PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Mesure de la cohabitation cycliste-piéton dans les rues piétonnes par analyse vidéo
Auteur: Author:	Fatima-Zahra Dahak
Date:	2023
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Dahak, F.-Z. (2023). Mesure de la cohabitation cycliste-piéton dans les rues piétonnes par analyse vidéo [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/57131/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/57131/
Directeurs de recherche: Advisors:	Nicolas Saunier
Programme: Program:	Génie civil

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Mesure de la cohabitation cycliste-piéton dans les rues piétonnes par analyse vidéo

FATIMA-ZAHRA DAHAK
Département de génie civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie civil

Décembre 2023

© Fatima-Zahra Dahak, 2023.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Mesure de la cohabitation cycliste-piéton dans les rues piétonnes par analyse vidéo

présenté par **Fatima-Zahra DAHAK**
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Martin TRÉPANIER, président
Nicolas SAUNIER, membre et directeur de recherche
Owen WAYGOOD, membre

DÉDICACE

À mes parents et ma famille

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Mon immense reconnaissance va à mon directeur de recherche Nicolas Saunier, qui a partagé son expertise, ses conseils éclairés et son temps précieux tout au long de ce projet. Sa guidance a été inestimable et a grandement enrichi mon expérience académique.

Un merci particulier à ma famille et à mes amis qui ont apporté leur soutien constant et leurs encouragements. Leur présence a été une source d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours académique. Enfin, je suis reconnaissante envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce projet.

RÉSUMÉ

Le transport actif se présente comme une solution face à plusieurs enjeux environnementaux émergents. En privilégiant des alternatives plus durables aux véhicules motorisés, le transport actif contribue à réduire leur utilisation, favorisant ainsi la création d'espaces plus durables. Dans ce contexte, notre étude se focalise sur un projet pilote de cohabitation entre cyclistes et piétons dans trois rues piétonnes de la ville de Montréal.

Par le biais d'une analyse vidéo, notre objectif est d'étudier les interactions entre les cyclistes et les piétons au sein des zones piétonnières. Dans une première étape, nous avons examiné les vitesses et les accélérations de chaque cycliste circulant dans ces rues. Les résultats démontrent que le site Wellington et Hickson affiche les valeurs les plus élevées, avec une vitesse moyenne dépassant les 3.5 m/s (environ 12.6 km/h) et une accélération moyenne d'environ 1 m/s^2, suivi de près par Bernard et Champagneur. Les autres sites présentent des similitudes ou une proximité des résultats. De plus, Wellington entre la 3$^{\text{è}}$ et la 4$^{\text{è}}$ avenue ainsi que Bernard et Outremont occupent les positions les plus favorables, avec les valeurs les plus basses. Ces deux sites génèrent des résultats similaires en termes de vitesses et d'accélérations, avec des moyennes d'environ 2.5 m/s (environ 9 km/h) et 0.4 m/s^2, respectivement.

Ensuite, nous nous concentrons sur les interactions entre cyclistes et piétons en utilisant des indicateurs de sécurité tels que le TTC ("Time To Collision") et les distances minimales entre ces deux usagers pour chaque interaction. Les résultats obtenus mettent en évidence des variations significatives entre les sites d'une même rue, indépendamment des réglementations en place. Wellington et Hickson affiche systématiquement les valeurs les plus élevées pour les deux indicateurs, le qualifiant comme le site le plus sûr, tandis que Bernard et Champagneur ainsi que Mont-Royal et Drolet présentent régulièrement les valeurs les plus basses pour TTC_{15}, avec des valeurs moyennes autour d'une seconde pour les deux sites.

L'analyse statistique suggère que des valeurs élevées de TTC sont associées à des accélérations et des distances minimales importantes, ainsi qu'à un faible nombre de piétons sur la chaussée, sauf pour Wellington et Hickson et Bernard et Outremont. De plus, le modèle de vitesse montre que des valeurs élevées de v_{85} sont liées à des distances réduites, des accélérations plus élevées et des valeurs faibles de TTC_{15}.

En ce qui concerne le comportement, les piétons s'adaptent davantage aux cyclistes dans les interactions étudiées, alors que les cyclistes, en général, n'ajustent pas leur vitesse en fonction de leur proximité avec les piétons. Bien que les vitesses maximales des cyclistes diminuent avec l'augmentation du nombre de piétons sur la chaussée, les médianes des vitesses demeurent

relativement similaires. De plus, les angles de vélocité indiquent que les piétons changent plus fréquemment de direction que les cyclistes.

En ce qui concerne les limitations de cette étude, des problèmes de détection et de suivi des trajectoires, nécessitant une validation manuelle, ont été rencontrés, ainsi que des défis liés à la vitesse comparable des cyclistes et des piétons pour les outils de classification. D'autres facteurs environnementaux, tels que la largeur des voies, la longueur totale de la rue et la pente de la rue, doivent être pris en compte dans les analyses futures.

ABSTRACT

Active transportation presents itself as a solution to several emerging environmental challenges. By favoring more sustainable alternatives to motorized vehicles, active transportation contributes to reducing their use, thus promoting the creation of more ecological spaces. In this context, our study focuses on a pilot project of cohabitation between cyclists and pedestrians in three pedestrian streets in the City of Montreal, where cyclists are allowed to stay on their bikes in two of these streets.

Through video analysis, our goal is to investigate the interactions between cyclists and pedestrians within pedestrian zones. Initially, we examined the speeds and accelerations of each cyclist moving in these streets. The results demonstrate that the Wellington and Hickson site exhibits the highest values, with an average speed exceeding 3.5 m/s (approximately 12.6 km/h) and an average acceleration of about 1 m/s^2, closely followed by Bernard and Champagneur. Other sites show similarities or proximity in their results. Additionally, Wellington between the 3rd and 4th avenues and Bernard and Outremont occupy the most favorable positions, with the lowest values. Both sites generate similar results for speeds and accelerations, with averages around 2.5 m/s (approximately 9 km/h) and 0.4 m/s^2, respectively.

Next, we focus on interactions between cyclists and pedestrians using safety indicators such as "Time To Collision" (TTC) and the minimum distances between these two users for each interaction. The results highlight significant variations between sites on the same street, irrespective of existing regulations. Wellington and Hickson consistently display the highest values for both indicators, qualifying it as the safest site, while Bernard and Champagneur and Mont-Royal and Drolet regularly exhibit the lowest values for TTC, with average values around one second for both sites.

Statistical analysis suggests that high TTC values are associated with significant accelerations and minimum distances, as well as a low number of pedestrians on the roadway, except for Wellington and Hickson and Bernard and Outremont. Moreover, the speed model indicates that high speed values are linked to reduced distances, higher accelerations, and low TTC values.

Regarding behavior, pedestrians adapt more to cyclists in the studied interactions, while cyclists, in general, do not adjust their speed based on their proximity to pedestrians. Although the maximum speeds of cyclists decrease with an increase in the number of pedestrians on the roadway, the median speeds remain relatively similar. Additionally, velocity angles indicate

that pedestrians change direction more frequently than cyclists.

As for the limitations of this study, issues with trajectory detection and tracking, requiring manual validation, were encountered, along with challenges related to the comparable speed of cyclists and pedestrians for classification tools. Other environmental factors, such as road width, total street length, and street gradient, should be considered in future analyses.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vii

TABLE DES MATIÈRES ix

LISTE DES TABLEAUX xi

LISTE DES FIGURES xii

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xiv

LISTE DES ANNEXES xv

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1
- 1.1 Éléments de la problématique 1
- 1.2 Objectifs de recherche 2
- 1.3 Plan du mémoire 3

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 4
- 2.1 Mesures substituts de sécurité 4
- 2.2 Méthode de vision par ordinateur 7
- 2.3 Cas d'études sur les interactions entre les usagers vulnérables et les autres usagers motorisés 8
- 2.4 Espaces partagés et usagers vulnérables 9

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 11
- 3.1 Méthodes de vision par ordinateur 11
  - 3.1.1 Prétraitement des données 11
  - 3.1.2 Traitement des données 13
- 3.2 Optimisation 16
- 3.3 Analyse des données 19

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : ASSESSING THE SAFETY OF CYCLIST-PEDESTRIAN INTERACTIONS IN SEASONAL PEDESTRIAN STREETS USING COMPUTER VISION TECHNIQUE 23
4.1 Abstract 23
4.2 Introduction 24
4.3 Literature review 25
4.4 Methodology 27
4.4.1 Data preparation 28
4.4.2 Video Analysis and Optimisation 28
4.4.3 Safety analysis 29
4.4.4 Statistical Modeling 30
4.5 Results 32
4.5.1 Video data description 32
4.5.2 User Analysis 34
4.5.3 Interaction Analysis 36
4.5.4 Regression analysis 37
4.6 Conclusion 40
4.7 Acknowledgements 41

CHAPITRE 5 COHABITATION CYCLISTE-PIÉTON 42
5.1 Définition de la cohabitation cycliste-piéton 42
5.2 Comportement des usagers 43
5.2.1 Selon la distance 43
5.2.2 Selon le nombre de piétons sur la chaussée 45
5.3 Angles de vélocité 46
5.4 Discussion 49

CHAPITRE 6 CONCLUSION 53
6.1 Synthèse des travaux 53
6.2 Limitations des réalisations effectuées et améliorations futures 55

RÉFÉRENCES 56

ANNEXES 63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Paramètres de suivi des caractéristiques pour Traffic Intelligence . . . 20

Tableau 3.2 Paramètres de regroupement des caractéristiques pour Traffic Intelligence 22

Tableau 4.1 Detailed description of data collected in the three streets (# means number, Ped. and Cyc. respectively pedestrians and cyclists, Inter. the pedestrian-cyclist interactions) 33

Tableau 4.2 Descriptive statistics of the variables extracted for each interaction with a collision course 38

Tableau 4.3 OLS Regression Results for $log(TTC_{15})$ for interactions with collision course 39

Tableau 4.4 OLS Regression Results for $log(v_{85})$ for interactions with a collision course 40

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Pyramide de la hiérarchie des interactions des usagers de la route [1]	6
Figure 2.2	La définition du TET et TIT [2]	7
Figure 3.1	Schéma détaillé de la Méthodologie d'analyse des données	11
Figure 3.2	Exemple d'extraction des caractéristiques et leur regroupement	13
Figure 3.3	Vue du site Bernard-Champagneur	14
Figure 3.4	Exemple d'extraction des caractéristiques et leur regroupement	15
Figure 3.5	Exemples de trajectoires de fausses alarmes (suivi d'un oiseau en haut et d'un ombre en bas)	17
Figure 3.6	Exemples de sursegmentation d'un objet	18
Figure 3.7	Exemples de sous-segmentation d'un objet	19
Figure 3.8	Exemple de trajectoire qui suit plusieurs objets	21
Figure 4.1	Methodology overview	28
Figure 4.2	Correlation Matrix	31
Figure 4.3	Camera Views of collection sites	32
Figure 4.4	Boxplot for the 85^{th} centiles of cyclist speed v_{85} per site	34
Figure 4.5	Boxplot of the 85^{th} centiles of the cyclist acceleration a_{85} per site	35
Figure 4.6	Boxplot of the 15^{th} centiles of the cyclist acceleration a_{15} per site	36
Figure 4.7	Boxplot of minimum cyclist-pedestrian distances d_{min} per site (for interactions with a collision course)	37
Figure 4.8	Boxplot of the 15^{th} centiles of the TTC_{15} per site (for interactions with a collision course)	38
Figure 5.1	Comparaison des ratios de vitesse des cyclistes	44
Figure 5.2	Variations de vitesse des cyclistes avant et après la distance minimale avec un piéton (Cas Ratio<2)	45
Figure 5.3	Vitesses des cyclistes à la distance minimale avec un piéton	46
Figure 5.4	85 $^{\text{e}}$ centile de vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons sur la chaussée	47
Figure 5.5	Types d'interactions cyclistes-piétons [3, 4]	48
Figure 5.6	Distribution de catégories d'interaction	49
Figure 5.7	Angles de vélocité des cyclistes	50
Figure 5.8	Variations des angles de vélocité des piétons	51
Figure A.1	Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Bernard Bloomfield	63
Figure A.2	Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Bernard Outremont	64

Figure A.3 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Bernard Champagneur 64
Figure A.4 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Mont Royal et De la Roche 65
Figure A.5 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Mont Royal et Drolet 65
Figure A.6 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Wellington entre 3ème et 4ème Avenue 66
Figure A.7 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Wellington et Hickson 67

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

MADS	Mesh Adaptive Direct Search
MOTA	Multiple Object Tracking Accuracy
NOMAD	Nonlinear Optimization by Mesh Adaptive Direct Search (software)
SMoS	Surrogate Measures of Safety
TCT	Traffic Conflict Technique
TET	Time Exposed TTC
TIT	Time Integrated TTC
TTC	Time To Collision
PET	Post-Encroachment Time

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Analyses complémentaires 63

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La pandémie de COVID-19 a mis en évidence l'impératif de préserver la distanciation physique, ce qui a accentué l'importance des espaces partagés comme moyen de garantir cette distanciation tout en promouvant la santé publique. Par conséquent, une augmentation significative de nouveaux espaces pour les transports actifs a été observée, caractérisée par une expansion rapide de leur nombre et de leur utilisation. Ces espaces favorisent la priorité des piétons, dans le but d'encourager l'adoption de modes de transport durables.

Dans le cadre de notre étude, nous focalisons notre attention sur les rues piétonnes en tant qu'environnement urbain particulier. Les rues piétonnes sont des zones urbaines aménagées exclusivement dédiées aux piétons, fournissant un espace sécurisé et convivial pour leurs déplacements. Elles cherchent à réduire la dépendance aux modes de transport individuels motorisés en encourageant des alternatives plus respectueuses de l'environnement, telles que la marche, et parfois également le vélo, comme dans notre cas d'étude. De plus, ces espaces offrent des opportunités pour des activités récréatives et sociales, contribuant ainsi à une plus grande vitalité urbaine. Les piétons peuvent profiter d'un cadre propice aux rencontres, aux échanges et aux moments de détente. Cela renforce le tissu social de la communauté et crée une atmosphère dynamique et conviviale dans les rues piétonnes.

1.1 Éléments de la problématique

À l'été 2020, certaines rues de la ville de Montréal sont fermées à la circulation automobile pour devenir des rues piétonnes saisonnières, offrant ainsi des espaces non motorisés où les piétons peuvent circuler librement. Cependant, malgré l'interdiction générale de circuler à vélo dans les rues piétonnes, les cyclistes continuent de les emprunter, surtout lorsque la densité de piétons est faible. Plusieurs études ont montré que la coexistence des piétons et des cyclistes dans un même espace entraîne rarement des accidents graves [5].

Dans la littérature, aucune étude ne traite spécifiquement les rues piétonnes, bien que plusieurs s'intéressent aux interactions entre cyclistes et piétons au sein d'espaces partagés. La terminologie "espaces partagés" revêt diverses acceptions dans la documentation existante. Selon le ministère britannique des Transports, un espace partagé est défini comme un lieu où la priorité est accordée aux piétons, établissant ainsi leur dominance par rapport aux véhicules motorisés. Dans ces espaces, tous les usagers partagent l'espace, évinçant les règles rigides présentes dans les conceptions conventionnelles [6]. En contraste avec les espaces par-

tagés, les rues piétonnes restreignent l'accès aux piétons, et parfois aux cyclistes, comme c'est le cas dans notre étude.

Ces espaces partagés offrent aux utilisateurs une expérience de circulation sans stress et sont souvent mis en œuvre dans les environnements urbains pour répondre au manque d'espaces publics destinés à tous les usagers de la route dans des infrastructures séparées, ainsi que pour promouvoir les modes de transport actifs [5, 7].

Bien que les espaces partagés offrent de nombreux avantages aux communautés, de nombreux piétons et cyclistes se plaignent des désagréments qu'ils peuvent causer les uns aux autres [7]. Les collisions graves restent rares dans ces espaces, mais les nombreuses interactions entre les différents usagers, en raison du manque de réglementations claires, augmentent le niveau d'insécurité, pouvant entraîner des conflits graves et des accidents.

Dans le cadre de cette étude, nous examinerons trois rues piétonnes, dont l'une interdit totalement le passage des cyclistes, tandis que les deux autres autorisent leur présence à condition qu'ils circulent à la vitesse de marche lorsque la densité de piétons le permet. L'objectif de ces réglementations est d'encourager les cyclistes à s'adapter aux piétons tout en donnant accès aux rues piétonnes aux cyclistes. En complément de ces réglementations, diverses mesures ont été mises en place pour gérer la cohabitation entre cyclistes et piétons dans les rues piétonnes. Ces mesures se traduisent par des aménagements visant à rendre ces espaces plus attrayants pour les piétons, tels que des terrasses de café, des aires de jeux pour enfants et d'autres installations qui font des rues piétonnes une destination en elles-mêmes.

À notre connaissance, la sécurité des usagers de la route vulnérables dans les espaces partagés est rarement étudiée en utilisant des techniques de vision par ordinateur et n'a jamais été étudiée spécifiquement pour les rues piétonnes.

1.2 Objectifs de recherche

L'objectif principal de cette étude est d'investiguer la cohabitation entre les piétons et les cyclistes dans les rues fermées à la circulation automobile en fonction de différentes réglementations.

Cet objectif principal peut être divisé en deux sous-objectifs :

1. Le premier consiste à évaluer la sécurité des interactions entre cyclistes et piétons sur les rues piétonnes en calculant des indicateurs de sécurité. Cette évaluation s'appuie sur l'application de méthodes de vision par ordinateur, visant à extraire les trajectoires des usagers et les classifier généralement piéton et cycliste ;

2. Le deuxième objectif consiste à examiner le comportement des usagers dans les rues piétonnes en analysant diverses mesures. Ces mesures visent à étudier la cohabitation entre cyclistes et piétons au sein de ces espaces piétonnisés.

1.3 Plan du mémoire

Le mémoire comprends six chapitres comme suit :

— Le **chapitre 1** présente une introduction au sujet en discutant les éléments de la problématique et en citant les objectifs de la recherche.

— Le **chapitre 2** présente une revue de la littérature.

— Le **chapitre 3** présente la méthodologie suivie dans le projet de recherche.

— Le **chapitre 4** présente l'article "Assessing The Safety of Cyclist-Pedestrian Interactions in Seasonal Pedestrian Streets Using Computer Vision Techniques" qui a été soumis à la revue "Transportation Research Record" en décembre 2023. Cet article présente une analyse de sécurité des interactions cycliste-piéton dans les rues piétonnes à l'aide de plusieurs indicateurs de sécurité.

— Le **chapitre 5** présente des résultats complémentaires à l'analyse de sécurité menée dans l'article scientifique. En étudiant les comportements des piétons et cyclistes en interactions, nous serons en mesure de décrire à un certain niveau la cohabitation des piétons avec les cyclistes dans les rues piétonnes.

— Le dernier chapitre, le **chapitre 6** présente une synthèse des travaux du mémoire, les limitations de la recherche et propose des améliorations pour les travaux futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Les études antérieures concernant la sécurité des usagers de la route se sont essentiellement fondées sur l'exploitation de données relatives aux accidents, néanmoins, ces données présentent diverses limitations. Tout d'abord, les données d'accidents, généralement recueillies sous la forme de rapports de police ou d'entretiens, ne permettent pas d'attribuer de manière définitive la collision à une source ou une cause spécifique. Deuxièmement, en raison de la rareté des accidents, la quantité de données disponible est souvent insuffisante et peu satisfaisante. Par conséquent, pour mener des analyses de sécurité adéquates, il est nécessaire de collecter des données sur une longue période, même si ces données concernent précisément les événements que l'analyse vise à prévenir, ce qui peut sembler paradoxal. Enfin, la qualité des données peut affecter la robustesse des analyses, car les rapports de police sont souvent sujets à des jugements subjectifs, et les collisions dans lesquelles les dommages sont minimes risquent de ne pas être signalées [8]. En réponse à ces limitations, des mesures substituts de sécurité ont été développées.

2.1 Mesures substituts de sécurité

Les mesures substitutives de sécurité, connues sous le nom de "Surrogate Measures of Safety" (SMoS), sont de plus en plus utilisées dans la littérature scientifique en remplacement des données d'accidents ou de blessures. Ces méthodes peuvent être regroupées en trois catégories distinctes. La première catégorie concerne les techniques basées sur les événements, qui prennent en compte la probabilité qu'un conflit engendre une collision, et la gravité de ces événements. La deuxième catégorie repose sur les techniques comportementales, qui considèrent le comportement individuel des usagers de la route indépendamment des conflits ou des évitements de collisions, par exemple, le respect des règles de priorité ou les infractions au code de la route. Enfin, la dernière catégorie concerne les mesures liées aux variables de la circulation, qui regroupent des mesures agrégées du trafic, telles que l'analyse des volumes, des vitesses ou des densités, afin d'estimer le niveau de risque [9].

Les techniques de conflits de trafic sont les plus utilisés dans la littérature. Le concept de conflit, initialement proposé par Perkins et Harris en 1968 [10], a fait l'objet d'études approfondies dans différents articles traitant de la validité de son utilisation dans les études de sécurité [11–13]. Ces recherches ont examiné comment les techniques de conflits peuvent être appliquées pour identifier les interactions potentiellement dangereuses entre les usagers de la route. Ces techniques permettent d'identifier les facteurs déclencheurs des situations

potentielles d'accidents [14]. Elles présentent plusieurs avantages significatifs, notamment en termes de prévention des accidents en amont. De plus, elles facilitent la réalisation d'analyses plus robuste grâce à l'augmentation de la quantité de données disponibles, étant donné que les conflits sont plus fréquents que les collisions [8].

Dans la littérature, différentes définitions des conflits sont rapportées. Un conflit de circulation est défini comme un événement suffisamment proche d'un accident réel [15]. Une autre définition, plus précise, considère le conflit comme "une situation observable dans laquelle deux usagers de la route ou plus se rapprochent dans l'espace et dans le temps à un point tel qu'il existe un risque de collision si leurs mouvements restent inchangés" [8].

Pour pouvoir utiliser les conflits comme alternative aux données de collisions, il faut établir la relation entre les conflits et les accidents. De nombreux chercheurs ont émis l'hypothèse, soutenue par des travaux antérieurs [16, 17], selon laquelle toutes les interactions entre usagers de la route peuvent être classées selon une hiérarchie de sécurité (voir Figure 2.1). Cette hiérarchie se reflète visuellement en plaçant les collisions au sommet. Juste en dessous se trouvent les interactions les plus dangereuses, souvent désignées comme des quasi-collisions, où il existe un risque imminent de collision si les trajectoires des usagers ne sont pas modifiées. Les conflits viennent ensuite dans cette hiérarchie, représentant des situations où une proximité spatiale et temporelle entre les usagers de la route augmente le risque de collision. Enfin, les interactions moins critiques sont classées en bas de la hiérarchie, précédant les passages non perturbés, où les usagers se déplacent indépendamment les uns des autres sans risque de collision [18].

Les techniques de conflits de trafic, basées sur les événements, visent principalement à identifier les situations fréquentes qui présentent un risque de collision [14]. Grâce aux indicateurs de sécurité, la sévérité d'une interaction peut être estimée en quantifiant la proximité spatiale et temporelle des usagers. Ces indicateurs de sécurité permettent de mesurer la sévérité d'une interaction d'une manière objective et quantitative [19].

Parmi les indicateurs de sécurité largement employés, on peut mentionner le temps à la collision ou "Time To Collision" (TTC). Ce paramètre repose sur la prévision des trajectoires des usagers et est calculé lorsque ces trajectoires convergent vers une possible collision [2]. Cet indicateur est égal au temps nécessaire pour que les deux usagers entrent en collision s'ils continuent avec le même mouvement. Cet indicateur est continu, il est calculé à chaque instant pour chaque usager le long de sa trajectoire. Ainsi, différentes méthodes existent pour en dériver différents indicateurs à valeur unique par interaction. Par exemple : TET et TIT (voir Figure 2.2). Contrairement aux valeurs TTC momentanées, comme l'indicateur TA (Temps à l'accident) et la valeur minimale du TTC lors d'une interaction TTC_{min}, qui

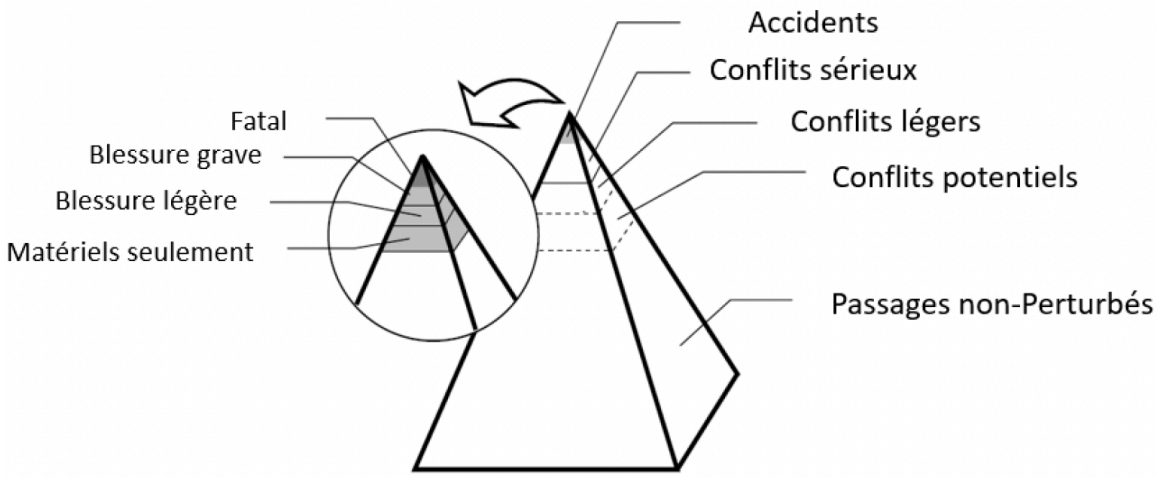

FIGURE 2.1 Pyramide de la hiérarchie des interactions des usagers de la route [1]

décrivent la gravité de l'événement, les indicateurs TET (Temps d'exposition avant collision) et TIT (Temps de collision intégré) sont utilisés pour mesurer la durée critique d'un évènement en termes de sécurité [2]. Le TET est défini comme étant la durée lors d'un événement où les valeurs TTC étaient inférieures à une certaine valeur seuil TTC*. Tandis que le TIT est égal à la surface entre la courbe TTC et sa valeur seuil [20].

L'un des indicateurs les plus couramment utilisés dans l'évaluation de la sécurité des usagers de la route est le temps de post-empiètement, également appelé "Post-Encroachment Time" (PET). Le PET est spécifiquement calculé pour les situations où les trajectoires des usagers se croisent [9]. Le calcul du PET débute par la détection du point de conflit lorsque les trajectoires des deux usagers s'entrecroisent. Il mesure le temps écoulé entre le moment où le premier usager franchit la trajectoire du second usager au point de conflit, et le moment où ce dernier atteint également le même point.

En complément du PET, d'autres indicateurs sont également présents dans la littérature scientifique. Ces indicateurs permettent d'évaluer la sécurité en mesurant la proximité spatiale et temporelle des usagers de la route dans différentes situations. Pour une revue exhaustive des divers indicateurs utilisés, plusieurs articles offrent un résumé complet de ces approches [2, 15, 21–23].

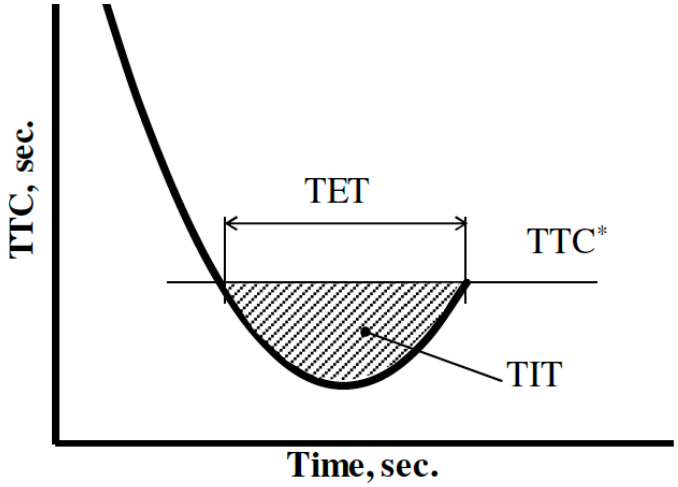

FIGURE 2.2 La définition du TET et TIT [2]

2.2 Méthode de vision par ordinateur

La qualité des données de sécurité est importante pour les chercheurs et les praticiens, afin qu'ils puissent prendre des décisions éclairées et mettre en œuvre des solutions efficaces en vue d'améliorer la fluidité et la sécurité du trafic routier. Ainsi, il est impératif de procéder à une collecte de données valide et fiable qui reflète fidèlement l'état réel du trafic. Différentes méthodes de collecte de données sont disponibles, parmi lesquelles figurent les observations manuelles sur le terrain, les observations manuelles de vidéos et les techniques automatisées basées sur les enregistrements vidéos [24].

Un corpus étendu d'articles dans la littérature se consacre à l'examen de la sécurité des usagers de la route en utilisant des mesures substitut de sécurité, en se basant sur des méthodes manuelles. Toutefois, ces approches sont confrontées à diverses limitations inhérentes. Premièrement, la collecte de données sur le terrain entraine des coûts élevés et une formation approfondie du personnel. Deuxièmement, l'objectivité des données peut être remise en question, car elles sont recueillies par des observateurs humains sur le terrain. Cette méthode de collecte ne permet pas de capturer les variations microscopiques des positions et des vitesses des usagers de la route. De plus, l'estimation d'indicateurs objectifs tels que le temps à la collision (TTC) peut s'avérer difficile à réaliser avec précision à partir des données collectées manuellement sur le terrain [8]. Par conséquent, il est nécessaire de rechercher des approches alternatives qui surmontent ces limitations pour une évaluation plus rigoureuse de la sécurité routière.

Les méthodes de vision par ordinateur constituent une avancée majeure pour pallier les

limitations inhérentes aux méthodes traditionnelles de collecte de données de sécurité, à savoir la subjectivité et le manque de qualité. En recourant à des capteurs vidéo, il est possible d'obtenir des données supplémentaires relatives à divers facteurs, tels que la densité du trafic et les conditions météorologiques. Cette approche permet une collecte objective et précise d'informations, contribuant ainsi à une analyse plus rigoureuse et détaillée des évènements observés [9].

Des études ont été menées pour créer un système d'analyse vidéo qui permet de détecter, de suivre et de classer les usagers de la route automatiquement pour analyser leur mouvements [25]. Plusieurs études ont utilisé des techniques de vision par ordinateur pour analyser les données vidéos [3, 24, 26, 27].

Trois types de méthodes de suivi sont disponibles : le suivi par détection, le suivi par flux et le suivi probabiliste. Dans le cadre du projet open source "Traffic Intelligence", l'approche adoptée repose sur le suivi par flux basé sur les caractéristiques [19]. Les auteurs ont fourni une description détaillée de l'algorithme utilisé pour ce suivi [28]. Ce projet vise à extraire les trajectoires des usagers de la route à partir de séquences vidéo. Les variables de position et de vitesse sont automatiquement extraites, et une classification des usagers est effectuée en se basant sur leurs caractéristiques physiques, leur position et leur vitesse. Plusieurs études ont été menées afin de valider les différents éléments constitutifs de ce projet, démontrant ainsi son efficacité et son potentiel dans le domaine de l'analyse du trafic [8, 29–31]. L'applicabilité de l'utilisation des méthodes d'analyse vidéo automatisée a été démontrée dans la littérature [19].

2.3 Cas d'études sur les interactions entre les usagers vulnérables et les autres usagers motorisés

La sécurité des usagers vulnérables lors de leurs interactions avec les usagers motorisés suscite l'intérêt de plusieurs études. Une recherche menée en Inde a adopté une approche basée sur des mesures substitut de sécurité pour analyser les interactions entre les piétons et les véhicules aux passages piétons urbains à mi-bloc. Cette analyse a été réalisée en extrayant manuellement les trajectoires à partir de données vidéo, et en utilisant des mesures telles que le temps d'empiétement (PET) [32]. Une autre étude, également basée sur l'extraction manuelle des données vidéo, examine les interactions piéton-véhicule pour comparer les observations sur le terrain avec les observations vidéo [33].

Les méthodes de vision par ordinateur ont également été utilisées dans la littérature pour analyser la sécurité des usagers vulnérables. Une étude menée à Montréal a examiné les interactions des cyclistes aux intersections, qu'elles soient dotées ou non de pistes cyclables,

afin de déterminer l'impact de ces pistes sur la sécurité des cyclistes. L'indicateur PET a été utilisé pour mesurer la gravité des interactions des cyclistes avec les véhicules tournant dans la même direction [34].

De même, les interactions entre les piétons et les véhicules ont été analysées en utilisant des méthodes de vision par ordinateur. Une étude a démontré la faisabilité d'effectuer une analyse avant-après des mesures de sécurité en utilisant des données vidéo pour étudier les interactions piéton-véhicule à Chinatown, Oakland, Californie [8]. Différents indicateurs tels que le TTC et le PET ont été utilisés.

Une autre étude réalisée à Montréal a examiné l'impact sur la sécurité des usagers de la conversion des intersections à arrêt sur la route secondaire en intersections à arrêt sur toutes les directions. Les interactions de tous types, véhicule-véhicule, véhicule-piéton et piéton-cycliste, ont été analysées à l'aide de méthodes de vision par ordinateur [35].

En outre, plusieurs articles ont été consacrés à l'étude du comportement des piétons [36, 37].

L'objectif était de comparer l'utilisation d'indicateurs de conflits basés sur la proximité temporelle et les actions d'évitement pour évaluer la gravité des conflits entre piétons dans différents environnements de circulation.

L'analyse des interactions impliquant des usagers vulnérables a contribué à la comparaison des performances de certains indicateurs évaluant la gravité des conflits entre piétons dans divers environnements. Une étude a été entreprise pour évaluer la sévérité des interactions entre les piétons et les autres usagers de la route, en se basant sur des données vidéo recueillies dans cinq grandes villes de différents pays. L'objectif de cette recherche était de comparer l'utilisation d'indicateurs de proximité temporelle et d'indicateurs basés sur les manoeuvres d'évitement basés sur l'action pour évaluer les risques [38].

Une autre étude s'est penchée sur l'applicabilité des indicateurs de conflit basés sur la proximité temporelle afin d'évaluer la sécurité des piétons dans des environnements moins structurés [39]. Par ailleurs, certains auteurs ont utilisé les interactions entre les véhicules et les piétons pour développer des méthodes permettant d'agréger les mesures d'indicateurs de conflits en un indice global de sécurité [40].

2.4 Espaces partagés et usagers vulnérables

Le terme "partagé" dans le contexte des rues ou des espaces partagés ne se réfère pas seulement à une zone où différents usagers de la route coexistent, mais également à un espace aménagé qui accorde la priorité aux piétons dans le but d'améliorer leur confort en créant un environnement convivial [6].

L'intégration des usagers motorisés dans les espaces résidentiels lors des premières études sur les espaces partagés a donné lieu au concept de "Woonerf". Ce concept oblige les usagers de la route à partager un espace avec des aménagements spécifiques visant à restreindre le confort des usagers motorisés, tels que des obstacles physiques ou naturels comme des blocs de béton ou de grands arbres le long de la chaussée, afin de réduire leur visibilité et les inciter à ralentir. Ainsi, ce concept permet aux usagers actifs de partager un espace plus agréable où les autres usagers motorisés sont plus attentifs [41].

Toutefois, les perceptions des usagers à l'égard de ce concept sont diversifiées. Les personnes à mobilité réduite, en particulier, expriment leur opposition en raison de l'incertitude quant à leur sécurité lorsqu'ils partagent leur espace avec d'autres usagers. Tandis que d'autres affirment que l'ambiguïté introduite dans ce type d'espace oblige les différents usagers à être plus vigilants [6].

Plusieurs études se sont penchées sur les interactions entre les cyclistes et les piétons dans les pistes cyclables. Parmi ces études, l'une d'entre elles a adopté une approche basée sur les observations sur le terrain pour développer une méthode permettant de déterminer le niveau de service [42]. Une autre étude a utilisé des enregistrements vidéo pour observer le comportement des usagers vulnérables [43]. De même, une autre étude a analysé les interactions entre les usagers vulnérables aux arrêts d'autobus le long des pistes cyclables en utilisant des techniques de vision par ordinateur [44].

Cependant, rares sont les études qui ont examiné les interactions des usagers vulnérables dans des espaces partagés en utilisant des méthodes de vision par ordinateur [9]. De plus, aucune étude n'a encore abordé spécifiquement les interactions entre cyclistes et piétons au sein des rues piétonnes.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Méthodes de vision par ordinateur

La méthodologie suivie pour atteindre les objectifs de cette étude, consiste en quatre étapes présentées dans la Figure 3.1.

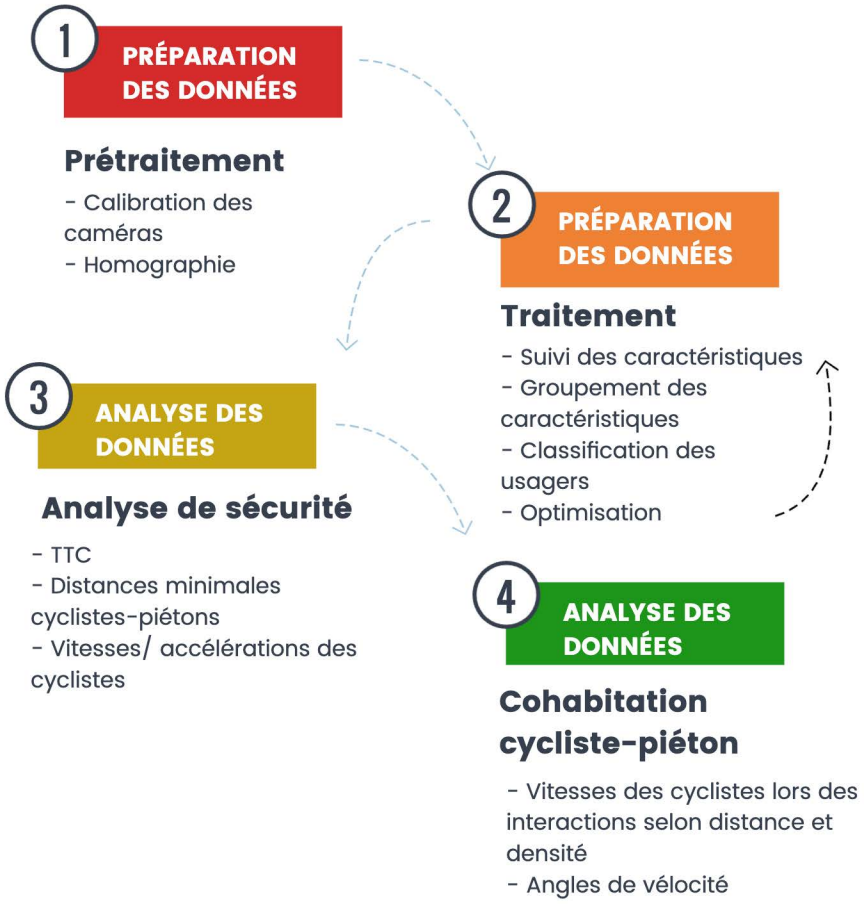

FIGURE 3.1 Schéma détaillé de la Méthodologie d'analyse des données

3.1.1 Prétraitement des données

L'initialisation du traitement des données vidéo commence par une étape cruciale : la calibration des caméras. Cette procédure d'étalonnage vise à estimer les paramètres requis pour la projection des objets présents sur le plan du capteur vidéo dans le monde réel. Elle permet

d'établir une correspondance entre les coordonnées spatiales des objets et leur représentation dans l'image capturée [25].

La phase de calibration revêt une importance capitale dans l'estimation précise des mesures métriques des usagers et dans la garantie de la fiabilité des analyses de sécurité qui reposent sur ces mesures. Il est crucial de corriger la distorsion en barillet de l'image ou effet d'oeil de poisson généralement présent dans les caméras utilisées dans ce projet, notamment celles produites par GoPro.

Avant de calculer la matrice d'homographie, il est nécessaire de corriger l'image en effectuant une transformation géométrique à l'aide d'une carte de rectification. Pour réaliser cette correction, il est essentiel de disposer de la matrice intrinsèque de la caméra A et du vecteur des coefficients de distorsion [8, 26].

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Les paramètres f_x et f_y correspondent aux distances focales dans les directions x et y de la caméra, tandis que c_x et c_y désignent les coordonnées du centre optiques dans les directions x et y.

$$\textit{Coefficients de distorsion} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & p_1 & p_2 & k_3 \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Les coefficients k1, k2 et k3 sont utilisés pour représenter les distorsions radiales dans l'image, tandis que les coefficients p1 et p2 sont utilisés pour représenter les distorsions tangentes.

La calibration des caméras est effectuée lors de chaque session de collecte de données afin de tenir compte de la variabilité inhérente aux perspectives des caméras. À cet effet, la méthode de calibration intégrée dans le projet "Traffic Intelligence" est utilisé. Cette fonction permet de générer une matrice d'homographie grâce à une correspondance entre plusieurs points. Cette matrice joue un rôle essentiel en établissant une correspondance entre les objets détectés dans la vidéo et leurs coordonnées dans le monde réel [45].

L'utilisation de la matrice d'homographie permet de réaliser une transformation des coordonnées de l'image capturée par la caméra vers des coordonnées réelles. Pour ce faire, la méthode nécessite la sélection d'au moins quatre points dans chaque image, à savoir l'image représentant une capture de la vidéo, et l'image représentant la vue aérienne.

3.1.2 Traitement des données

Avant de procéder à l'extraction des trajectoires, il est essentiel de définir la zone d'étude à l'aide d'un masque. Ce masque consiste en une représentation graphique où l'espace d'étude est représenté en blanc, tandis que les zones exclues sont en noir. Cette approche permet de restreindre l'analyse à une partie spécifique de l'environnement étudié, simplifiant ainsi les calculs et focalisant l'attention sur les éléments pertinents.

La création du masque se fait à l'aide d'un logiciel de manipulation d'images, qui permet de délimiter précisément la zone d'étude. La Figure 3.2 ci-dessous présente un exemple de cette délimitation réalisée à l'aide du masque.

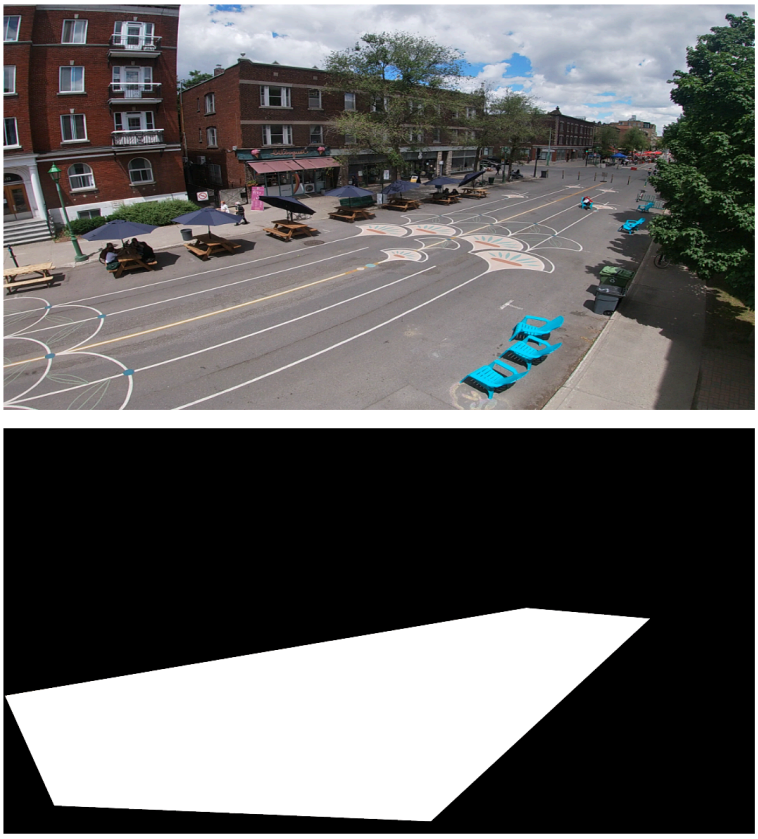

FIGURE 3.2 Exemple d'extraction des caractéristiques et leur regroupement

Dans le cadre de notre étude, notre analyse se concentre spécifiquement sur les voies routières des rues piétonnes, excluant ainsi les trottoirs et les intersections de notre champ d'étude. Cette décision est motivée par plusieurs raisons. Tout d'abord, la plupart des cyclistes ne circulent pas sur les trottoirs, ce qui justifie de les exclure de notre analyse pour une approche plus ciblée. De plus, l'occlusion, résultant de la présence d'obstacles tels que les arbres, les

lampadaires, les panneaux de signalisation et les aménagements comme les terrasses de café, peut rendre le suivi précis des déplacements des piétons plus difficile sur les trottoirs. En outre, les rues piétonnes sont conçues principalement pour offrir un espace sécurisé et convivial aux piétons, tandis que les cyclistes sont généralement interdits. Par conséquent, il est essentiel de se concentrer sur les interactions au niveau de l'infrastructure routière qui peuvent influencer la cohabitation entre ces deux groupes d'usagers. La Figure 3.3 suivante illustre un exemple concret où la vue dégagée des trottoirs n'est pas assurée.

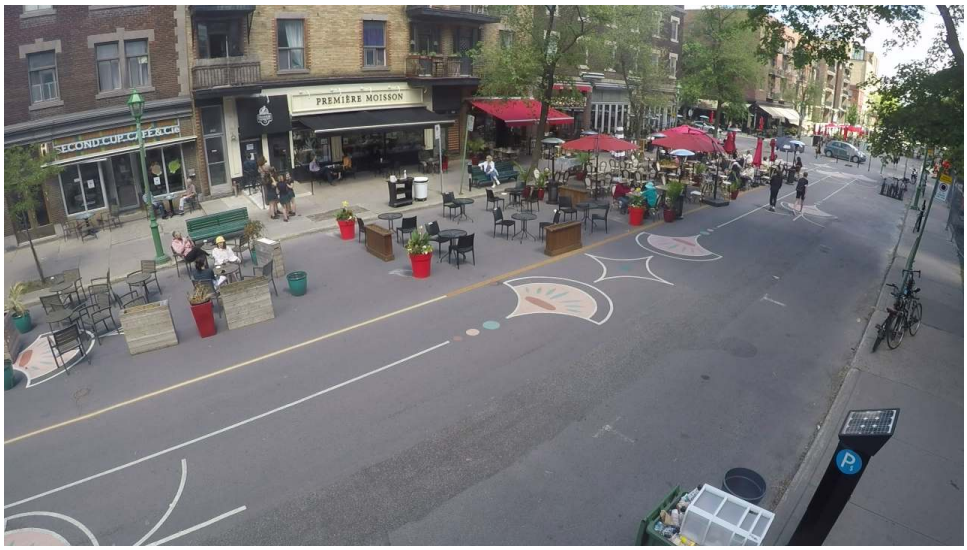

FIGURE 3.3 Vue du site Bernard-Champagneur

Une fois les caméras calibrées et les masques générés, nous entamons l'analyse des données. Le traitement des données s'effectue en trois étapes : le suivi des caractéristiques, le regroupement des caractéristiques et la classification des objets.

La première étape de l'analyse consiste à effectuer le suivi des objets présents dans la séquence vidéo. Pour ce faire, l'outil de détection et de suivi , disponible dans le projet "Traffic Intelligence", est utilisé. Cet algorithme, basé sur le calcul du flux optique, permet de suivre, d'une image à une autre, des points distinctifs présents sur les objets, plutôt que de suivre les objets dans leur intégralité. Le suivi des caractéristiques est réalisé en utilisant des techniques bien établies telles que le suivi des caractéristiques "Kanade-Lucas-Tomasi". L'algorithme est conçu pour fonctionner dans diverses conditions environnementales, que ce soit de jour, de nuit ou au crépuscule, ainsi que dans différentes situations de circulation [28].

La deuxième étape du processus consiste à regrouper les entités à l'aide de l'algorithme de regroupement de caractéristiques présenté dans [28]. Chaque objet peut contenir plusieurs entités, et l'algorithme détermine quelles entités appartiennent à quels objets en se basant

sur la proximité spatiale et la similarité de mouvement.

Spécifiquement, pour chaque image, l'algorithme tente de sélectionner les entités qui sont suivies pendant un nombre minimal de frames, défini par le paramètre "min-feature-time", et qui ont un déplacement global significatif. Ensuite, les entités nouvellement suivies sont connectées aux entités déjà suivies en respectant une distance maximale prédéfinie, notée $D_{connexion}$. Par la suite, pour chaque paire d'entités connectées (f_i, f_j) qui sont actuellement suivies, si la différence entre leur distance maximale et minimale le long de leur suivi est supérieure à un seuil prédéterminé, noté $D_{segmentation}$, alors les entités sont déconnectées. L'ensemble des entités connectées forme un composant connecté qui représente une hypothèse d'objet dans le cadre de l'analyse. Cette approche de regroupement d'entités permet de déterminer les objets potentiels dans la séquence vidéo étudiée [28]. La Figure 3.4 suivante montre les phases de détections des caractéristiques et de leur regroupement.

FIGURE 3.4 Exemple d'extraction des caractéristiques et leur regroupement

Les trajectoires sont caractérisées par la position de l'objet dans chaque image. Par conséquent, les trajectoires sont enregistrées sous forme de listes dont la longueur correspond à la durée de présence de l'objet dans la vidéo multipliée par le nombre d'images par unité

de temps. Ainsi, les vitesses et accélérations peuvent être déduites pour chaque image en se basant sur les coordonnées successives de l'objet. Cette déduction s'effectue de la manière suivante :

$$v_i = \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t}, \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t} \right) \tag{3.3}$$

Les accélérations peuvent également être calculées de la manière suivante :

$$\text{accélération} = \left(\frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\Delta t^2}, \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta t^2} \right) \tag{3.4}$$

La phase finale du processus de traitement des données consiste en la classification des objets. La structure de mouvement des objets offre des indications sur leur nature, par exemple, les véhicules se déplacent généralement de manière linéaire à des vitesses relativement élevées, tandis que les piétons et les cyclistes présentent un comportement oscillatoire. En outre, d'autres caractéristiques telles que la vitesse maximale et la taille des objets contribuent à une classification plus précise des usagers [27], généralement piéton ou cycliste dans notre étude.

3.2 Optimisation

Le suivi des objets dans les rues piétonnes s'est avéré complexe, en particulier pour les piétons et les cyclistes dont les vitesses et les mouvements sont similaires. Afin d'améliorer la qualité du suivi et de réduire le temps nécessaire à l'annotation des trajectoires, une étape d'optimisation a été ajoutée à la méthodologie. Cette étape vise à ajuster les paramètres de suivi afin d'obtenir une meilleure précision et à augmenter la taille des données utilisées pour l'analyse.

Afin d'effectuer l'optimisation, il est nécessaire de générer des trajectoires révisées manuellement pour chaque journée de collecte. Ces trajectoires, appelées trajectoires de "vérité terrain", servent de référence pour l'optimisation des paramètres de suivi. Dans le cadre du projet "Traffic Intelligence", un outil d'annotation appelé "Traffic Intelligence Annotation Tool" est mis à disposition pour faciliter cette tâche. L'outil développé offre la possibilité de visualiser les trajectoires des objets et de réaliser différentes opérations sur celles-ci. Parmi ces opérations, il est envisageable de supprimer des trajectoires dans le cas de fausses alarmes, telles que des arbres, des ombres, des oiseaux, etc. La Figure 3.5 suivante montre des exemples de fausses alarmes.

De plus, il est possible de regrouper les trajectoires en cas de sursegmentation, qui se produit

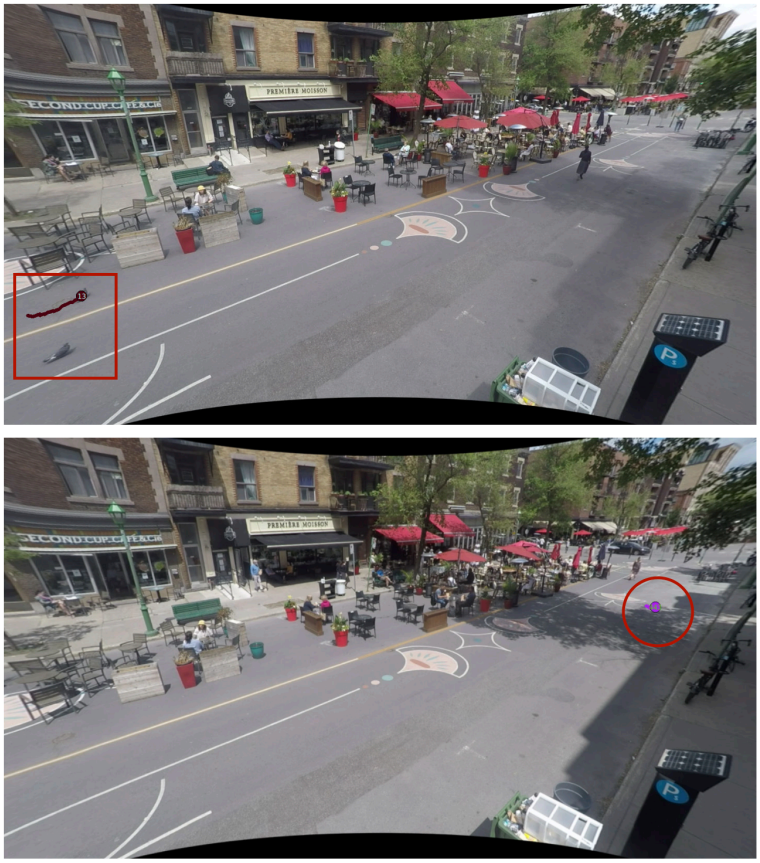

FIGURE 3.5 Exemples de trajectoires de fausses alarmes (suivi d'un oiseau en haut et d'un ombre en bas)

lorsque plusieurs trajectoires ont été extraites pour un même objet. Cette situation peut être observée dans la Figure 3.6 suivante, où deux exemples de sursegmentation sont illustrés.

En revanche, dans le cas opposé du surgroupement, l'outil est également capable de suivre des objets qui n'ont pas été détectés, ce qui correspond à une situation de sous-segmentation. Un exemple de cette situation est illustré dans la figure 3.7.

Une complication supplémentaire liée à la sous-segmentation peut émerger lorsque plusieurs utilisateurs sont attribués à une même trajectoire. Pour remédier à cette situation, l'outil d'annotation permet la gestion des caractéristiques des objets, assurant ainsi leur séparation pour obtenir une trajectoire distincte pour chacun. La Figure 3.8 illustre un exemple de trajectoire qui suit plusieurs objets plutôt qu'un seul.

Le suivi et le regroupement des caractéristiques dépendent des paramètres de suivi, qui sont spécifiés dans un fichier de configuration utilisé comme entrée pour l'algorithme de suivi. Le Tableau 3.2 suivant présente brièvement les principaux paramètres de suivi utilisés. La

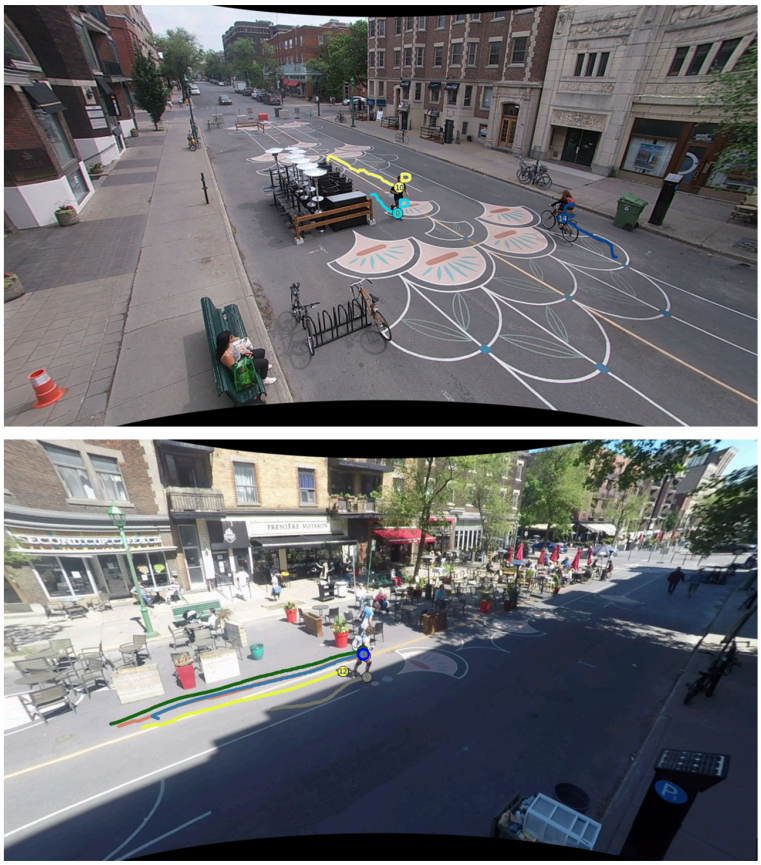

FIGURE 3.6 Exemples de sursegmentation d'un objet

génération des trajectoires pour les usagers dans cet environnement non motorisé présente des défis, ce qui nécessite une attention particulière lors du choix et de l'ajustement des paramètres. L'objectif est de s'assurer que tous les objets possèdent un nombre suffisant de caractéristiques pour qu'ils puissent être regroupés lors de la phase de regroupement. À l'origine, ces paramètres de regroupement étaient ajustés et améliorés manuellement par une approche d'essai-erreur.

La collecte de données a été effectuée sur plusieurs sites pendant plusieurs jours. En raison de la quantité importante de données à analyser et des défis liés au suivi des usagers vulnérables, l'étape d'optimisation devient difficile à réaliser manuellement. Par conséquent, l'ajustement des paramètres est effectué à l'aide du logiciel d'optimisation de boîtes noires NOMAD "Non-linear Optimization by Mesh Adaptive Direct Search". Dans le but de réduire davantage le temps nécessaire pour ajuster les paramètres, seuls les paramètres de regroupement seront optimisés.

L'application logicielle NOMAD, basée sur la simulation, utilise l'algorithme de recherche

FIGURE 3.7 Exemples de sous-segmentation d'un objet

directe adaptative maillée "Mesh Adaptive Direct Search" (MADS) [46–48]. Cette méthode permet d'itérer sur les paramètres de suivi sélectionnés pour l'optimisation, tout en respectant les limites spécifiées pour chaque paramètre en entrée. Un maximum de 100 itérations est fixé. L'algorithme vise à trouver les paramètres qui produisent les trajectoires les plus proches de la réalité, en maximisant la valeur du MOTA. Afin d'amorcer le processus d'optimisation, des valeurs initiales sont attribuées à chaque paramètre. Le calcul du MOTA s'effectue en confrontant les trajectoires réelles avec celles obtenues à partir des paramètres initiaux fournis en entrée. Il convient de souligner que deux positions sont assimilées si la distance qui les sépare dans l'espace image est inférieure à 500 pixels.

Le Tableau 3.2 présente les paramètres fondamentaux du regroupement devant être optimisés.

Les paramètres mentionnés seront utilisés pour générer les trajectoires finales des usagers, qui seront ensuite soumises à une étape supplémentaire de nettoyage manuel pour les améliorer.

3.3 Analyse des données

L'analyse des données est subdivisée en deux parties principales, détaillées dans les sections suivantes. La première se concentre sur l'évaluation de la sécurité dans les rues piétonnes en examinant les mesures métriques des cyclistes dans ces rues, ainsi que les interactions entre

Tableau 3.1 Paramètres de suivi des caractéristiques pour Traffic Intelligence

Paramètre	Type	Unité	Défaut	Description
max-nfeatures	int	caractéristiques	2000	Nombre maximum de caractéristiques par image
feature-quality	float	—	0.1	Niveau de qualité des features à retenir
min-feature-distanceklt	float	px	3.5496	Distance minimale entre caractéristiques
block-size	int	px	7	Détection de coin de Harris
k	float	—	0.4	Paramètre pour détecter les bonnes caractéristiques à suivre
window-size	int	px	6	Taille de la fenêtre de recherche à chaque niveau de la pyramide
pyramid-level	int	—	5	Niveau maximal de pyramide
ndisplacements	int	—	3	Nombre de déplacements pour tester le mouvement minimum des caractéristiques
min-feature-displacement	float	px	0.001	Déplacement minimal entre les images pour conserver les caractéristiques
acceleration-bound	float	—	3	accélération maximale des caractéristiques
deviation-bound	float	—	0.6	Écart maximal des caractéristiques
smoothing-halfwidth	int	images	5	Nombre d'images pour lisser les positions
min-feature-time	int	images	15	Temps minimal d'existance d'un élément pour être sauvé

FIGURE 3.8 Exemple de trajectoire qui suit plusieurs objets

cyclistes et piétons, à l'aide d'indicateurs de sécurité spécifiques.

- Le 85e centile de vitesse et accélération des cyclistes ;
- Le 15e centile du TTC comme valeur minimale pour chaque interaction dont les trajectoires des usagers se croisent ;
- La distance minimale entre cycliste et piéton dont les trajectoires se croisent.

Une analyse complémentaire statistique de régression linéaire propose deux modèles ayant comme variables dépendantes le 15^{e} centile du TTC et le 85è centile de vitesse.

La deuxième partie de l'analyse se concentre sur la cohabitation entre les cyclistes et les piétons. L'objectif est de déterminer qui s'adapte à qui en examinant le comportement des deux types d'usagers lors des interactions cycliste-piéton. Cette étude vise à comprendre comment les cyclistes et les piétons interagissent et s'ajustent mutuellement dans des situations de cohabitation. Pour ce faire, nous nous intéresserons particulièrement aux vitesses des cyclistes, en les analysant selon différents paramètres et situations. Tout d'abord, nous examinerons les variations de vitesse des cyclistes en fonction des distances qui les séparent des piétons, en nous concentrant sur le point critique de chaque interaction. Ce point critique correspond au

Tableau 3.2 Paramètres de regroupement des caractéristiques pour Traffic Intelligence

Paramètre	Type	Unité	Défaut	Description
mm-connection-distance	float	px	1	Distance de connexion dans le groupement d'entités
mm-segmentation-distance	float	px	1	Distance de segmentation dans le regroupement de caractéristiques
min-nfeatures-group	float	caractéristiques	3	Nombre moyen minimum de caractéristiques par image pour créer une hypothèse de véhicule

moment où la distance entre le cycliste et le piéton est minimale. Nous analyserons également les vitesses des cyclistes avant et après ce point critique.

Dans le cadre de cette étude, les vitesses des cyclistes seront également analysées en fonction du nombre de piétons sur la chaussée. Cette analyse nous permettra d'évaluer l'impact de la présence de piétons sur la perception et le comportement des cyclistes. De plus, elle nous permettra de vérifier si les cyclistes réagissent de la même manière que dans d'autres environnements, qu'ils soient motorisés ou non, où les vitesses diminuent lorsque la densité augmente [9]. Un indicateur additionnel de comportement est péoposé dans cette étude. Il permet d'examiner les fluctuations des angles de vélocité tout au long du déplacement des usagers, visant ainsi à décrire les modifications de direction dans leurs trajectoires.

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : ASSESSING THE SAFETY OF CYCLIST-PEDESTRIAN INTERACTIONS IN SEASONAL PEDESTRIAN STREETS USING COMPUTER VISION TECHNIQUES

Authors : Fatima-Zahra Dahak, Nicolas Saunier
Polytechnique Montréal, Montreal, Canada
fatima-zahra.dahak@polymtl.ca, nicolas.saunier@polymtl.ca,
Submitted to Transportation Research Record, December 2023.

4.1 Abstract

Pedestrian streets, also known as streets closed to motorized traffic, serve to promote active modes of transportation. This concept offers the potential to enhance safety for the most vulnerable road users while concurrently reducing air pollution. The present study aims to evaluate the safety of interactions between pedestrians and cyclists, focusing on three pedestrian streets within the city of Montreal. Data collection is performed using cameras during summer days in 2021. Following camera calibration, a total of 80 hours of data is analyzed. Each road user detected and tracked is categorized as either “Pedestrian” or “Cyclist”. The analysis involves the computation of indicators for individual cyclists (speed and acceleration) and for their interactions with pedestrians (distance and time to collision (TTC)). Two multivariate regression models were estimated to analyze the relationship between TTC or the cyclist speed as the dependent variables and several other factors.

The findings from the safety analysis reveal a discernible variation in safety indicator values among distinct sites, even those situated on the same thoroughfare, independent of regulatory measures. The statistical analysis indicates that elevated values of TTC correspond to high acceleration and increased distances between pedestrians and cyclists. Moreover, high TTC values are associated negatively with the numbers of pedestrians detected on the roadway in the camera’s field of view. In contrast, concerning speed, high values are linked to low TTC and distances, along with elevated acceleration values.

Keywords : road safety, surrogate measures of safety, cycling, active transportation, video analysis, walking.

4.2 Introduction

In response to the challenges posed by sustainability and livability in urban transportation systems, cities are actively exploring different strategies to promote sustainable modes of transportation, including walking, cycling, and public transport, while enhancing the quality of public spaces. One prominent approach involves reallocating road space traditionally reserved for car traffic to accommodate these sustainable modes. This reallocation can manifest in permanent forms, such as transforming car lanes or on-street parking spaces into cycling facilities, or temporary measures, like establishing car-free streets for specific periods known as "pedestrian streets".

Pedestrian streets provide a communal area primarily for pedestrians, occasionally shared with cyclists whether explicitly allowed or not [6]. The risk that cyclists pose to pedestrians is generally low compared to the hazards posed by motorized vehicles in other streets. Numerous studies consistently demonstrate the low risk of pedestrian injuries caused by cyclists [49–51]. Nevertheless, a recent study [5] illustrated that collisions between cyclists and pedestrians can occasionally lead to significant injuries. Given the relatively limited research in this particular environment, insights can be drawn from studies on shared spaces.

Shared spaces are characterized as environments "designed to improve pedestrian movement and comfort by reducing the dominance of motor vehicles and enabling all users to share the space rather than follow the clearly defined rules implied by more conventional designs" [9]. Furthermore, this layout can offer a safe and pleasant experience for cyclists, rendering it an increasingly adopted solution in urban settings, as evidenced by studies conducted in shared spaces [5, 7].

The elevated frequency of interactions between pedestrians and cyclists amplifies the intricacy of the scenario, thereby escalating the likelihood of conflicts and collisions. Despite this, shared spaces designed for both pedestrians and cyclists have the potential to augment road safety by introducing an element of ambiguity, thereby encouraging road users to exercise heightened attention and vigilance [6]. In this context, amenities dedicated to pedestrians, such as cafe terraces, playgrounds for children, and planted areas, can serve as effective regulatory measures. This is because they contribute to enhancing safety by functioning as obstacles that sustain the alertness of road users [41].

Over the past decade, Montreal has witnessed the implementation of various initiatives aimed at creating pedestrian-friendly environments. One such initiative is the Complete and Livable Streets program, which annually selects streets for pilot projects and promotes seasonal pedestrianization on commercial streets during the summer. These efforts have been further

accelerated by the COVID-19 pandemic, which has emphasized the importance of outdoor activities and the need for physical distancing. Consequently, these interventions have gained popularity and have experienced significant expansion.

Notably, during the summer, more than ten commercial streets in Montreal are closed to vehicular traffic, allowing the installation of terraces and urban furniture for pedestrians to enjoy. However, it is important to note that these pedestrian streets generally prohibit cycling. Cyclists are required to dismount and walk alongside their bicycles. Notwithstanding this regulation, bicycle traffic remains prevalent on these streets, particularly in situations where pedestrian density is low and there are few safe alternatives for cycling. In this paper, we aim to investigate the safety of pedestrians and cyclists in three seasonal pedestrian streets. Notably, in two of these districts, a new regulation allowing cyclists to ride at walking speed was implemented during the summer of 2021.

The observation of traffic conflicts has been utilized in safety studies since the 1970s. The growing preference for this approach is justified by several compelling reasons. Firstly, conflicts occur more frequently than actual crashes, especially among vulnerable road users. Secondly, analyzing conflicts provides the opportunity for proactive crash prevention rather than solely relying on crash data. This shift in focus has led to a more comprehensive understanding of road safety and the implementation of targeted safety measures [52, 53].

To the best of our knowledge, the safety of vulnerable road users in pedestrian streets has not yet been studied using computer vision techniques. This study aims to analyze user behavior and the safety of pedestrian streets by utilizing video data collected from three different districts in the city of Montreal. Additionally, we seek to assess the impact of the new regulation, allowing cyclists to remain on their bikes, by comparing the results across the three pedestrian streets. The subsequent section provides a review of the literature related to this subject. Following that, we present the detailed methodology employed for data collection and analysis, and subsequently discuss the empirical findings. Conclusions and limitations of the study are highlighted in the final section.

4.3 Literature review

The literature offers a range of methods for studying road user safety, encompassing crash data analysis, user behavior-based approaches, and conflict and interaction analysis. Previous studies have predominantly relied on crash data, which presents several limitations, as it cannot definitively attribute crashes to specific causes or sources. Moreover, due to the infrequent occurrence of crashes, the available data often prove inadequate [8]. Among

the alternative methods, traffic conflict techniques and more generally surrogate measures of safety have garnered widespread use and their validity has been investigated in several studies [11, 12, 54]. Initially proposed by Perkins and Harris in 1968 [10], these methods have been further developed and used in countless studies to identify dangerous interactions among road users. Leveraging these techniques facilitates the identification of factors that trigger potential crash situations, thereby offering several advantages, including crash prevention and enhanced analysis stemming from the abundance of conflict data compared to actual crash data [14].

As a result, the analysis of conflicts and interactions with safety indicators is now commonly used in safety studies. By employing safety indicators, it becomes feasible to quantitatively assess the spatial and temporal proximity between road users, thereby estimating the severity of an interaction [19]. For instance, [44] examined the interactions between cyclists and pedestrians at bus stops along segregated bike paths using automated video analysis. Three primary indicators were selected to characterize these interactions among vulnerable road users. Among these indicators, Time To Collision (TTC) and Post-Encroachment Time (PET) are the most commonly employed in the literature. TTC represents the time required for two road users to collide if they continue with their current movements. It requires a method for movement prediction, in order to detect if the users are on a collision course [2, 8, 55]. In contrast, PET is computed for situations where the road user trajectories intersect [2, 56]. It is defined as the time between the instant when the first road user leaves the crossing zone and the instant when the second road user reaches the same crossing zone.

Various studies extensively utilize these two indicators in their safety analyses. While conflicts were initially observed directly on the field by trained observers, video data has become more and more popular. Trained human observers manually determine factors from the video footage, as they might do on site [7]. Alternatively, semi-automated and fully-automated analysis of video data using computer vision techniques has also been employed [4, 35, 57–59]. For instance, Beauchamp, Saunier, and Cloutier [4] investigated the safety of automated shuttles in urban traffic by analyzing their interactions with other road users. They compared the safety level of these interactions with those involving conventional vehicles and other road users, considering various safety indicators such as speed and acceleration, time headway, TTC, PET, and speed differences during interactions. Fu et al. [60] also studied interactions between pedestrians and vehicles. They used video-based trajectory data to assess the safety of secondary pedestrian-vehicle interactions at non-signalized intersections, including an analysis of the PET indicator. The findings from their study emphasize the heightened risks associated with secondary interactions due to factors such as unclear right-of-way, driver acceleration attempts, and the complex intersection scenario.

"Traffic Intelligence" (TI) is an open-source computer vision-based project developed at Polytechnique Montreal, widely used in numerous studies for extracting road user trajectories and evaluating safety [26] [1]. The available tracker employs a feature-based tracking approach [28] : It outputs the road user positions and velocities from video sequences, and also classifies users based on their physical features, position, and velocity. Extensive validation studies have demonstrated the project's effectiveness and potential in traffic and safety analysis [8, 29–31]. The project has been applied to assess safety for various user types in diverse environments. For instance, [34] investigated the safety of cycle tracks by analyzing interactions between cyclists and turning vehicles at signalized intersections. Similarly, [36] studied non-conforming pedestrian behavior at urban intersections with the same tools. Several studies have explored conflicts involving vehicles at urban intersections using the TI project [35, 39, 40, 60]. However, this project has been applied in only a few investigations to study less structured environments and interactions among active transport users. In one example, [9] investigated the safety of cyclist-pedestrian interactions on the McGill University campus in Montreal, Canada, using the TI project. This study encountered challenges related to the nature of the involved users, their low speeds, and small physical sizes, requiring manual validation of tracking and classification errors. In this research, cyclist-pedestrian interactions in pedestrian streets will be analyzed using the TI tools, addressing a gap in the current studies that have not examined such interactions in pedestrian environments.

4.4 Methodology

The methodology comprises four steps, illustrated in Figure 4.1. Initially, data preparation involves camera calibration and the derivation of the camera homography matrix. Subsequently, the video analysis step generates user trajectories using a feature-based tracker. This involves three main steps : feature tracking, feature grouping, and road user classification. Following this, an optimization of tracking parameters is undertaken to acquire more fitting parameters for the subsequent analysis. Ultimately, the safety analysis is carried out, centering on cyclist-pedestrian interactions. Various indicators, including speed, acceleration, TTC, and minimum distances between cyclists and pedestrians, are employed for a comprehensive evaluation.

1. Available at `https://trafficintelligence.confins.net`.

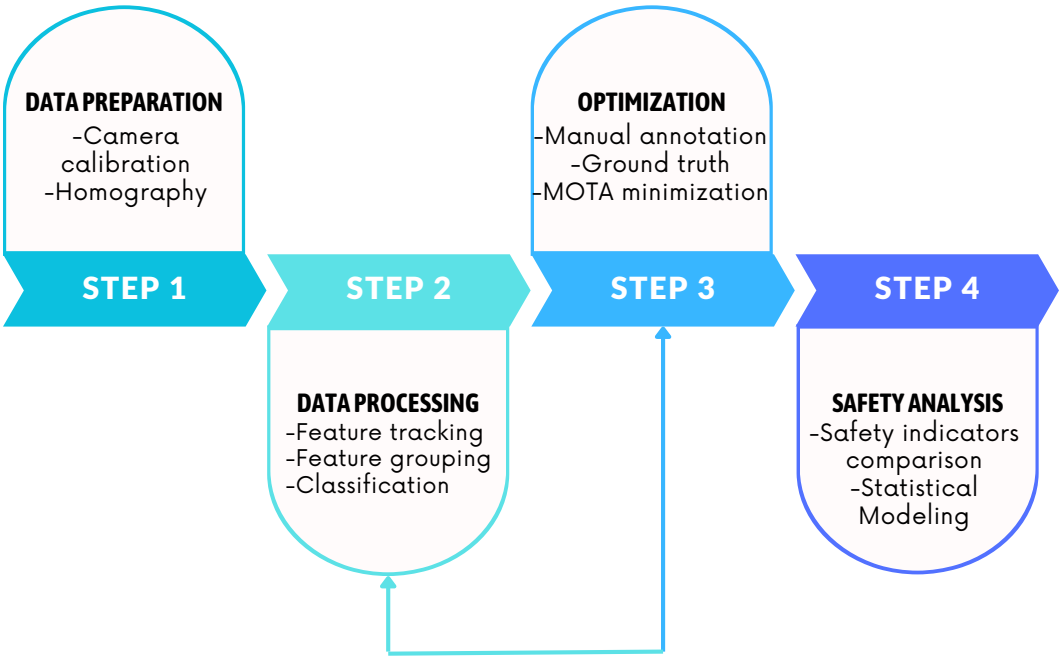

FIGURE 4.1 Methodology overview

4.4.1 Data preparation

In the first step, data preparation is conducted using the open-source TI project [26]. To accurately establish the real-world coordinates from the captured images, camera calibration is essential to link the image coordinates with real-world coordinates using the camera intrinsic parameters and a site-specific homography matrix [25, 45]. This calibration is achieved through an integrated tool available in the TI project, which generates the homography matrix based on point correspondences.This preparatory phase facilitates the estimation of metric measures such as speed, acceleration, and other pertinent indicators. It is imperative to conduct the calibration step in each data collection session to address the intrinsic variability in camera perspectives.

4.4.2 Video Analysis and Optimisation

After completing the calibration process, the subsequent phase involves the extraction and categorization of road user trajectories. For this purpose, the feature-based tracker integrated into the TI project is employed. In this study, the identified trajectories are divided into two

primary groups : pedestrians and cyclists. While other categories, such as motorcyclists and cars, are occasionally observed despite their prohibition from these streets, their presence is only noticeable on one street. Despite their infrequent occurrence, an 'other' category encompasses miscellaneous types, such as skateboard and rollerblade users. The primary types of tracking errors include over-segmentation, where more than one trajectory is assigned to a single user, and over-grouping, which occurs when multiple users share the same trajectory despite not being in a coordinated movement. Additionally, false alarms, such as trees, shadows, and birds, also contribute to the observed errors.

Data collection was carried out at seven locations spanning three pedestrian streets over multiple days. Given the substantial amount of data to be analyzed and the challenges associated with tracking vulnerable road users in such environments, manual tracking parameter optimization becomes impractical. Approximately 20 minutes of footage is reviewed for each of the seven investigated sites, manually rectifying any significant errors using the TI Traffic Annotation Tool. Subsequently, the trajectories corrected manually serve as ground-truth trajectories and are used to enhance the tracking parameters through iterative parameter optimization using the NOMAD (Nonlinear Optimization by Mesh Adaptive Direct Search) black-box optimization software [48]. This tool is used to optimize the tracking accuracy measure MOTA (multiple object tracking accuracy) by finding tracking parameters that generate trajectories that more closely match the ground-truth [61]. To accelerate the parameter adjustment process, optimization focused solely on the grouping parameters.

4.4.3 Safety analysis

In this research, safety is assessed through the utilization of multiple indicators. Initially, two distinct behavioral variables pertaining to cyclists, namely speed and acceleration, are computed from the cyclist trajectories at each temporal increment. To ensure the accuracy of the data, a smoothing filter, specifically the Moving Window Average filter with a half-width of five temporal instants (approximately 0.15 s), is implemented before deriving these variables. Despite the application of the Moving Window Average filter, occurrences of elevated speed and acceleration values persist, surpassing 30 m/s and 10 m/s^2, respectively. Consequently, values surpassing 8 m/s and 2 m/s^2 have been omitted from the analysis.

An interaction is characterized by the proximity of two users within a defined time period. The focus of this study is solely on pedestrian-cyclist interactions when users are on a collision course and a TTC can be computed. The calculation of TTC for each interaction involves a simple constant velocity motion prediction method, considering both speed and direction. This method utilizes a collision distance threshold of 1 m. In addition, the distance

is computed for each interaction. Speed and acceleration for each cyclist, distance and TTC for each interaction are all continuous measures recorded at each instant, from which aggregate statistics, such as average, quartiles, and centiles, are derived. In this study, the 15^{th} centile is selected for TTC, denoted TTC_{15}, the minimum for distance, denoted d_{min}, and the 85^{th} centile as the maximum value for speed and acceleration of cyclists, denoted v_{85} and a_{85} respectively. The selection of the 85^{th} and 15^{th} centiles is deliberate, aiming to capture the upper and lower extremes of the distributions while mitigating the impact of potential outliers.

4.4.4 Statistical Modeling

To better understand the relationship between multiple variables, we develop statistical models for two key interaction variables : TTC_{15} and v_{85}. Each of these variables is the dependent variable in separate models, capturing the dynamics of interactions between pedestrians and cyclists. The general model is outlined as follows :

$$y_i = \beta_0 + \sum_j \beta_j \cdot \mathrm{x}_{i,j} + \epsilon_i \tag{4.1}$$

where :

- i is the index of the pedestrian-cyclist interaction ;
- j is the independent variable index ;
- y_i is the dependent variable, either $log(TTC_{15})$ or $log(v_{85})$ for interaction i ;
- $x_{i,j}$ is the value of the independent variable j for interaction i ;
- β_0 is the model intercept ;
- β_j is the coefficient for covariate j ;
- ϵ_i is the regression error.

Several variables were evaluated as potential independent variables for the statistical models. Furthermore, TTC_{15} was tested as an independent variable for the speed model. The independent variables are outlined as follows :

- d_{min} is the minimum distance between pedestrians and cyclists within an interaction ;
- $\bar{v}$ is the mean speed of the cyclist ;
- The variables v_{85}, v_{50}, and v_{15} represent the 85^{th} centile, the median, and the 15^{th} centile of the cyclist's speed, respectively.
- $\bar{a}$ is the mean acceleration of the cyclist ;
- a_{85}, a_{50} and a_{15} are the 85^{th} centile, the median and the 15^{th} centile of the cyclist's acceleration ;

— n_{ped} represents the number of pedestrians detected within the camera view, excluding sidewalks and terraces due to multiple obstacles causing occlusions that hinder trajectory extraction. This count is considered at the moment when the distance is minimal during an interaction between a pedestrian and a cyclist.

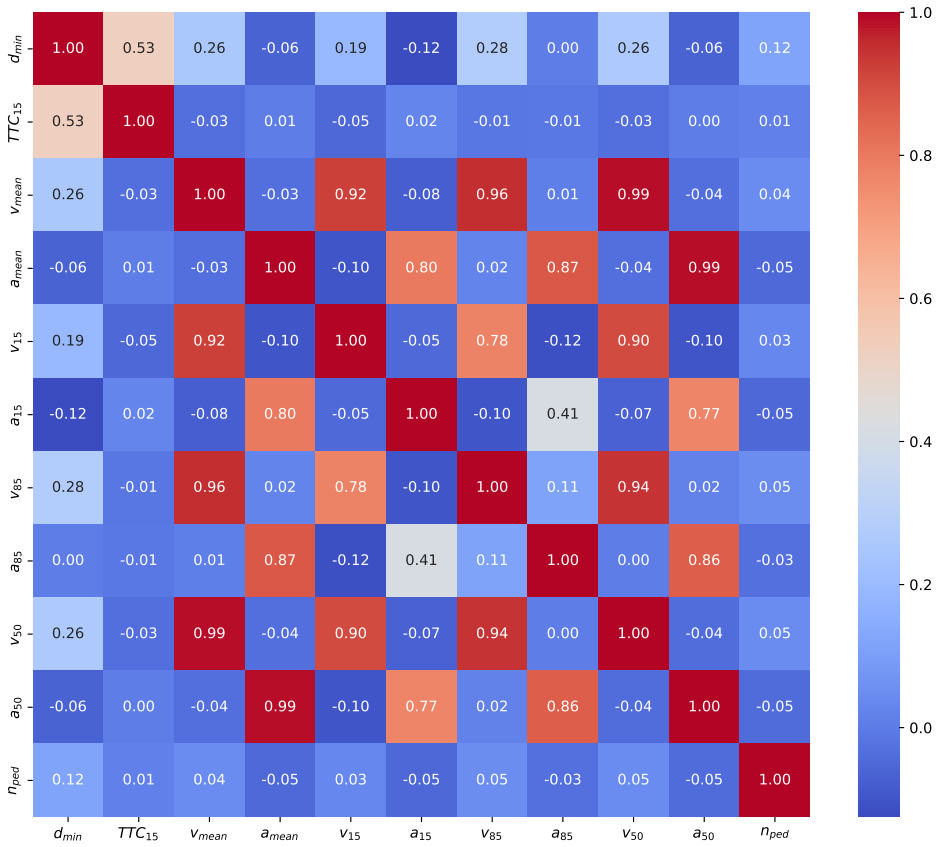

FIGURE 4.2 Correlation Matrix

Prior to embarking in the model construction phase, a correlation analysis is undertaken among the variables considered for inclusion in the two statistical models. This preliminary investigation is imperative for assessing the independence of covariates before the model development stage. Figure 4.2 illustrates the correlation matrix encompassing the diverse variables under consideration for model incorporation.

Clearly, there is a strong correlation between the four speed statistics on the one hand, and the four acceleration statistics on the other hand. Consequently, only one speed statistic

and one acceleration statistic will be utilized in the same regression model. Most correlation coefficients are low, except for the correlation between TTC_{15} and d_{min}, which could be deemed moderate.

4.5 Results

4.5.1 Video data description

This study relies on data collected during the pilot project for the cohabitation of cyclists and pedestrians in pedestrian streets. Some Montreal boroughs chose to experiment in 2021 with a novel regulation allowing cyclists to stay on their bikes and move at a walking pace, except for Bernard. Table 4.5.1 and Figure 4.3 illustrate the various sites under investigation, the number of hours analyzed, the count of cyclist-pedestrian interactions, and the detected numbers of pedestrians and cyclists.

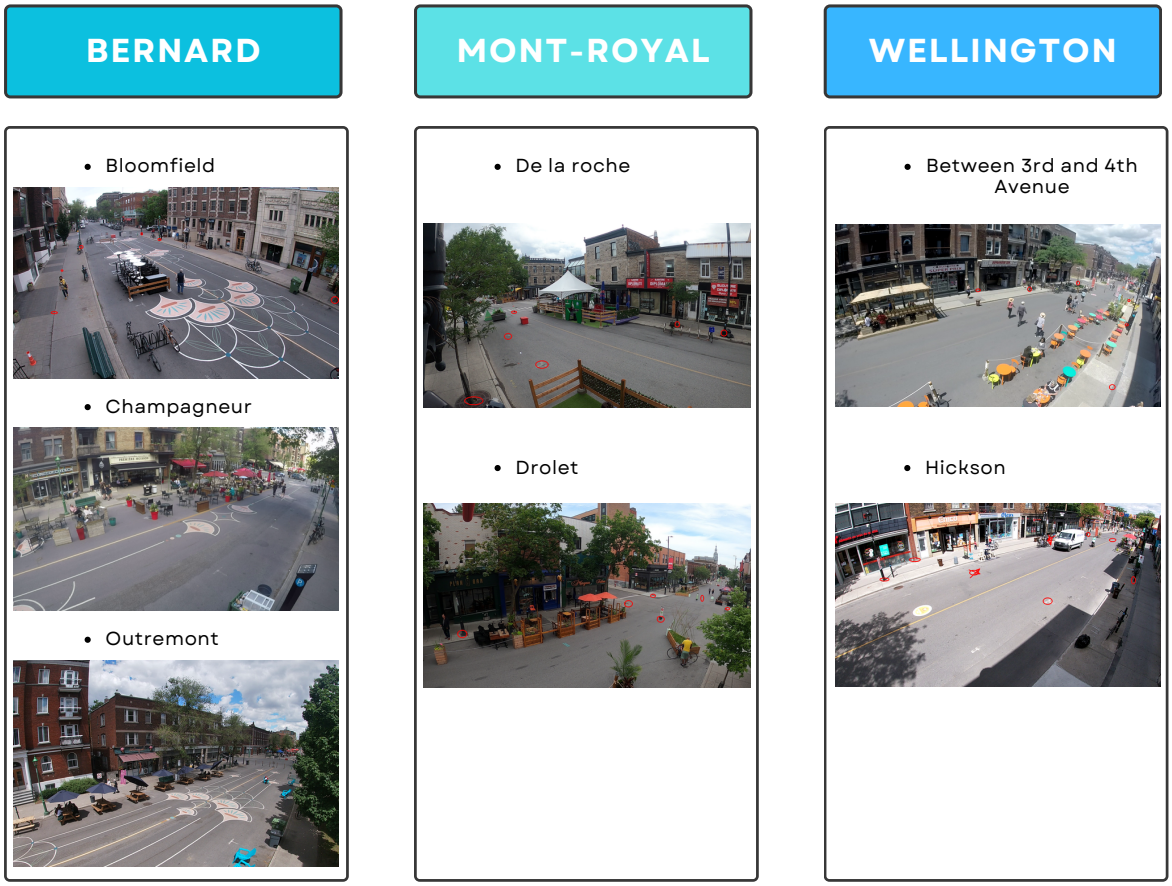

FIGURE 4.3 Camera Views of collection sites

— The Mont-Royal Avenue :
  — Section 1 : between the De La Roche Street and Christophe-Colomb Avenue ;
  — Section 2 : between the Drolet Street and Henri-Julien Avenue.
— The Wellington Street :
  — Section 1 : between the Hickson and de l'Église Streets ;
  — Section 2 : between the 3rd and 4th Avenues.
— The Bernard Avenue :
  — Section 1 : between the Champagneur and Outremont Avenues ;
  — Section 2 : between the Outremont and Wiseman Avenues ;
  — Section 3 : between the Bloomfield and Champagneur Avenues.

The sites on Bernard Avenue were included to serve as comparison with the others, since cyclists had to step down from their bikes on that street, while the two other streets allowed cycling at walking speed. This street is important as certain cyclists persist in traversing these streets despite the prohibition.

Tableau 4.1 Detailed description of data collected in the three streets (# means number, Ped. and Cyc. respectively pedestrians and cyclists, Inter. the pedestrian-cyclist interactions)

Street	Cycling	Site	Day 2021	Duration collected	# Inter.	# Ped.	# Cyc.
Bernard	Prohibited	Bloomfield	June 18th	5 h 18 min	22	587	1049
		Outremont	June 16th	8 h 33 min	45	1186	817
		Champagneur	June 16th	8 h 22 min	23	384	1307
Mont-Royal	Allowed	De la Roche	July 16th	5 h 55 min	385	2642	4760
			July 28th	5 h 47 min	249	2857	3671
			July 30th	5 h 55 min	545	2862	4993
		Drolet	July 7th	2 h 44 min	26	1356	1146
			July 23rd	5 h 56 min	331	3635	4433
			July 28th	6 h 17 min	313	3387	4565
Wellington	Allowed	Between 3e	June 23rd	5 h 32 min	64	1738	818
		& 4e Avenue	July 22nd	6 h 18 min	102	1784	1461
		Hickson	June 23rd	2 h 39 min	7	82	1092
			July 22nd	5 h 55 min	44	303	2288
			Aug. 10th	5 h 14 min	10	61	1225

Figure 4.3 illustrates the different camera angles, which may vary slightly from day to day, despite being consistently installed at the same location. To ensure high-quality video capture, a GoPro camera was mounted on poles, such as lamp posts, strategically placed along the streets. The selection of sites aimed to minimize distractions and provide clear camera perspectives [4].

4.5.2 User Analysis

In the following, boxplots are used to show the distribution of variables of interest. The green line within the box symbolizes the median, while the red line denotes the mean value. "The whiskers extend from the box to the farthest data point lying within one and a half times the interquartile range (IQR) from the box" [2]. Data points beyond the whiskers, often considered as outliers, are then displayed individually.

Cyclist Speeds

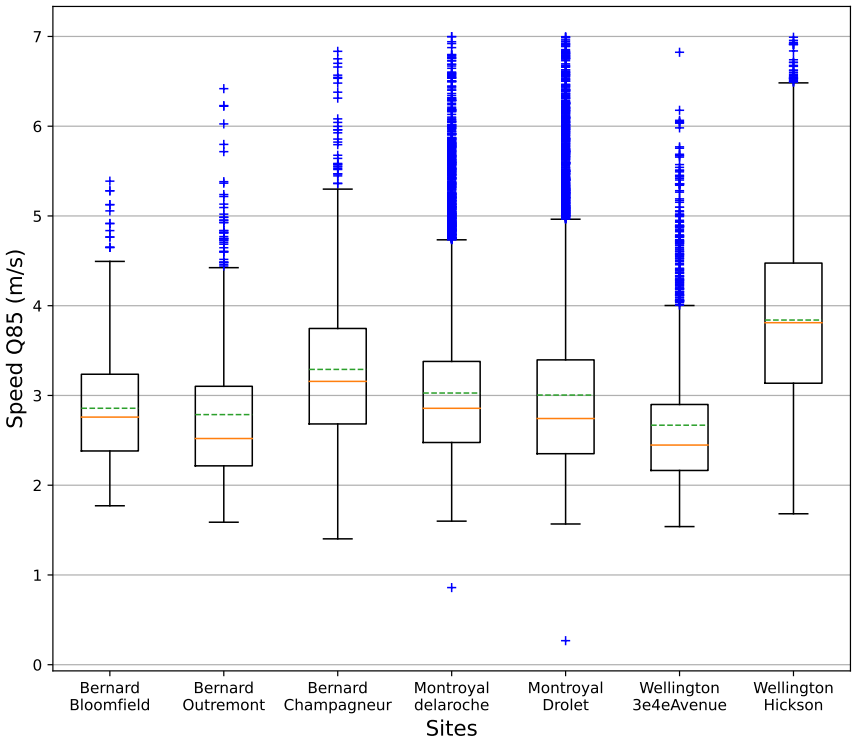

FIGURE 4.4 Boxplot for the 85$^{\text{th}}$ centiles of cyclist speed v_{85} per site

Based on the boxplots of v_{85} in Figure 4.4, the Wellington and Hickson site exhibits the highest speeds, with a median value of approximately 3.7 m/s (13.3 km/h). These elevated speeds may be associated with lower pedestrian density or a more open street layout compared to other sites. The street's openness provides cyclists with a favorable space, minimizing obstacles and enabling swift passage, potentially leading to a deviation from regulations. It is noteworthy that this site features the fewest dedicated pedestrian facilities. Following closely are the Bernard Champagneur site and the two Mont-Royal street sites. Conversely,

2. `https://matplotlib.org/stable/api/_as_gen/matplotlib.pyplot.boxplot.html`

Wellington between the 3rd and 4th Avenues, and Bernard Outremont record the lowest speeds among cyclists in comparison to other sites. For Wellington Street, significant variations in cycling speeds are observed between the two locations on the same street where cycling is allowed.

Cyclist Accelerations

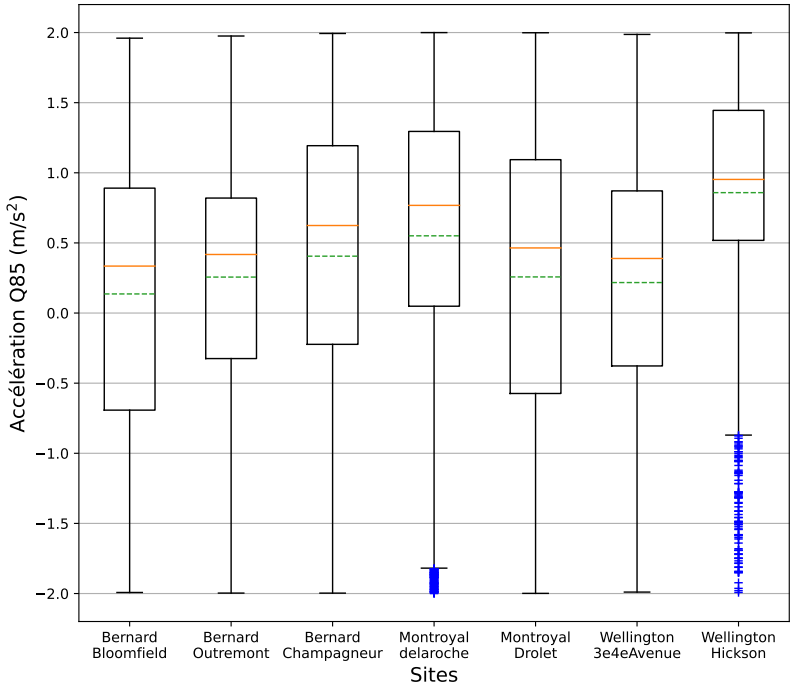

FIGURE 4.5 Boxplot of the 85th centiles of the cyclist acceleration a_{85} per site

As seen in Figures 4.5 and 4.6, the Wellington and Hickson site exhibited also the highest acceleration and deceleration values, closely followed by the Mont-Royal and De la Roche site, as well as the Bernard and Champagneur site. Conversely, the lowest values were observed at Wellington, between the 3rd and 4th Avenues, and Bernard Bloomfield. This order of sites is maintained in the results for decelerations as well. The Wellington Hickson site retains its position as the location with the highest values, not only for speed but also for acceleration and deceleration. Conversely, the Wellington site between the 3rd and 4th Avenues and Bernard Bloomfield consistently exhibit the lowest values for both acceleration and deceleration.

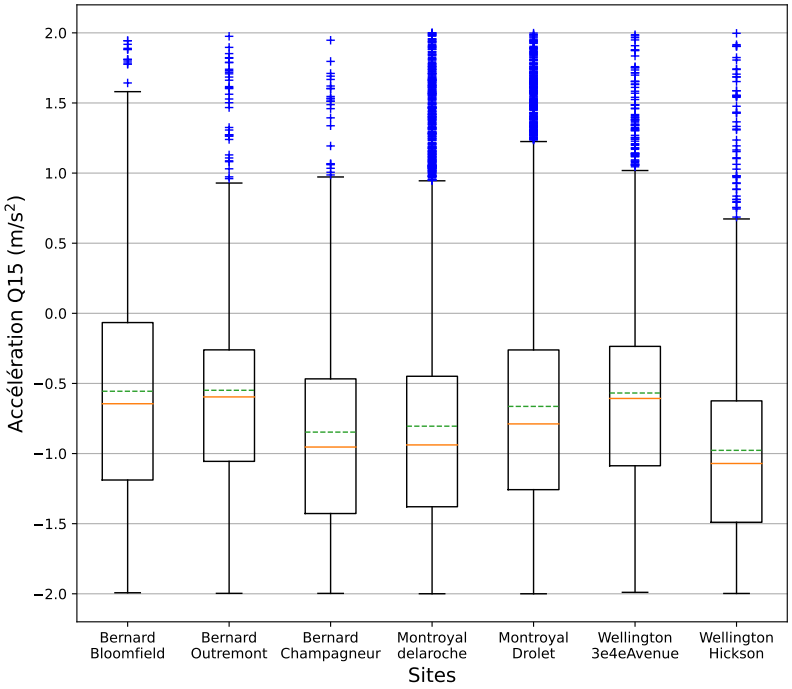

FIGURE 4.6 Boxplot of the 15$^{\text{th}}$ centiles of the cyclist acceleration a_{15} per site

4.5.3 Interaction Analysis

Minimum Distances

Figure 4.7 shows certain sites consistently display higher distances. The highest distances between cyclists and pedestrians are measured at the Wellington and Hickson location, followed by Bernard and Champagneur and Bernard and Bloomfield. In contrast, the most confined spacings are identified at the Mont-Royal and Drolet locale, akin to those at the Mont-Royal and De la Roche site along the same thoroughfare. It is noteworthy that the street layout and the arrangement of pedestrian facilities significantly constrain the width of the road at the Mont-Royal Street sites, as depicted in the camera views in Figure 4.3. This configuration causes proximity between pedestrians and cyclists.

Time To Collision

The values of TTC_{15} are shown in Figure 4.8, with the site of Bernard and Champagneur and Mont-Royal and Drolet exhibiting the lowest values, corresponding to the least safe conditions. The Wellington Street locations, specifically between the 3$^{\text{rd}}$ and 4$^{\text{th}}$ Avenues and at the intersection with Hickson, exhibit elevated (safer) TTC values. Following closely in this

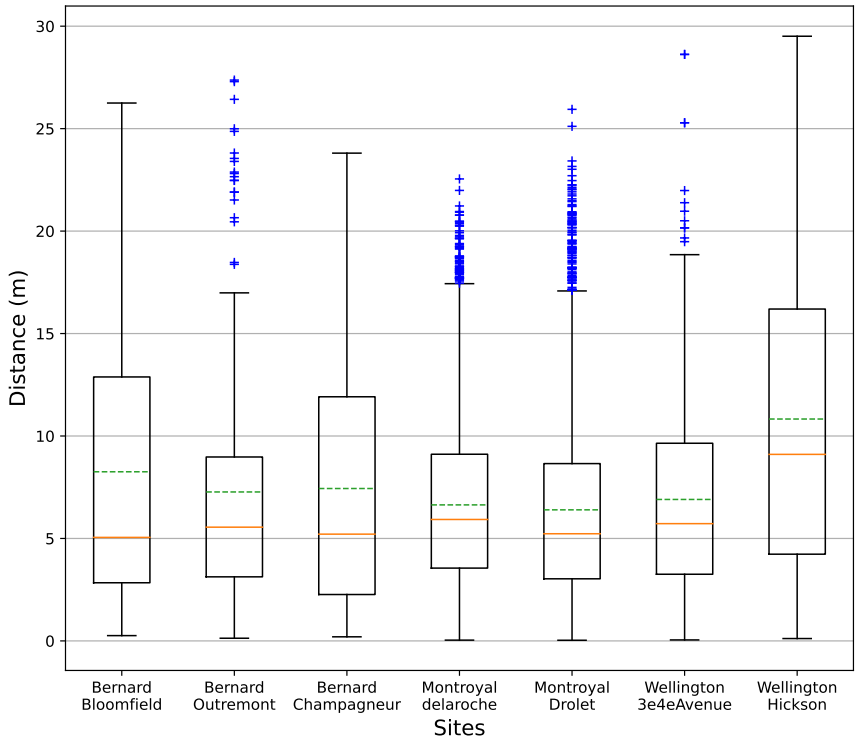

FIGURE 4.7 Boxplot of minimum cyclist-pedestrian distances d_{min} per site (for interactions with a collision course)

regard is the Mont-Royal and De la Roche site. The Mont-Royal Drolet, Bernard Bloomfield, and Bernard Outremont sites show almost identical median and mean values, although with slightly different data ranges. Consequently, we can infer that, in terms of TTC, the sites with the most hazardous interactions are Mont-Royal and Drolet, and Bernard and Champagneur.

4.5.4 Regression analysis

As discussed, high correlation exists between the three speed measures and between the three acceleration measures. It is not clear which would be more related to the dependent variable, so each was tested in turn and the measure that resulted in the highest adjusted R2 was retained. Consequently, in the TTC_{15} model, the 85^{th} centile of acceleration was replaced with the 15^{th}, improving the model's quality. Table 4.5.4 displays the descriptive statistics of the interaction data employed for the statistical analysis. The results of the statistical models are presented in Tables 4.3 and 4.4.

Interactions at higher speeds generally result in reduced TTC_{15} values, aligning with the expectation that, for a given distance between two users on a collision course, higher speeds

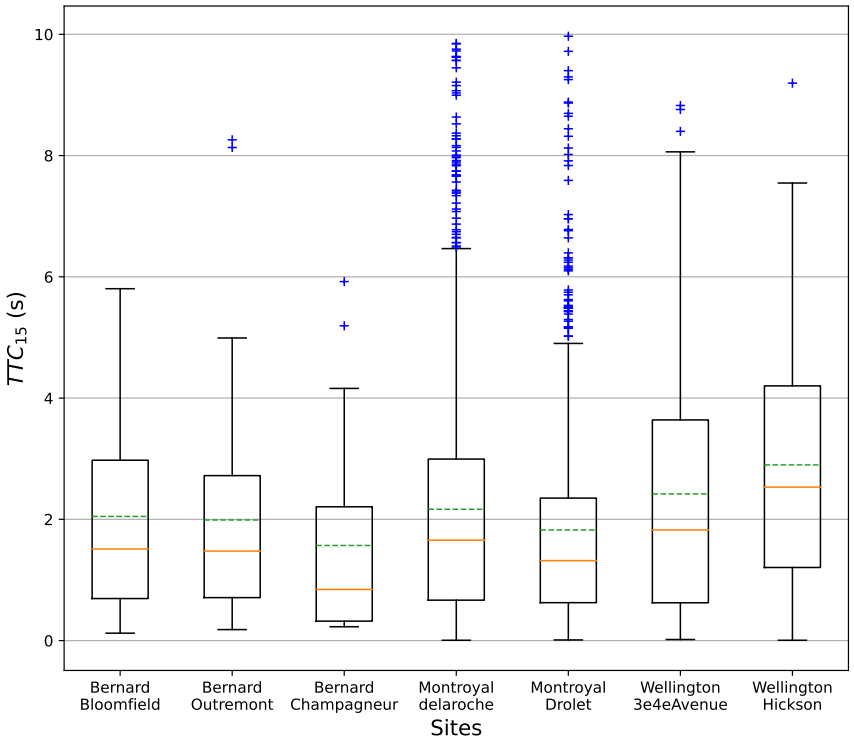

FIGURE 4.8 Boxplot of the 15$^{\text{th}}$ centiles of the TTC_{15} per site (for interactions with a collision course)

TABLEAU 4.2 Descriptive statistics of the variables extracted for each interaction with a collision course

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
d_{min}	4.0642	3.7203	0.0320	1.2815	3.0568	5.4660	23.8104
TTC_{15}	2.0893	1.9491	0.0055	0.6508	1.5519	2.8496	9.9683
$\bar{v}$	2.5426	0.7318	0.7505	2.0573	2.3184	2.7763	6.8840
$\bar{a}$	-0.3802	1.7197	-14.7073	-0.3094	-0.0466	0.0921	11.7592
v_{15}	2.2925	0.7006	0.3729	1.8806	2.1199	2.5020	6.5714
a_{15}	-1.5647	1.8458	-14.7073	-2.1094	-1.2670	-0.7183	11.7592
v_{85}	2.7859	0.8536	1.1937	2.2317	2.5153	3.0844	7.0891
a_{85}	0.7943	2.2295	-14.7073	0.3565	1.0018	1.7840	17.1118
v_{50}	2.5382	0.7355	0.5793	2.0543	2.3021	2.7690	6.9210
a_{50}	-0.3702	1.7680	-14.7073	-0.3610	-0.0478	0.1481	12.8209
n_{ped}	1.3292	0.5776	1.0000	1.0000	1.0000	2.0000	4.0000

lead to lower TTC. This phenomenon suggests that safety in pedestrian areas tends to increase when cyclists travel at lower speeds. Moreover, a lower deceleration (a_{15}, typically negative) exhibits a positive correlation with high TTC_{15} values : stronger decelerations are therefore

Dep. Variable :	$log(TTC_{15})$	**R-squared :**	0.372
No. Observations :	2166	**Adj. R-squared :**	0.365

	coef	**std err**	**t**	**P> |t|**
$const$	0.9317	0.819	1.138	0.255
$log(v_{85})$	-0.7400	0.085	-8.753	**0.000**
a_{15}	0.0237	0.012	2.040	**0.041**
$Outremont$	-0.3308	0.951	-0.348	0.728
$Champagneur$	-1.6330	1.168	-1.399	0.162
$DelaRoche$	-0.7661	0.821	-0.933	0.351
$Drolet$	-0.7766	0.823	-0.943	0.346
$34Avenue$	-0.3556	0.837	-0.425	0.671
$Hickson$	0.1739	0.884	0.197	0.844
n_{ped}	-1.1156	0.474	-2.356	**0.019**
$n_{ped} * Outremont$	0.9044	0.607	1.490	0.136
$n_{ped} * Champagneur$	1.7898	0.863	2.075	**0.038**
$n_{ped} * DelaRoche$	1.0559	0.476	2.219	**0.027**
$n_{ped} * Drolet$	1.0419	0.479	2.176	**0.030**
$n_{ped} * 34Avenue$	0.6457	0.496	1.302	0.193
$n_{ped} * Hickson$	0.9329	0.539	1.731	**0.084**
d_{min}	0.7239	0.226	3.203	**0.001**
$d_{min} * Outremont$	-0.5926	0.228	-2.602	**0.009**
$d_{min} * Champagneur$	-0.5217	0.234	-2.230	**0.026**
$d_{min} * DelaRoche$	-0.4837	0.226	-2.139	**0.033**
$d_{min} * Drolet$	-0.5352	0.226	-2.366	**0.018**
$d_{min} * 34Avenue$	-0.5082	0.227	-2.241	**0.025**
$d_{min} * Hickson$	-0.6085	0.227	-2.677	**0.007**

TABLEAU 4.3 OLS Regression Results for $log(TTC_{15})$ for interactions with collision course

associated with lower TTC, as may be expected in the case of harsher evasive actions.

An augmented presence of pedestrians generally corresponds to a diminished TTC_{15}. This correlation is substantiated by the TTC model. Upon scrutinizing the different sites, it becomes apparent that, apart from Bernard and Champagneur, the pedestrian count demonstrates an inverse relationship with the Time-to-Collision (significant at four sites). Regarding the minimum distance d_{min}, an increase is consistently associated with heightened TTC_{15} values across all sites with similar coefficients.

In the context of the speed model outlined in Table 4.4, congruent with the $log(TTC_{15})$ model, there persists a consistent negative correlation between $log(TTC_{15})$ and speed. The variable d_{min} exhibits a positive correlation with v_{85}, consistent with the expectation that cyclists, aiming for higher speeds, tend to distance themselves from pedestrians. Further-

more, in accordance with expectations, there is a positive correlation observed between the acceleration parameter a_{85} and the corresponding speed parameter v_{85}. The Bernard and Outremont site has lower speeds than the others, but this is not significant. Wellington and Hickson, as well as Mont Royal and Drolet, and Mont Royal and de la Roche, have significantly higher speeds than Bernard and Bloomfield. The variable n_{ped} was not included in the model due to its lack of statistical significance, showing the absence of apparent effect of the number of pedestrians on cyclist speed.

Dep. Variable :	$log(v_{85})$	**R-squared :**	0.170
No. Observations :	2166	**Adj. R-squared :**	0.167

	coef	**std err**	**t**	**P> |t|**
$const$	0.7221	0.052	13.908	**0.000**
d_{min}	0.0298	0.002	17.415	**0.000**
$log(TTC_{15})$	-0.0480	0.005	-9.225	**0.000**
a_{85}	0.0141	0.002	5.956	**0.000**
$Outremont$	-0.0112	0.063	-0.177	0.859
$Champagneur$	0.0626	0.073	0.862	0.389
$DelaRoche$	0.1310	0.053	2.495	**0.013**
$Drolet$	0.1882	0.053	3.555	**0.000**
$34Avenue$	0.0791	0.055	1.428	0.154
$Hickson$	0.1926	0.061	3.165	**0.002**

Tableau 4.4 OLS Regression Results for $log(v_{85})$ for interactions with a collision course

4.6 Conclusion

This study examined the safety of interactions between cyclists and pedestrians on pedestrian streets in Montreal. Video data were collected and analyzed using computer vision techniques to extract user trajectories. Two analyses were conducted in this article. The first focused on safety indicators for cyclists and interactions, while the second involved a statistical analysis of two linear regression models for the explained variables $log(TTC_{15})$ and $log(v_{85})$.

In the security analysis, four indicators were computed, namely v_{85}, a_{85}, TTC_{15}, and d_{min}. For each trajectory, v_{85} and a_{85} were extracted. The results indicate that the Wellington Hickson site exhibits the highest values, followed by Bernard Champagneur, while the other sites show similar results. Regarding acceleration and deceleration, the sites displayed similar outcomes for these two variables. Wellington Hickson maintains the top position, followed by Mont-Royal De la Roche, with Wellington between the 3rd and 4th Avenues having the lowest values.

Following that, we extracted the indicators TTC_{15} and d_{min} for each interaction. The Wellington Hickson site consistently yields the highest values for both indicators, suggesting safer conditions and establishing it as the safest site. In contrast, the Bernard Champagneur and Mont-Royal Drolet sites consistently display the lowest values for TTC_{15}.

Statistical analysis reveals that, for all sites, increased TTC_{15} values are linked to elevated accelerations and extended distances. Notably, except for the Wellington and Hickson, and Bernard and Outremont site, TTC_{15} values at all other sites exhibit correlations with pedestrian counts. In the speed model, elevated v_{85} values demonstrate connections with reduced distances, higher accelerations, and diminished TTC_{15} values.

In future investigations, it is essential to consider various limitations. Unlike conventional vehicles and their interactions with fellow road users, cyclists and pedestrians often move at comparable speeds, especially within pedestrian zones where cyclists adhere to walking velocities. Their physical appearances are also similar ; thus, these limitations diminish the effectiveness of the classification tools. Additionally, the tool encounters challenges related to trajectory detection and tracking. Addressing these issues requires manual validation to ascertain user types and eliminate spurious alerts. Several additional factors related to the studied environment merit consideration for future analyses, including the width of each thoroughfare and the gradient.

4.7 Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the financial support of MITACS and two boroughs of the City of Montreal, “Plateau Mont-Royal” and “Verdun” for this project.

CHAPITRE 5 COHABITATION CYCLISTE-PIÉTON

L'objectif initial de ce projet, tel qu'exploré dans le chapitre précédent, était d'évaluer la cohabitation cycliste-piéton dans les rues piétonnes. L'objectif du chapitre précédent est d'étudier la sécurité des interactions entre cyclistes et piétons en utilisant des indicateurs tels que le Temps à la collision (TTC) et la distance minimale entre les piétons et les cyclistes pour chaque interaction où les deux trajectoires se croisent, ainsi que les statistiques de vitesse et d'accélération des cyclistes. Cependant, ce chapitre présente des résultats complémentaires, contribuant ainsi à la réalisation de l'objectif final de cette recherche. Celui-ci se concentre sur l'étude du comportement des usagers actifs, à savoir les cyclistes et les piétons, dans les zones piétonnes. Cette évaluation est approfondie en analysant les comportements des usagers vulnérables évoluant dans cet environnement piétonnier.

5.1 Définition de la cohabitation cycliste-piéton

Avant d'entamer l'analyse de la cohabitation, il est impératif de définir ce concept. La définition explicite du terme "cohabitation" facilite la sélection d'indicateurs et de mesures pertinents. Elle assure également une interprétation cohérente des résultats.

Le concept de "cohabitation" entre les usagers de la route demeure ambigu et n'a pas été clairement défini ni explicitement abordé dans la littérature scientifique jusqu'à présent, à notre connaissance. Cependant, une référence récente [62] a introduit un terme similaire, "coexistence", dans son analyse. Dans la littérature actuelle, l'évaluation de la sécurité survient lors du partage d'un même espace par les usagers de la route, en examinant les conflits, les interactions ou les collisions entre eux. Il convient de souligner que la cohabitation et la sécurité sont deux concepts intrinsèquement liés. La cohabitation des usagers dans un espace peut être définie comme l'assurance de la sécurité dans cet espace. En d'autres termes, si la sécurité des usagers s'améliore, la cohabitation tend également à s'améliorer, établissant ainsi un lien étroit entre ces deux notions.

La cohabitation dans ce projet sera examinée sous deux aspects : la sécurité et l'adaptation mutuelle des usagers. La sécurité des interactions entre les cyclistes et les piétons dans les zones piétonnes est étudiée selon divers indicateurs de sécurité dans le chapitre précédent. Le second aspect requiert une analyse du comportement des usagers de la route.

Ce chapitre s'appuiera sur des mesures supplémentaires visant à caractériser le comportement des usagers. En particulier, nous examinerons toutes les interactions entre cyclistes et piétons.

Nous débuterons par analyser les variations de vitesse en fonction de la distance minimale entre les usagers. Cette mesure éclairera le comportement des cyclistes lors de l'approche des piétons (avant d'atteindre la distance minimale), après d'avoir atteint le point le plus proche des piétons et au moment le plus proche entre les deux parties. Parallèlement, nous étudierons les fluctuations de la vitesse des cyclistes en fonction du nombre des piétons présents sur la chaussée, cette mesure étant déterminée au moment où la distance minimale est atteinte.

Une analyse complémentaire des angles de vélocité est entreprise pour examiner les fluctuations dans les mouvements des usagers piétons et cyclistes, permettant ainsi d'identifier lesquels des piétons et cyclistes modifient plus la direction de leur mouvement.

5.2 Comportement des usagers

Cette section se consacre à l'étude du comportement des usagers à travers l'analyse des vitesses des cyclistes. Cette analyse repose sur les données présentées dans le chapitre précédent. La plupart des résultats sont illustrés à l'aide de graphiques en violon, lesquels dépeignent, pour chaque site, les résultats sous la forme d'une courbe enveloppée, où les extrêmes représentent les valeurs maximales et minimales. De plus, à un emplacement particulier, la largeur du violon reflète la densité des données pour cette valeur.

5.2.1 Selon la distance

Dans cette analyse, nous calculons les vitesses des cyclistes au moment où ils sont à leur distance minimale des piétons, ainsi que dans les intervalles avant et après l'instant où le distance minimale est atteinte. Cette approche permettra d'évaluer l'influence de la proximité entre les cyclistes et les piétons sur les vitesses.

La Figure 5.1 présente le rapport entre les v_{85} des cyclistes avant et après avoir atteint la distance minimale avec un piéton. Ce rapport est déterminé par la formule suivante :

$$\text{Ratio} = \frac{v_{85} \text{ après l'instant où } d_{min} \text{ est atteint}}{v_{85} \text{ avant d'atteindre } d_{min}}$$

Pour assurer une meilleure visibilité, les données entre 0 et 2 rad sont présentées à la figure 5.2.

D'après les Figures 5.1 et 5.2, la plupart des ratios de vitesses des cyclistes se situent dans l'intervalle de 0 à 2. Les valeurs médianes oscillent autour de l'unité, indiquant que la plupart des cyclistes ne modifient pas considérablement leur vitesse avant et après le passage le plus proche d'un piéton. L'amplitude des données est plus élevée pour les sites de l'avenue du Mont Royal et de la rue Wellington, où les cyclistes peuvent rester sur leur vélo. Ainsi, des

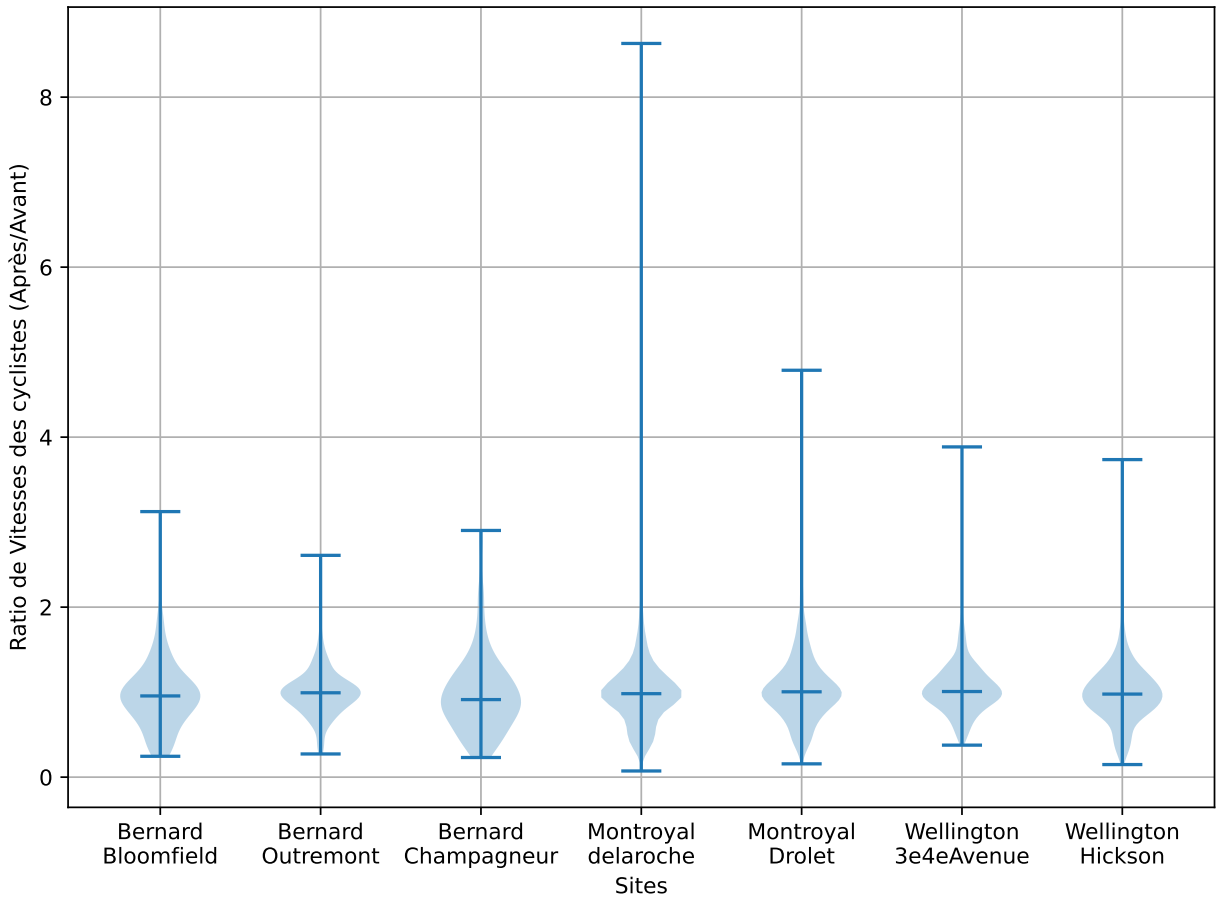

FIGURE 5.1 Comparaison des ratios de vitesse des cyclistes

cyclistes de ces deux rues montrent une augmentation importante après avoir dépassé les piétons.

La Figure 5.3 révèle d'importantes fluctuations dans les médianes des vitesses des cyclistes au point le plus proche d'un piéton, s'étendant d'environ 2 à 3 m/s. Les observations principales se situent dans une fourchette de 1 à 5 m/s. Notamment, le site présentant la plus grande amplitude dans ces variations demeure Mont Royal et de La Roche. En comparaison, Wellington et Hickson se démarque avec une médiane légèrement supérieure à 3 m/s, suivi de près par Bernard et Champagneur et Bernard et Bloomfield. Les sites le long de l'avenue du Mont Royal suivent ensuite. À l'opposé, Bernard et Outremont et Wellington entre 3 ^{e} et 4 ^{e} Avenue génèrent les valeurs médianes les plus basses, légèrement inférieures à 2 m/s. De plus, Wellington et Hickson reste le site présentant la médiane de vitesses des cyclistes la plus élevée par rapport aux autres sites.

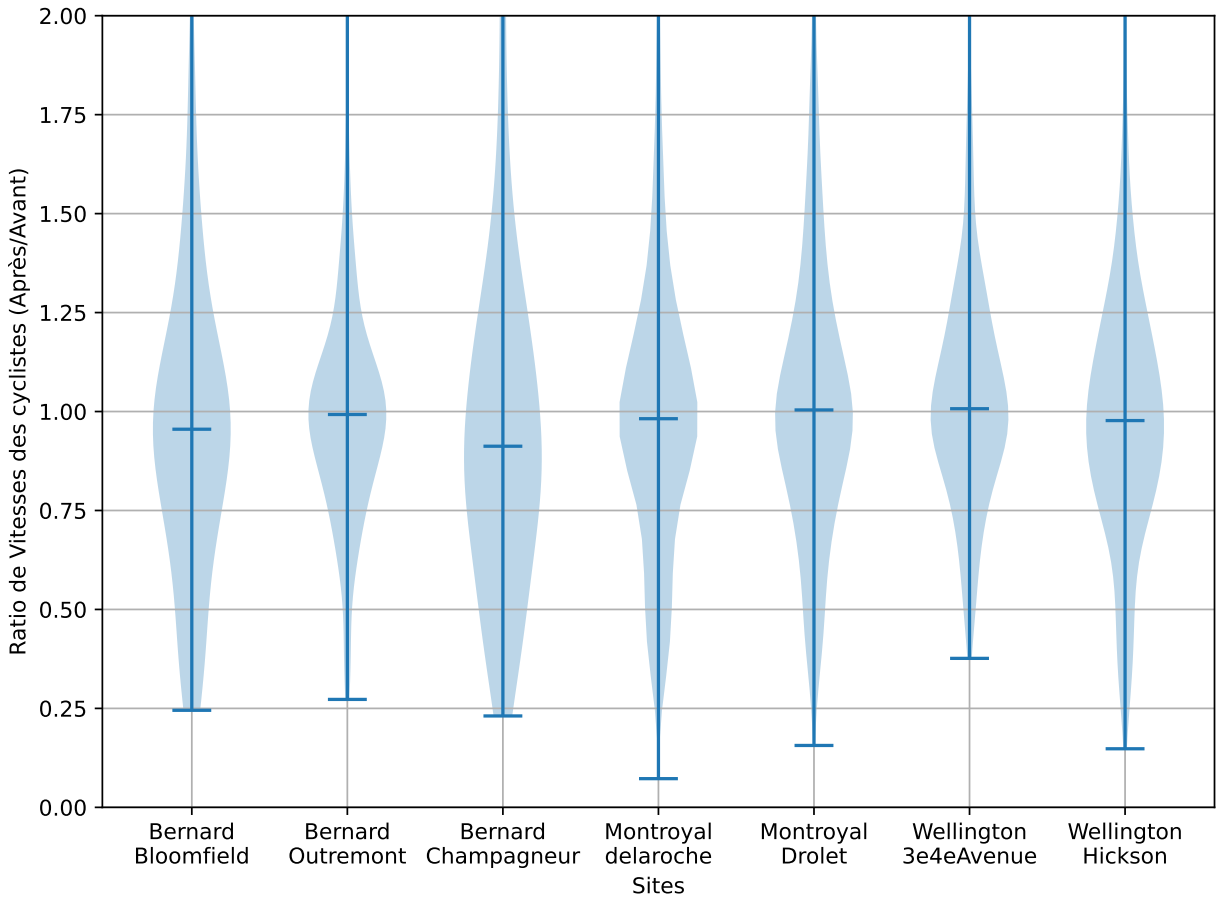

FIGURE 5.2 Variations de vitesse des cyclistes avant et après la distance minimale avec un piéton (Cas Ratio<2)

5.2.2 Selon le nombre de piétons sur la chaussée

Dans cette sous-section, une autre variable a été intégrée pour caractériser le comportement des usagers actifs, à savoir le nombre de piétons détectés présents sur la surface de la rue piétonne visible dans la vue de la caméra, à l'exclusion des trottoirs et des terrasses. La Figure 5.4 présente le 85 ^{e} centile des vitesses des cyclistes en fonction du nombre de piétons dans la rue.

L'étendue des données diminue avec l'augmentation du nombre de piétons. Les médianes des vitesses demeurent relativement constantes. Les vitesses maximales sont enregistrées en l'absence totale de piétons sur la voie, de même que les valeurs minimales. Cette observation suggère que les cyclistes ont tendance à ajuster leur vitesse en fonction de leur niveau de confort lorsque la rue est dépourvue de piétons.

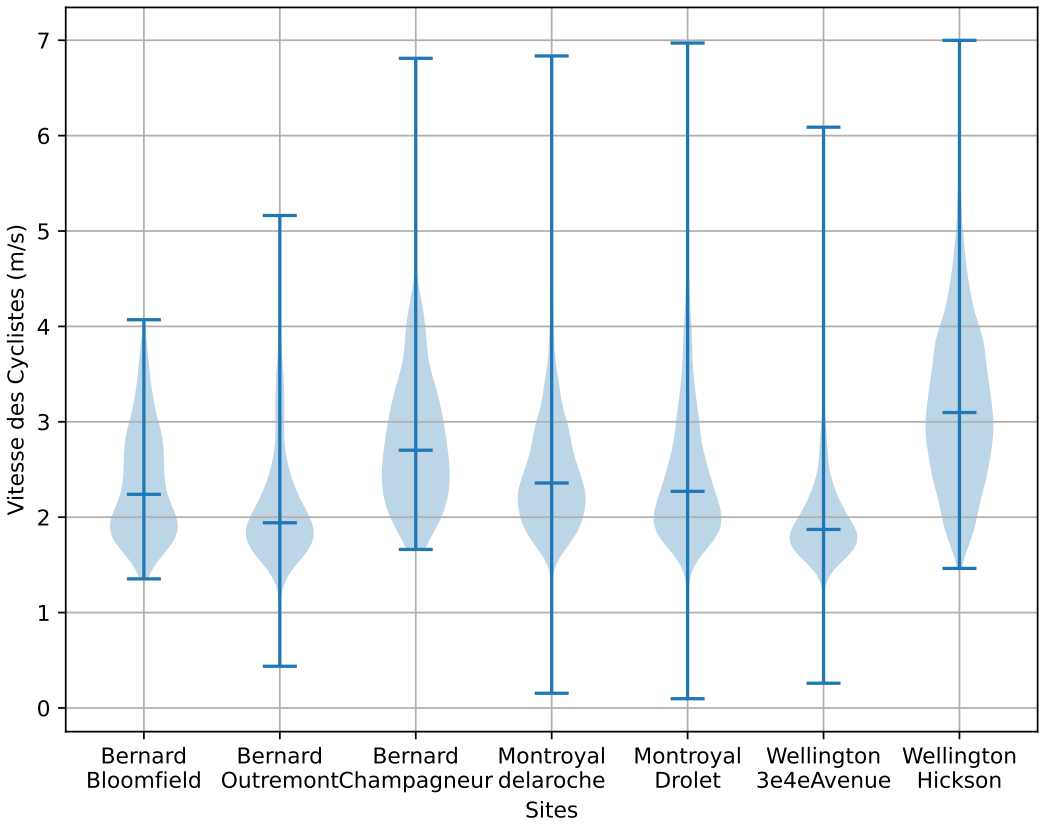

FIGURE 5.3 Vitesses des cyclistes à la distance minimale avec un piéton

5.3 Angles de vélocité

Dans cette section, nous explorons les variations des angles de vélocité. L'objectif est de déterminer lequel, entre les cyclistes et les piétons, ajuste le plus son mouvement à l'autre. Avant d'entamer l'analyse, toutes les catégories d'interactions entre cyclistes et piétons sont présentées à la figure 5.5.

La détermination de la catégorie d'interaction repose sur l'identification de la catégorie la plus fréquente parmi les catégories instantanées identifiées pour chaque interaction [4]. Les interactions de type Latéral se révèlent être les plus observées, suivies par les interactions de type "Arrière". Pour évaluer l'influence des changements de mouvement des usagers, les variations des angles de vélocité des deux catégories d'usagers seront spécifiquement calculées pour les interactions cycliste-piéton de type "Latéral".

Les variations angulaires sont dérivées des vecteurs de vélocité d'un cycliste et d'un piéton

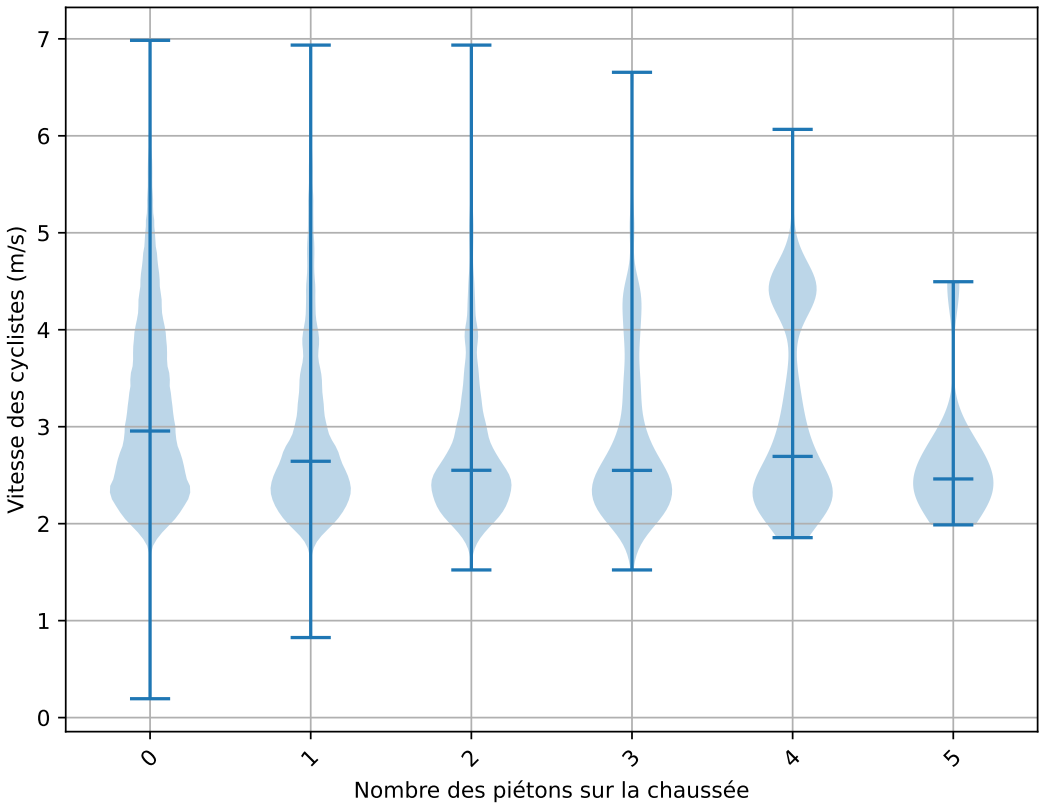

FIGURE 5.4 85 ^{e} centile de vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons sur la chaussée

engagés dans une interaction de type “Latéral”, où leurs trajectoires s’entrecroisent. La variation est l’angle entre les vecteurs vélocité à deux instants séparés de 30 images, équivalent à une seconde plus tard. Les angles de vélocité seront calculés à l’instant t à l’aide de la formule suivante :

$$\text{Angle de vélocité} = \arccos\left(\frac{\mathbf{v_t} \cdot \mathbf{v_{t+1}}}{\|\mathbf{v_t}\| \cdot \|\mathbf{v_{t+1}}\|}\right)$$

La Figure 5.7 illustre les 85^{e} centiles d’angles de vélocité des cyclistes en interaction avec un piéton, sur les différents sites d’étude. Pour les cyclistes, les sites de l’avenue du Mont Royal se distinguent par des valeurs maximales d’angles de vélocité élevées par rapport aux autres sites, bien que la médiane reste la plus élevée pour ces sites or qu’elles ne présentent pas de divergences significatives par rapport aux autres sites. Les sites de la rue Bernard occupent la deuxième position en termes de variations angulaires. En suivant, les sites de

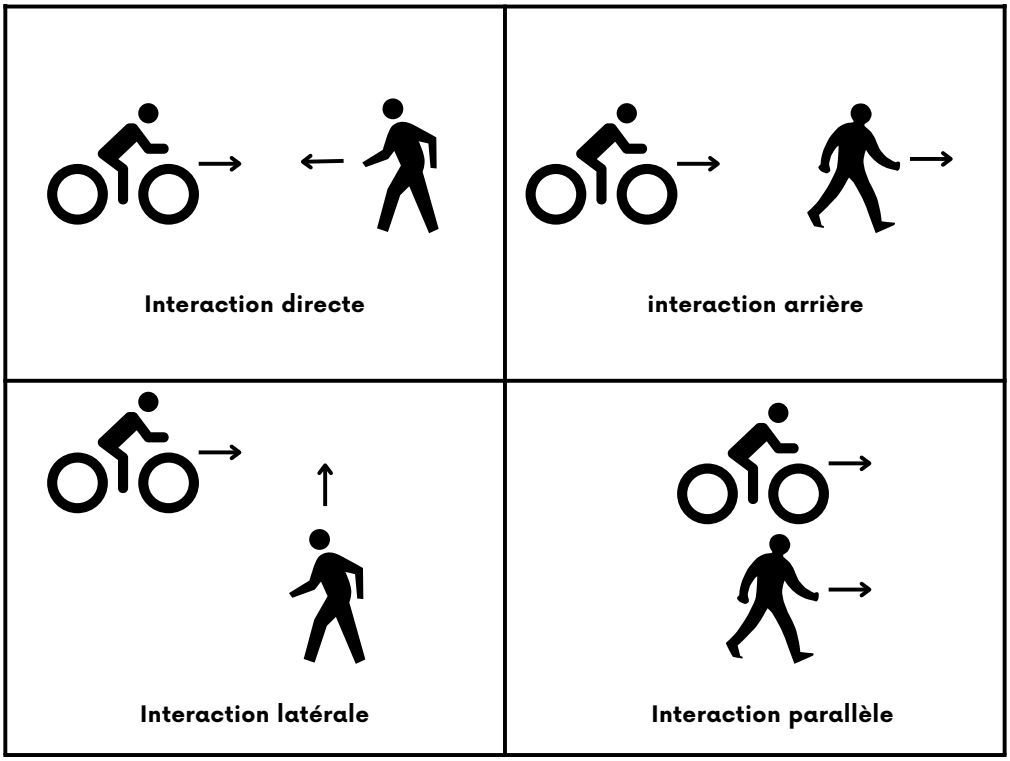

FIGURE 5.5 Types d'interactions cyclistes-piétons [3, 4]

la rue Bernard affichent les valeurs d'angles les plus modestes. À l'intersection de Bernard et Bloomfield, l'étendue des valeurs ainsi que la médiane sont les plus réduites. Ainsi, les cyclistes circulant sur les sites de la rue Bernard altèrent peu leurs trajectoires. En revanche, les cyclistes sur les sites de Mont-Royal et de La Roche manifestent des fluctuations notables dans leurs mouvements.

La Figure 5.8 illustre les angles de vélocité pour les piétons, permettant de comparer les variations de mouvement avec celles des cyclistes. Comme anticipé, les piétons exhibent des mouvements plus oscillants que les cyclistes, indiquant des variations de direction plus prononcées. En tête du classement, le site Mont Royal et de la Roche affiche les valeurs maximales les plus élevées pour les piétons par rapport aux autres sites. Cette observation peut être due à l'environnement et aux aménagements spécifiques du site Mont Royal et de la Roche. Tant les piétons que les cyclistes peuvent être contraints de modifier leur trajectoire pour éviter les obstacles présents dans la rue. Des blocs et de grands pots de plantes ont été positionnés au milieu de la rue, notamment sur Mont Royal et Drolet, classé deuxième en termes de valeurs élevées. Bien que le site Wellington et Hickson ne révèle pas de valeurs maximales aussi élevées que les sites de l'avenue du Mont Royal, il affiche néanmoins des valeurs médianes et moyennes comparables à celles observées sur les sites du Mont Royal et

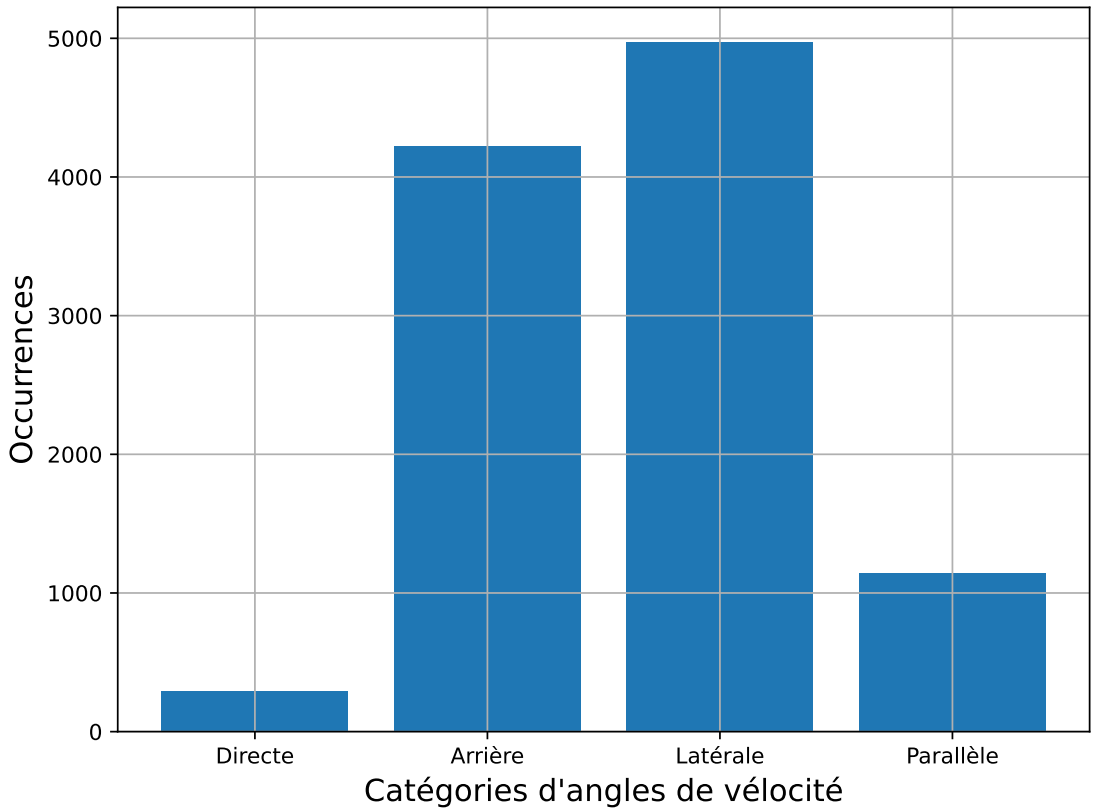

FIGURE 5.6 Distribution de catégories d'interaction

de la Roche. Comme pour les résultats pour les cyclistes, les sites de la rue Bernard, affichent les valeurs les plus faibles pour cette catégorie.

5.4 Discussion

Cette section synthétise les résultats des analyses de sécurité et de comportement des usagers vulnérables dans les rues piétonnes, permettant ainsi de tirer des conclusions sur les mesures de cohabitation.

L'analyse de la cohabitation s'est concentrée sur les interactions entre cyclistes et piétons en examinant les variations de la vitesse des cyclistes lors des interactions, en fonction de la distance minimale entre ces usagers et du nombre de piétons sur la chaussée. Cette analyse révèle que, en termes de distance, des valeurs élevées de ratios de vitesses sont observées dans les rues où les cyclistes sont autorisés à rouler sur leur vélo. Le ratio des vitesses (après/avant)

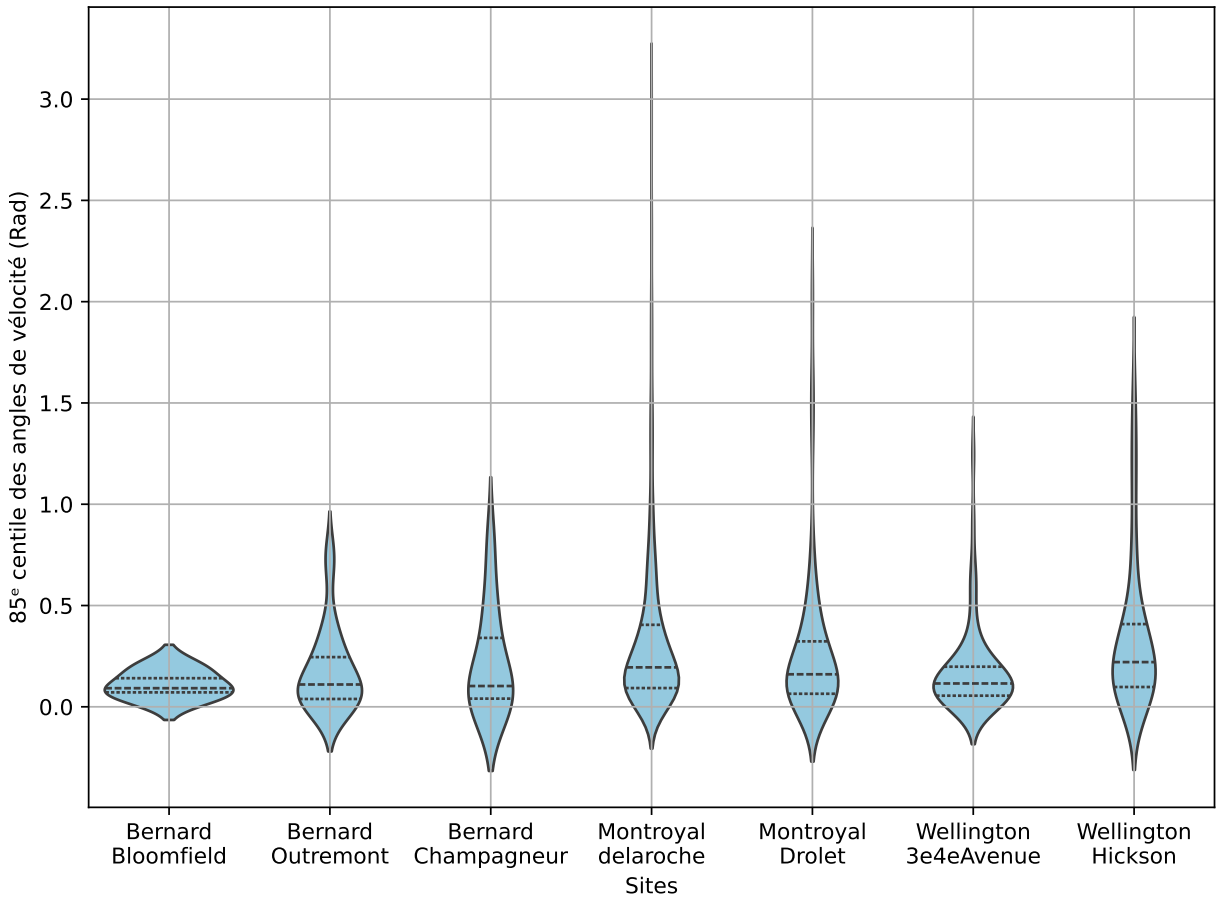

FIGURE 5.7 Angles de vélocité des cyclistes

à la distance minimale montre une médiane proche de l'unité pour tous les sites, indiquant que la majorité des cyclistes n'ajustent pas significativement leur vitesse après avoir dépassé le point le plus proche des piétons, témoignant d'une relative stabilité de leur vitesse.

En ce qui concerne le nombre de piétons par chaussée, l'amplitude des valeurs diminue également avec l'augmentation du nombre de piétons. La plus grande variabilité des vitesses des cyclistes est observée lorsque le nombre de piéton est nul, indiquant que la vitesse varie davantage lorsque la rue est dépourvue de piétons.

L'analyse du changement de trajectoire des piétons repose sur l'étude des variations des angles de vélocité. Les résultats révèlent que les variations les plus faibles sont observées principalement sur la rue Bernard, où il est interdit de faire du vélo. Peut être cela est dû au nombre faible d'interactions cycliste-piéton dans cette rue. De plus, les variations d'angles des piétons sont plus marquées que celles des cyclistes, soulignant que le mouvement des piétons change de direction plus fréquemment que celui des cyclistes qui ont tendance à suivre une

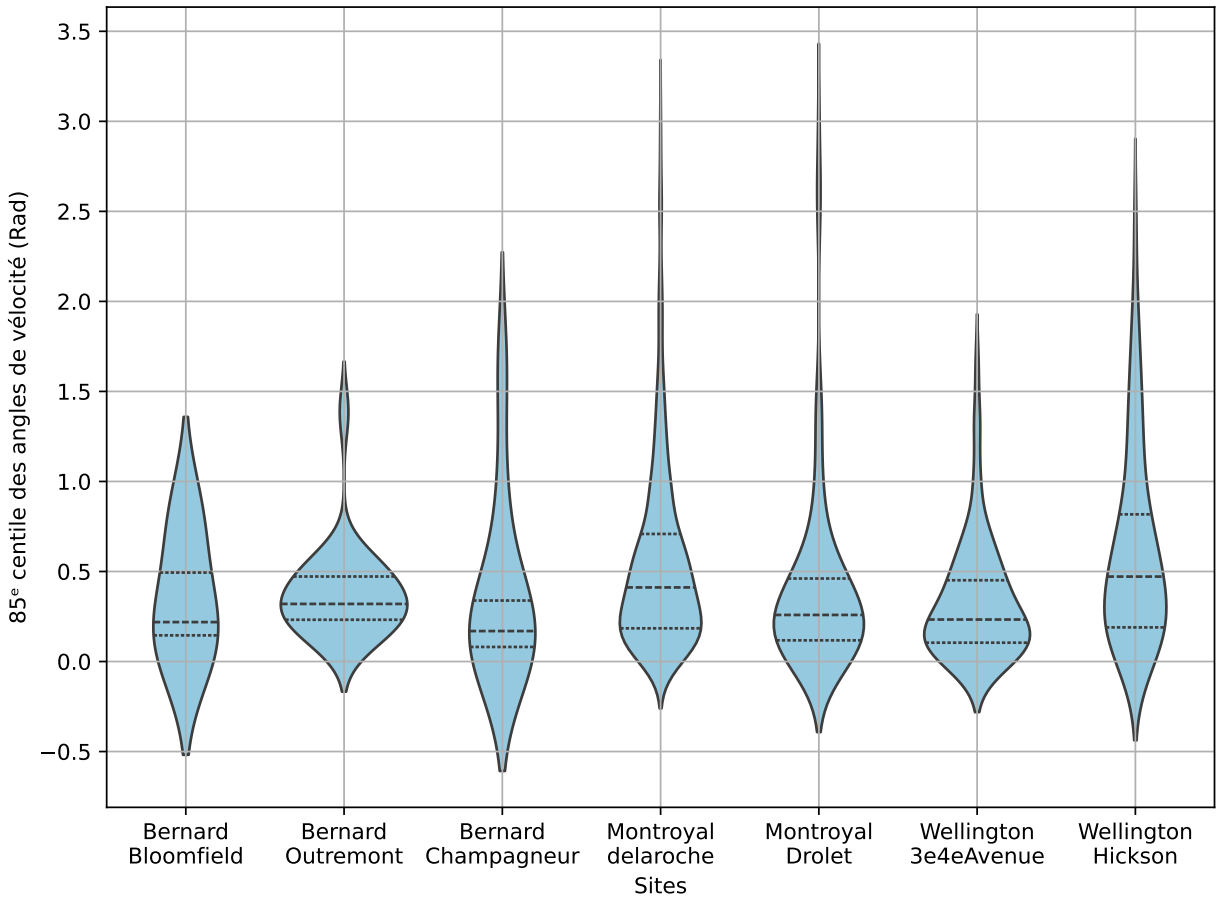

FIGURE 5.8 Variations des angles de vélocité des piétons

trajectoire plus directe. En résumé, les cyclistes maintiennent généralement des ratios de vitesses proches de l'unité, et ce constat demeure constant sur l'ensemble des sites étudiés. De plus, les médianes des vitesses des cyclistes demeurent pratiquement inchangées, quelle que soit le nombre de piétons sur la chaussée. De plus, les piétons présentent des angles de vélocités supérieurs à ceux des cyclistes. Cette constatation suggère que, du point de vue des mesures effectuées, les piétons démontrent une capacité d'adaptation plus marquée que les cyclistes. D'autres analyses s'avèrent nécessaires afin de déduire des résultats plus concluants. Par exemple, une amélioration de la qualité des données en utilisant un système de détection plus adaptés aux usagers vulnérables, ou l'exploration d'autres intervalles distincts de 30 images pour le calcul des angles de vélocité pourrait être envisagée. Une agrégation analytique des angles de vélocité, orientée par interaction plutôt que par usager individuel, présente un intérêt potentiel.

Concernant l'analyse de sécurité, celle-ci s'est appuyée sur les mesures de vitesses et d'accé-

lérations des cyclistes de manière générale, ainsi que sur les mesures de distances et de TTC lors des interactions entre cyclistes et piétons. Ces mesures ont révélé que les sites les plus sécuritaires en termes de vitesses, d'accélérations, et de distances minimales sont Wellington entre la 3 e et la 4 e Avenue, ainsi que les deux sites de la rue Bernard, Bloomfield et Outremont. En revanche, les sites présentant un risque plus élevé sont ceux du Mont Royal et De la Roche et Bernard et Champagneur.

En synthèse, pour la rue Bernard où le passage des cyclistes est interdit, en particulier au niveau du site Bernard et Bloomfield, les cyclistes maintiennent des vitesses et des accélérations modérées par rapport aux autres sites. Ils conservent également une distance sécuritaire avec les piétons, générant des valeurs de TTC_{15} généralement sécuritaires, avec des médianes et des moyennes relativement élevées. Les changements de direction des piétons et des cyclistes dans ce site sont moins fréquents, peut-être en raison de la présence réduite d'obstacles dans la rue.

Les résultats sont un peu similaires pour la rue Bernard et Outremont, mais contrastent avec Bernard et Champagneur, où des vitesses et des accélérations cyclistes élevées sont observées, accompagnées de faibles valeurs de TTC_{15}. Le risque dans ce site est plus élevé que dans les autres secteurs de la rue Bernard.

Concernant l'avenue du Mont Royal, les deux sites présentent des valeurs élevées de vitesses et d'accélérations, mais le site du Mont Royal et Drolet présente un risque plus élevé en termes de TTC_{15} et d_{min} par rapport à Mont Royal et De la Roche. Ces deux sites affichent également les plus grandes variations d'angles de vélocité, indiquant des changements fréquents de direction, qui peuvent être dus à des aménagements réduisant la largeur de la rue et servant d'obstacles aux usagers.

Pour la rue Wellington, une considérable variabilité entre les résultats des deux sites est observée par rapport aux deux autres rues. Le site Wellington et Hickson affiche des valeurs élevées des indicateurs de sécurité tels que la vitesse et l'accélération, ainsi que des valeurs élevées de TTC_{15} et d_{min}. En revanche, Wellington entre la 3e et la 4e Avenue, présente des valeurs plus faibles pour la vitesse, l'accélération, TTC_{15} et d_{min}. Les variations d'angles de vélocité sont également réduites à ce site, indiquant des changements de direction moins fréquents pour les cyclistes et les piétons par rapport à Hickson de la même rue, ainsi que pour les deux sites de l'avenue du Mont Royal.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

La section finale consolide les résultats de ce projet de recherche en vue d'atteindre les objectifs énoncés au début du mémoire. Cette partie englobe une synthèse des travaux accomplis, une analyse critique de la méthodologie employée, la mise en lumière des limites des réalisations effectuées, ainsi que des propositions d'améliorations à prendre en considération pour les travaux futurs.

6.1 Synthèse des travaux

Le dessein principal de cette recherche réside dans la quantification de la cohabitation entre cyclistes et piétons au sein des rues piétonnes, en se focalisant sur deux aspects : la sécurité et l'adaptation. Pour ce faire, deux analyses majeures ont été entreprises en utilisant les données du projet pilote de cohabitation entre cyclistes et piétons dans trois rues piétonnes de la ville de Montréal en 2021.

La première analyse évalue la sécurité des interactions entre cyclistes et piétons dans ces zones, en utilisant des indicateurs tels que les 85e centiles de vitesses et d'accélérations des cyclistes, ainsi que le (TTC_{15}) et les distances minimales pour chaque interaction. Les résultats révèlent des disparités entre les sites des mêmes rues, indépendamment des réglementations.

Sur la rue Bernard, le site de Bernard et Bloomfield émerge comme étant le plus sécuritaire, en se basant sur les valeurs d'accélération des cyclistes. Quant à Bernard et Outremont, ce site se distingue comme étant le plus sécuritaire en considérant les valeurs de vitesse. En revanche, le site de Bernard et Champagneur se révèle comme le moins sécuritaire, d'après les données de TTC et les valeurs de vitesse des cyclistes.

Sur l'avenue Mont-Royal, le site De la Roche se positionne comme moins sécuritaire en termes d'accélération, tandis que le site Mont Royal et Drolet présente moins de sécurité selon les valeurs de TTC.

Concernant la rue Wellington, le site entre la 3 ^{e} et la 4 ^{e} avenue se démarque comme le plus sécuritaire, que ce soit en termes de vitesses, d'accélérations, ou de TTC. De plus, le site Wellington et Hickson génère des valeurs de vitesses et d'accélérations les plus élevées parmi les autres sites, mais demeure le plus sécuritaire d'après les indicateurs de TTC et de distances minimales.

Les décideurs devraient concentrer leurs efforts sur l'amélioration de la sécurité et la promotion d'interactions sécuritaires entre piétons et cyclistes sur les rues dangereuses, notamment

les sites de Mont-Royal et de Wellington ainsi qu'à Bernard et Champagneur.

En premier lieu, l'analyse des données révèle que, à l'exception des sites de Mont-Royal et de Drolet, tous les autres sites présentent des valeurs élevées de vitesses, d'accélérations, ou les deux. Par conséquent, des mesures de régulation, telles que l'amélioration de la conception des intersections, pourraient faciliter une transition en douceur des cyclistes à partir de ces points, tandis que la réduction du champ de vision des cyclistes grâce à des aménagements piétonniers ou autres pourrait inciter à maintenir des vitesses modérées le long de la rue piétonne.

De manière similaire, la totalité des sites, à l'exception de Mont-Royal et de De la Roche, exhibent des valeurs élevées de TTC, un phénomène qui requiert une exploration approfondie dans les futures études. Nos observations directes, notamment sur les sites de Mont-Royal et de Bernard et Champagneur, révèlent que ces endroits présentent des largeurs de rues considérablement restreintes en raison d'aménagements piétonniers. Par conséquent, il serait envisageable d'augmenter ces dimensions afin d'assurer une surface propice à un partage sécurisé et confortable de l'espace entre les piétons et les cyclistes en circulation.

Une analyse statistique démontre des relations entre les valeurs de TTC_{15} et de v_{85} avec d'autres variables telles que d_{min}, les 85 ^{e} et 15 ^{e} centiles d'accélération, et le nombre de piéton par chaussée. Pour la majorité des sites, une augmentation de TTC_{15} est associée à des nombres faibles de piétons sur la chaussée (sauf pour Wellington et Hickson et Beranrd et Outremont). Elle est également associée à des distances minimales élevées. De même, des valeurs élevées de v_{85} sont corrélées à des distances minimales et des a_{85} plus importantes, tandis que les valeurs de TTC_{15} diminuent.

La seconde analyse se concentre sur le comportement des usagers en examinant toutes les interactions cycliste-piéton. Les vitesses des cyclistes sont extraites en fonction des distances minimales les séparant des piétons, ainsi que de le nombre de piétons sur la chaussée. Les résultats indiquent que la vitesse des cyclistes ne varie généralement pas lors des interactions avec les piétons. De même, les vitesses en fonction du nombre de piétons sur la chaussée restent relativement similaires même avec des changements et une augmentation du nombre de piéton.

Un autre indicateur exploré est la variation des angles de vélocité pour chaque type d'usager, permettant une analyse des changements de direction dans les trajectoires. Les variations des angles de vélocité sont plus remarquables chez les piétons que chez les cyclistes, montrant une propension des piétons à changer de direction plus fréquemment que les cyclistes.

6.2 Limitations des réalisations effectuées et améliorations futures

Les rues piétonnes présentent une variabilité significative en termes d'environnement, résultant des disparités dans les aménagements et la diversité des usagers. À titre d'exemple, les deux sites de l'avenue du Mont Royal ainsi que le site Bernard et Champagneur présentent des aménagements réduisant considérablement la largeur de la rue par rapport aux autres sites. En revanche, pour le site Wellington et Hickson, la présence de véhicules, notamment des camions de marchandises, a été détectée. Ces camions, souvent en arrêt pour des livraisons, deviennent ainsi des obstacles, altérant la perception du site en tant que rue exclusivement piétonne et le transformant en une rue partagée. Dans cette perspective, les recherches futures devront intégrer, dans l'étude des interactions cycliste-piéton dans les rues piétonnes, plusieurs autres variables liées à l'environnement d'étude.

Parmi les limitations identifiées, on peut souligner le nombre restreint d'interactions surtout pour la rue Bernard où les cyclistes sont interdits de circuler avec leurs vélos. Ainsi, une plus grande quantité de données aide à déduire des conclusions plus détaillées. Ce qui nous amène au système d'analyse des données par vision par ordinateur. Le système de détection et de suivi utilisé présente diverses limitations, même après l'ajout d'une étape d'optimisation. Le premier problème est lié à la détection des usagers, se manifestant parfois par une sur-segmentation ou sous-segmentation. De plus, certains usagers demeurent non détectés malgré l'utilisation de paramètres optimisés. Ainsi, l'utilisation d'un système plus adapté aux usagers actifs permettra d'analyser au mieux cet environnement piétonnier.

Parmi les limitations de cette étude comportementale, il convient de mentionner que l'utilisation du calcul des angles de vélocité offre une analyse approfondie des changements de direction chez les usagers. Toutefois, pour les piétons, leurs mouvements exhibent des oscillations considérables, ce qui peut entraver la comparaison directe entre les deux types d'usagers. Les investigations à venir pourraient ainsi confirmer la qualité des données et améliorer l'effet d'oscillation par le biais de méthodes de vision par ordinateur mieux adaptées aux mouvements des usagers actifs. Il serait opportun de comparer différents pas ou durées d'images pour le calcul des angles et d'explorer l'utilisation d'indicateurs plus pertinents afin de minimiser au mieux cet effet d'oscillation. Ce faisant, une évaluation plus précise des comportements des piétons en interaction avec d'autres usagers de la route serait rendue possible.

RÉFÉRENCES

[1] A. Laureshyn, Å. Svensson et C. Hydén, "Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data : Theoretical framework and first implementation," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 42, n°. 6, p. 1637–1646, 2010. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457510001041

[2] A. Laureshyn, C. Jonsson, T. De Ceunynck, Å. Svensson, M. de Goede, N. Saunier, P. Włodarek, R. van der Horst et S. Daniels, "Review of current study methods for vru safety (appendix 6)," InDeV (In-Depth understanding of accident causation for Vulnerable road users), Rapport technique, 2006.

[3] N. Saunier, T. Sayed et K. Ismail, "Large-scale automated analysis of vehicle interactions and collisions," *Transportation Research Record*, vol. 2147, n°. 1, p. 42–50, 2010. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.3141/2147-06

[4] É. Beauchamp, N. Saunier et M.-S. Cloutier, "Study of automated shuttle interactions in city traffic using surrogate measures of safety," *Transportation research part C : emerging technologies*, vol. 135, p. 103465, 2022. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103465

[5] S. Jackson, L. F. Miranda-Moreno, P. St-Aubin et N. Saunier, "Flexible, mobile video camera system and open source video analysis software for road safety and behavioral analysis," *Transportation Research Record*, vol. 2365, n°. 1, p. 90–98, 2013. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.3141/2365-12

[6] I. Kaparias, M. G. Bell, T. Biagioli, L. Bellezza et B. Mount, "Behavioural analysis of interactions between pedestrians and vehicles in street designs with elements of shared space," *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 30, p. 115–127, 2015. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.02.009

[7] L. Zheng, T. Sayed et Y. Guo, "Investigating factors that influence pedestrian and cyclist violations on shared use path : An observational study on the brooklyn bridge promenade," *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 14, n°. 7, p. 503–512, 2020. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1575495

[8] K. Ismail, T. Sayed et N. Saunier, "Automated analysis of pedestrian–vehicle conflicts context for before-and-after studies," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2198, p. 52–64, 2010.

[9] D. Beitel, J. Stipancic, K. Manaugh et L. Miranda-Moreno, "Assessing safety of shared space using cyclist-pedestrian interactions and automated video conflict analysis,"

Transportation Research Part D, vol. 65, p. 710–724, 2018. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.10.001

[10] S. Perkins et J. Harris, "Report gmr632, criteria for traffic conflict characteristics," Technical report, General Motors Corporation, Warren, MI, Rapport technique, 1967.

[11] K. El-Basyouny et T. Sayed, "Safety performance functions using traffic conflicts," *Safety science*, vol. 51, n°. 1, p. 160–164, 2013.

[12] E. Sacchi, T. Sayed et P. Deleur, "A comparison of collision-based and conflict-based safety evaluations : The case of right-turn smart channels," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 59, p. 260–266, 2013. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2013.06.002

[13] L. Zheng, K. Ismail et X. Meng, "Shifted gamma-generalized pareto distribution model to map the safety continuum and estimate crashes," *Safety Science*, vol. 64, p. 155–162, 2014.

[14] S. R. Perkins et J. I. Harris., "Traffic conflict characteristics : Accident potential at intersections," *Highway Research Record*, vol. 225, n°. 4, p. 135–43, 1968.

[15] A. Tarko, G. Davis, N. Saunier, T. Sayed et S. Washington, "White paper : surrogate measures of safety," *Committee on Safety Data Evaluation and Analysis (ANB20)*, 2009.

[16] C. Hydén, "The development of a method for traffic safety evaluation : The swedish traffic conflicts technique," *Bulletin Lund Institute of Technology, Department*, n°. 70, 1987.

[17] A. Svensson, *A method for analysing the traffic process in a safety perspective*. Lund Institute of Technology Sweden, 1998.

[18] N. Saunier et T. Sayed, "Automated analysis of road safety with video data," *Transportation Research Record*, vol. 2019, n°. 1, p. 57–64, 2007.

[19] M. H. Zaki, T. Sayed, A. Tageldin et M. Hussein, "Application of computer vision to diagnosis of pedestrian safety issues," *Transportation research record*, vol. 2393, n°. 1, p. 75–84, 2013.

[20] M. M. Minderhoud et P. H. Bovy, "Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 33, p. 89–97, 2001. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00019-1

[21] G. R. Brow, "Traffic conflicts for road user safety studies," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, n°. 1, p. 1–15, 1994.

[22] J. Archer, "Methods for the assessment and prediction of traffic safety at urban intersections and their application in micro-simulation modelling," *Royal institute of technology*, 2004.

[23] S. S. Mahmud, L. Ferreira, M. S. Hoque et A. Tavassoli, "Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation : A review of recent developments and research needs," *IATSS research*, vol. 41, nº. 4, p. 153–163, 2017. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2017.02.001

[24] T. Sayed, M. H. Zaki et J. Autey, "Automated safety diagnosis of vehicle–bicycle interactions using computer vision analysis," *Safety science*, vol. 59, p. 163–172, 2013. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.05.009

[25] K. Ismail, T. Sayed, N. Saunier et C. Lim, "Automated analysis of pedestrian–vehicle conflicts using video data," *Transportation research record*, vol. 2140, nº. 1, p. 44–54, 2009. [En ligne]. Disponible : https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3141/2140-05

[26] S. Jackson, L. F. Miranda-Moreno, P. St-Aubin et N. Saunier, "Flexible, mobile video camera system and open source video analysis software for road safety and behavioral analysis," *Transportation research record*, vol. 2365, nº. 1, p. 90–98, 2013.

[27] S. Zangenehpour, L. F. Miranda-Moreno et N. Saunier, "Automated classification based on video data at intersections with heavy pedestrian and bicycle traffic : Methodology and application," *Transportation research part C : emerging technologies*, vol. 56, p. 161–176, 2015. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.05.009

[28] N. Saunier et T. Sayed, "A feature-based tracking algorithm for vehicles in intersections," dans *The 3rd Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV'06)*. IEEE, 2006, p. 59–59.

[29] M. H. Zaki et T. Sayed, "A framework for automated road-users classification using movement trajectories," *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 33, p. 50–73, 2013. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.04.007

[30] P. Anderson-Trocmé, J. Stipancic, L. Miranda-Moreno et N. Saunier, "Performance evaluation and error segregation of video-collected traffic speed data," dans *Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting*, 2015. [En ligne]. Disponible : http://n.saunier.free.fr/saunier/stock/stipancic15performance.pdf

[31] T. Fu, L. Miranda-Moreno et N. Saunier, "A novel framework to evaluate pedestrian safety at non-signalized locations," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 111, p. 23–33, 2018.

[32] A. Chaudhari, N. Gore, S. Arkatkar, G. Joshi et S. Pulugurtha, "Exploring pedestrian surrogate safety measures by road geometry at midblock crosswalks : A perspective under mixed traffic conditions," *IATSS research*, vol. 45, nº. 1, p. 87–101, 2021. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2020.06.001

[33] R. Madigan, Y. M. Lee et N. Merat, "Validating a methodology for understanding pedestrian–vehicle interactions : A comparison of video and field observations," *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, vol. 81, p. 101–114, 2021. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.05.006

[34] S. Zangenehpour, J. Strauss, L. F. Miranda-Moreno et N. Saunier, "Are signalized intersections with cycle tracks safer ? a case-control study based on automated surrogate safety analysis using video data," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 86, p. 161–172, 2016. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2015.10.025

[35] B. Navarro, L. Miranda-Moreno, N. Saunier, A. Labbe et T. Fu, "Do stop-signs improve the safety for all road users ? a before-after study of stop-controlled intersections using video-based trajectories and surrogate measures of safety," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 167, p. 106563, 2022. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106563

[36] M. H. Zaki, T. Sayed, K. Ismail et F. Alrukaibi, "Use of computer vision to identify pedestrians' nonconforming behavior at urban intersections," *Transportation research record*, vol. 2279, nº. 1, p. 54–64, 2012. [En ligne]. Disponible : https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3141/2279-07

[37] S. AlKheder, A. Alrashidi et A. Zaqzouq, "Examine the pedestrian road crossing behavior in kuwait," *Journal of Public Affairs*, vol. 22, p. e2812, 2022. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1002/pa.2812

[38] A. Tageldin, T. Sayed et K. Shaaban, "Comparison of time-proximity and evasive action conflict measures : Case studies from five cities," *Transportation research record*, vol. 2661, nº. 1, p. 19–29, 2017. [En ligne]. Disponible : https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3141/2661-03

[39] A. Tageldin et T. Sayed, "Developing evasive action-based indicators for identifying pedestrian conflicts in less organized traffic environments," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 50, nº. 6, p. 1193–1208, 2016. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1002/atr.1397

[40] K. Ismail, T. Sayed et N. Saunier, "Methodologies for aggregating indicators of traffic conflict," *Transportation research record*, vol. 2237, nº. 1, p. 10–19, 2011. [En ligne]. Disponible : https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3141/2237-02

[41] M. Che, Y. D. Wong, K. M. Lum et X. Wang, "Interaction behaviour of active mobility users in shared space," *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 153, p. 52–65, 2021. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.08.017

[42] H. Botma, “Method to determine level of service for bicycle paths and pedestrian-bicycle paths,” *Transportation Research Record*, vol. 1502, p. 38–44, 1995. [En ligne]. Disponible : https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1502/1502-005.pdf

[43] A. R. A. van der Horst, M. de Goede, S. de Hair-Buijssen et R. Methorst, “Traffic conflicts on bicycle paths : A systematic observation of behaviour from video,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 62, p. 358–368, 2014. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.04.005

[44] A. P. Afghari, K. Ismail, N. Saunier, A. Sharma et L. Miranda-Moreno, “Pedestrian-cyclist interactions at bus stops along segregated bike paths : a case study of montreal,” dans *Proceedings of the 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*. Citeseer, 2014. [En ligne]. Disponible : https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=2c6993bc56e4f1b52dceabdf99e169711ee5fc7b

[45] K. Ismail, T. Sayed et N. Saunier, “A methodology for precise camera calibration for data collection applications in urban traffic scenes,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 40, n°. 1, p. 57–67, 2013. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1139/cjce-2011-0456

[46] M. A. Abramson, C. Audet, J. E. Dennis Jr et S. L. Digabel, “Orthomads : A deterministic mads instance with orthogonal directions,” *SIAM Journal on Optimization*, vol. 20, n°. 2, p. 948–966, 2009. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1137/080716980

[47] C. Audet et J. E. Dennis Jr, “Mesh adaptive direct search algorithms for constrained optimization,” *SIAM Journal on optimization*, vol. 17, n°. 1, p. 188–217, 2006. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1137/040603371

[48] ——, “A progressive barrier for derivative-free nonlinear programming,” *SIAM Journal on optimization*, vol. 20, n°. 1, p. 445–472, 2009. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1137/070692662

[49] R. Grzebieta, A. McIntosh et S. Chong, “Pedestrian-cyclist collisions : Issues and risk,” dans *Australasian College of Road Safety Conference*, 2011, p. 1–12.

[50] S. O’Hern et J. Oxley, “Pedestrian injuries due to collisions with cyclists melbourne, australia,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 122, p. 295–300, 2019. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457518308649

[51] P. Tuckel, W. Milczarski et R. Maisel, “Pedestrian injuries due to collisions with bicycles in new york and california,” *Journal of Safety Research*, vol. 51, p. 7–13, 2014. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022437514000814

[52] J. Strauss, S. Zangenehpour, L. F. Miranda-Moreno et N. Saunier, "Cyclist deceleration rate as surrogate safety measure in montreal using smartphone gps data," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 99, p. 287–296, 2017. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2016.11.019

[53] X. Liang, X. Meng et L. Zheng, "Investigating conflict behaviours and characteristics in shared space for pedestrians, conventional bicycles and e-bikes," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 158, p. 106167, 2021. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106167

[54] N. Saunier et A. Laureshyn, "Surrogate measures of safety," dans *International Encyclopedia of Transportation*, R. Vickerman, édit. Oxford : Elsevier, 2021, p. 662–667. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081026717101976

[55] J. Hayward, *Near misses as a measure of safety at urban intersections.* Pennsylvania Transportation and Traffic Safety Center, 1971.

[56] L. N. Peesapati, M. P. Hunter et M. O. Rodgers, "Evaluation of postencroachment time as surrogate for opposing left-turn crashes," *Transportation Research Record*, vol. 2386, nº. 1, p. 42–51, 2013. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.3141/2386-06

[57] M. S. Nabavi Niaki, N. Saunier et L. F. Miranda-Moreno, "Is that move safe ? case study of cyclist movements at intersections with cycling discontinuities," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 131, p. 239–247, 2019. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457518306092

[58] J. Stipancic, S. Zangenehpour, L. Miranda-Moreno, N. Saunier et M.-A. Granié, "Investigating the gender differences on bicycle-vehicle conflicts at urban intersections using an ordered logit methodology," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 97, p. 19–27, 2016. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457516302627

[59] Z. Sun, Y. Chen, P. Wang, S. Fang et B. Tang, "Vision-based traffic conflict detection using trajectory learning and prediction," *IEEE Access*, vol. 9, p. 34 558–34 569, 2021.

[60] T. Fu, W. Hu, L. Miranda-Moreno et N. Saunier, "Investigating secondary pedestrian-vehicle interactions at non-signalized intersections using vision-based trajectory data," *Transportation research part C : emerging technologies*, vol. 105, p. 222–240, 2019. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.06.001

[61] K. Bernardin et R. Stiefelhagen, "Evaluating multiple object tracking performance : The clear mot metrics," *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 2008, nº. 1, p. 246309, 2008.

[62] P. G. Tzouras, M. Batista, K. Kepaptsoglou, E. I. Vlahogianni et B. Friedrich, “Can we all coexist ? an empirical analysis of drivers’ and pedestrians’ behavior in four different shared space road environments,” *Cities*, vol. 141, p. 104477, 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275123002895

ANNEXE A ANALYSES COMPLÉMENTAIRES

A.1 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons par site

Dans la majorité des sites, les cyclistes suivent le même comportement décrit par la Figure 5.4 générale de vitesses selon le nombre de piétons sur la chaussée. Mais ce n'est pas le cas pour les sites Mont Royal et Drolet et Wellington, entre 3^{e} et 4^{e} Avenue.

Le site Mont Royal et Drolet présente des résultats similaires aux autres sites (Figure A.5) jusqu'à ce que le nombre de piétons atteigne 3. Cependant, avec quatre piétons sur la rue, l'étendue des valeurs de vitesse des cyclistes, ainsi que la médiane, augmentent considérablement. La médiane lorsque la rue est dépourvue de piétons reste inférieure à celle lorsque quatre piétons sont présents sur la chaussée, d'environ 1 m/s. Wellington entre la 3^{e} et la 4^{e} Avenue montre des observations similaires (Figure A.6) : lorsque moins de deux piétons sont présents sur la chaussée, les médianes restent presque identiques. Cependant, lorsque le nombre de piétons dépasse deux par chaussée, les vitesses augmentent et les médianes varient entre 3.5 et 4.5 m/s.

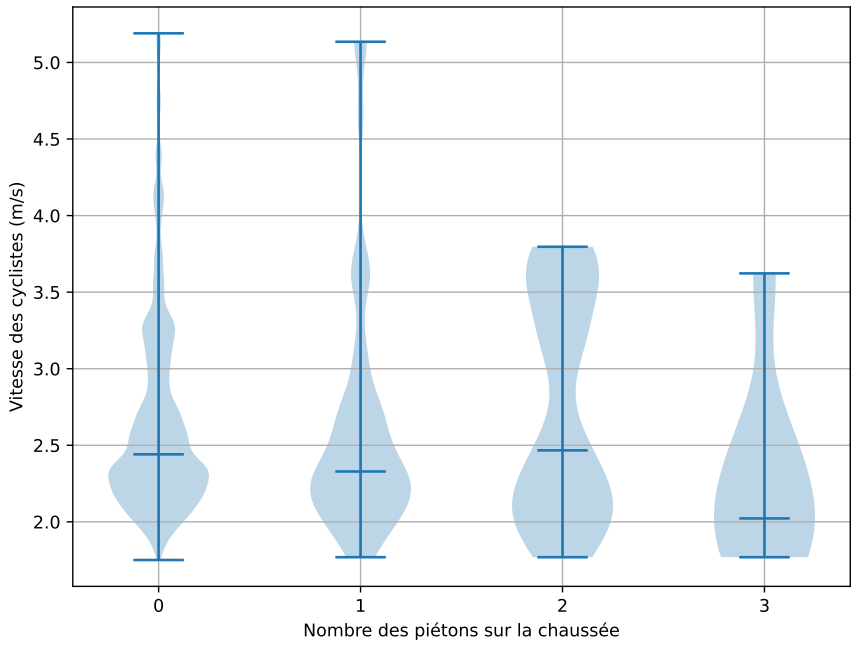

FIGURE A.1 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Bernard Bloomfield

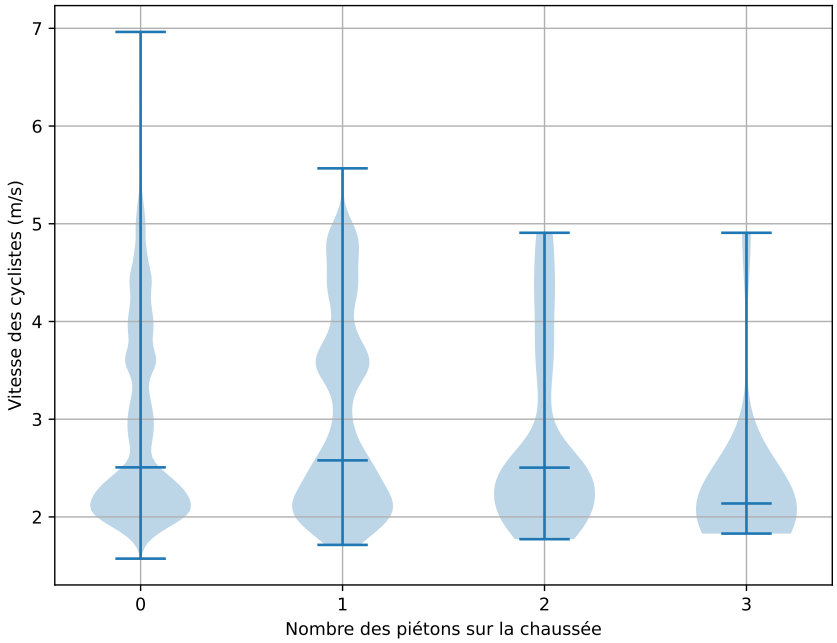

FIGURE A.2 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Bernard Outremont

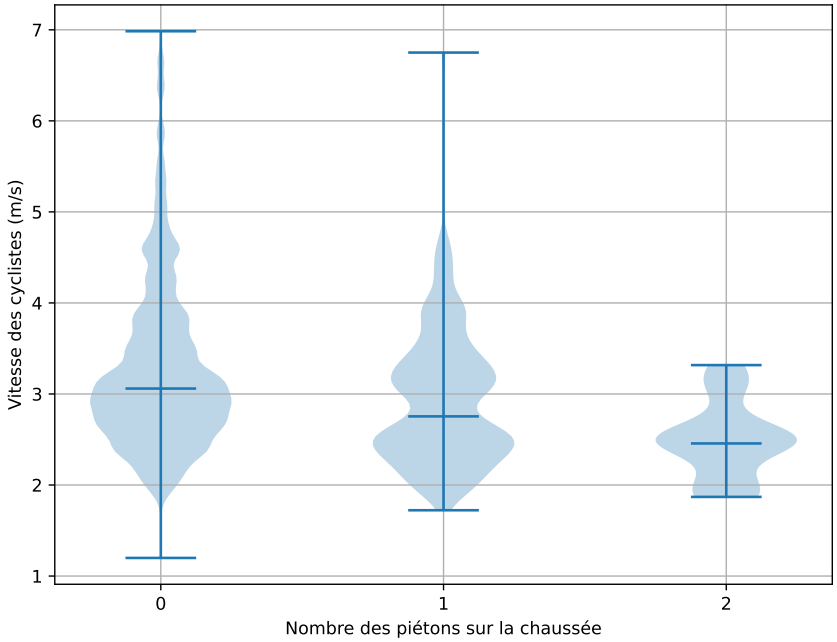

FIGURE A.3 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Bernard Champagneur

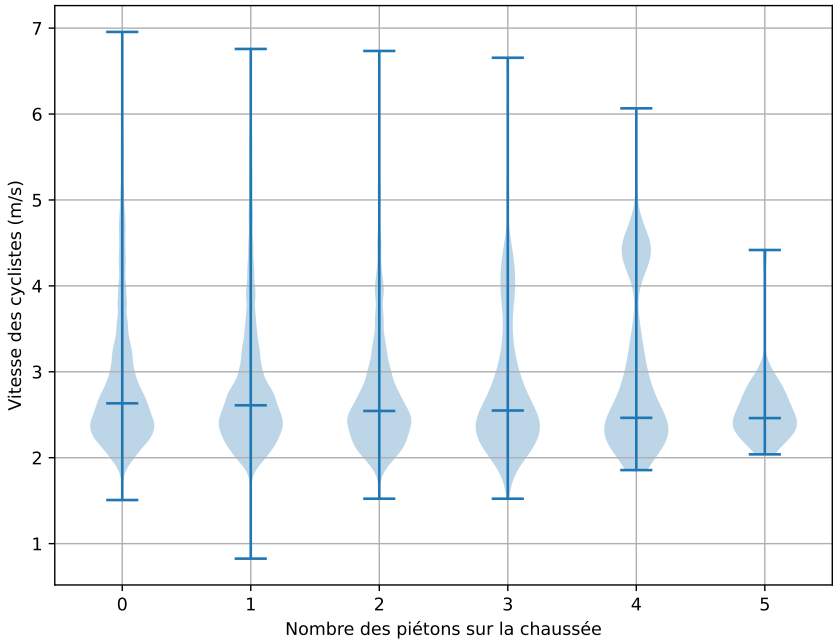

FIGURE A.4 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Mont Royal et De la Roche

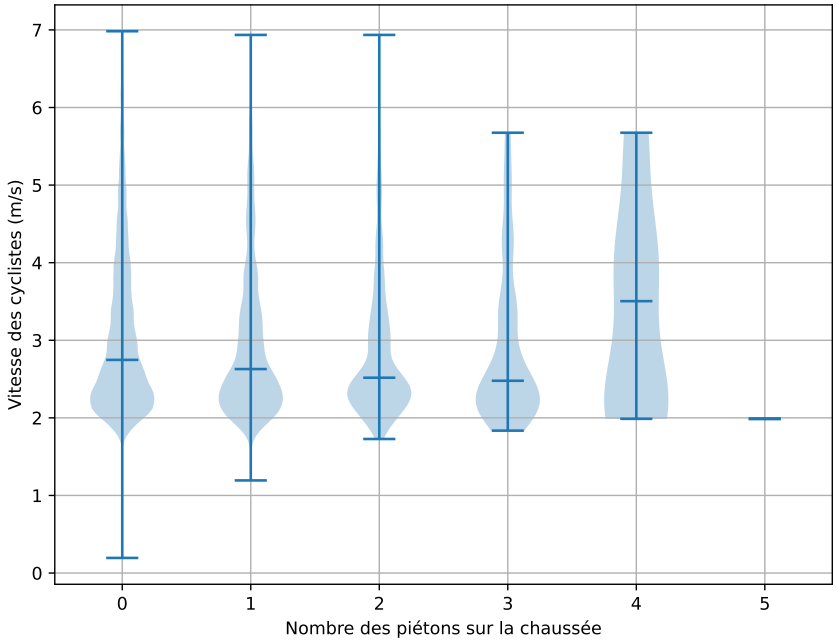

FIGURE A.5 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Mont Royal et Drolet

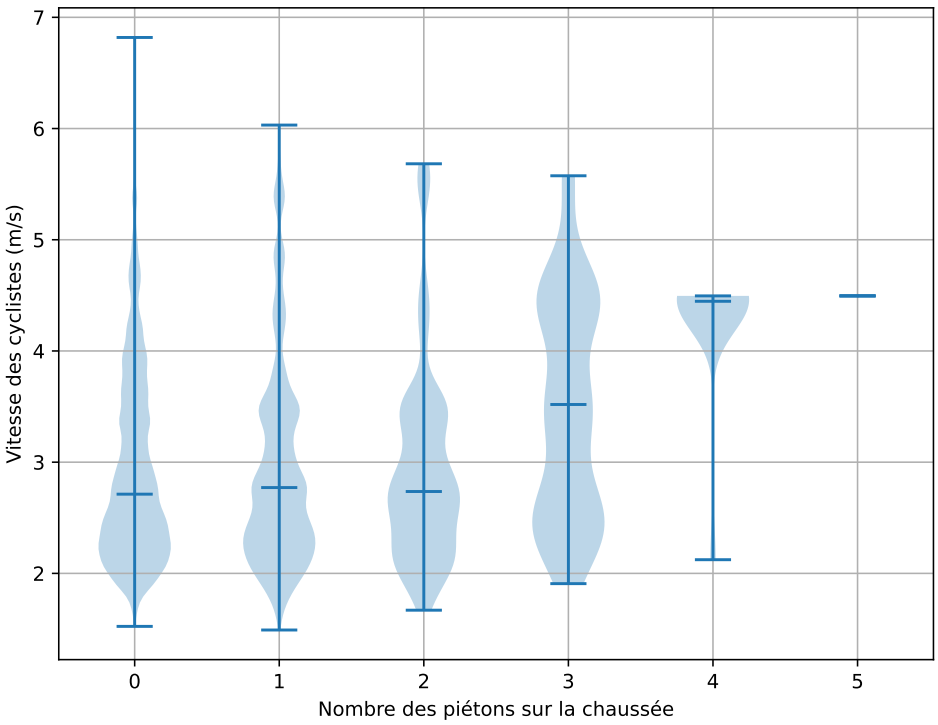

FIGURE A.6 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Wellington entre 3ème et 4ème Avenue

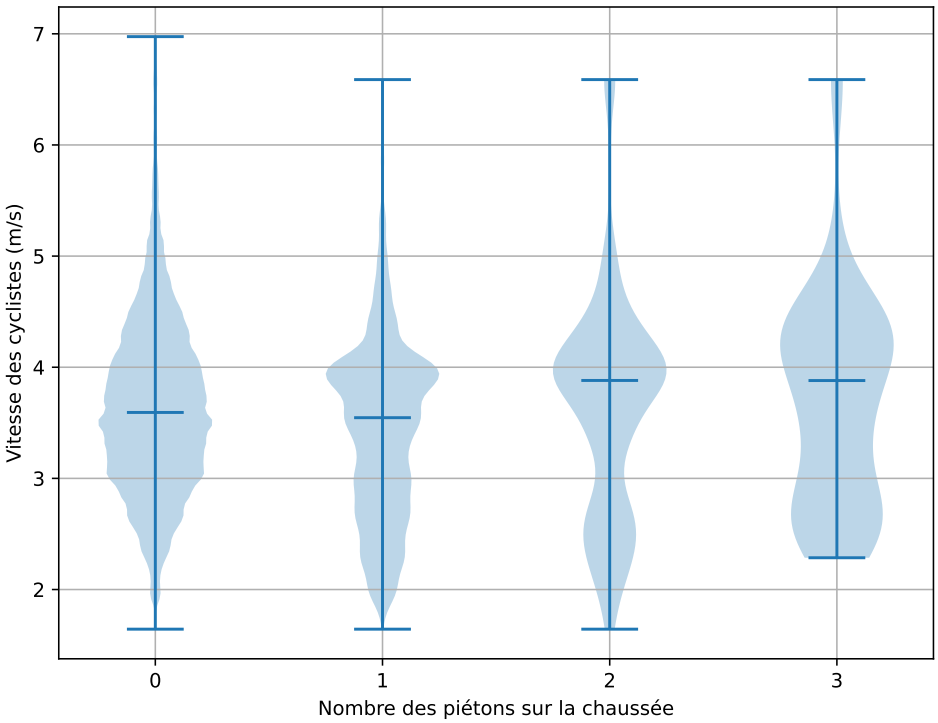

FIGURE A.7 Vitesses des cyclistes selon le nombre de piétons à Wellington et Hickson