été préalablement définis par les membres de l'équipe du LAEQ dans Google MyMaps en fonction de deux critères. Premièrement, il s'agissait de maximiser la couverture de la ville ; en d'autres termes, de couvrir l'ensemble des quartiers de l'île de Montréal afin d'explorer les variations spatiales et temporelles de la DLD. Deuxièmement, il s'agissait de maximiser la diversité des types de routes et d'infrastructures cyclables empruntés, afin d'explorer la variation de la DLD en fonction des environnements urbains. Puisque les trajets ont été élaborés dans GoogleMyMaps, durant la collecte, chaque participant·e devait suivre le trajet du matin et celui de l'après-midi sur un téléphone portable fixé sur le guidon. Une pause de deux heures était accordée vers midi pour manger, se reposer et recharger les appareils. La nourriture était fournie aux participant·e·s en fonction de leur régimes alimentaires respectifs (allergie ou intolérance alimentaire, alimentation végétarienne ou végétalienne, etc.).

2.2.2 Équipements utilisés durant les trajets à vélo

Les participant·e·s ont utilisé le même type de vélo, soit des vélos hybrides fournis par le LAEQ équipés des différents dispositifs pour mesurer la distance latérale de dépassement et caractériser

l'environnement urbain durant les trajets. Ainsi, chaque participant·e était muni·e de six types d'appareils :

1. Un Codaxus (C3FT v3 Codaxus, Austin, TX, USA) pour mesurer la distance latérale de dépassement avec une intervalle de mesure de 20 à 250 centimètres et un cycle de dix captures par seconde (10 Hz).
2. Un micro-ordinateur Raspberry Pi Zero W (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, UK) pour enregistrer les valeurs de distance du Codaxus avec l'heure précise de la capture (hh:MM:SS.ss).
3. Une montre GPS (Forerunner 920 XT, Garmin International, Inc., Olathe, KS, USA) pour obtenir la position géographique et la vitesse du ou de la cycliste chaque seconde.
4. Deux caméras d'action Garmin (Virb XE, Garmin International, Inc., Olathe, KS, USA), placées sur le guidon du vélo pour enregistrer deux vidéos : l'une latérale, l'autre frontale.
5. Un téléphone portable placé sur le guidon pour suivre les trajets préalablement tracé dans Google MyMaps.
6. Des chargeurs portables (Duracell Powermat 8800 mAh, Duracell, Bethel, Connecticut; États-Unis) (batterie externe) dans lesquels sont branchés le téléphone et les deux caméras.

Chaque matin d'une journée de collecte, les pneus ont été gonflés à la même pression et les horloges de l'ensemble des appareils ont été synchronisées. Le positionnement des appareils sur le vélo pour la collecte est schématisé dans la figure 2.3.

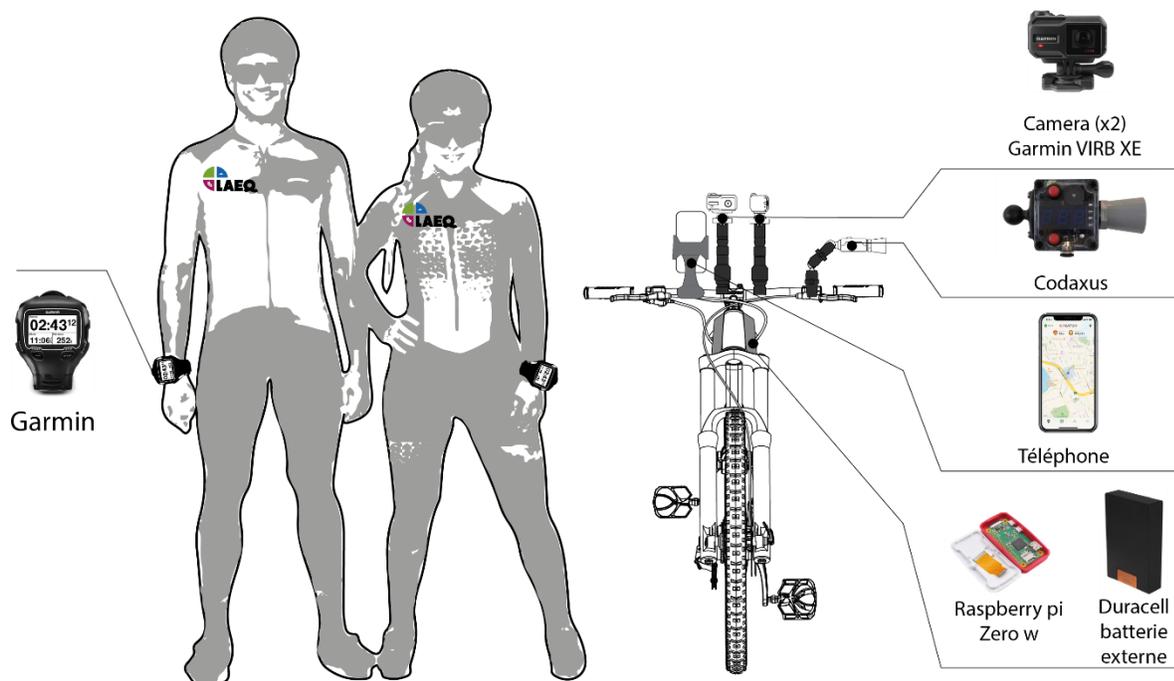


Figure 2.3 : Les appareils utilisés pour la collecte de données.

2.3 Structuration des données primaires et fusion avec les données secondaires

La structuration des données est un processus rigoureux et fondamental dans la réalisation du projet de recherche. Elle consiste principalement à fusionner toutes les données obtenues par l'ensemble des appareils à partir de l'heure précise de chacun d'entre eux. Puis, il s'agit de générer un fichier géographique compatible avec un système d'information géographique (SIG), pour l'utiliser ultérieurement dans des modèles statistiques. Avant de décrire en détail la structuration des données, il est nécessaire de proposer une définition opérationnelle du dépassement.

2.3.1 Identification et caractérisation des dépassements et DLD

La manœuvre de dépassement est l'événement au cours duquel un véhicule motorisé dépasse un-e cycliste en mouvement. Cette manœuvre dépend du type d'infrastructure où le-la cycliste circule, du type de trajectoire du véhicule, de la présence de mobilier urbain entre le-la cycliste et le véhicule et d'autres éléments environnementaux. Un guide de comptage des dépassements a été élaboré pour décrire en détail les types de dépassement (annexe 1).

En résumé, cinq types de manœuvres considérées comme des dépassements sont présentés à la figure 2.4 :

- lorsque le·la conducteur·rice du véhicule change de voie (figure 2.4.a et b);
- lorsqu'il y a absence de ligne de séparation (figure 2.4.c);
- lorsque le·la cycliste circule sur une bande cyclable (figure 2.4.d);
- lorsque le·la cycliste circule sur une route avec des véhicules stationnés (figure 2.4.e, f et g);
- et lorsque le·la cycliste circule sur une bande cyclable unidirectionnelle en présence de véhicules stationnés (figure 2.4.h).

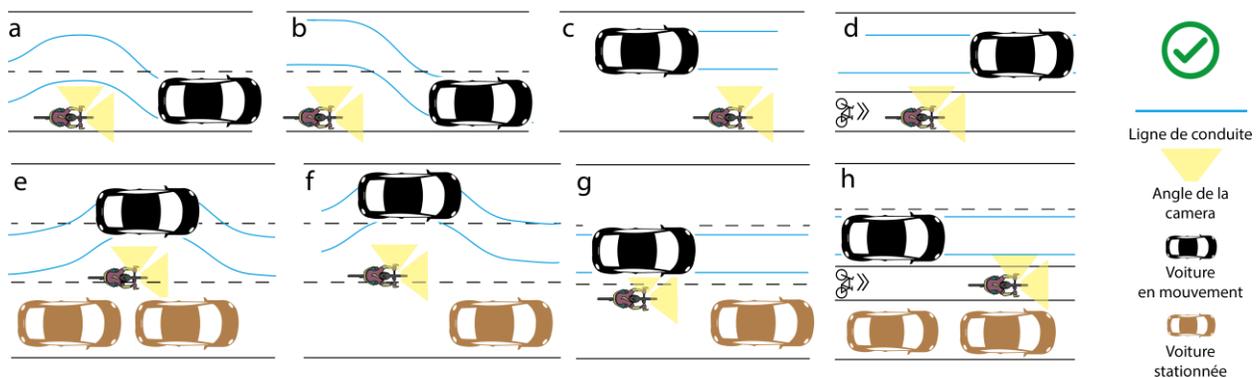


Figure 2.4 : Cas considérés comme des dépassements : (a) et (b) dépassement avec changement de voie ; (c) dépassement en l'absence de ligne de séparation ; (d) dépassement le long d'une bande cyclable ; (e) à (h) dépassement en présence de véhicules stationnés.

Les cas qui ne sont pas considérés comme des dépassements sont présentés dans la figure 2.5. Il n'y a pas de dépassement :

- en présence d'une bande cyclable bidirectionnelle de circulation (figure 2.5.a);
- lorsqu'une voie sépare le·la cycliste et le véhicule qui effectue le dépassement (figure 2.5.b);
- lorsque des véhicules stationnés séparent le·la cycliste et le véhicule qui effectue le dépassement (figure 2.5.c);
- et lorsqu'il y a présence de mobilier urbain entre le·la cycliste et le véhicule qui effectue le dépassement (figure 2.5.d), soit des balises routières, cônes, bollards ou encore une protection en béton. En présence de cônes ou de bollards, les mesures de distance latérales risquent d'être faussées ; il est très difficile de savoir avec exactitude si la mesure est bien la distance avec le véhicule réalisant le dépassement ou bien celle avec le cône ou le bollard.

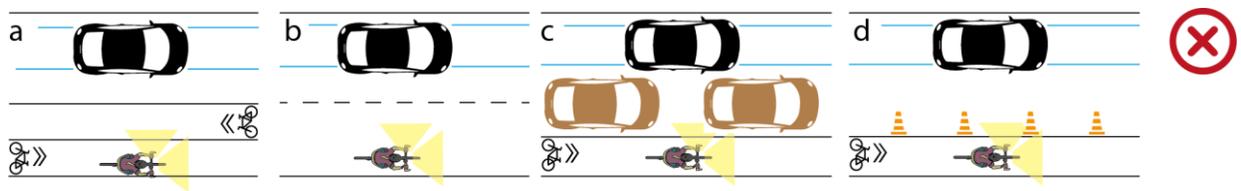


Figure 2.5 : Cas non considérés comme dépassements. (a) dépassement sur une piste bidirectionnelle ; (b) dépassement avec une voie séparant le la cycliste du véhicule ; (c) dépassement le long de véhicules stationnés ; (d) dépassement le long d'une piste cyclable protégée.

En ce qui concerne la caractérisation des dépassements, le logiciel *open source* Vifeco a été utilisé, car il permet de créer plusieurs annotations sur une vidéo (Maigan, Apparicio et Gelb 2021). Cinq catégories ont été créées dans le logiciel en fonction du type de véhicule : voiture, camionnette [pick-up], camion, bus et autre (voir l'annexe 1).

À partir du guide de comptage des dépassements (annexe 1) et du logiciel Vifeco, deux analystes – un stagiaire d'été au baccalauréat en urbanisme et l'auteur du mémoire – ont été entraînés pour identifier et enregistrer les dépassements, et ce, sur dix vidéos d'environ 45 minutes chacune. Cette phase d'entraînement a ainsi permis de s'assurer que le guide de comptage était bien maîtrisé par les deux analystes. Par la suite, le processus a été réalisé sur l'ensemble des vidéos. Chaque analyste observait individuellement les deux vidéos (frontale et latérale) de chaque trajet pour identifier les dépassements. Lorsqu'il identifiait un événement, il devait enregistrer une observation au début et à la fin du dépassement, alignée à la hauteur du dispositif de mesure de distance (figure 2.6). En même temps, l'analyste devait choisir l'icône respective pour le type de véhicule (voiture, camionnette, camion, bus, et autre).

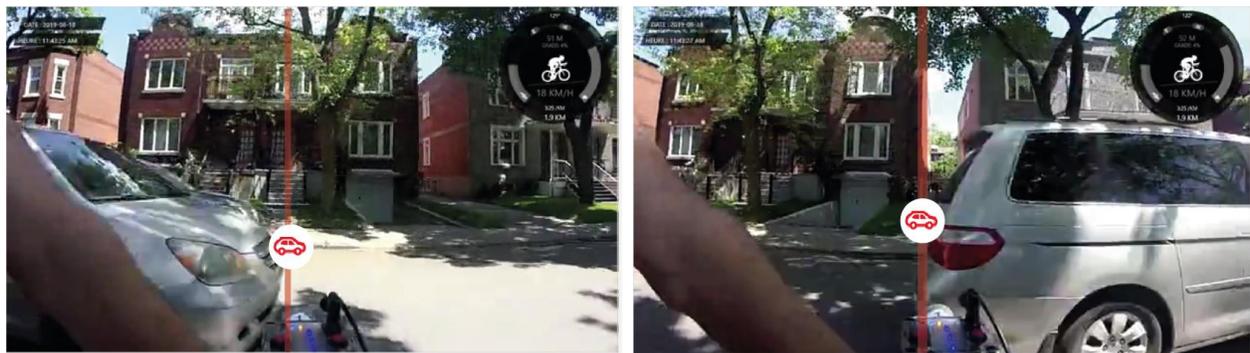


Figure 2.6 : Caractérisation de dépassements sur Vifeco : (a) début du dépassement aligné sur l'appareil de mesure de distance ; (b) fin du dépassement.

Une fois que les analystes ont terminé le processus de comptage, un indice de concordance global a été calculé. Il représente la division entre le nombre total des observations concordantes

et la somme des observations annotées par les deux analystes ; ce pourcentage permet ainsi d'évaluer le niveau de fiabilité du processus de comptage. La valeur finale obtenue est de 92,4% pour 165 vidéos dont la durée totale est de 101 heures. Finalement, un troisième expert (le directeur de recherche) a examiné les cas discordants (7,6%) avec les deux analystes afin de les corriger. Les deux analystes ont consacré environ 230 heures au processus de comptage.

2.3.2 Fusion avec les données secondaires d'OpenStreetMap

La structuration des données comprend cinq étapes, toutes réalisées dans le logiciel R version 4.0.2 (R Core Team 2020).

Premièrement, à partir du logiciel Vifeco, les dépassements ont été exportés au format JSON et importés dans R, tout comme les mesures de distance du Codaxus enregistrées au format CSV sur le Raspberry Pi. Deuxièmement, ces deux sources de données – les observations de dépassement et les mesures de distance – ont été combinées à partir de l'heure précise (hh:MM:SS.ss). Troisièmement, à partir des observations (début et fin de chaque dépassement), il a été possible de déterminer la distance minimale dans l'intervalle et la durée de dépassement.

Quatrièmement, à partir des données de la montre GPS, les coordonnées des itinéraires ont été cartographiées et appariées spatialement (*map-matched*) avec le réseau routier d'OpenStreetMap. De la sorte, pour chaque dépassement, nous disposons des informations suivantes : les types de rues (Key:highway d'OpenStreetMap), les types de voies cyclables (Key:cycleway d'OpenStreetMap) et la vitesse du ou de la cycliste enregistrée sur la montre GPS. Notez d'emblée que nous avons préféré utiliser la typologie d'OMS plutôt que le réseau de la Géobase de la Ville de Montréal, et ce, pour deux raisons principales. Premièrement, le choix de cette typologie facilite les comparaisons avec des études antérieures. Deuxièmement, l'équipe du LAEQ a aussi réalisé des collectes similaires à Toronto et à Québec (respectivement septembre et octobre 2019). Par conséquent, dans des études ultérieures, nous pourrions comparer les résultats de la DLD et les facteurs associés dans ces trois villes canadiennes en utilisant la même typologie du réseau routier, soit celle d'OSM.

Pour une description détaillée des types d'axes du champ *highway*, les lecteur·rice·s pourront consulter la documentation d'OpenStreetMap au lien suivant : <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/FR:Key:highway>. Succinctement, dans une agglomération comme celle de Montréal, les routes primaires correspondent aux artères principales (par

exemple, rue Sherbrooke, boulevard Pie-IX, rue Peel). Les routes secondaires (par exemple, rue Saint-Denis, boulevard Saint-Laurent, boulevard Saint-Joseph) et tertiaires (par exemple rue Saint-Hubert, boulevard Maisonneuve Est) sont des rues de transit automobile (de connexion) entre les quartiers d'une ville (voir en guise d'exemple, des illustrations de ces types de voies à la figure 2.7). Quant aux rues résidentielles, elles comprennent très majoritairement des bâtiments résidentiels de chaque côté de la rue avec des places de stationnement ; et surtout peu ou aucune circulation de transit.

La cinquième et dernière étape de la structuration vise à identifier la présence de véhicules stationnés et des bandes cyclables sur rue pendant chaque dépassement. Pour le faire, des images et des clips vidéo de 20 secondes ont été exportés pour chaque événement. Leur visionnement a ainsi permis de valider la présence d'une bande cyclable et d'identifier les dépassements avec la présence d'un ou plusieurs véhicules stationnés à la droite des cyclistes.

1. Type de voies selon la clé *highway* d'OpenStreetMap

1.1 Route primaire (*rue Sherbrooke*)



1.2 Route secondaire (*boulevard Saint-Laurent*)



1.3 Route tertiaire (*rue Saint-Hubert*)



1.4 Rue résidentielle



Figure 2.7 : Typologie d'OSM à Montréal.

2.3 Modélisation des dépassements

Un modèle logit additif généralisé (GAM) a été construit en utilisant le paquet *mgcv* (Wood 2011). Ce modèle a été sélectionné pour sa capacité à modéliser et à prédire des variables binaires, et à inclure des variables indépendantes, soit sous forme linéaire, soit sous forme non linéaire (*splines*). Dans le modèle, la DLD a été introduite sous forme dichotomique – à moins d’un mètre ou non – permettant ainsi de prédire la probabilité qu’un dépassement dangereux ait lieu. Les variables de contrôle et explicatives sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Spécification du modèle.

Variable	Nom	Modalités	Dimension	Famille
Dépendante	Type de dépassement	Dangereux (<100cm)	-	Binomiale
		Non dangereux (≥100cm)		
Contrôle	Participant	ID du/de la cycliste	FC	Catégorielle
	Jour de collecte	12, 17, 18, 19, 21 juin 2019	FE	Catégorielle
	Moment de la journée	Minutes écoulées depuis 8h00	FE	Continue
	Localisation	Coordonnées géographiques (x,y)	FE	Continue
Explicative	Type d’axe routier	Primaire, secondaire, tertiaire, résidentiel et non classé	FE	Catégorielle
	Bande cyclable	Présence. Absence	FE	Binomiale
	Type de véhicule	Voiture, camionnette, camion, bus et autre	FT	Catégorielle
	Durée de dépassement	Logarithme de la durée entre la fin et le début du dépassement (en secondes)	FT	Continue
	Vitesse du ou de la cycliste	Vitesse au moment du dépassement (km/h)	FC	Continue

FC: Facteurs associés aux cyclistes; FE : Facteurs associés à l’environnement; FT : Facteurs associés au trafic.

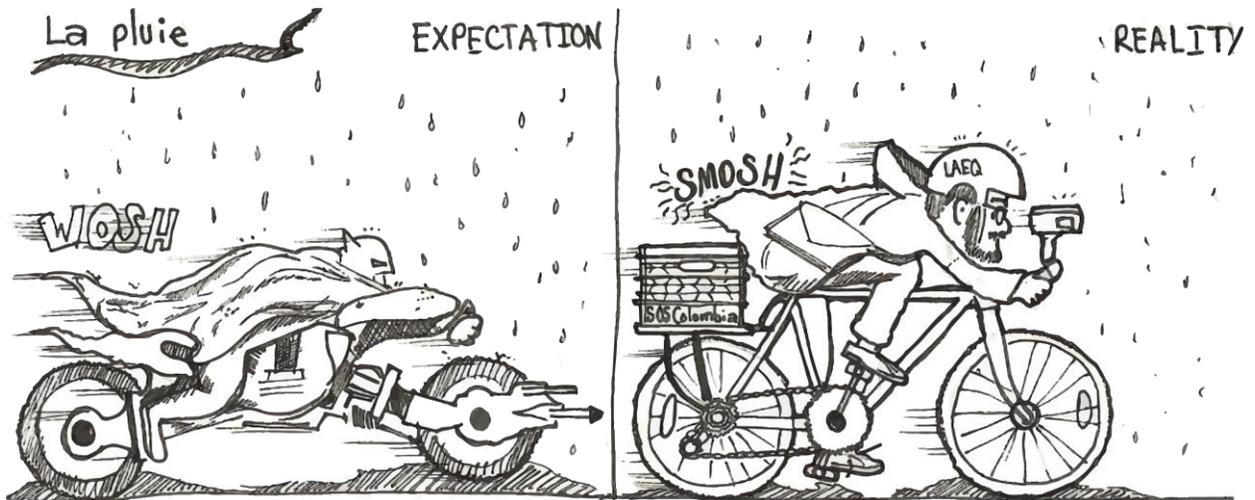
Dans le modèle, plusieurs facteurs sont contrôlés pour réduire leur biais potentiel sur les coefficients des variables explicatives. Premièrement, il est possible que la probabilité d’observer un dépassement soit influencée par le type de cycliste, notamment son genre et sa façon de conduire (Rubie et al. 2020). Deuxièmement, les conditions de trafic sont différentes selon le jour de la semaine, le moment de la journée et la localisation géographique (Włodarek et Olszewski 2020; Carvajal et al. 2020; Rahman et al. 2019; Schleinitz et al. 2015) et peuvent ainsi influencer potentiellement la probabilité d’observer ou non des dépassements dangereux. Par conséquent, les participant·e·s et le jour de la semaine sont introduits comme des effets linéaires tandis que

le moment de la journée et la localisation géographique comme des effets non linéaires (*smooth effects* — *splines*) à l'instar de travaux récents (Apparicio et Gelb 2020; Gelb et Apparicio 2020; Gelb et Apparicio 2019).

Une fois ces facteurs pris en compte, on s'attend à ce que circuler sur un axe majeur (route primaire ou secondaire) augmente la probabilité d'observer des dépassements dangereux comparativement à une rue résidentielle (Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018; Llorca et al. 2017; Shackel et Parkin 2014). Concernant le type de véhicule, on prévoit une augmentation de la probabilité d'observer un dépassement dangereux en présence de véhicules volumineux (bus, camion et dans une moindre mesure, camionnette) comparativement à une voiture (Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018).

La présence d'une bande cyclable pourrait soit augmenter la probabilité d'observer un dépassement dangereux (Beck et al. 2019; Feng et al. 2018; Parkin et Meyers 2010) ou à l'inverse, la diminuer (Chuang et al. 2013; Mehta, Mehran et Hellinga 2015). Il est possible que la durée des dépassements dangereux soit plus courte (Chuang et al. 2013). Finalement, la vitesse du ou de la cycliste augmenterait la probabilité d'observer un dépassement dangereux. Conformément à l'argument formulé par Apasnore et al. (2017), les cyclistes qui roulent plus vite sont généralement considéré·e·s comme plus expérimenté·e·s par les conducteur·rice·s de véhicules motorisés, qui ont tendance à réduire la distance lors des manœuvres de dépassement.

CHAPITRE 3: ARTICLE 1 – ONE METRE IS NOT ENOUGH! DANGEROUS OVERTAKING OF CYCLISTS IN MONTRÉAL



Henao (1989 -...)

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

1. Identification de l'étudiant

Nom, Prénom : Henao, Andres

2. Description de l'article

Titre : One metre is not enough! Dangerous overtaking of cyclists in Montréal

Auteur·e·s : Andres Henao et Philippe Apparicio

Revue avec comité de lecture : Safety

État du cheminement : Publié date de publication : _____

Sous presse

Accepté moyennant modifications

Soumis

Résumé* Il est largement admis que le vélo est une alternative de mobilité durable en ville. Malgré ses nombreux bénéfices, la pratique du vélo comporte des risques de blessure et de décès. Ces risques résultent, entre autres, de manœuvres de dépassement non sécuritaires des cyclistes par les véhicules motorisés. Cette étude vise à identifier les caractéristiques du réseau routier et du trafic qui influencent la distance latérale et la durée de dépassement. En utilisant des vélos équipés de capteurs de distance, de GPS et de caméras, quatre cyclistes ont parcouru 1689 km à Montréal. Ainsi, 3591 dépassements ont été enregistrés avec une distance moyenne de 176 cm; 111 dépassements se sont produits à des distances inférieures à 1 m, soit un événement non sécuritaire tous les 32 dépassements. En moyenne, la durée d'un dépassement est de 1,082 secondes et les dépassements dangereux (à moins d'un mètre) ont duré 0,57 seconde de plus que les dépassements sécuritaires (un mètre et plus). Un modèle logit additif généralisé (GAM) est construit pour prédire la probabilité d'un dépassement latéral dangereux. Les résultats montrent qu'emprunter une route majeure, la présence de véhicules stationnés et la durée de dépassement augmentent significativement la probabilité de subir un dépassement dangereux. Par contre, le·la participant·e, le type de véhicule et la présence d'une bande cyclable n'ont pas d'effets significatifs. De la sorte, les résultats démontrent l'importance de maintenir les cyclistes isolés du trafic. De plus, aménager une voie cyclable le long de places de stationnement semble être une solution ne favorisant pas la sécurité des cyclistes.

3. Contribution de chaque coauteur·e

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

Identification du·de la coauteur·e	Description de la contribution
Andres Henao	Revue de littérature, structuration des données, analyses statistiques dans R, structuration et rédaction de l'article.
Philippe Apparicio (directeur)	Révision des données, participation active à la structuration et aux analyses statistiques dans R, révisions de l'article.

4. Déclaration

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

Coauteur·e	Signature	Date
Andres Henao		2021-08-09
Philippe Apparicio		2021-08-09

Titre : One metre is not enough! Dangerous overtaking of cyclists in Montréal

Revue : Safety

Auteur·e·s et affiliations :

Andres Henao
Institut national de la recherche scientifique

Philippe Apparicio
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 :

Henao, Andres et Philippe Apparicio (sous presse). *One metre is not enough! Dangerous overtaking of cyclists in Montréal*. Safety.

Abstract:

It is largely consented that the bicycle is a sustainable mobility alternative in the city. Despite its many benefits, cycling comprises risks of injury or death. Among others, these risks are a result of unsafe overtaking manoeuvres by motorized vehicles toward cyclists. This study aims to identify the characteristics of the road network and traffic influencing the lateral distance and duration of overtaking. Using bicycles equipped with distance sensors, GPS, and cameras, four cyclists covered 1,689 km in Montréal. Hence, 3,591 overtakings were identified with an average distance of 176 cm.; 111 overtaking manoeuvres took place at distances less than 1 m, resulting in an unsafe event for every 32 overtakings. On average, the duration of an overtaking was 1.082 seconds and dangerous overtakings (less than one metre) lasted 0.57 second more than safe overtakings (one metre and over). A generalized additive logit model (GAM) is built to predict the likelihood of a dangerous lateral passing (less than 1 m). The results show that in taking a major route, the presence of parked vehicles and the time required for overtaking significantly increase the probability of experiencing a dangerous overtaking. However, the participant, type of vehicle, or presence of a bike lane have not significant effect. Therefore, the results demonstrate the importance of keeping cyclists isolated from traffic. Furthermore, providing a bike path along parking spaces seems to be a solution that does not enhance cyclist safety.

Keywords:

bicycle; cyclist safety; lateral passing distance; overtaking manoeuvre; Generalized Additive Model (GAM); Montréal

3.1 Introduction

Today, the bicycle is a sustainable mobility alternative for numerous actors. In fact, many governments and cities encourage their citizens to travel by bicycle because of its multiple benefits. According to Garrard et al. (2012), these benefits can be grouped in three categories: improvement of health due to an increase in physical activity, psychosocial benefits for mental health, and environmental benefits (reduction of atmospheric and noise pollution, and road congestion). Despite these individual and collective benefits, cycling in the city comprises risks of injury and death associated to collisions with motorized vehicles, and particularly in cities where the cycling network is under- developed and/or not separate from automobile traffic (Buehler et Pucher 2017; Pucher et Dijkstra 2003). This situation is especially prevalent in North American

cities, contrary to their Northern European counterparts (in particular Dutch and Danish) (Furth 2012). For example, on the island of Montréal (Canada), only 24% of the cyclable network corresponds to lanes exclusively dedicated to cyclists (isolated from traffic) (Vélo Québec 2016; Houde, Apparicio et Séguin 2018). Cyclists must therefore share a significant part of their trip with motorized vehicles. As a result, 1,389 collisions involving cyclists were registered between 2018 and 2019, 11% of these accidents took place in bicycle lanes (non-protected infrastructures), and 60% in traffic lanes (Ville de Montréal 2020).

It is largely recognized that a significant number of accidents involving cyclists take place during overtaking manoeuvres by motorized vehicles (Beck et al. 2016). Consequently, many countries have adopted a regulation on overtaking distances to ensure the safety of cyclists. In the Province of Québec (Canada), regulation establishes the following lateral passing distance (LPD): 1 metre in zones of 50 km/h zones or less, and 1.5 metres in zones of more than 50 km/h (SAAQ 2021b). Previous studies have demonstrated that many factors influence LPD, sometimes placing cyclists in a particularly vulnerable situation (Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Beck et al. 2019; Chuang et al. 2013; Debnath et al. 2018; Dozza et al. 2016; Feng et al. 2018; Llorca et al. 2017; Mehta, Mehran et Hellinga 2015; Parkin et Meyers 2010; Shackel et Parkin 2014; Walker 2007; Walker, Garrard et Jowitt 2014). They can be grouped in three categories: characteristics of the road network, factors related to traffic, and those associated to cyclists.

3.1.1 Factors associated to characteristics of the road network

Many authors have found that LPD increase on two-lane roads or more, compared to those that have only one lane (Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Mehta, Mehran et Hellinga 2015; Shackel et Parkin 2014). Because the road width provides more space to drivers during an overtaking manoeuvre, unsurprisingly, the LPD is greater on wide roads than on narrow roads. As would be expected, the authors also report that where lanes are larger and more numerous, the greater the speed of the vehicle during a LPD (Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Mehta, Mehran et Hellinga 2015; Shackel et Parkin 2014), thus possibly contributing to a decrease in the cyclist's feeling of security (Apasnore, Ismail et Kassim 2017).

The type of bicycle facility may also have an impact on LPD. As for the presence of a bicycle lane, the results vary greatly from one study to the next. In Victoria (Australia) (Beck et al. 2019), Lancashire (England) (Parkin et Meyers 2010), and Ann Arbor (Michigan, United States) (Feng et

al. 2018), riding in a bike lane would seem to significantly decrease the LPD (compared to a single lane without this facility). How can such a result be explained? It is probable that certain car drivers wrongly consider the line of the bicycle lane as a protective measure for the cyclist; therefore, they don't hesitate in driving close to it, thus executing a dangerous overtaking. Conversely, in Kitchener-Waterloo (Ontario, Canada), Mehta et al. (2015) conclude that the LPD increases on two-lane roads with a bicycle lane, compared to the roads without a bicycle lane. Similarly, in Taiwan, Chuang et al. (2013) found an increase in LPD on roads (with a speed limit of 50 km/h) with a bicycle lane.

The presence of parked vehicles on the road is a variable accounted for in many studies (Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018). According to Beck et al. (2019), LPD would be reduced from 30 to 40 cm in the presence of parked vehicles. This could be explained by the fact that cyclists steer clear of parked vehicles to avoid the probability of a dooring crash.

3.1.2 Factors associated to traffic

Among the factors associated to traffic, traffic density is certainly the one that is the most explored in literature (Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Dozza et al. 2016; Feng et al. 2018; Llorca et al. 2017; Shackel et Parkin 2014; Walker, Garrard et Jowitt 2014); moreover, it is evaluated either with proxies (e.g., annual average daily traffic - AADT) (Parkin et Meyers 2010), or real time traffic measures (Apasnore, Ismail et Kassim 2017). In this last study, the researchers found that an increase in traffic density resulted in a decrease of LPD.

Speed limits are also taken into account in many studies although the speed limit doesn't necessary correspond to the speed of vehicle overtaking (Parkin et Meyers 2010). There again, results differ: some studies report an inferior value for LPD (Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018; Shackel et Parkin 2014) and others report a superior value (Parkin et Meyers 2010) on roads with higher speed limits.

Many authors have measured vehicle speed while overtaking (with a speed sensor) (Dozza et al. 2016; Llorca et al. 2017) or have estimated it (with videos or the frequency of capture by the distance sensor) (Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Mehta, Mehran et Hellinga 2015). Some conclude that speed had no significant influence on the LPD (Dozza et al. 2016; Mehta, Mehran et Hellinga 2015), contrary to Apasnore et al. (2017), reporting that it is positively correlated at

LPD. Llorca et al. (2017) conducted a quantitative analysis of the cyclist's perception during overtaking. Although researchers found no significant relation between speed and LPD, the cyclist's perception of danger was remarkably high during a high-speed overtaking manoeuvre (> 80 km/h).

LPD could also vary significantly according to types of vehicles. Although the classification used differs from one study to the other, the starting hypothesis remains the same, that is, that bigger vehicles (bus, truck, van) tend to decrease LPD compared to smaller vehicles (car, taxi, SUV). Many studies confirm this hypothesis (Beck et al. 2019; Chuang et al. 2013; Debnath et al. 2018; Parkin et Meyers 2010).

Finally, it would seem that LPDs decrease with the presence of oncoming vehicles (Dozza et al. 2016; Feng et al. 2018; Llorca et al. 2017; Shackel et Parkin 2014). Paradoxically, Dozza et al. (2016) find that the speed of passing vehicles decreases in the presence of vehicles in the adjacent lanes (same direction or oncoming).

3.1.3 Factors associated to cyclists

Many individual factors could contribute to significantly decreasing or increasing LPD, particularly as concerns gender, experience, speed, and appearance of the cyclist.

First, some researchers have attempted to evaluate the influence of the cyclist's gender on LPD. According to Debnath et al. (2018), this individual factor would have no significant influence in Queensland (Australia). On the contrary, Chuang et al. (2013) have shown that drivers have a tendency to allow more space to women than to men in Taiwan. It is important to highlight that the participating men in the study had more cycling experience than the participating women. These results are corroborated by Walker et al. (2007), where the cities of Salisbury and Bristol (England) use a particularly original approach, that is, the cyclist wearing a wig to imitate an appearance often associated with the female gender. They thus report that LPD is greater for the cyclist wearing the wig (Walker 2007).

Secondly, some suggest that the cyclist's experience could have an impact on LPD (Chuang et al. 2013; Walker 2007; Walker, Garrard et Jowitt 2014). Yet, to our knowledge, this element is not taken into account in the quasi-naturalistic studies. Indeed, some studies involve participants with various levels of experience, however, without including participant identifiers as explanatory or

control variables in their models (Beck et al. 2019; Chuang et al. 2013; Llorca et al. 2017). Other studies will prefer to impose upon participants a predefined distance between the bicycle and the sidewalk during trips (usually between 0.3 m to 1 m) (Dozza et al. 2016; Llorca et al. 2017; Mehta, Mehran et Hellenga 2015; Parkin et Meyers 2010; Shackel et Parkin 2014; Walker, Garrard et Jowitt 2014). Consequently, it seems difficult to establish if the experience or the type of driving has a significant impact on LPD or not.

Thirdly, an increase in cyclists' speed is associated to a decrease in LPD (Apasnore, Ismail et Kassim 2017). According to them, automobile drivers would consider rapid cyclists to be more experienced and therefore less vulnerable during an overtaking with little lateral distancing.

Fourthly, the appearance of the cyclist does not seem to have a significant impact (Debnath et al. 2018; Walker, Garrard et Jowitt 2014). As an example, Walker et al. (2014) compared seven outfits associated with the cyclist's level of experience, one of which included a vest printed with the word "police". Only this latter one is associated with a significant difference on LPD of approximately 8 cm more compared to other types of clothing.

3.1.4 Research objectives

Many factors relative to the road network, traffic, and cyclists may therefore have an impact on LPD and thus increase or decrease the probability that a cyclist must deal with a dangerous overtaking. However, these factors are often inconsistent from one study to the next, depending on the city or country reviewed. To our knowledge, another factor has been little explored until now: the duration of cyclist overtaking. Yet, it is probable that the longer a dangerous overtaking, the greater the risk of collision and feeling of insecurity for the cyclist. According to Dozza et al. (2016), an overtaking manoeuvre comprises four phases (approaching, steering away, passing, and returning). For the cyclist being overtaken by the vehicle, the average time is 1.65 s (± 0.61), with an average distance of 2.03 m (± 0.28) (Dozza et al. 2016). According to Chuang et al. (2013), the LPD will be significantly lower during rapid overtaking (0.1 to 0.4 s) compared to those whose duration is superior to 0.4 seconds.

The main objective of this study is to analyze the factors contributing to the increase or decrease of the probability of a dangerous overtaking in Montréal (Canada) by using a quasi-naturalistic cycling approach. For a second objective, we explore the relationships between LPD and passing duration.

3.2 Materials and Methods

3.2.1 Study area and primary data collection

A mobile primary data collection was conducted on the territory of the island of Montréal (population of 1.942 million in 2020) during five dry-weather weekdays (2019, June 12, 17-19, 21). Four graduate students, in good physical condition and with moderate urban cycling experience, were involved in the data collection (one female and three male between 25 and 36 years old). This study has been approved by the Research Ethics Board of the Institut national de la recherche scientifique (project no. CER19-509). The participants wore the same cycling jersey, a bike helmet, used the same hybrid bicycle equipped with mandatory visibility accessories (white front reflector, red rear reflector, yellow reflector on each pedal, reflectors on the wheels). Participants rode for two data collection sessions per day, in the morning (8 a.m. to 1 p.m.) and in the afternoon (2 p.m. to 6 p.m.). Cyclists covered 80 to 100 km individually per day, for a total of 1,689 km (Figure 3.1.a). They were provided with three riding instructions: 1) respect current traffic regulation; 2) ride at a safe speed for the urban environment (between 15 and 20 km/h); and 3) divide their routes into 40-minute segments, to simplify data processing. However, no instruction was provided to define a specific distance they should keep from the sidewalk when riding.

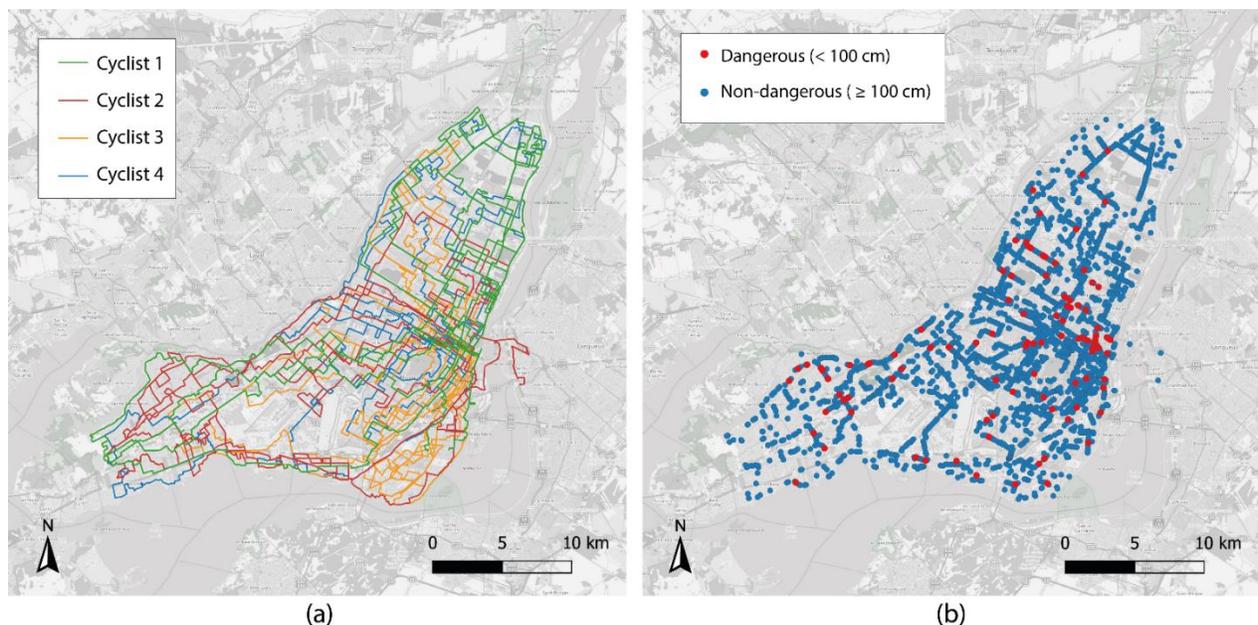


Figure 3.1 : Data collected (a) Trips completed by the four participants; (b) dangerous overtakings or not.

As for collection devices, each bicycle was equipped with four devices: a Codaxus sensor (C3FT v3 Codaxus, Austin, TX, USA) to measure distance (up to 250 cm); two Garmin cameras (Virb XE, Garmin International, Inc., Olathe, KS, USA), a Raspberry Pi Zero W (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, UK) to record data from the distance sensor, a cell phone to follow pre-determined itineraries. The devices were placed on the bicycle as illustrated in Figure 3.2. The cyclists also wore a GPS watch (Forerunner 920XT, Garmin International, Inc., Olathe, KS, USA) which recorded their speed and their geographical position each second.

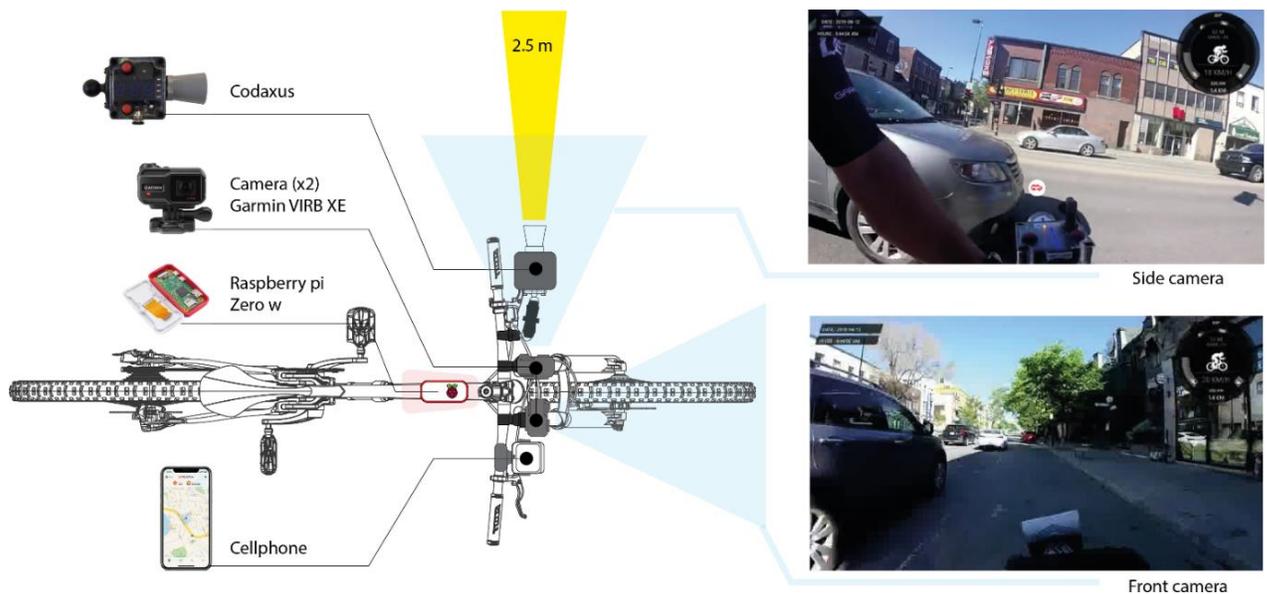


Figure 3.2 : The devices used for collection, attached to the bicycle.

3.2.2 Operational definition of overtaking

An overtaking manoeuvre is the event that occurs when a motorized vehicle overtakes a moving cyclist. However, this manoeuvre largely depends on the morphology of the road in the urban environment. In order to establish overtakings through the analysis of videos, we defined a set of rules outlined in Figure 3.3. We consider that overtaking takes place when a vehicle overtaking a cyclist switches lane (Figure 3.3.a and b), when there is an overtaking in the absence of a dividing line (Figure 3.3.c), when there is overtaking parallel to a cycling lane (Figure 3.3.d), and when there is overtaking in the presence of parked vehicles (Figure 3.3.e to h).

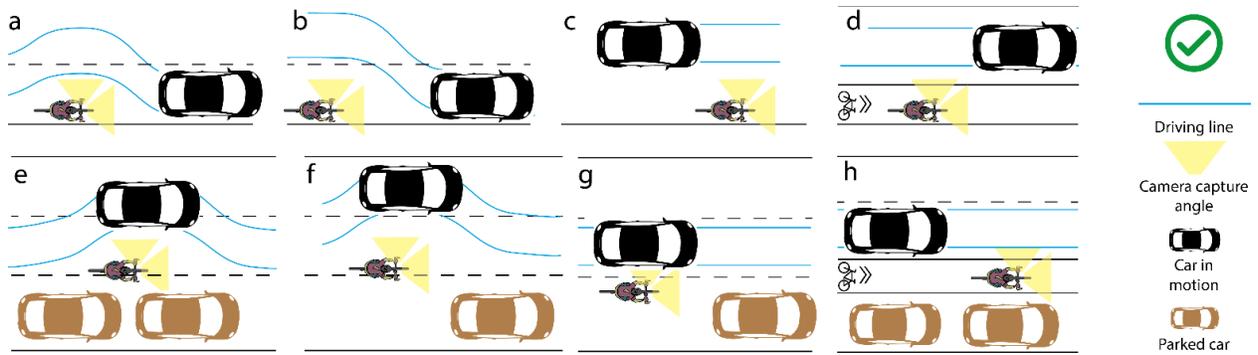


Figure 3.3 : Cases considered to be overtakings. (a) and (b) overtaking by switching lanes; (c) overtaking in the absence of a dividing line; (d) overtaking along a bike lane; (e) to (h) overtaking in the presence of parked vehicles.

Cases not considered to be overtakings are presented in Figure 3.4: there is no overtaking in the presence of a two-way traffic bike lane (Figure 3.4.a), when a lane separates the cyclist and the overtaking vehicle (Figure 3.4.b), when parked vehicles separate the cyclist and the overtaking vehicle (Figure 3.4.c), and when urban property is present between the cyclist and the overtaking vehicle (Figure 3.4.d), that is traffic delineator posts, cones, bollards, or again protective concrete.

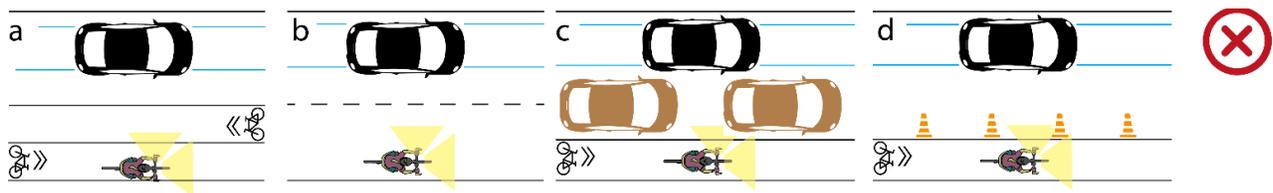


Figure 3.4 : Cases not considered as overtakings (a) overtaking in a bidirectional lane; (b) overtaking with a lane separating the cyclist from the vehicle; (c) overtaking alongside parked cars; (d) overtaking alongside a protected bicycle lane.

Vifeco, an open-source software that allows to annotate several features on videos (Apparicio, Maignan et Gelb 2021), was used to characterize overtakings. Five categories were created in the software according to type of vehicle: car, truck, bus, pick-up, and other (see supplementary material). Starting with the operational definition of overtaking and the Vifeco software, two analysts were trained to identify and record overtakings (see supplementary material).

As for counting methodology, the analyst simultaneously observed frontal and lateral videos. Then, once an overtaking was identified, on the lateral video, he/she recorded the beginning and the end of the passing as illustrated in Figure 3.5.



Figure 3.5 : Characterization of a lateral passing on Vifeco. (a) beginning of passing aligned with the device for distance measurement; (b) end of passing.

The two analysts dedicated approximately 230 hours to video analyses and they concluded with a global concordance index of 92.4% for 165 videos totalling 101 hours. Finally, a third expert (professor of urban studies) reviewed the discordant cases with the two analysts to correct them.

3.2.3 Structuring of data

Structuring of data includes five phases, all completed with version 4.0.2 of the R software (R Core Team 2020). First, lateral passings were exported from the Vifeco software in JSON format and imported in the R software, as distance measurements from Codaxus recorded in CSV format on Raspberry Pi. Second, these two data sources –passings and distance measurements– were then merged by exact time (timestamp). Third, by using the two respective observations for each passing manoeuvre (beginning and end), it was possible to determine minimal distance and duration. Fourth, from the observations of the GPS watch, itinerary coordinates were mapped and map-matched with *OpenStreetMap*. Thus, for each passing, we obtain the following information: types of roads (Key:highway on *OpenStreetMap*), types of bicycle paths (Key: cycleway on *OpenStreetMap*), and the cyclist's speed recorded on the GPS watch. The last phase of structuring aims to identify the presence of parked vehicles and a bicycle lane during each overtaking. In order to do so, images and 20-second videoclips were exported for each event, then analyzed.

3.2.4 Modelling

A generalized additive logit model (GAM) was constructed using the mgcv package (Wood 2011), with the LPD as the dependent dichotomous variable (less than one metre or not). The control variables and predictors are presented in Table 3.1.

Within the model, many factors are controlled to reduce their potential bias on predictor coefficients. First, it is possible that the probability of observing a dangerous overtaking is influenced by the type of cyclist particularly as regards gender and their way of riding. Secondly, the weekday, time of day, and geographical position are well-known factors of impact on traffic conditions (Włodarek et al. 2020; Carvajal et al. 2020; Rahman et al. 2019; Schleinitz et al. 2015), and therefore potentially on the probability of observing dangerous overtakings. Consequently, the participant and the weekday are introduced as linear effects, where time of day and geographical position are introduced as smooth effects (splines), as in recent works (Apparicio et al. 2020; Gelb et al. 2020; Gelb et al. 2019).

Table 3.1 : Model specifications.

Variable	Name	Modality	Dimension	Family
Outcome	Type of overtaking	Dangerous (<100cm), Non-dangerous (≥100cm)	-	Binomial
Control	Participant	Cyclist ID	FC	Categorical
	Day of collection	12, 17, 18, 19, 21 (June, 2019)	FT	Categorical
	Time of the day	Number of minutes since 08:00	FT	Continuous
	Geographical position	Geographic coordinates (x,y)	FT	Continuous
Predictor	Type of road	Primary road, secondary road, tertiary road,	FR	Categorical
	Bike lane	Presence. Absence	FR	Binomial
	On-street parked vehicles	Presence. Absence	FR	Binomial
	Type of vehicle	Car, truck, bus, pick-up and other	FT	Categorical
	Passing duration	Logarithm of time between the end and the beginning of the lateral passing (in seconds)	FT	Continuous
	Cyclist speed	Speed at the moment of lateral passing (km/h)	FC	Continuous

FC Factors associated to cyclists; FR: Factors associated with the road network; FT: Factors associated to traffic.

Once these factors controlled, one expects that to ride on a major axis, such as primary and secondary roads, increases the likelihood of observing dangerous overtaking compared to a residential street (Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018; Llorca et al. 2017; Shackel et al. 2019).

2014). As for the type of vehicle, we expect an increase in the probability of observing a dangerous overtaking in the presence of large vehicles (bus, truck and, less so, pick-up) compared to a car (Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018).

The presence of a bicycle lane could either increase the observance of a dangerous overtaking (Beck et al. 2019; Feng et al. 2018; Parkin et Meyers 2010) or, on the contrary, reduce it (Chuang et al. 2013; Mehta, Mehran et Hellenga 2015). It is possible that the duration of dangerous overtakings would be shorter (Chuang et al. 2013). Finally, the cyclist's speed would reduce the probability of observing a dangerous overtaking. In compliance with the argument formulated by Apasnore et al. (2017), cyclists riding more quickly are generally considered to be more experienced by motorized vehicle drivers who have a tendency to reduce distance during an overtaking manoeuvre.

3.3 Results

3.3.1 Descriptive statistics

In total, 3591 overtaking manoeuvres were registered with an average of 176 cm, the minimal distance registered being 47 cm. Most lateral passings take place at a distance less than 250 cm (75%, n=2632), and 3.1% took place at a distance inferior to 100 cm (n=111), representing a dangerous event ratio for every 32 overtakings (Figure 3.1.b).

Close to three-quarters of overtakings took place on secondary (40.5%) and tertiary (32.7%) roads. The types of vehicles most frequently involved in overtaking manoeuvres were cars (n=3154, 78.8%), trucks (n=131, 6.2%), pick-ups (n=131, 3.6%) and buses (n=62, 1.7%). Finally, more than one-quarter of overtakings took place in the presence of vehicles parked on the road (n=988, 27.5%) and 13% when the cyclist was riding on a bicycle path or a shared lane.

Also, the ratios vary significantly according to type of vehicle. If, in total, there is a dangerous event every 32 overtakings for all vehicles combined, it is only 1 for 25 trucks and 1 for 12 buses. It must be noted however that overtaking occurrences are much lower for these two categories of vehicles.

As for road type, it is noted that there is 1 dangerous overtaking out of 16 on a primary road, compared to 1 out of 43 for a residential street or tertiary road. (Table 3.2). A variance analysis

also demonstrated a statistically significant effect of types of lanes for LPD inferior to 250 cm ($F(3,2628) = 23.93, p < 0.001$).

Table 3.2 : Frequency of overtaking

Variable	Lateral Passing			Passing distance				Passing distance	
	All	< 100 cm	ratio	Less than 250 cm				250 and over	
				n	%	Mean	SD	n	%
Primary road	372	24	16	256	4	158	46	116	31.2
Secondary road	1454	48	30	1066	16.5	173	42	388	26.7
Tertiary road	1174	27	43	837	12.9	180	40	337	28.7
Residential street	519	12	43	421	6.5	180	39	98	18.9
Unclassified street	72	0	--	52	0.8	195	35	20	27.8
Cycle lane	439	5	88	340	5.2	181	36	99	22.6
Shared lane	28	1	28	24	0.4	177	35	4	14.3
On-street parked vehicles	988	37	27	851	13.1	168	168	137	13.9
Car	3154	94	34	2315	35.7	176	42	839	26.6
Pick-up	131	3	44	95	1.5	176	43	36	27.5
Truck	223	9	25	156	2.4	171	43	67	30
Bus	62	5	12	50	0.8	172	49	12	19.4
Other	21	0	--	16	0.2	189	39	5	23.8
Total	3591	111	32	2632	73.3	176	42	959	26.7

Table 3.3 presents the results associated with lateral passing duration, which on average is 1.082 seconds for all observations ($Q1 = 0.723, Median = 0.908, Q3 = 1.299$). Significant variations are observed according to type of vehicle (ANOVA: $F(3, 3587) = 179.62, p < 0.001$). Not surprisingly, longer vehicles have a tendency to take more time for an overtaking manoeuvre: on average, 2.318 for a bus, 1.759 for a truck, compared to 0.993 for a car.

Finally, dangerous overtakings (less than 1 m) would last longer than safe overtakings (more than 1 m): for all observations, 1.583 compared to 1.066, representing a difference of more than one-half second (0.517) (Table 3.3). These differences also vary according to road type: the difference between a dangerous overtaking or not is 0.393 for residential streets compared to 0.695 second for tertiary roads (Table 3.3).

Figure 3.6 illustrates this significant negative relation between duration and distance of lateral passing (Pearson's Correlation Coefficient = $-0.135, p < 0.001$; Spearman's rho = $-0.149, p < 0.001$). In summary, even if this correlation is weak, the shorter the LPD, the longer the duration of the lateral passing.

Table 3.3 : Duration of lateral passings (dangerous or not) in seconds.

Variable	All		Dangerous passing		Non-dangerous passing		Diff. Mean
	passings		Less than 100 cm		100 cm and over		
	Mean	Median	Mean	Median	Mean	Median	
Primary road	1.018	0.867	1.512	1.515	0.984	0.849	0.528
Secondary road	1.099	0.924	1.548	1.238	1.084	0.916	0.464
Tertiary road	1.014	0.856	1.693	1.161	0.998	0.850	0.695
Residential street	1.240	1.080	1.624	1.290	1.231	1.075	0.393
Unclassified street	1.045	0.821	--	--	1.045	0.821	--
Bicycle lane	1.132	0.970	2.538	2.136	1.116	0.968	1.422
Shared lane	1.350	1.144	3.892	3.892	1.256	1.136	2.636
On-street parked vehicles	1.136	0.969	1.788	1.488	1.110	0.954	0.678
Car	0.993	0.876	1.384	1.157	0.981	0.868	0.403
Pick-up	1.201	0.972	3.249	3.858	1.153	0.967	2.096
Truck	1.756	1.344	2.142	1.980	1.739	1.329	0.403
Bus	2.318	2.180	3.336	2.136	2.228	2.180	1.108
Other	2.954	1.916	--	--	2.954	1.916	--
Total	1.082	0.908	1.583	1.236	1.066	0.900	0.517

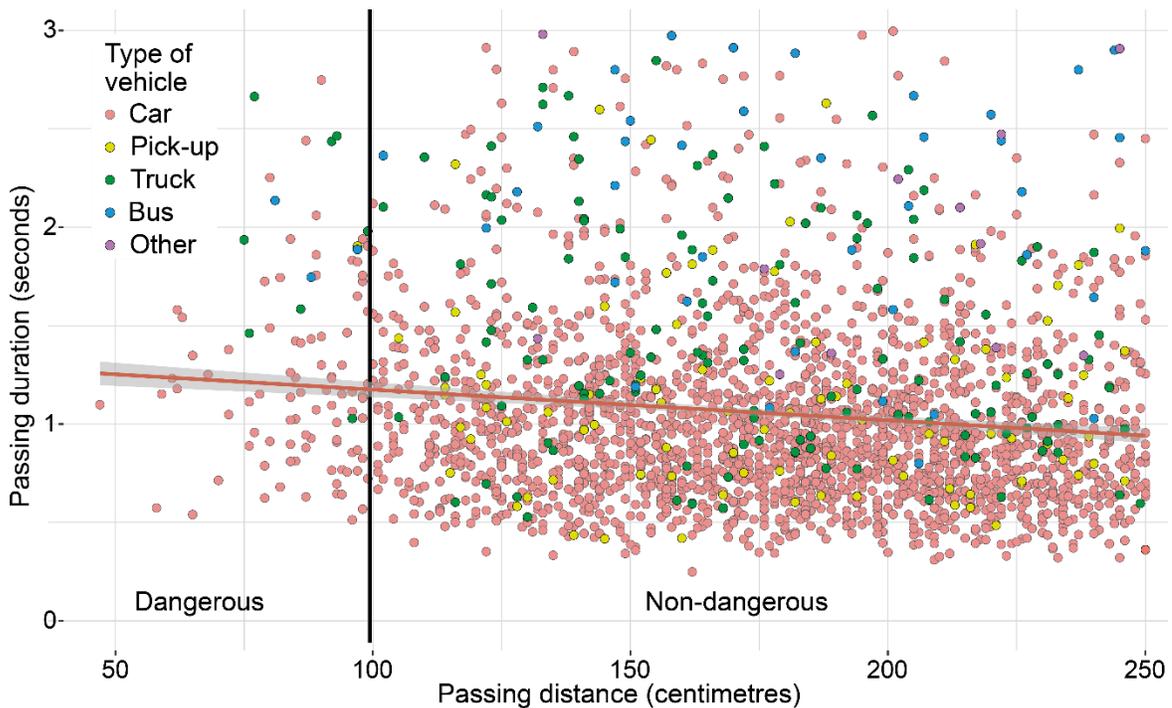


Figure 3.6 : Overtaking in distance and time.

Finally, since the relative variable for duration of overtaking has a positively skewed distribution (Skewness = 4.97), it is introduced in the form of a logarithm in the GAM model.

3.3.2 Results of the generalized additive logit regression

The results are presented in Table 3.4. First, the fit statistics indicate that the model explains 16% of the total variance (Nagelkerke $R^2 = .159$; Deviance explained = .142). It therefore allows to identify the variables having an impact on the probability of experiencing a dangerous overtaking, once many factors are controlled.

Table 3.4 : Results of the generalized additive logit model.

Variables	OR ¹	OR CI (95%) ²	
Intercept	0.025	0.008	0.078
Control variables			
Wednesday, June 12 (ref.)	Ref.		
Monday, June 17	0.606	0.293	1.251
Tuesday, June 18	0.823	0.435	1.556
Wednesday, June 19	0.714	0.386	1.321
Friday, June 21	0.711	0.344	1.471
Cyclist 1 (male)	Ref.		
Cyclist 2 (male)	1.330	0.639	2.770
Cyclist 3 (female)	1.653	0.860	3.179
Cyclist 4 (male)	1.735	0.911	3.305
Splines			
	Edf ³	P	
Time of the day	1.000	0.616	
Geographical position	11.002	0.004	
Predictor variables			
	OR ¹	OR CI (95%) ²	
Residential or unclassified street	Ref.		
Primary road	5.608	2.518	12.491
Secondary road	2.430	1.223	4.827
Tertiary road	1.424	0.687	2.951
Bicycle lane	0.423	0.166	1.078
On-street parked vehicle	1.954	1.220	3.129
Car	Ref.		
Pick-up	0.555	0.169	1.827
Truck + Other	0.472	0.215	1.036
Bus	1.117	0.383	3.258
Log(passing duration)	4.660	3.197	6.793
Cyclist speed (km/h)	0.945	0.902	0.991
Fit statistics			
n	3591		
R ² Nagelkerke	0.159		
Deviance explained	0.142		

¹ OR: Odds ratio. ² CI: confidence interval. Statistically significant values are shown in bold.

³ edf: estimated degrees of freedom.

3.3.3 Control variables effects

A reading of the confidence intervals of the reports rated at 95% allows to find that the weekday and the participant have no significant effect on the probability of experiencing a dangerous overtaking. As for splines, time of day is not significant (edf = 1.000, $p = 0.616$), contrary to geographical position (edf = 11, $p < 0.001$). This provides for two interesting findings. First, although traffic levels may vary during the day, nonetheless, the time of day does not seem to have an impact on the probability that a cyclist experience a dangerous overtaking. Second, all things being equal, certain areas of the space under study are characterized by stronger or weaker probabilities of experiencing dangerous overtaking. However, these findings only apply to the collection period and our space under study. In other words, they cannot be generalized for the whole year or another city. Nevertheless, the fact that geographical position is significant demonstrates that this parameter, as is the case for the time of day, must be controlled in order to obtain non-biased coefficients for the other parameters (Table 3.4).

3.3.4 Effects off factors associated to characteristics of the road network

Not surprisingly, the types of lanes greatly influence the probability of experiencing a dangerous overpassing. Compared to a residential or non classified street, this probability is five times higher on primary roads (OR = 5.608; CI[95%] = 2.518 – 12.491), and twice as high for secondary roads (OR = 2.430; CI[95%] = 1.223 – 4.827) (Table 3.4). On the other hand, the presence of a bicycle path has no significant effect on the probability of a dangerous overtaking. Finally, the presence of parked vehicles doubles the probability of experiencing a dangerous overtaking (OR = 1.954; CI[95%] = 2.220 – 3.129).

3.3.5 Effects of factors associated to traffic

Contrary to our initial hypothesis, the type of vehicle has no influence. However, the logarithm for time required for overtaking is significant in the model (OR = 4.660; CI [95%] = 3.197 – 6.793), suggesting that a longer duration for overtaking is associated to a higher probability of dangerous overtaking.

3.3.6 Effects of factors associated to cyclists

The cyclist's speed is a significant factor in the model (OR = 0.945; CI[95%] = 0.902 – 0.991), but contrary to our initial hypothesis, it reduces the probability of observing a dangerous overtaking (Table 3.4).

3.4 Discussion

3.4.1 Limits of the study

Although the type of axis –a variable retained in this study– is considered a proxy for traffic density and width of the street (Gelb et Apparicio 2021), it would be appropriate to include traffic measures in real time for future research. These indicators could be introduced in the model in the form of splines since we may suppose that traffic density does not linearly influence the probability of an overtaking being dangerous. Although complex, resorting to methods of *image detection and computer vision* (Redmon et al. 2016; G. Li, Song et Fu 2018) would certainly allow the automation of camera video analyses to create these indicators. As a second limit, the effect of oncoming vehicles on LPD was not explored in our study, as done by several authors (Dozza et al. 2016; Feng et al. 2018; Llorca et al. 2017; Shackel et Parkin 2014).

3.4.2 Contribution to academic knowledge

During our cycling data collection on the island of Montréal, we found that 1 overtaking out of 32 was dangerous. This ratio is much weaker than that reported in a study in Victoria, Australia (1 of 17) (Beck et al. 2019). However, these two ratios should be compared with caution since the two collection methods are different. In the Australian study, 60 participants were recruited who cycled during their usual trips for one to two weeks. In our case, the mobile collection was extensive and aimed to cover the whole island of Montréal, and from 9 a.m. to 6 p.m. for five days.

Our results sometimes refute, sometimes corroborate those of previous studies. There again, these comparisons must be interpreted with caution due to methodological designs and geographical contexts that differ greatly from one study to the next. On the one hand, contrary to the results of previous studies (Beck et al. 2019; Chuang et al. 2013; Debnath et al. 2018; Parkin

et Meyers 2010), the type of vehicle has no influence on the probability that an overtaking is dangerous, nor does the presence of a bike lane. On the other hand, our results corroborate other studies showing that traffic density (Apasnore, Ismail et Kassim 2017; Dozza et al. 2016; Feng et al. 2018; Llorca et al. 2017; Shackel et Parkin 2014; Walker, Garrard et Jowitt 2014) and parked vehicles decrease LPD (Beck et al. 2019). Indeed, cycling on a primary or secondary route (compared to a residential street) and in the presence of parked vehicles quite significantly increases the probability that a cyclist experiences a dangerous overtaking.

This study also allows to shed light on two little-known results to date. First, the probability of a dangerous overtaking may vary non linearly in time and space. In order to do so, as demonstrated in this study, having recourse to generalized additive models (GAM) is particularly appropriate to control these effects. Therefore, in later modelling studies of dangerous overtakings or any other conflict involving different road users, control of space and time should be generalized. Secondly, in Montréal, dangerous lateral passings are associated to longer durations, certainly contributing to the increase of the cyclist's level of insecurity. This would require being validated or refuted with further studies in other Canadian cities and elsewhere in the world.

3.4.3 Implications for decision-makers

In light of the results, many recommendations can be formulated. Providing a bicycle lane alongside parking places does not seem to be a safe solution since it enhances the possibility of both dangerous overtakings and dooring crash (unless there is a buffer space between the bicycle lane and the parking spaces).

Contrary to other studies (Beck et al. 2019; Debnath et al. 2018), we did not find significant effects according to type of vehicle on LPD. However, the duration of an lateral passing is significantly longer for trucks and buses, and also during unsafe passings (for all types of vehicles). As a reminder, regulatory minimal distances are 1 m (speed inferior or equal to 50 km) and 1.5 m (speed superior to 50 km/h) in the Province of Québec. It is therefore legitimate to question whether these regulatory distances should be lengthened for heavy vehicles. As an illustration, Figure 3.7 presents several overtaking manoeuvres according to type of vehicle and distance intervals. Of course, an overtaking with less than a metre by a heavy vehicle (truck and bus) is certainly considered to make a cyclist feel much more insecure compared to being overtaken by an automobile. Although it is regulatory, it is also probable that an overtaking between 100 and

150 cm by a truck or a bus is deemed to be unsafe. As we have demonstrated, LPD is influenced by many variables relative to network and road traffic; it is therefore important to question these regulatory limits in order to establish safer riding conditions for cyclists in the future.

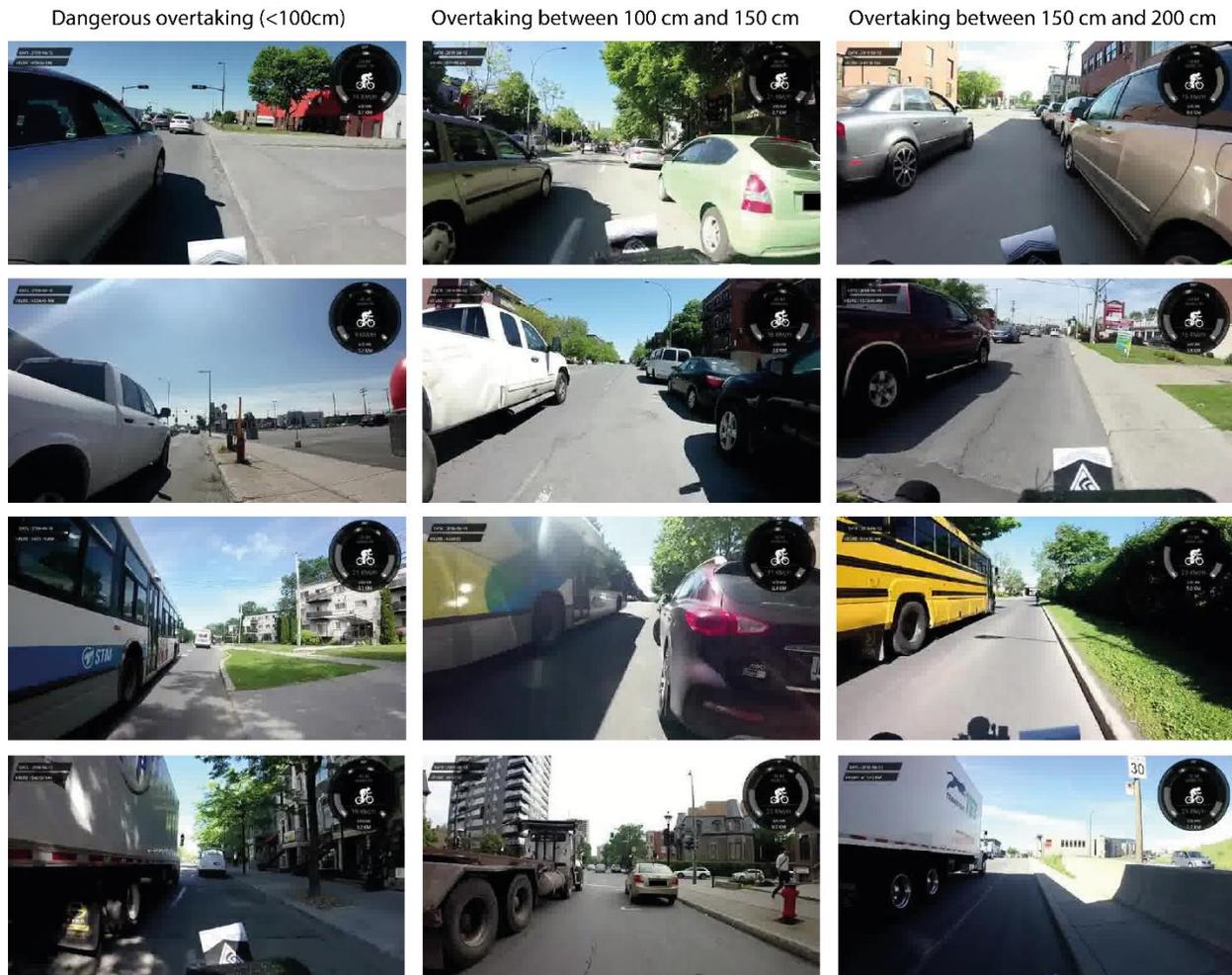


Figure 3.7 : Different overtakings according to types of vehicles and LPD.

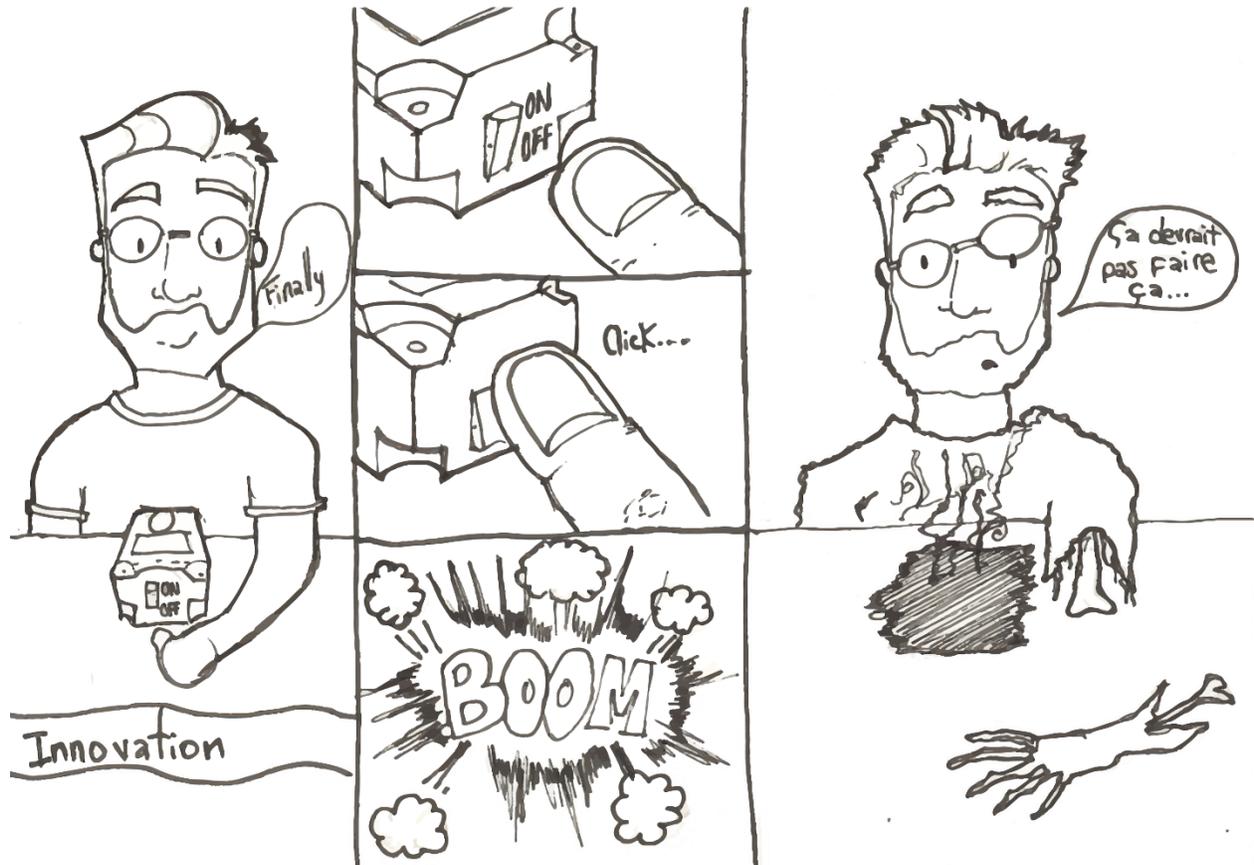
3.5 Conclusion

Within the framework of this quasi-naturalistic study on overtaking of cyclists by motorized vehicles in Montréal, one event in 32 overtakings was considered dangerous (less than one metre where the speed limit is 50 km/h or less), in compliance with current regulation in Québec. The results revealed that three major factors positively and significantly influence the probability that a cyclist experience a dangerous overtaking: riding on a major road (primary or secondary route), the presence of parked vehicles, and the duration of the overtaking. However, compared to previous

studies, the type of vehicle, the presence of a bike lane, and the participant had no significant effects. In light of these results, it would be appropriate to develop awareness campaigns for drivers with regard to distancing rules and risks involved in an unsafe overtaking. Also, to improve cyclists' security, it would be useful to provide infrastructures separating cyclists from road traffic and away from parked vehicles.

On the methodological side, it is worth noting that these types of studies are relatively complex to implement since they are based on many different devices (commercial or home-made distance sensor, GPS, and action camera) that are quite expensive. The collected data set must then be merged and matched to a road network. The development of a low-cost sensor including a distance sensor (acoustic or lidar), a GPS, a camera and a microphone would certainly contribute to the democratization of these types of studies in the future.

CHAPITRE 4: ARTICLE 2 - ONE METRE PLUS (1M+): A MULTIFUNCTIONAL OPEN SOURCE SENSOR FOR BICYCLES BASED ON RASPBERRY PI



Henao (1989 -....)

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

1. Identification de l'étudiant

Nom, Prénom : Henao, Andres

2. Description de l'article

Titre : One metre plus (1M+): a multifunctional open source sensor for bicycles based on raspberry pi

Auteur·e·s : Andres Henao Philippe Apparicio et David Maignan

Revue avec comité de lecture : Sensors

État du cheminement : Publié date de publication : 29 août 2021

Sous presse

Accepté moyennant modifications

Soumis

Résumé* Au cours de la dernière décennie, les vélos équipés de capteurs sont devenus un outil fondamental pour la recherche, notamment dans les études qui analysent la distance latérale de dépassement entre les véhicules motorisés et les cyclistes. Cet article a pour but de décrire un capteur *open source* à faible coût appelé *one metre plus* (1m+) capable de mesurer la distance latérale de dépassement, enregistrer la position géographique du·de la cycliste et une vidéo du trajet. Les plans, les codes et le schéma de montage sont ouverts et facilement accessibles à la communauté scientifique. Cette étude décrit en détail le processus de conceptualisation, les caractéristiques du dispositif et les matériaux qui le composent. Elle présente aussi une évaluation du produit et décrit les fonctionnalités du capteur et son domaine d'application. Ce projet vise à démocratiser la recherche et à développer une plateforme/produit participative qui offre des outils aux chercheur·se·s du monde entier pour standardiser l'échange de connaissances et faciliter la comparabilité des résultats entre différents contextes.

3. Contribution de chaque coauteur·e

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

Identification du·de la coauteur·e	Description de la contribution
Andres Henao	Revue de littérature, conceptualisation de l'appareil, développement du logiciel, rédaction de l'article
Philippe Apparicio (directeur)	Conceptualisation de l'appareil, financement, révision de l'article
David Maignan	Validation du logiciel

4. Déclaration

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

Coauteur·e	Signature	Date
Andres Henao		2021-08-09
Philippe Apparicio		2021-08-09
David Maignan		2021-08-09

Titre : One metre plus (1M+): a multifunctional open source sensor for bicycles based on raspberry pi

Revue : Sensors

Auteur·e·s et affiliations :

Andres Henao
Institut national de la recherche scientifique

Philippe Apparicio
Institut national de la recherche scientifique

David Maignan
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 :

Henao, Andres et Philippe Apparicio (publié). *One metre is not enough! Dangerous overtaking of cyclists in Montréal*. Sensors.

Abstract:

During the last decade, bicycles equipped with sensors became an essential tool for research, particularly for studies analyzing lateral passing distance between motorized vehicles and bicycles. The objective of this article is to describe a low-cost open source sensor called *one metre plus* (1m+) capable of measuring lateral passing distance, registering the geographical position of the cyclist, and video-recording the trip. The plans, codes, and schematic design are open and therefore easily accessible for the scientific community. This study describes in detail the conceptualisation process, the characteristics of the device, and the materials from which they are made. The study also provides an evaluation of the product and describes the sensor's functionalities and its field of application. The objective of this project is to democratize research and develop a platform/participative project that offers tools to researchers worldwide, in order to standardize knowledge sharing and facilitate the comparability of results in various contexts.

Keywords:

instrumented bikes; cyclist safety; bicycle video recording; lateral passing distance; overtaking distance; sensors; raspberry pi

4.1 Introduction

Over the past decade, many naturalistic cycling studies (i.e., mobile data collection) were undertaken by different researchers throughout the world. This stream of studies is mostly based on bicycles transformed into actual mobile laboratories, based on the use of a vast array of sensors (Gadsby et Watkins 2020). These instrumented bicycles have become an essential tool for research. They allow us to understand cyclists' behaviour in varying environments and evaluate their safety (Gadsby et Watkins 2020; Rubie et al. 2020).

Among the studies using instrumented bicycles, there are usually five types: **(1)** studies on e-bikes to compare electric and traditional bicycles, in terms of speed, acceleration, and deceleration (Langford, Chen et Cherry 2015; Huertas-Leyva, Dozza et Baldanzini 2018; Lopez et al. 2017; Vlakveld et al. 2015; Twisk et al. 2013; Kováčsová et al. 2016; Petzoldt et al. 2017), **(2)** studies on cyclists' exposure to air pollution and noise exposure (Apparicio et al. 2016; Apparicio et al. 2018; Liu et al. 2019; Boogaard et al. 2009; Okokon et al. 2017; Dekoninck et al. 2015; Minet et al. 2018; Apparicio et Gelb 2020), **(3)** studies on cyclist conflicts (Werneke, Dozza et Karlsson

2015; Angel-Domenech et al. 2014; Jahangiri et al. 2016; Schleinitz et al. 2015; Reynolds et al. 2009; Gustafsson et Archer 2013), **(4)** studies on vehicle detection when encountered met during trips (G. Li, Song et Fu 2018; Redmon et al. 2016; Jeon et Rajamani 2018), and finally, **(5)** studies on lateral passing distance by motorized vehicles (Beck et al. 2019; Chuang et al. 2013; Shackel et Parkin 2014; Walker, Garrard et Jowitt 2014; Dozza et al. 2016; Parkin et Meyers 2010; Llorca et al. 2017; Mehta, Mehran et Hellinga 2015).

The goal of this work is to describe a low-cost open-source sensor adapted to the bicycle and allowing to measure mainly the lateral passing distance, but also the geographical position as well as record a video of the trip. The project was designated as being 1m+ or one metre plus. Since access to the plans and codes of the device are free for the scientific community in general, this project is part of the philosophy of Open-source Product Development (OSPD) (Bonvoisin 2017; Bonvoisin et Boujut 2015; Balka, Raasch et Herstatt 2010). Yet, compared to the use of open-source software (ex., OSGIS) and open geospatial data, OSPD is something seldom mobilized in urban studies and more specifically in the field of road safety studies (Mobasheri 2020; Mobasheri et al. 2020).

The rest of the paper is organized as follows: a literature review of the instrumented bicycles used in passing distance studies, the materials used for the open-source sensor and the assembly characteristics, the product evaluation results, discussion and conclusion.

4.2 Review of Instrumented Bicycles for Measuring Lateral Distance Passing

4.2.1 Why develop an open source product?

The increasing use of mobile data collection is due to many factors: the production of more compact sensors, the development of open-source hardware and software (microcontroller board and embedded single board computers), and new techniques for rapid prototyping (CNC, laser cut, and 3D printing), thus facilitating the development of custom-made products (Gadsby et Watkins 2020). Nevertheless, conducting a naturalistic cycling study with an instrumented bike still presents four major challenges.

First, most products are not specifically designed for mobile data collection. Therefore, researchers must modify and adapt the bicycle frame devices, so that they are correctly positioned, usually by attaching them to the handlebars, or on the rear or front rack.

Second, few products include multiple functions. Therefore, researchers must use different devices for specific tasks such as distance sensors, GPS, cameras, vehicle speed sensors, pollution and noise sensors, etc. This contributes to a considerable increase in research costs.

Third, the plethora of configurations and devices used present a challenge for the merging and interoperability of data, since these are recorded in different formats and temporal resolutions depending on the sensors. It therefore becomes difficult to compare empirical results between the various studies.

Fourth, if they resort to commercial products (GPS, camera, distance sensor, etc.), researchers are limited to the functions and characteristics of the sensors as provided by the manufacturers, and these do not always adequately meet the needs for their studies.

To overcome these challenges, many researchers decided to develop custom-made products. However, these products are unavailable commercially, or the plans and development codes are not open. This therefore has a detrimental effect on the replicability of naturalistic cycling studies.

4.2.2 Devices for measuring lateral passing distance: a brief overview

Recent studies on lateral passing distance (LPD) are based on three types of approaches (Table 4.1). First, pioneer works on LPD were entirely conducted solely with cameras, that is, without resorting to distance sensor and GPS devices (Shackel et Parkin 2014; Stewart et McHale 2014). The LPD was evaluated by using footage mark over the video, which is an interesting approach but not very precise.

Second, many studies used a multitude of existing devices, particularly distance sensors, GPS, front and lateral cameras, and in some cases, speedometers, accelerometers, gyroscopes, and lasers (Chuang et al. 2013; Shackel et Parkin 2014; Dozza et al. 2016; Llorca et al. 2017). Although this approach is interesting, it has two major drawbacks. On the one hand, these devices are not merged in the same unit. On the other hand, the total cost of the various devices is often quite onerous (between \$1290 and \$5980 US) (Table 4.1).

Third, the latest trend in studies is based on custom-made devices. Walker et al. (2014) Used an MB1200 XL-MaxSonar-EZ0 distance sensor (Maxbotix Inc., Brainerd, MN, USA) connected to an Arduino Uno microcontroller card (Arduino, Scarmagno, Italy). The card registered the sensor's distance captures by attributing time and date. The various elements, as well as the batteries, were assembled in a grey plastic box on the bicycle's rear luggage carrier. In the case of Mehta et al. (2015), the researchers designed a sensor with a microcontroller, a GPS, and a sonar-type distance sensor (no specifications for devices in the article). The devices were integrated into a sealed plastic grey box at the rear of the bicycle. The researchers also used a camera on the handlebars to observe the side of the cyclist. Finally, Beck et al. (2019) designed a device called Metrebox. The device integrated a GPS (Adafruit Ultimate FeatherWing, Adafruit Industries, New York, NY, USA), a distance sensor (MB1230 XL-MaxSonar-EZ3, Maxbotix Inc., Brainerd, MN, USA), and rechargeable lithium 18,650 batteries. The Metrebox used a box printed in 3D in which the devices are assembled. The researchers also used a camera (GoPro Hero5 Session, GoPro, San Mateo, CA, USA) attached to the handlebars to record the trips. As for the studies based on multiple existing devices, the set-up costs of custom-made devices is considerably less expensive (Table 4.1).

To our knowledge, to date, there exists only one commercial solution to measure LPD: the Codaxus C3FT v3 (Codaxus, Austin, TX, USA), at a cost of \$1460 USD. This device uses a MB7066 XL-MaxSonar-WRL1 distance sensor (Maxbotix Inc., Brainerd, MN, USA). The device sends back distances between 0 to 250 cm with a frequency of 10 Hz. This device's functions are quite limited since it excludes a GPS, camera, and especially, there is no data recording device.

Table 4.1 : Summary of instrumented bikes by devices in studies on lateral passing distance.

Study (Year)	Distance sensor			GPS		Camera		Product	Product
	Product	Hz	Range Distance (m)	Product	Hz	Product	Resolution (px)	Additional Device	Type and Cost (\$US) of the Final Product
Parkin et al. (2010)	NA	NA	NA	NA	NA	Helmet Camcorder Generation 5 (Archos, Igny, France)	640 × 480	Archos 605 MP4 recording device (Archos, Igny, France)	Multiple existing devices. 600 \$US
Stewart et McHale (2014)	NA	NA	NA	NA	NA	AT1 and ATC5K Waterproof Action Camera (Oregon Scientific,	640 × 480	NA	Multiple existing devices. 150 \$US

Portland, OR, USA)									
Shackel et al. (2014)	M-300/95 Sensor (Massa, Hingham, MA, USA)	95,000	0.3–4	NA	NA	Viosport POV 1.5 camera × 2 (V.I.O, New Hope, PA, USA)	720 × 480 (30 fps)	Laser pointer for distance from the kerb	Multiple existing devices. Price: NA
Chuang et al. (2013)	MB1200 XL-MaxSonar-EZ0 × 2 (Maxbotix Inc., MN, USA)	60–70	0–6.5	GPS (Canmore Electronics Co Ltd. Jhubei, Hsin Chu, Taiwan)	1	Car camera DVR black box × 5 (DOD Tech Co Ltd., Taoyuan, Taiwan)	860 × 640 (30 fps)	Multi-function logger PhidgetSpatial Precision 3/3/3 (Phidgets Inc. Calgary, AB, Canada)	Multiple existing devices. 1290 \$US
Dozza et al. (2016)	LIDAR system UXM-30LXH-EWA (Hokuyo, Osaka, Japan)	20	ND	ND	1	ND	1920 × 1080 (30 fps)	NA	Multiple existing devices. 5980 \$US
Llorca et al. (2017)	TruSense S200 Laser Sensor × 2 (Laser Technology Inc., CO, USA)	55,000	0.5–750	Video VBOX waterproof 10 HZ gps data logger (Racelogic, Buckingham, UK)	10	Video VBOX waterproof 10 HZ gps data logger (Racelogic, Buckingham, UK) with 3 cameras	ND	TrueSense T100 (Laser Technology Inc., Centennial, CO, USA) for measure the speed of overtaking vehicles.	Multiple existing devices. 3695 \$US
Walker et al. (2014)	MB1200 XL-MaxSonar-EZ0 (Maxbotix Inc., MN, USA)	10	ND	NA	NA	NA	NA	Arduino Uno (Arduino, Scarmagno, Italy)	Custom-made. 120 \$US
Mehta et al. (2015)	ND	10	0.3–4.8	ND	ND	Camera lateral (type not defined)	ND	NA	Custom-made. Price: NA
Beck et al. (2019)	MB1230 XL-MaxSonar-EZ3 (Maxbotix Inc., MN, USA)	10	0–3.3	Adafruit Ultimate GPS FeatherWing (Adafruit Industries, New York, NY, USA)	1	GoPro Hero 5 Session (GoPro, CA, USA) in the handlebar	ND	NA	Custom-made. Price: 693 \$US

ND : Not defined, NA : Not applicable, The cost (in dollars) is estimated by summing the price of each electronic device.

4.3 Materials and Methods

4.3.1 Preliminary assessment

A preliminary analysis of the products was conducted to assess the feasibility of the project and identify possible technical solutions for an OSPD product. Two main findings emerge. First, many researchers use rapid prototyping techniques (3D printers and laser cut) to develop personalized cases (Beck et al. 2019; Bernal, Vanegas et Pachon Artesano 2020). Second, many of them use microcontrollers (ex., Arduino) (Beck et al. 2019; Bernal, Vanegas et Pachon Artesano 2020) or single board nano computers (ex., Raspberry pi) (Gandhi 2018) for data management.

Following the production of many prototypes, we decided to develop a product based on the Raspberry pi zero w (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, UK). Many reasons motivated the choice of this nano computer, namely excellent online support, high-level connectivity with various devices (especially the connection of a video camera), size (65 mm × 31 mm × 5 mm), and the price between \$10 and \$25 US. As for the case, we decided to resort to a 3D printer, providing more flexibility for design and different prototypes.

4.3.2 Electronic devices

An extensive search for available devices was conducted on the three most important dimensions for the analysis of LPD studies: detection of lateral distance, recording of geographical coordinates, and video recording. The selection of devices was also based on compatibility with Raspberry pi zero w, resolution (cost-benefit ratio), and size.

The final selection of devices is reported in Table 4.2. The distance sensor chosen for the project is the Tfmini plus micro lidar (Benewake, Beijing, China), capable of measuring up to 12 m and achieving up to 100 distance captures per second with an accuracy of ± 5 cm at distances of less than 5 m. It is also possible to configure the capture cycle. Compared to devices used in previous studies (Table 4.1), the Tfmini plus micro lidar counts with superior capture frequency and distance measurement.

The GPS BN-220 (Beitian Shenzhen, Hong Kong, China) was selected for its work frequency of one cycle per second that can be modified, its spatial precision (two metres horizontally), and its adequate documentation and online support.

Usually, in studies analyzing overtaking distance, two cameras are used: a front camera to characterize the urban environment and a lateral camera to determine vehicle type. However, the Raspberry pi zero w can only manage one camera. For this reason, the fish-eye type cameras were privileged to allow for recording both front and side of the cyclist at the same time. We selected the Rpi Camera G (Waveshare, Shenzhen, Hong Kong, China) with a working angle of 160 degrees. It is also equipped with an infrared system for night vision and an adjustable resolution up to full HD (1920 × 1080 px).

In the following section, there are detailed descriptions of electrical connections and assembly of the device.

Table 4.2 : Summary of electronic devices for the sensor one meter plus (1m+)

Device	Model	Manufacturer	Specifications	Quantity	Price (US)
Screen touch	NX3224T024	Nextion (Shenzhen, Hong Kong, China)	Resolution: 320 x 240 px Color: 65536 colors Voltage: 5 V	1	30
Distance sensor	Tfmini plus micro lidar	Benewake (Beijing, China)	Range: 0.1 - 12 m Frequency: 100 Hz Resolution: 1 cm Voltage: 5 V	1	60
GPS	BN - 220	Beitian (Shenzhen, Hong Kong, China)	Frequency: 1 Hz Resolution: 2m in horizontal position Voltage: 5 V	1	16
Small single board computer	Raspberry Pi Zero W	Raspberry Pi Foundation (Cambridge, UK)	Memory: 512 MB RAM Connectivity: Bluetooth and Wifi Processor: 1GHz single-core CPU Voltage: 3.3 V	1	30
Hub usb	Hub zero w - BH10128PSU	Makerspot	Socket type: 4 port USB	1	17
Camera	RPi Camera G	Waveshare (Shenzhen, Hong Kong, China)	Field of view: 160 degrees Sensor resolution: Max 1080p Aperture (F): 2.35	1	25

Voltage: 3.3 V

			Charging current: 0 - 2.1 A		
			Discharge current: 0 - 2.4 A	1	15
			Input voltage: 5 V		
Battery Charger	HW-775	Makerfocus (China)	Output voltage: 3.7 - 5 V		
Waterproof Cable micro-USB	Micro USB mount extension	Cerrxian (China)	Connector: Micro USB male/female	1	15
SD Card	EVO Select micro SDXC 64 Gb	Samsung (Seoul, South Korea)	Capacity: 64 GB	1	15
			Voltage: 3.3 V or 5 V		
	DS3231 Real time clock		time accuracy: +-0.4 sec/day	1	4
		Daoki (China)			
	Round Rocker Switch Blue		Voltage: 12 V		
Waterproof switch		Twidex (Suzhou, China)	Current: 20 A	1	3
			Voltage: 3.7 V		
Battery	3.7V Li-ion 18650	Pkcell (Shenzhen, Hong Kong, China)	Nominal Capacity: 2200mAh	4	22
			Output Voltage: 3.3 or 5 V		
Usb to ttl connector	CP 2102	Izokee (China)	Communication protocol: UART	2	20
			Output Voltage: 3.3 or 5 V		
Usb to ttl connector	RS232	Robojax (China)	Communication protocol: UART	1	10
					292
		Total :			

Note : This list only includes electronic devices.

4.3.3 Connection diagram

The diagram of the connections between devices is presented in Figure 4.1. Three systems configure the device. First, the system to charge and manage the battery is composed of four elements:

- An HW 775 (Makerfocus, China) card which manages charging and discharging of the device and also protects the system from eventual electrical peaks.
- Four lithium Pkcell batteries (Shenzhen, Hong Kong, China) of 2200 mAh each for a total of 8800 mAh (approximately seven hours of continuous recording).

- A sealed Twidex switch (Suzhou, China) to allow the current to be conducted to the device as a whole.
- A sealed micro Cerrxian USB port (China) to recharge the batteries and to which it is also possible to connect Power Banks to increase autonomy during a data collection session.

The second system is responsible for data recording and device management: the Raspberry pi zero w with an SD card of 64 GB to record trips between 15 and 30 hours according to camera resolution.

The last one is the peripheral management system. The GPS, distance sensor, and screen use series communication protocols, while the camera uses an MIPI camera serial interface (CSI). The camera is directly connected to the CSI port of the Raspberry pi zero w (Figure 4.2).

Other elements are necessary to guarantee the proper operation of the device:

- The tactile screen as a collection device for user commands.
- The DS3231 RTC clock which memorizes the time and transmits it to the Raspberry pi, the latter being directly welded to the superior pins of the nano computer.
- Finally, the hub zero USB is the connection bridge between the devices from 3 USB adaptors toward ttl, one last USB micro port is available to download the collected files during the bicycle trips.

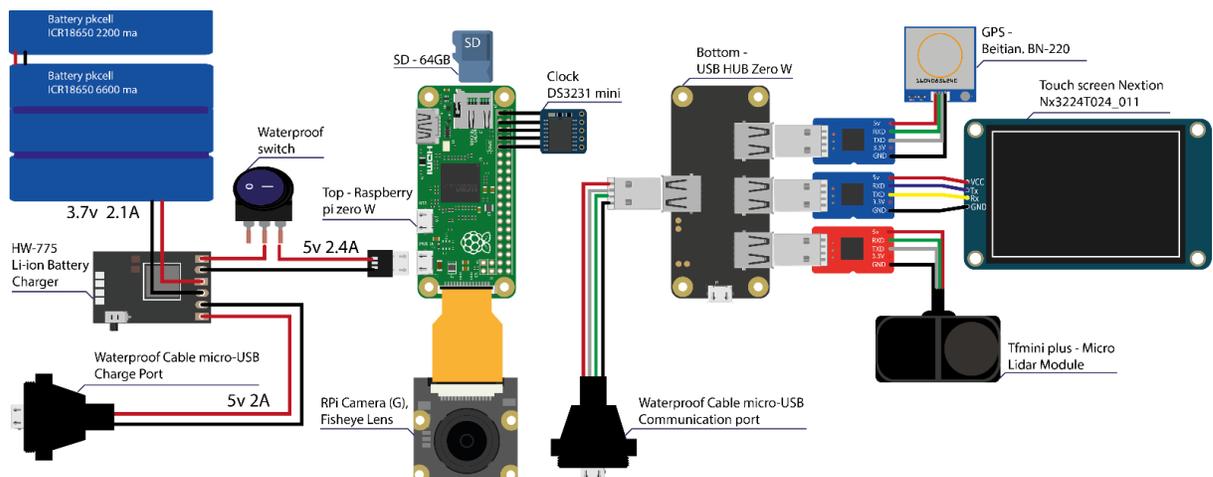


Figure 4.1 : Schematic connection diagram

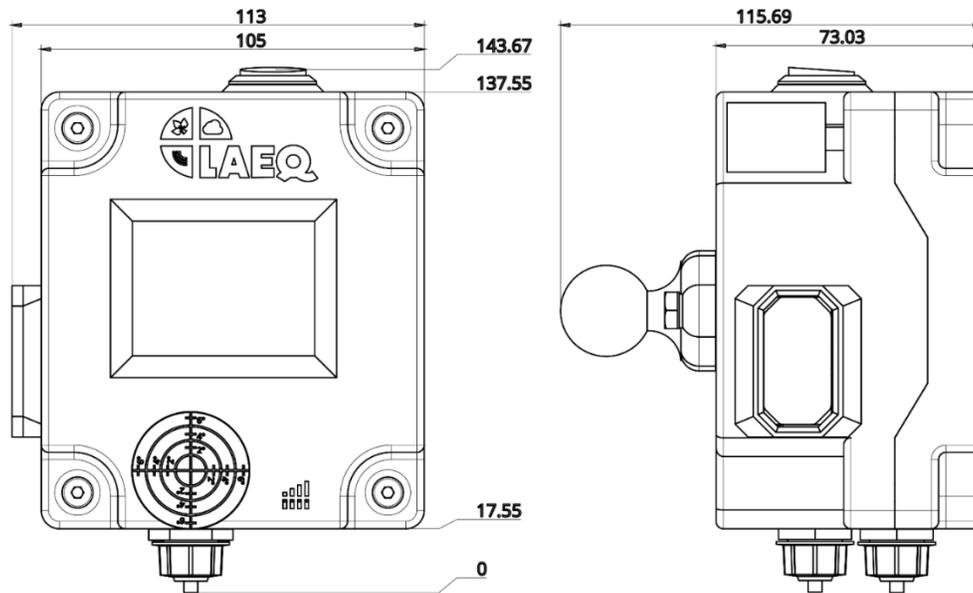


Figure 4.2 : One metre plus (1m+) sensor, distances in mm.

4.3.4 Software

The operating system used on the Raspberry pi zero w is the Raspberry Pi OS (32 bit) based on Debian (The Raspberry Pi Foundation 2021). The programming language selected for the development of the project was Python (version 3.7.3) (Python 2021), using many libraries: pycserial (3.5), multiprocessing (0.70.11.1), raspivid camera app, path (15.1.2), pynmea2 (1.18.0), and PyYAML (5.4.1). The source codes of one metre plus software are available free of charge (under the GPLv3 licence) on GitHub (LAEQ 2021).

Three types of files are obtained through the data collection process:

- For the distance sensor, a CSV file including the time (in milliseconds) of the event and the distance in centimetres.
- For the GPS, a CSV file with the time (in milliseconds) and the coordinates of the geographical position (longitude and latitude).
- For the fish-eye camera, a file of h.264 format.

These three files were recorded with the identification of the device, the date and time of the beginning of the recording (e.g., ID1_C1_2021_05_20_20_14_08_15.h264).

4.3.5 Product design and 3D modeling

Since the one meter plus sensor is based on the integration of the various devices described previously, there are no available cases on the market for the assembly of the different components. Therefore, we have created a model for a personalized 3D case for the 1m+. The 3D Modelling was done on Onshape (2021). Figure 4.2 shows the dimensions of the 1m+ sensor (for more details on parts, assembly, and devices, see supplementary material, S1-S3).

The different elements (Table 4.3) were printed on the Creality 3D CR-10s printer (Creality3D, Dalang, Shenzhen, China). The printing characteristics are the following: Layer height of 0.2 mm, infill density of 70%, wall lines count of 3 and support on. The printing material used was the white PLA (Polylactic Acid). Total duration of 3D printing of a 1m+ sensor is 51 h (with Creality 3D CR-10s printer) and approximately 380 g of PLA are necessary for its production. The 3D models and plans are available free of charge licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International Licence (CC-BY-NC).

Table 4.3 : 3D parts specifications.

Element	Size (High, Width and Depth in mm)	Time of Printing	Material Quantity (g)
Top cover	105 × 120 × 34	15 h 40 min	128
Bottom case	113 × 122 × 62	28 h 43 min	213
Raspberry pi support	92 × 6 × 32		
Distance sensor support	35 × 14 × 26.5		
Camera support	38 × 17.5 × 25	6 h 23 min	39
Touch screen support	80 × 61 × 6		
Charger support	24 × 17 × 3		

The 1m+ sensor includes a diamond baseball-type inferior support (RAM® B 238U, Seattle, WA, USA); this physical element, as well as the double socket arm (RAM® B 400U, Seattle, WA, USA) and the tough claw (RAM® B 201U, Seattle, WA, USA), greatly facilitate the attachment of the sensor to the bicycle. The three elements facilitate the attachment of the sensor in many positions and diameters of handlebars (Figure 4.3). An important characteristic of the mobile data collection is the horizontal position of the camera; to guarantee this condition, the 1m+ device has a spirit level on the top cover.

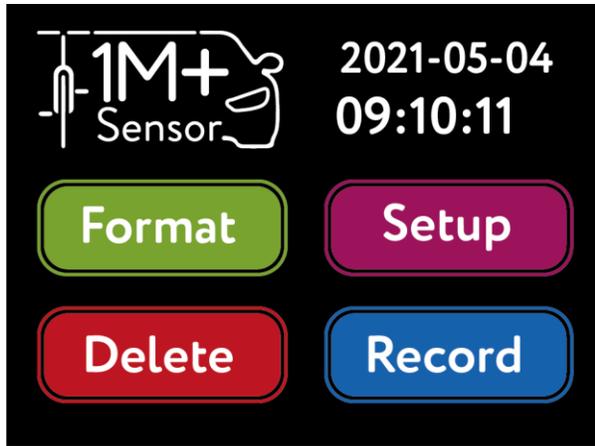


Figure 4.3 : Integration of the one metre plus sensor to the bicycles

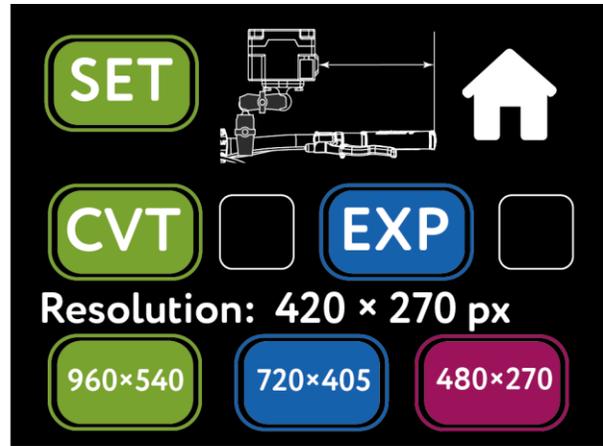
The final price of the product is approximately 500 US\$ (values may vary according to the availability of products); this value includes electronic materials, screws, and various elements for assembly, the RAM[®]'s supports and the printed plastic case. The value does not include assembly costs. The assembly and installation time are about 6 hours. For more details on the list of materials, see the supplementary material (S2).

4.3.6 User interface

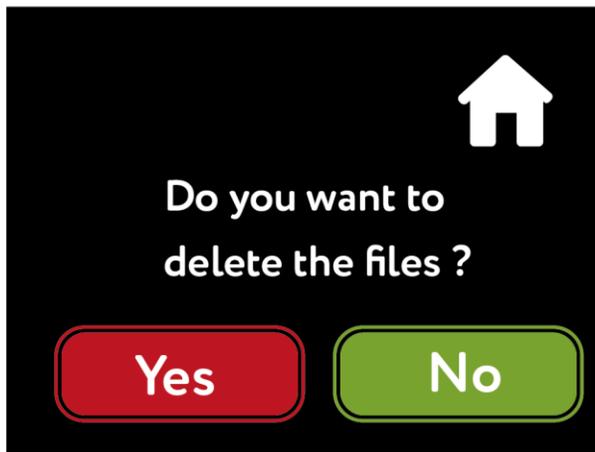
To manipulate the 1m+ sensor, the tactile screen includes a specific editor (nextion-editor v1.631, Nextion, Shenzhen, Hong Kong, China) to implement and develop the graphic interface. The interface is composed of the main menu and the format, configuration, file removal, and recording pages (Figures 4.4 and 4.5).



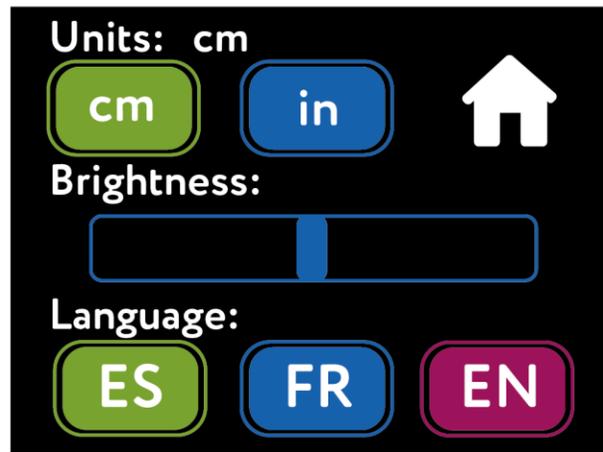
(a)



(b)

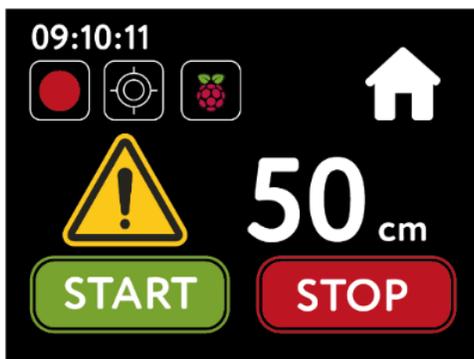


(c)



(d)

Figure 4.4 : Graphical user interface. (a) main page; (b) Configuration page activated by the button Setup. (c) Delete page activated by the button Delete. (d) Format page activated by the button Format.



-  Camera on indicator
-  GPS on indicator
-  Raspberry Pi indicator connected
-  Menu button / home button

Figure 4.5 : Recording page

The main menu shows time and date, as well as the buttons granting access to the pages (Figure 4.4a).

On the configuration page, the user may regulate the distance in relation to the edge of the handlebar for the data collection process (Figure 4.4b). Still on the same page, two buttons are available for file management and exportation: the CVT button (Convert) converts the video files from the h264 format (native to the camera) to the mp4 format; the EXP button (Export) exports files recorded by the device on a USB key. The user may also define the camera resolution (960 × 540, 720 × 405 and 480 × 270 px).

The deletion page allows the user to eliminate files recorded by the sensor (Figure 4.4c). In the Format page, the user can define the units of measure (metric or imperial), modify the brightness of the screen, and choose between three languages (Spanish, English or French) (Figure 4.4d). On each page, there is a Home button to return to the main menu

The last page is the recording interface (*Record* button). In the top left corner, time is indicated. Once the user clicks on the start button (START), the system launches the respective commands to begin data recording. Three icons indicate the status of the device to the user: one for the beginning of the video recording, a second one for the status of connection of the GPS, and the last one for the connection of the Raspberry pi zero w (Figure 4.5). As for distance, the numerical indicator shows the respective values with a resolution of 1 cm; if the value measured by the sensor is inferior to 100 cm, a “danger” icon appears at the left of the distance value. Finally, the stop button (STOP) finalizes the recording process.

4.3.6 Data collection

To evaluate the 1m+ sensor, data collection was conducted in Montréal (Canada), including the first two authors on 8 June 2021, from 8:00–10:30 a.m. The cyclists covered 30 km individually. Each bicycle was equipped with a 1m+ sensor, the referral distance at the edge of the handlebars was determined at the beginning of the collection. The participants had to travel the same circuit twice with different camera resolutions: during the first lap, cyclists travelled with the highest resolution (960 × 540 px) and, for the second lap, one participant cycled with medium resolution (720 × 405 px), and the other with minimal resolution (480 × 270 px). The two sensors were pre-calibrated at two metres using a flexometer. 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).

The structuring of data was completed with version 4.0.2 of the R software (R Core Team 2020). Since the sensor can measure distance for an array of objects, it is therefore relevant to identify the values generated by vehicle overtakings. Consequently, the tracking of these overtakings was conducted with a visual analysis of videos with the Vifeco free software (Apparicio, Maignan et Gelb 2021) and starting with a counting guide (presented in the supplementary material, S4). According to this guide, it is necessary to situate an observation at the beginning of the overtaking (front end of vehicle aligned with the cyclist's handlebars, Figure 4.6a), and a second observation at the end of the overtaking (extremity of the vehicle aligned with the cyclist's handlebars, Figure 4.6b).

The JSON files obtained from Vifeco were imported in the R software with the beginning and the end of each overtaking (in milliseconds). Once paired (timestamp) with data for one metre plus distances, it is then possible to obtain the minimal distance during overtaking. Subsequently, minimal distance values for each overtaking were combined with the geographical position according to the time associated with GPS coordinates.



Figure 4.6 : Characterization of overtakings on Vifeco. **(a)** beginning of overtaking aligned with cyclist's handlebars; **(b)** end of overtaking.

4.4 Results

During the trips for this test collection, the two 1m+ sensors recorded close to four hours of travel, corresponding to approximately 12 GB (for both sensors); no loss of data was found. The files

obtained by the two sensors are presented in detail in Table 4.4. As expected, camera resolution had an important impact on the size of the MP4 output file.

Table 4.4 : Files specifications

File	Distance File	GPS File	Video File			
	Size (KB)	Size (KB)	Resolution (px)	Size H264 (KB)	Size MP4 (KB)	Duration (mm:ss)
ID1_C1_2021_06_08_08_14_39	841	156	960 × 540	4,027,668	4,028,034	52:36
ID1_C1_2021_06_08_09_29_01	633	154	720 × 405	3,226,752	3,227,105	52:06
ID2_C2_2021_06_08_08_19_49	1081	169	960 × 540	3,789,376	3,789,765	56:48
ID2_C2_2021_06_08_09_33_16	794	169	480 × 270	985,284	985,639	57:00

4.4.1 Spatial observations

As for the GPS coordinates, Figure 4.7a presents the predefined trip for product testing. Figure 4.7b shows one of the four tracks of spatial coordinates obtained by the 1m+ sensor. Each point/observation/coordinate is one second apart, therefore, responding to the technical characteristics of the device. The adequate precision of the GPS and the low distribution of observations must be noted (Figure 4.7c).

Figure 4.8 shows 17 locations where cyclists experienced a dangerous overtaking, that is with a lateral passing distance less than one metre.

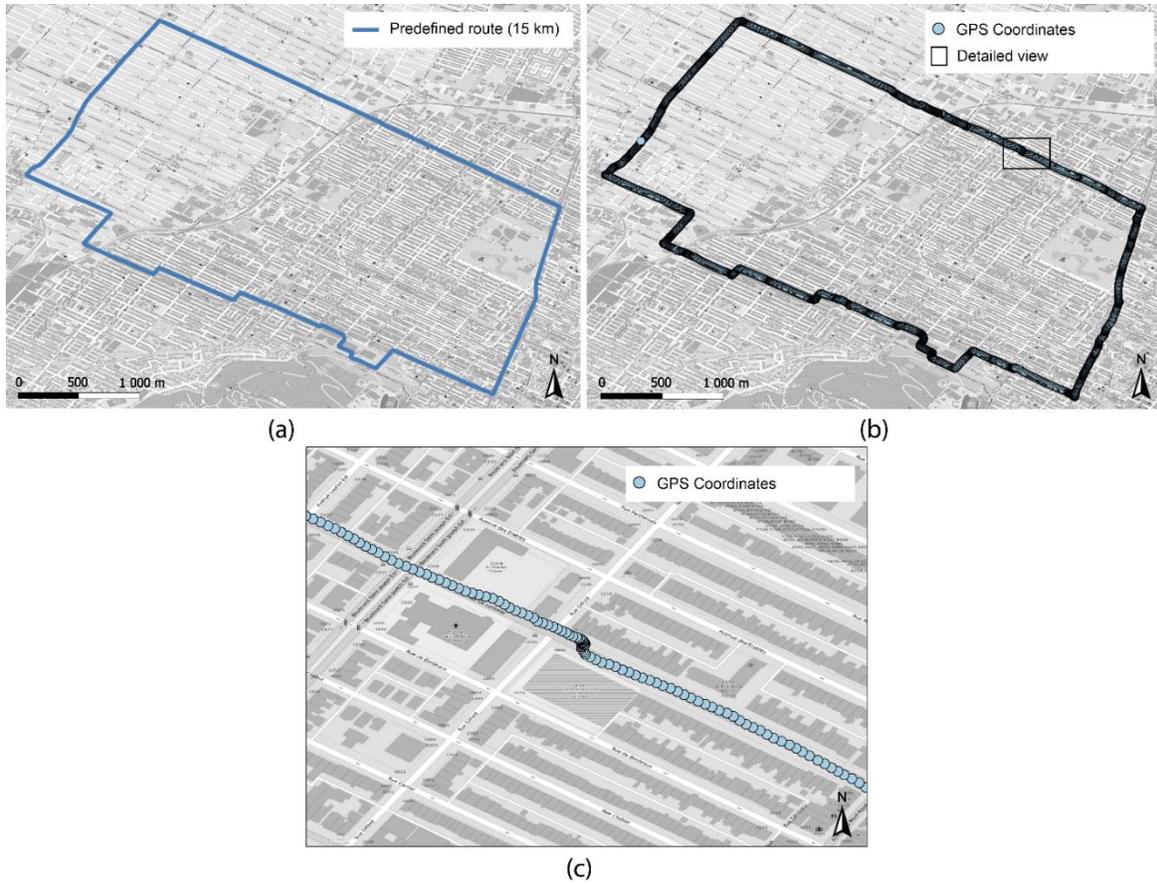


Figure 4.7 : Characteristics of the trip **(a)** predefined trip; **(b)** data collected by the 1m+ sensor; **(c)** detailed view of data collected by the 1m+ sensor



Figure 4.8 : Data collected with dangerous overtakings (less than 100 cm).

4.4.2 Camera resolution

Figure 4.9 is constructed with images at two different intersections extracted from the videos recorded by the 1m+ sensors and with three available resolutions: 920 × 540 px (Figure 4.9a) 720 × 405 px (Figure 4.9b) et 480 × 270 px (Figure 4.9c).



Figure 4.9 : Different resolutions of the 1m+ camera sensor (a) 920 x 540 px (b) 720 x 405 px (c) 480 x 270 px

4.4.3 Distance mesures by vehicule

A total of 317 overtaking manoeuvres were recorded; the minimal distance was 67 cm and the maximal distance was 354 cm. Figure 4.10 illustrates different values of lateral passing distance with the image of the vehicle having performed the manoeuvre.

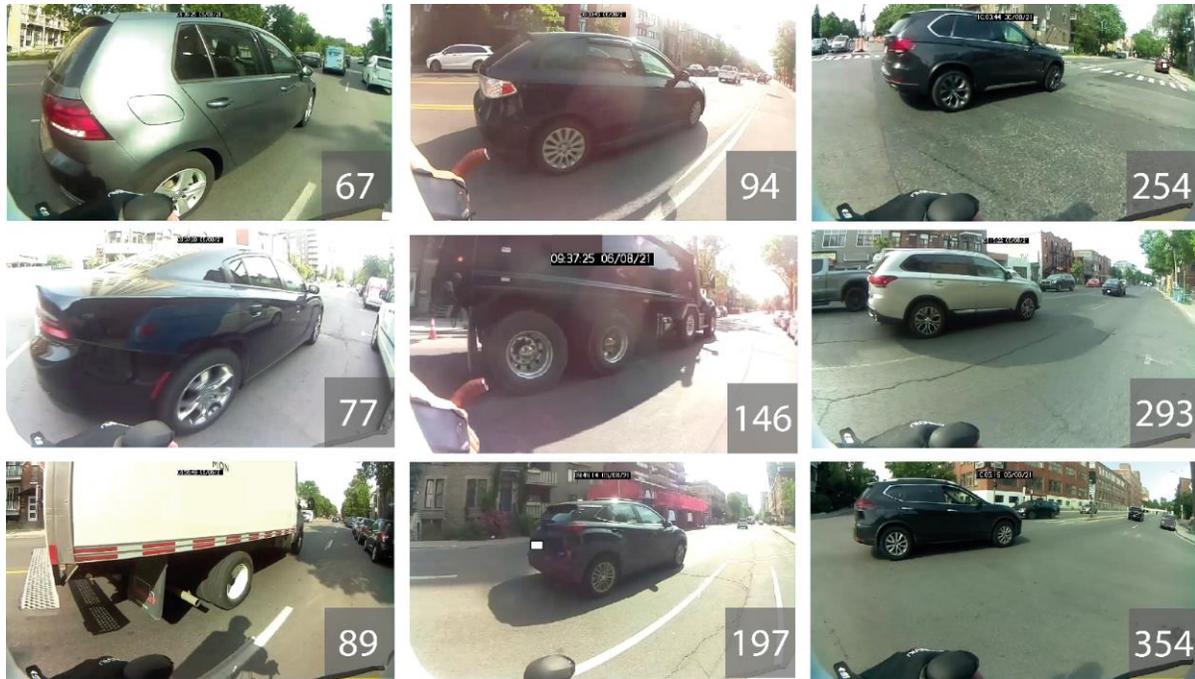


Figure 4.10 : Overtaking by vehicles according to minimal distance in centimetres.

4.4.4 Technical Data – Product characteristics

The technical specifications of the product summarize the functions and characteristics described previously (Table 4.5).

Table 4.5: Technical specifications one metre plus (1m+)

Charge		Distance Sensor	
Charging voltage	5 V	Range (adjustable)	2 cm–400 cm
Charging current	2 A	Capture frequency (adjustable)	30–40 Hz
Battery		GPS	
Capacity	8800 mAh	Horizontal resolution	2 m
Technology	Li-ion	Capture frequency (adjustable)	1 Hz
Operation voltage	3.7 V	Global system	
Operation current	1 A	Maximum operation time	7 h of continuous recording
Camera		Operating System	Raspberry Pi OS (32 bit)
Angle	160 degrees	Wifi	802.11 b/g/n
Resolution, by default	- Low (426 × 240 px)	Bluetooth	v4.1 BLE standard
Large (adjustable)	- Medium (768 × 432 px)	CPU	1 GHz single-core
Aperture (F)	2.35	RAM	512 MB
Format	h.264 and mp4	Spirit Level	Integrated
Framerate (adjustable)	25 fps		

4.5 Discussion

4.5.1. Comparison with Previous Devices

Table 4.6 presents a summary of the characteristics of custom-made devices used to analyze cyclists' safety based on LPD. First, most of them have a distance sensor, but a 1m+ sensor presents a capture cycle per second six times higher (60 Hz versus 10 Hz). We must remember that our device's capture cycle can be reduced in the open Python code. Second, the range distance is larger and adjustable as well (0.1 to 12 m). Usually, overtakings of more than four metres are seldom considered in studies. Again, the distance threshold can be modified in the settings file.

Table 4.6: Comparison between one metre plus (1m+) and other devices.

Study (Year)	Distance Sensor			GPS		Camera	Technology	
	Feature	Hz	Range Distance (m)	Feature	Hz	Feature Resolution		
Walker et al. (2014) (Walker, Garrard et Jowitt 2014)	√	10	ND	x	NA	x	NA	Custom made: Grey plastic box and commercial devices
Mehta et al. (2015) (Mehta, Mehran et Hellinga 2015)	√	10	0.3–4.8	√	ND	√ (not integrated)	ND	Custom made: Grey plastic box and commercial devices
Beck et al. (2019) (Beck et al. 2019)	√	10	0.3–3.3	√	1	√ (not integrated)	3840 × 2160	Custom made: 3D printing and commercial devices
Codaxus C3FT v3	√	10	0–2.5	x	NA	x	NA	Standard product.
1m+ sensor	√	60	0.1–12	√	1	√	Max 1920 × 1080	Custom made: 3D printing and commercial devices

Third, the GPS records one observation per second as do most devices. This capture cycle can require a lot of energy. Consequently, this value can be increased with the device (ex., one observation every five seconds) in cases where high accuracy of a trajectory is not necessary. In such cases, using post-treatment map-matching algorithms would be recommended such as that proposed by Li et al. (2016) to improve the GPS tracking.

Fourth, the camera resolution is less than the Go Pro hero 5 session but based on our experience, a resolution of 426 × 240 px is sufficient to conduct an analysis of environmental characteristics. As a comparison, the camera used in the 1m+ costs about \$25 US, versus \$400 US for the Go Pro hero 5 session (Beck et al. 2019).

Finally, most of the custom-made products can be manufactured through rapid prototyping technologies; like Beck et al. (2019), we opted for 3D printing. The most significant distinction of our device is access to 3D plans and templates. Also, 1m+ sensor fits with the OSPD philosophy, users being able to utilize it, modify it, and share it.

Unfortunately, an evaluation/comparison of the devices in real conditions is not possible because the plans, codes, and materials of other devices are unavailable online.

4.5.2 Limits of the sensor and potential improvements

During the analysis of the videos to identify overtaking manoeuvres, we found a significant number of vibrations on the videos for certain sections of the trip. This factor varies according to bicycle suspension, road condition, cyclist's driving style, among others. Therefore, future versions of the 1m+ sensor should include physical elements that reduce vibrations to improve the quality of the videos and increase the sensor's life span (by reducing the impacts). It is also possible to reduce video vibrations in postprocessing, with libraries such as vidstab (Spannbauer 2020) or opencv (OpenCV 2021). Once data are collected, two avenues could be explored in future works: automatic detection of passing vehicles by using Yolo (G. Li, Song et Fu 2018; Redmon et al. 2016; Jeon et Rajamani 2018), and improvement of the map-matching process. On this last point, each location of the GPS coordinates could be matched with an image extracted for the video (recorded by the wide-angle camera) to assess spatial accuracy and modify the location when needed.

This version of 1m+ is only dedicated to identifying dangerous overtakings. However, other elements could be added in future versions to characterize the cyclist's behaviour and their safety during a route:

- A microphone to record the video with the environmental sound.

- A Bluetooth speedometer (with a sensor attached to the wheel) to accurately measure speed and distance.
- Gyroscopes and accelerometers to measure cyclist stability during the overtaking manoeuvre.
- A push-button that allows the cyclist to identify dangerous manoeuvres or other conflicts. This could be useful to evaluate differences between perceived and real risks.

It would also be practicable to create ecosystems between these different devices with Wi-Fi or Bluetooth connectivity.

4.5.2 Contribution to research

Considering the results of the device, we believe that the 1m+ sensor can become an essential element in research with equipped bicycles. Free access to the plans and software are elements that can motivate other researchers to use the product and/or create new versions that can be adapted to their needs. Although the 1m+ sensor is initially meant for LPD analysis, some of its functions could be useful in cyclist conflicts studies, the detection of vehicles, and studies with e-bikes. Based on the data collected by the 1m+ combined with video analysis, it is possible to evaluate the influence of various environmental factors on the safety of cyclists.

4.6 Conclusion

In this study, we described an open-source sensor capable of measuring vehicle overtaking distances, recording geographical location and a video of the trip. Among the comparable advantages of the 1m+ in relation to other devices, let us mention others: the integration of many functions in the same device, facility in data management (all devices are synchronized with the same temporal reference), access to variables by default to modify the parameters of the device, and access to the 3D model for purposes of modification, if necessary.

The implementation of this project is mainly oriented by the democratization of a research tool on the safety of cyclists, by proposing a free and participative platform/product. This device could therefore be used by different members of the academic community or organizations interested in

dangerous overtaking of cyclists in a given city. Also, police services in many cities and countries around the world could use the 1m+ sensor to evaluate whether the legislation in effect on overtaking distances with cyclists is respected.

CHAPITRE 5 : DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 Bénéfices et limites d'une collecte mobile quasi-naturalistique extensive

Les collectes mobiles quasi-naturalistiques extensives avec des vélos équipés représentent une approche méthodologique originale, innovante et rigoureuse pour répertorier et comprendre les événements affectant la sécurité des cyclistes comme les dépassements dangereux. Les avantages de ce type de collecte sont nombreux :

- Cette approche permet de **diversifier les types d'environnements urbains** traversés par les cyclistes et de **maximiser la couverture du territoire à l'étude**. Dans le cadre de ce travail, 1 680 kilomètres ont ainsi été parcourus par uniquement quatre cyclistes durant seulement cinq jours.
- Puisqu'il est possible de parcourir un grand nombre de kilomètres durant une **courte période**, cela **réduit grandement les coûts de la collecte** comparativement à une collecte mobile naturalistique impliquant de nombreux·ses participant·e·s. En effet, pour une étude naturalistique, on invite généralement ces dernier·ère·s à parcourir leurs trajets habituels ; cela se limite le plus souvent à une dizaine kilomètres (voire moins) par jour et par participant·e. Aussi, dans une étude naturalistique, les coûts d'acquisition des appareils de mesure sont décuplés puisqu'il faut équiper les vélos d'un nombre beaucoup plus important de participant·e·s.
- En raison du volume considérable de données et de la diversité des environnements traversés durant une telle collecte, il est alors possible d'**explorer une panoplie de facteurs** pouvant influencer la distance latérale de dépassement (type de route, présence d'une bande cyclable, présence de véhicules stationnés, type de véhicule, jour et moment de la journée et position géographique, etc.).
- Il y a **peu ou pas de perte de données** à condition de bien former les participant·e·s à la manipulation des appareils et de mettre en place un protocole rigoureux pour la récupération des données sur les appareils à la fin de chaque journée de collecte. Comparativement à une collecte naturalistique, la formation est facilitée puisque les participant·e·s font habituellement partie de l'équipe de recherche (ou minimalement, de l'université de l'équipe de recherche). Aussi, une journée de collecte se termine

généralement au laboratoire, ce qui facilite la récupération et la validation des données. Finalement, les erreurs potentielles de manipulation, de configuration des dispositifs ou de perte d'information sont réduites puisque la gestion des appareils et des données sont réalisées par les chercheur·se·s.

Néanmoins, les collectes mobiles quasi-naturalistiques extensives présentent également plusieurs limites :

- Les résultats s'appliquent uniquement à une courte période. Il convient alors de faire preuve de **prudence lors de la comparaison des résultats** avec ceux d'autres études. Aussi, il n'est pas possible d'explorer les variations saisonnières qui nécessiteraient une collecte tout au long de l'année ou minimalement plusieurs collectes durant la même année.
- Le volume de données de ce type de collecte étant très important, **la structuration des données est souvent un processus laborieux et chronophage**, et ce, pour trois raisons principales. Premièrement, les données des différents appareils (caméra, GPS, capteur de distance) doivent être appariées en fonction de l'heure précise, ce qui nécessite la synchronisation de leurs horloges avant chaque journée de collecte. Deuxièmement, les données doivent être appariées spatialement (*map-matched*) à un réseau routier. Bien que cette opération puisse être automatisée, les résultats de l'appariement spatial pour chaque trace GPS doivent être validés (par exemple, en visualisant les vidéos des trajets). Troisièmement, l'identification des dépassements sur les vidéos est un processus fastidieux qui nécessite au moins deux analystes pour calculer des taux de concordance et s'assurer ainsi d'une bonne fiabilité des données sur les dépassements. En guise d'illustration, notre collecte a permis de recueillir 101 heures de vidéos alors que l'identification des dépassements sur ces dernières a nécessité 230 heures de visionnement à deux analystes.
- Cette approche représente en soi **un défi de préparation et de gestion**. Rappelons que dans une collecte naturalistique, les participant·e·s parcourent le plus souvent les trajets habituels tandis que dans une collecte quasi-naturalistique extensive les trajets doivent être préalablement tracés en respectant deux critères (maximisation de la diversité des types d'axes et de la couverture spatiale du territoire). Là encore, définir et tracer les trajets en respectant ces deux critères peut être chronophage. Du point de vue de la gestion, il

faut bien former les cyclistes au maniement des appareils, prévoir une équipe de secours⁸, constituer et former une autre équipe chargée de la gestion des appareils⁹.

5.2 Limites de l'étude : les facteurs partiellement ou non explorés de la DLD

Bien que nous ayons exploré de nombreux facteurs pouvant influencer la DLD, d'autres n'ont été pas analysés ou bien partiellement.

Premièrement, les caractéristiques des cyclistes ont été peu explorées bien que nous ayons introduit judicieusement l'identifiant des participant·e·s comme variable catégorielle de contrôle. Avec uniquement quatre participant·e·s (trois hommes et une femme), il était impossible d'évaluer les effets du genre, de l'âge et de l'apparence des cyclistes sur la DLD. Concernant ce dernier point, il est à noter que les cyclistes portaient le même maillot de vélo.

Deuxièmement, la relation entre les risques perçus et réels d'un dépassement dangereux (mesuré par l'appareil Codaxus C3FT) n'a pas été établie.

Troisièmement, la largeur de l'axe routier, le nombre de voies et la densité du trafic ont été explorés avec des variables de substitution (*proxy variables*). À titre de rappel, on a supposé que les routes primaires, secondaires et tertiaires étaient plus larges et caractérisées par des volumes de trafic plus importants comparativement aux rues résidentielles. Or, il aurait été possible de mesurer précisément la largeur des rues avec les données géomatiques de la Ville de Montréal¹⁰ et de construire des indicateurs du trafic en temps réel en identifiant sur les vidéos tous les véhicules en mouvement lors des trajets. Concernant la construction de ces indicateurs, cette tâche est toutefois très chronophage, car difficilement automatisable (voir la section 1.1.3).

Quatrièmement, la vitesse du véhicule lors du dépassement n'a pas été explorée. Dans une étude antérieure, Mehta et al (2015) font une estimation approximative de la vitesse de dépassement de véhicules, à partir de la longueur approximative du véhicule et de la durée de la manœuvre. Ce calcul n'a pas été effectué car on considère cette approche pas assez précise puisqu'il y a une

⁸ En cas de blessure d'un·e participant·e qui doit rouler de 80 à 100 kilomètres par jour durant cinq jours.

⁹ Les tâches affectées à cette équipe sont : synchroniser les horloges des appareils, configurer et fixer adéquatement les appareils sur les vélos, entretenir et réparer au besoin les vélos avant le début d'une journée de collecte, télécharger et valider les données des appareils, recharger les appareils à la fin de chaque journée de collecte.

¹⁰ Bien qu'intéressante, la largeur de la rue ne permet pas d'évaluer précisément l'espace disponible lors d'un dépassement qui dépend à la fois de cette dernière et de la présence et du type de véhicules stationnés sur la rue.

grande variation de longueurs entre les différents véhicules. Autrement dit, à notre avis, la valeur moyenne de longueur utilisée par Mehta et al (2015) n'est pas appropriée pour mesurer tout le spectre des carrosseries observées entre les catégories de véhicules. Dans les études futures, nous espérons disposer d'instruments appropriés (radar de vitesse portatif) pour mesurer plus précisément la vitesse des véhicules.

5.3 Retour sur les principaux résultats

Durant notre collecte, nous avons montré qu'un dépassement sur 32 était dangereux, soit un ratio beaucoup plus faible que celui rapporté par Beck et al. (2019) à Victoria en Australie (1 sur 17). En raison d'approches méthodologiques différentes, ces ratios doivent être comparés avec la plus grande prudence. Dans l'étude australienne, 60 participant·e·s ont été recruté·e·s et ont effectué leurs trajets habituels pendant une à deux semaines. Dans notre étude, la collecte mobile est extensive et visait à couvrir l'ensemble de l'île de Montréal, de 9h à 18h durant cinq jours. On pourrait supposer que la grande majorité des trajets de l'étude Beck et al. (2019) a été réalisé en heures de pointe.

Les résultats du modèle généralisé additif logistique nous permettent de valider ou de réfuter les hypothèses formulées dans la section 1.4.2 :

- la densité du trafic varie fortement selon le jour de la semaine, le moment de la journée et la localisation géographique pouvant ainsi affecter sur l'occurrence des dépassements dangereux. Toutefois, les facteurs temporels n'ont pas eu d'impact significatif sur la probabilité de subir un dépassement dangereux. Par contre, la *spline* bivariée construite avec les coordonnées géographiques a clairement révélé que la dimension spatiale a un effet significatif. Il convient de rappeler que ces constats sur les effets spatio-temporels ne s'appliquent toutefois qu'à la période durant laquelle la collecté a été faite.
- Contrairement à notre hypothèse de départ, le·la participant·e n'a pas non plus d'effet sur la probabilité de vivre un dépassement dangereux.
- Sans surprise, les types de voies sur lesquels circulent les cyclistes influencent grandement la probabilité de subir un dépassement dangereux. Comparativement à une rue résidentielle ou non classifiée, cette probabilité est cinq fois plus élevée sur une route primaire et deux fois plus élevée sur les routes secondaires. Par contre, la présence de

bande cyclable n'a pas d'effet significatif sur la probabilité de dépassement dangereux. Finalement, la présence de véhicules stationnés augmente de deux fois la probabilité de subir un dépassement dangereux.

- Contrairement à notre hypothèse de départ, le type de véhicule n'a pas d'influence sur la distance latérale de dépassement.
- Par contre, la durée de dépassement a un effet significatif ; une durée plus longue est associée à une probabilité plus élevée d'un dépassement dangereux.
- La vitesse du cycliste est un facteur significatif dans le modèle, mais qui, contrairement à notre hypothèse de départ, réduit la probabilité d'observer un dépassement dangereux.

Rappelons qu'au Québec, la distance minimale lors d'un dépassement d'un vélo par un véhicule motorisé est fixée à 1 mètre dans une zone de 50 km/h ou moins et à 1,5 mètre dans une zone de plus de 50 km/h. À la lumière de nos résultats, il convient de s'interroger sur la pertinence et l'applicabilité de cette règle. Bien que dans notre étude, le type de véhicule n'ait pas montré de relation significative avec les dépassements dangereux, la distance et la durée sont corrélées négativement, c'est-à-dire que les dépassements dangereux ont une durée plus longue. À titre de rappel, la durée d'un dépassement latéral est 0,993 seconde pour une voiture, contre 1,201 pour une camionnette, 1,756 pour un camion et 2,318 pour un autobus. Pour les dépassements dangereux, ces durées s'élèvent à 1,384 secondes pour une voiture, contre 3,249 pour une camionnette, 2,142 pour un camion et 3,336 pour un autobus. Grossièrement, la durée des dépassements réglementaires ou dangereux réalisés par des conducteur·trice·s de véhicules lourds (camions et autobus) est habituellement deux fois plus longue que celle des automobilistes. Il est donc fort probable que les perceptions du risque des cyclistes augmentent considérablement en fonction de la durée du dépassement et de la taille du véhicule. On peut donc se questionner à savoir si la distance minimale d'un mètre est suffisante pour garantir la sécurité des cyclistes lors des dépassements latéraux réalisés par des véhicules lourds dont la durée dépasse deux secondes. À l'avenir, il pourrait être judicieux de remettre en question ces limites réglementaires afin d'établir des conditions de circulation plus sécuritaires pour les cyclistes. Concrètement, les distances minimales de 1 et 1,5 mètre dépendamment de la limite de vitesse autorisée sur l'axe pourraient être modulées en fonction du type de véhicule.

Concernant l'applicabilité des règles relatives aux distances minimales lors d'un dépassement latéral, à notre connaissance, aucune statistique ou donnée ouverte ne semblent être disponibles pour documenter le phénomène des dépassements dangereux à Montréal et plus largement au Québec. Cet enjeu est d'ailleurs souvent absent des campagnes de sécurité à vélo (SPVM 2021a; SPVM 2021b). Nous espérons ainsi que nos résultats permettront de sensibiliser les différents acteur·trice·s œuvrant de près ou de loin dans le domaine de la sécurité des cyclistes, qui ne se limite pas à la présence ou non de réflecteurs sur le vélo.

Concernant le dispositif *open source*, nous considérons que le capteur 1m+ peut devenir un élément fondamental de la recherche avec des vélos équipés. L'accès gratuit aux plans et au logiciel est un élément qui peut motiver d'autres chercheur·se·s à utiliser le produit et/ou à créer de nouvelles versions répondant à leurs besoins spécifiques. À cela s'ajoute que les vidéos peuvent être ainsi analysées (pour repérer les dépassements) dans un logiciel libre, soit Vifeco (Apparicio, Maignan et Gelb 2021). Bien que le capteur 1m+ est dédié initialement à l'analyse de la DLD, certaines de ses fonctions pourraient être utiles dans les études sur les conflits impliquant les cyclistes, la détection des véhicules et sur les vélos électriques. En définitive, nous espérons qu'à l'avenir, les outils et plateformes collaboratifs tels que le capteur 1m+ démocratiseront la recherche et enrichiront la comparabilité des projets axés sur la sécurité des cyclistes dans différents contextes.

5.4 Pistes de recherches futures

Suite à ce travail, plusieurs pistes de recherche mériteraient d'être explorées à l'avenir.

Premièrement, il conviendrait d'explorer la relation entre les risques perçus et réels des dépassements dangereux. Plusieurs approches méthodologiques sont possibles : à l'instar de Werneke et al. (2015) et Dozza et al. (2014), utiliser un bouton poussoir qui serait activé par le·la cycliste lors d'un dépassement qu'il·elle estime dangereux ; recourir à un code oral (par exemple, la mention du terme « danger » par le·la participant·e) qu'il serait possible de repérer sur l'audio des vidéos enregistrées par les caméras ; utiliser un journal de bord combiné avec l'un des deux outils précédents. Des approches mixtes seraient aussi extrêmement riches pour analyser la relation entre les risques perçus et réels, notamment avec : des mesures objectives issus des capteurs de distance et des entretiens individuels avec des extraits de vidéos de dépassements dangereux.

Deuxièmement, il serait pertinent d'explorer l'influence des caractéristiques des cyclistes (âge, genre, expérience de conduite) et des types de vélos (traditionnel, bixi, vélo électrique). Cela nécessiterait toutefois une collecte naturalistique extensive avec un grand nombre de participant·e·s.

Troisièmement, il serait intéressant de comparer plusieurs villes canadiennes. Comme le LAEQ a réalisé des collectes de données à vélo similaires à Toronto et à Québec en 2019, nous comptons réaliser prochainement le même exercice de modélisation pour ces deux villes. Nous pourrions ainsi vérifier si les facteurs significatifs contribuant à augmenter ou diminuer la probabilité d'un dépassement dangereux sont les mêmes dans les trois villes ; si tel est le cas, cela augmenterait alors la portée généralisatrice de nos résultats.

Finalement, en ce qui concerne le capteur 1m+, plusieurs éléments méritent d'être considérés :

- Réduire les vibrations de l'appareil pendant l'enregistrement vidéo. Comme constaté pendant le traitement de vidéos, les vibrations varient énormément en fonction du type de vélo, de l'état du réseau routier, du type de conduite, etc. Dans les futures versions du 1m+, il faudrait ajouter des éléments physiques pour réduire les vibrations (soit un système de suspension sur le vélo, soit un système directement entre l'appareil et le guidon). Cette amélioration devrait aussi augmenter la durée de vie de l'appareil en réduisant les impacts.
- Dans les versions futures, il sera possible d'implémenter des algorithmes de reconnaissance d'images afin d'identifier en temps réel non seulement le type de véhicule (voiture, camionnette, autobus, camion) impliqué dans un dépassement dangereux, mais également certains facteurs intégrés dans le modèle (bande cyclable, présence de véhicule stationné, etc.).
- Ajouter un microphone pour enregistrer les sons de l'environnement et au besoin la voix du·de la cycliste.
- Ajouter un compteur de vitesse Bluetooth pour mesurer plus précisément la vitesse et la distance parcourue.
- Ajouter d'autres appareils sur un réseau wifi pour créer des écosystèmes de travail et de communication.

- Ajouter un ou plusieurs boutons poussoirs pour caractériser la perception du·de la cycliste pendant la manœuvre de dépassement.

5.5 Recommandations

Lors de la mise en œuvre de nouvelles règles et mesures de sécurité routière (par exemple, une nouvelle limite de vitesse, un nouveau feu de circulation ou un panneau d'arrêt), plusieurs phases sont nécessaires pour évaluer la pertinence et l'impact des mesures sur la sécurité des différents usager·ère·s de la route. Cela implique des campagnes de communication et de sensibilisation, la mise en œuvre (par exemple, un aménagement spécifique) et finalement, une évaluation pour déterminer son efficacité.

Bien que la règle sur le dépassement latéral par des véhicules motorisés d'un·e cycliste établisse des distances minimales de 1 mètre (de 50 km/h et moins) et 1,5 mètre (plus de 50 km/h), le respect de cette règle par les conducteur·trices·s de véhicules motorisés est loin d'être évaluée par les autorités responsables. Tel que mentionné dans le cas de Montréal, la SPVM a acquis plusieurs dispositifs pour mesurer la distance latérale de dépassement (Codaxus C3FT, Austin, TX, USA), mais il n'y a aucune information sur l'utilisation de ces dispositifs, les processus de collecte et/ou les processus d'évaluation de la règle à partir de ces appareils.

Aussi, il existe actuellement des données ouvertes sur les collisions entre les véhicules motorisés et les cyclistes (Ville de Montréal 2020), mais ce type de jeux de données n'existe pas sur les dépassements dangereux. Nous espérons que le capteur 1m+ servira d'alternative aux autorités responsables (service de police, analystes de sécurité, etc.) afin d'évaluer la distance latérale de dépassement, en privilégiant l'accès aux données ouvertes disponibles pour l'ensemble de la communauté.

CONCLUSION

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons comme objectif d'identifier les facteurs influençant la probabilité qu'un·e cycliste subisse un dépassement dangereux (moins de 1 mètre) sur l'île de Montréal. Aussi, nous voulions établir la relation entre la durée de dépassement et la distance latérale lors d'une manœuvre de dépassement entre un véhicule motorisé et un cycliste.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une collecte quasi-naturalistique extensive sur l'île de Montréal de 1 689 km. Nous avons ensuite identifié et analysé les manœuvres de dépassement en tenant compte des différents types d'axes et d'infrastructures cyclables empruntés par le·la cycliste. Pour ce faire, nous avons fusionné les données obtenues des appareils (distance minimale de dépassement, position géographique) avec les fichiers résultats de l'analyse des vidéos sur la plateforme Vifeco (type de véhicule, début et fin de la manœuvre). Puis, les données primaires ont été fusionnées avec les caractéristiques du réseau routier (OpenStreetMap). Finalement, un modèle additif généralisé (GAM) a été utilisé pour évaluer les différents facteurs pouvant avoir un effet sur la DLD. Les résultats ont démontré que trois principaux facteurs influencent positivement et significativement la probabilité qu'un·e cycliste subisse un dépassement dangereux : circuler sur une route majeure (route primaire et secondaire), la présence de véhicules stationnés et la durée du dépassement. Par contre, comparativement à des travaux antérieurs, le type de véhicule, la présence d'une bande cyclable et le participant n'ont pas eu d'effets significatifs. Aussi, la probabilité de subir un dépassement dangereux peut varier de manière non linéaire dans l'espace, mais pas dans le temps. Pour cela, le recours à des modèles GAM s'est avéré particulièrement précieux pour contrôler les facteurs spatio-temporels non linéairement.

Dans un deuxième temps, nous avons identifié les potentielles possibilités d'amélioration en termes de dispositifs pour collecter des données sur les dépassements dangereux. Une recherche préliminaire nous a permis de révéler : le manque de produits pour mesurer la sécurité des cyclistes, le coût élevé associé aux instruments utilisés dans la collecte mobile avec des vélos et le manque de méthodes de collecte standardisées. Par conséquent, nous avons développé un produit/plateforme participative pour la communauté scientifique, le 1m+ qui est un capteur *open source* permettant de mesurer les trois principaux facteurs des études centrées sur la DLD : la mesure de la distance latérale de dépassement, l'enregistrement vidéo du trajet et l'enregistrement de la position géographique.

BIBLIOGRAPHIE

- Angel-Domenech, Antonio, Alfredo Garcia, Fernando Agustin-Gomez et Carlos Llorca. 2014. « Traffic conflict analysis by an instrumented bicycle on cycle tracks of Valencia. » In *3rd International Cycling Safety Conference*, 1-19.
- Apasnore, Peter, Karim Ismail et Ali Kassim. 2017. « Bicycle-vehicle interactions at mid-sections of mixed traffic streets: Examining passing distance and bicycle comfort perception. » *Accident Analysis & Prevention* 106: 141-148. doi:10.1016/j.aap.2017.05.003.
- 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: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*.
- 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:10.1016/j.jtrangeo.2018.06.007.
- 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): 1-9.
- Asmara, Rosa Andrie, Bimo Syahputro, Dodit Supriyanto et Anik Nur Handayani. 2020. « Prediction of Traffic Density Using YOLO Object Detection and Implemented in Raspberry Pi 3b + and Intel NCS 2. » In *2020 4th International Conference on Vocational Education and Training (ICOVET)*, 391-395. Malang, Indonesia: IEEE. doi:10.1109/ICOVET50258.2020.9230145. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9230145/>.
- Bagdadi, Omar. 2013. « Assessing Safety Critical Braking Events in Naturalistic Driving Studies. » *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 16: 117-126. doi:10.1016/j.trf.2012.08.006.
- Balka, Kerstin, Christina Raasch et Cornelius Herstatt. 2010. « How open is open source?—Software and beyond. » *Creativity and Innovation Management* 19 (3). Wiley Online Library: 248-256.
- 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. doi:10.1016/j.aap.2019.03.007.
- Beck, Ben, Mark Stevenson, Stuart Newstead, Peter Cameron, Rodney Judson, Elton R. Edwards, Andrew Bucknill, Marilyn Johnson et Belinda Gabbe. 2016. « Bicycling Crash Characteristics: An in-Depth Crash Investigation Study. » *Accident Analysis & Prevention* 96: 219-227. doi:10.1016/j.aap.2016.08.012.
- Bernal, Daniel, Antonio Vanegas et Juan Carlos Pachon Artesano. 2020. « CanAirIO. » *CanAirIO*. <https://canair.io/docs/>.

- Bíl, Michal, Martin Dobiáš, Richard Andrášik, Martina Bílová et Petr Hejna. 2018. « Cycling Fatalities: When a Helmet Is Useless and When It Might Save Your Life. » *Safety Science* 105: 71-76. doi:10.1016/j.ssci.2018.02.005.
- Bonvoisin, Jérémy. 2017. « Limits of Ecodesign: The Case for Open Source Product Development. » *International Journal of Sustainable Engineering* 10 (4-5): 198-206. doi:10.1080/19397038.2017.1317875.
- Bonvoisin, Jérémy et Jean-François Boujut. 2015. « Open design platforms for open source product development: current state and requirements. » In *DS 80-8 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 8: Innovation and Creativity, Milan, Italy, 27-30.07. 15*, 11-20.
- 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. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.05.035.
- Buehler, Ralph et John Pucher. 2017. « Trends in walking and cycling safety: recent evidence from high-income countries, with a focus on the United States and Germany. » *American journal of public health* 107 (2). American Public Health Association: 281-287.
- 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:10.1016/j.aap.2020.105596.
- Chuang, Kai-Hsiang, Chun-Chia Hsu, Ching-Huei Lai, Ji-Liang Doong et Ming-Chang Jeng. 2013. « The Use of a Quasi-Naturalistic Riding Method to Investigate Bicyclists' Behaviors When Motorists Pass. » *Accident Analysis & Prevention* 56: 32-41. doi:10.1016/j.aap.2013.03.029.
- Copenhagenize. 2019. « 2019 Copenhagenize Index - Copenhagenize. » <https://copenhagenizeindex.eu/>.
- 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:10.1016/j.aap.2018.03.016.
- Dekoninck, Luc, Dick Botteldooren, Luc Int Panis, Steve Hankey, Grishma Jain, Karthik S et Julian Marshall. 2015. « Applicability of a Noise-Based Model to Estimate in-Traffic Exposure to Black Carbon and Particle Number Concentrations in Different Cultures. » *Environment International* 74: 89-98. doi:10.1016/j.envint.2014.10.002.
- Dozza, Marco, Ron Schindler, Giulio Bianchi-Piccinini et Johan Karlsson. 2016. « How Do Drivers Overtake Cyclists? » *Accident Analysis & Prevention* 88: 29-36. doi:10.1016/j.aap.2015.12.008.
- 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:10.1016/j.trf.2014.04.001.
- Feng, Fred, Shan Bao, Robert C. Hampshire et Michael Delp. 2018. « Drivers Overtaking Bicyclists—An Examination Using Naturalistic Driving Data. » *Accident Analysis & Prevention* 115: 98-109. doi:10.1016/j.aap.2018.03.010.
- Fishman, Elliot et Christopher Cherry. 2016. « E-bikes in the Mainstream: Reviewing a Decade of Research. » *Transport Reviews* 36 (1): 72-91. doi:10.1080/01441647.2015.1069907.

- Fondation OpenStreetMap. 2021. « OpenStreetMap. » *OpenStreetMap*.
<https://www.openstreetmap.org/about>.
- Furth, Peter G. 2012. « Cycling infrastructure for mass cycling: a transatlantic comparison. » In *City cycling*, 105-140. Cambridge, MA: MIT Press.
- Fyhri, Aslak et Nils Fearnley. 2015. « Effects of E-Bikes on Bicycle Use and Mode Share. » *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 36: 45-52.
doi:10.1016/j.trd.2015.02.005.
- Gadsby, April et Kari Watkins. 2020. « Instrumented bikes and their use in studies on transportation behaviour, safety, and maintenance. » *Transport Reviews* 40 (6).
Routledge: 774-795. doi:10.1080/01441647.2020.1769227.
- Gandhi, Arun. 2018. « Object Detection Using Deep Learning on a Raspberry Pi. » *Hackster.io*.
<https://www.hackster.io/arun-gandhi/object-detection-using-deep-learning-on-a-raspberry-pi-32f94c>.
- Garrard, Jan, Chris Rissel et Adrian Bauman. 2012. « Health benefits of cycling. » In *City cycling*, MIT Press, 31-56. Cambridge.
- 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. Elsevier: 332-343.
- . 2020. « Modelling Cyclists' Multi-Exposure to Air and Noise Pollution with Low-Cost Sensors—The Case of Paris. » *Atmosphere* 11 (4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute: 422.
- . 2021. « Cyclists' exposure to atmospheric and noise pollution: a systematic literature review. » *Transport Reviews*. Taylor & Francis: 1-24.
- Grzebieta, R. H., A. M. McIntosh et S. Chong. 2011. « Pedestrian-cyclist collisions: Issues and risk. » In *Australasian College of Road Safety Conference, Melbourne, Australia*.
- Gustafsson, Louise et Jeffery Archer. 2013. « A Naturalistic Study of Commuter Cyclists in the Greater Stockholm Area. » *Accident Analysis & Prevention* 58: 286-298.
doi: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. doi:10.1016/j.aap.2017.02.017.
- Heinrich, Herbert William. 1941. « Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach. » *Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach*. (Second Edition). New York & London: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Hosford, Kate, Marie-Soleil Cloutier et Meghan Winters. 2020. « Observational Study of Pedestrian and Cyclist Interactions at Intersections in Vancouver, BC and Montréal, QC. » *Transportation Research Record* 2674 (6): 410-419.
doi:10.1177/0361198120919407.
- 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:10.1016/j.jtrangeo.2018.02.005.
- Høye, Alena. 2018. « Bicycle Helmets – To Wear or Not to Wear? A Meta-Analysis of the Effects of Bicycle Helmets on Injuries. » *Accident Analysis & Prevention* 117: 85-97.
doi:10.1016/j.aap.2018.03.026.

- Huertas-Leyva, P., M. Dozza et N. Baldanzini. 2018. « Investigating Cycling Kinematics and Braking Maneuvers in the Real World: E-Bikes Make Cyclists Move Faster, Brake Harder, and Experience New Conflicts. » *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 54: 211-222. doi:10.1016/j.trf.2018.02.008.
- Jahangiri, Arash, Mohammed Elhenawy, Hesham Rakha et Thomas A. Dingus. 2016. « Investigating Cyclist Violations at Signal-Controlled Intersections Using Naturalistic Cycling Data. » In *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2619-2624. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE. doi:10.1109/ITSC.2016.7795977. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7795977/>.
- Jeon, Woongsun et Rajesh Rajamani. 2018. « Rear Vehicle Tracking on a Bicycle Using Active Sensor Orientation Control. » *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 19 (8): 2638-2649. doi:10.1109/TITS.2017.2764006.
- Kováčsová, N., J. C. F. de Winter, A. L. Schwab, M. Christoph, D. A. M. Twisk et M. P. Hagenzieker. 2016. « Riding Performance on a Conventional Bicycle and a Pedelec in Low Speed Exercises: Objective and Subjective Evaluation of Middle-Aged and Older Persons. » *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 42: 28-43. doi:10.1016/j.trf.2016.06.018.
- LAEQ. 2021. « LAEQ. » *GitHub*. <https://github.com/LAEQ/OneMetrePlus>.
- Langford, Brian Casey, Jiaoli Chen et Christopher R. Cherry. 2015. « Risky Riding: Naturalistic Methods Comparing Safety Behavior from Conventional Bicycle Riders and Electric Bike Riders. » *Accident Analysis & Prevention* 82: 220-226. doi:10.1016/j.aap.2015.05.016.
- Lawrence, Brendan M., Jennifer A. Oxley, David B. Logan et Mark R. Stevenson. 2018. « Cyclist Exposure to the Risk of Car Door Collisions in Mixed Function Activity Centers: A Study in Melbourne, Australia. » *Traffic Injury Prevention* 19 (sup1): S164-S168. doi:10.1080/15389588.2017.1380306.
- Ledezma-Navarro, Bismarck, Luis Miranda-Moreno et Nicolas Saunier. 2021. « Cyclist Behaviour Towards Stop Signs. A Before-After Study on Stop-Controlled Intersections Using Video Trajectory and Surrogate Methods. » <https://trid.trb.org/view/1759836>.
- Li, Guanqing, Zhiyong Song et Qiang Fu. 2018. « A new method of image detection for small datasets under the framework of YOLO network. » In *2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 1031-1035. s.l.: IEEE.
- Li, Xiaohan, Fengpeng Yuan et Janne Lindqvist. 2016. « Feasibility of software-based duty cycling of GPS for trajectory-based services. » In *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, 18-26. doi:10.1109/CCNC.2016.7444725.
- Liu, Yisi, Bowen Lan, Jeff Shirai, Elena Austin, Changhong Yang et Edmund Seto. 2019. « Exposures to Air Pollution and Noise from Multi-Modal Commuting in a Chinese City. » *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 (14): 2539. doi:10.3390/ijerph16142539.
- Llorca, Carlos, Antonio Angel-Domenech, Fernando Agustin-Gomez et Alfredo Garcia. 2017. « Motor Vehicles Overtaking Cyclists on Two-Lane Rural Roads: Analysis on Speed and Lateral Clearance. » *Safety Science* 92: 302-310. doi:10.1016/j.ssci.2015.11.005.

- Lopez, Angel J., Paola Astegiano, Sidharta Gautama, Daniel Ochoa, Chris Tampère et Carolien Beckx. 2017. « Unveiling E-Bike Potential for Commuting Trips from GPS Traces. » *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6 (7): 190. doi:10.3390/ijgi6070190.
- Love, David C., Autumn Breaud, Sean Burns, Jared Margulies, Max Romano et Robert Lawrence. 2012. « Is the Three-Foot Bicycle Passing Law Working in Baltimore, Maryland? » *Accident Analysis & Prevention* 48. Intelligent Speed Adaptation + Construction Projects: 451-456. doi:10.1016/j.aap.2012.03.002.
- 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). BMJ Publishing Group Ltd: 131-135.
- Maigan, David, Philippe Apparicio et Jérémy Gelb. 2021. *Video Feature Counter Software*. Java. s.l.: LAEQ. <https://github.com/LAEQ/vifeco>.
- Mehta, Kushal, Babak Mehran et Bruce Hellinga. 2015. « Evaluation of the Passing Behavior of Motorized Vehicles When Overtaking Bicycles on Urban Arterial Roadways. » *Transportation Research Record* 2520 (1): 8-17. doi:10.3141/2520-02.
- Meuleners, Lynn B., Michelle Fraser, Marilyn Johnson, Mark Stevenson, Geoffrey Rose et Jennie Oxley. 2020. « Characteristics of the Road Infrastructure and Injurious Cyclist Crashes Resulting in a Hospitalisation. » *Accident Analysis & Prevention* 136: 105407. doi:10.1016/j.aap.2019.105407.
- 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. doi:10.1016/j.trd.2018.10.012.
- Mobasheri, Amin. 2020. *Open Source Geospatial Science for Urban Studies: The Value of Open Geospatial Data*. s.l.: Springer Nature.
- Mobasheri, Amin, Helena Mitsova, Markus Neteler, Alexander Singleton, Hugo Ledoux et Maria Antonia Brovelli. 2020. « Highlighting Recent Trends in Open Source Geospatial Science and Software. » *Transactions in GIS* 24 (5): 1141-1146. doi:10.1111/tgis.12703.
- Nabavi Niaki, Matin, Nicolas Saunier et Luis Miranda-Moreno. 2019. « Is that move safe? Case study of cyclist movements at intersections with cycling discontinuities. » *Accident Analysis & Prevention* 131: 239-247. doi:10.1016/j.aap.2019.07.006.
- O'Hern, Steve et Jennie Oxley. 2018. « Fatal cyclist crashes in Australia. » *Traffic Injury Prevention* 19 (sup2): S27-S31. doi:10.1080/15389588.2018.1497166.
- Okokon, Enembe O., Tarja Yli-Tuomi, Anu W. Turunen, Pekka Taimisto, Arto Pennanen, Ilias Vouitsis, Zissis Samaras, Marita Voogt, Menno Keuken et Timo Lanki. 2017. « Particulates and Noise Exposure during Bicycle, Bus and Car Commuting: A Study in Three European Cities. » *Environmental Research* 154: 181-189. doi:10.1016/j.envres.2016.12.012.
- Onshape. 2021. « Onshape | Product Development Platform. » <https://www.onshape.com/en/>.
- OpenCV. 2021. « OpenCV. » *OpenCV*. <https://opencv.org/>.
- 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:10.1016/j.aap.2009.07.018.

- 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:10.1016/j.trf.2016.06.010.
- Poppinga, Benjamin, Martin Pielot, Wilko Heuten et Susanne Boll. 2014. « Unobtrusive Observation of Cycling Tourists in the Wild. » *International Journal of Mobile Human Computer Interaction (IJMHCI)* 6 (4): 22-42. doi:10.4018/ijmhci.2014100102.
- Pucher, John et Lewis Dijkstra. 2003. « Promoting safe walking and cycling to improve public health: lessons from the Netherlands and Germany. » *American journal of public health* 93 (9). American Public Health Association: 1509-1516.
- Python. 2021. « Python. » *Python.Org*. <https://www.python.org/>.
- R Core Team. 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. (version R version 4.0.2). Vienna, Austria.: R Foundation for statistical computing: <https://www.r-project.org/>.
- Rahman, Ziaur, Stephen 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. doi:10.1016/j.aap.2019.03.014.
- Redmon, Joseph, Santosh Divvala, Ross Girshick et Ali Farhadi. 2016. « You only look once: Unified, real-time object detection. » In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 779-788.
- Reynolds, Conor CO, M Anne Harris, Kay Teschke, Peter A Crompton 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.
- Rubie, Elisabeth, Narelle Haworth, Divera Twisk et Naohide Yamamoto. 2020. « Influences on lateral passing distance when motor vehicles overtake bicycles: a systematic literature review. » *Transport Reviews* 40 (6): 754-773. doi:10.1080/01441647.2020.1768174.
- SAAQ. 2021a. « En vélo électrique. » SAAQ. <https://saaq.gouv.qc.ca/securite-routiere/moyens-deplacement/velo-electrique>.
- . 2021b. « Partage de la route. » SAAQ. <https://saaq.gouv.qc.ca/securite-routiere/moyens-deplacement/auto/partage-de-la-route/>.
- . 2021c. « Courtoisie et partage de la route entre usagers. » SAAQ. <https://saaq.gouv.qc.ca/securite-routiere/comportements/courtoisie-partage-route/entre-usagers-route/>.
- Schleinitz, Katja, Tibor Petzoldt, Luise Franke-Bartholdt, Josef 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:10.1016/j.trf.2015.04.002.
- . 2017. « The German Naturalistic Cycling Study – Comparing Cycling Speed of Riders of Different e-Bikes and Conventional Bicycles. » *Safety Science* 92: 290-297. doi:10.1016/j.ssci.2015.07.027.
- Scott bikes. 2021. « Quelle est la différence entre un e-bike, un Pédélec et un Speed Pédélec ? » *SCOTT Sports*. <https://help.scott-sports.com/hc/fr/articles/360000646925-Quelle-est-la-diff%C3%A9rence-entre-un-e-bike-un-P%C3%A9d%C3%A9lec-et-un-Speed-P%C3%A9d%C3%A9lec->.

- Shackel, Stella C. et John Parkin. 2014. « Influence of Road Markings, Lane Widths and Driver Behaviour on Proximity and Speed of Vehicles Overtaking Cyclists. » *Accident Analysis & Prevention* 73: 100-108. doi:10.1016/j.aap.2014.08.015.
- Sikic, Mirjana, Antonina A Mikocka-Walus, Belinda J Gabbe, Francis T McDermott et Peter A Cameron. 2009. « Bicycling Injuries and Mortality in Victoria, 2001–2006. » *Medical Journal of Australia* 190 (7): 353-356. doi:10.5694/j.1326-5377.2009.tb02446.x.
- Spannbauer, Adam. 2020. « Vidstab. » *Python.org*. <https://pypi.org/project/vidstab/>.
- SPVM. 2021a. « Sécurité des piétons : Le SPVM lance une vidéo sur les angles morts - Service de police de la Ville de Montréal. » <https://spvm.qc.ca/fr/PDQ38/Actualites/4902>.
- . 2021b. « Campagne de sécurité à vélo - Service de police de la Ville de Montréal. » <https://spvm.qc.ca/fr/PDQ27/Actualites/3478>.
- Stewart, Kathryn et Adrian McHale. 2014. « Cycle lanes: their effect on driver passing distances in urban areas. » *Transport* 29 (3). Taylor & Francis: 307-316.
- The Raspberry Pi Foundation. 2021. « Raspberry Pi Images. » *Raspberry Pi*. <https://www.raspberrypi.org/software/operating-systems/>.
- Twisk, Divera, Marjolein Boele, Willem Vlakveld, Michiel Christoph, Rommert Sikkema, R. Remij et Arend Schwab. 2013. « Preliminary results from a field experiment on e-bike safety: speed choice and mental workload for middle-aged and elderly cyclists. » In *Proceedings of the International Cycling Safety Conference 2013, ICSC2013*, 1-15. s.l.: Acquire Publishing BV.
- Vélo Québec. 2016. « L'état du vélo à Montréal en 2015. » http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/transports_fr/media/documents/etat_velo_2015.pdf.
- . 2020. « L'état du vélo au Québec en 2020. » Vélo Québec. <https://www.velo.qc.ca/wp-content/uploads/2021/06/vq-edv2020-fr.pdf>.
- Vélo Québec et Montréal. 2020. « L'état du vélo à Montréal en 2020. » <https://www.velo.qc.ca/wp-content/uploads/2021/06/vq-edv2020-montreal.pdf>.
- Ville de Montréal. 2020. « Collisions Routières - Jeu de Données. » <https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/collisions-routieres>.
- Vlakveld, Willem P., Divera Twisk, Michiel Christoph, Marjolein Boele, Rommert Sikkema, Roos Remy et Arend L. Schwab. 2015. « Speed Choice and Mental Workload of Elderly Cyclists on E-Bikes in Simple and Complex Traffic Situations: A Field Experiment. » *Accident Analysis & Prevention* 74: 97-106. doi:10.1016/j.aap.2014.10.018.
- Walker, Ian. 2007. « Drivers Overtaking Bicyclists: Objective Data on the Effects of Riding Position, Helmet Use, Vehicle Type and Apparent Gender. » *Accident Analysis & Prevention* 39 (2): 417-425. doi:10.1016/j.aap.2006.08.010.
- Walker, Ian, Ian Garrard et Felicity Jowitt. 2014. « The Influence of a Bicycle Commuter's Appearance on Drivers' Overtaking Proximities: An on-Road Test of Bicyclist Stereotypes, High-Visibility Clothing and Safety Aids in the United Kingdom. » *Accident Analysis & Prevention* 64: 69-77. doi:10.1016/j.aap.2013.11.007.
- 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:10.1016/j.trf.2015.10.004.

- Włodarek, Paweł et Piotr Olszewski. 2020. « Traffic safety on cycle track crossings – traffic conflict technique. » *Journal of Transportation Safety & Security* 12 (1). Taylor & Francis: 194-209. 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). Wiley Online Library: 3-36.

ANNEXE 1 : GUIDE DE COMPTAGE

**IN
RS**

Institut national
de la recherche
scientifique

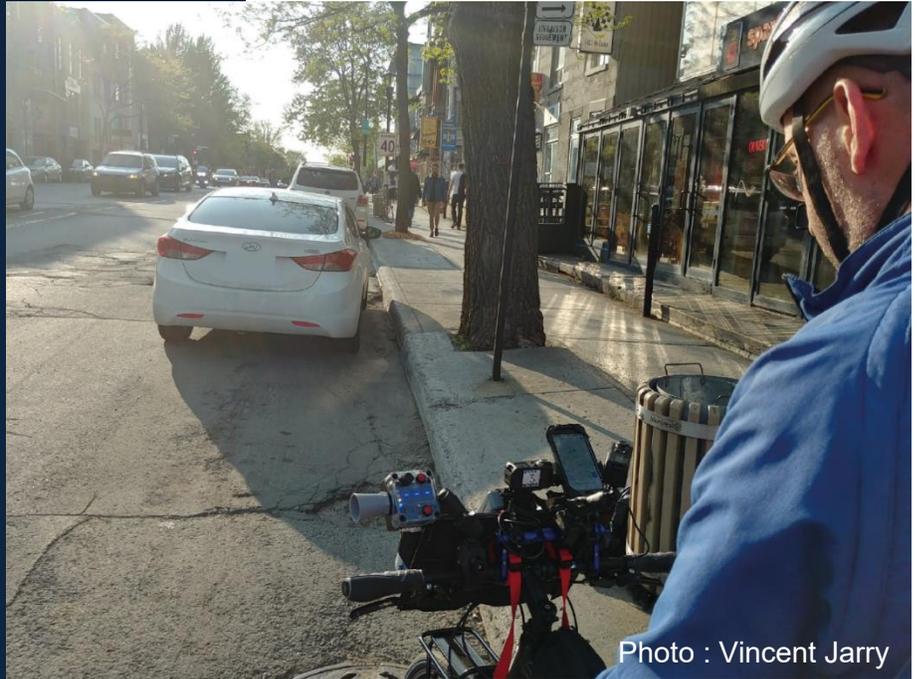


Photo : Vincent Jarry

Guide de comptage projet de recherche

Objectif : Déterminer les caractéristiques des dépassements des cyclistes à Montréal.

Andrés Henao Florez,

Étudiant à la maîtrise en études urbaines (INRS)

Membre du Laboratoire d'équité
environnementale (LAEQ)

carlosa.henaof@inrs.ca

Philippe Apparicio,

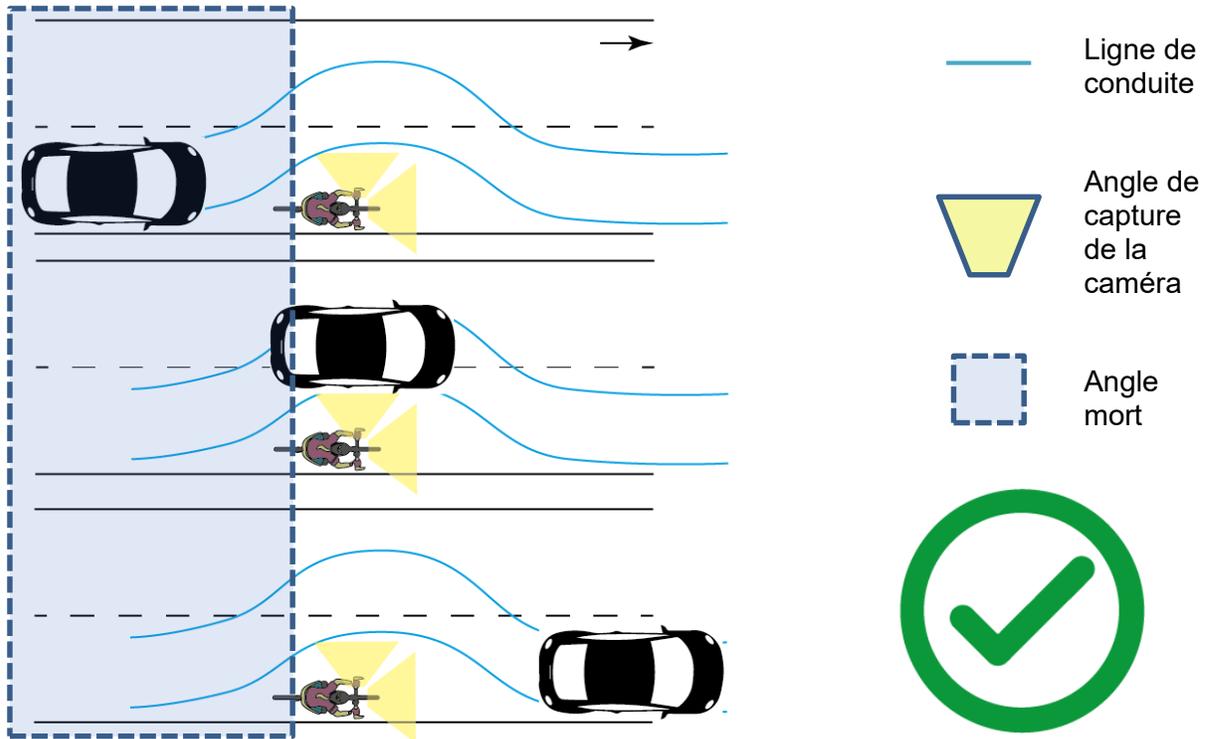
Professeur titulaire à l'INRS
Directeur du Laboratoire d'équité
environnementale (LAEQ)

philippe.apparicio@inrs.ca

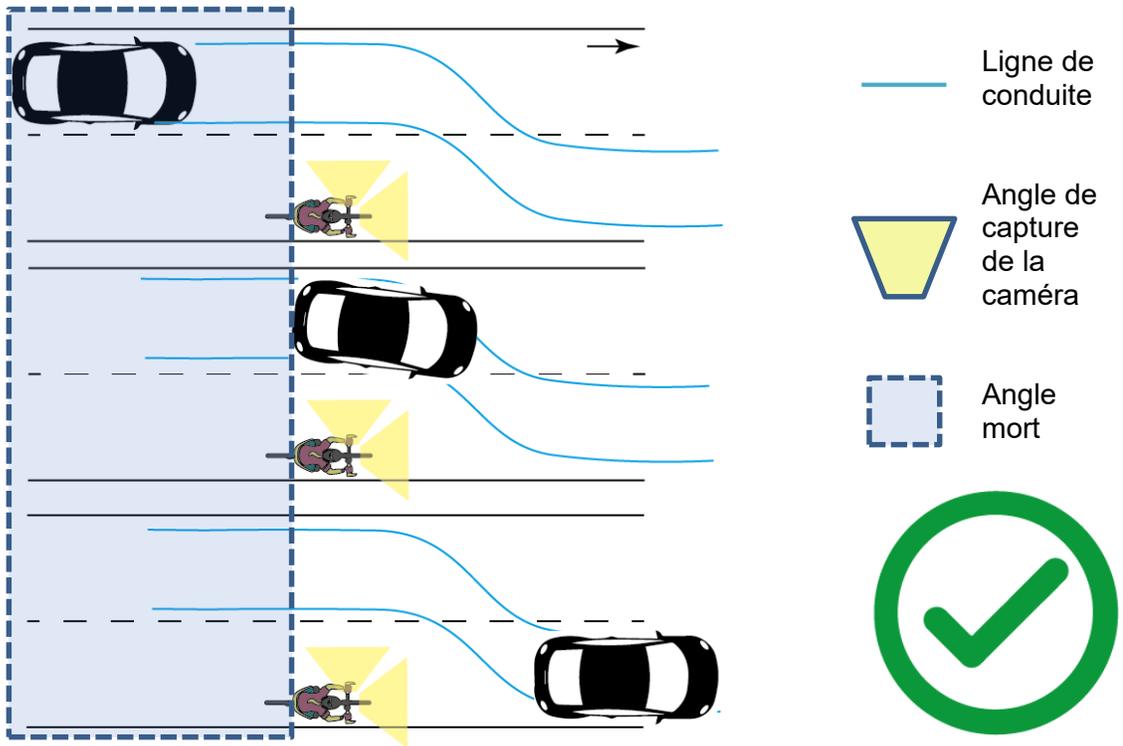
1. Type de dépassement

Dans cette section, sont décrits les types de dépassements admissibles dans le cadre de la recherche.

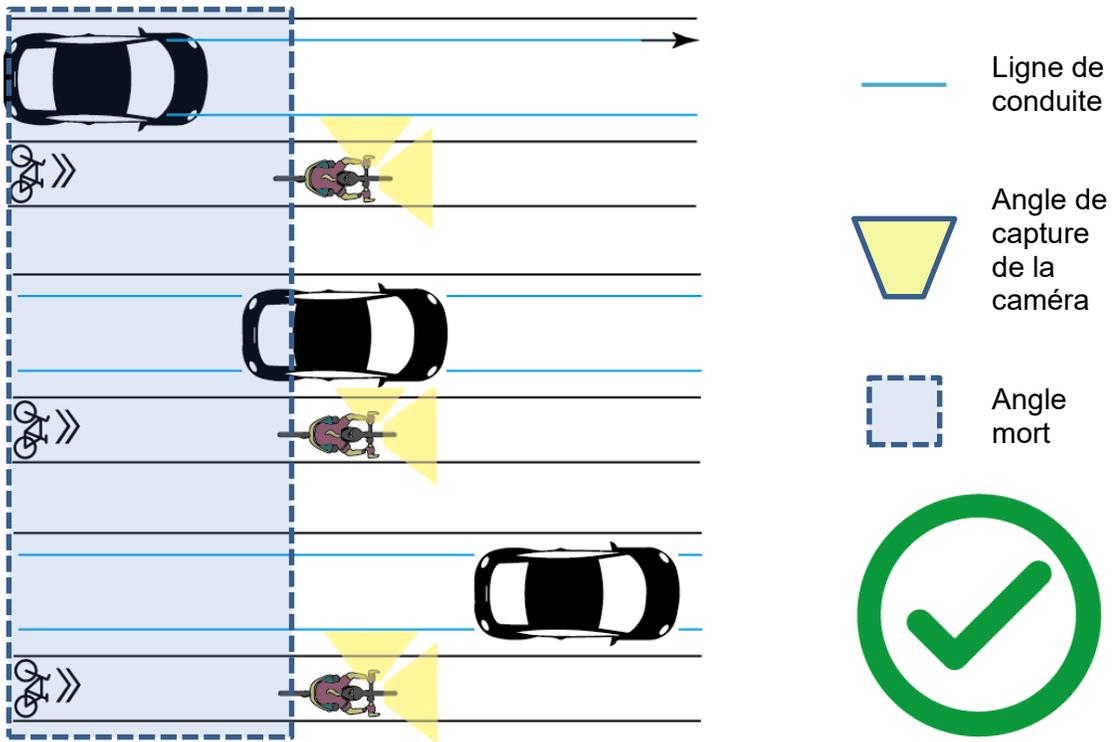
1.1. Passer à côté et retourner sur la ligne de conduite du·de la cycliste (**type 1**)



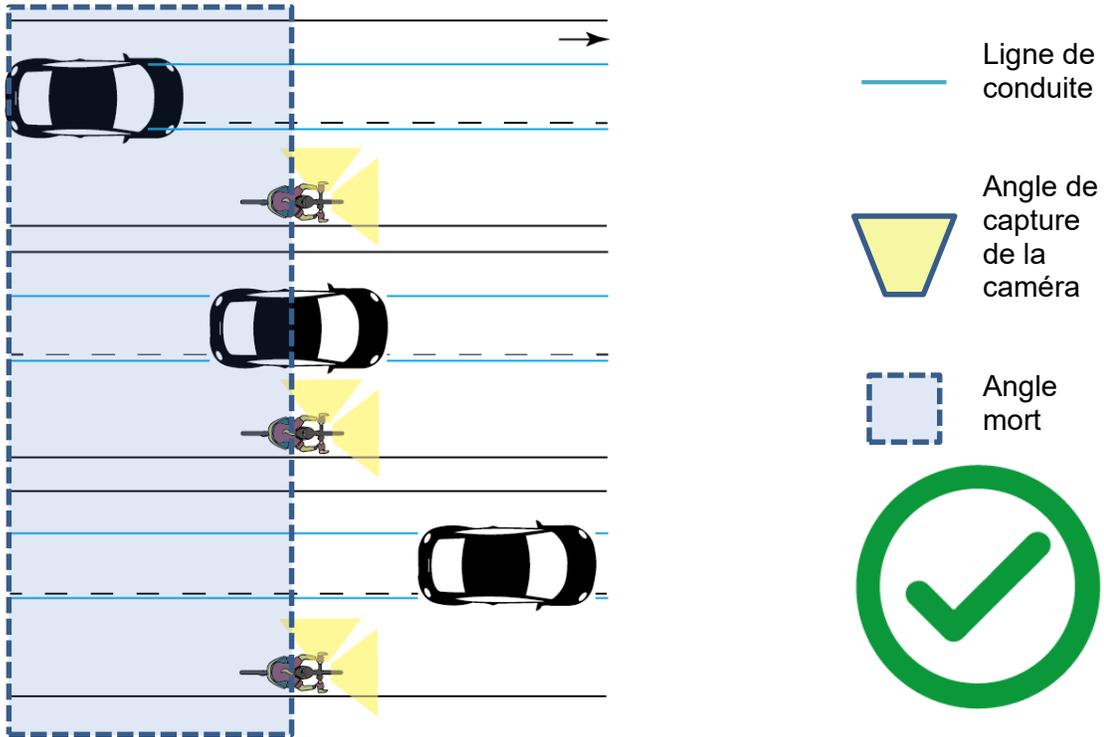
1.2. Passer à côté et retourner sur la ligne de conduite du-de la cycliste (type 2)



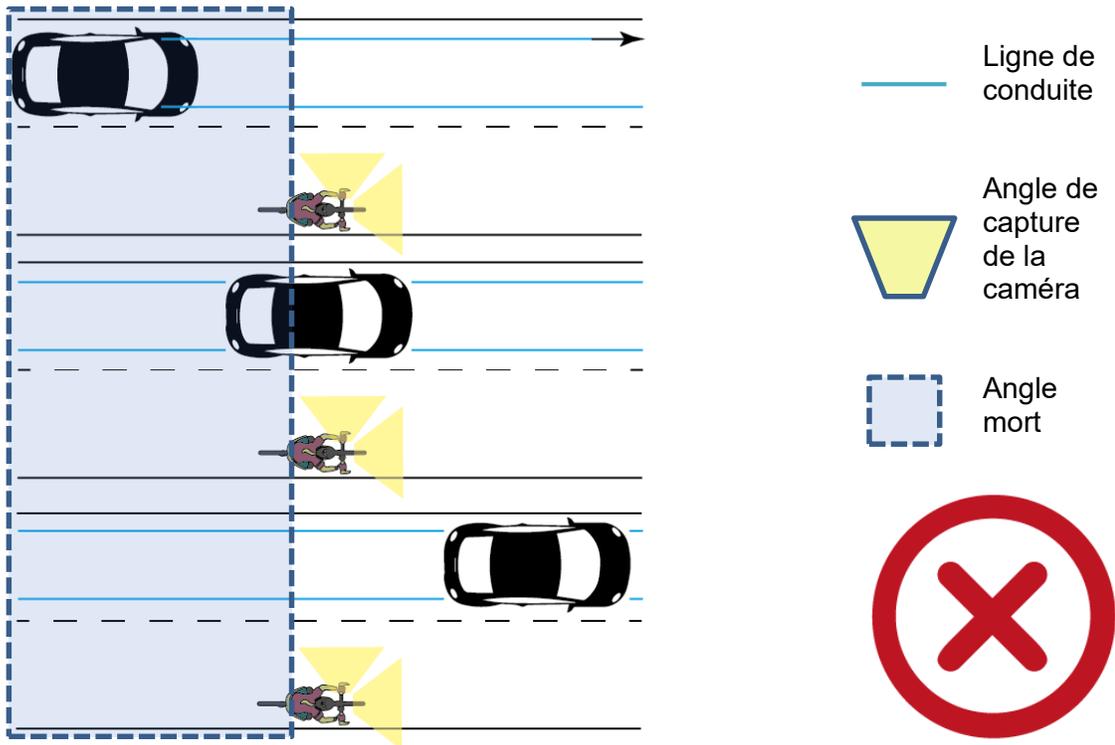
1.3. Passer à côté d'une piste cyclable sans protection (type 3)



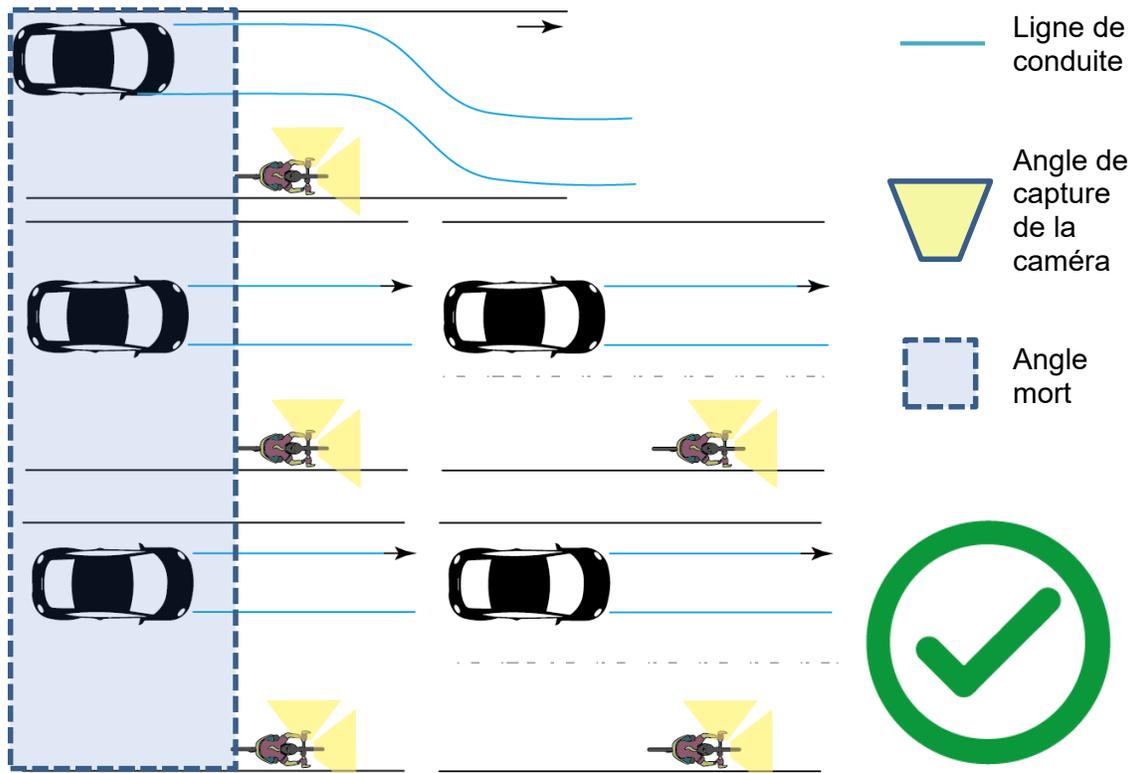
1.4. Dépasser un cycliste en empiétant sur sa voie de circulation. La ligne de démarcation doit être visible (type 4)



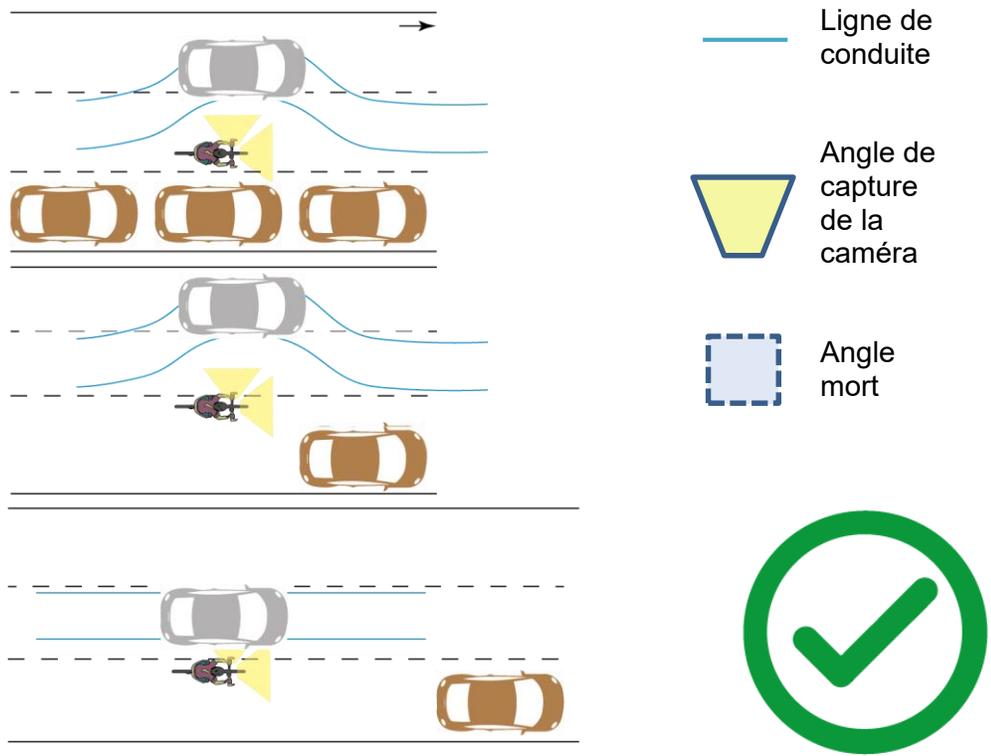
1.5. Passer à côté d'un-e cycliste en deuxième voie n'est pas considéré un dépassement. La ligne de démarcation doit être visible.



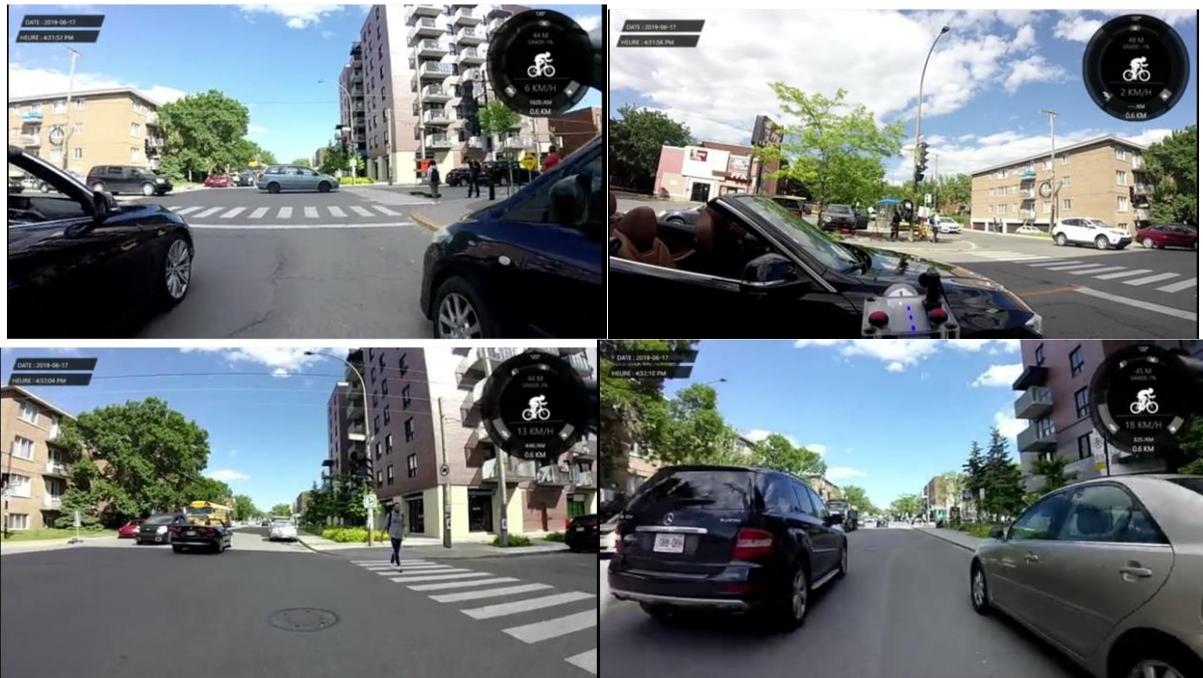
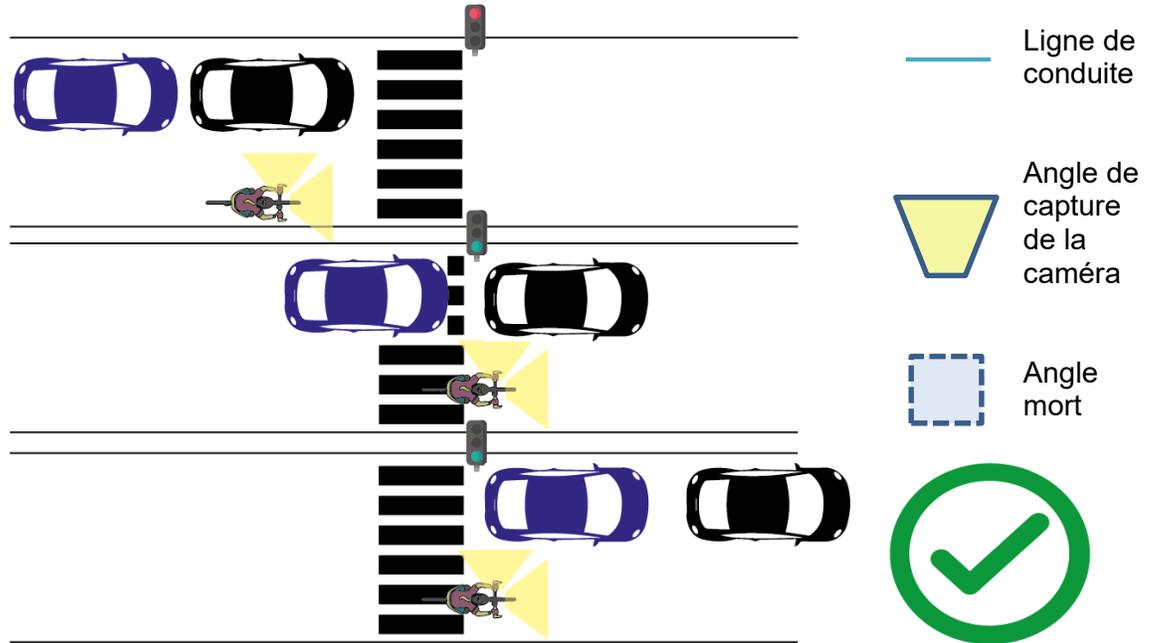
1.6. Route sans démarcation ou avec une démarcation floue. En l'absence de ligne de démarcation, tout passage est considéré comme un dépassement (**type 5**).



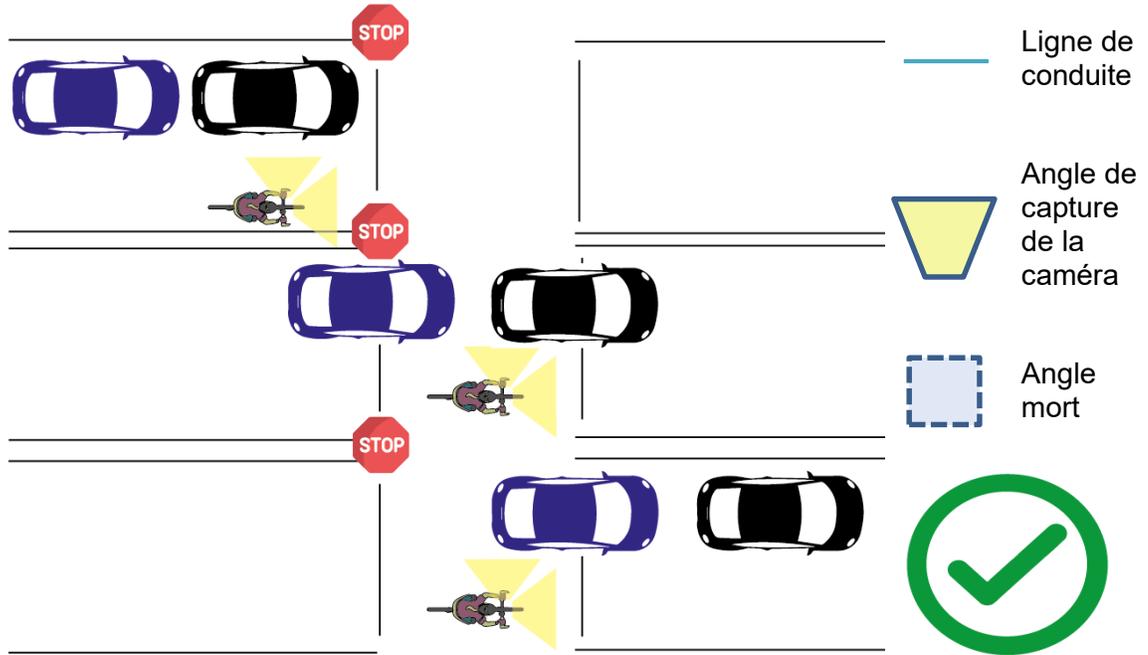
1.7. Véhicules garés dans la route et approche d'un·e cycliste par la deuxième voie : l'exemple de la figure doit être considéré comme un dépassement (**type 6**).



1.8. Dépassement pendant un feu rouge : le passage de la voiture à l'arrêt (dans la figure le véhicule noir) qui commence le déplacement au côté du cycliste n'est pas considéré comme un dépassement, tandis que le passage de la deuxième voiture (bleue) est considéré un dépassement, à condition qu'elle soit en dehors de l'angle de vision de la camera latérale.

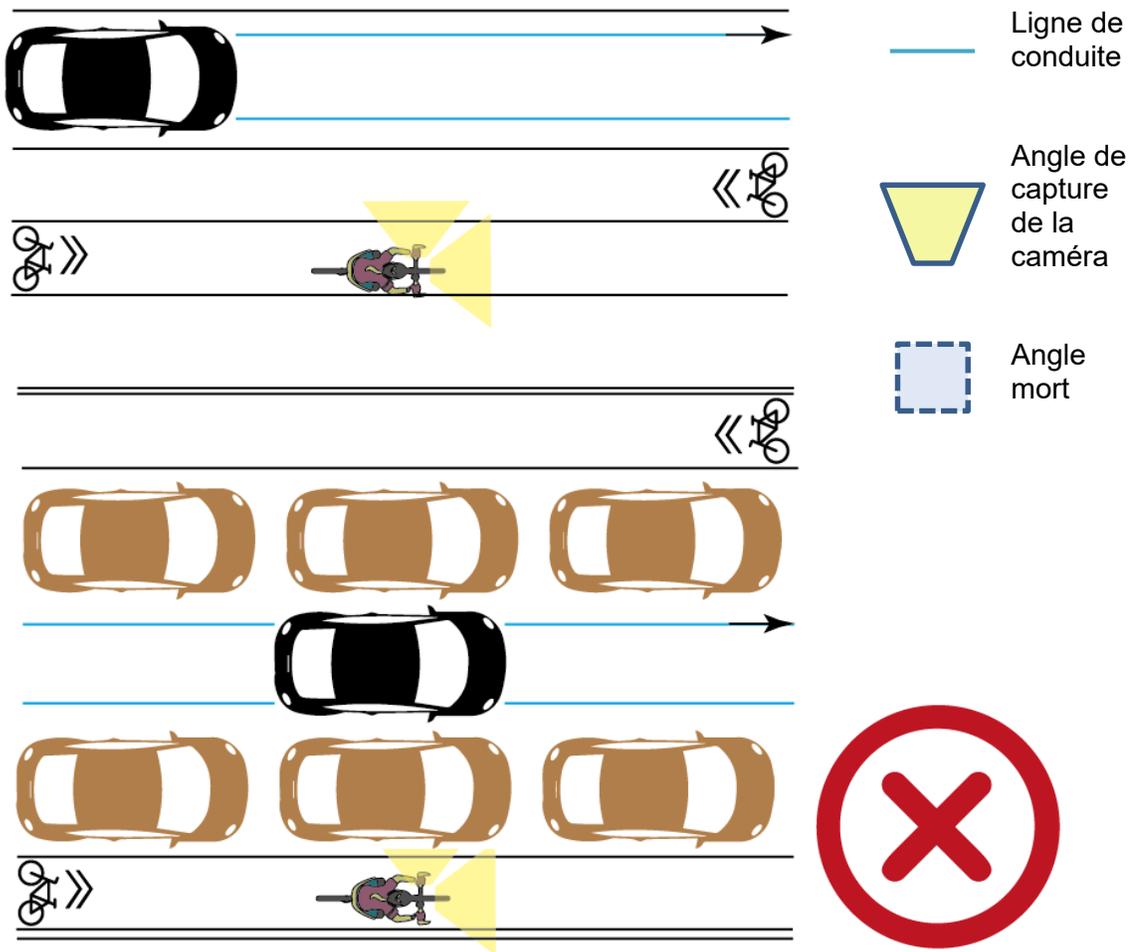


1.9. Dépassement pendant un intersection : si le-la cycliste est complètement arrêté à une intersection contrôlée par un arrêt, la règle des feux de circulation s'applique. Une voiture à l'arrêt (dans la figure, le véhicule noir), qui commence ensuite à se déplacer à côté du cycliste, n'est pas considérée comme un dépassement, tandis que le passage de la deuxième voiture (bleue) est considéré un dépassement, à condition qu'elle soit initialement en dehors de l'angle de vision de la caméra latérale.



1.1. D'autres considérations

Si le·la cycliste fait son trajet dans une piste cyclable double, le passage de la voiture n'est pas considéré un dépassement. Également, si le·la cycliste est couvert·e par des véhicules stationnés, le passage du véhicule n'est pas considéré un dépassement.



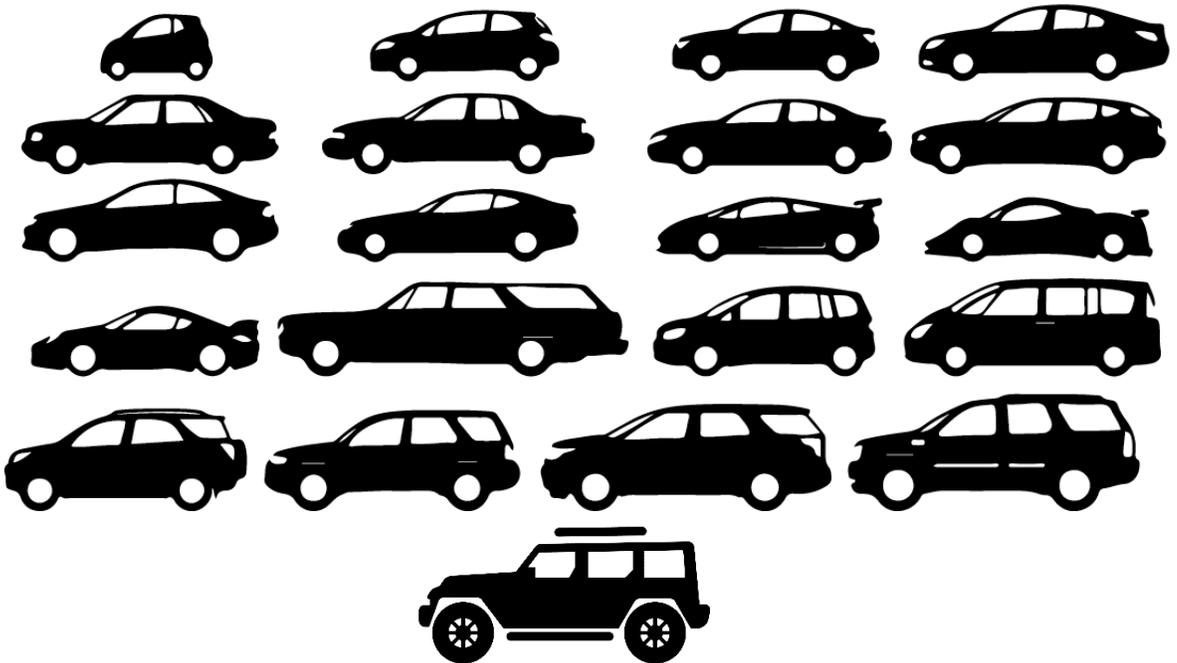
2. Type de Véhicule :

Cette section correspond à la définition de cinq types de véhicules différents :

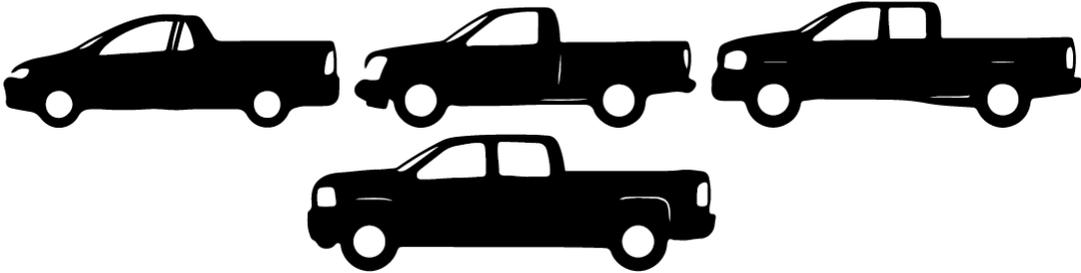
1. Voiture normale
2. Camionnette
3. Camion
4. Bus
5. Autres

2.1. Voiture normale

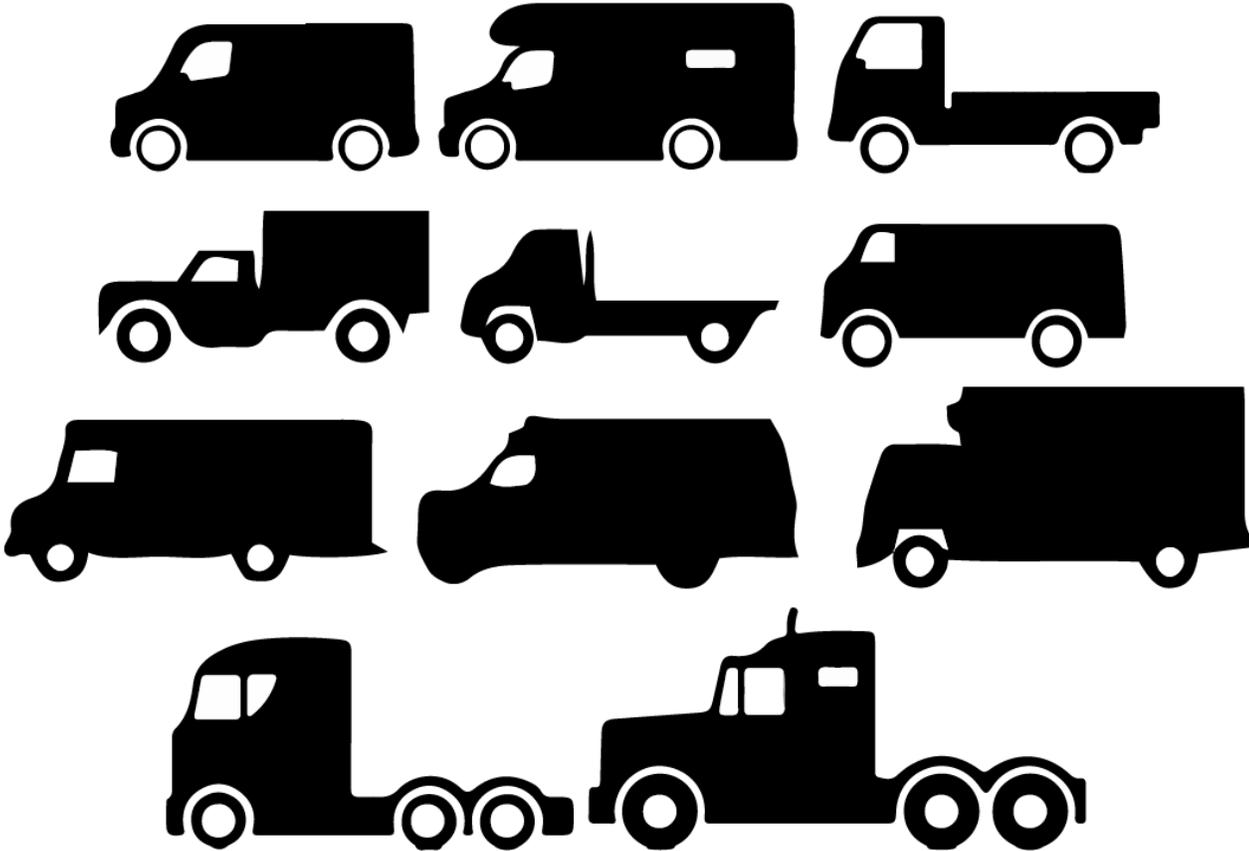
Pour faciliter le codage et le système de classification, utilisez les silhouettes de référence pour identifier le type de voiture.



2.2. Camionnette (pick-up)



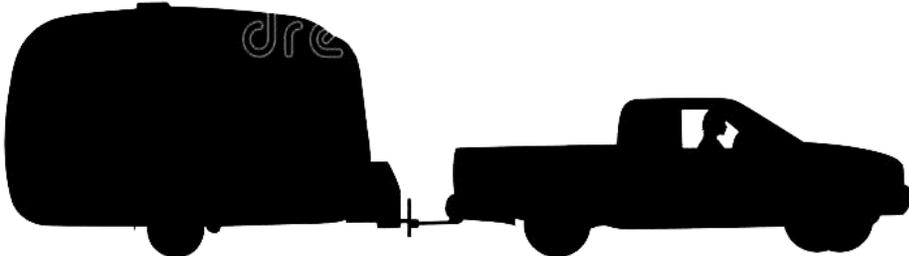
2.3. Camion



2.4. Bus



2.5. Autre

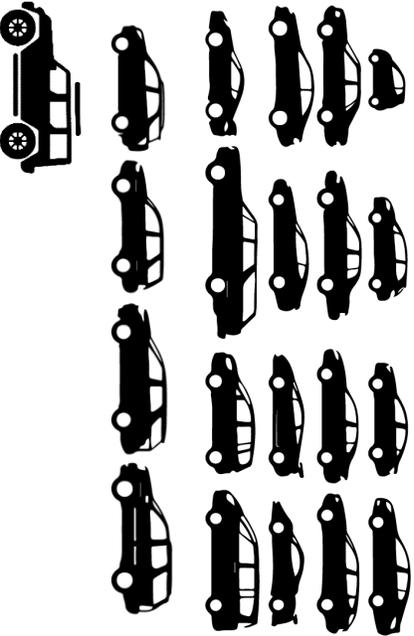


Résumé guide de comptage – Andrés Henao et Philippe Apparicio

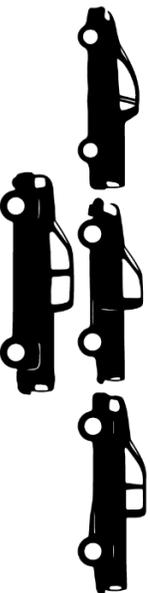
1. Identifier s'il existe un dépassement selon les critères définis

2. Identifier le type de véhicule qui dépasse le cycliste

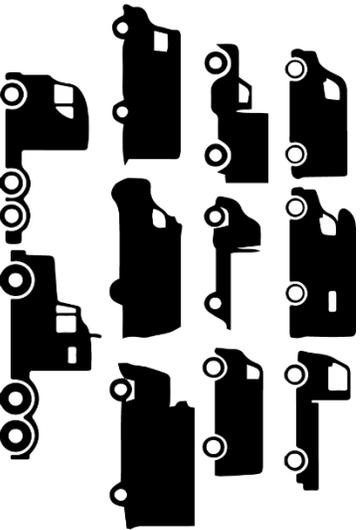
Voiture normale



Camionnette



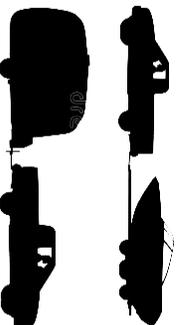
Camion



Bus



Autres



ANNEXE 2 : DETAILED LIST OF PRODUCTS - 1M+

Item	Quantity	Name	Manufacturer
1	1	Bottom case	3d printed
2	1	Top cover	3d printed
3	1	Distance sensor support	3d printed
4	1	Camera support	3d printed
5	1	Touch screen support	3d printed
6	1	Acrylic cover	3d printed
7	1	Raspberry pi support	3d printed
8	1	Charger support	3d printed
9	Standard products		
9.1	1	RAM@ ball support diamond	RAM@ B 238U (Seattle, Washington, USA)
9.2	1	RAM@ double socket arm	RAM@ B 400U (Seattle, Washington, USA)
9.3	1	RAM@ tough claw	RAM@ B 201U (Seattle, Washington, USA)
9.4	1	HW-775 Charger	Makerfocus (China)
9.5	1	SD Card 64 Gb	Samsung (Seoul, South Korea)
9.6	1	Bull eye level 32 mm	Taskar
9.7	1	Lithium Battery ICR 18650 x 3	Pkcell (Shenzhen, Hong Kong, China)
9.8	1	Lithium battery x ICR 18650 x 1	Pkcell (Shenzhen, Hong Kong, China)
9.9	2	Waterproof micro usb port	Cerrxian (China)
9.10	3	USB to ttl connectors cp2102	Izokee (China)
9.11	1	Waterproof switch Round Rocker Switch Blue	Twidec (Suzhou, China)
9.12	1	Raspberry pi zero w	Raspberry Pi Foundation (Cambridge, UK)
9.13	1	USB HUB Zero - BH10128PSU	Makerspot
9.14	1	Touch screen nextion NX3224T024	Nextion (Shenzhen, Hong Kong, China)
9.15	1	Raspberry Pi Camera (G) 160°	Waveshare (Shenzhen, Hong Kong, China)
9.16	1	Tfmini plus micro lidar	Benewake (Beijing, China)
9.17	1	Clock DS3231 RTC	Daoki (China)
9.18	1	GPS Beitian BN 220	Beitian (Shenzhen, Hong Kong, China)
9.19	4	Hex socket head cap screw M5x0.8x20 mm	Local Supplier

Detailed list of products

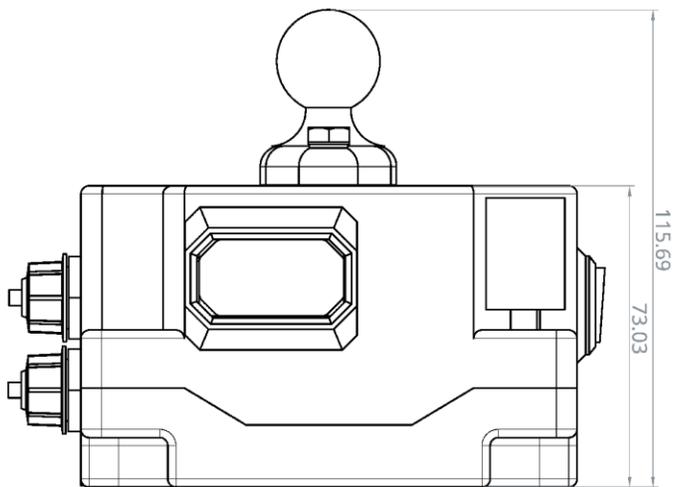
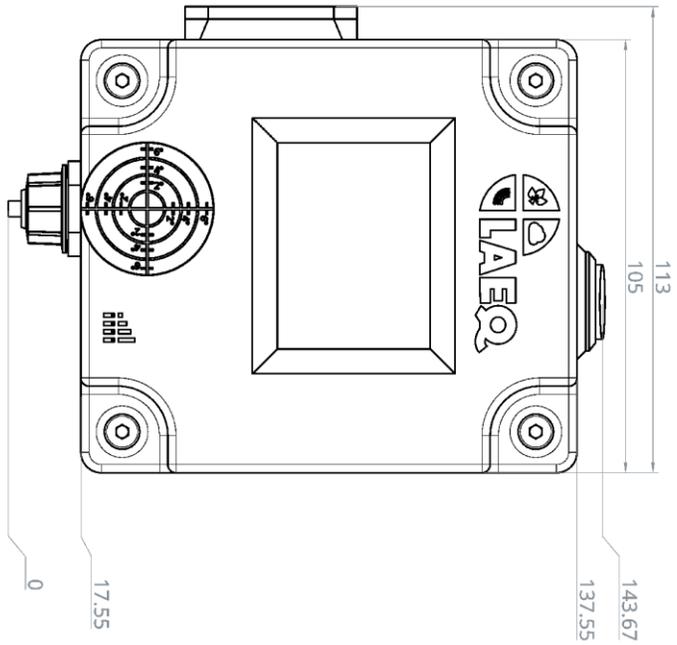
Item	Quantity	Name	Manufacturer
9.20	4	Hex locking nut M5x0.8	Local Supplier
9.21	4	Hex socket head cap screw M5x0.8x20 mm	Local Supplier
9.22	2	Hex socket head cap screw M6x1.0x20 mm	Local Supplier
9.23	2	Hex locking nut M6x1.0	Local Supplier
9.24	9	Hex socket head cap screw M3x0.5x 7 mm	Local Supplier
9.25	10	Hex socket head cap screw M2x0.4x7 mm	Local Supplier
9.26	10	Knurled Nut insert M2	Local Supplier
9.27	9	Knurled Nut insert M3	Local Supplier
9.28	4	Hex plastic standoff for raspberry pi M2.4x10mm+6mm	Makerspot
9.29	2	Micro USB Type B Male Connector	Uxcell
9.30	1	Standard USB Type A Male Connector	Biuzi
10	Other		
10.1	NA	Solder	
10.2	NA	24-28 AWG wires	
10.3	NA	Heat Shrink Tubing Cable	
10.4	1	Accessories Hub Micro USB OTG 4 ports	MakerSpot

NA : Not applicable

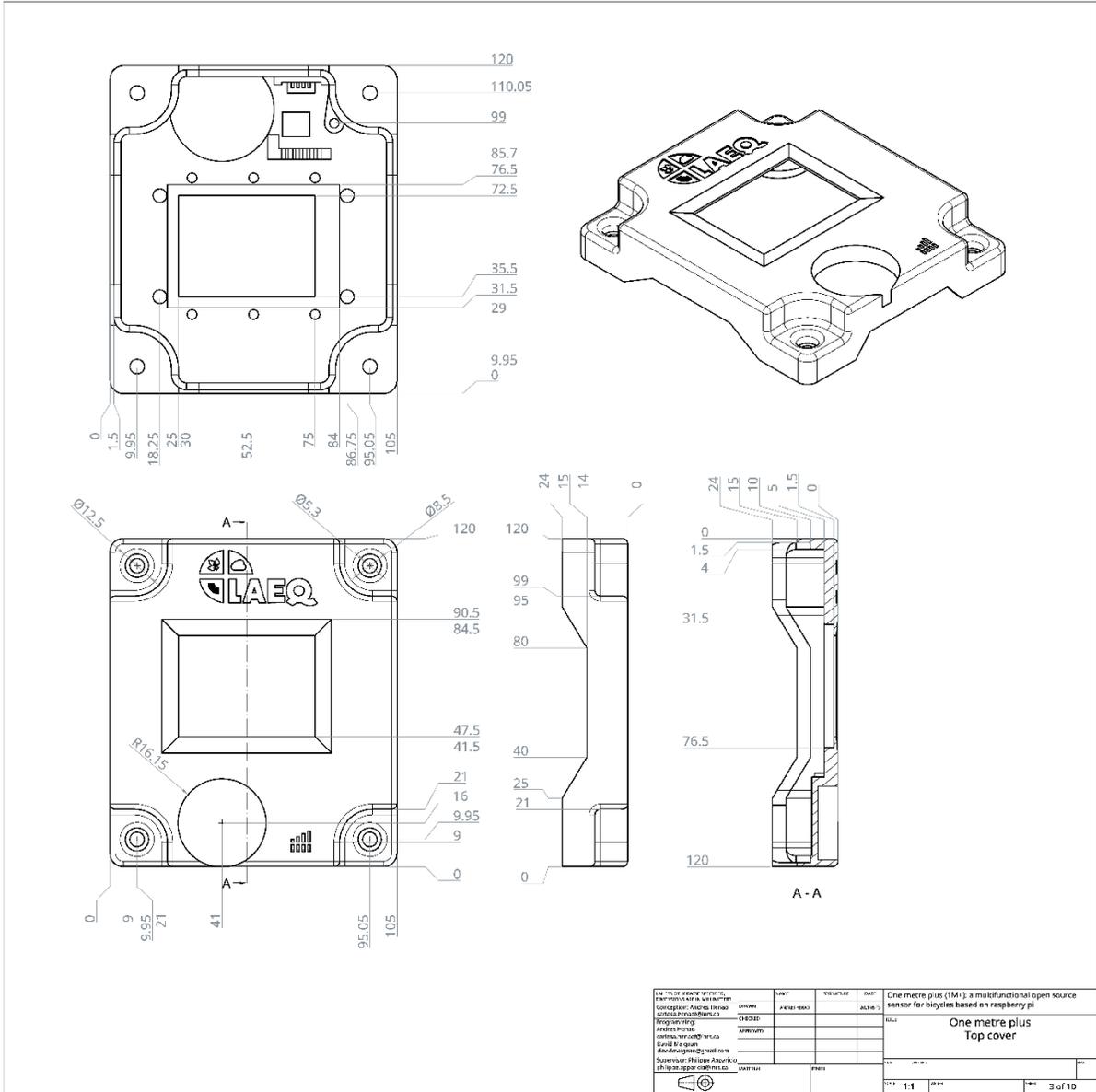
ANNEXE 3 : PLANS – 1M+

Item	Quantity	Name
1	1	Bottom case
2	1	Top cover
3	1	Distance sensor support
4	1	Camera support
5	1	Touch screen support
6	1	Acrylic cover
7	1	Raspberry pi support
8	1	Charger support
9	1	Standard products
9.1	1	RAM® ball support diamond
9.2	1	HW-775 Charger
9.3	1	Bull eye level
9.4	1	Lithium Battery x 3
9.5	1	Lithium battery x 1
9.6	1	Waterproof micro usb port
9.7	1	USB to ttl connectors
9.8	1	Waterproof switch
9.9	1	Raspberry pi zero w
9.10	1	USB HUB Zero
9.11	1	Nuts and screws
9.11.1	4	Hex thin nut grade A & B M5x0.8
9.11.2	2	Hex nut style 2 grade A & B M6x1.0
9.11.3	2	Hex head screw grade A & B M6x1.00 x 20
9.11.4	4	Hex socket head cap screw M5x0.80 x 20
9.11.5	9	Hex socket head cap screw M3x0.50 x 8
9.11.6	10	Hex socket head cap screw M2x0.40 x 8
9.12	1	Touch screen nextion
9.13	1	Raspberry Pi Camera (G) 160°
9.14	1	Tfmini plus micro lidar
9.15	1	Clock DS3231 RTC
9.16	1	GPS Beitian BN 220
9.17	1	Knurled nut insert M2
9.17.1	10	Knurled Nut Insert M2
9.18	1	Knurled nut insert M3
9.18.1	9	Knurled Nut Insert M3
9.19	1	Hex Standoff M2.5 x 10 mm
9.19.1	4	Hex standoff M2.5 x 10 + 6mm

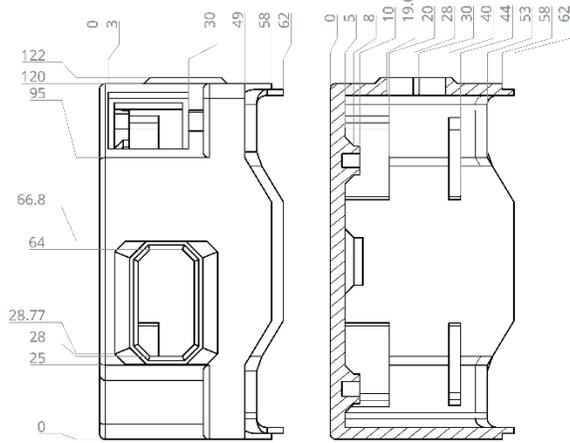
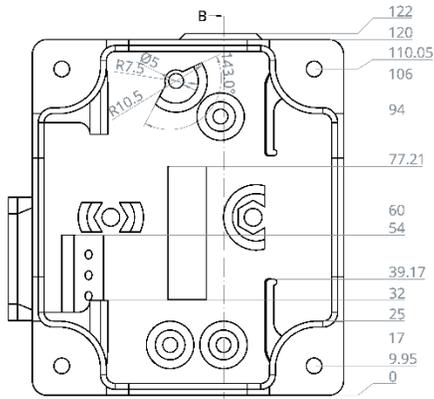
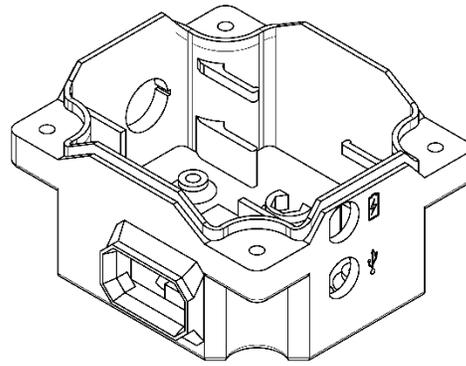
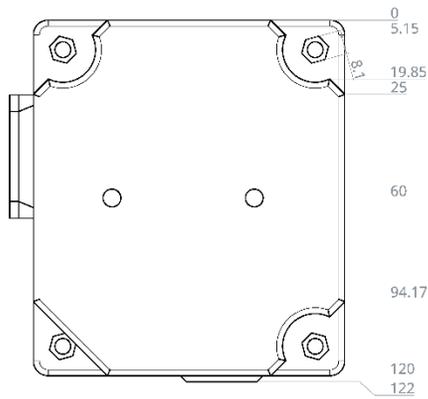
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		NAME	SIGNATURE	DATE	One metre plus (1M+); a multifunctional open source sensor for bicycles based on raspberry pi
CONCEPTION:	ANDRES HENAO	ANDRES HENAO		2021-09-13	
PROGRAMMING:	ANDRES HENAO				TITLE
	ANDRES HENAO				One metre plus
	DAVID MAIGNAN				Bill of materials
	DAVID MAIGNAN				
	PHILIPPE APPARICIO				
	PHILIPPE APPARICIO				
MATERIAL	FINISH	SIZE	DWG NO.	REV.	
		SCALE	1:2	WEIGHT	SHEET 1 of 10



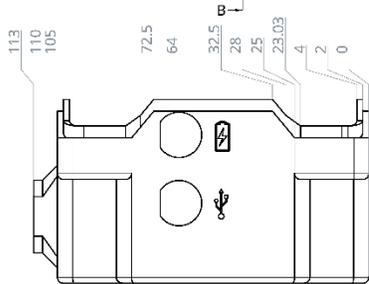
INTELLECTUALLY PROTECTED DOCUMENT INFORMACION PROTEGIDA POR DERECHOS DE AUTOR		NAME JAMES WALKO	SKETCH/USE 2021-08-13	DATE 2021-08-13
Concealed: Andres Hueso Programming: Andres Hueso Address: +34900 240000000 Email: andres@laeq.com Supervisor: Philippe Aspinet philippe.aspinet@laeq.com		CHECKED APPROVED	2021-08-13	2021-08-13
TITLE One metre plus Assembly		DRAWING NO. A3	SCALE 1:1	SHEET 2 of 10



One metre plus (1M+): a multifunctional open source sensor for bicycles based on raspberry pi Conceptor: Andrés Ibarra Conceptor: Felipe Becerra Programing: Andrés Ibarra Design: Felipe Becerra Supervisor: Felipe Becerra phillip@openhardware.com	UNIT: mm DATE: 2015-07-01 REV: 1.1	One metre plus (1M+): a multifunctional open source sensor for bicycles based on raspberry pi One metre plus Top cover	1-1 3 of 10
---	--	--	----------------



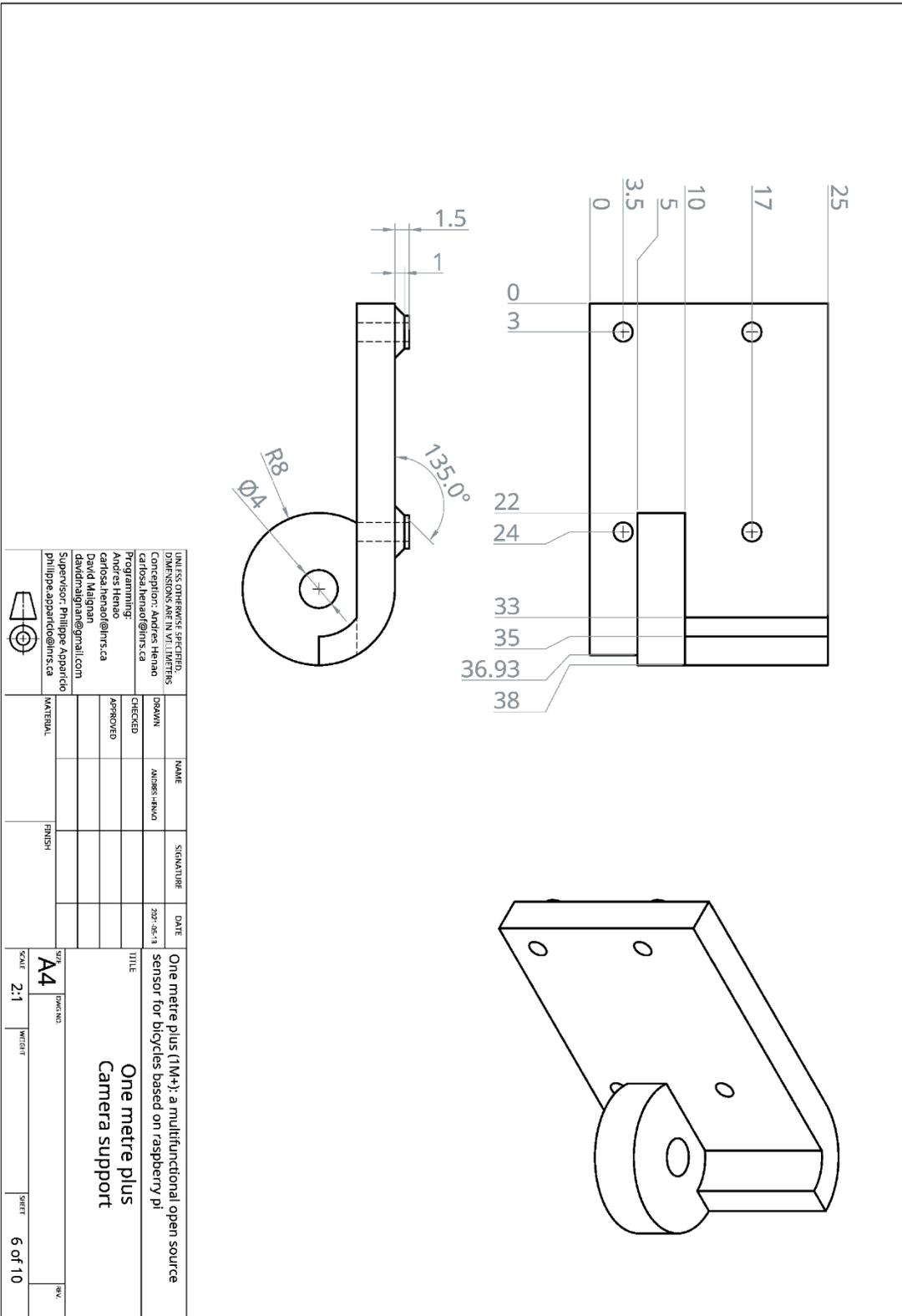
B - B



NAME OF SERVICE PROVIDER	NAME	SOFTWARE	GPL	One metre plus (1M+): a multi-functional open source sensor for bicycles based on raspberry pi
2015-2016: IIR (ISSUE 1.0)	IRVING	4.0.12.0.0	no	
Concepts: Android Motion	IRVING			
Core: Java/Android	IRVING			
Programming	IRVING			
Hardware	IRVING			
License: MIT License	IRVING			
Support: GitHub	IRVING			
GitHub: https://github.com/1mplus	IRVING			
Support: https://github.com/1mplus	IRVING			
GitHub: https://github.com/1mplus	IRVING			

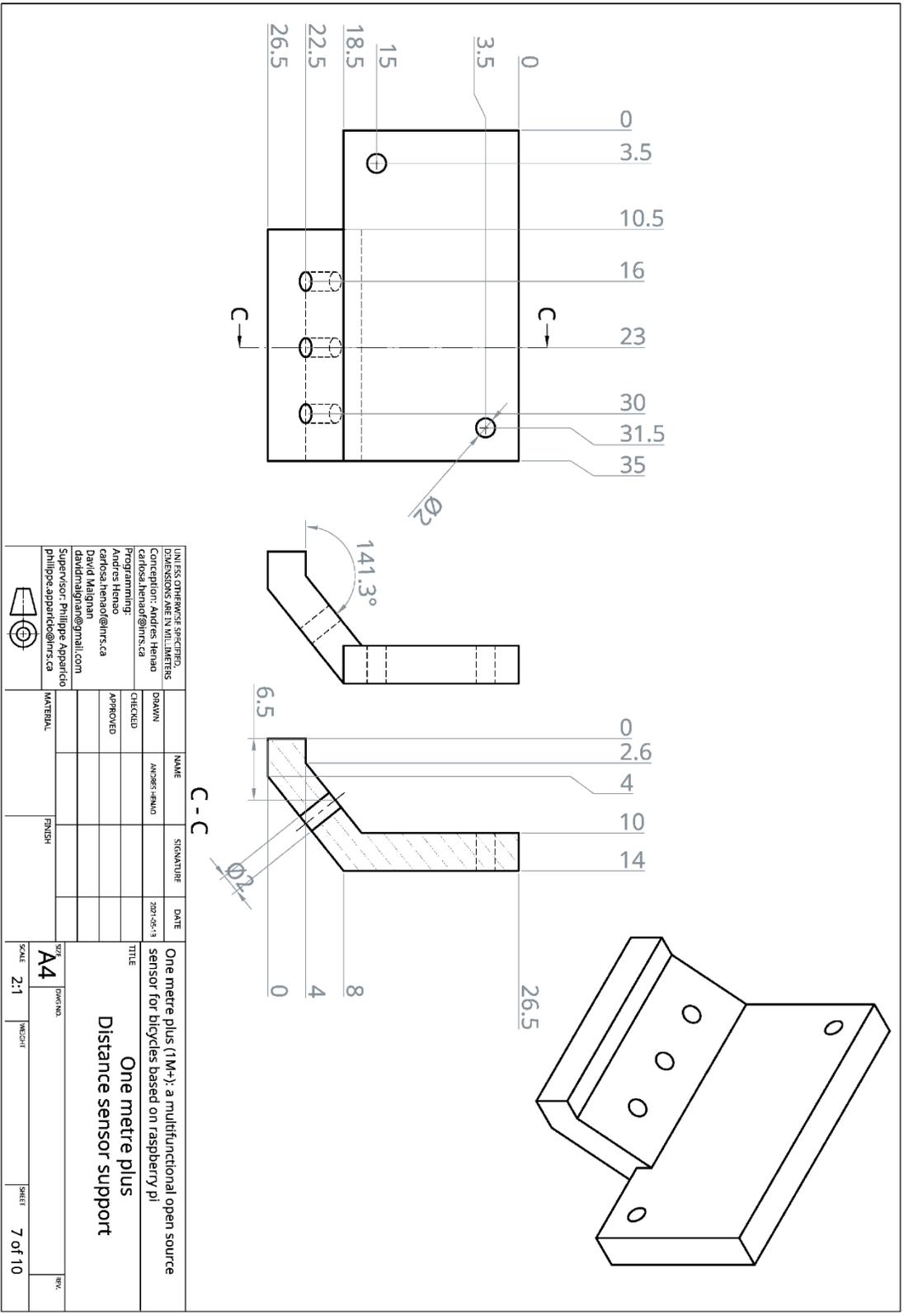
One metre plus
Bottom Case

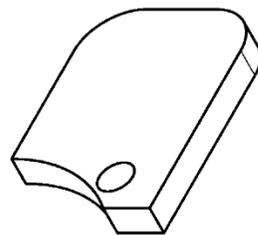
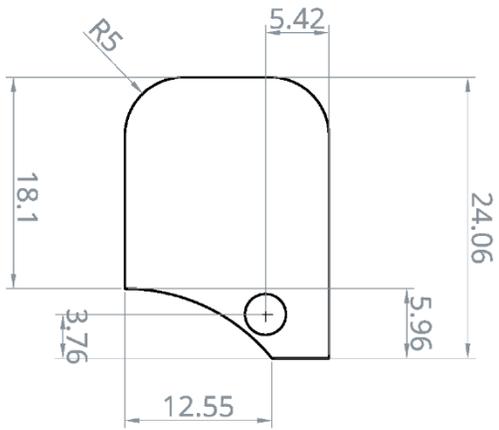
1:1 4 of 10



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		NAME	SIGNATURE	DATE	One metre plus (1M+): a multifunctional open source sensor for bicycles based on raspberry pi
CONCEPTION: Adrien Hehan	DESIGN	Adrien Hehan		2017-05-13	
PROJETS: Carlos Hernandez	CHECKED				TITLE One metre plus Camera support
APPROVED: Carlos Hernandez	APPROVED				
Supervisor: Philippe Aparicio	MATERIAL		FINISH		
Philippe Aparicio					

SCALE: 2:1
SHEET: 6 of 10





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE	SCALE	WEIGHT	SHEET	REV.
Drawn by: carlosa.henao@inrs.ca	ANDRES HENAO		2021-05-31	One metre plus (1M+): a multifunctional open source sensor for bicycles based on raspberry pi	A4		10 of 10	
Checked by: Andres Henao	CHECKED			One metre plus Acrylic cover	2:1			
Approved by: carlosa.henao@inrs.ca	APPROVED							
Programming: Andres Henao								
David Maignan								
davidmaignan@gmail.com								
Supervisor: Philippe Aparicio								
philippe.aparicio@inrs.ca								
MATERIAL:								
FINISH:								

ANNEXE 4 : CONNECTION DIAGRAM – 1M+

