

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Étude de la sécurité routière en présence d'un véhicule automatisé

ÉTIENNE BEAUCHAMP
Département de génies civil, géologique et des mines

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

Décembre 2020

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Étude de la sécurité routière en présence d'un véhicule automatisé

présenté par **Étienne BEAUCHAMP**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Martin TRÉPANIÉR, président

Nicolas SAUNIER, membre et directeur de recherche

Owen WAYGOOD, membre externe

DÉDICACE

*À mes parents,
pour votre amour et votre soutien*

REMERCIEMENTS

Dans un premier temps, j'aimerais remercier mon directeur de recherche, Nicolas Saunier, pour son expertise, son encadrement, sa patience et surtout sa disponibilité au cours des deux dernières années.

Je voudrais également remercier tous ceux qui ont contribué, parfois indirectement, à la réalisation de ce projet. Merci particulièrement à Catherine Toulouse, Lionel Nébot Janvier et Bénédicte Samuel-Lafleur de m'avoir accompagné lors des collectes de données sur le terrain. Aussi, je désirerais exprimer ma reconnaissance aux nombreux collègues avec qui j'ai partagé un bureau et à tous mes amis, sans qui mon quotidien aurait indéniablement été moins agréable.

Merci à la SAAQ, au MTQ, à la Fondation CAA-Québec et à Mitacs pour le financement du projet. Merci également au CIRRELT, à l'AQTr, ainsi qu'au RRSR pour leur aide financière.

Finalement, je souhaiterais souligner ma gratitude immense à mes parents pour leur générosité et pour m'avoir épaulé pendant mes études.

RÉSUMÉ

L'automatisation est fortement associée à l'essor économique et généralement perçue comme un des moteurs importants de la prospérité technologique qui l'accompagne. Hyponyme du futur, les voitures totalement autonomes sont souvent dépeintes dans la littérature de fiction, dans les films et avec d'autres médiums artistiques comme un accessoire indispensable à une vie futuriste. Avec raison, la voiture autonome est perçue, dans l'imaginaire collectif, comme un jalon technologique important des progrès d'ingénierie dans le domaine du transport. Comme pour la plupart des développements qui la précèdent, elle se veut un outil qui facilitera nos déplacements. En effet, elle est généralement envisagée comme un remède à une panoplie de problèmes comme l'accès à la mobilité, les émissions de gaz à effet de serre et les collisions de la route. Malheureusement, il s'avère impossible de valider ces affirmations et de connaître les effets réels à long terme de l'introduction d'une telle technologie. Qui plus est, les craintes que suscitent ces véhicules en termes de sécurité posent un frein important à leur implantation massive. Il s'avère donc crucial d'examiner cet aspect et de se questionner sur une façon de certifier leur sécurité, et ce, sans avoir à attendre que des collisions se produisent.

Dans ce contexte, ce projet de recherche se penche sur deux projets pilotes de navettes automatisées menés en milieu urbain au Québec en 2019. L'étude concerne plus spécifiquement l'utilisation d'enregistrements vidéos, ainsi que des techniques de vision artificielle pour évaluer les interactions entre les différents usagers de la route et ces véhicules automatisés. L'objectif premier du projet de recherche était d'évaluer la sécurité des interactions qu'ont eues ces navettes à l'aide d'indicateurs de sécurité. L'objectif secondaire était d'explorer les caractéristiques de la circulation avec des navettes automatisées.

Les résultats obtenus indiquent que ces navettes, du troisième niveau d'automatisation, circulant à basse vitesse sur un trajet prédéfini de rues peu achalandées, ont généré des interactions beaucoup plus sûres que celles impliquant des véhicules ayant une trajectoire similaire, pour tout site, selon la moyenne des indicateurs de sécurité. Cela pourrait s'expliquer en partie par leur comportement beaucoup plus prévisible. En effet, les données d'accélération montrent que les navettes étudiées sont beaucoup plus délicates dans leurs manœuvres de démarrage et de freinage. Aussi, la moyenne et tous les quartiles des vitesses d'une navette sont beaucoup plus faibles que ceux de véhicules ayant des trajectoires comparables. D'après les modèles prédictifs obtenus, les valeurs du 85^e centile de l'accélération et du 15^e centile de la vitesse des autres usagers impliqués dans les interactions sont associés aux différents indicateurs de sécurité. Le site d'étude a également un impact sur la dangerosité des interactions. En résumé,

ces navettes se sont également avérées plus sûres pour les interactions impliquant des usagers de la route vulnérables que les véhicules de contrôle. Aucune différence n'a été constatée entre les caractéristiques du trafic pour les intervalles de temps avec ou sans navette.

ABSTRACT

Automation is strongly associated with economic growth and is widely seen as an important driver of the technological prosperity that accompanies it. Associated with the idea of the future, automated cars are often portrayed in fictional literature, movies and other mediums as an indispensable accessory to a futuristic life. The automated car is seen in the collective imagination as an important technological milestone in transportation engineering progress. As with most of the preceding developments, it is intended to facilitate our travelling behaviours. Indeed, it is generally seen as a remedy for a range of problems such as access to mobility, greenhouse gas emissions and road accidents. Unfortunately, it is impossible to validate these claims and to know the real long-term effects of the introduction of such a technology. Moreover, the safety concerns that these vehicles raise are a major obstacle to their widespread deployment. It is therefore crucial to examine this aspect and to question how to assess their safety, without having to wait for accidents to occur.

In this context, this research project examines two automated shuttle pilot projects conducted in urban areas in Quebec in 2019. These shuttles are partially automated and always supervised by an operator, and circulate at low speeds on pre-defined routes on low-traffic streets. More specifically, the study concerns the use of video recordings, as well as computer vision techniques to evaluate the interactions between different road users and these automated vehicles. The primary objective of the research project was to assess the safety of the interactions between these shuttles using safety indicators. The secondary objective was to explore the characteristics of traffic with automated shuttles.

The results obtained indicate that these shuttles generated much safer interactions than those involving vehicles with a similar trajectory, for any site, according to the average of safety indicators. This could be explained in part by their much more predictable behaviour. Indeed, acceleration data shows that the studied shuttles are much more delicate in their starting and braking manoeuvres. Also, average value and all percentiles of speed distributions indicate that interactions with shuttles are safer than those with a human driver with similar trajectories. According to the predictive models obtained, the values of the 85th percentile of the acceleration and the 15th percentile of the speed of the other user involved are associated with the safety indicators. The study site is also associated with the safety of the interactions. In summary, these shuttles were also found to have safer for interactions involving vulnerable road users compared to control vehicles. The traffic had the same characteristics for time intervals with or without a shuttle.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
LISTE DES ANNEXES	xvii
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	5
2.1 Automatisation de la conduite	5
2.1.1 Aide à la conduite automobile	5
2.1.2 Émergence des VA	6
2.2 Évaluation des caractéristiques de circulation	13
2.2.1 Indicateurs et caractéristiques de la circulation	14
2.3 Évaluation de la sécurité routière	14
2.3.1 Données de collisions	14
2.3.2 Déclarations volontaires	15
2.3.3 Mesures substituts de sécurité	16
2.4 Méthodes de collectes de données pour l'évaluation du comportement et de la sécurité des usagers	18
2.4.1 Méthodes manuelles	19

2.4.2	Méthodes par vidéo	19
CHAPITRE 3 DÉMARCHE DU TRAVAIL DE RECHERCHE		22
3.1	Critères de sélection des sites	22
3.1.1	Montréal	23
3.1.2	Candiac	23
3.2	Procédure de collecte des données	25
3.3	Préparation des données	26
3.3.1	Calibration	26
3.3.2	Homographie	26
3.4	Traitement	28
3.4.1	Suivi basé sur les caractéristiques	28
3.4.2	Coordonnées curvilignes	31
3.4.3	Classification	32
3.5	Ajustements	32
3.5.1	Vérité terrain	33
3.5.2	Optimisation	34
3.6	Analyse	37
CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : Study of Automated Shuttle Interactions in City Traffic Using Surrogate Measures of Safety		40
4.1	Introduction	41
4.2	Literature Review	42
4.2.1	Road Safety Diagnosis Methods	42
4.2.2	Safety Assessment of AVs	44
4.3	Methodology	46
4.3.1	Site Selection and Video Data Collection	47
4.3.2	Data Preparation	47
4.3.3	Data Processing and Optimization	47
4.3.4	Trajectory Clustering	48
4.3.5	Safety Analysis with SMOs	49
4.4	Experimental Results	52
4.4.1	Sites and Collected Data	52
4.4.2	Distribution Comparisons	52
4.4.3	Regression Analysis	60
4.5	Conclusions	64
4.6	Acknowledgements	65

CHAPITRE 5	RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES	66
5.1	Modèle statistique	66
5.2	Analyse des caractéristiques de la circulation	71
5.2.1	Comparaison entre les manufacturiers	72
5.2.2	Situations de poursuite	76
5.2.3	Diagrammes fondamentaux du trafic	78
5.3	Conflits observés avec la navette	79
5.4	Conclusion	80
CHAPITRE 6	DISCUSSION GÉNÉRALE	82
6.1	Évaluation de la sécurité routière	82
6.2	Effets sur les caractéristiques de la circulation	84
CHAPITRE 7	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	85
7.1	Synthèse des travaux	85
7.2	Limites de la recherche	86
7.3	Perspectives	87
RÉFÉRENCES	88
ANNEXES	103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Résumé des données vidéo collectées à Montréal	23
Tableau 3.2	Résumé des données vidéos collectées à Candiac (^P indique une défectuosité de la caméra et ^N les sites où la navette est vraisemblablement conduite entièrement manuellement (par l'opérateur))	24
Tableau 3.3	Paramètres de suivi des caractéristiques de l'algorithme de <i>Traffic Intelligence</i>	38
Tableau 3.4	Paramètres de groupement des caractéristiques de l'algorithme de <i>Traffic Intelligence</i>	39
Tableau 3.5	Statistiques des distributions de vitesses moyennes à l'intersection de Letourneux et Pierre-De Coubertin par catégorie d'usager.	39
Tableau 3.6	Résultats de l'optimisation.	39
Table 4.1	Summary of processed video data collected in Montreal and Candiac per site.	53
Table 4.2	Summary of the recorded interactions.	54
Table 4.3	Regression models (p-values<0.05 are in bold) (part 1).	61
Table 4.4	Regression models (p-values<0.05 are in bold) (part 2).	62
Tableau A.1	Modèles de régression sans les interactions de sites (valeurs p<0.05 en gras).	103
Tableau B.1	Résultat du modèle de régression de TIV ₁₅ prédit	110

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Niveaux d'automatisation de la conduite (tiré de [1]).	9
Figure 2.2	Exemple d'une interaction tracé selon le modèle de psycho-espacement (adapté de [2]). À chaque instant (t), la position du véhicule meneur (x_n) et du véhicule suiveur (x_{n+1}), ainsi que la vitesse du véhicule meneur (v_n) et du véhicule suiveur (v_{n+1}).	15
Figure 2.3	Pyramide des conflits (adaptée de [3]).	17
Figure 2.4	Trois usagers avec leurs trajectoires possibles ($H_{i,j}$), les points de collision potentielle et temps à la collision t_k correspondant (tiré de [4]).	18
Figure 2.5	Illustration des instants d'entrée t_1 et de départ t_2 dans la zone de chevauchement (hachurée) des trajectoires des deux usagers pour le calcul du PET.	19
Figure 2.6	Illustration des instants de passage t_1 et t_2 de deux usagers au même point pour le calcul du TIV.	20
Figure 3.1	Installation typique à Candiac sur le boulevard Montcalm à deux sites.	25
Figure 3.2	Illustration d'une homographie (adapté de [5]).	27
Figure 3.3	Points de correspondances (numérotés en bleu) dans les deux espaces pour obtenir une homographie.	28
Figure 3.4	Masque de traitement.	29
Figure 3.5	Exemple de détection et de suivi. Trajectoires des points caractéristiques des usagers (au-dessus) et de leur regroupement par usager (en-dessous).	30
Figure 3.6	Coordonnées cartésiennes et curvilignes sur une ligne (en bleu) des points d'une trajectoire (en rouge).	32
Figure 3.7	Exemple de sur-segmentation d'un usager.	33
Figure 3.8	Exemple de sous-segmentation avec deux usagers.	34
Figure 3.9	Distributions des vitesses moyennes des différents types d'usagers à l'intersection des avenues Letourneux et Pierre-De Coubertin.	35
Figure 3.10	Exemple de sur-segmentation due à l'ombre d'un usager.	36
Figure 4.1	Methodology overview.	46
Figure 4.2	Cluster prototypes associated AVs (in orange) and other users (in blue) at the Montcalm & Inverness site (origins marked with a circle).	49
Figure 4.3	Maps of the routes (in blue) and selected video data collection sites (red dots) in Montreal (left) and Candiac (right).	55

Figure 4.4	Frames from the collected video data at each site with the automated shuttle visible.	56
Figure 4.5	Mean user speed and acceleration distributions of control vehicles and automated shuttles at each site.	57
Figure 4.6	15 th percentile of headway (h_{15}) distributions with a leading control vehicle or automated shuttle for three sites in Candiac.	58
Figure 4.7	TTC_{15} distributions for control vehicle and shuttle interactions at each site.	58
Figure 4.8	PET distributions for control vehicle and shuttle interactions at each site.	59
Figure 4.9	Δv_{85} distributions for control vehicle and shuttle interactions at each site.	60
Figure 4.10	Cumulative coefficients (intercepts) for the three models associated with control vehicles and automated shuttles depending on the second road user type (top) and the interaction category (bottom).	63
Figure 5.1	Matrice des coefficients de corrélation de Pearson des variables continues et binaires.	68
Figure 5.2	Matrice des coefficients de corrélation de Spearman des variables continues et binaires.	69
Figure 5.3	Matrice des coefficients du V de Cramér des variables catégorielles non binaires.	70
Figure 5.4	Accélération moyenne en fonction de la vitesse moyenne de chaque véhicule	71
Figure 5.5	Accélération moyenne à différentes vitesses pour un véhicule (à gauche) et pour une navette (à droite)	72
Figure 5.6	Distributions des vitesses instantanées	73
Figure 5.7	Distributions des vitesses moyennes	74
Figure 5.8	Distributions des accélérations instantanées	74
Figure 5.9	Distributions des accélérations moyennes	75
Figure 5.10	distance inter-véhiculaire (DIV) et différentiel de vitesse des dix situations de suivis avec le plus de DIV mesurés n'impliquant pas de navette.	76
Figure 5.11	DIV et différentiel de vitesse des dix situations de suivis avec le plus de DIV impliquant une navette en tête.	77
Figure 5.12	DIV et différentiel de vitesse des dix situations de suivis le plus de DIV impliquant une navette en position de suiveur.	78

Figure 5.13	Situation où la navette est amenée à s'arrêter abruptement ($TTC_{15} = 0.9850s$ et $PET = 6.333s$) à cause d'un cycliste.	80
Figure 5.14	Situation dangereuse ($TTC_{15} = 0.9927s$) où un homme sur un gyropode traverse sur un feu rouge, face à une navette qui entamait le franchissement du carrefour.	81
Figure B.1	Matrice des coefficients de corrélation de Pearson des variables continues du modèle de TTC final.	104
Figure B.2	Résidus du modèle de TTC final.	105
Figure B.3	Matrice des coefficients de corrélation de Pearson des variables continues du modèle de PET final.	106
Figure B.4	Résidus du modèle de PET final.	107
Figure B.5	Résidus du modèle de PET sans log.	107
Figure B.6	Résidus du modèle de différentiel de vitesse maximum final.	108
Figure B.7	Matrice des coefficients de corrélation de Pearson des variables continues du modèle de TIV_{15}	109
Figure B.8	Résidus du modèle de TIV_{15}	111
Figure C.1	Diagrammes fondamentaux à l'intersection d'Hochelaga & Letourneux.	112
Figure C.2	Diagrammes fondamentaux à l'intersection d'Ontario & Letourneux.	112
Figure C.3	Diagrammes fondamentaux face à la résidence Chartwell, sur le boulevard Montcalm.	113
Figure C.4	Diagrammes fondamentaux à l'intersection du boulevard Montcalm & l'avenue d'Inverness.	113
Figure C.5	Diagrammes fondamentaux à l'intersection de la voie ferrée & du boulevard Montcalm.	114

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACC	adaptive cruise control
ADAS	advanced driver-assistance systems
AEB	autonomous emergency braking
AFIL	alerte de franchissement involontaire de ligne
ARAMIS	agencement en rames automatisées de modules indépendants en stations
CAS	collision avoidance system
CEE-ONU	commission économique pour l'Europe des Nations unies
CS	connaissance de la situation
CVS	computer-controlled vehicle system
DARPA	defense advanced research projects agency
DF	diagrammes fondamentaux
DIV	distance inter-véhiculaire
ESP	électro-stabilisateur programmé
FAA	federal aviation administration
FCW	forward collision warning
FHWA	Federal Highway Administration
GRVA	groupe de rapporteurs pour les véhicules autonomes
IA	intelligence artificielle
LDWS	lane departure warning system
MADS	mesh adaptive direct search
MOTA	multiple object tracking accuracy
MSS	mesures substituts de sécurité
NAHSC	National Automated Highway System Consortium
OACI	organisation de l'aviation civile internationale
PATH	partners for advanced transit and highways
PET	post-encroachment time
pPET	time integrated TTC
PRT	personal rapid transit
RVE	régulateur de vitesse et d'espacement
SAE	Society of Automotive Engineers
TA	time-to-accident
TAdv	time advantage

TCT	trafic conflict technique
TET	time exposed TTC
TTL	time-to-Lane crossing
TIT	time integrated TTC
TIV	temps inter-véhiculaire
TRP	transport rapide personnalisé
TTC	time-to-collision
Tzeb	time-to-Zebra
VA	véhicules automatisés
VAC	véhicule automatisé et connecté
VC	véhicules connectés

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Modèles statistiques	103
Annexe B	Développement des modèles statistiques	104
Annexe C	Diagrammes fondamentaux	112

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

En plus de causer un nombre important de décès et de blessures, les collisions routières engendrent d'importants coûts sociaux à travers le monde où la voiture est omniprésente. Qui plus est, la croissance de la population et l'augmentation constante du taux de possession de voitures exacerbent ces problèmes. Étant donné que les collisions sont majoritairement attribués aux erreurs humaines, il y a un intérêt grandissant pour des systèmes d'aide à la conduite visant à limiter les erreurs possibles d'un conducteur. De plus, il est espéré que la connectivité et la coopération de tels véhicules pourraient permettre de réduire la congestion et de diminuer l'émission de polluants atmosphériques. Il est supposé que l'automatisation quasi totale des véhicules pourrait engendrer d'importants gains en matière de performance et de sécurité, de façon similaire à ce qui a été observé dans le milieu de l'aérospatiale avec l'automatisation des commandes de vols. Bien que les véhicules automatisés soient introduits tranquillement dans nos vies en étant porteurs d'une panoplie de promesses, leurs effets concrets sur la circulation et la sécurité restent à vérifier, et ce, de façon indépendante.

1.1 Éléments de la problématique

Bien que l'automatisation de la conduite représente d'importants défis d'ingénierie et qu'il est excitant de voir les progrès faits dans ce domaine, il ne faut pas pour autant s'emballer et encourager la prolifération d'une technologie qui n'a pas encore été homologuée. Bien que des effets positifs soient attendus, peu d'études se sont attardées à l'effet qu'auraient des véhicules automatisés dans un contexte urbain réel. À l'heure actuelle, les études sur les gains en termes de sécurité d'une telle technologie se basent généralement sur des données produites par simulation ou encore sur des rapports de collisions et d'incidents comportant de nombreuses limitations. Qui plus est, les instances gouvernementales sont généralement dépassées par l'arrivée rapide de nouvelles technologies et les lois sont souvent mal adaptées. Il pourrait donc être dans l'intérêt des décideurs d'avoir recours à des méthodes systématiques et objectives pour certifier de tels systèmes. Quelques efforts ont été mis de l'avant dernièrement, notamment avec la commission économique pour l'Europe des Nations unies (CEE-ONU) et sa filiale formée en 2018, le groupe de rapporteurs pour les véhicules autonomes (GRVA), qui se concentre sur les véhicules automatisés (VA) et les véhicules connectés (VC). Intel a également proposé en 2019 les premiers pas vers une démarche systématique d'évaluation [6]. Il n'y a cependant pas encore d'entité internationale, similairement à ce qui se voit dans le domaine de l'aérospatiale avec l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) et la

Federal Aviation Administration (FAA), qui a assuré une standardisation des pratiques dans le milieu et qui permet de normaliser le processus de certification de tels véhicules. Il s’agit donc là d’une problématique importante avec l’arrivée des VA.

De la même façon, les effets attendus sur l’amélioration de la circulation en général ne sont pas encore vérifiés ou soutenus par des données réelles. Les projections se basent généralement sur une vision très utopique de l’arrivée de tels véhicules. Il s’agit donc là d’une seconde problématique abordée dans ce projet de recherche.

1.2 Objectifs de recherche

Deux projets pilotes de navettes automatisées circulant à basse vitesse ont été mis à l’essai à Montréal et à Candiac dans la deuxième moitié de l’année 2019. L’opportunité d’étudier les comportements routiers en présence d’un VA a donc été saisie.

Le projet de recherche proposé vise à analyser les interactions des usagers de la route, motorisé et non motorisé, avec une navette automatisée, pour évaluer leur impact sur la circulation, plus particulièrement sur la sécurité. Il se divise plus spécifiquement en un objectif primaire et secondaire.

Objectif primaire : Analyser la sécurité des interactions, par des mesures substituts de sécurité (MSS), entre autres pour les usagers de la route vulnérables.

- Appliquer une approche de collecte et d’analyse automatisée de données vidéo sur le trafic impliquant des VA ;
- Proposer un cadre pour l’analyse de la sécurité impliquant des VA à l’aide d’indicateurs de sécurité pour pouvoir réaliser une étude proactive de leur implantation ;
- Construire des modèles statistiques pour identifier les variables ayant un impact sur les mesures substitues calculées.

Objectif secondaire : Explorer les effets sur les caractéristiques de la circulation.

- Comparer les comportements des automobilistes en situation de poursuite d’après les temps et les distances intervéhiculaires ;
- Quantifier avec des indicateurs de caractéristiques de circulation l’incidence des VA sur la circulation générale.

Il est à noter que le terme “automatisé” est utilisé dans ce mémoire pour faire référence aux niveaux définis par la norme J3016, un document incluant des définitions et notamment une taxonomie des niveaux d’automatisation, introduite par la Society of Automotive Engineers (SAE) International [7], présentée au chapitre 2, comme il s’agit de la référence généralement utilisée dans la littérature. Aussi, l’utilisation de l’acronyme VA sera essentiellement utilisé

pour faire référence aux navettes à l'étude. L'étude se consacre plus particulièrement sur des navettes automatisées circulant à basse vitesse. D'après la définition établie par la SAE, il s'agit de véhicules du troisième niveau d'automatisation.

Il faut également garder en tête que les résultats présentés dans ce mémoire ne sont pas directement transposables pour des véhicules hautement automatisés, qualifiés généralement comme "autonome" étant donné qu'il se déplace sans conducteur (niveau 4 et 5), ou même pour les systèmes d'aide à la conduite (advanced driver-assistance systems (ADAS) en anglais) (niveau 1 ou 2). En effet, les différences entre ces technologies sont très importantes. De plus, les véhicules à l'étude parcourent des trajets préétablis, dans des zones relativement peu achalandées. Il ne s'agit donc pas d'un contexte représentatif de la complexité de l'ensemble des tâches impliquées dans la conduite.

1.3 Plan du mémoire

Le mémoire est séparé en 7 chapitres, qui se présentent comme suit :

- Le **Chapitre 1** a présenté l'introduction. Ce chapitre a permis d'amener le sujet, la problématique et les objectifs, généraux et spécifiques, du projet de recherche.
- Le **Chapitre 2** présente la revue de littérature. Cinq sujets et l'état de l'art qui s'y rapportent y sont présentés : l'automatisation de la conduite et son avènement ; les méthodes de collectes de données dans le domaine du transport, spécifiquement pour l'étude des comportements et de la sécurité ; les méthodes d'analyse de la performance routière ; et, finalement, les méthodes d'analyse de la sécurité routière.
- Le **Chapitre 3** montre la méthodologie employée dans le projet de recherche.
- Le **Chapitre 4** présente l'article "Study of Automated Shuttle Interactions in City Traffic Using Surrogate Measures of Safety" qui a été soumis à la revue "Accident Analysis & Prevention" en novembre 2020 (une première version a été acceptée pour présentation au congrès du Transportation Research Board de janvier 2021). Cet article énumère les résultats des indicateurs de sécurité, notamment à l'aide de visualisation et d'analyse statistiques pour les différents sites où ont eu lieu les collectes.
- Le **Chapitre 5** présente les résultats complémentaires qui n'ont pas été abordés dans l'article. Il s'agit principalement d'analyses statistiques supplémentaires, de sources de conflit observées manuellement et de résultats sur les performances routières.
- Le **Chapitre 6** présente une discussion générale qui ramène les objectifs et les faits saillants qui s'y rapportent, ainsi qu'une analyse critique de la méthodologie.
- Le **Chapitre 7** présente la conclusion, où une synthèse du mémoire y est faite. Les

limitations et les perspectives y sont également exposées.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Dans l'intérêt de mieux situer le lecteur avec la problématique étudiée, une revue de littérature est ici présentée. Ladite section se décline en quatre sous-parties. La première partie présente un résumé historique des développements technologiques liés à l'automatisation de la conduite automobile. La deuxième partie expose les outils habituellement employés pour évaluer la performance d'infrastructure de transport. La troisième partie décrit une variété de méthodes qui permettent de mesurer la sécurité routière. Finalement, la dernière partie présente les moyens disponibles pour collecter des données dans ce contexte.

2.1 Automatisation de la conduite

2.1.1 Aide à la conduite automobile

La mobilité est un aspect important au sein d'une société. La facilité avec laquelle les individus peuvent se déplacer est important pour la prospérité économique et sociétale d'une population. Parallèlement, l'automobile a su, depuis son avènement à la fin du 19e siècle, s'imposer comme moyen de transport et comporte désormais une part modale importante dans les pays industrialisés. Or, l'utilisation massive de ce moyen de transport n'est pas sans conséquences négatives. La pollution atmosphérique, la congestion, les blessures et les morts de la route sont quelques exemples d'impacts nuisibles qui affectent la société et l'économie [8,9].

Pour livrer bataille aux coûts d'une mobilité dominée par la voiture différentes mesures ont été prises. Notamment, des politiques ont été adoptées, amenant une révision de la façon de concevoir et d'aménager les routes. Les systèmes d'aide à la conduite ont fait leur apparition dans le même contexte, pour s'attaquer plus directement aux problèmes de sécurité et d'efficacité, causée par les limitations d'un conducteur humain [10].

Dans cette optique, les fabricants automobiles ayant pour intérêt de produire des véhicules plus attractifs ont commencé à intégrer de tels systèmes. À la fin des années 70, des voitures furent équipées du premier système de freins antiblocage, soit un des premiers systèmes d'aide à la conduire [11]. L'introduction du système de contrôle de traction suivit dans les années 80 et l'arrivée d'autres systèmes de contrôle de la conduite, tel que l'électro-stabilisateur programmé (ESP), suivit en 1995 [10]. Cette première génération de systèmes fonctionnait au moyen de senseurs dits proprioceptifs, soit des systèmes qui se basent sur les informations internes au véhicule. Il est à noter que de tels systèmes peuvent engendrer une "adaptation

de comportement”, et, plus spécifiquement, une “compensation du risque”, soit le fait que des usagers adaptent leur conduite à de nouvelles conditions ou systèmes et contrebalancent l’effet attendu (p. ex. des véhicules équipés d’ABS peuvent amener les conducteurs à avoir des distances intervéhiculaires plus faibles) [12, 13]. Bien qu’ils puissent induire de telles modifications de comportements, l’analyse de données de collisions a permis de conclure que de tels systèmes de contrôle dynamique de la conduite atténuent les risques de collision, potentiellement parce qu’ils permettent d’améliorer la dynamique de conduite et de réduire la probabilité de perte de contrôle [14, 15].

Vers la fin des années 90, une deuxième génération de systèmes fit son entrée sur le marché. Leur opération reposait plutôt sur des senseurs extéroceptifs, c’est-à-dire qu’ils se basent sur des données provenant de l’environnement externe au véhicule. Ces senseurs plus sophistiqués permirent l’émergence de systèmes d’aide à la conduite réalisant des tâches plus complexes.

Ces systèmes incluent : le régulateur de vitesse et d’espacement (RVE) ; le système anti-collision ; le système de surveillance des angles morts ; le système de freinage automatique d’urgence ; l’avertisseur de risque de collision à l’avant ; ainsi que l’alerte de franchissement involontaire de ligne (AFIL). Ultimement, l’intérêt d’intégrer de tels systèmes est de réduire le fardeau de la conduite pour l’automobiliste pour minimiser les erreurs liées aux facteurs humains et, conséquemment, les risques de collision. Différentes études ont souligné leur efficacité d’après des analyses statistiques [16–18]. Dans cette optique, l’automatisation de la conduite s’inscrit logiquement dans la suite des choses.

2.1.2 Émergence des VA

L’automatisation de la conduite n’est pas un concept qui a récemment piqué l’intérêt des chercheurs. Dès le milieu des années 60, des études importantes sur les nouvelles technologies de mobilité ont été menées. Des instances gouvernementales se sont notamment penchées sur le sujet pour tenter de comprendre les tendances et pouvoir guider les décisions dans le domaine du transport. Par exemple, en 1966, le ministère du Logement et du Développement urbain des États-Unis étudia les nouveaux systèmes de transport et s’intéressa déjà au concept de voies rapides réservées à des véhicules connectés circulant en peloton et des modes de transports en commun automatisés [19].

De premières expérimentations ont été menées sur la commande de direction automatique des véhicules en Angleterre au cours des années 1960. Le principe utilisé à l’époque consistait à enfouir un câble dans lequel circule un courant à 5 kHz. Le champ magnétique qui en résulte peut être utilisé pour corriger la trajectoire [20]. La conduite dirigée par radiofréquence a également été expérimentée au Japon à la même époque [21].

Le suivi automatique et le contrôle longitudinal de véhicules firent l'objet d'études à la fin des années 60 et dans les années 70 [22–24]. L'enthousiasme pour l'automatisation de la conduite se fit sentir à la même époque dans le milieu du transport collectif, alors que des projets de transport rapide personnalisé (TRP) bénéficiant d'un système de contrôle longitudinal firent leur apparition, d'abord à Morgantown, sur le campus de l'université de la Virginie-Occidentale [25, 26], puis notamment en Allemagne, avec le Cabintaxi [26], en France, avec le système d'agencement en rames automatisées de modules indépendants en stations (ARAMIS) [27] et au Japon, avec le computer-controlled vehicle system (CVS) [28]. La technologie proposée dans ces projets ne fut cependant jamais adoptée, principalement parce qu'il s'agissait de systèmes complexes pour lesquels l'état de l'art des systèmes de contrôle, de communication et de capteurs était un facteur limitant [29].

Un des jalons importants de la conduite automatisée est la mise sur pied de programmes nationaux de recherche sur les concepts futurs pour améliorer la circulation routière avec l'implantation de nouvelles technologies. Ces projets ont fait progresser de manière significative l'utilisation de capteurs.

En 1986, en Europe, le programme PROMETHEUS (PROgramme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety) permit de financer des projets visant à élaborer des concepts pour améliorer le trafic en Europe (en matière de sécurité, d'économie, d'environnement et d'efficacité). La participation de différents constructeurs automobiles supporta les premiers progrès dans la conduite assistée, comme la conception du adaptive cruise control (ACC) [30].

Parallèlement, aux États-Unis, l'université de Californie à Berkeley, en partenariat avec le ministère des Transports de Californie, fonda le programme PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) [31]. Ce programme finança des projets dans des domaines tels que les systèmes anticollision, le contrôle des véhicules et les concepts d'automatisation. Il dirigea notamment les tests d'autoroute intelligente menés dans les années 90 [32].

Au Japon, différentes instances gouvernementales ont lancé plusieurs programmes d'IVHS soit le "Vehicle Information and Communication System", l'"Universal Traffic Management System", l'"Advanced Safety Vehicle (ASV)", le "MOC-Intelligent Transportation System" et le "Super SmartVehicle System". Ces programmes permirent d'étudier et de développer une vingtaine de systèmes d'aide ou d'automatisation de la conduite, ainsi que d'étudier la communication intervéhiculaire [33].

À la fin des années 90, la Federal Highway Administration (FHWA) a établi la National Automated Highway System Consortium (NAHSC) pour conduire des recherches sur les

technologies de contrôle de la conduite. Cette entité mena notamment des démonstrations des capacités des systèmes automatisés de la route. Diverses technologies de maintien de la trajectoire, basées sur la vision par ordinateur ou une infrastructure améliorée, comme les aimants intégrés à la chaussée et les bandes réfléchissantes radar posées sur la chaussée ont été présentées lors de l'événement Demo '97 du NAHSC [10]. Des manœuvres plus complexes furent présentées lors de l'événement Demo 2000 de l'AIIST au Japon, comme la conduite en peloton, le "stop-and-go", l'intégration de voies de circulation et l'évitement d'obstacles.

Les dernières innovations de capteurs et l'engouement de l'intelligence artificielle (IA) ont grandement contribué à l'avènement des VA. En 2003, le Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) organisait une compétition ambitieuse, avec un grand prix d'un million de dollar. Le Grand Challenge qui pris place au mois de mars 2004, mettait au défi de concevoir un véhicule intelligent capable de conduire un véhicule sur 142 miles à travers le désert de Mojave, et ce, en moins de 10 h. Aucune équipe ne réussit à compléter le défi lors de la première édition et c'est à la deuxième itération de la compétition, qui eu lieu en 2005, au mois d'octobre, que cinq équipes complétèrent le parcours [34].

Bien que l'automatisation de la conduite est accompagnée de beaucoup d'intérêt, les différentes législations et la complexité judiciaire liée à la responsabilité en cas de collision demeurent des freins importants à la propagation plus rapide de tels véhicules [35].

En 2014, SAE International a publié la norme J3016 [7]. Celle-ci découle de discussions avec des chercheurs et des parties prenantes dans le domaine et est désormais largement utilisée, bien qu'elle n'ait aucun poids législatif. Ce standard permet de catégoriser selon un des cinq niveaux d'automatisation d'un véhicule. La Figure 2.1 présente la définition de chaque niveau.

Aujourd'hui, les VA ne se retrouvent pas sur les routes de façon omniprésente, bien que des fabricants aient annoncé par le passé leur intention de mettre sur le marché de tels véhicules d'ici 2020 [36, 37]. En effet, la pénétration des VA sur le marché semble être plus modeste que ce qui avait été espéré il y a quelques années, malgré les promesses qui accompagnaient cette technologie. Ceci s'explique notamment par le manque d'action politique et l'applicabilité à large échelle des technologies proposées. Tout d'abord, la plupart des gouvernements nationaux n'ont pas de mesures strictes pour gérer les risques en matière de sécurité des VA. En effet, la plupart des décideurs ont plutôt adopté des lignes directrices, qui ne sont généralement pas obligatoires, et qui sont plutôt axées sur les tests de VA [38]. Ensuite, les VA font toujours face à d'importants défis techniques et économiques [39]. Si ces obstacles sont perçus comme insurmontables, l'intérêt pour ce domaine pourrait conduire à un "hiver de l'automatisation de la conduite", similairement à la période de stagnation qu'a connue la recherche plus généralement dédiée à l'IA dans les années 80. [40].

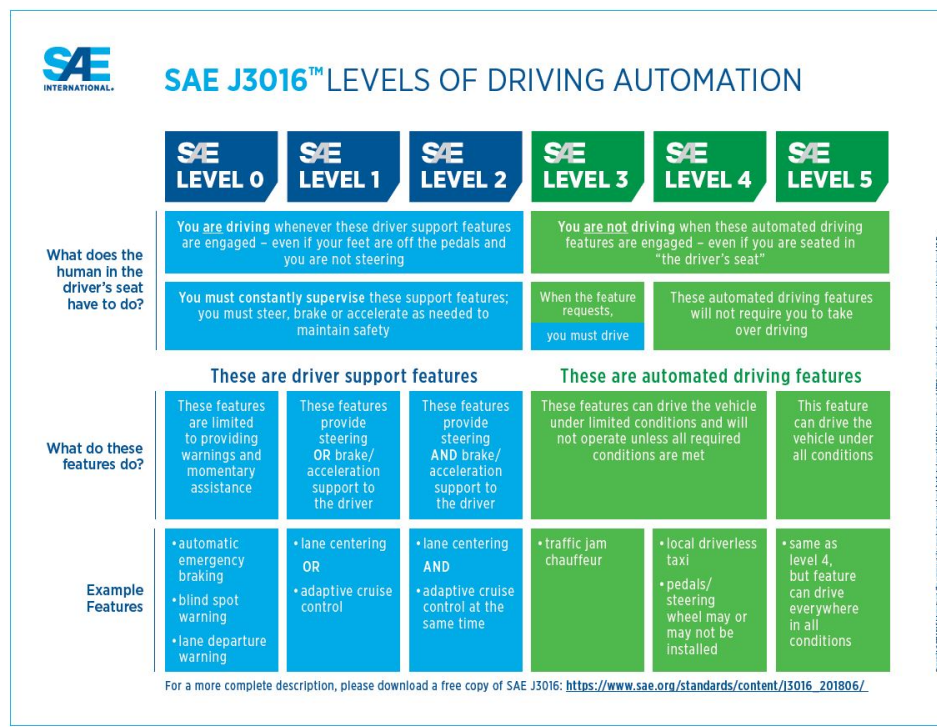


Figure 2.1 Niveaux d'automatisation de la conduite (tiré de [1]).

Les experts ont de la difficulté à prédire l'année où des véhicules seraient commercialement disponibles pour le grand public et ceux-ci continuent de réviser leurs prédictions à la hausse, prévoyant maintenant généralement une entrée sur le marché vers 2040 [41]. Bien qu'ils ne soient pas accessibles sur le marché, les VA font actuellement partie de services offerts. En effet, Waymo, filiale d'Alphabet, la compagnie mère de Google, offre depuis 2018 à Phoenix un service de taxi avec des véhicules au niveau quatre d'automatisation [42]. Similairement, Uber souhaite lancer très prochainement un service avec des VA de niveau quatre dans quelques villes à travers le monde [43]. Également, des services de navettes de niveau trois sont à l'essai depuis quelques années déjà [44].

Les deux projets qui ont été conduits plus récemment au Québec sont ici à l'étude. Deux navettes EZ10 d'Easymile ont circulé à Montréal et une navette Autonome de Navya a parcouru les routes de Candiac, entre le printemps et à l'automne 2019. Les deux entreprises sont d'ailleurs titulaires d'un permis d'essai (avec un opérateur) [45]

Ce genre de projet est généralement accueilli avec beaucoup d'enthousiasme considérant que l'analyse de l'impact socio-économique et les améliorations de la sécurité potentiellement apportées par les VA présentent cette technologie de façon très favorable [46].

Impact social

Les VA vont occasionner des retombées dans différentes sphères du transport. Ils pourraient notamment permettre des économies de temps, en offrant aux occupants d'utiliser leur temps de déplacement de façon plus efficace et productive pour travailler [47, 48].

L'automatisation de la conduite est aussi souvent associée avec une réduction des émissions de gaz à effet de serre [49]. En effet, les VA pourraient suivre des règles d'écoconduite, en minimisant l'accélération au départ et à l'arrêt. La consommation de carburant par kilomètre parcouru serait ainsi réduite [50]. Conséquemment, la réduction des émissions d'oxydes d'azote (NO_x) est espérée et pourrait permettre de lutter contre la pollution de l'air responsable de plusieurs millions de décès mondialement [51, 52]. Ces perspectives sont cependant optimistes et reposent sur l'hypothèse que le comportement des usagers serait inchangé.

Une circulation en pelotons serrés est également possible grâce aux VA et VC. Contrairement à un conducteur humain, les VA ont un délai minimal dû à un temps de réaction et perception, étant donné qu'ils peuvent communiquer leurs intentions de façon quasi instantanément. Sans compter que la friction de l'air est réduite pour les véhicules se trouvant dans de tels convois et il permettraient donc des économies de carburant [53–56]. Il s'agit là d'impacts importants pour des compagnies de transport de marchandises par camion [57]. Évidemment, un temps de perception-réaction aurait des impacts sur toute la circulation qui se traduirait en gain de temps et de sécurité.

Cependant, bien qu'une diminution des émissions par kilométrage pourrait être observée, l'offre de tels services et l'amélioration de la capacité des infrastructures pourraient induire une hausse de la demande et entraîner plus de déplacements [35, 49, 53], des déplacements plus longs et par conséquent augmenter l'étalement urbain [58, 59]. Également, bien que l'efficacité énergétique apportée par les véhicules amène une diminution des émissions par kilomètre parcouru par véhicule, les émissions totales pourraient en fait augmenter [60]. Il s'agit là de l'effet pervers de "rebond". Dans ce cas, par exemple, une augmentation du rendement énergétique permettrait de diminuer le coût du carburant par kilomètre parcouru, ce qui entraînerait une augmentation de l'utilisation des véhicules [61]. La mobilité pour les personnes qui ne peuvent pas conduire, tel que des personnes avec des limitations physiques et les personnes jeunes ou âgées qui n'ont pas de permis, serait amenée à augmenter [35, 60, 62].

Il est important de noter que de tels impacts sont des estimations qui se basent généralement sur des simulations, qui restent de l'ordre spéculatif, et qu'ils varient selon la pénétration sur le marché de tels véhicules [35]. Aussi, bien que le sujet ne soit pas abordé ici, l'acceptabilité sociale de cette technologie est également accompagnée de questionnement éthique [63].

Impact sur la performance

La congestion et les retards sur la route sont également une source de dépense et de gaspillage. Par exemple, aux États-Unis en 2011, les citoyens ont perdu 5,5 milliards d’heures de plus que ce qui aurait été requis pour leurs déplacements et ont dû acheter 2,9 milliards de gallons de carburant supplémentaires pour ce faire, gaspillant 121 milliards de dollars à cause des problèmes de congestion [8].

Un des principaux attraits des VA est la fluidité qu’ils pourraient apporter sur les routes. Il est notamment attendu que les VA amènent une augmentation de la capacité des routes [64–66]. En se déplaçant plus près l’un de l’autre, de tels véhicules permettraient d’augmenter significativement la capacité des routes existantes [67].

La communication entre les véhicules et les infrastructures routières pourrait également améliorer la fluidité de la circulation et réduire les retards [66]. Par contre, ce genre de technologie, pour être efficace, nécessiterait un taux de pénétration des véhicules très élevé et ne serait donc pas envisageable à court terme [68].

Les études qui se sont penchées sur cet aspect utilisent généralement des simulations et analysent des diagrammes fondamentaux pour différents taux de pénétration des VC. On note principalement une hausse de la capacité maximale dans un contexte où les VA sont omniprésents [69]. On constate également que les pelotons permettent de limiter les régimes favorables à des oscillations et des collisions [69].

Cependant, l’arrivée de tels véhicules pourrait également avoir des effets indésirables qui sont parfois négligés. Bien que les véhicules pourraient permettre une meilleure utilisation de la route, cette augmentation de la capacité risque de mener à une demande plus forte [60]. En effet, l’offre de service de VA n’est pas à l’abri du phénomène de “demande induite”, observé depuis quelques décennies pour les infrastructures routières [70, 71].

Impact sur la sécurité

L’utilisation massive de la voiture n’est pas sans risque, alors que les collisions de la route figuraient en 2016 parmi les dix principales causes de décès selon les données de l’OMS [72]. Qui plus est, l’erreur humaine figure comme une des causes les plus fréquentes de ces collisions. Bien que chaque collision s’explique par une multitude de facteurs, les facteurs humains demeurent une des causes principales. Aux États-Unis, 90 % des collisions ont une cause faisant partie des facteurs humains dans le dernier événement dans la chaîne de causalité et l’inattention, la distraction, ainsi que la vitesse sont les facteurs généralement contributifs à une à la gravité des blessures [73]. De façon similaire, au Canada, une négligence du conducteur

intervenait dans 85 % des décès de la route en 2018 [74].

Les VA des niveaux un à trois permettent de réduire la charge de travail des conducteurs, pour les soulager des tâches répétitives. Ultimement, les VA élimineront leur participation dans la conduite. On s'attend ainsi à réduire le nombre d'erreurs et, conséquemment, le nombre de collisions.

Les collisions de la route ont également des répercussions majeures sur la société, principalement parce qu'ils sont fréquents et qu'ils engendrent indirectement d'importants coûts. Aux États-Unis, plus de 5,5 millions de collisions sont rapportés annuellement par la police et il est estimé que les collisions ont induit, en 2009 seulement, un coût de 299,5 milliards de dollars [75]. En considérant les coûts externes (dommages matériels, retards engendrés, services d'urgence, impacts sur la productivité du marché et des ménages, assurance et droit), il est estimé que le coût des collisions, selon leur gravité, varie entre 2 000 \$ et 250 000 \$. Chaque décès coûterait plus de trois millions de dollars [76]. Il est donc attendu que les VA et VC permettent d'importantes économies en réduisant significativement le nombre de collisions de la route et le nombre de morts ou de blessés [74].

Malheureusement, l'évaluation de la sécurité des VA n'est pas actuellement standardisée ou réglementée. De plus, les systèmes des véhicules ont généralement recours à des techniques d'apprentissage automatiques. Or, ces solutions, comparativement aux logiciels "conventionnels", sont plus difficiles à certifier. C'est pourquoi l'étude de la sécurité des VA nécessite des essais opérationnels [77].

Les chercheurs se penchent généralement sur l'utilisation de données de rapport sur les kilomètres parcourus et les désengagements [78–81] ou bien sur les résultats de données de simulations macroscopiques [82–84].

Les études consultées utilisant les rapports se basent généralement sur les documents du département des véhicules motorisés de la Californie qui sont disponibles publiquement [85,86]. L'analyse des rapports de désengagements dresse un bilan sombre pour cette technologie, manquant apparemment de maturité [79]. En effet, en comparant le nombre de kilomètres parcourus et le nombre de désengagements et de collisions, les véhicules non automatisés étaient moins susceptibles d'avoir une collision que les VA [79,80] et on note une forte corrélation entre le nombre de kilomètres parcourus de manière automatisée et les collisions [78,81].

Ces études sont cependant limitées par un manque de standardisation des données dans ces rapports émis par des entreprises conduisant des tests. Ceci rend l'analyse de ces rapports difficiles à interpréter et à comparer. On note au passage que l'industrie automobile aurait intérêt à instaurer des normes de pratiques de tests et d'établir des méthodes de certifications

standards, semblablement à ce qui se voit dans l'industrie aérospatiale [78]. Aussi, l'évaluation de la sécurité par l'utilisation de données historiques pose un problème, car il s'agit d'une approche réactive au problème qui nécessite d'attendre que les incidents se produisent.

Les études ayant plutôt recours aux simulations utilisent communément des logiciels de simulation de la circulation microscopique, tels que VISSIM, et les MSS [46, 83, 87, 88]. Celles-ci exposent un portrait plutôt positif de l'émergence des VA. Bien que certains affirment qu'une faible pénétration du marché des VA peut impliquer une hausse du nombre de situations conflictuelles dans certains cas [46, 83], d'autres suggèrent plutôt que les VA puissent être bénéfiques indépendamment de leur pénétration du marché [87], la conclusion demeure qu'ils permettraient d'améliorer la sécurité.

Ces études présentent cependant une limitation importante, car leurs analyses dépendent des modèles utilisés. Or, il s'avère difficile de calibrer ces derniers pour simuler adéquatement les comportements de conducteurs. Évidemment, l'ajout de VA ne simplifie pas cette tâche, sans compter qu'on déplore souvent le manque de données sur les véhicules pour la calibration [87, 88].

La négligence du niveau d'automatisation est un autre manque qui a été observé pour ce type d'étude. En effet, il semblerait que les VA sont généralement supposés comme étant totalement automatisés (de niveau cinq). Or, il est difficile de prédire si l'offre de véhicules sur le marché débutera par des VA de niveau cinq ou si l'automatisation se fera de façon graduelle selon les niveaux d'automatisation (se référer à la Figure 2.1). Dans le cas où des véhicules des niveaux trois ou quatre seraient disponibles au public, les problèmes liés aux facteurs humains ne seraient pas systématiquement éliminés. Comme ce qui a été observé dans le domaine de l'aviation, l'automatisation du cockpit transforme la participation active des pilotes en un rôle de surveillance, une tâche pour laquelle les humains ne sont pas particulièrement efficaces [89]. Aussi, l'obligation d'avoir les yeux sur la route sans avoir à interagir avec les systèmes de commande dans une situation normale (comme c'est le cas, pour des véhicules de niveau deux et trois) a pour effet de réduire la connaissance de la situation (CS). Ceci peut exacerber ou même aggraver des problèmes en cas de défaillance des systèmes [90].

2.2 Évaluation des caractéristiques de circulation

En plus de la sécurité, les experts dans le domaine du transport s'intéressent généralement à l'étude des flux de trafic, notamment aux problèmes de congestion et de pollution. Les sujets généralement abordés dans la littérature sont : la capacité, la stabilité et le débit [64, 91, 92]. Plus largement, c'est ce qu'on qualifie de l'étude des performances routières.

Depuis l'émergence des systèmes d'ACC, l'effet de tels systèmes sur les flux routiers alimente des discussions. Les simulations conduites à l'époque indiquaient un grand potentiel pour ce genre de technologie [93]. Aujourd'hui des questionnements similaires font surface concernant l'arrivée des VA. Pour évaluer les bénéfices qu'apporteraient les véhicules, les études ont généralement recours aux diagrammes fondamentaux (DF) ou à des indicateurs.

2.2.1 Indicateurs et caractéristiques de la circulation

Une façon d'illustrer les performances routières est l'utilisation des DF. Les DF permettent d'illustrer, à l'échelle macroscopique, la performance du flux routier, en mettant en relation le débit, la densité et la vitesse moyenne. Ceux-ci permettent de visualiser l'effet d'une mesure ou d'une modification d'une infrastructure sur la performance de la circulation. La capacité et les DF ont notamment été utilisés pour étudier l'effet des VA sur la performance apportée dans un contexte de voie réservée [94] et dans le cadre de trafic mixte [92,95–98]. Les résultats de ces études montrent, d'après les simulations, que la capacité d'infrastructures existantes augmenterait, et ce, selon le taux de pénétration des VA.

Les situations de poursuite sont des interactions particulièrement intéressantes pour l'étude des caractéristiques de la circulation. Ces situations ont fait l'objet d'études depuis les années 50 [99]. Une méthode répandue pour visualiser ces situations consiste à tracer la DIV en fonction du différentiel de vitesse. Certains modèles comme le modèle psycho-espacement définissent des zones d'action, délimitées par des seuils de perception. Ces zones représentent les situations où un conducteur prendrait des actions pour maintenir une distance sécuritaire avec l'usager meneur. À l'intérieur de ces zones, le conducteur suiveur ne prendra pas nécessairement d'action étant donné qu'il n'est pas sensible à la situation et à la nécessité de prendre une action dans sa dynamique de conduite, d'après le véhicule meneur. La Figure 2.2 illustre ce concept avec un exemple simple.

2.3 Évaluation de la sécurité routière

Comme présenté à la section 2.1.2, les VA pourraient apporter des gains en sécurité. Évidemment, pour valider ces hypothèses il est nécessaire de se doter de moyens pour évaluer la sécurité. Pour cela, différentes approches peuvent être employées.

2.3.1 Données de collisions

Les données de collisions de la route comportent généralement des informations sur les collisions routières ayant résulté au moins en une blessure ou en un décès. Il s'agit d'une source

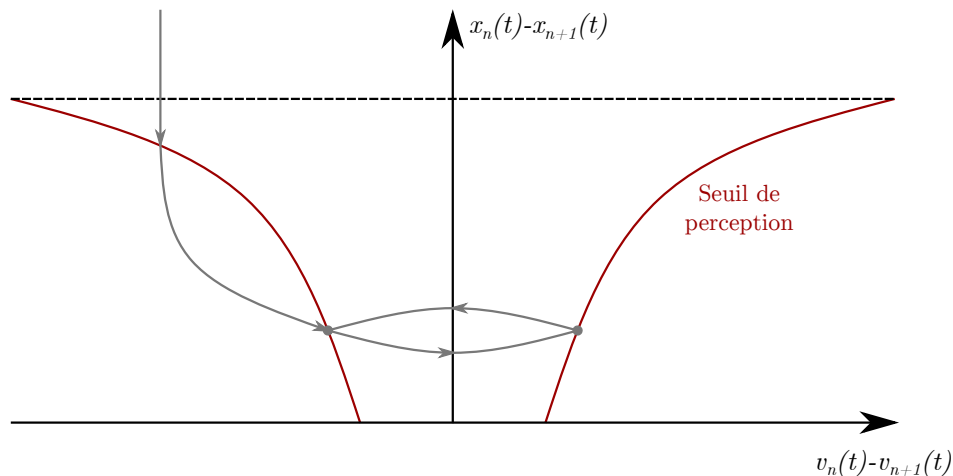


Figure 2.2 Exemple d’une interaction tracé selon le modèle de psycho-espacement (adapté de [2]). À chaque instant (t), la position du véhicule meneur (x_n) et du véhicule suiveur (x_{n+1}), ainsi que la vitesse du véhicule meneur (v_n) et du véhicule suiveur (v_{n+1}).

de données importante et intuitive pour évaluer la sécurité. Elles sont plus appropriées pour dresser un portrait général de la situation et de faire des comparaisons géographiques et dans le temps, de façon similaire à une étude épistémologique [100].

Les données de collisions présentent un désavantage important quand il s’agit d’évaluer rapidement l’impact de modifications sur le réseau routier puisque peu de données peuvent être collectées lorsque la période d’étude est limitée ou qu’elle touche une population très petite. Ce problème touche évidemment l’arrivée des VA, alors que peu de collisions sont actuellement répertoriés.

2.3.2 Déclarations volontaires

Les données de rapport de déclarations volontaires permettent d’obtenir de l’information sur les collisions et les quasi-collisions, tel que rapporté par les usagers de la route impliqués. Il s’agit généralement de sondages qui permettent d’obtenir des informations complémentaires non incluses dans les rapports de police [100].

De façon similaire aux rapports remplis en cas d’incidents sur la route, des données fournies par les constructeurs automobiles de VA sont accessibles et ont été utilisées dans le cadre d’études. Celles-ci concernent plus précisément les rapports remplis en cas de désengagement ou de collisions avec un véhicule et ont été utilisées principalement à titre comparatif avec des données sur la conduite humaine [78–81].

2.3.3 Mesures substituts de sécurité

En plus de dresser un portrait un peu trop général, comme il a été explicité à la sous-section précédente, les données de collisions présentent une autre contrainte importante. En effet, pour y avoir recours, il faut attendre que des collisions se produisent pour évaluer la sécurité [46]. Or, il s'agit là d'un problème lorsqu'on souhaite évaluer la sécurité de nouvelles technologies comme les VA étant donné que peu d'événements du genre sont documentés. C'est dans cette optique que l'utilisation de MSS pour évaluer les conflits s'avère intéressante.

L'analyse d'événements critiques pour évaluer la sécurité routière est un sujet qui intéresse les chercheurs depuis la fin des années 50 [101]. L'intérêt d'utiliser ce type de données, plutôt que les données de collisions, traditionnellement utilisées, était de pouvoir évaluer la sécurité de manière plus proactive. En effet, plusieurs problèmes se posent : les collisions sont des événements rares et aléatoires, ce qui implique qu'il faut beaucoup de temps pour collecter suffisamment de données ; parfois, des collisions ne sont pas signalés ; l'attente que des gens se blessent ou meurent sur la route pour pouvoir évaluer le problème pose un problème éthique ; les données de collisions comprennent généralement seulement le résultat final de la collision, ainsi que des causes, mais pas nécessairement tous les facteurs et le processus qui ont mené à un accident [102].

En 1968, des chercheurs chez General Motors se sont intéressés aux principes et à l'analyse de conflits [100,103]. La popularité de ce concept engendra l'arrivée de nombreuses approches de trafic conflict technique (TCT), alors développées dans différents pays dans les années 70. Une des plus réputées étant la technique suédoise [3]. Bien qu'elles diffèrent quelque peu entre elles, ces techniques se basent sur le concept de sévérité énoncé par Hydén, soit le fait que les interactions entre des usagers de la route sont des événements qui peuvent être catégorisés selon leur gravité et que les événements moins sévères peuvent être observés plus fréquemment. Le concept est généralement illustré par une pyramide telle que montrée à la Figure 2.3). Les TCT reposent sur l'observation de conflits et d'événements jugés critiques. La sévérité des interactions est mesurée avec des indicateurs de sécurité. La distinction entre un conflit léger et un conflit sérieux repose sur des valeurs seuils d'indicateurs, comme un *time-to-accident* (TA) de 1,5 s [3].

Il faut noter que l'utilisation des conflits est valable s'il existe une relation entre le nombre de collisions et le nombre de conflits sévères. Or, des études ont démontrées la corrélation entre le nombre d'événements jugés critiques et les collisions [104–107].

Le temps à la collision (*time-to-collision* (TTC) en anglais), le temps post-empiètement (*post-encroachment time* (PET) en anglais) et la décélération sont les indicateurs de sécurité les

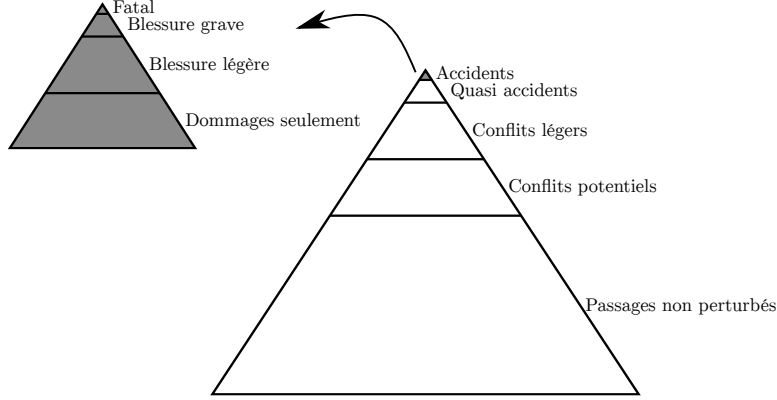


Figure 2.3 Pyramide des conflits (adaptée de [3]).

plus fréquemment utilisés dans la littérature [102]. D'autres mesures sont parfois utilisées, mais il s'agit généralement de variantes de ces indicateurs.

Temps à la collision

Le TTC est un indicateur qui détermine le temps avant que deux usagers entrent en collision, s'il maintenait leurs trajectoires. Cet indicateur a été introduit au début des années 70 [108] et il s'agit aujourd'hui de l'indicateur le plus utilisé dans les études [102].

Le TTC est calculé de façon continue, à chaque instant, comme le temps avant qu'une collision se produise entre les deux trajectoires projetées des usagers impliqués. Une définition naïve considère que les usagers poursuivent leurs trajectoires avec une direction et une vitesse constante. Des définitions plus réalistes ont été proposées, notamment l'approche probabiliste qui considère un ensemble de trajectoires possibles, avec leurs probabilités respectives, pour déterminer si des points de collision potentielle existent pour deux usagers [4]. Avec cette méthode (illustrée à la Figure 2.4), les trajectoires prototypes servent de parcours hypothétiques ($H_{i,j}$). L'espérance du TTC est calculée à chaque instant t entre U_i et U_j selon l'équation suivante :

$$TTC() = \frac{\sum_{1 \leq n \leq N_{CP}} P(Collision(CP_n))t_n}{P(Collision(U_i, U_j))} \quad (2.1)$$

Le temps t_n correspond à l'instant de la collision entre les usagers au point de collision potentielle CP_n . $P(Collision(CP_n))$ correspond à la probabilité de collision au CP_n . Les N_{CP} points de collisions sont ainsi sommés et pondérés selon les $P(Collision(U_i, U_j))$, définie comme $P(Collision(U_i, U_j)) = \sum_{1 \leq n \leq N_{CP}} P(Collision(CP_n))$, soit la probabilité cumulative des probabilités des points de collisions entre les deux usagers U_i et U_j .

Le TA [3], le time-to-Zebra (Tzeb) [109], le time-to-Lane crossing (TTL) [110], le time exposed

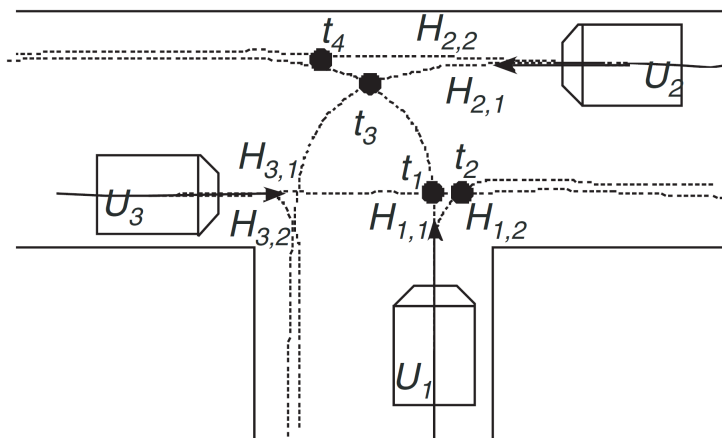


Figure 2.4 Trois usagers avec leurs trajectoires possibles ($H_{i,j}$), les points de collision potentielle et temps à la collision t_k correspondant (tiré de [4]).

TTC (TET) et le time integrated TTC (TIT) [111] sont des mesures également retrouvées dans la littérature. Ces indicateurs sont des variantes qui font partie de la famille des TTC.

Temps post-empiètement

Introduit en 1978 [112], le post-encroachment time (PET) mesure le temps qui sépare le moment où un usager quitte une zone de conflit à l'intersection du trajet d'un second et l'instant où ce second usager atteint cette zone. Contrairement au TTC, qui est obtenu d'après des prédictions probabilistes, cet indicateur provient d'une observation. Aussi, le PET est une valeur ponctuelle et non pas continue, comme c'est le cas avec le TTC. La Figure 2.5 illustre le calcul du PET.

Le time advantage (TAdv) [113], time integrated TTC (pPET) [114] et le temps inter-véhiculaire (TIV) sont également des indicateurs fréquemment utilisés qui sont des variantes du PET. Il est à noter que le TIV est un cas particulier du PET. En effet, cette mesure détermine la durée entre les passages à un point donné sur la route de deux usagers qui se suivent. La Figure 2.6 illustre cet indicateur.

2.4 Méthodes de collectes de données pour l'évaluation du comportement et de la sécurité des usagers

L'analyse de données en matière de conflits et des collisions de la route permet de comprendre les facteurs influençant la sécurité. Or, une grande variété de méthodes existent pour collecter de telles données. Le choix d'une méthode dépend de différents facteurs, notamment le budget,

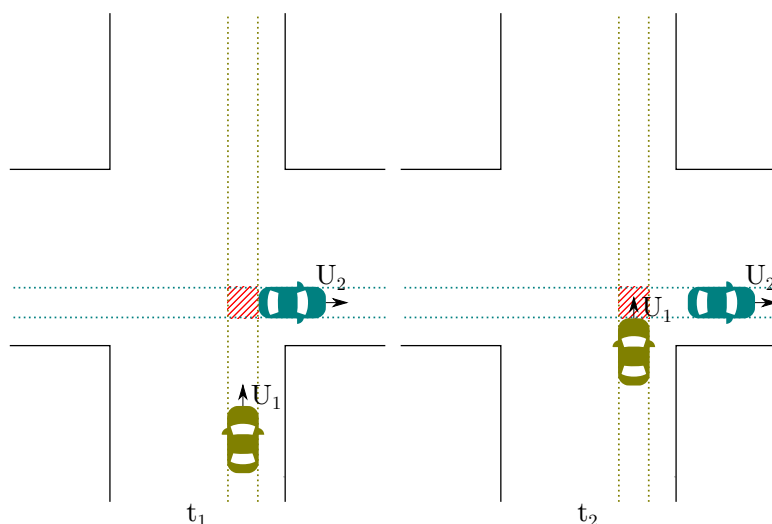


Figure 2.5 Illustration des instants d'entrée t_1 et de départ t_2 dans la zone de chevauchement (hachurée) des trajectoires des deux usagers pour le calcul du PET.

le lieu de la collecte, le personnel disponible et le type de donnée à collecter.

2.4.1 Méthodes manuelles

La collecte de données manuelle est une technique utilisée depuis longtemps et toujours employée à ce jour, lorsque les besoins sont minimaux (p. ex. lorsque les données nécessaires peuvent être obtenues avec une montre, un formulaire d'enregistrement et un crayon) [100]. Il s'agit d'une technique utilisée traditionnellement pour collecter des données de conflit sur la route. Les observateurs se positionnent à un endroit d'intérêt sur le réseau routier, ils relèvent tous les conflits et ils évaluent leur sévérité.

La collecte manuelle comporte cependant quelques limitations. D'abord, l'amélioration de la sécurité au cours des années a mené à une diminution du nombre de conflits observés ce qui nécessite de collecter des données pour de plus grandes périodes de temps [100]. Ce type de collecte nécessite également la formation du personnel procédant aux collectes. De plus, l'attention totale des individus collectant les données est requise pour la période de la collecte et ces derniers sont enclins à faire des erreurs [100].

2.4.2 Méthodes par vidéo

Bien que la collecte manuelle ait largement été employée historiquement, elle a rarement été utilisée dans la dernière décennie, et ce, au profit de l'analyse vidéo [102]. L'analyse d'image apporte une alternative flexible remédiant aux limitations de la collecte manuelle. D'abord,

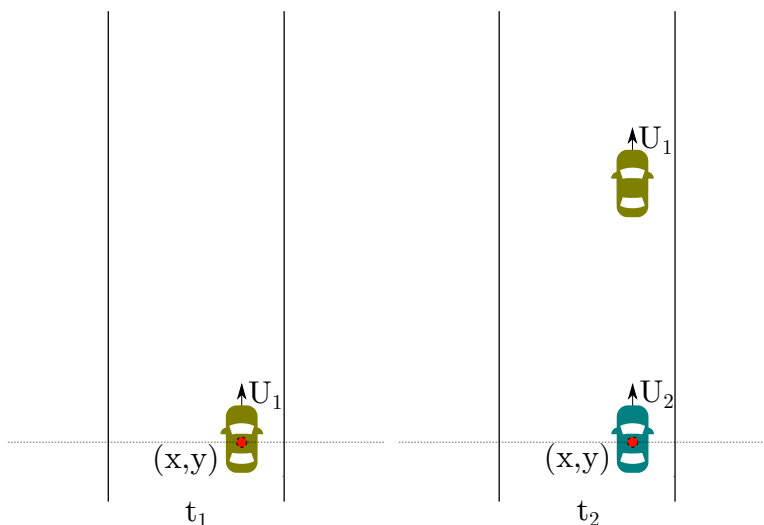


Figure 2.6 Illustration des instants de passage t_1 et t_2 de deux usagers au même point pour le calcul du TIV.

l'utilisation de caméra vidéo permet de collecter des données sur une plus grande surface (p. ex. plusieurs voies simultanément). Ensuite, l'installation est flexible et ne nécessite pas de modifications des infrastructures. Finalement, l'utilisation de caméras permet également de collecter un riche éventail de données [115].

Les progrès des dernières années en vision par ordinateur, jumelés au coût plus abordable des caméras et la qualité de l'image, ont rendu l'utilisation de données vidéos plus attrayante [100]. En effet, les vidéos renferment une grande richesse d'information et les techniques d'analyse modernes permettent de traiter automatiquement une grande quantité de données [116].

Les données vidéos sont généralement utilisées pour faire des observations manuellement ou même pour permettre de réviser des observations faites sur le terrain. Elles peuvent également être traitées à l'aide de logiciels, avec les données saisies par un utilisateur ou de manière automatique. Cette dernière approche est la technique utilisée dans le cadre du projet de recherche.

L'utilisation de caméras est cependant accompagnée de quelques limitations : la performance est affectée par la température et l'éclairage ; une installation en hauteur est préférable ; et la qualité des données vidéos est susceptible d'être affectée par des vibrations [115].

Pour traiter automatiquement les données vidéos, il faut avoir recours à des techniques modernes de vision artificielle pour extraire les trajectoires des usagers filmés. Cette extraction est généralement faite par inférence probabiliste, par soustraction de l'arrière-plan ou par

suivi de caractéristiques.

Soustraction de l'arrière-plan

Avec cette technique, le fond de l'image sans objet est utilisé comme référence. Ensuite, à chaque instant, l'image est soustraite avec le fond. La différence, si elle dépasse une valeur seuil choisie, permet de détecter les objets [117].

Des logiciels comme PedTrack [118] utilisent cette méthode. Cette technique offre généralement de bons résultats, mais elle est cependant très vulnérable au changement de luminosité, aux intempéries et à tout changement apporté au fond [119–121]. De plus, elle est généralement mal adaptée pour des situations de congestion. L'occlusion complexifie la délimitation des objets [122].

Suivi par inférence probabiliste

Cette technique consiste à prédire un état futur en tenant compte des mesures prises précédemment et de la connaissance à priori. L'utilisation d'un filtre de Kalman est une technique populaire qui permet de prédire les déplacements à partir de positions précédentes [117]. Cette méthode permet d'avoir une solution simple et efficace [123]. Par contre, cette approche est mal adaptée dans des scénarios où les objets interagissent les uns avec les autres et se regroupent [124].

Suivi basé sur les caractéristiques

Cette méthode débute par une sélection de caractéristiques sur des objets en mouvement, puis la correspondance des objets entre des images successives est établie. Les points suivis sont ensuite regroupés en trajectoires d'objets [124]. Cette approche a été utilisée pour l'analyse d'interactions dans différents contextes [116]. Évidemment, cette technique n'est pas à l'abri des problèmes. Pour celle-ci aussi, l'occlusion d'objets est un obstacle. On note également qu'il peut y avoir des erreurs avec l'estimation du centre de l'objet.

Bien que cette technique a été employée par le passé pour étudier la sécurité routière, notamment avec les MSS, elle n'a jamais encore été utilisée pour l'étude de vidéos impliquant des VA.

CHAPITRE 3 DÉMARCHE DU TRAVAIL DE RECHERCHE

Pour atteindre les objectifs du projet de recherche qui ont été énoncés à la section 1.2, une démarche en cinq étapes a été élaborée :

1. Conduire des collectes d'enregistrements vidéos pour obtenir des données réelles ;
2. Préparer les données collectées pour être prêtes à l'analyse ;
3. Traiter les vidéos à l'aide d'outils d'analyse d'image pour extraire des données sur les trajectoires des usagers à partir de techniques de suivi d'objets en mouvement ;
4. Peaufiner les résultats de suivi et optimiser les paramètres de suivis ;
5. Mesurer les changements de comportements observés en comparant les interactions impliquant des VA et celles impliquant des véhicules "témoins" à l'aide d'analyses statistiques.

Les différentes étapes du projet de recherche seront ici présentées, de façon similaire à la méthodologie fournie dans l'article scientifique inclus au chapitre 4 qui était plus concise. Cette section présente la démarche du travail de recherche en accordant un peu plus d'importance aux étapes qui n'y étaient pas ou peu expliquées.

Comme il a été expliqué au chapitre 2 dans la revue de littérature, les études de sécurité avec des MSS sont généralement plus appropriées pour évaluer l'effet de technologies émergentes. Par contre, les études précédemment faites sur le sujet des VA utilisent des données de simulations et ne jouissent pas de données réelles sur le terrain. La présence de projet pilote de VA dans la région de Montréal présentait donc une opportunité importante pour remplir ce manque dans l'état de l'art actuel. Des collectes de données vidéos ont donc été planifiées au printemps 2019, en marge du début des deux projets pilotes de navettes automatisées.

3.1 Critères de sélection des sites

La première étape pour recueillir des observations consiste à sélectionner les sites de collecte. Avant de procéder aux collectes, une étude préliminaire a été menée sur le terrain pour évaluer les lieux et déterminer les endroits appropriés pour installer les caméras. Ces premières visites effectuées ont notamment servi à déterminer les endroits où l'installation des caméras serait facile et où la vue offerte serait assez bonne. Lors de ces journées, les trajets des navettes étaient parcourus à pieds. Sur le chemin, les structures hautes comme les lampadaires ont d'abord été identifiées étant donné qu'ils fournissent une base stable pour les

pôles télescopiques utilisés. Une attention particulière a été donnée aux intersections puisqu’il s’agit d’endroits achalandés et complexes, maximisant le nombre d’interactions. Ensuite, les endroits où la vue fournie sur la rue était intéressante et dégagée.

3.1.1 Montréal

Le projet pilote mené à Montréal débuta le 27 juin 2019 et pris fin le 4 août de la même année. Deux navettes EZ10 de la compagnie française EasyMile parcouraient un trajet de 1,4 km, comportant sept arrêts. Les navettes circulaient entre 10 h et 18 h. Les journées de collectes à Montréal sont présentées dans le Tableau 3.1. Les lieux de collecte sont également présentés sur une carte dans l’article à la Figure 4.3.

Tableau 3.1 Résumé des données vidéo collectées à Montréal

Lieu de collecte	Jour	Heures d’opération	Durée totale	Nombre de passages de VA
Coubertin	03/07	10h30-16h12	≈17h00	10
	11/07	10h40-17h41		72
	15/07	13h54-17h48		22
Hochelaga	16/07	10h47-17h46	≈18h30	37
	22/07	13h05-17h52		15
	04/08	10h02-16h23		28
Ontario	30/07	10h18-17h35	≈15h30	63
	31/07	10h17-17h56		62

3.1.2 Candiac

Le second projet pilote étudié était celui dirigé par Keolis, impliquant une navette AUTONOM de Navya. Il était annoncé que la navette débiterait son service le 15 mai 2019 et qu’elle serait en fonction jusqu’à l’automne 2019. Le service était offert selon un horaire restreint et changeant quotidiennement. Les heures de fonctionnement étaient mises à jour sur le site de Keolis et étaient consultées pour planifier les sorties sur le terrain. La navette connut des difficultés et n’entra pas en service les premières semaines comme prévu. La première visite du terrain fut organisée avec des collègues de l’INRS le 27 mai 2019. Comme à Montréal, cette visite permit de déterminer les endroits propices pour installer l’équipement d’enregistrement et de noter les sources de conflits potentiels ou d’interactions intéressantes à étudier. Malheureusement, à cette date la navette n’était toujours pas en service. Le service devait commencer, avec du retard le 5 septembre, mais un bris d’équipement amena au lancement du service le 18 novembre.

Étant donné que la navette ne peut circuler en cas de fort vent ou lors de chutes de neige, les données ont été collectées en fonction des prévisions météorologiques. Les conditions météorologiques plus difficiles de décembre ont fréquemment mené à l'interruption du service de la navette et Keolis fournissait généralement un préavis d'annulation seulement quelques heures au préalable. Les responsables du projet étaient contactés avant les collectes alors que l'horaire affiché sur le site s'est avéré ne pas être fiable. Par exemple, une collecte prévue pour le 19 décembre a dû être abandonnée à cause du froid. Avec une température en matinée d'environ -20 °C et de forts vents, la navette a connu des problèmes techniques et son service n'a été maintenu que 31 minutes, sans compter qu'une des caméras a cessé de fonctionner après seulement quelques minutes. Quelques collectes ont ainsi dû être annulées. La navette a également connu un problème technique avec son système GPS. La perte de signal à l'intersession de la voie ferrée ainsi que Marie-Victorin aurait forcé l'opérateur à prendre le contrôle de la voiture pour quelques instants. Le Tableau 3.2 présente un résumé des collectes à Candiac où la navette était aperçue au moins une fois sur les images vidéo. Les lieux de collecte de Candiac, comme pour ceux de Montréal, sont présentés sur une carte dans l'article à la Figure 4.3.

Tableau 3.2 Résumé des données vidéos collectées à Candiac (^P indique une défectuosité de la caméra et ^N les sites où la navette est vraisemblablement conduite entièrement manuellement (par l'opérateur))

Lieu de collecte	Jour	Heures d'opération	Durée totale	Nombre de passages de VA
Chartwell	27/11	12h35-15h27	≈7h30	21
	03/12	09h20-11h55		14
	16/12	10h00-11h56		13
	19/12 ^P	09h34-10h05		-
Voie ferrée ^N	03/12	09h20-11h55	≈8h00	21
	16/12	10h00-11h56		18
	19/12	09h34-10h05		3
Inverness	29/11	13h05-15h00	≈09h30	13
	02/12	14h35-15h30		6
	04/12	09h30-10h10		7
	12/12	12h39-15h35		22
	17/12	09h52-11h58		13
Marie-Victorin ^N	29/11	13h05-15h00	≈09h30	17
	02/12	14h35-15h30		11
	04/12	09h30-10h10		6
	12/12	12h39-15h35		32
	17/12	09h52-11h58		26

3.2 Procédure de collecte des données

Lors des jours de collectes, des caméras GoPro du modèle HERO3+ étaient installées sur un poteau télescopique à un des sites sélectionnés. Une carte microSD de 128 Gb et une batterie portable de 10 000 mAh étaient également utilisées pour assurer une autonomie de près de 17 heures et demie. Des chaînes étaient également utilisées pour sécuriser l'équipement et prévenir le vol.

Puisque des infrastructures de la ville étaient utilisées pour installer les poteaux, une demande de permis "d'obstruction temporaire du domaine public" était envoyée généralement une semaine avant la collecte. Lorsqu'une journée de collecte s'achevait, l'équipement était retiré et les données enregistrées étaient transférées sur un disque dur à Polytechnique Montréal.

Le même type d'installation que celui utilisé à Montréal était utilisé à Candiac. La Figure 3.1 montre une installation à Candiac.



Figure 3.1 Installation typique à Candiac sur le boulevard Montcalm à deux sites.

Pour maximiser le nombre d'heures de vidéo colligé et compenser les heures d'opérations limitées de la navette à Candiac, deux caméras plutôt qu'une étaient installées à deux endroits différents pour chaque journée de collecte.

3.3 Préparation des données

Avant de procéder à l'analyse d'images, il est nécessaire de corriger la distorsion des lentilles des caméras et d'établir une correspondance entre les positions des objets du point de vue de la caméra (espace image) et les positions de ces objets au niveau du sol (espace du monde).

3.3.1 Calibration

Les caméras, comme celles produites par GoPro, sont généralement accompagnées d'une distorsion en barillet de l'image causée par la lentille, communément appelée effet œil de poisson. Ceci entraîne une déformation visible de lignes droites et doit donc être corrigé pour pouvoir subséquemment projeter avec plus de fidélité les positions extraites des images. Pour rectifier cet effet, l'image est modifiée par une transformation géométrique obtenue en utilisant une carte de rectification [125]. La matrice A , soit la matrice intrinsèque de la caméra, doit d'abord être calculée :

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

Où f_x et f_y représentent respectivement les distances focales en x et en y de la caméra. Les variables c_x et c_y représentent respectivement les centres optiques en x et en y . Les paramètres de distorsion sont également nécessaires au calcul. Ils sont généralement encapsulés dans le vecteur des *coefficients de distorsions*.

$$\text{coefficients de distorsions} = [k_1 \quad k_2 \quad p_1 \quad p_2 \quad k_3] \quad (3.2)$$

Où k_1 , k_2 et k_3 sont les coefficients radiaux. p_1 et p_2 sont les coefficients de distorsion tangentielle. Ces deux matrices qui permettent d'établir une correspondance entre les coordonnées de l'image originale, avec distorsion, et les coordonnées de l'image corrigée ont été calculée au préalable et sont disponible sur le wiki de la recherche en Transports Intelligents et Sécurité Routière à Polytechnique Montréal [126].

3.3.2 Homographie

Les trajectoires capturées sur les images vidéos devront être projetées dans un système de coordonnées au niveau du sol du monde réel, notamment pour assurer une standardisation des trajectoires récoltées sous différents angles, ainsi que pour l'estimation des distances. Pour

ce faire, une homographie est calculée pour établir une correspondance entre les pixels de l'image corrigée de la caméra vidéo et les pixels d'une image aérienne capturée au-dessus du site. En d'autres termes, les positions des usagers dans le système de coordonnées de la caméra sont mises à l'échelle de la vue aérienne. La Figure 3.2 illustre la projection d'un point \tilde{x}_0 , provenant d'un premier système de coordonnées, vers un autre système de coordonnées avec H_{10} , qui correspond à la matrice 3 x 3 d'homographie, pour obtenir le point \tilde{x}_1 correspondant.

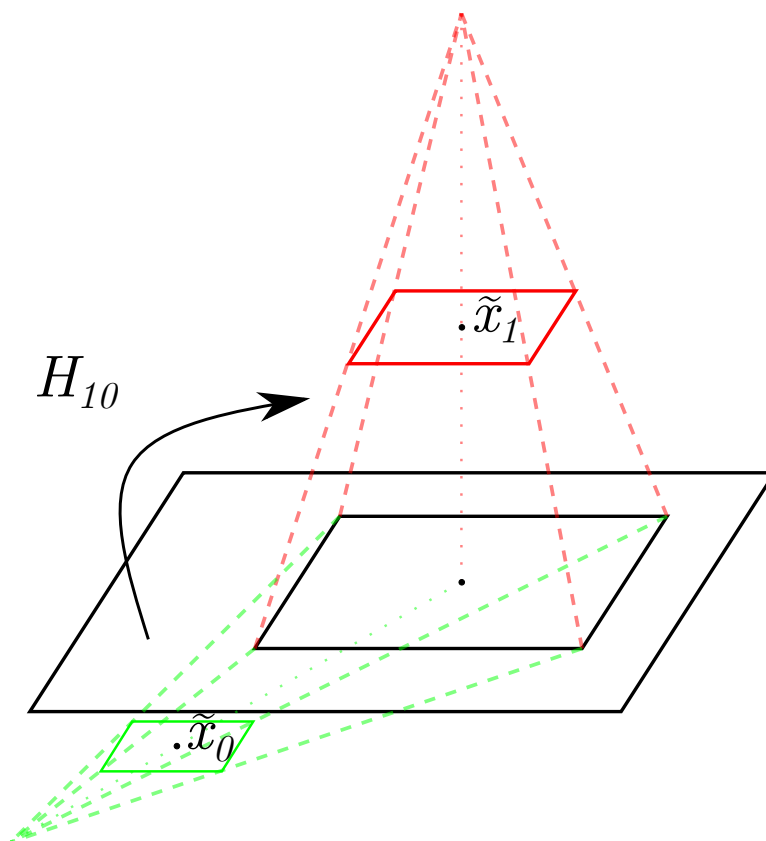


Figure 3.2 Illustration d'une homographie (adapté de [5]).

La correspondance entre les deux systèmes peut se faire avec la transformation suivante :

$$\begin{aligned}
 s\tilde{x}_1 &\sim H_{10}\tilde{x}_0 \\
 s \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{pmatrix} &\sim H_{10} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Ici, le facteur s permet de faire une mise à l'échelle entre les systèmes de coordonnées. La Figure 3.3 illustre les points correspondants dans les deux espaces images utilisés pour estimer la matrice d'homographie. L'homographie peut être obtenues grâce aux outils du

projet *Traffic Intelligence* [116, 127].



Figure 3.3 Points de correspondances (numérotés en bleu) dans les deux espaces pour obtenir une homographie.

3.4 Traitement

Avec les homographies calculées pour chacune des journées de collecte, les vidéos ont été traitées pour extraire la position des usagers à chaque instant à l'aide de la méthode de “détection et suivi de points caractéristiques” telle qu’implémentée dans le projet libre *Traffic Intelligence*.

3.4.1 Suivi basé sur les caractéristiques

Pour obtenir les trajectoires des usagers, les vidéos sont traitées avec un algorithme de suivis des caractéristiques implémenté dans le projet *Traffic Intelligence*. Étant donné que le traitement des images vidéo est un processus qui peut prendre beaucoup de temps de calcul,

une zone d'étude est d'abord délimitée. Ainsi, l'espace dans les images qui ne s'avère pas intéressant pour l'extraction des trajectoires est exclu, limitant ainsi le temps de calcul. Un masque délimitant la zone d'exclusion (noire) et la zone d'analyse (blanc) est grossièrement dessiné à l'aide d'un outil de retouche d'image. La Figure 3.4 montre un exemple de masque réalisé.



Figure 3.4 Masque de traitement.

L'analyse des images est ensuite effectuée sur les vidéos avec l'algorithme de suivi des caractéristiques, plus spécifiquement la méthode de Kanade-Lucas-Tomasi [128]. Cette méthode permet de suivre des points d'intérêts sur des objets en mouvement. Les trajectoires des points d'intérêts sont ensuite regroupées selon les paramètres de l'algorithme de regroupement. Les paramètres de l'algorithme de suivi et de groupement sont respectivement résumés dans le Tableau 3.3 et le Tableau 3.4. La Figure 3.5 illustre un exemple de résultat obtenu avec la technique employée. L'algorithme est d'abord exécuté avec les valeurs de paramètres par défaut. Subséquemment, ceux-ci sont réglés lors de la phase d'ajustement.

Les trajectoires représentent approximativement la position centrale de l'objet à chaque

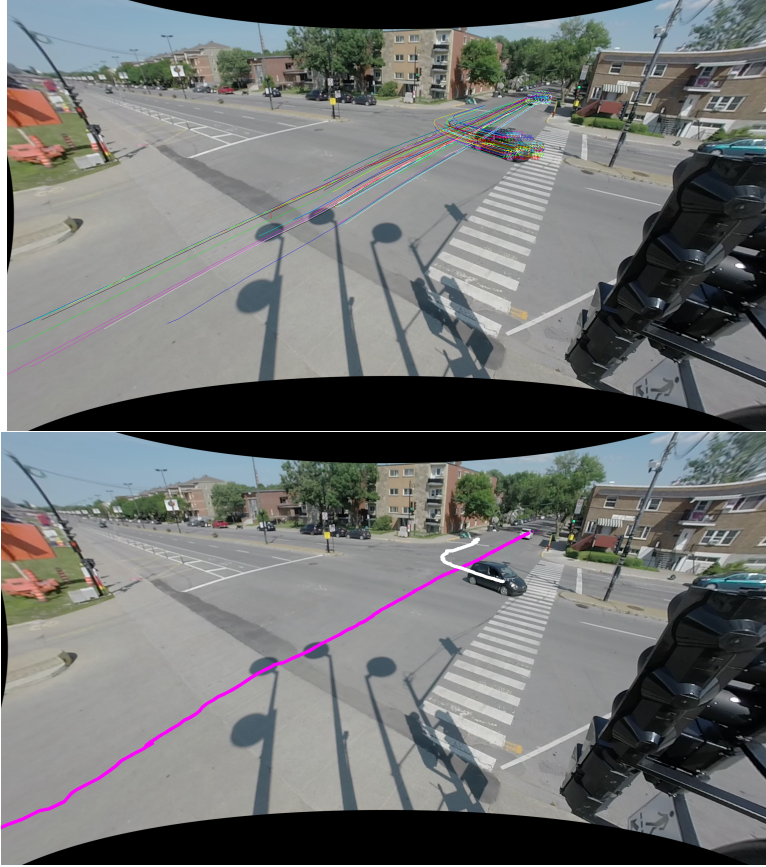


Figure 3.5 Exemple de détection et de suivi. Trajectoires des points caractéristiques des usagers (au-dessus) et de leur regroupement par usager (en-dessous).

image. Celles-ci sont stockées sous la forme d'un vecteur de n positions. Un pas de temps constant, soit le temps entre chaque image, sépare ces positions. Il est donc possible à partir de ces informations de déterminer les vitesses et les accélérations instantanées. En effet, le temps entre les images est l'inverse de la fréquence d'image fps .

$$\Delta t = \frac{1}{fps} \quad (3.4)$$

La vitesse v_i à l'instant i est donc déterminée à partir de deux positions successives et de l'équation 3.5.

$$v_i = \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t}, \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t} \right) \quad (3.5)$$

Les accélérations a_i à l'instant i peuvent être calculées d'une manière similaire. L'équation 3.6 explicite ce calcul.

$$a_i = \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t^2}, \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t^2} \right) \quad (3.6)$$

Les trajectoires uniques obtenues pour chaque usager sont elles aussi regroupées en “prototypes”. Les prototypes sont en fait des trajectoires d’usager qui permettent de décrire les principaux mouvements dans la zone d’étude. Ces trajectoires sont utilisé entre autres dans les calculs de TTC, pour la prédiction des mouvements. Dans ce projet, ils ont également été utilisés pour désigner des véhicules “témoins”. Ces derniers sont des usagers qui ont été identifiés comme des véhicules motorisés qui avaient des trajectoires semblables à celles des VA. Pour ce faire, les prototypes pour lesquels une trajectoire de navette avait été associée ont d’abord été identifiés. Ensuite, les véhicules motorisés ayant une trajectoire qui avait été regroupée dans un de ces prototypes ont été classifiés comme “témoins”.

Enfin, les trajectoires sont d’abord associées en “interactions”. Il est à noter qu’une “interaction” est défini par le fait que deux usagers de la route sont présents à l’intérieur du champ de vision de la caméra à l’intérieur d’un laps de temps commun. Les données des paires d’usagers de chaque interaction sont utilisées pour calculer une variété d’indicateurs, comme la différence d’angle entre les usagers ou le TTC à chaque instant de l’interaction.

3.4.2 Coordonnées curvilignes

Pour faciliter certains calculs, notamment celui des temps intervéhiculaires, les positions ont été projetées dans un système curviligne. Un tel système de coordonnées a des axes qui peuvent être courbés et s’avère pratique puisque la projection dans un système de coordonnées curvilignes permet de simplifier certains calculs et de faire une analyse par voie de circulation. En effet, les coordonnées dans un tel système sont représentées par des positions curvilignes :

$$p = (l, S_p, \gamma_p) \quad (3.7)$$

La distance le long de la ligne l par rapport à son origine est donnée avec la variable S_p . La distance perpendiculaire entre le point p et la ligne l est représentée par la variable γ_p . La Figure 3.6 illustre la projection d’un point d’un système cartésien vers un système curviligne.

Ce système de coordonnées permet de calculer rapidement la distance et le temps qui séparent deux véhicules se suivant et circulant dans une même voie puisqu’il n’y a qu’une seule dimension à analyser pour comparer la position des usagers. En effet, la coordonnée S_p permet de déterminer quel usager est en tête dans l’interaction à chaque instant. La coordonnée γ_p permet de déterminer si un usager se déplace latéralement ce qui permet d’identifier le

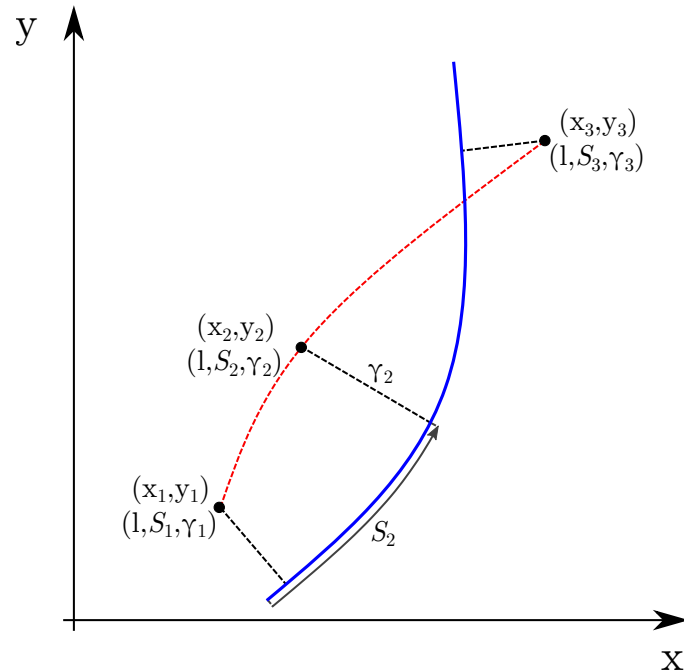


Figure 3.6 Coordonnées cartésiennes et curvilignes sur une ligne (en bleu) des points d'une trajectoire (en rouge).

début et la fin d'une manœuvre de dépassement.

3.4.3 Classification

Une fois les positions obtenues, les usagers sont classifiés d'après la probabilité d'appartenir à une classe selon leur apparence et leur vitesse. La Figure 3.9 illustre les distributions qui ont été utilisées pour déterminer la probabilité de la classe la plus probable d'un usager en fonction de sa vitesse moyenne. Il est à noter que les vidéos ont été revues manuellement lors d'une phase d'ajustement pour corriger les trajectoires et, par le fait même, les trajectoires des VA ont ainsi été catégorisées manuellement.

3.5 Ajustements

Pour chaque journée de collecte, des vidéos et les trajectoires qui en avaient été extraites ont été revues manuellement. Cette révision permet d'avoir des trajectoires de "vérité terrain". À partir de celles-ci, les paramètres de l'algorithme de suivis ont été optimisés.

3.5.1 Vérité terrain

Pour revoir et annoter manuellement les résultats de l'extraction, un outil d'annotation développé spécifiquement pour *Traffic Intelligence* a été utilisé¹. Celui-ci permet de visualiser les trajectoires obtenues, de refaire le suivi de certains objets et de supprimer des trajectoires. Ainsi, il est possible de jumeler des trajectoires en trop dans le cas de “sur-segmentation” des trajectoires, soit le fait que deux trajectoires ou plus aient été associées à un même usager. La Figure 3.7 illustre un exemple de cette situation.



Figure 3.7 Exemple de sur-segmentation d'un usager.

Dans le cas, où des usagers n'avaient pas été suivis correctement, généralement lorsqu'une seule trajectoire était associée à un groupe d'usagers il était possible de refaire le suivi de ces usagers individuellement. Cette situation de “sous-segmentation” est illustrée à la Figure 3.8. Pour chaque journée de collecte, une seule vidéo d'environ 30 min était analysée manuellement. Au total, près de 15 h de vidéos ont été corrigées. Ces données ont été utilisées pour établir une estimation des distributions de vitesses des différentes catégories d'usagers. La Figure 3.9 montre un exemple de distributions obtenues et le Tableau 3.5 présente les paramètres des distributions. On note au passage que la distribution des vitesses des cyclistes est

1. <https://bitbucket.org/Wendlasida/trafficintelligenceannotationtool/>



Figure 3.8 Exemple de sous-segmentation avec deux usagers.

généralement mieux représentée par une distribution log-normale.

Les données manuellement annotées sont utilisées pour estimer, par maximum de vraisemblance, les paramètres des distributions qui reproduisent les observations. Ces distributions, avec le modèle d'apparence, sont combinées pour déterminer la probabilité qu'un usager appartienne à une classe donnée, d'après sa vitesse. Les données corrigées ont également été utilisées comme réalité de terrain dans le processus d'optimisation des paramètres de l'algorithme de suivi décrit ci-dessous.

3.5.2 Optimisation

La détection et le suivi de multiples objets dans une vidéo restent à ce jour un défi et l'objet de recherche. Évidemment, la grande variété d'algorithmes nécessite une mesure commune pour comparer les performances des solutions proposées. Différentes approches d'évaluation ont été proposées au fil des années. Une de ces mesures est la précision du suivi d'objets multiples [131]. Cette mesure peut être appliquée à une grande variété de méthodes de suivi dans le domaine de la vision artificielle et elle permet de déterminer la précision avec laquelle les objets sont reconnus, localisés et suivis. Le calcul de cette mesure étant implémentée dans *Traffic Intelligence*, elle a été utilisée comme indicateur de qualité des résultats de

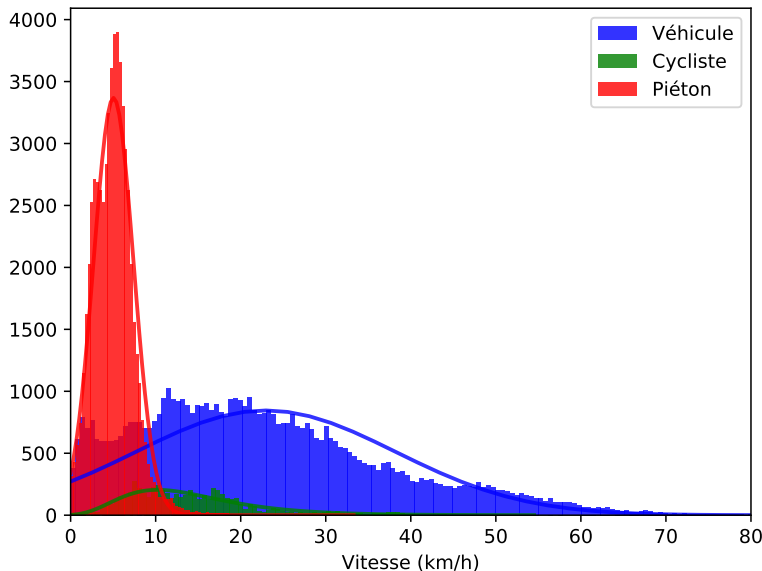


Figure 3.9 Distributions des vitesses moyennes des différents types d’usagers à l’intersection des avenues Letourneux et Pierre-De Coubertin.

suivis obtenus. L’algorithme de suivi des caractéristiques implémenté est initialisé avec les paramètres qui sont présentés dans le Tableau 3.3 et le Tableau 3.4.

Généralement, ces paramètres sont ajustés manuellement par essai-erreur. Étant donné que des vidéos ont été collectées à de nombreux sites et pour différentes journées, cette tâche s’avère laborieuse. Pour accélérer les ajustements, les paramètres ont été trouvés avec le logiciel d’optimisation NOMAD [132, 133]. Ce logiciel développé par des chercheurs du Groupe d’études et de recherche en analyse des décisions (GERAD) est un logiciel d’optimisation de boîte noire. Les paramètres de l’algorithme de suivis étaient fournis en entrée. Par contre, pour limiter les temps de calcul, seuls les paramètres de groupement (se référer au Tableau 3.4) ont été considérés étant donné que ces variables (à savoir *mm-connection-distance*, *mm-segmentation-distance* et *min-nfeatures-group*) ont des effets plus importants sur le résultat. La valeur du MOTA est calculée en comparant les trajectoires de la base de données annotée manuellement avec celles obtenues par une nouvelle génération de trajectoire avec les paramètres fournis (deux positions sont similaires si leur distance dans l’espace image est inférieure à 500 pixels). Cette mesure repose sur la distance entre les positions obtenues par l’algorithme de suivi et celles de la vérité terrain. L’optimisation se faisait en minimisant la valeur négative du MOTA obtenu. L’algorithme mesh adaptive direct search (MADS) [134, 135] implémenté sur NOMAD était exécuté de façon itérative en explorant les différentes valeurs

possibles de chaque paramètre selon les frontières définies pour chacune d'entre elles dans le fichier de configuration. Une limite de 200 itérations a également été fixée puisque les paramètres obtenus variaient généralement peu après ce nombre d'évaluations. Le Tableau 3.6 présente un résumé des résultats d'optimisation pour chaque site. Les paramètres résultants étaient ensuite utilisés pour le suivi final des usagers.

Il est à noter que les performances sont les meilleures aux intersections où le débit est moins important et où le trafic est plus homogène. Ceci est dû au suivi par caractéristiques qui fonctionne moins bien avec des vidéos où on observe une grande variété de tailles et de vitesses d'objet. Aussi, malgré l'optimisation, des erreurs sont toujours présentes. Les vidéos et les trajectoires ont été revues pour corriger les erreurs aberrantes, mais des problèmes de segmentation (se référer à la la Figure 3.7 et Figure 3.8) n'ont pas pu être éradiqués complètement.

Le suivi des usagers sur une vidéo est enclin à faire défaut à cause des ombres qui peuvent être identifiées comme des usagers. Il s'agit là d'un autre problème lié au groupement des caractéristiques. La Figure 3.10 illustre un exemple où l'ombre d'un véhicule cause une erreur de suivi.



Figure 3.10 Exemple de sur-segmentation due à l'ombre d'un usager.

3.6 Analyse

Une fois que les données des trajectoires ont toutes été extraites et nettoyées, une évaluation de la sécurité a été conduite. Les interactions de chaque site ont été analysées avec les indicateurs du TTC, d’après la définition présentée à la section 2.3.3 et en prenant le 15e centile ; du PET, d’après la définition présentée à la section 2.3.3 ; et de la différence de vitesse Δv , en prenant le 85e centile. D’autres variables ont été extraites, comme il a été présenté à la section 4.3.5, pour des analyses subséquentes, à savoir la construction d’un modèle linéaire.

Les résultats pour les interactions impliquant un VA ont été séparés de celles avec un conducteur humain. Les distributions résultantes pour chaque site ont été comparées avec le test de Kolmogorov-Smirnov (KS) où l’hypothèse nulle posée est que les échantillons proviennent de la même distribution.

De façon similaire, des indicateurs pour étudier les caractéristiques de la circulation ont été utilisés. Les vitesses, d’après le 15e v_{15} et le 85e centile v_{85} , et les accélérations, d’après le 15e v_{15}^2 et le 85e centile v_{85}^2 , ainsi que les TIV et DIV ont été extraits.

Encore une fois, les distributions des indicateurs ont été extraites séparément pour les interactions impliquant un véhicule “témoins” et un VA. Les distributions étaient ensuite comparées selon le même test d’hypothèse pour déterminer si les deux distributions étaient statistiquement différentes.

Pour trouver l’association entre les différents indicateurs et les différentes variables, des modèles linéaires ont été estimés, tels que montré à la section 4.3.5. L’utilisation du logarithme pour le modèle du temps est justifiée par la figure des résidus (se référer à la Figure B.5). L’hétéroscédasticité des résultats et la distribution plus normale des résultats résultants de l’usage du log ont justifier ce choix. Il est à noter que les modèles ont été obtenus avec la librairie Python “statsmodels”.

Finalement, les données ont ensuite été utilisées de façon exploratoire pour essayer de trouver d’autres relations et résultats intéressants.

Tableau 3.3 Paramètres de suivi des caractéristiques de l'algorithme de *Traffic Intelligence*.

Paramètre	Type	Défaut	Unité	Description
max-nfeatures	int	2000	caractéristiques	Nombre maximum de caractéristiques ajoutées à chaque image
feature-quality	float	0.1	-	Niveau de qualité des bonnes caractéristiques à suivre
min-feature-distanceklt	float	3.5496	px	Distance minimale entre les caractéristiques
block-size	int	7	px	Taille du bloc pour les éléments caractéristiques
use-harris-detector	bool	False	-	Détection de coin de Harris [129]
k	float	0.4	-	Paramètre de détection des bonnes caractéristiques [130]
window-size	int	6	px	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.
min-feature-displacement	float	0.001	px	Déplacement minimal des caractéristiques entre les images
acceleration-bound	float	3	-	Rapport maximal des vitesses entre les images
deviation-bound	float	0.6	-	Écart maximal des caractéristiques
smoothing-halfwidth	int	5	images	Nombre d'images pour lisser les positions
max-number-iterations	int	20	-	Nombre maximum d'itérations pour arrêter le suivi
min-tracking-error	float	0.1833	-	Erreur minimale à atteindre pour arrêter le suivi
min-feature-eig-threshold	float	1e-4	-	Valeur propre minimale d'une matrice normale 2x2 des équations de flux optique
min-feature-time	int	15	images	Temps minimal d'existence d'un élément pour être sauvé

Tableau 3.4 Paramètres de groupement des caractéristiques de l’algorithme de *Traffic Intelligence*.

Paramètre	Type	Défaut	Unité	Description
mm-connection-distance	float	1	px	Distance de connexion dans le groupement d’éléments
mm-segmentation-distance	float	1	px	Distance de segmentation dans le regroupement des caractéristiques
max-distance	float	5	px	Distance maximale entre les éléments pour le regroupement
min-nfeatures-group	float	3	caractéristiques	Nombre moyen minimal de trajectoires de caractéristiques par image pour créer une hypothèse de véhicule

Tableau 3.5 Statistiques des distributions de vitesses moyennes à l’intersection de Letourneux et Pierre-De Coubertin par catégorie d’usager.

	Distribution	μ (km/h)	σ (km/h)
Véhicule	normale	22.95	15.23
Cycliste	log-normale	2.51	0.60
Piéton	normale	5.05	2.35

Tableau 3.6 Résultats de l’optimisation.

Lieu	MOTA avant	MOTA après	Accroissement
letourneux-coubertin	0.6179	0.7360	+19.11 %
letourneux-hochelaga	0.4401	0.6082	+38.20 %
letourneux-ontario	0.6317	0.8778	+38.95 %
montcalm-chartwell	0.6279	0.7275	+15.87 %
montcalm-inverness	0.7774	0.8688	+11.76 %
montcalm-victorin	0.6202	0.7184	+15.83 %
montcalm-voie	0.6452	0.8989	+39.34 %

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : Study of Automated Shuttle Interactions in City Traffic Using Surrogate Measures of Safety

Authors: Étienne Beauchamp¹, Nicolas Saunier¹, Marie-Soleil Cloutier²

¹Polytechnique Montréal, Montreal, Canada

²Institut National de la Recherche Scientifique, Montreal, Canada

etienne-2.beauchamp@polymtl.ca, nicolas.saunier@polymtl.ca,

marie-soleil.cloutier@ucs.inrs.ca

Submitted to Accident Analysis & Prevention journal, November 2020.

Abstract

Driving automation is happening at a rapid pace, with different driver assistance systems already available in mass-market cars. However, this rapid development in driving automation leads to concerns and questions about their impact on safety. While previous studies have been restricted to incident reports and simulation tools, the safety of automated vehicles (AVs) has not been clearly demonstrated independently from their developers and proponents. Instead of crashes, which are extremely rare events, this study uses surrogate measures of safety (SMoS) to analyze the interactions between road users and low-speed automated shuttles that circulated in Montreal and Candiac, in Canada, during two pilot projects in mid and late 2019. Cameras were placed at seven intersections along the routes of the shuttles. More than 70 hours of footage were processed to extract the road user trajectories using computer vision techniques and compute various safety indicators: speed and acceleration at the road user level, time headway, time-to-collision (TTC), post-encroachment time (PET) and the speed differential at the interaction level. The Kolmogorov–Smirnov test was used to compare the distributions of these indicators for interactions involving automated shuttles or motorized vehicles following similar paths. The results indicate that these automated shuttles behave generally more safely: their speeds and accelerations are lower and their interactions are characterized by higher TTC and PET values, and lower speed differentials. However, small headway times at one site with high-speed differentials between the shuttles and other following vehicles raise concerns that warrant further research into the suitable context for these vehicles. Statistical models for the TTC, PET and speed differential demonstrate that automated shuttles have safer interactions with all types of road users and in all categories of interaction. These safety indicators are further associated with the sites and the kinematics

of the second road user involved in the interactions.

Keywords: Road Safety, Automated Shuttles, Surrogate Measures of Safety, Video Analysis

4.1 Introduction

Road safety has a considerable impact on public health. Road traffic injuries were among the ten leading causes of death world wide in 2016, with pedestrians, cyclists and motorcyclists, commonly defined as vulnerable road users (VRU), being overly impacted in the toll [72]. Moreover, road crashes have repercussions on society in many ways, from the fatalities and injuries to the healthcare costs and impacts on congestion. In Canada, driver error was estimated to be a contributing factor in 85 % of road casualties in 2018, mainly because of speeding, distracted driving and impaired driving, respectively in 23 %, 22 % and 19 % of fatal crashes [136] and it is estimated that automated vehicles (AVs) could lead to safety benefits resulting in savings of \$ 65 billion per year in Canada [137].

Among the various ways to improve safety, interest has grown recently for vehicular technologies, in particular advanced driver assistance technologies (ADAS), which assist the driver and can even take control of the vehicles for some tasks like acceleration (e.g. adaptive cruise control) or crash avoidance (e.g. emergency braking and steering systems). There has been a growing focus on driving automation in particular during the last decade, with the promise that driverless vehicles will eliminate road crashes. In the meantime, vehicles with varying levels of automation are tested and some are already available on the market. Despite these developments, there are few studies clearly measuring the impact of ADAS and driving automation on road safety (only the electronic stability control (ESC) is mentioned in [72]). Recent improvements in the design of vehicles or road infrastructure might play a bigger role in the decline in road injuries in developed countries and result in overestimating the impact of ADAS on safety [14]. Furthermore, the number of AVs on the road is still very limited and data on crashes with existing AVs is very rare. ADAS and AV manufacturers do not share detailed data and results about the safety performance of their products. The few existing studies on the safety of AVs have mostly examined disengagement reports from AV testing programs, mainly coming from California's Department of Motor Vehicles (DMV) [78,79,81].

While the most common way to assess safety is through the analysis of crash data, that approach has many shortcomings [102] such as its reactive nature and the low frequency of crashes, which are particularly acute for new technologies with no or limited penetration. In the 1970s, several methods to rate the safety of near-miss traffic events were developed. These

methods focused on the detection and characterization of severe traffic conflicts to assess safety in a proactive way [108]. There was a renewed interest in the 2000s as new technologies became available to collect data more efficiently and objectively. Traffic conflicts and other events of interest for safety diagnosis are more frequent than crashes, and their observation provides more insight about the traffic processes that may lead to crashes [102,138]. Johnsson et al. report that “while all the studies use different methods to evaluate the relationship between critical events and accidents, they all find a strong correlation between the two” [138]. All in all, surrogate measures of safety (SMoS) can be used to assess safety more quickly, which is particularly suitable for new technologies like ADAS and AVs, as documented crashes involving AVs are currently scarce.

The objective of this paper is to study the safety of automated low-speed shuttles in real traffic using video data and SMoS. To the authors’ knowledge, analyzing video recordings of AVs in an urban setting, under real conditions, and assessing the safety through the use of SMoS has never been done before. It is of the utmost importance as there is no detailed safety assessment of AVs independent from their developers. Video was recorded at three different sites in Montreal, Canada, during the summer of 2019 and at four different sites in Candiac (a suburb on the South Shore) during the fall of the same year using a portable installation [127]. The analysis was conducted using several safety indicators; namely speed and acceleration at the road user level, time headway, time-to-collision (*TTC*), post-encroachment time (*PET*) and the speed differential at the interaction level. The following sections present respectively the literature review, a detailed description of the methodology, the collected data, as well as the experimental results and, finally, the closing remarks of this paper.

4.2 Literature Review

4.2.1 Road Safety Diagnosis Methods

Road safety studies generally rely on one of three main categories of data [139,140]: 1. crash data; 2. self-reported crashes, and 3. near-crashes and non-crash observations. Methods in the first category are the most common and the traditional way to diagnose road safety [139,140]. Countless studies at various levels, from individual sites to whole countries, rely on crash data. Although it seems natural to assess safety based on historical crash data, this approach suffers from many shortcomings, from the quality of the data to its biases. For example, it is known that more severe crashes are more likely to be reported, and crashes involving different types of road users are reported at varying rates. In addition, this is an intrinsically reactive approach that requires waiting for crashes to occur before addressing

their causes [102, 138]. Furthermore, the need to wait for long periods of time to collect sufficient amounts of data makes crash data particularly inappropriate to evaluate new trends and fast evolving technologies like ADAS and AVs.

Information on crashes is collected by various organizations, primarily the police, but there is a growing interest for self-reported crashes and near-crashes. Such data has some advantages over traditional crash data collection: it can include information about other, non-crash, events that may be relevant to safety and more information than what is typically collected in crash reports; it can be tailored to specific needs when designing the survey or data collection method; and data is available more quickly, possibly on a continuous basis. Although complementary to historical crash data, it still shares most of the shortcomings of crash data.

The last category of data encompasses various kinds of data, particularly traffic events, that are shown or believed to have a relationship to crash occurrence and severity. Traffic conflicts have received the most attention since the late 1960s, with the development of several traffic conflict techniques (TCT), such as the Swedish Traffic Conflict Technique and the Dutch Objective Conflict Technique for Operation and Research (DOCTOR) [102]. With such techniques, human observers were trained to identify conflicts in traffic and rate their severity, which is time-consuming, costly and subjective. Recent progress in various sensor technologies, in particular the affordability of quality video recording equipment and computer vision, makes fully or semi-automated video analysis for safety analysis possible [4, 116, 124, 141]. The various types of traffic events and their relationship to safety are famously represented in the safety pyramid popularized by Christer Hydén [102], with crashes at the top, the most severe and rare events, and normal traffic at the bottom. The most common SMoS is the number of severe traffic conflicts, or near crashes/misses [102, 142]. Severity is measured through safety indicators like the speed, the time-to-collision (*TTC*), which estimates the time remaining until two road users collide, and the post-encroachment time (*PET*), which measures the time between the moment a user leaves an area that crosses the path of a second user and the moment the second user reaches said area [102]. Conflicts and interactions with lower severity levels may also be interpreted in a safety perspective [143].

SMoS have been used to assess the impacts on road safety of new legislation or road facilities [144]. Studying non-crash events and using SMoS has several advantages such as short data collection periods and richer data, which also provides insights by the direct observation of the complete traffic process, on the contrary to what is available in crash reports [102]. Although some studies have shown correlations between SMoS like the number of severe traffic conflicts and safety [104, 142, 145–148], SMoS are still not as widely used as measures derived from crash data.

4.2.2 Safety Assessment of AVs

Even if individual components of AV technology have been extensively tested and their reliability has been proven, AVs as a whole are still a new technology with limited testing in the various real-world conditions [79]. AV safety assessment poses challenges in several areas [149, 150] - whether it be the certification of hardware, software or human-machine interface (HMI) - and a single solution to certify AV safety does not exist.

Current AV Testing Frameworks

SAE International issued in 2014 the J3016 standard [7] that categorizes the different levels of driving automation. While influential, the document is descriptive and has no legal value. In 2017, Mobileye (subsidiary of Intel) proposed the Responsibility-Sensitive Safety (RSS) [40], a mathematical model to help standardize requirements to certify AV safety. However, up to this day, regulations on safety of driver assistance technologies and AVs is fractured and inconsistent, lacking standardization, as opposed to what can be seen in the aerospace industry.

In the state of California, where many tests of AVs on public roads are conducted, the department of motor vehicles (DMV) requires manufacturers who wish to conduct said tests to obtain permits [151]. They are also obliged to report crashes involving property damage, bodily injury or death, and disengagement (situations in which the safety driver must take back control of the AV) [86].

In Canada, there is no regulatory requirements for driver automation technologies and it is up to provincial and territorial governments to oversee regulations regarding road operations (such as driver licensing, vehicle registration, motor vehicle insurance and liability, vehicle maintenance standards and traffic laws) [74]. According to the jurisdiction of the province or territory where they are conducted, manufacturers must: receive permits and any other required authorization; report disengagement, crashes and incidents [152]. However, Quebec's Highway Safety Code includes no mentions of permits or crash reports [153] and no publicly available data on AV incidents or crashes were found by the authors.

Existing AV Safety Studies

Previous studies conducted to evaluate AV safety have mostly used two approaches: 1. miles driven and disengagement reports; and 2. data from microscopic traffic simulations.

AV manufacturers have notably used mileage as an argument to prove the safety of their

vehicles' ADAS such as intelligent cruise control and lane assist [154]. The distance travelled between crashes is used to determine an average mileage per crash. However, such claims require to drive considerable distances, not to mention the fact that mileage does not take into account the surrounding traffic, as well as environmental factors and the complexity of the driving task [40].

Some researchers have explored publicly available data on AV crashes, notably from California DMV disengagement and collision reports, and found that AVs encountered more frequent crashes per miles driven than human drivers [79–81] and that a strong correlation exists between the number of miles driven and the number of disengagement [78]. Nonetheless, reports were found to have inconsistencies, as a lack of standardization among manufacturers made the analysis and comparison difficult. Requirements for these reports were also found to be too broad and vague to draw clear conclusions on the safety of AVs [78, 79]. This is to be expected, as no strict rules or requirements seem to have been given to AV developers. More importantly, disengagement reports provide limited information on the factors of these events and no quantitative data, preventing the independent assessment of the behaviour and safety of these vehicles in different environments.

While some real-world tests have been conducted in different countries, the scarce data available from these tests has led to the prominence of simulation-based safety assessment studies [87]. Different studies using the VISSIM microscopic traffic simulation software have shown that the AV safety benefits would depend on the penetration rate of the said vehicles [83, 84]. Some have argued that crash rates involving conventional users would not necessarily be proportional to the penetration rates [82]. But invariably, AVs were found to reduce the number of conflicts compared to the scenarios where they are absent and that a full penetration would result in the greatest safety benefits [82–84].

Yet, the calibration of driver behaviour models can be limiting due to the lack of empirical data [83, 84, 88] and it is even more difficult for safety studies since they require that the various factors and chains of events, including human factors, leading to a crash are represented. Confirming that a simulator accurately represents reality is just as complex as validating the driving policy itself [40]. Besides, simulation assumes AVs function as expected on the road, when such vehicles, which are highly dependent on sensors, might encounter problems related to the weather or road infrastructure and occasional unpredictable events (e.g. road repair).

There have been a few real-world studies of AV safety by researchers, including some of the pilot projects involving automated shuttles similar to the one presented in this work. Past pilot projects presented little challenge to the AVs as the AVs generally run off-road,

interacting only with pedestrians. These few published studies generally rely on qualitative data without any systematic evaluation of conflicts and safety indicators like speed, *TTC* and *PET* [44, 155]. To the authors' knowledge, SMOs have yet to be used to evaluate the interactions of AVs with other road users in real city traffic.

4.3 Methodology

The methodology follows five steps as shown in Figure 4.1. Briefly, data was first collected at the selected sites. Following calibration of the cameras to recover real world coordinates, user trajectories were extracted. The data was manually verified: some trajectories were corrected and used to optimize tracking parameters, which is the feedback loop added to the five methodology steps. Finally, various indicators including the safety indicators were computed and used to compare interactions involving a shuttle with non-AV interactions. The steps are discussed below in each subsection.

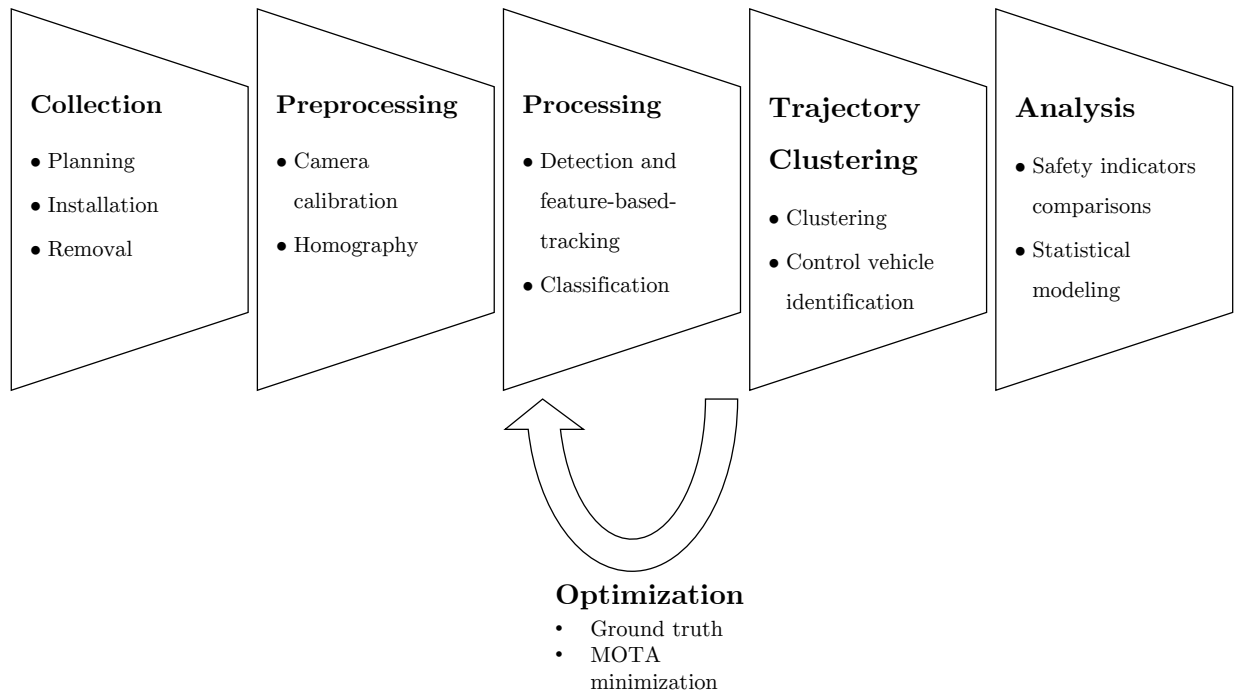


Figure 4.1 Methodology overview.

4.3.1 Site Selection and Video Data Collection

This study takes place in the context of two pilot projects of transit service provided by AV shuttles in the cities of Montreal and Candiac (on the South Shore of the Island of Montreal) in 2019. The AV shuttles are an EZ10 by EasyMile in Montreal and an AUTONOM shuttle by Navya in Candiac. To collect the data needed for this research, both routes shown in Figure 4.3 were first visited before the start of the projects. Three factors needed to be met to select the data collection locations. Sites had to:

1. include a lamp post or similar public structure to attach the video recording equipment (pole and camera);
2. have as few trees and other obstructing objects as possible, to have a clear view of traffic from the camera viewpoint;
3. provide a good view of the shuttle’s interaction with other road users, including intersections for more varied movements and maneuvers.

A GoPro camera was installed on a height-adjustable pole attached to a lamp post at each site. In Montreal, video data was collected during the summer of 2019, for seven days in July and one day in August, between 10:00 AM and 6:00 PM. In Candiac, video data was collected during two days in November 2019 and four days in December 2019, during various time intervals, depending on the shuttle schedule. Weather was mild on all data collection days.

4.3.2 Data Preparation

Data preparation consists of calibrating the camera to correct the lens distortion and computing the homography matrix that allows the conversion of the road user coordinates from the image space to real world coordinates at the ground level. This was done using the open source “Traffic Intelligence” project¹ [127]. It includes scripts to perform such calculations, which have been shown to be reliable [156]. Readers looking for more details are referred to previous work [157].

4.3.3 Data Processing and Optimization

The next step is to extract road user trajectories and classify them. All moving objects within a user-defined analysis zone in the camera field of view are detected and tracked using the feature-based tracker available in the “Traffic Intelligence” project [116], then classified

1. <http://trafficintelligence.confins.net>

to three categories as a pedestrian, cyclist or motorized vehicle based on their speed and appearance. A trajectory is a vector of the positions $(x_{i,j}, y_{i,j})$ of a road user i (centroid) at each frame instant t_j . Knowing the frame rate (30 frames per second), the time step between frame instants is constant and the positions can be differentiated to obtain the instantaneous speeds and accelerations. All the other indicators are also derived from trajectory data.

The many tracking parameters are usually adjusted for each study by trial and error [127, 141, 158]. To further improve the tracking performance, a first dry-run of tracking was made on 30-minute videos for each day and the results were manually verified and corrected. The resulting ground truth trajectory databases for the selected videos were then used as an input to adjust the tracking parameters by optimizing the measure of tracking accuracy (MOTA) [131] using the Mesh Adaptive Direct Search algorithm (MADS) available in the open source NOMAD tool [132, 133]. Also, the road user speeds from the ground truth trajectory databases were used to update the speed distributions for the user type classifiers.

Once all the videos were automatically processed with the optimized tracking parameters, the trajectories were manually cleaned by removing false alarms and merging duplicated trajectories for the same road user. The shuttle trajectories were manually annotated with a fourth “automated” road user category.

4.3.4 Trajectory Clustering

Trajectories were then clustered using the longest common subsequence similarity (LCSS) using the algorithm available in the “Traffic Intelligence” project [4, 159, 160]. Each cluster being represented by a “prototype” trajectory. The clustering algorithm parameters are: the measure of similarity between user positions, set to the Manhattan distance with a 2 m threshold in this study, and a minimum similarity threshold for trajectories to belong to the same cluster, set to 50 % in this study (two trajectories need to have 50 % of their positions’ Manhattan distances within 2 m). The resulting trajectory clusters are used to 1. predict road user motion to compute the *TTC* and 2. identify motorized users with trajectories similar to the AV shuttles for comparison, which is explained below.

The manually annotated AV trajectories were used to identify which users followed similar paths. By identifying the clusters these AV trajectories belong to, the other motorized users in these clusters were designated as control users or vehicles. This follows the safety analysis method by movement patterns presented in [160]. In this way, the safety of AVs can be compared to the safety of human drivers following similar paths. Figure 4.2 shows an example of the cluster prototypes and the subset of prototypes associated with AVs.

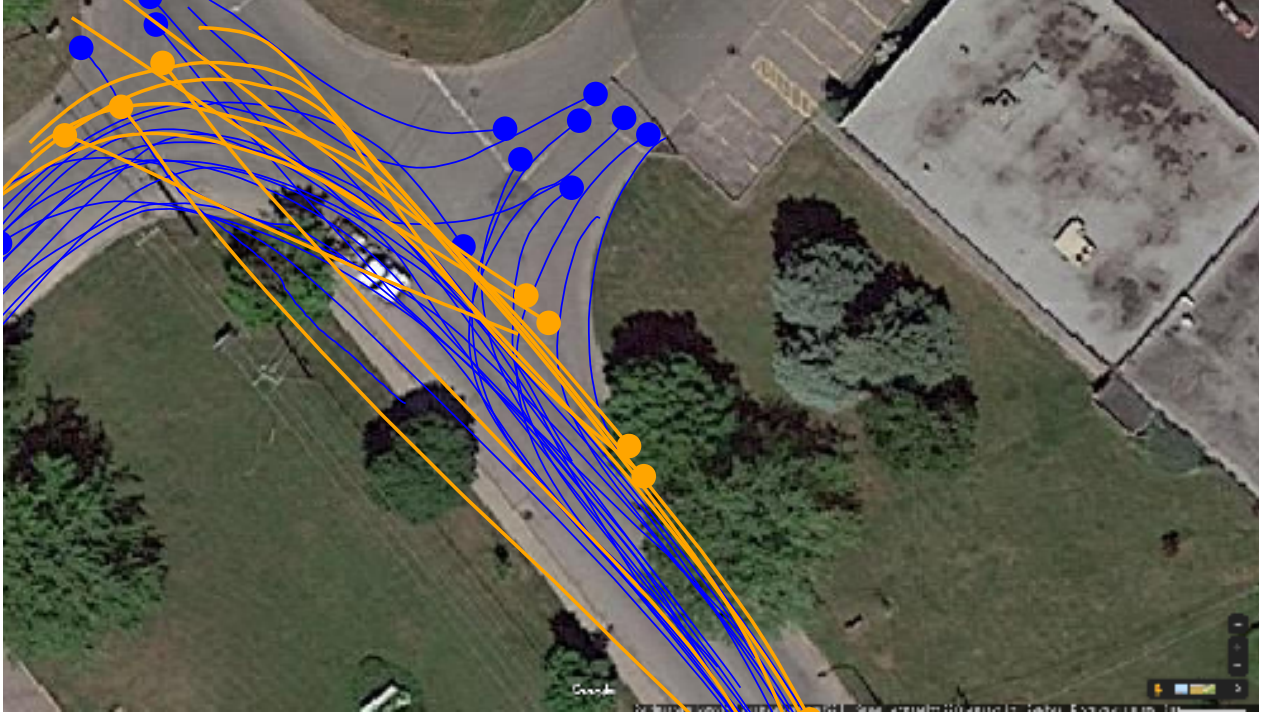


Figure 4.2 Cluster prototypes associated AVs (in orange) and other users (in blue) at the Montcalm & Inverness site (origins marked with a circle).

4.3.5 Safety Analysis with SMOs

Interactions and Safety Indicators

An interaction is formally defined when two road users coexist in the area of study within the analysis zone. An interaction is thus a precursor to a conflict or a crash in that. Several positional and velocity-based indicators are extracted and are used to categorize the interactions at each instant (see [4] for more details). There are five categories: side, rear end, parallel, head-on and “leaving” for a side interaction where at least one road user is past their crossing point and their distance is increasing. Interactions where most instants are categorized as head-on were manually verified and filtered out as they generated severe safety indicator values that did not reflect their actual safety.

Only the interactions involving at least an AV shuttle or a control vehicle were analyzed: these interactions are split in two subsets. The first is the set of AV interactions, i.e. interactions of one shuttle with another type of road user, since there is only one shuttle at a time. The second is the set of control vehicle interactions that encompasses all other interactions of a control vehicle with any other type of road user (except shuttles, counted in AV

interactions). The following safety indicators were computed for all interactions: speed, acceleration, *TTC* and *PET*. Speed and acceleration are derived from the road user positions, using the Savitsky-Golay filter for smoothing. The filter parameter were respectively a filter length of 11 and 21, and a polynomial function of orders 9 and 15. These parameters were determined by trial and error looking at raw data and resulting fitted curves.

TTC is “the time until a collision between the vehicles would occur if they continued on their present course at their present rates” [102,108]. *PET* is “the time between the moment that the first road user leaves the path of the second and the moment that the second reaches the path of the first” [102]. *TTC* and *PET* are computed using a distance threshold of 1.7 m to account for the average road user width (since it is otherwise represented by a centroid position). A method to predict the future positions is necessary to compute *TTC* at each instant: instead of the common assumption that road users keep moving with constant speed and direction, the probabilistic framework first presented [161] is used with the cluster trajectory prototypes to account for the various paths a road user may take. Among the positional and velocity-based indicators, the speed differential is also investigated as a proxy to the severity of a potential crash as speed is a well-known factor [162].

Finally, the time headway was also computed for rear-end interactions (car following situations) at three sites in Candiac on the Montcalm Boulevard where there are few turning movements and car following could be observed for sufficient amounts of time. The road user trajectories are first projected in curvilinear coordinates along each center line per direction and sorted in chronological order. Time headway is in fact the *PET* for car following situations and is usually measured at a fixed location on the road. However, it can also be computed continuously (at each instant): for each position x_l of a leading user t_1 in a rear-end interaction, the time t_2 at which the following user reached x_l was recorded to compute the time headway $t_2 - t_1$.

All these safety indicators, except for *PET*, are continuously measured and are aggregated to characterize each interaction with a single value:

- for each trajectory, the mean, 15th and 85th percentile of the speeds and accelerations are computed;
- for each interaction, the 15th percentile of the *TTC* and time headway are extracted (denoted respectively TTC_{15} and h_{15}), while the 85th percentile of the speed differentials is extracted (denoted Δv_{85}).

The percentiles are used to reflect extreme values, especially the most severe values of safety indicators, and avoid outliers [163]). Lower *TTC*, headway time and *PET*, and higher speed differential reflect a less safe interaction. The non-parametric Kolmogorov-Smirnov (KS) test

is used to determine whether the indicator distributions for the AV shuttles and the control vehicles are different.

Statistical Modelling

A statistical multivariate model is estimated to better understand the associations between the different variables and the safety indicators. The PET , TTC_{15} and Δv_{85} of each interaction involving a control vehicle or an automated shuttle are used as the dependent variable (directly or via the log function for PET). The proposed model takes the form of Equation 4.1:

$$y_i = \beta_0 + \sum_j \beta_j x_{i,j} + \epsilon_i \quad (4.1)$$

where:

- i is the interaction index;
- $j = 1, \dots, p$ is the covariate index;
- y_i is the dependent variable, either $\log(PET)$, TTC_{15} or Δv_{85} , for interaction i ;
- $x_{i,j}$ is the value of covariate 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 independent variables or covariates were generated for each interaction. The first road user is either the automated shuttle or a control vehicle. The second road user is the other involved in the interaction. Both types are recorded as two categorical covariates. Several statistics of their respective speeds and accelerations were extracted as well. Other covariates include the category of interaction (most frequent category over all instants), and exposure variables recording the number and presence of pedestrians and cyclists separately. A categorical variable also records the site where the data is collected, the city and other characteristics. For each interaction, after analyzing their correlations and testing various variable combinations, the following covariates are kept in the models:

- AV : the type of the first road user in the interaction (1 for an automated shuttle, 0 for control vehicles);
- the type of the second road user involved in the interaction;
- the interaction category is the prevalent interaction category (head-on, side, rear-end, parallel or leaving);
- the site of the data collection;

- v_{15}^2 : the 15th percentile of the speeds of the second road user;
- a_{15}^2 : the 15th percentile of the accelerations of the second road user.
- a_{85}^2 : the 85th percentile of the accelerations of the second road user.

During the model developments, it should be noted that residuals were plotted and analyzed to validate the model and identify outliers.

4.4 Experimental Results

4.4.1 Sites and Collected Data

To minimize the computing time, videos before and after the AV shuttles’ operating hours were not processed. The Table 4.1 summarizes the information about the sites in Montreal and Candiac, the amount of processed video data, the number of trajectories per road user category, the site characteristics and the number of interactions. The resulting interactions are described in Table 4.2. The shuttle routes are shown in Figure 4.3. Sample frames from the video data are shown for each site in Figure 4.4. All indicator distribution plots, or “violin” plots, for mean speed and acceleration, time headway, TTC_{15} and PET such as in Figure 4.5 include the number of observations (“n:”) and the three quartiles represented as dashed lines. The code for the trajectory data processing, the results presented in this section and supplemental material is available at <https://github.com/FinestStone/AV-Interactions-City-Traffic>.

4.4.2 Distribution Comparisons

Speed and Acceleration

The Figure 4.5 shows respectively the distributions for the mean user speed and acceleration for automated shuttles and control vehicles per site. The mean, standard deviations and all quartiles of the shuttle speeds are much lower than those of the control vehicles. This is confirmed by the KS test which is significant for all sites (p-value $< 10^{-10}$). All the speeds, independently for control vehicles and shuttles, are slightly higher at the sites in Candiac compared to Montreal, which may be attributed to the wider road and lighter traffic. One can also note the bimodal nature of many speed distributions for the shuttle, which may be related to stop for passengers to get on and off.

Absolute mean accelerations and the acceleration standard deviations are also lower for the shuttles, which is consistent with their more predictable and cautious behaviour. The means and the medians (second quartile) of the shuttle accelerations tends toward 0, which is also

Table 4.1 Summary of processed video data collected in Montreal and Candiac per site.

Sites	Hours	#AV	#Cars	#Ped.	#Cyc.	Comments
Montreal						
Letourneux & Coubertin	≈11h50	104	5474	2516	408	Traffic light, shuttle takes a turn
Letourneux & Hochelaga	≈16h40	84	22319	1373	440	Traffic light
Letourneux & Ontario	≈14h10	125	2693	724	224	Shuttle turns into a back alley
Candiac						
Montcalm & Residence	≈8h00	48	2987	37	0	Stop sign, shuttle stops in front of a retirement home
Montcalm & Inverness	≈10h20	61	3623	107	29	Stop sign on Inverness
Montcalm & Victorin	≈9h25	91	7717	71	30	Traffic light
Montcalm & Rail	≈5h40	42	1786	39	2	Railway crossing

consistent with the tendency of shuttles to keep a constant speed and make less abrupt accelerations. As with the speed distributions, the results of the KS tests are statistically significant for all the sites (p-value $< 10^{-5}$).

Time Headway

The Figure 4.6 displays the time headway (15th percentile h_{15}) distributions for rear-end interactions with either a leading control vehicle or automated shuttle. The situation is different at the three sites: when the shuttle is the leading vehicle, headway times tend to be larger at the Residence and at the rail crossing sites though only statistically significant at the former ($D=0.2762$, p-value=0.0441). On the other hand, the headway time median is smaller when the shuttle is the leading vehicle at the Inverness site, though not statistically significant, which is consistent with higher control vehicle speeds at this site (see Figure 4.5). Drivers may become impatient as they have to follow the low-speed shuttle before finding an opportunity to pass.

Time-to-Collision (TTC)

The Figure 4.7 shows a side-by-side comparison of the TTC_{15} distributions for control vehicle and shuttle interactions. It is clear that the TTC_{15} distributions for the automated shuttle interactions are either similar or shifted toward larger TTC_{15} values based on the distribution

Table 4.2 Summary of the recorded interactions.

Description	Montreal		Candiac	
	Count	Percent (%)	Count	Percent (%)
Total number of interactions	1980	-	1129	-
Interactions with AV	757	38.23	482	42.69
Interactions with <i>PET</i>	315	-	194	-
Motorized users	238	75.56	193	99.48
Cyclists	26	8.25	0	0
Pedestrians	51	16.19	1	0.52
Interactions with <i>TTC</i> ₁₅	571	-	302	-
Motorized users	393	68.83	298	98.68
Cyclists	36	6.30	0	0
Pedestrians	142	24.87	4	1.32
Interactions with headways	-	-	148	-
Interactions with control vehicle	1223	61.77	647	57.31
Interactions with <i>PET</i>	415	-	518	-
Motorized users	376	90.60	508	98.07
Cyclists	18	4.34	0	0
Pedestrians	21	5.06	10	1.93
Interactions with <i>TTC</i> ₁₅	955	-	453	-
Motorized users	667	69.84	431	95.14
Cyclists	49	5.13	0	0
Pedestrians	239	25.03	22	4.85
Interactions with headways	-	-	8295	-

shapes and quartiles. On the one hand, sites with higher control vehicle and shuttle speeds, namely Hochelaga, in Montreal, and Inverness, in Candiac, also have lower TTC_{15} values. On the other and, in Montreal, at the intersections of Letourneux Street with Pierre-De Coubertin Avenue and Ontario Street, the shuttles generally had to stop to yield before making a turn. Consequently, control vehicles (selected to have similar trajectories) are also likely to have similar, lower speed movements, which lead to safer interactions in general. Shuttles appear to have even safer interactions, which may be attributed to the cautious driving behaviour of these vehicles. Similarly, in Candiac, the observation site in front of the retirement home, which is close to a stop sign, and the slightly raised railway crossing with stop lane markings have higher TTC_{15} compared to the other sites in Candiac.

Results of the KS tests comparing TTC_{15} distributions indicate a statistically significant difference (p-value<0.05) at the following sites: Pierre-de Coubertin Avenue (D=0.166, p-value=3.13 10⁻⁷) in Montreal, and three of the four sites in Candiac, at the retirement home

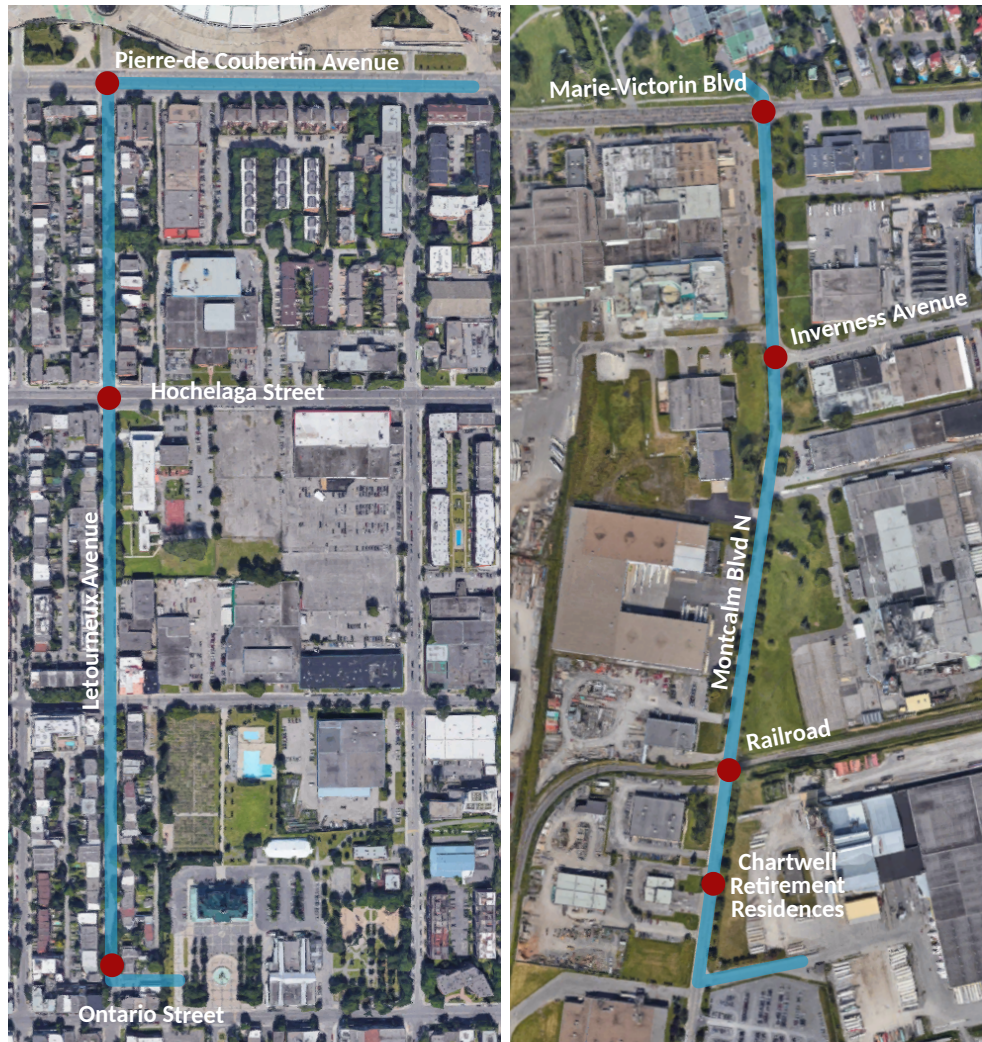


Figure 4.3 Maps of the routes (in blue) and selected video data collection sites (red dots) in Montreal (left) and Candiac (right).

($D=0.244$, $p\text{-value}=0.0030$), Marie-Victorin Boulevard ($D=0.228$, $p\text{-value}=0.0464$) and the rail crossing ($D=0.231$, $p\text{-value}=0.0322$). The KS test result at the Hochelaga intersection is significant at the 0.1 level ($D=0.119$, $p\text{-value}=0.0681$). The distributions are similar at the other sites. Few control vehicles turn at the intersection with Ontario, and the smaller interaction sample (only 19 control vehicle interactions) partly explains the lack of significance.

Interactions with vulnerable road users were investigated separately. Unfortunately, pedestrian and cyclist traffic was too low at the sites in Candiac. There were also too few interactions with cyclists in Montreal to be able to draw conclusions: the TTC_{15} were higher for shuttle interactions with cyclists at the Pierre-de-Coubertin and Hochelaga intersections, but the difference between the distributions was not significant. Regarding the interactions with

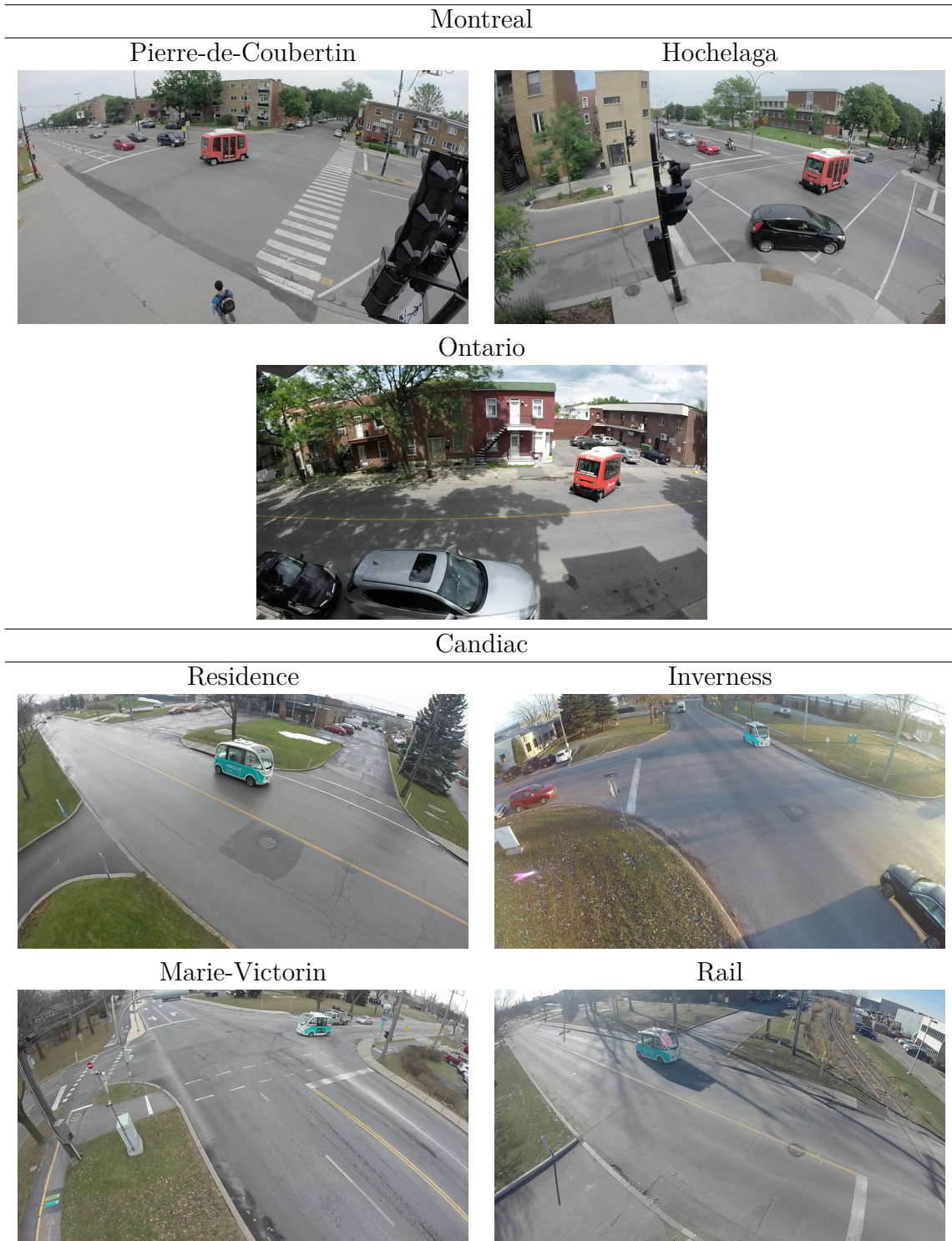


Figure 4.4 Frames from the collected video data at each site with the automated shuttle visible.

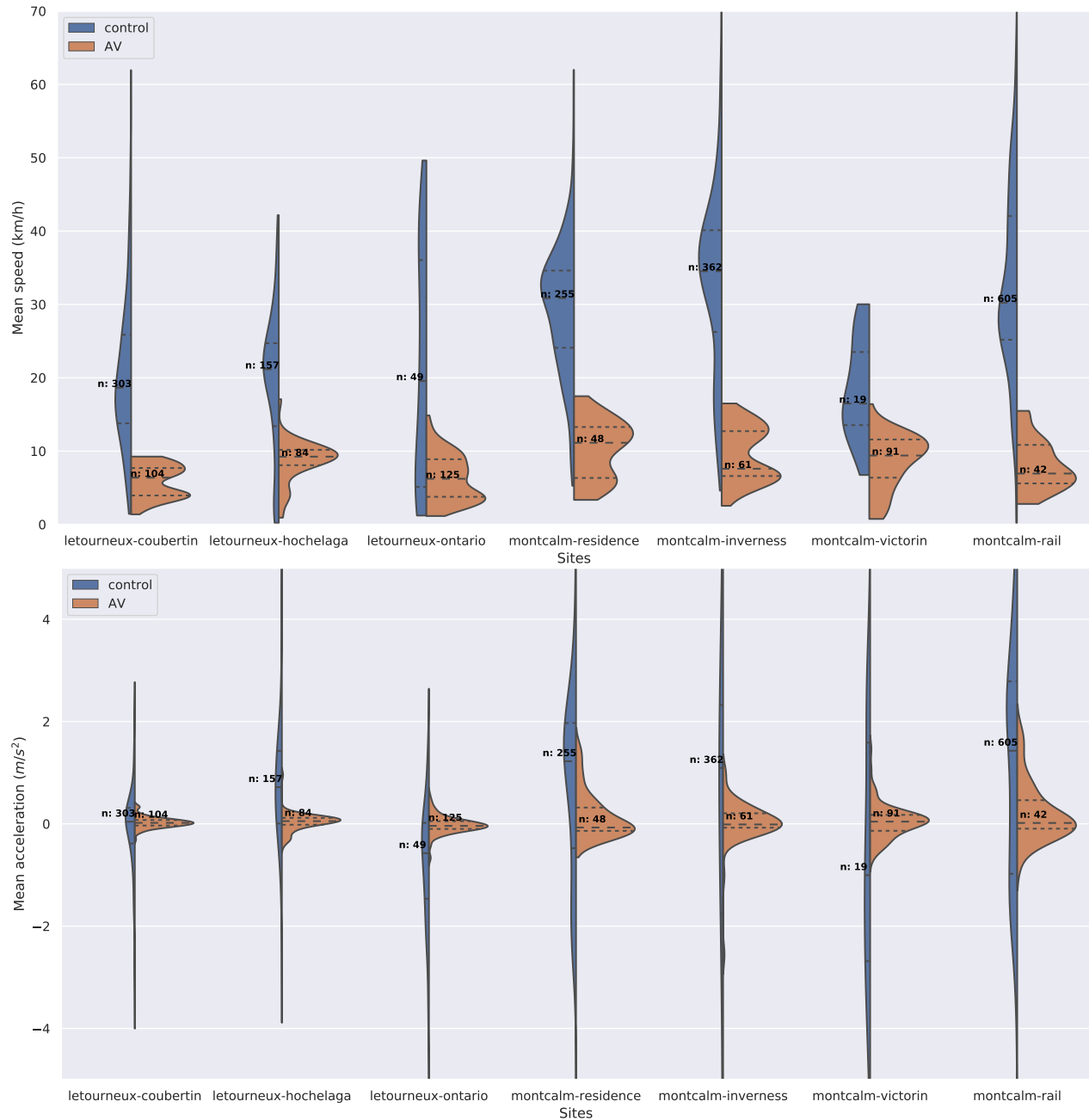


Figure 4.5 Mean user speed and acceleration distributions of control vehicles and automated shuttles at each site.

pedestrians, the distributions for shuttle interactions show generally higher TTC_{15} , indicating safer interactions. The shuttle and control vehicle TTC_{15} distributions are significantly different only at the Hochelaga intersection ($D=0.3509$, $p\text{-value}=0.0266$), though there are few observations (respectively 49 and 21 for control vehicles and shuttles).

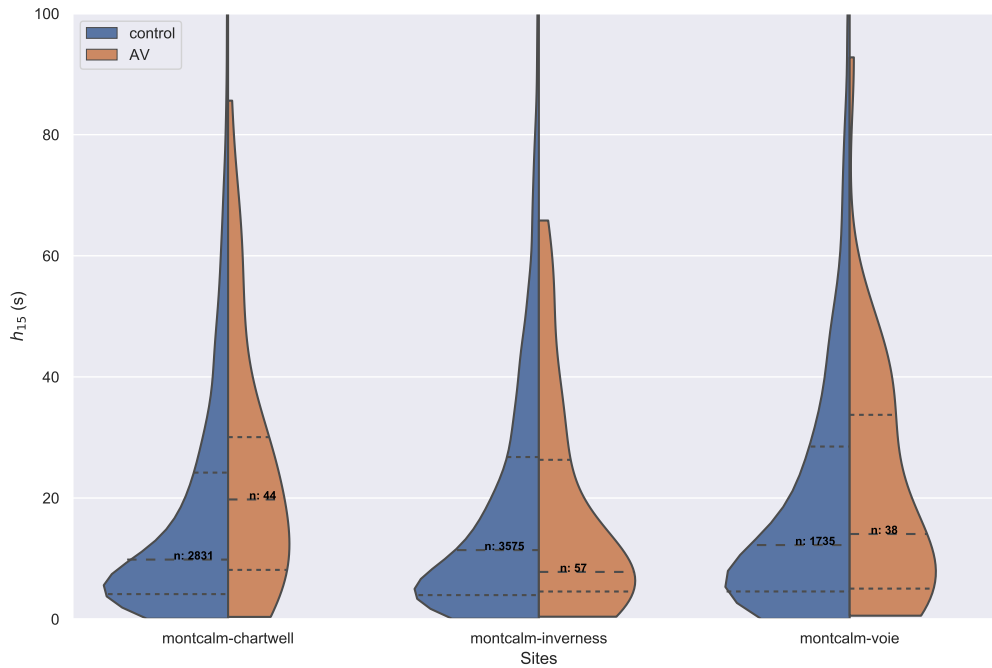


Figure 4.6 15th percentile of headway (h_{15}) distributions with a leading control vehicle or automated shuttle for three sites in Candiac.

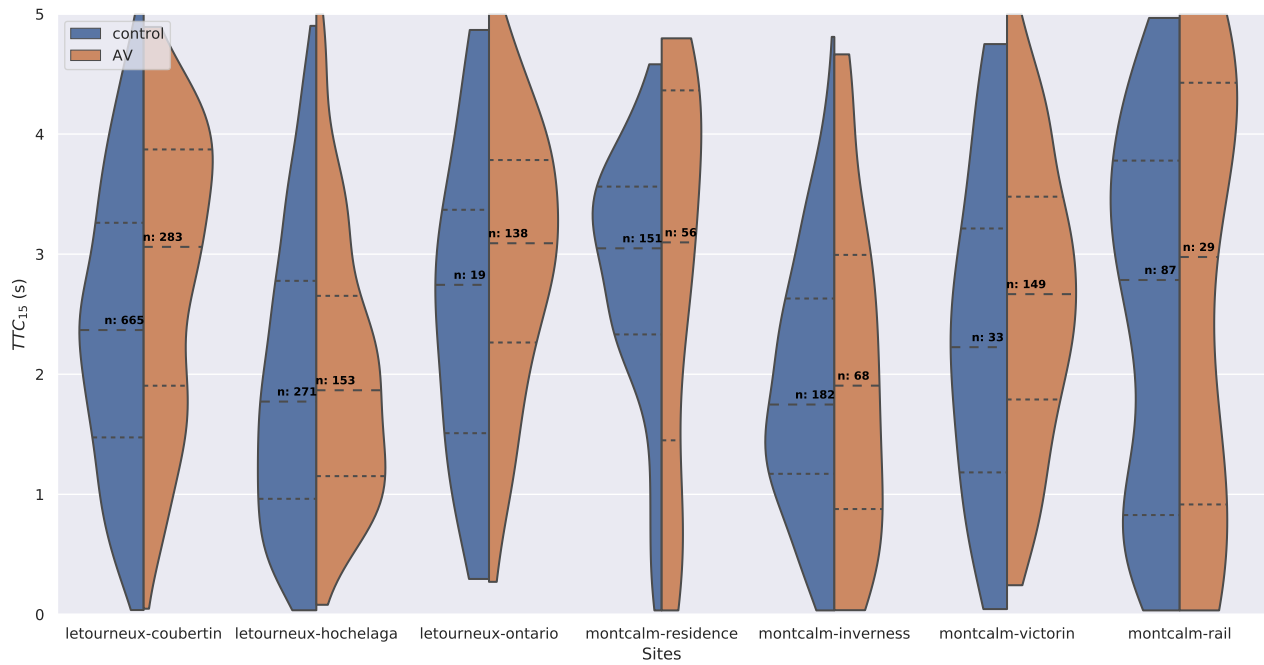


Figure 4.7 TTC_{15} distributions for control vehicle and shuttle interactions at each site.

Post-Encroachment Time (PET)

The *PET* distributions for shuttle and control vehicle interactions are shown in Figure 4.8. The first thing to note is that much higher *PET* values are recorded than *TTC*, as there is no upper bound on the maximum duration between the passing times of two road users at the same location (*TTC* is by construction limited to the motion prediction time horizon of 5 s used in this study). Similarly to the previous *TTC* analysis, the *PET* values are greater overall for shuttle interactions. Here, the KS tests indicate a statistically significant difference between the distributions (p-value<0.05) for all sites, with the exception of the Marie-Victorin intersection in Candiac ($D=0.1307$, p-value=0.5511), which, despite the distribution shift, is related to the small sample size. Interactions with vulnerable road user safety were studied separately at the sites in Montreal: the distributions for the shuttle interactions were shifted toward higher values for cyclists and were similar for cyclists, but the small number of interactions did not yield any statistical difference.

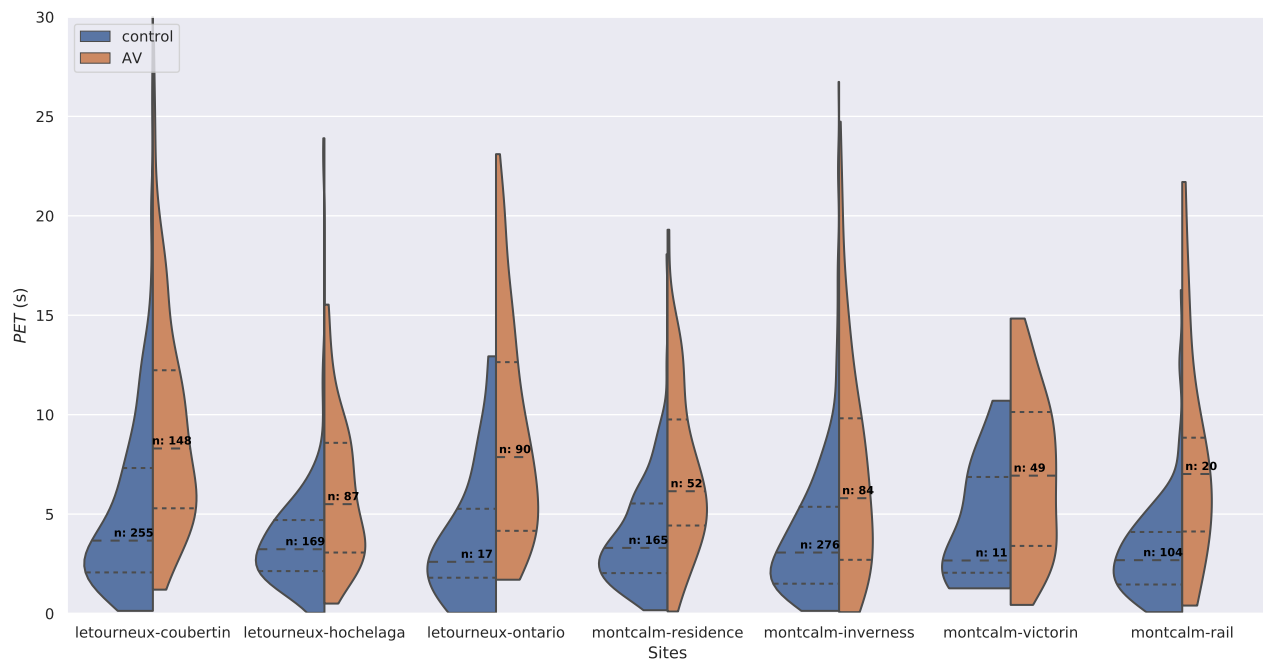


Figure 4.8 *PET* distributions for control vehicle and shuttle interactions at each site.

Speed Differential

The distributions of the 85th percentile of the speed differential for interactions involving control vehicles and automated shuttles are shown in Figure 4.9. Consistently with the previous safety indicators, the speed differentials are noticeably greater with the control

vehicles. The distributions were also compared using the KS test. As was the case for *PET*, results indicate that the distributions are significantly different, with p-values below the 0.05 level, for all sites except for the Marie-Victorin intersection in Candiac ($D=0.1958$, $p\text{-value}=0.1235$).

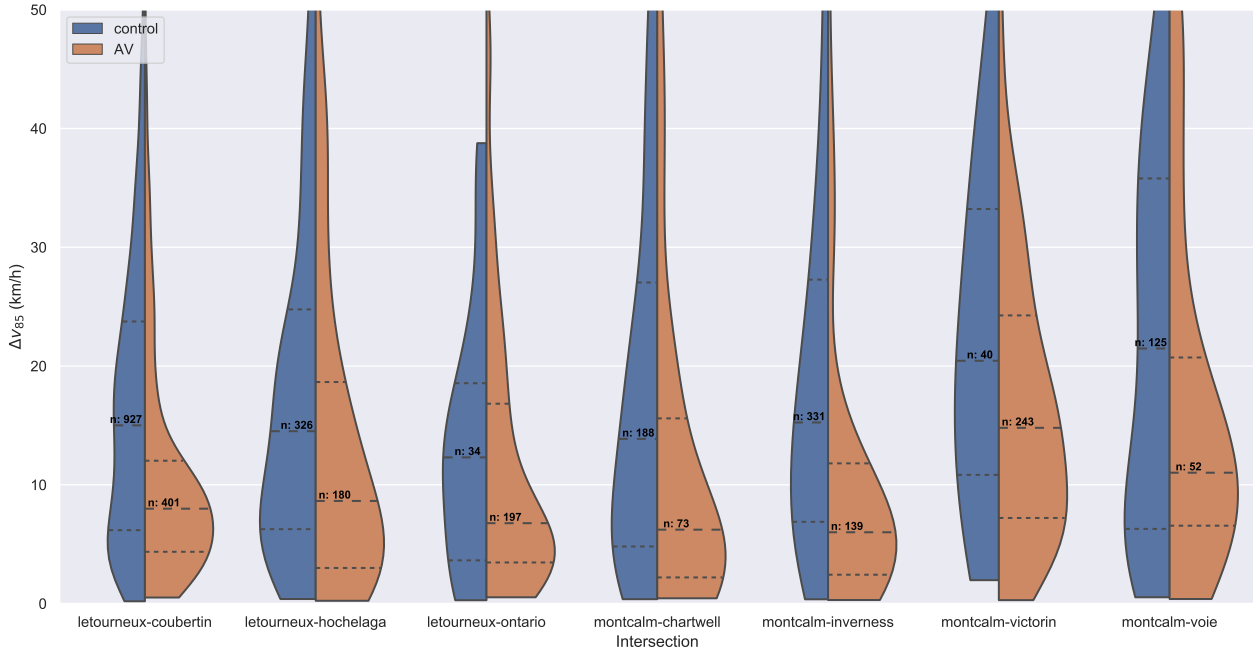


Figure 4.9 Δv_{85} distributions for control vehicle and shuttle interactions at each site.

4.4.3 Regression Analysis

The first models included all the extracted covariates for each interaction. Variables with strong correlations were considered individually and only the most significant variable in the model was kept while the rest were removed. For instance, the site, the date of the data collection and the presence of a traffic light were, without surprise, highly correlated. Consequently, the variable yielding the best model as measured by the adjusted R^2 , the site in this case, was kept in the model. Similarly, the speeds and accelerations of the second road user were also correlated and could not all be kept in the models: the minimum and maximum accelerations were kept in the TTC_{15} and *PET* models, while the minimum speed only was kept in the Δv_{85} model. Non-statistically significant variables were removed one after the other. Variables, such as the speed of the first road user (shuttle or control vehicle), that were not statistically significant in the model ($p\text{-value}>0.05$) were removed from the covariates. Finally, variables were combined by trial and error to find the best model.

Interaction variables were also tested, but did not necessarily translate into a better model. For example, the interaction term for the second user acceleration and the involvement of a shuttle was not found to be statistically significant. On the other hand, the interaction term for site and the second user speed or acceleration (depending on the model) was significant according to the p-value and the improvement of the adjusted R^2 . The resulting models for TTC_{15} , $\log(PET)$ and Δv_{85} are shown in two parts in Tables 4.3 and 4.4.

Table 4.3 Regression models (p-values<0.05 are in bold) (part 1).

	TTC_{15}			$\log(PET)$			Δv_{85}		
	Coef.	Std. err.	p-value	Coef.	Std. err.	p-value	Coef.	Std. err.	p-value
(Intercept)	2.5415	0.179	0.000	1.2758	0.195	0.000	5.3317	1.461	0.000
User type									
AV	0.1610	0.266	0.545	0.5350	0.233	0.022	-2.7620	2.252	0.220
Second user type (Ref. cyclist)									
car	0.2871	0.172	0.095	-0.0976	0.177	0.582	2.2959	1.465	0.117
pedestrian	0.4123	0.181	0.023	0.5088	0.221	0.021	3.6051	1.550	0.020
AV * car	-0.0900	0.263	0.732	0.1360	0.233	0.559	-0.4987	2.230	0.823
AV * pedestrian	0.0045	0.282	0.987	-0.3774	0.283	0.182	-5.8331	2.400	0.015
Interaction category (Ref. rear-end)									
side	-0.3800	0.070	0.000	0.5228	0.063	0.000	10.3523	0.608	0.000
leaving	-0.4250	0.126	0.001	0.7166	0.146	0.000	8.4703	0.948	0.000
AV * side	0.3008	0.109	0.006	-0.1411	0.095	0.139	-4.8304	0.938	0.000
AV * leaving	0.7547	0.188	0.000	-0.3774	0.192	0.049	-0.6293	1.390	0.651
Site (Ref. letourneux-coubertin)									
letourneux-hochelaga	-0.4146	0.147	0.005	-0.4809	0.176	0.006	-0.9251	0.778	0.234
letourneux-ontario	0.8066	0.201	0.000	-0.1442	0.163	0.375	-2.0336	1.104	0.066
montcalm-chartwell	0.3490	0.190	0.067	-0.1327	0.157	0.399	7.6399	1.194	0.000
montcalm-inverness	-0.8315	0.130	0.000	-0.0902	0.125	0.469	6.0168	0.951	0.000
montcalm-victorin	0.1392	0.202	0.491	-0.9747	0.249	0.000	4.4842	1.076	0.000
montcalm-rail	0.4375	0.215	0.041	0.2253	0.197	0.252	9.0823	1.390	0.000
Second user min. speed v_{15}^2									
v_{15}^2	-	-	-	-	-	-	0.5533	0.039	0.000
v_{15}^2 * letourneux-hochelaga	-	-	-	-	-	-	0.2079	0.058	0.000
v_{15}^2 * letourneux-ontario	-	-	-	-	-	-	0.1927	0.094	0.040
v_{15}^2 * montcalm-chartwell	-	-	-	-	-	-	-0.5571	0.089	0.000
v_{15}^2 * montcalm-inverness	-	-	-	-	-	-	-0.3788	0.086	0.000
v_{15}^2 * montcalm-victorin	-	-	-	-	-	-	0.0656	0.101	0.515
v_{15}^2 * montcalm-voie	-	-	-	-	-	-	-0.4039	0.081	0.000
	$n: 2281, \text{Adj. } R_{adj}^2: 0.138$			$n: 1442, \text{Adj. } R_{adj}^2: 0.287$			$n: 3109, \text{Adj. } R_{adj}^2: 0.304$		

The results for the automated shuttles are consistent with the distribution comparisons of the three safety indicators per site: the interactions involving a shuttle are safer than the ones involving control vehicles, i.e. with human drivers. If the AV variable is significant only in the PET model, its coefficient has the expected sign (positive for TTC_{15} and PET, negative for Δv_{85}), and many of its interactions terms with the second user type or the interaction category are significant. Figure 4.10 demonstrates the interactions with the type of the second road user (top graph) and with the interaction category (bottom graph) and both show the interactions with the automated shuttle to be safer for all other road users and in all types of interaction categories. The TTC_{15} values are the closest for the different types

Table 4.4 Regression models (p-values<0.05 are in bold) (part 2).

	TTC_{15}			$\log(PET)$			Δv_{85}		
	Coef.	Std. err.	p-value	Coef.	Std. err.	p-value	Coef.	Std. err.	p-value
(Intercept)	2.5415	0.179	0.000	1.2758	0.195	0.000	5.3317	1.461	0.000
Second user min. acceleration a_{15}^2									
a_{15}^2	-0.0565	0.020	0.006	-0.1134	0.021	0.000	-	-	-
a_{15}^2 * letourneux-hochelaga	0.1241	0.040	0.002	0.0655	0.049	0.181	-	-	-
a_{15}^2 * letourneux-ontario	0.3027	0.054	0.000	0.0774	0.044	0.077	-	-	-
a_{15}^2 * montcalm-chartwell	0.0394	0.045	0.382	0.1091	0.036	0.002	-	-	-
a_{15}^2 * montcalm-inverness	0.0845	0.025	0.001	0.1519	0.024	0.000	-	-	-
a_{15}^2 * montcalm-victorin	0.1058	0.041	0.009	-0.0053	0.057	0.926	-	-	-
a_{15}^2 * montcalm-voie	0.2235	0.045	0.000	0.1683	0.070	0.016	-	-	-
Second user max. acceleration a_{85}^2									
a_{85}^2	-0.1181	0.020	0.000	-0.1247	0.023	0.000	-	-	-
a_{85}^2 * letourneux-hochelaga	0.0328	0.044	0.455	0.1715	0.054	0.002	-	-	-
a_{85}^2 * letourneux-ontario	0.0967	0.046	0.036	0.1043	0.048	0.030	-	-	-
a_{85}^2 * montcalm-chartwell	0.0153	0.032	0.628	0.1220	0.030	0.000	-	-	-
a_{85}^2 * montcalm-inverness	0.1480	0.024	0.000	0.0978	0.026	0.000	-	-	-
a_{85}^2 * montcalm-victorin	0.0531	0.032	0.095	0.2254	0.039	0.000	-	-	-
a_{85}^2 * montcalm-voie	0.0906	0.034	0.008	0.0468	0.035	0.175	-	-	-
	n: 2281, Adj. R_{adj}^2 : 0.138			n: 1442, Adj. R_{adj}^2 : 0.287			n: 3109, Adj. R_{adj}^2 : 0.304		

of the second road user where none of the AV coefficients are significant. All interactions with pedestrians are significantly safer based on the TTC_{15} and PET models regardless of type of the first road user. On the contrary, the Δv_{85} model shows a striking difference between automated shuttles and control vehicles, where interactions with pedestrians are respectively the safest and least safe by large margins. These results are consistent for the automated shuttle across the safety indicators, where interactions with pedestrians are the safest, which is expected as they are programmed to be very cautious and may often stop for pedestrians to get on and off. The interactions of the control vehicles with pedestrians are also the safest among all types of users based on the TTC_{15} and PET models, but not for the Δv_{85} , which could happen when drivers accelerate after yielding to pedestrians. Regarding the interaction category, most variables and interaction terms are significant, the clearest conclusion is the improved safety of the automated shuttles. Putting aside the “leaving” category, which may reflect partially observed interactions, side interactions are consistently less safe than rear-end interactions based on TTC_{15} and Δv_{85} .

Looking at the sites, the observations based on the distribution comparisons are confirmed with the model. The sites with the highest speeds, namely Hochelaga, in Montreal, and Inverness, in Candiac, are significantly less safe in terms of most indicators (both for TTC_{15} , Hochelaga for PET and Inverness for Δv_{85}) with noticeable effects on the indicators. All sites in Candiac are significantly less safe in terms of Δv_{85} and one site (the Marie-Victorin intersection) in terms of PET . The sites in Montreal, except for the Hochelaga intersection, are generally safer than the higher-speed sites in Candiac across all indicators. The Ontario

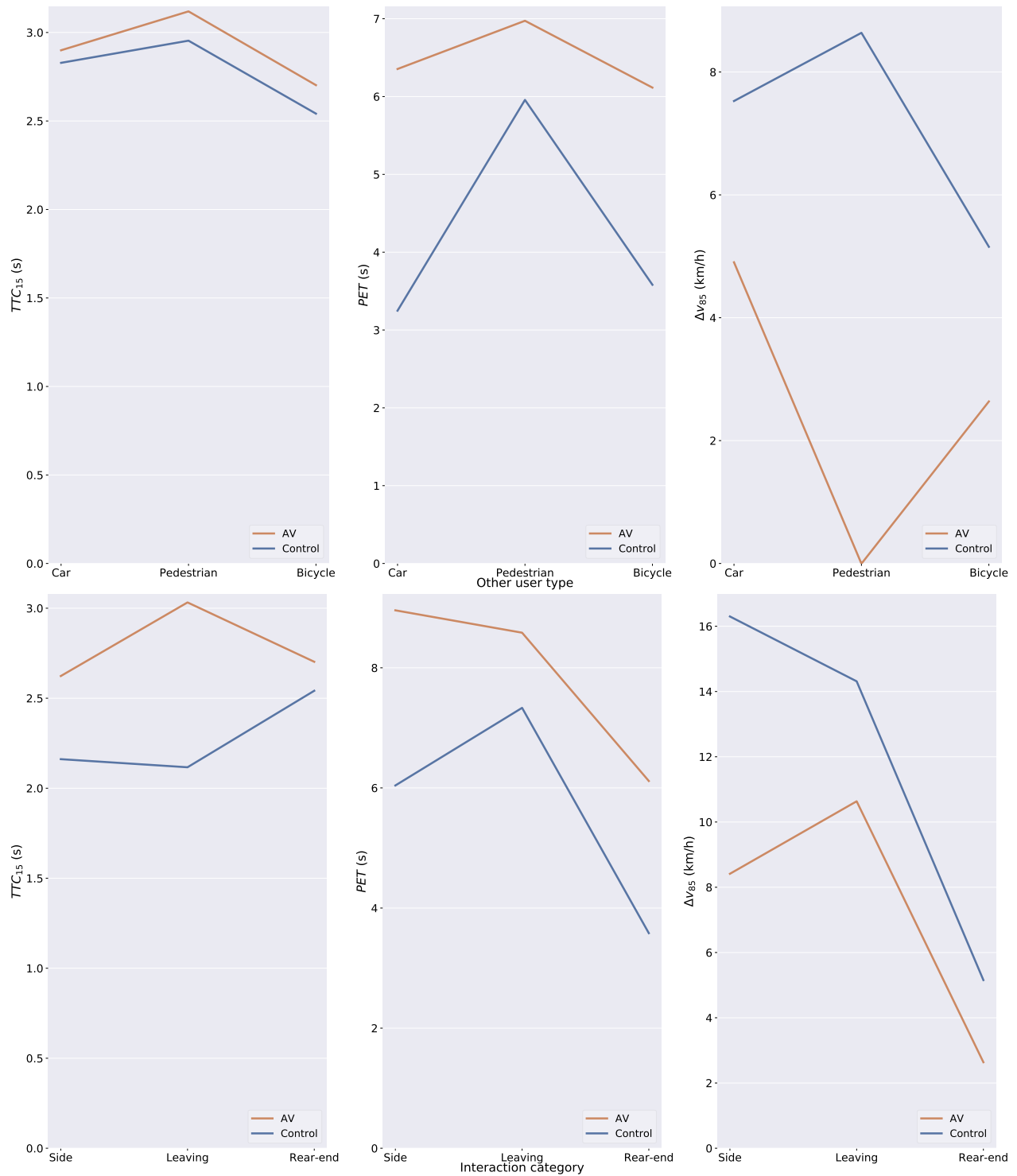


Figure 4.10 Cumulative coefficients (intercepts) for the three models associated with control vehicles and automated shuttles depending on the second road user type (top) and the interaction category (bottom).

intersection in Montreal and the rail crossing in Candiac are the safest based on the TTC_{15} model.

The kinematics of the second road user involved in an interaction are significant for many sites in all the models. It should be added that models without the site interactions show that the second user's speed and acceleration covariates have the expected signs globally, that the maximum acceleration is negatively and significantly correlated with TTC_{15} and PET , that the minimum acceleration, with overwhelmingly negative values, is positively correlated with TTC_{15} and PET (stronger deceleration, in absolute values, are thus associated with lower TTC_{15} and PET) (significant only in the TTC_{15} model) and that the minimum speed is positively and significantly correlated with Δv_{85} . Looking at the presented models with site interactions, the associations vary for the different sites. Few sites depart significantly from the general trends: the Letourneux and Coubertin intersection is notable as there is a significant and negative correlation between minimum acceleration, TTC_{15} and PET and it is the only site with a non-significant coefficient for minimum speed and Δv_{85} . The sites at the residence and the Marie-Victorin intersections also depart from the general trends for TTC_{15} and minimum acceleration, PET and minimum and maximum accelerations. Given the relatively small number of sites, it is difficult to correlate these differences with roadway and environmental characteristics.

4.5 Conclusions

This study investigated the safety of automated shuttles with an approach that has, to the authors' knowledge, never been used. Using road user trajectories extracted from video data, the speed, acceleration, time headway, TTC and PET were computed for all road users and all interactions. The results confirm the cautious driving behaviour of AVs, in particular the low-speed shuttles used in these two pilots. Their average speeds and accelerations are lower, although higher at the Candiac sites where general traffic was also faster. The time headway distributions were different at each site in Candiac. The site with the highest control vehicle speeds and highest differential with shuttle speeds showed the lowest time headway. This is expected in such a situation, but points to potential issues for low-speed shuttles on higher-speed roads. The TTC and PET results all point toward safer interactions of automated shuttles with all road users, in particular with pedestrians, compared to control vehicles. The KS tests show significant differences and clear shifts toward safer values for several sites. The statistical models confirm the interactions of automated shuttles with all types of road users and in all categories of interactions were safer. They show a more detailed picture of the factors associated with the different safety indicators at the different sites. The results

also show that different indicators capture different aspects of safety, as TTC_{15} and PET are more related to the proximity or probability of a crash, on the one hand, and Δv_{85} is more related to the severity of the potential crash on the other, and as these are respectively correlated to vehicle acceleration or speed.

The nonsignificant covariates like the different exposure measures should be noted, and further investigated, especially in the context of automated shuttles. Automated shuttles were shown to have safer interactions with pedestrians, but not with other users, and their number was not significant. A related safety concern is the possible carelessness from surrounding users interacting with AVs. This was repeatedly observed on site and in the videos. This is known in the literature as compensatory behaviour or risk compensation. Studies have suggested increased risk-taking behaviours might be observed from travellers who feel safer [164]. This unique dataset will be used to further investigate the impact of automated shuttles on road user behaviour.

4.6 Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the financial support of MITACS, Fondation CAA-Québec, Transport Québec and the Société de l'Assurance Automobile du Québec (SAAQ).

CHAPITRE 5 RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

L'article du chapitre précédent présentait de façon condensée les résultats obtenus qui permettaient de répondre à l'objectif principal de ce projet de recherche, soit d'évaluer la sécurité des interactions entre des VA et d'autres usagers de la route. D'autres résultats et analyses ont été menés pour répondre à cet objectif, mais, dans un intérêt de concision, n'ont pas été retenus pour la version finale de l'article. Ce chapitre présente donc des résultats complémentaires. Qui plus est, des mesures sur l'effet des navettes automatisées sur les caractéristique de la circulation ont été conduites, mais n'y avaient pas été présentées.

5.1 Modèle statistique

Pour obtenir les modèles statistiques finaux, de nombreuses variables qui avaient été générées précédemment ont été testées. De nombreuses combinaisons de celles-ci ont également été examinées pour trouver les meilleurs modèles.

Les variables *AV*, *Secondusertype*, *Interactioncategory*, *Site*, v_{15}^2 ainsi que a_{15}^2 et a_{85}^2 avaient été extraites et ont été présentées dans l'article. Des variables supplémentaires avaient également été extraites. À partir des bases de données d'interactions, les variables suivantes ont été extraites :

- *hour* Heure à laquelle s'est produite l'interaction. Cette variable numérique est déterminée d'après l'heure d'enregistrement de la vidéo et le nombre d'images ;
- *date* Cette variable catégorielle correspond à la journée où la collecte de données a été menée ;
- *duration* Durée de l'interaction. Il s'agit du nombre d'images où les deux usagers impliqués peuvent être vus ;
- *traffic_light* Variable binaire qui permet de savoir si un feu de circulation se trouve sur le site (1 si le site a un feu et 0 pour le cas contraire) ;
- *intersection* Variable binaire qui permet de savoir si le site où se déroule l'interaction est un carrefour (1 si le site est un carrefour et 0 pour le cas contraire) ;
- *city* Variable binaire qui correspond à la ville où se déroule l'interaction (0 si le site est à Candiac et 1 si le site est à Montréal) ;
- *collision_prob_max* Probabilité maximale de collision d'après les points de collision des trajectoires des usagers impliqués ;
- *nb_users_15_s* Nombre d'usagers ayant circulé dans le cadre de la vidéo 15 s avant et après l'intervalle de temps associé à l'interaction ;

- *nb_users_30_s* Nombre d’usagers ayant circulé dans le cadre de la vidéo 30 s avant et après l’intervalle de temps associé à l’interaction ;
- *pedestrian_15_s* Variable binaire correspondante à la présence d’au moins un piéton 15 s avant ou après l’intervalle de temps associé à l’interaction (1 si au moins un piéton peut être vu dans l’intervalle de temps) ;
- *pedestrian_30_s* Variable binaire correspondante à la présence d’au moins un piéton 30 s avant ou après l’intervalle de temps associé à l’interaction (1 si au moins un piéton peut être vu dans l’intervalle de temps) ;
- *cyclist_15_s* Variable binaire correspondante à la présence d’au moins un cycliste 15 s avant ou après l’intervalle de temps associé à l’interaction (1 si au moins un cycliste peut être vu dans l’intervalle de temps) ;
- *cyclist_30_s* Variable binaire correspondante à la présence d’au moins un cycliste 30 s avant ou après l’intervalle de temps associé à l’interaction (1 si au moins un cycliste peut être vu dans l’intervalle de temps) ;

Avant de construire les premiers modèles de régression, une analyse de corrélation a été conduite sur l’ensemble des interactions impliquant un VA ou un véhicule témoin. La matrice de corrélation obtenue avec les variables continues et binaires est présentée à la Figure 5.1. De façon similaire, les coefficients de corrélation de Spearman ont été calculés pour prendre en compte l’effet d’une corrélation non linéaire entre les variables. Ces résultats sont présentés à la Figure 5.2.

L’analyse de corrélation de Spearman semble générer des coefficients plus grands, en valeur absolue. Des variables déjà corrélées comme *av* et des variables de vitesse ou d’accélération comme *u1_min_15_acc* sont plus fortement corrélés. À l’inverse, des variables, comme *interaction_max_speed* et *u1_max_speed*, sont un peu moins corrélées. Ces différences ne sont cependant pas particulièrement importantes. L’utilisation des corrélations de Pearson est donc suffisante pour déterminer les combinaisons de variables possibles.

Le V de Cramér [165] a également été calculé pour mesurer l’association entre les variables catégorielles non binaires. La Figure 5.3 présente cette matrice.

Il est à noter qu’une analyse de corrélation a également été menée entre les variables pour les jeux de données spécifiques à chaque variable indépendante, c’est à dire les données pour les cas où la variable indépendante est non nulle. Ces figures sont disponibles à l’annexe B. Cependant, les corrélations spécifiques aux différents jeux de données ne varient pas énormément.

Les mesures de corrélation ont été utilisées lors de la construction des modèles pour éviter que les variables fortement corrélées entre elles s’y retrouvent simultanément. Par exemple, sans

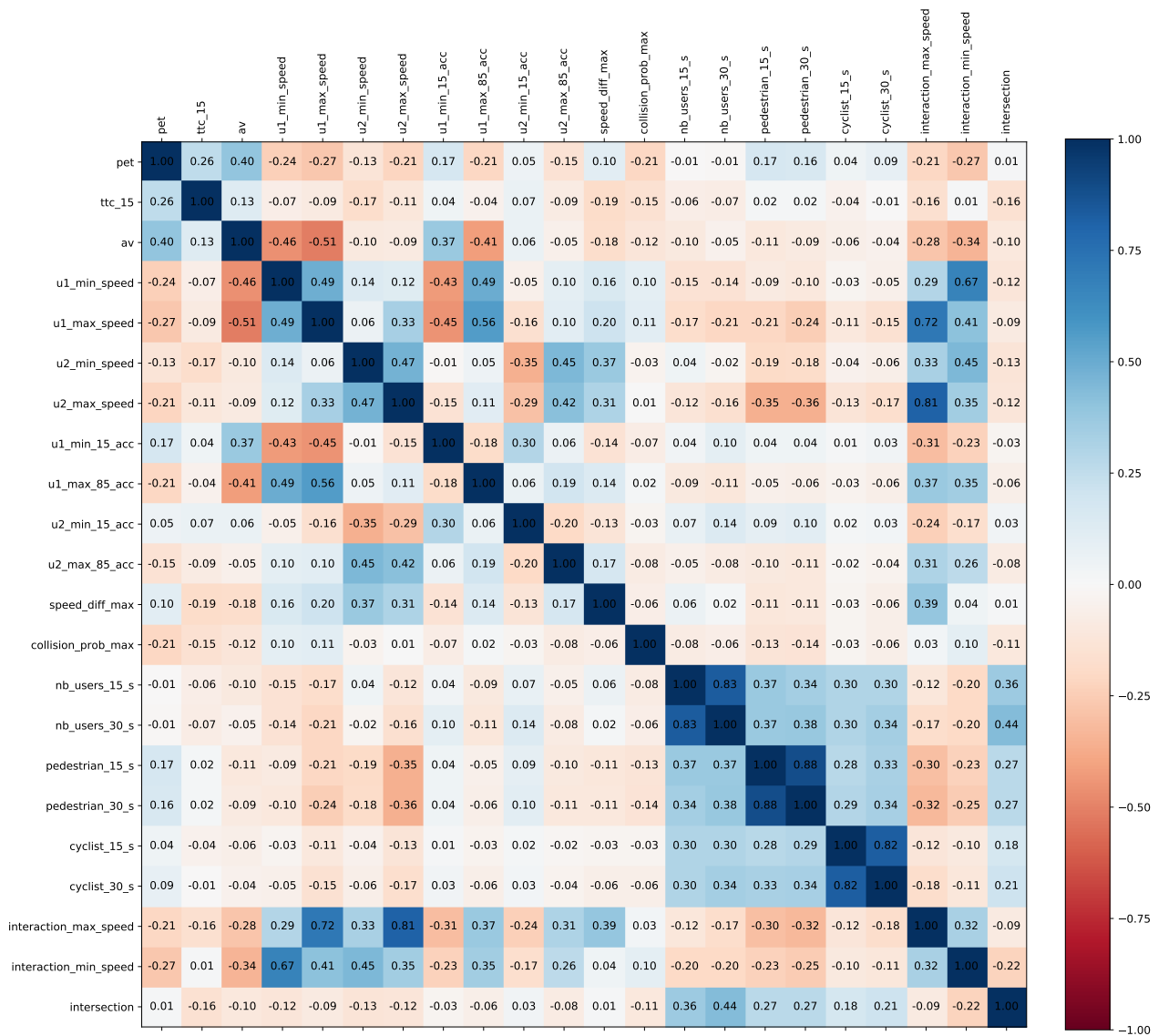


Figure 5.1 Matrice des coefficients de corrélation de Pearson des variables continues et binaires.

étonnement, les variables de vitesses du premier usager de l'interaction et la variable *av*, qui permet de distinguer un véhicule de contrôle et une navette, sont fortement corrélées. Ceci va de soi considérant que les navettes circulent beaucoup plus lentement que les autres usagers. Conséquemment, les variables de vitesse du premier usager n'ont pas été utilisées lorsque la variable de navette était utilisée dans le modèle. De la même manière, d'après les coefficients *V* de Cramér, les variables de date, de feux de circulation, de site et de ville étaient fortement corrélées. En conséquence, l'effet de ces variables était étudié individuellement. Ultimement, la variable de site procurait les meilleurs modèles en termes de R^2 ajusté et contenait plus

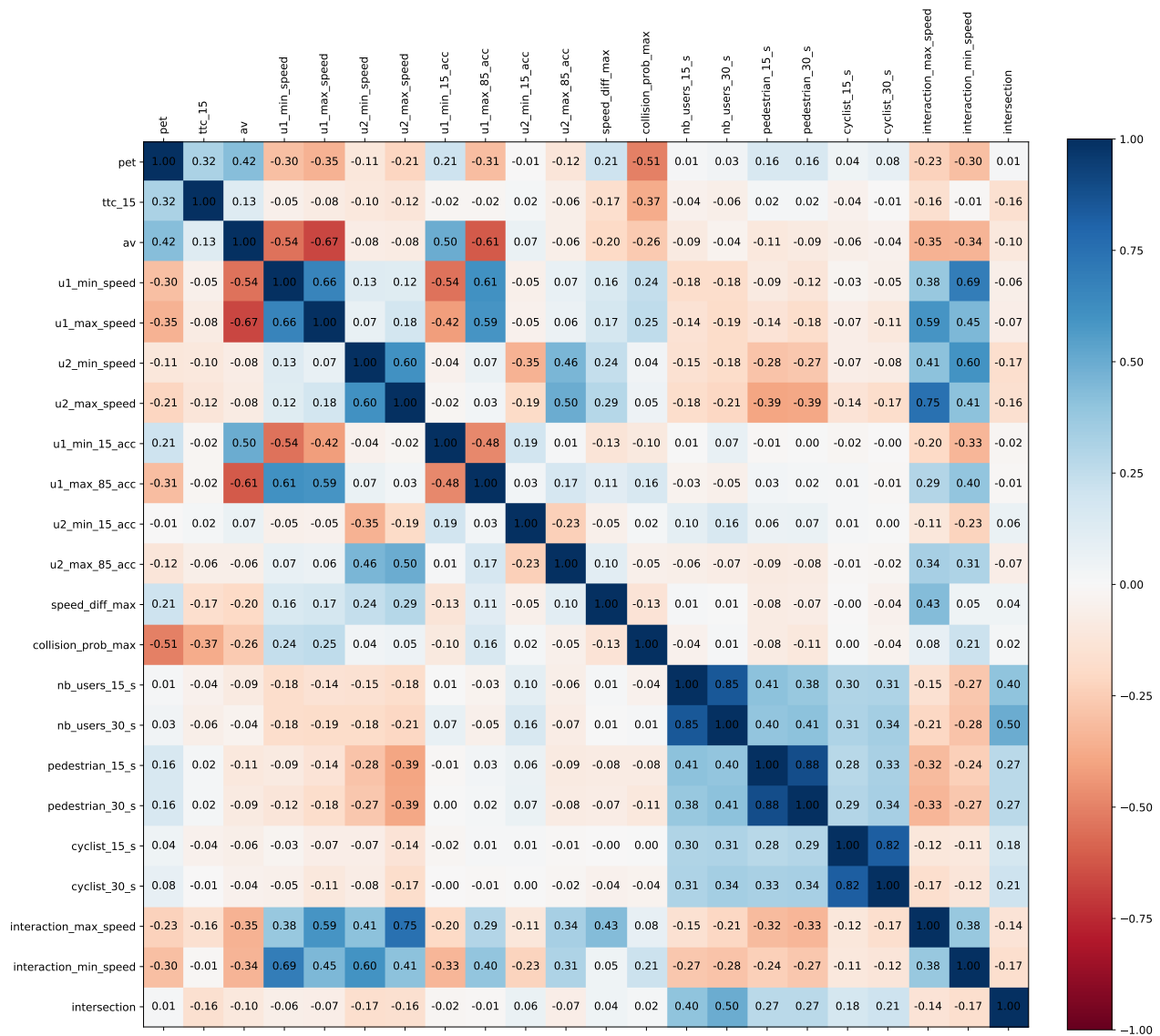


Figure 5.2 Matrice des coefficients de corrélation de Spearman des variables continues et binaires.

d'informations.

Différents modèles ont été testés, par essai-erreur. La mesure du R^2 ajusté était utilisée comme référence pour comparer les modèles entre eux. Dans l'intérêt d'avoir des modèles comparables entre les différents indicateurs, le meilleur agencement des variables indépendantes pour tous les modèles a été utilisé. Ce modèle a également été raffiné en essayant différentes combinaisons d'interaction entre les variables qui s'y retrouvaient. Encore une fois, la valeur du R^2 ajustée était utilisée pour évaluer l'apport de ces modifications sur la qualité des modèles résultants. La valeur p était également utilisée pour déterminer si ces

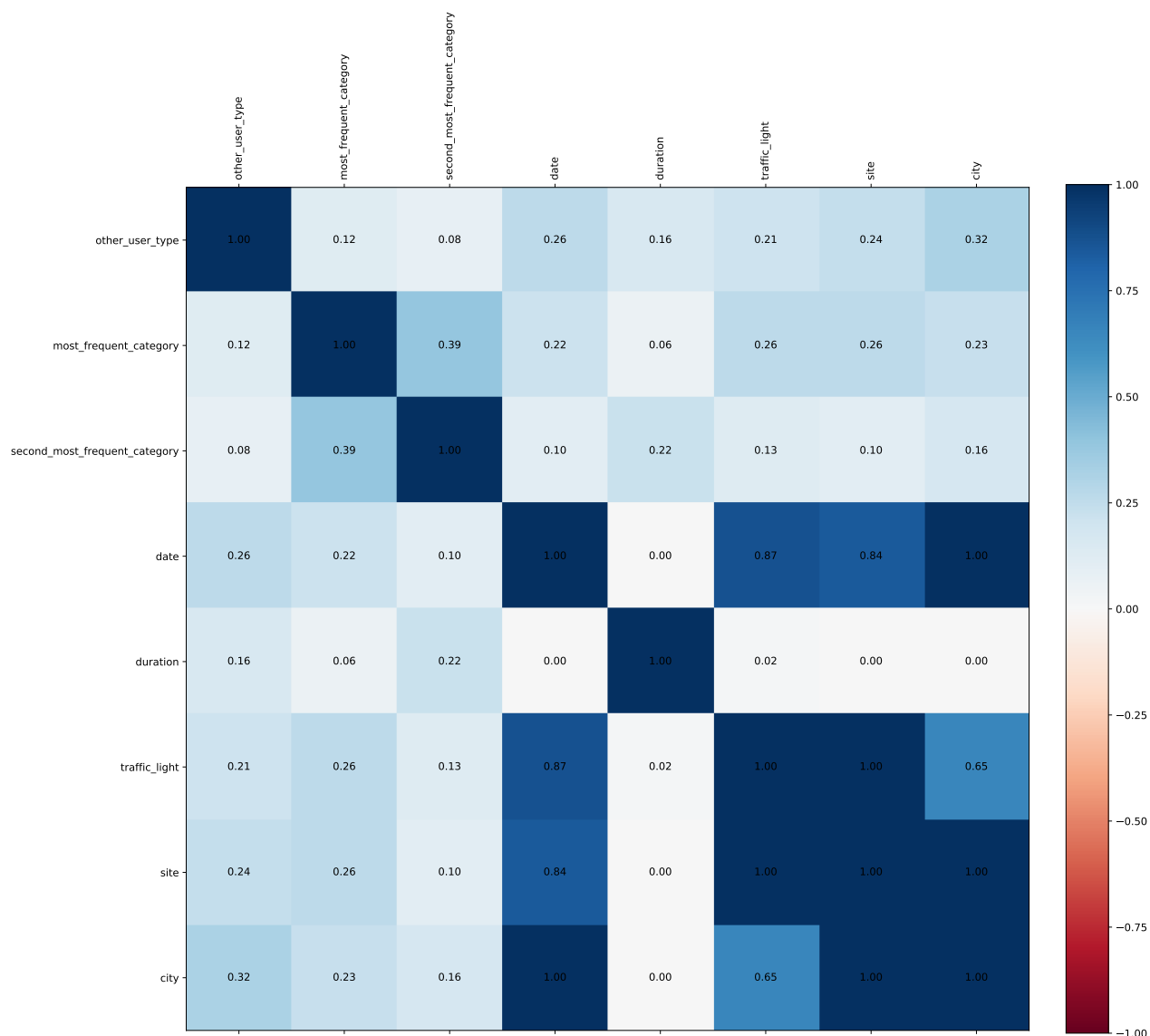


Figure 5.3 Matrice des coefficients du V de Cramér des variables catégorielles non binaires.

ajouts étaient significatifs.

Une analyse des résidus a également été conduite pour déterminer la validité des modèles. Aussi, les valeurs de résidus aberrantes, notamment les valeurs prédites négatives, ont été utilisées pour examiner des problèmes possibles. Cette analyse a notamment permis d'identifier des valeurs d'indicateurs problématiques résultantes de problèmes de segmentation dans les vidéos. Ces valeurs irrégulières ont ensuite été exclues pour les analyses. Les graphiques des valeurs de résidus sont disponibles à l'annexe B. Les résidus du modèle pour le PET indiquent que le modèle génère parfois des erreurs assez importantes. Ces erreurs sont cependant

réparties de façon homogène sur l'abscisse. Les valeurs de résidus du modèle pour le TTC semblent indiquer que la relation qui existe entre cette mesure et les variables indépendantes n'est pas linéaire. Le choix d'une régression linéaire n'est peut être pas approprié. Pour le modèle de la différence maximale de vitesse entre les usagers, le graphique des résidus (se référer à la Figure B.6) montre une hétéroscédasticité. Le modèle a de la difficulté à prédire correctement les valeurs lorsque le différentiel de vitesse augmente.

Les détails des modèles résultants, ainsi que les analyses qui ont été menées spécifiquement pour chacune des variables dépendantes sont présentées à l'annexe B. On y retrouve un tableau des corrélations entre les variables pour les jeux de données spécifiques à chaque variable indépendante, ainsi que les détails des modèles et les résidus qui s'y rattachent.

5.2 Analyse des caractéristiques de la circulation

Les données extraites ont été utilisées pour répondre à l'objectif principal de ce projet de recherche. Elles présentaient également l'opportunité de faire une analyse sous l'optique d'une analyse des caractéristiques de la circulation avec des navettes automatisées. Dans un premier temps, les séries temporelles de données de vitesses et d'accélérations de chaque trajectoire ont été lissées selon la méthode de Savitzky-Golay (avec les mêmes paramètres que ceux présentés dans l'article). Les accélérations et les vitesses ont ensuite été moyennées pour chaque trajectoire. Le nuage de points des observations par usager est présenté à la Figure 5.4.

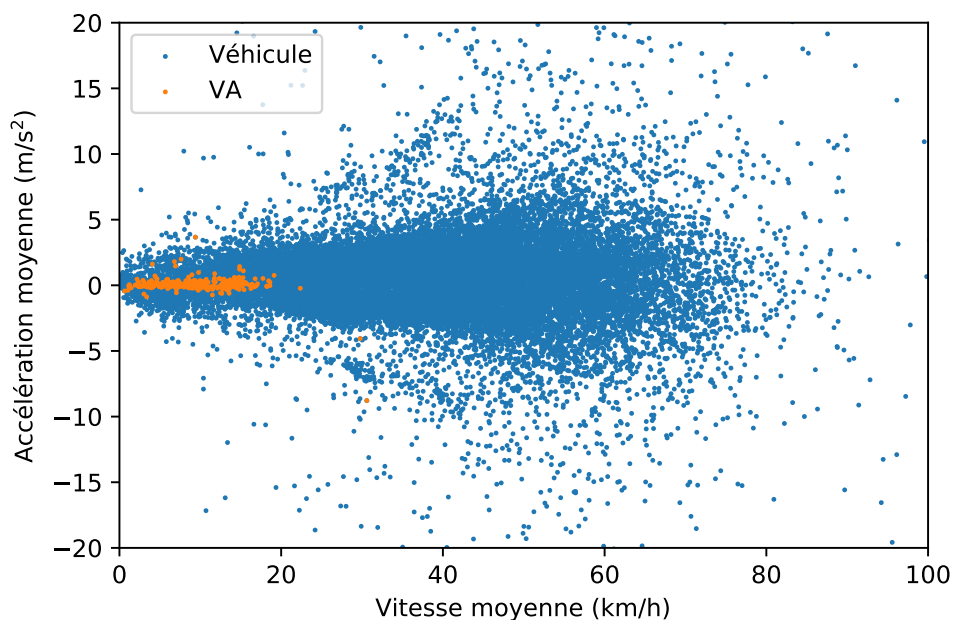


Figure 5.4 Accélération moyenne en fonction de la vitesse moyenne de chaque véhicule

Il a noté qu'il s'agit là de l'ensemble des points pour tous les sites. La plupart des vitesses se situent à l'intérieur des limites de vitesse (la limite de vitesse étant de 50 km/h sur le boulevard Montcalm, à Candiac, et de 30 km/h sur l'avenue Letourneux, à Montréal). Évidemment, plusieurs usagers roulent à des vitesses dépassant ces limites, notamment à Candiac où la chaussée est plus large et où le trafic est moins important. Des valeurs aberrantes peuvent avoir été mesurées, principalement lorsque des trajectoires sont plus éloignées de l'objectif de la caméra accentuant les erreurs de projection de l'homographie. À cause du comportement typique des conducteurs, on s'attend à ce que les mesures d'accélération soient plus élevées lorsque la vitesse augmente, jusqu'au point où la résistance de l'air contraint un véhicule de faire des accélérations trop importantes [166]. La distribution des points sur la Figure 5.4 correspond bien à ce qui est anticipé. Étant donné qu'il y a énormément de points ($N = 24182$), l'analyse de la densité permet de tracer un portrait plus clair de la concentration des observations. La Figure 5.5 présente les observations sous forme d'un histogramme à deux dimensions.

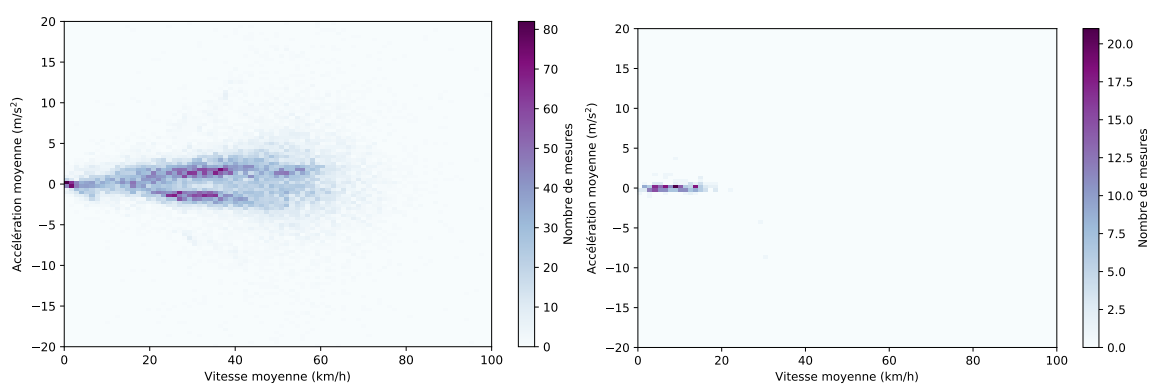


Figure 5.5 Accélération moyenne à différentes vitesses pour un véhicule (à gauche) et pour une navette (à droite)

Ici, le résultat est encore plus clair : les navettes circulent à des vitesses beaucoup plus faibles. La concentration des observations permet aussi de conclure que les navettes ont un comportement très prudent et des accélérations faibles, ce qui concorde avec les résultats présentés précédemment dans l'article.

5.2.1 Comparaison entre les manufacturiers

Les données des trajectoires des navettes ont également été analysées selon le type de navette. Une analyse comparative entre les distributions des vitesses instantanées est présentée à la Figure 5.6. Ce graphique contient les vitesses instantanées, à chaque instant, de toutes les trajectoires des navettes.

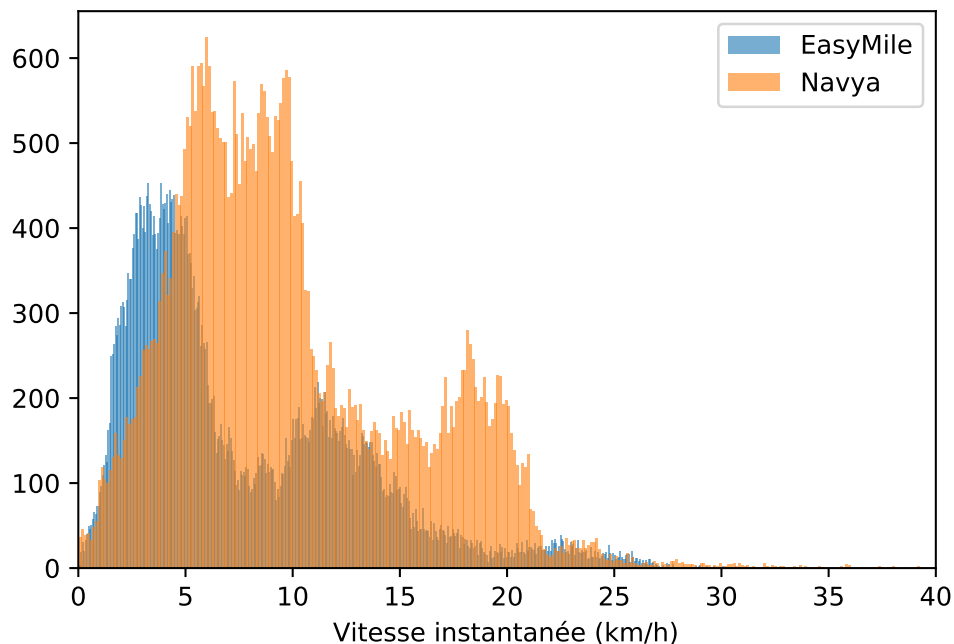


Figure 5.6 Distributions des vitesses instantanées

Les distributions ont une apparence similaire, ayant une allure bimodale et des écarts-types proches (pour EasyMile $\sigma = 5.412$ et Navya $\sigma = 5.675$). Le décalage vers la droite de la distribution des vitesses de la navette de Navya (pour EasyMile $\mu = 7.684$ et Navya $\mu = 9.971$) est principalement attribuable aux endroits où avait lieu l'enregistrement. En effet, les deux navettes il est supposé que les deux navettes avaient des spécifications similaires et circulaient dans un contexte très semblable. Les sites de Montréal comprenaient un arrêt ou un virage pour la navette alors qu'un site à Candiac (à l'intersection de l'Avenue d'Inverness) ne comprenait aucun arrêt. Aussi, les autres sites à Candiac étaient généralement peu achalandés et se caractérisaient par une circulation plus rapide.

Les données de vitesses ont également été moyennées par trajectoire. La Figure 5.7 présente les distributions résultantes.

Les moyennes des vitesses mènent aux mêmes constats que pour les vitesses instantanées. Le test de l'hypothèse nulle est rejeté avec le test K-S et un décalage vers la droite de la distribution des données pour Navya, probablement due aux vitesses pratiquées plus important dans les rues de Candiac.

Une analyse comparative des accélérations a également été conduite. La Figure 5.8 présente les distributions de toutes les accélérations instantanées mesurées.

On note d'abord que les deux distributions ont une allure semblable, bien que le test de

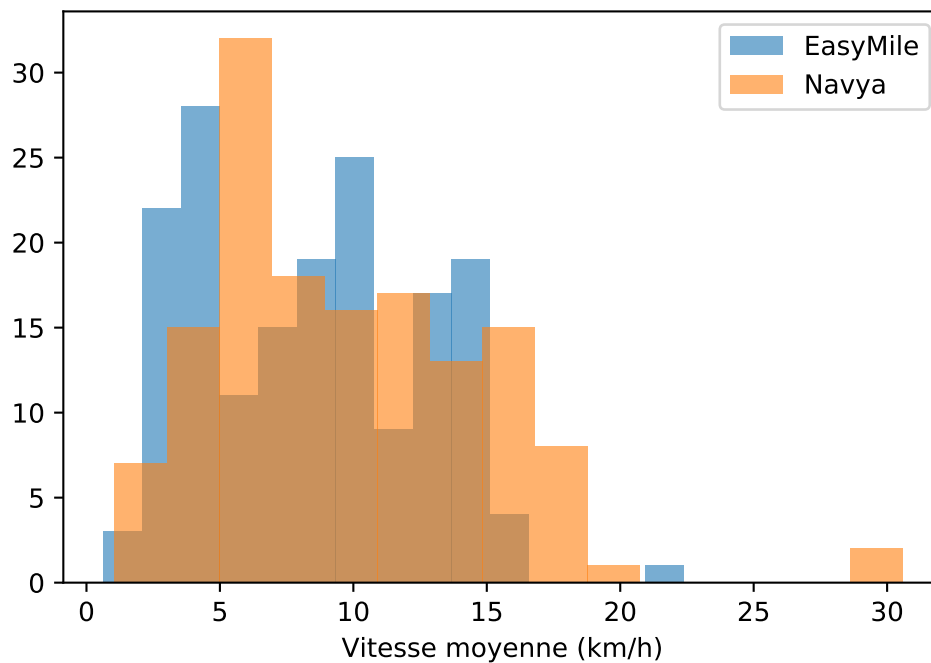


Figure 5.7 Distributions des vitesses moyennes

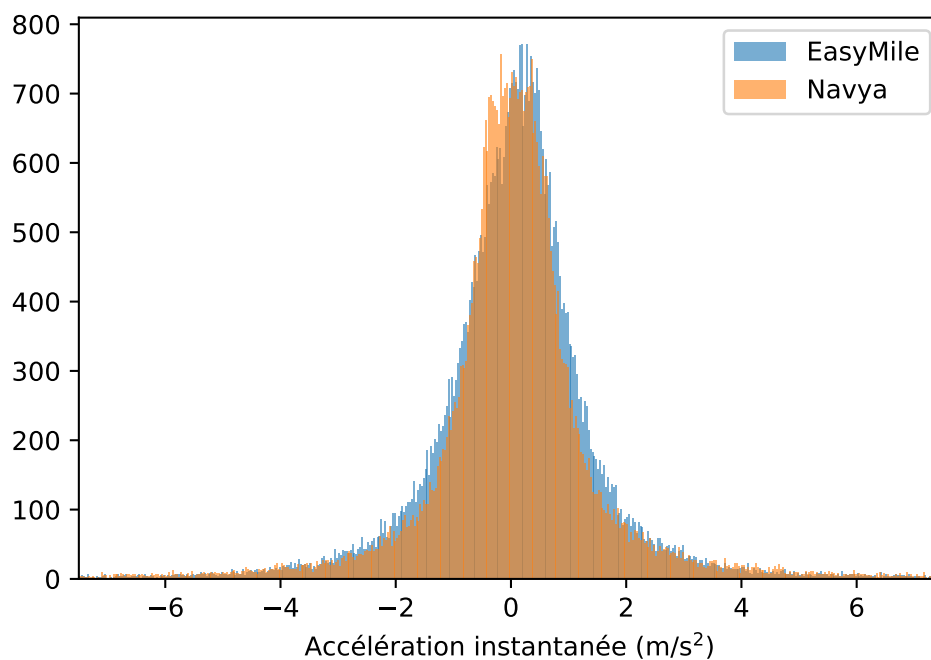


Figure 5.8 Distributions des accélérations instantanées

Kolmogorov-Smirnov amène à un rejet de l'hypothèse nulle pour une comparaison entre les deux distributions. L'hypothèse nulle du test K-S pour les deux distributions est également rejetée. C'est observations sont cependant peu étonnantes étant donné que les échantillons

sont volumineux.

Comme il avait déjà été abordé dans l'article avec les distributions d'accélération par sites, la moyenne tend vers 0 pour les données des navettes à Montréal ($\mu = 0.06838$) et à Candiac ($\mu = 0.06614$). On note aussi que les écarts-types de la distribution des données de Montréal ($\sigma = 1.565$) sont petits et relativement semblables avec celle de Candiac ($\sigma = 1.625$). Ces résultats n'ont rien d'étonnant puisque les navettes étaient opérées de façon semblable. Le coefficient d'asymétrie a été calculé pour ces deux distributions unimodales. La distribution des accélérations de la navette de Navya est légèrement étalée vers la droite ($\gamma_1 = 0.1647$), alors que la distribution des accélérations de la navette de EasyMile est légèrement plus étalée vers la gauche ($\gamma_1 = -0.0539$). Le coefficient d'acuité a aussi été calculé. Les mesures pour la distribution des accélérations de Navya ($\gamma_2 = 7.9226$) et d'EasyMile ($\gamma_2 = 7.3640$) indiquent que les deux distributions sont plus pointues qu'une distribution normale et ont une acuité similaire. Ces deux distributions ont donc un aplatissement également similaire. Les comportements des navettes sont donc sensiblement similaires et les minces variations sont probablement dues à l'environnement où elles ont circulé.

Les données d'accélération ont également été moyennées par trajectoire. La Figure 5.9 présente les distributions résultantes.

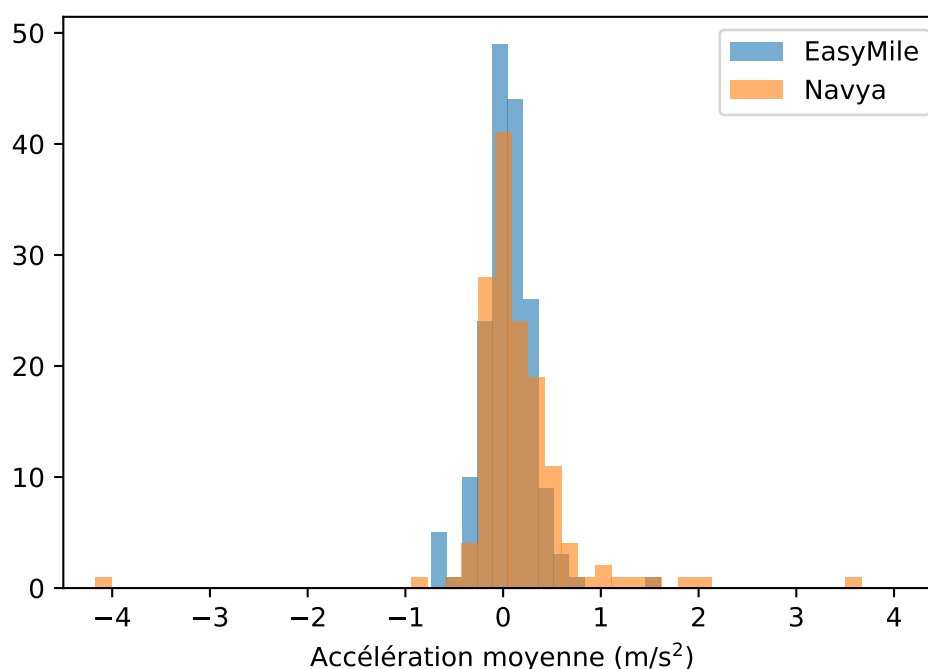


Figure 5.9 Distributions des accélérations moyennes

Il est intéressant de noter que dans ce cas, l'hypothèse nulle du test KS ne peut être rejetée

($p=0.1275$) et la différence entre les distributions n'est donc pas statistiquement significative.

5.2.2 Situations de poursuite

Bien que les données d'accélération présentent des informations importantes sur le comportement des navettes, cette variable ne présente pas explicitement le comportement des autres usagers qui interagissent avec la VA. Les données de DIV et de vitesses ont été comparées pour les situations de suivi les plus longues qui avaient été observées. La Figure 5.10 présente les dix situations de suivis avec le plus de mesures de DIV (entre 32 et 50 DIV) n'impliquant que des conducteurs humains de tous les sites confondus.

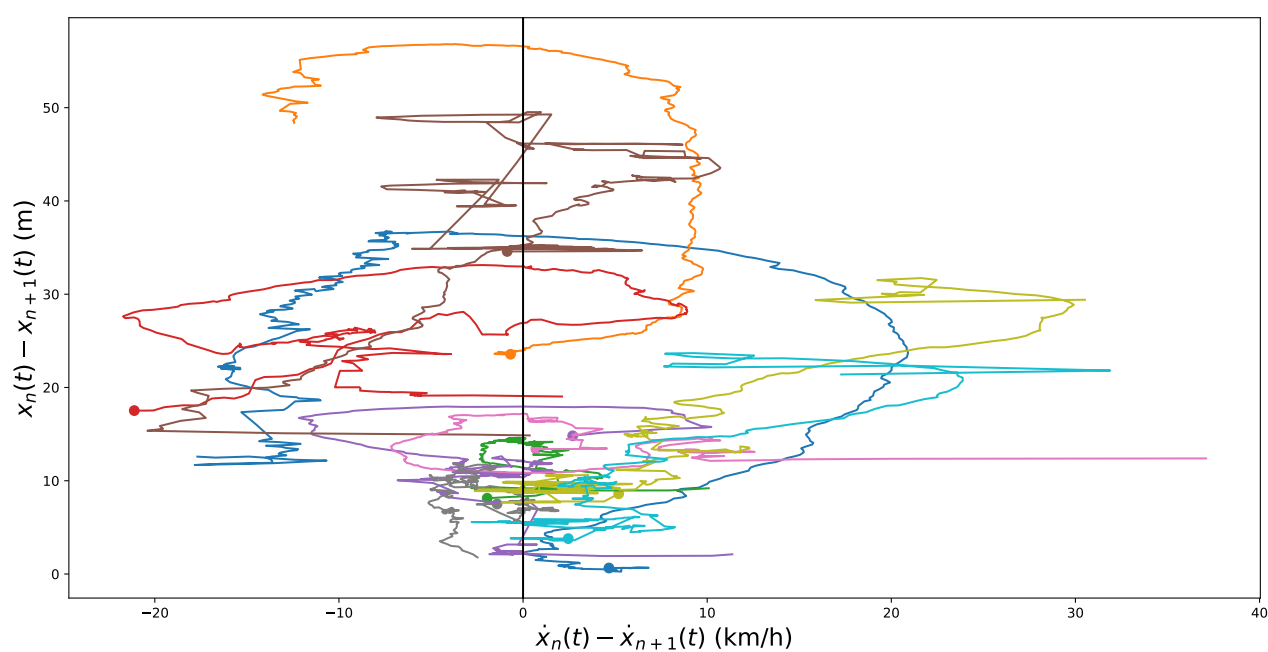


Figure 5.10 DIV et différentiel de vitesse des dix situations de suivis avec le plus de DIV mesurés n'impliquant pas de navette.

Conformément à ce qui est attendu, les DIV sont plus petites pour des différences de vitesse plus petites, alors que des mesures de correction de la vitesse sont plus étendues pour des DIV plus grandes. Il s'agit là du résultat des ajustements de vitesses du conducteur suiveur qui modifie sa conduite pour éviter une collision avec le meneur. Cependant, l'étendue des zones d'observation n'est pas suffisamment grande pour pouvoir observer des ajustements cycliques de vitesses.

Pour évaluer le comportement des autres automobilistes qui se retrouvent à suivre une navette, seules les interactions impliquant une navette en tête ont été considérées. La Figure 5.11

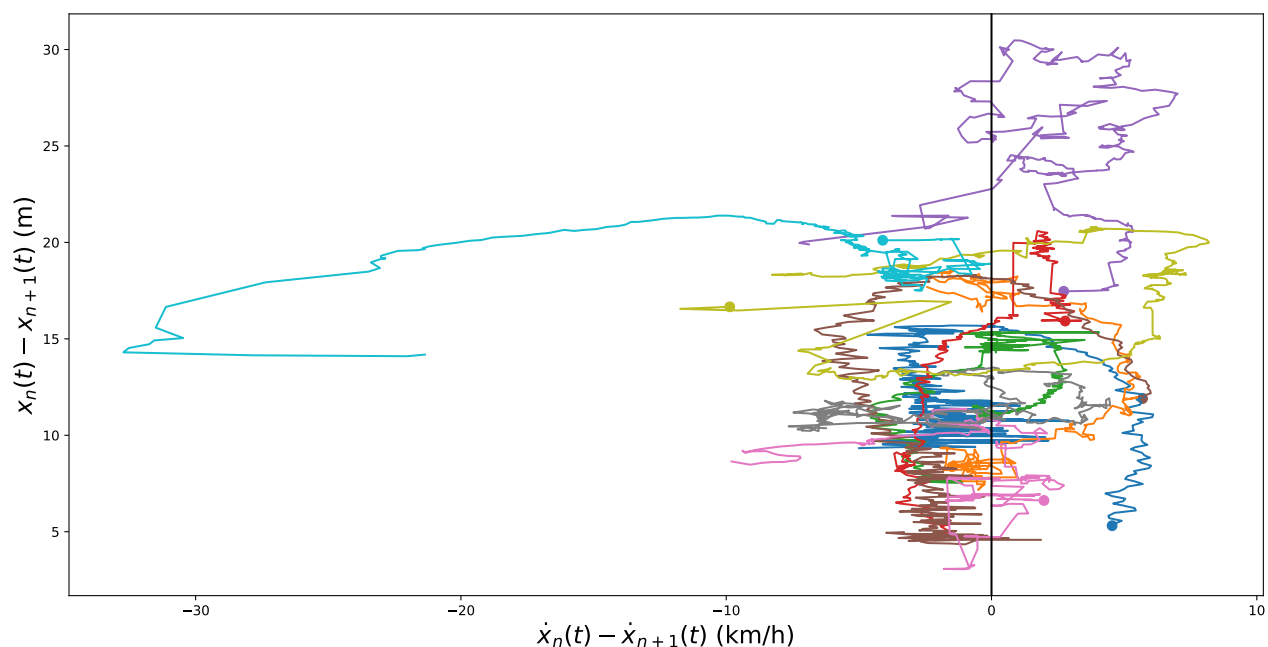


Figure 5.11 DIV et différentiel de vitesse des dix situations de suivis avec le plus de DIV impliquant une navette en tête.

présente le résultat. Ici, l'amplitude des différences de vitesse et de la DIV sont plus petites qu'avec les interactions n'impliquant pas la navette. Ceci correspond aux observations faites précédemment étant donné que la navette circule lentement et que les automobilistes la suivent de près dans des situations de suivis. Une des situations sort du lot, alors que la courbe bifurque vers la gauche. Après avoir revu manuellement l'interaction, il s'agit en fait d'une situation de dépassement. C'est la raison pour laquelle le différentiel de vitesse est négatif et que la distance diminue progressivement. Le véhicule suiveur augmente constamment sa vitesse et réduit l'écart avec la navette qui, elle, maintient une vitesse constante. L'interaction se termine quand la navette quitte le champ de vision, peu avant que l'automobiliste termine sa manœuvre.

Finalement, les situations de suivi qui impliquaient une navette suivant un automobiliste ont été isolées pour pouvoir comparer les effets d'un inversement des rôles dans les situations de suivis. La Figure 5.12 présente les dix situations de suivis avec le plus de DIV mesurés (entre 129 et 360 DIV) impliquant des situations de suivis avec des automobilistes en têtes, suivis par un VA. Pour la plupart des courbes, les mesures débutent davantage à droite sur l'axe des x. Cette observation souligne le fait que les véhicules meneurs ont tendance à avoir une vitesse plus élevée que la navette. Autre constat, pour la plupart des courbes, la distance qui sépare les deux véhicules augmente ensuite continuellement. Les courbes pour lesquelles le

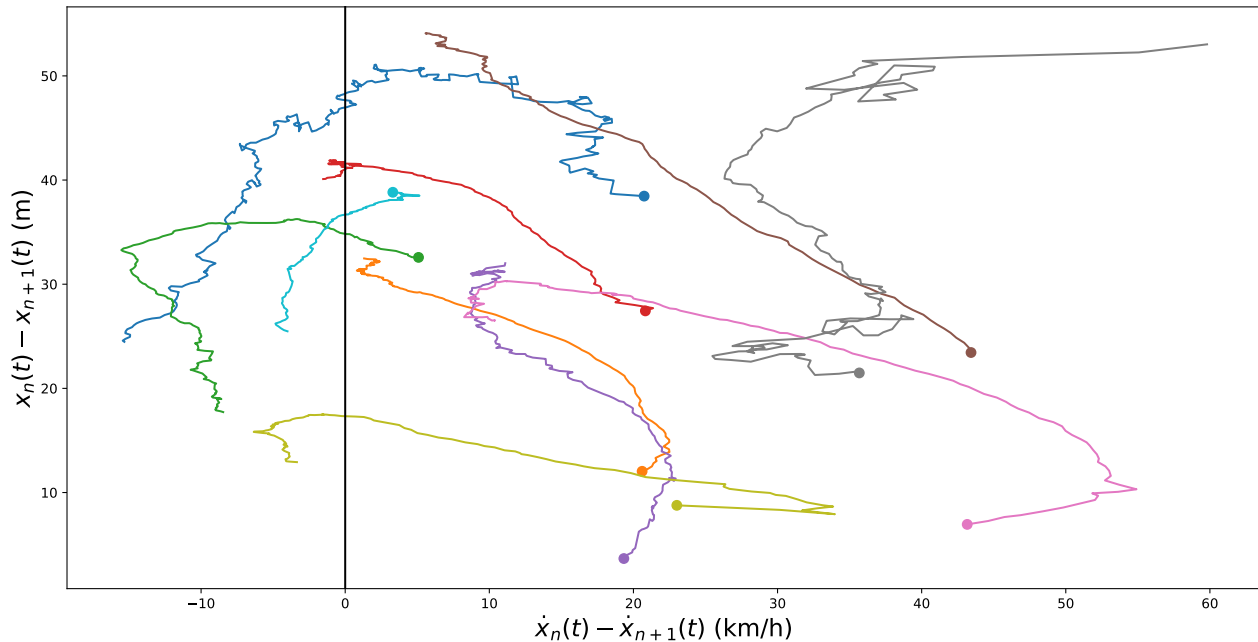


Figure 5.12 DIV et différentiel de vitesse des dix situations de suivis le plus de DIV impliquant une navette en position de suiveur.

DIV atteint un sommet puis diminue ensuite indiquent que le meneur est probablement en train de freiner ou bien à l'arrêt. La différence entre les vitesses dans ces situations avoisine le zéro. Ceci montre que les navettes ont une vitesse qui est très proche de celle du meneur. C'est effectivement le comportement attendu étant donné que les navettes circulent à de basses vitesses constantes et laissent un espace important avec les autres véhicules.

5.2.3 Diagrammes fondamentaux du trafic

Les données ont été agrégées par tranches de 6000 captures, soit 200 s. Cette agrégation a permis de moyennner la vitesse et de comptabiliser le nombre de véhicule passant dans cet intervalle de temps. À partir de ces données, le débit horaire et la densité ont été déterminés. Ces mesures ont permis de tracer les diagrammes fondamentaux pour chacun des sites. Ces figures sont disponibles à l'annexe C. Malheureusement, les données obtenues ne permettent pas de tirer des conclusions particulièrement intéressantes. Puisque les VA offrent un temps de réaction plus court, il pourraient théoriquement offrir une augmentation de la capacité [167]. En principe, ceci pourrait également être observé sur le diagramme du débit en fonction de la densité avec une augmentation du débit critique. Par contre, les résultats obtenus ne permettent pas de faire un tel constat. Effectivement, il ne semble pas y avoir de changement

frappant en termes de caractéristique pour les intervalles de temps incluant une navette. Ceci est notamment dû au fait qu'il n'y a pas de points dans les zones approchant la densité critique, avec de plus grands débits et densités, ou dans des conditions de congestion. Il faut noter que ceci est notamment dû au fait que les artères étudiées sont à proximité de carrefours. Conséquemment, il ne s'agit pas d'une circulation ininterrompue comme ce serait le cas sur une autoroute. Les observations faites se trouvent plutôt dans la catégorie de l'écoulement libre et c'est bien ce que les Figure C.1 à C.5 démontrent. Qui plus est, les navettes circulaient toujours individuellement dans leurs voies. Or, les effets sur la capacité devraient être plus importants sur les pelotons puisque les voitures automatisées offrent la possibilité d'une distance de suivi beaucoup plus courte.

5.3 Conflits observés avec la navette

Les interactions qui impliquaient une navette ont été revues manuellement pour déceler des situations conflictuelles ou tout comportement potentiellement dangereux qui n'aurait pas été identifié avec les indicateurs utilisés.

Les navettes, plus spécifiquement celles étudiées dans ce projet, semblaient être très sensibles au passage d'usagers s'approchant de trop près. À quelques occasions, des usagers ont profité de la lenteur de la navette pour traverser devant celle-ci. Or, ce genre de situation occasionne un arrêt brusque pour la navette, même pour des distances assez importantes. Cela concorde avec les résultats des données de PET qui montraient que la navette accordait beaucoup plus d'espace aux autres usagers. La Figure 5.13 présente un exemple de ce scénario très fréquent.

Bien qu'une telle réaction puisse sembler précautionneuse, elle pourrait constituer un danger pour des véhicules suivants de près derrière. Il s'agit également d'un problème qui a été observé avec l'environnement. Par exemple, le feuillage dans la ruelle empruntée par la navette d'EasyMile à l'intersection d'Ontario a parfois occasionné des arrêts et contraint l'opérateur de la navette à la conduire manuellement. D'ailleurs les capteurs utilisés ont également causé des arrêts en raison des conditions météorologiques. À Candiac, des chutes plus ou moins importantes de neige ont fréquemment engendré une annulation de l'opération de la navette. Par exemple, les quelques millimètres de neiges qui sont tombés en matinée le 19 décembre 2019 occasionnaient des arrêts abrupts et fréquents, alors que les capteurs interprétaient la neige comme un obstacle.

Bien que ces arrêts brusques soient dus principalement à une mauvaise interprétation de l'environnement et des intentions des individus dans l'environnement, certains sont plutôt causés par des usagers qui s'avèrent téméraires dans leurs interactions. C'est ce qui est qualifié

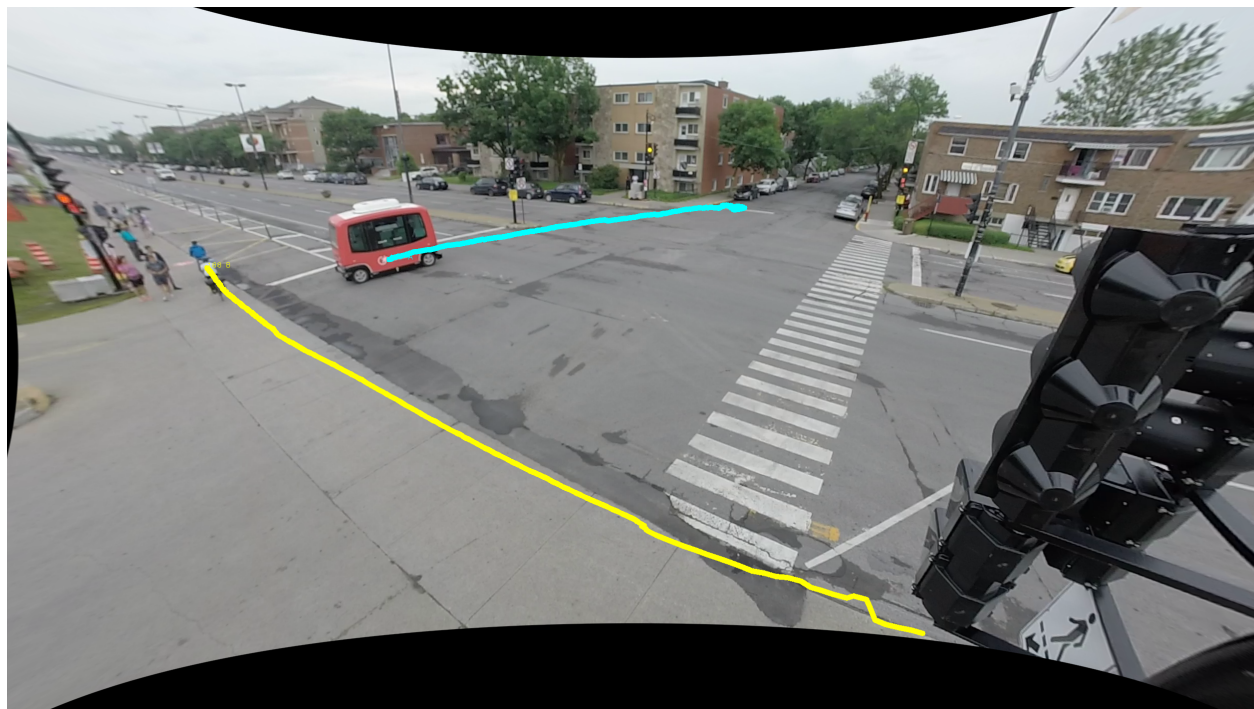


Figure 5.13 Situation où la navette est amenée à s'arrêter abruptement ($TTC_{15} = 0.9850s$ et $PET = 6.333s$) à cause d'un cycliste.

dans la littérature de “harcèlement de véhicules automatisés”. Ce phénomène très récent a d'ailleurs mené au brevetage d'un système et méthode pour détecter de tels comportements [168]. Quelques instances de ce genre de comportement ont été notées lors de la revue manuelle des enregistrements. La Figure 5.14 en présente un exemple.

5.4 Conclusion

Ce chapitre présentait des résultats additionnels qui permettent de compléter les analyses exposées dans l'article. En effet, les modèles statistiques ont été détaillés. Les variables et leur relation ont été précisées. Les modèles résultants et leur validation par une analyse de résidus ont également été présentés.

Aussi, des résultats exploratoires qui cherchaient à répondre à l'objectif secondaire de ce projet ont été présentés. En effet, les données ont été utilisées pour étudier les caractéristiques de la circulation. Bien que les conclusions tirées à partir des résultats soient limitées par la nature des données, ils demeurent intéressants.

L'analyse du diagramme DIV-différentiel de vitesse permet de voir une distinction importante



Figure 5.14 Situation dangereuse ($TTC_{15} = 0.9927s$) où un homme sur un gyropode traverse sur un feu rouge, face à une navette qui entamait le franchissement du carrefour.

entre les comportements dans des situations de suivis. Les situations de poursuite avec deux conducteurs humains avaient l'allure attendue pour ce genre de situations. Au contraire, les navettes avaient rarement besoin d'ajuster leurs vitesses et étaient très conservatrices dans leur distance de suivi. Lorsqu'elles étaient plutôt en tête, les suivis étaient plus lents et serrés, sans compter que de nombreux dépassements de la navette par des conducteurs humains ont été observés. Ces résultats, bien que leur portée soit limitée par le petit nombre d'observations, corroborent les conclusions exposées dans l'article.

Les observations manuelles ont également permis de mettre en lumière des exemples typiques de situations potentiellement dangereuses qui concordent avec les attentes des conclusions de l'article. En effet, les deux exemples présentés montrent des situations typiques où la navette s'arrête rapidement au passage d'un autre usager qui entraîne des valeurs de TTC basses et des PET élevées. Ces exemples témoignent également du manque de courtoisie et de patience des autres usagers de la route face aux navettes. Ceci avait également été relevé lors des analyses des temps intervéhiculaires.

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

La démarche pour atteindre les objectifs du projet de recherche a été explicitée aux chapitres 3 et 4. Ce chapitre présente une synthèse des résultats, ainsi qu’une analyse critique de la méthodologie et des techniques employées, à savoir si elles étaient appropriées pour atteindre ces objectifs.

En guise de rappel, l’objectif primaire du travail présenté était d’évaluer la sécurité des navettes et, plus particulièrement, la sécurité des interactions avec d’autres usagers de la route. Les sous-objectifs étaient :

- Employer une méthode de collecte de données vidéos, ainsi qu’une approche d’analyse automatisée ;
- Avoir recours aux MSS pour mener une étude proactive de l’implantation des VA ;
- Proposer des modèles statistiques pour comprendre les variables ayant un impact sur les mesures calculées.

Le projet comportait également un objectif secondaire qui consistait à étudier les caractéristiques de la circulation et les effets des VA. Les sous-objectifs étaient :

- Mettre en contraste les comportements d’usagers de la route en situation de poursuite selon la présence d’un VA, d’après les mesures de TIV et de DIV ;
- Évaluer les caractéristiques de circulation et l’effet des VA sur la circulation générale avec différents indicateurs.

Les sous-sections qui suivent présentent une synthèse de la méthodologie employée et des résultats, spécifiquement pour les sous-objectifs, les choix qui ont été faits à cet égard, ainsi que l’évaluation de ces décisions.

6.1 Évaluation de la sécurité routière

L’évaluation de la sécurité routière en présence de VA a principalement été couverte avec l’article présenté à la section 4. L’évaluation a été faite avec le logiciel à source libre “Traffic Intelligence” qui a permis entre autres d’extraire des données de trajectoires des vidéos collectées avec des techniques de traitement d’images et de mener une étude de sécurité avec des MSS. L’utilisation de cette approche pour étudier la sécurité de VA est unique en son genre, d’après la revue de l’état de l’art qui avait été faite. Effectivement, elle comporte de nombreux avantages par rapport à ce qui est actuellement populaire dans le domaine. Comme il avait été mentionné au chapitre 4.2, les essais routiers sont peu encadrés et ne présentent

pas une grande valeur en termes de mesure de la sécurité. Par exemple, l'utilisation d'une moyenne de kilomètres parcourus entre des incidents ne prend pas en compte le contexte et de la complexité dans lequel un VA a été opéré. Une autre technique généralement utilisée est la simulation. Le recours à cette technique nécessite cependant une calibration, ce qui constitue un désavantage important considérant que peu de données sur les dynamiques des VA sont actuellement disponibles. Qui plus est, il s'avère complexe de prouver qu'un système de simulation reproduit fidèlement la réalité et plus particulièrement les facteurs humains, surtout pour un contexte d'homologation de la sécurité. Finalement, l'utilisation de données historiques des collisions n'est pas appropriée pour l'évaluation de la conduite automatisée puisque peu de données à cet égard sont disponibles. L'utilisation de MSS découle donc comme un choix logique. Comme il a été expliqué à la section 2.3.3, les indicateurs de sécurité sont corrélées au nombre des collisions observées et elles sont largement utilisées dans les études de sécurité. Cette approche est intéressante puisqu'elle permet de faire une évaluation de la sécurité par des valeurs "proxy", plutôt que de devoir attendre que des collisions se produisent pour proposer des mesures correctives. Généralement, l'utilisation de ces indicateurs implique l'analyse manuelle des interactions observées sur le terrain ou le visionnement d'enregistrement. Il s'agit là d'une tâche fastidieuse. L'utilisation de techniques était donc un choix idéal puisque le traitement d'images permet d'effectuer cette analyse automatiquement. Les résultats qui ont été obtenus montraient assez clairement que les navettes à l'étude avaient des interactions plus sécuritaires que les véhicules témoins. Par contre, d'autres facteurs influencent évidemment les résultats obtenus. Les navettes circulaient notamment à des vitesses basses (moins de 20 km/h) et avaient une allure très singulière dans le trafic. Le gain en sécurité n'est peut-être pas attribuable uniquement au fait qu'il s'agissait de véhicules automatisés. De plus, comme il a été mentionné au chapitre 1, les résultats obtenus ne sont pas directement transposables pour l'ensemble des véhicule automatisé et connecté (VAC) et des différents niveaux d'automatisation. Cependant, la méthodologie employée pourrait très bien être utilisée pour l'étude d'autres types de véhicules. Il est important de comprendre aussi que dans le contexte actuel, avec l'automatisation rapide de la conduite et l'arrivée imminente de véhicules hautement automatisés, il est primordial de proposer des méthodes pour pouvoir certifier ces véhicules. La méthode employée pourrait être employée pour la certification dans le futur. Les essais routiers seront évidemment nécessaires pour homologuer les systèmes. Évidemment, il serait important de pouvoir collecter des données externes aux systèmes étudiés pour pouvoir évaluer la sécurité des interactions. L'approche proposée pourrait donc s'inscrire dans une série de tests à réaliser pour assurer sa sécurité. Aussi, l'observation des comportements dans un milieu urbain réel permet d'apporter des observations intéressantes qui n'auraient pu être faites dans un environnement contrôlé. Cela

s'avère important quand vient le temps de se questionner sur les effets d'une présence plus importante de tels véhicules. Par exemple, la recherche menée ici a permis de souligner des comportements inconsiderés de certains usagers face aux VA. En considérant un contexte où le taux de pénétration de véhicules du genre est plus important, peut-être faudra-t-il devoir faire plus de sensibilisation ou renforcer certains aspects législatifs pour décourager ce genre de comportement.

6.2 Effets sur les caractéristiques de la circulation

L'effet de VA sur les caractéristiques de la circulation a surtout été présenté à la section 5. Un des gains principaux attendus de l'arrivée des VA est la diminution du temps de réaction et, conséquemment, la diminution de la DIV. Ceci devrait théoriquement augmenter la capacité maximale des infrastructures actuelles. Étant donné que les VA ont un taux de pénétration du marché actuellement très faible, l'utilisation de simulation est particulièrement populaire. Or, cette méthode comporte des inconvénients, de la même façon qu'avec l'utilisation de logiciels de simulation pour évaluer la sécurité. Dans ce cas-ci aussi, la calibration peut poser problème pour les mêmes raisons que celles citées précédemment. Ici aussi, l'opportunité d'avoir accès à de vraies données de circulation avec des véhicules a été saisie. Les données sur les trajectoires obtenues avec le logiciel "Traffic Intelligence" ont été utilisées ici aussi, dans ce contexte un peu différent.

Évidemment, la zone d'étude était trop limitée spatialement et les infrastructures où étaient capturées des vidéos comportaient des carrefours. De plus, les conditions de circulation étaient peu variées. Pour toutes ces raisons, les données ne représentaient pas un contexte propice à l'étude des caractéristiques de la circulation. Qui plus est, il n'y avait jamais plus qu'une navette circulant sur une voie. Les effets comme le déplacement en peloton ne peuvent donc pas être observés. Les données ont donc été étudiées de façon plus exploratoire.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans le dernier chapitre, l'objectif du projet de recherche a été rappelé. Une analyse critique de la méthodologie a également été amenée pour déterminer si elle s'avérait appropriée pour l'atteinte dudit objectif. Le chapitre actuel clôture l'étude menée en présentant une synthèse du travail, les limitations de la démarche, les contributions, ainsi que les perspectives pour des travaux de recherche futurs.

7.1 Synthèse des travaux

L'objectif des travaux menés était principalement d'étudier la sécurité des interactions entre les navettes automatisées et les autres usagers de la route. Pour ce faire, des enregistrements vidéo ont été collectés dans le cadre de deux projets pilotes de navette automatisées. Les données ainsi récoltées ont été traitées avec des techniques de vision artificielle. Pour étudier le comportement des autres usagers face à une navette automatisée, les données de trajectoires ont ainsi été analysées à l'aide de cinq mesures : la vitesse moyenne, l'accélération moyenne, le 15^{ème} centile du TTC, le PET et le 85^{ème} centile du différentiel de vitesse.

Des analyses ont été menées pour faire la comparaison de ces indicateurs pour les interactions impliquant une VA et celles impliquant une voiture "témoins". D'après les résultats de vitesses et d'accélération, une différence statistique a été mesurée entre la conduite d'un automobiliste et d'une VA. En effet, les navettes ont un comportement beaucoup plus prudent et prévisible que les véhicules témoins. D'après les indicateurs de sécurité, les navettes ont également des interactions plus sécuritaires en étant impliquées dans des situations moins sévères et en offrant généralement plus d'espace aux usagers avec lesquels elle interagit. Les interactions impliquant des usagers vulnérables de la route ont également été isolées et il a été constaté que les navettes s'avéraient généralement plus sécuritaires dans ces situations aussi.

Différentes variables ont ensuite été utilisées pour élaborer un modèle statistique. Bien que les modèles n'aient pas un R^2 ajusté très grand, les résultats de la régression linéaire ont tout de même permis d'identifier les facteurs influençant ces valeurs. Étant donné que les variables choisies ont été appliquées aux différents modèles, il était également possible de comparer leur effet sur les différents indicateurs. D'abord, le modèle du PET montrait que la présence d'une navette augmentait les mesures d'environ 1,68 s pour le PET et 0,24 s pour le TTC, conformément aux résultats des distributions des indicateurs de sécurité. L'effet d'une

navette était d'ailleurs significatif sur la valeur prédite du PET et des autres indicateurs selon les types du second usager et la catégorie d'interaction.

Les données de trajectoires ont également servi à mener des analyses sur les caractéristiques de la circulation. En effet, les informations sur les trajectoires ont permis de mesurer les TIV et les DIV des usagers en situation de poursuite. À partir de celles-ci les mesures dérivées du débit, de la densité et de la vitesse moyenne ont été estimées. Ces valeurs ont ensuite permis de faire une analyse d'après le modèle psycho-espacement et des diagrammes fondamentaux. Des différences ont été notées avec les graphiques de la DIV en fonction du différentiel de vitesses selon le rôle de la navette dans les situations de suivis. D'abord les navettes sont généralement suivies de plus près et à des vitesses plus basses. Bien qu'elle semble réduire la vitesse pratiquée, elles causent généralement plus de situations de dépassements et parfois même des manœuvres agressives d'automobilistes impatientes. Leur effet sur l'apaisement de la circulation et la sécurité sous cette optique est donc discutable.

Les diagrammes fondamentaux se sont également avérés peu concluants alors que très peu de différences ont été notées notamment sur la capacité. Les intervalles de temps incluant le passage d'une navette n'engendraient pas des différences notables. Évidemment, des données dans le cadre de situations plus diversifiées auraient potentiellement permis de faire des constats. En bref, l'effet sur la circulation n'est pas aussi clair que sur les indicateurs de sécurité.

7.2 Limites de la recherche

D'abord, les projets pilotes étudiés se déroulaient sur un parcours très restreint. Par exemple, les navettes à Montréal avaient une voie réservée sur l'avenue Pierre-De Coubertin et un virage protégé par un feu de circulation. À Candiac, la navette circulait lentement sur une artère peu achalandée dans un secteur industriel. De telles conditions minimisent nécessairement les situations de conflits.

Aussi, très peu de données impliquant des usagers vulnérables ont été collectées. À Montréal, la navette circulait sur une petite rue résidentielle et la plupart des interactions avec un trafic hétérogène étaient principalement faites à l'intersection de l'avenue Letourneux et l'avenue Pierre-De Coubertin. Évidemment, encore moins d'observations du genre ont été faites à Candiac, où le trafic était principalement composé de voitures et de camions.

La zone d'étude plutôt restreinte et l'absence d'une variété de conditions de congestion ont également fait obstacle à l'évaluation de la circulation. La zone d'étude plutôt restreinte, limitée au cadre de la caméra a nécessairement fait obstacle à l'évaluation des situations de

suivi. Évidemment, la localisation des trajets n'était pas particulièrement intéressante pour mener une telle étude. Aussi, l'absence d'une variété de conditions de congestion a également été un facteur limitant.

Finalement, le système utilisé pour la détection et le suivi n'est pas sans défauts. Malgré l'optimisation des paramètres à partir de données annotées manuellement, des erreurs de segmentation des trajectoires persistent. Il s'agit d'un problème connu étant donné que l'algorithme est enclin à commettre plus d'erreurs dans des situations de trafic hétérogène. Plus spécifiquement, les camions ont tendance à être sursegmentés, c'est-à-dire que l'algorithme croit à tort qu'il s'agit de plusieurs véhicules se suivant de près. À cause de leur taille importante par rapport aux autres catégories d'utilisateurs, leur trajectoire finale est également plus élevée par rapport à la chaussée qu'une voiture. La projection des trajectoires dans l'espace "monde" avec l'homographie engendre dans ces situations des erreurs de positions.

7.3 Perspectives

Tel qu'expliqué dans l'article à la section 4, le travail présenté est unique et présente une méthode originale pour l'étude de la sécurité routière dans un contexte impliquant VA. En effet, la méthodologie exposée permet d'avoir une meilleure compréhension des interactions et des informations riches sur les causes potentielles des collisions. D'autres méthodes pourraient être employées pour la détection des véhicules automatisés. Plutôt que d'annoter les passages manuellement, une technique comme le "object re-identification" pourrait être employée pour détecter automatiquement la présence d'un véhicule automatisé à l'essai.

Il est important de noter que les résultats et les conclusions présentées dans ce mémoire ne sont pas nécessairement transposables à tous les véhicules automatisés et à tous les niveaux d'automatisation. Les navettes à l'étude sont des véhicules bien différents des véhicules de niveau d'automatisation inférieur et des véhicules hautement automatisés. Bien qu'ils soient tous considérés comme des VA, un wagon de TRP, des véhicules personnels, des pelotons de poids lourd ou les navettes étudiées sont tous largement différents à bien des égards. Leur apparence et la technologie derrière leur fonctionnement sont notamment dissemblables. Il serait donc intéressant de mener des recherches avec la méthodologie présentée, mais pour des projets impliquant ces autres types de véhicules automatisés.

RÉFÉRENCES

- [1] SAE international. (2019) Sae standards news : J3016 automated-driving graphic update. [En ligne]. Disponible : <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>
- [2] R. G. Hoogendoorn, S. P. Hoogendoorn, K. A. Brookhuis et W. Daamen, “Longitudinal driving behavior under adverse conditions : A close look at psycho-spacing models,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 20, p. 536 – 546, 2011, the State of the Art in the European Quantitative Oriented Transportation and Logistics Research – 14th Euro Working Group on Transportation & 26th Mini Euro Conference & 1st European Scientific Conference on Air Transport. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042811014406>
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] R. Szeliski, *Computer vision : algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [6] C. Chai, X. Zeng, X. Wu et X. Wang, “Safety evaluation of responsibility-sensitive safety (rss) on autonomous car-following maneuvers based on surrogate safety measurements,” dans *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. IEEE, 2019, p. 175–180.
- [7] SAE international, “Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles,” SAE international, Standard J3016, 2018. [En ligne]. Disponible : https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/
- [8] D. Schrank, B. Eisele et T. Lomax, “Tti’s 2012 urban mobility report,” *Texas A&M Transportation Institute. The Texas A&M University System*, vol. 4, 2012.
- [9] E. Verhoef, “External effects and social costs of road transport,” *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 28, n°. 4, p. 273–287, 1994.
- [10] K. Bengler, K. Dietmayer, B. Farber, M. Maurer, C. Stiller et H. Winner, “Three decades of driver assistance systems : Review and future perspectives,” *IEEE Intelligent transportation systems magazine*, vol. 6, n°. 4, p. 6–22, 2014.

- [11] Bosch. (2020) Beginnings of abs. [En ligne]. Disponible : <https://www.bosch.com/stories/beginnings-of-abs/>
- [12] T. Vaa, “Modelling driver behaviour on basis of emotions and feelings : intelligent transport systems and behavioural adaptations,” dans *Modelling driver behaviour in automotive environments*. Springer, 2007, p. 208–232.
- [13] F. Sagberg, S. Fosser et I.-A. F. Sætermo, “An investigation of behavioural adaptation to airbags and antilock brakes among taxi drivers,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 29, n^o. 3, p. 293 – 302, 1997. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457596000838>
- [14] A. Erke, “Effects of electronic stability control (esc) on accidents : A review of empirical evidence,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 40, n^o. 1, p. 167–173, 2008.
- [15] M. Aga et A. Okada, “Analysis of vehicle stability control (vsc)’s effectiveness from accident data,” *Proceedings : International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, vol. 2003, p. 7–p, 2003.
- [16] Y. Li, Z. Li, H. Wang, W. Wang et L. Xing, “Evaluating the safety impact of adaptive cruise control in traffic oscillations on freeways,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 104, p. 137–145, 2017.
- [17] J. B. Cicchino, “Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 99, p. 142–152, 2017.
- [18] M. Doyle, A. Edwards et M. Avery, “Aeb real world validation using uk motor insurance claims data,” dans *24th ESV Conference*, 2015, p. 13–0058.
- [19] L. M. Cole, *Tomorrow’s transportation : new systems for the urban future*. US Government Printing Office, 1968, vol. 62.
- [20] K. Cardew, “The automatic steering of vehicles : An experimental system fitted to a ds 19 citroen car,” *RRL report ; LR 340*, 1970.
- [21] Y. Ohshima, “Control system for automatic automobile driving,” dans *Proc. IFAC Tokyo Symposium on Systems Engineering for Control System Design, 1965*, 1965.
- [22] R. E. Fenton et R. J. Mayhan, “Automated highway studies at the ohio state university-an overview,” *IEEE transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, n^o. 1, p. 100–113, 1991.
- [23] S. E. Shladover, “Longitudinal Control of Automated Guideway Transit Vehicles Within Platoons,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 100, n^o. 4, p. 302–310, 12 1978. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1115/1.3426382>

- [24] R. J. Caudill et W. L. Garrard, “Vehicle-Follower Longitudinal Control for Automated Transit Vehicles,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 99, n^o. 4, p. 241–248, 12 1977. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1115/1.3427114>
- [25] J. Noble, “The morgantown personal rapid transit system : the impact on future prt systems.” Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 1976.
- [26] A. J. Ellison et H. Bahmanyar, “Surface-guided transport systems of the future,” *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 121, n^o. 11, p. 1224–1248, 1974.
- [27] J. P. MAURY, “The aramis prt system,” dans *SAE Technical Paper*. SAE International, 02 1974. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.4271/740143>
- [28] T. Ishii, M. Iguchi et M. Koshi, “Cvs : computer-controlled vehicle system,” dans *Reports of 3rd International PRT Conference*, 1975, p. 77–83.
- [29] M. Tomizuka, “Automated highway systems-an intelligent transportation system for the next century,” dans *ISIE '97 Proceeding of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 1, 1997, p. PS1–PS4 vol.1.
- [30] R. L. French, I. America *et al.*, “A comparison of ivhs progress in the united states, europe, and japan,” 1993.
- [31] S. E. Shladover, “Review of the state of development of advanced vehicle control systems (avcs),” *Vehicle System Dynamics*, vol. 24, n^o. 6-7, p. 551–595, 1995.
- [32] California PATH. (2017) National automated highway systems consortium. [En ligne]. Disponible : <https://path.berkeley.edu/research/connected-and-automated-vehicles/national-automated-highway-systems-consortium>
- [33] S. Tsugawa, M. Aoki, A. Hosaka et K. Seki, “A survey of present ivhs activities in japan,” *Control Engineering Practice*, vol. 5, n^o. 11, p. 1591–1597, 1997.
- [34] S. Thrun, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann *et al.*, “Stanley : The robot that won the darpa grand challenge,” *Journal of field Robotics*, vol. 23, n^o. 9, p. 661–692, 2006.
- [35] D. J. Fagnant et K. Kockelman, “Preparing a nation for autonomous vehicles : opportunities, barriers and policy recommendations,” *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 77, p. 167–181, 2015.
- [36] C. Thompson. (2016) Volvo’s first self-driving car has a big edge over the competition — and it’s coming sooner than you think. [En ligne]. Disponible : <https://www.insider.com/volvos-first-self-driving-car-is-coming-in-2020-2016-5>
- [37] Nissan Motor Corporation. (2013) Nissan announces unprecedented autonomous drive benchmarks. [En ligne]. Disponible : <https://usa.nissannews.com/en-US/releases/nissan-announces-unprecedented-autonomous-drive-benchmarks#>

- [38] A. Taeihagh et H. S. M. Lim, “Governing autonomous vehicles : emerging responses for safety, liability, privacy, cybersecurity, and industry risks,” *Transport Reviews*, vol. 39, n^o. 1, p. 103–128, 2019.
- [39] G. Silberg, R. Wallace, G. Matuszak, J. Plessers, C. Brower et D. Subramanian, “Self-driving cars : The next revolution,” *White paper, KPMG LLP & Center of Automotive Research*, vol. 9, n^o. 2, p. 132–146, 2012.
- [40] S. Shalev-Shwartz, S. Shammah et A. Shashua, “On a formal model of safe and scalable self-driving cars,” *arXiv preprint arXiv :1708.06374*, 2017.
- [41] P. Bazilinsky, M. Kyriakidis, D. Dodou et J. de Winter, “When will most cars be able to drive fully automatically? projections of 18,970 survey respondents,” *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 64, p. 184 – 195, 2019. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847818307642>
- [42] M. DeBord. (2018) Waymo has launched its commercial self-driving service in phoenix — and it’s called ‘waymo one’. [En ligne]. Disponible : <https://www.businessinsider.com/waymo-one-driverless-car-service-launches-in-phoenix-arizona-2018-12>
- [43] S. Shetty. (2020) Uber’s self-driving cars are a key to its path to profitability. [En ligne]. Disponible : <https://www.cnbc.com/2020/01/28/ubers-self-driving-cars-are-a-key-to-its-path-to-profitability.html>
- [44] E. R. Straub et K. E. Schaefer, “It takes two to tango : Automated vehicles and human beings do the dance of driving—four social considerations for policy,” *Transportation research part A : policy and practice*, vol. 122, p. 173–183, 2019.
- [45] California Department of Motor Vehicles. (2020) Autonomous vehicle testing permit holders. [En ligne]. Disponible : <https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/autonomous-vehicle-testing-permit-holders/>
- [46] N. Viridi, H. Grzybowska, S. T. Waller et V. Dixit, “A safety assessment of mixed fleets with connected and autonomous vehicles using the surrogate safety assessment module,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 131, p. 95–111, 2019.
- [47] D. Milakis, B. Van Arem et B. Van Wee, “Policy and society related implications of automated driving : A review of literature and directions for future research,” *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, n^o. 4, p. 324–348, 2017.
- [48] S. Childress, B. Nichols, B. Charlton et S. Coe, “Using an activity-based model to explore the potential impacts of automated vehicles,” *Transportation Research Record*, vol. 2493, n^o. 1, p. 99–106, 2015.

- [49] J. M. Anderson, K. Nidhi, K. D. Stanley, P. Sorensen, C. Samaras et O. A. Oluwatola, *Autonomous vehicle technology : A guide for policymakers*. Rand Corporation, 2014.
- [50] Z. Wadud, D. MacKenzie et P. Leiby, “Help or hindrance? the travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles,” *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 86, p. 1 – 18, 2016. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856415002694>
- [51] R. Burnett, H. Chen, M. Szyszkowicz, N. Fann, B. Hubbell, C. A. Pope, J. S. Apte, M. Brauer, A. Cohen, S. Weichenthal, J. Coggins, Q. Di, B. Brunekreef, J. Frostad, S. S. Lim, H. Kan, K. D. Walker, G. D. Thurston, R. B. Hayes, C. C. Lim, M. C. Turner, M. Jerrett, D. Krewski, S. M. Gapstur, W. R. Diver, B. Ostro, D. Goldberg, D. L. Crouse, R. V. Martin, P. Peters, L. Pinault, M. Tjepkema, A. van Donkelaar, P. J. Villeneuve, A. B. Miller, P. Yin, M. Zhou, L. Wang, N. A. H. Janssen, M. Marra, R. W. Atkinson, H. Tsang, T. Quoc Thach, J. B. Cannon, R. T. Allen, J. E. Hart, F. Laden, G. Cesaroni, F. Forastiere, G. Weinmayr, A. Jaensch, G. Nagel, H. Concin et J. V. Spadaro, “Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, n°. 38, p. 9592–9597, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.pnas.org/content/115/38/9592>
- [52] A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett, H. R. Anderson, J. Frostad, K. Estep, K. Balakrishnan, B. Brunekreef, L. Dandona, R. Dandona, V. Feigin, G. Freedman, B. Hubbell, A. Jobling, H. Kan, L. Knibbs, Y. Liu, R. Martin, L. Morawska, C. A. Pope, H. Shin, K. Straif, G. Shaddick, M. Thomas, R. van Dingenen, A. van Donkelaar, T. Vos, C. J. L. Murray et M. H. Forouzanfar, “Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution : an analysis of data from the global burden of diseases study 2015,” *The Lancet*, vol. 389, n°. 10082, p. 1907 – 1918, 2017. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673617305056>
- [53] A. Brown, J. Gonder et B. Repac, *An Analysis of Possible Energy Impacts of Automated Vehicles*. Cham : Springer International Publishing, 2014, p. 137–153. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1007/978-3-319-05990-7_13
- [54] K. Ahn, H. A. Rakha et S. Park, “Ecodrivre application : Algorithmic development and preliminary testing,” *Transportation Research Record*, vol. 2341, n°. 1, p. 1–11, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.3141/2341-01>
- [55] P. Schito et F. braghin, “Numerical and experimental investigation on vehicles in platoon,” *SAE Int. J. Commer. Veh.*, vol. 5, p. 63–71, 04 2012. [En ligne]. Disponible :

<https://doi.org/10.4271/2012-01-0175>

- [56] R. Kunze, R. Ramakers, K. Henning et S. Jeschke, “Organization and operation of electronically coupled truck platoons on german motorways,” dans *Intelligent Robotics and Applications*, M. Xie, Y. Xiong, C. Xiong, H. Liu et Z. Hu, édit. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009, p. 135–146.
- [57] S. Tsugawa, “An overview on an automated truck platoon within the energy its project,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, n^o. 21, p. 41 – 46, 2013, 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016383409>
- [58] D. Stead et B. Vaddadi, “Automated vehicles and how they may affect urban form : A review of recent scenario studies,” *Cities*, vol. 92, p. 125 – 133, 2019. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275118313945>
- [59] D. Milakis, M. Kroesen et B. van Wee, “Implications of automated vehicles for accessibility and location choices : Evidence from an expert-based experiment,” *Journal of Transport Geography*, vol. 68, p. 142 – 148, 2018. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692317308098>
- [60] B. W. Smith, “Managing autonomous transportation demand,” *Santa Clara L. Rev.*, vol. 52, p. 1401, 2012.
- [61] L. A. Greening, D. L. Greene et C. Difiglio, “Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey,” *Energy Policy*, vol. 28, n^o. 6, p. 389 – 401, 2000. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421500000215>
- [62] L. T. Truong, C. De Gruyter, G. Currie et A. Delbosc, “Estimating the trip generation impacts of autonomous vehicles on car travel in victoria, australia,” *Transportation*, vol. 44, n^o. 6, p. 1279–1292, 2017.
- [63] J.-F. Bonnefon, A. Shariff et I. Rahwan, “The social dilemma of autonomous vehicles,” *Science*, vol. 352, n^o. 6293, p. 1573–1576, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://science.sciencemag.org/content/352/6293/1573>
- [64] R. Hoogendoorn, B. van Arerm et S. Hoogendoorn, “Automated driving, traffic flow efficiency, and human factors : Literature review,” *Transportation Research Record*, vol. 2422, n^o. 1, p. 113–120, 2014.
- [65] M. A. S. Kamal, J.-i. Imura, T. Hayakawa, A. Ohata et K. Aihara, “A vehicle-intersection coordination scheme for smooth flows of traffic without using traffic lights,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, n^o. 3, p. 1136–1147, 2014.

- [66] S. E. Shladover, D. Su et X.-Y. Lu, “Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow,” *Transportation Research Record*, vol. 2324, n^o. 1, p. 63–70, 2012.
- [67] P. Tientrakool, Y. Ho et N. F. Maxemchuk, “Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance,” dans *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2011, p. 1–5.
- [68] K. Dresner et P. Stone, “A multiagent approach to autonomous intersection management,” *Journal of artificial intelligence research*, vol. 31, p. 591–656, 2008.
- [69] A. Talebpour et H. S. Mahmassani, “Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 71, p. 143–163, 2016.
- [70] P. B. Goodwin, “Empirical evidence on induced traffic,” *Transportation*, vol. 23, n^o. 1, p. 35–54, 1996. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1007/BF00166218>
- [71] A. Downs, “The law of peak-hour expressway congestion,” *Traffic quarterly*, vol. 16, n^o. 3, p. 393–409, 1962.
- [72] World Health Organization, *Global status report on road safety 2018*. World Health Organization, 2018.
- [73] S. Singh, “Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey,” Rapport technique, 2015.
- [74] Transports Canada, “Canada’s safety framework for automated and connected vehicles,” Transports Canada, Rapport technique, 2019, retrieved from https://www.tc.gc.ca/en/services/road/documents/tc_safety_framework_for_acv-s.pdf. [En ligne]. Disponible : https://www.tc.gc.ca/en/services/road/documents/tc_safety_framework_for_acv-s.pdf
- [75] C. Systematics et M. Meyer, “Crashes vs. congestion : What’s the cost to society,” *Prepared for the American Automobile Association*, 2011.
- [76] I. W. Parry, M. Walls et W. Harrington, “Automobile externalities and policies,” *Journal of economic literature*, vol. 45, n^o. 2, p. 373–399, 2007.
- [77] X. Zhao, V. Robu, D. Flynn, K. Salako et L. Strigini, “Assessing the safety and reliability of autonomous vehicles from road testing,” dans *2019 IEEE 30th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE)*, Oct 2019, p. 13–23.
- [78] F. Favarò, S. Eurich et N. Nader, “Autonomous vehicles’ disengagements : Trends, triggers, and regulatory limitations,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 110, p. 136–148, 2018.

- [79] S. S. Banerjee, S. Jha, J. Cyriac, Z. T. Kalbarczyk et R. K. Iyer, “Hands off the wheel in autonomous vehicles? a systems perspective on over a million miles of field data,” dans *2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)*. IEEE, 2018, p. 586–597.
- [80] F. M. Favarò, N. Nader, S. O. Eurich, M. Tripp et N. Varadaraju, “Examining accident reports involving autonomous vehicles in california,” *PLoS one*, vol. 12, n^o. 9, p. e0184952, 2017.
- [81] V. V. Dixit, S. Chand et D. J. Nair, “Autonomous vehicles : disengagements, accidents and reaction times,” *PLoS one*, vol. 11, n^o. 12, p. e0168054, 2016.
- [82] A. Sinha, S. Chand, K. P. Wijayarathna, N. Viridi et V. Dixit, “Crash severity and rate evaluation of conventional vehicles in mixed fleets with connected and automated vehicles,” *Procedia Computer Science*, vol. 170, p. 688–695, 2020.
- [83] M. S. Rahman, M. Abdel-Aty, J. Lee et M. H. Rahman, “Safety benefits of arterials’ crash risk under connected and automated vehicles,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 100, p. 354–371, 2019.
- [84] M. M. Morando, Q. Tian, L. T. Truong et H. L. Vu, “Studying the safety impact of autonomous vehicles using simulation-based surrogate safety measures,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, 2018.
- [85] California Department of Motor Vehicles. (2020) Disengagement reports. [En ligne]. Disponible : <https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/disengagement-reports/>
- [86] ——. (2020) Autonomous vehicle collision reports. [En ligne]. Disponible : <https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/autonomous-vehicle-collision-reports/>
- [87] A. Papadoulis, M. Quddus et M. Imprialou, “Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 124, p. 12–22, 2019.
- [88] M. S. Rahman et M. Abdel-Aty, “Longitudinal safety evaluation of connected vehicles’ platooning on expressways,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 117, p. 381–391, 2018.
- [89] L. Petersen, L. Robert, J. Yang et D. Tilbury, “Situational awareness, driver’s trust in automated driving systems and secondary task performance,” *SAE International Journal of Connected and Autonomous Vehicles, Forthcoming*, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://ssrn.com/abstract=3345543orhttp://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3345543>

- [90] N. Stanton, P. Chambers et J. Piggott, “Situational awareness and safety,” *Safety Science*, vol. 39, n°. 3, p. 189 – 204, 2001. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753501000108>
- [91] X. Li, S. C. Calvert, W. J. Schakel et J. W. C. van Lint, “Will automated vehicles negatively impact traffic flow?” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, p. 3082781, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1155/2017/3082781>
- [92] A. Kesting, M. Treiber, M. Schönhof et D. Helbing, “Adaptive cruise control design for active congestion avoidance,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 16, n°. 6, p. 668 – 683, 2008. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X08000028>
- [93] P. A. Ioannou et C. C. Chien, “Autonomous intelligent cruise control,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, n°. 4, p. 657–672, 1993.
- [94] L. Ye et T. Yamamoto, “Impact of dedicated lanes for connected and autonomous vehicle on traffic flow throughput,” *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 512, p. 588 – 597, 2018. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437118310252>
- [95] J. Zhou et F. Zhu, “Modeling the fundamental diagram of mixed human-driven and connected automated vehicles,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 115, p. 102614, 2020. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X19313543>
- [96] M. Amirgholy, M. Shahabi et H. Oliver Gao, “Traffic automation and lane management for communicant, autonomous, and human-driven vehicles,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 111, p. 477 – 495, 2020. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X18315791>
- [97] S. He, X. Guo, F. Ding, Y. Qi et T. Chen, “Freeway traffic speed estimation of mixed traffic using data from connected and autonomous vehicles with a low penetration rate,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2020, 2020.
- [98] W.-X. Zhu et H. Zhang, “Analysis of mixed traffic flow with human-driving and autonomous cars based on car-following model,” *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 496, p. 274 – 285, 2018. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437117313523>
- [99] M. Brackstone et M. McDonald, “Car-following : a historical review,” *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 2, n°. 4, p. 181 – 196, 1999. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136984780000005X>

- [100] E. Polders et T. Brijs, *How to analyse accident causation? A handbook with focus on vulnerable road users*. Hasselt University, 2018.
- [101] T. W. Forbes, "Analysis of "near accident" reports," *Highway Research Board Bulletin*, vol. 152, p. 23–37, 1957.
- [102] A. Laureshyn, C. Johnsson, 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—scoping review : surrogate measures of safety in site-based road traffic observations : Deliverable 2.1—part 4." 2016.
- [103] S. R. Perkins et J. L. Harris, "Traffic conflict characteristics—accident potential at intersections," *Highway Research Record*, n°. 225, 1968.
- [104] 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, n°. 1, p. 42–51, 2013.
- [105] D. Lord, "Analysis of pedestrian conflicts with left-turning traffic," *Transportation Research Record*, vol. 1538, n°. 1, p. 61–67, 1996. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1177/0361198196153800108>
- [106] P. Cooper, "Experience with traffic conflicts in canada with emphasis on "post encroachment time" techniques," dans *International calibration study of traffic conflict techniques*. Springer, 1984, p. 75–96.
- [107] W. T. Baker, "An evaluation of the traffic conflicts technique," *Highway Research Record*, n°. 384, 1972.
- [108] J. C. Hayward, "Near miss determination through use of a scale of danger." Pennsylvania State University University Park, 1972.
- [109] A. Varhelyi, "Drivers' speed behaviour at a zebra crossing : a case study," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 30, n°. 6, p. 731–743, 1998.
- [110] W. van Winsum, K. A. Brookhuis et D. de Waard, "A comparison of different ways to approximate time-to-line crossing (tlc) during car driving," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 32, n°. 1, p. 47–56, 2000.
- [111] M. M. Minderhoud et P. H. Bovy, "Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 33, n°. 1, p. 89–97, 2001.
- [112] B. L. Allen, B. T. Shin et P. J. Cooper, "Analysis of traffic conflicts and collisions," Rapport technique, 1978.
- [113] A. Hansson, *Studies in Driver Behaviour with Applications in Traffic Design and Planning*, 1975.

- [114] M. G. Mohamed et N. Saunier, “Motion prediction methods for surrogate safety analysis,” *Transportation Research Record*, vol. 2386, n^o. 1, p. 168–178, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.3141/2386-19>
- [115] L. A. Klein, M. K. Mills, D. R. Gibson *et al.*, “Traffic detector handbook : Volume i,” Turner-Fairbank Highway Research Center, Rapport technique, 2006.
- [116] 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.
- [117] D. Forsyth, O. Arikan, L. Ikemoto, J. O’Brien et D. Ramanan, “Computational studies of human motion : Part 1, tracking and motion synthesis,” *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, vol. 1, 01 2005.
- [118] Y. Malinovskiy, J. Zheng et Y. Wang, “A simple and model-free algorithm for real-time pedestrian detection and tracking,” dans *86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*, 2007.
- [119] S. Atev, H. Arumugam, O. Masoud, R. Janardan et N. P. Papanikolopoulos, “A vision-based approach to collision prediction at traffic intersections,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 6, n^o. 4, p. 416–423, 2005.
- [120] S. Messelodi et C. M. Modena, “A computer vision system for traffic accident risk measurement : A case study,” 2005.
- [121] B. Maurin, O. Masoud et N. P. Papanikolopoulos, “Tracking all traffic : computer vision algorithms for monitoring vehicles, individuals, and crowds,” *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 12, n^o. 1, p. 29–36, 2005.
- [122] N. Saunier et T. Sayed, “Automated road safety analysis using video data,” *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2019, n^o. 57-64, p. 9–10, 2007.
- [123] P. Kilambi, E. Ribnick, A. J. Joshi, O. Masoud et N. Papanikolopoulos, “Estimating pedestrian counts in groups,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 110, n^o. 1, p. 43–59, 2008.
- [124] K. Ismail, T. Sayed et N. Saunier, “Automated analysis of pedestrian–vehicle conflicts : Context for before-and-after studies,” *Transportation research record*, vol. 2198, n^o. 1, p. 52–64, 2010.
- [125] OpenCV. (2020) Camera calibration and 3d reconstruction. [En ligne]. Disponible : https://docs.opencv.org/4.4.0/d9/d0c/group__calib3d.html

- [126] N. Saunier et P. St-Aubin. (2020) Camera matrices and distortion coefficients. [En ligne]. Disponible : https://www.polymtl.ca/wikitransport/index.php?title=Equipment#Camera_Matrices_and_Distortion_Coefficients
- [127] 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^o. 1, p. 90–98, 2013.
- [128] C. Tomasi et T. Kanade, “Detection and tracking of point features,” 1991.
- [129] OpenCV. (2020) Harris corner detection. [En ligne]. Disponible : https://docs.opencv.org/3.4/dc/d0d/tutorial_py_features_harris.html
- [130] ——. (2020) Good features to track. [En ligne]. Disponible : https://docs.opencv.org/master/dd/d1a/group__imgproc__feature.html#ga1d6bb77486c8f92d79c8793ad995d541
- [131] K. Bernardin et R. Stiefelhagen, “Evaluating multiple object tracking performance : the clear mot metrics,” *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 2008, p. 1–10, 2008.
- [132] M. Abramson, C. Audet, G. Couture, J. Dennis, Jr., S. Le Digabel et C. Tribes, “The NOMAD project,” 2011. [En ligne]. Disponible : <https://www.gerad.ca/nomad/>
- [133] S. Le Digabel, “Algorithm 909 : NOMAD : Nonlinear optimization with the MADS algorithm,” *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 37, n^o. 4, p. 1–15, 2011.
- [134] C. Audet et J. E. Dennis Jr, “Mesh adaptive direct search algorithms for constrained optimization,” *SIAM Journal on optimization*, vol. 17, n^o. 1, p. 188–217, 2006.
- [135] C. Audet et W. Hare, “Derivative-free and blackbox optimization,” 2017.
- [136] Transport Canada, “National Collision Database (motor vehicles),” 2018.
- [137] P. Godsmark, B. Kirk, V. Gill et B. Flemming, “Automated vehicles : The coming of the next disruptive technology,” 2015.
- [138] C. Johnsson, A. Lareshyn et T. De Ceunynck, “In search of surrogate safety indicators for vulnerable road users : a review of surrogate safety indicators,” *Transport reviews*, vol. 38, n^o. 6, p. 765–785, 2018.
- [139] E. Polders et T. Brijs, édit., *How to analyse accident causation? A handbook with focus on vulnerable road users*. Hasselt University, 2018. [En ligne]. Disponible : https://www.bast.de/BASSt_2017/EN/Traffic_Safety/Subjects/InDeV/Handbook/Handbook_node.html
- [140] *Road Safety Manual*, 3^e éd., World Road Association (PIARC), oct. 2019. [En ligne]. Disponible : <https://roadsafety.piarc.org/>

- [141] P. St-Aubin, L. Miranda-Moreno et N. Saunier, “An automated surrogate safety analysis at protected highway ramps using cross-sectional and before–after video data,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 36, p. 284–295, 2013.
- [142] A. Tarko, *Measuring Road Safety with Surrogate Events*. Elsevier, 2019.
- [143] A. Svensson, “A method for analyzing the traffic process in a safety perspective,” Thèse de doctorat, University of Lund, 1998, bulletin 166. [En ligne]. Disponible : <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=18638&fileId=1653512>
- [144] J. Stipanovic, L. Miranda-Moreno, J. Strauss et A. Labbe, “Pedestrian safety at signalized intersections : Modelling spatial effects of exposure, geometry and signalization on a large urban network,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 134, p. 105265, 2020.
- [145] P. Songchitruksa et A. P. Tarko, “The extreme value theory approach to safety estimation,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 38, n°. 4, p. 811–822, 2006.
- [146] T. S. Emanuele Sacchi 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://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457513002303>
- [147] K. El-Basyouny et T. Sayed, “Safety performance functions using traffic conflicts,” *Safety Science*, vol. 51, n°. 1, p. 160 – 164, 2013. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753512001671>
- [148] E. Sacchi et T. Sayed, “Conflict-based safety performance functions for predicting traffic collisions by type,” *Transportation Research Record*, vol. 2583, n°. 1, p. 50–55, 2016.
- [149] T. Luettel, M. Himmelsbach et H.-J. Wuensche, “Autonomous ground vehicles—concepts and a path to the future,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, n°. Special Centennial Issue, p. 1831–1839, 2012.
- [150] P. Koopman et M. Wagner, “Autonomous vehicle safety : An interdisciplinary challenge,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 9, n°. 1, p. 90–96, 2017.
- [151] Department of Motor Vehicles, “Autonomous Vehicles Testing With A Driver,” <https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/testing-autonomous-vehicles-with-a-driver/>, 2020.
- [152] Transport Canada, “Testing Highly Automated Vehicles in Canada,” https://www.tc.gc.ca/en/services/road/safety-standards-vehicles-tires-child-car-seats/testing-highly-automated-vehicles-canada.html#_TOC_250004, 2018.
- [153] Gouvernement du Québec, “Highway Safety Code,” <http://legisquebec.gouv.qc.ca/en/ShowDoc/cs/C-24.2>, 2018.

- [154] Tesla, “Tesla Vehicle Safety Report,” https://www.tesla.com/fr_CA/VehicleSafetyReport?redirect=no, 2020.
- [155] K. Rehrl et C. Zankl, “Digibus© : results from the first self-driving shuttle trial on a public road in austria,” *European Transport Research Review*, vol. 10, n° 2, p. 51, 2018.
- [156] D. Ettehadieh, B. Farooq et N. Saunier, “Systematic parameter optimization and application of automated tracking in pedestrian-dominant situations,” dans *Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*. Citeseer, 2015, p. 15–2400.
- [157] 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.
- [158] P. Morse, P. St-Aubin, L. Miranda-Moreno et N. Saunier, “Transferability study of video tracking optimization for traffic data collection and analysis,” dans *Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, 2016, p. 16–6810.
- [159] M. G. Mohamed et N. Saunier, “Behavior analysis using a multilevel motion pattern learning framework,” *Transportation Research Record*, vol. 2528, n° 1, p. 116–127, 2015.
- [160] M. S. N. 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.
- [161] N. Saunier, T. Sayed et C. Lim, “Probabilistic collision prediction for vision-based automated road safety analysis,” dans *2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. IEEE, 2007, p. 872–878.
- [162] A. Laureshyn, T. De Ceunynck, C. Karlsson, Åse Svensson et S. Daniels, “In search of the severity dimension of traffic events : Extended delta-v as a traffic conflict indicator,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 98, p. 46 – 56, 2017. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457516303566>
- [163] P. St-Aubin, N. Saunier et L. F. Miranda-Moreno, “Comparison of various objectively defined surrogate safety analysis methods,” dans *Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, Washington, D.C., 2015, 15-4629.
- [164] T. Litman, “Autonomous vehicle implementation predictions : Implications for transport planning,” 2020.
- [165] H. Cramir, “Mathematical methods of statistics,” *Princeton U. Press, Princeton*, vol. 500, 1946.

- [166] X. Wang, A. J. Khattak, J. Liu, G. Masghati-Amoli et S. Son, “What is the level of volatility in instantaneous driving decisions?” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 58, p. 413–427, 2015.
- [167] M. W. Levin et S. D. Boyles, “A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 62, p. 103 – 116, 2016. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X1500354X>
- [168] M. J. Lawrenson, J. C. Nolan, N. Kobayashi, N. Fukuda et K. Nishihara, “System and method for detecting bullying of autonomous vehicles while driving,” janv. 10 2019, uS Patent App. 16/023,805.

ANNEXE A MODÈLES STATISTIQUES

Tableau A.1 Modèles de régression sans les interactions de sites (valeurs $p < 0.05$ en gras).

	TTC_{15}			$\log(PET)$			Δv_{85}		
	Coef.	Std. err.	p-value	Coef.	Std. err.	p-value	Coef.	Std. err.	p-value
(Intercept)	2.5392	0.174	0.000	1.2526	0.185	0.000	5.1546	1.470	0.000
User type									
AV	0.2281	0.270	0.399	0.5893	0.238	0.013	-2.5175	2.294	0.273
Second user type (Ref. cyclist)									
car	0.2652	0.175	0.130	-0.1221	0.181	0.500	2.3731	1.492	0.112
pedestrian	0.4046	0.184	0.028	0.5782	0.225	0.010	3.4834	1.576	0.027
AV * car	-0.1426	0.268	0.594	0.0731	0.237	0.758	-0.1074	2.272	0.962
AV * pedestrian	-0.0461	0.287	0.873	-0.4189	0.288	0.147	-6.1242	2.443	0.012
Interaction category (Ref. rear-end)									
side	-0.3958	0.071	0.000	0.5139	0.063	0.000	11.1462	0.613	0.000
leaving	-0.4104	0.128	0.001	0.6931	0.149	0.000	9.1584	0.963	0.000
AV * side	0.2890	0.111	0.009	-0.1945	0.096	0.043	-5.3698	0.946	0.000
AV * leaving	0.6987	0.191	0.000	-0.4010	0.195	0.040	-1.1597	1.410	0.411
Site (Ref. letourneux-coubertin)									
letourneux-hochelaga	-0.6025	0.071	0.000	-0.1647	0.066	0.013	1.0721	0.640	0.094
letourneux-ontario	0.2706	0.108	0.012	0.0382	0.088	0.664	-0.7105	0.894	0.427
montcalm-chartwell	0.2594	0.096	0.007	0.0184	0.070	0.794	2.3333	0.859	0.007
montcalm-inverness	-0.5582	0.088	0.000	-0.1792	0.060	0.003	3.0162	0.680	0.000
montcalm-victorin	0.0069	0.104	0.947	-0.1507	0.112	0.179	4.5542	0.857	0.000
montcalm-rail	0.0677	0.121	0.575	-0.1308	0.086	0.129	4.0883	1.005	0.000
Second user min. speed									
v_{15}^2	-	-	-	-	-	-	0.5071	0.024	0.000
Second user acceleration									
a_{15}^2	0.0307	0.010	0.001	0.0065	0.008	0.442	-	-	-
a_{85}^2	-0.0359	0.008	0.000	-0.0206	0.008	0.011	-	-	-
	$n : 2281, \text{Adj. } R_{adj}^2 : 0.105$			$n : 1442, \text{Adj. } R_{adj}^2 : 0.254$			$n : 3109, \text{Adj. } R_{adj}^2 : 0.277$		

ANNEXE B DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES STATISTIQUES

Modèle du TTC final

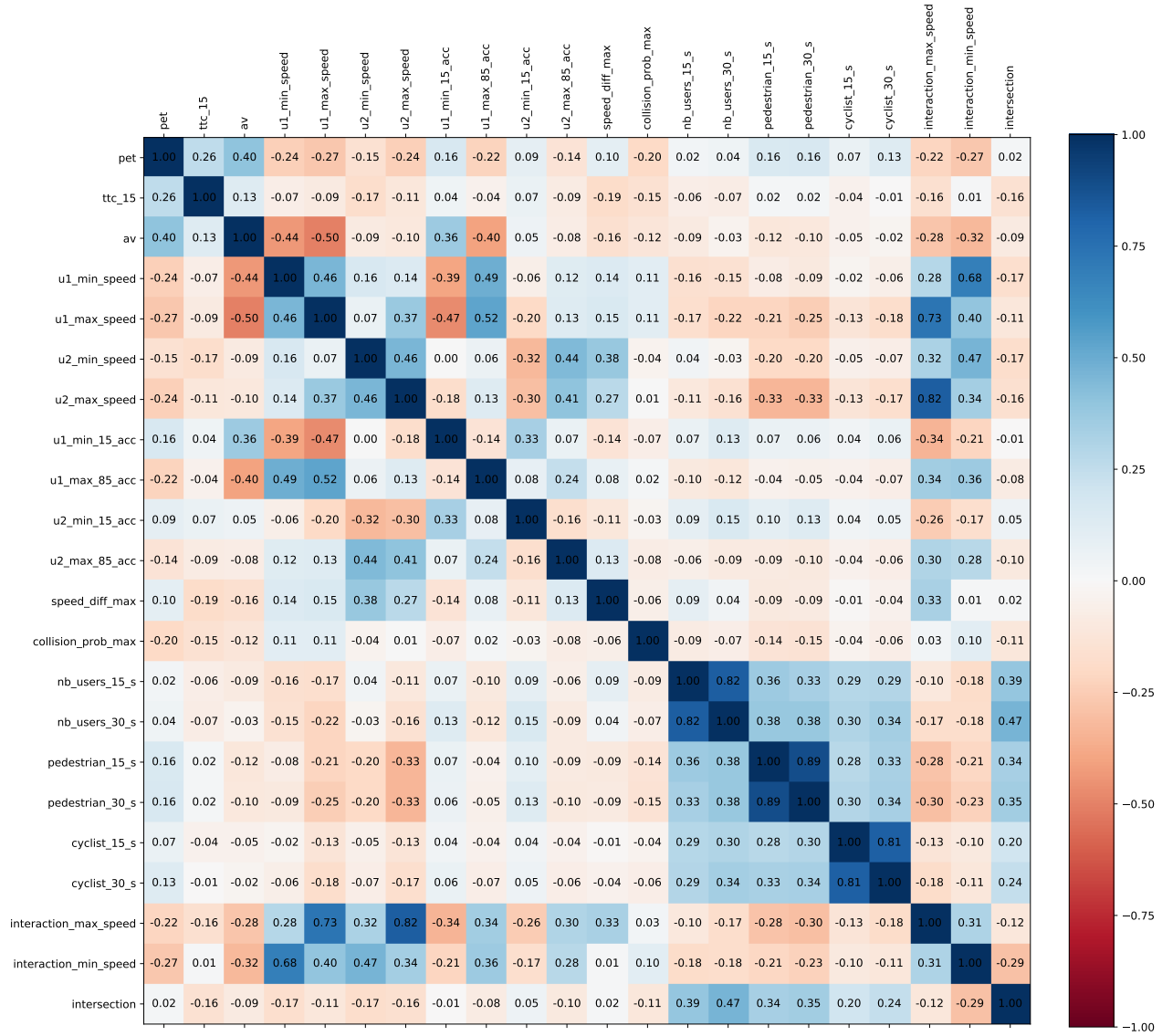


Figure B.1 Matrice des coefficients de corrélation de Pearson des variables continues du modèle de TTC final.

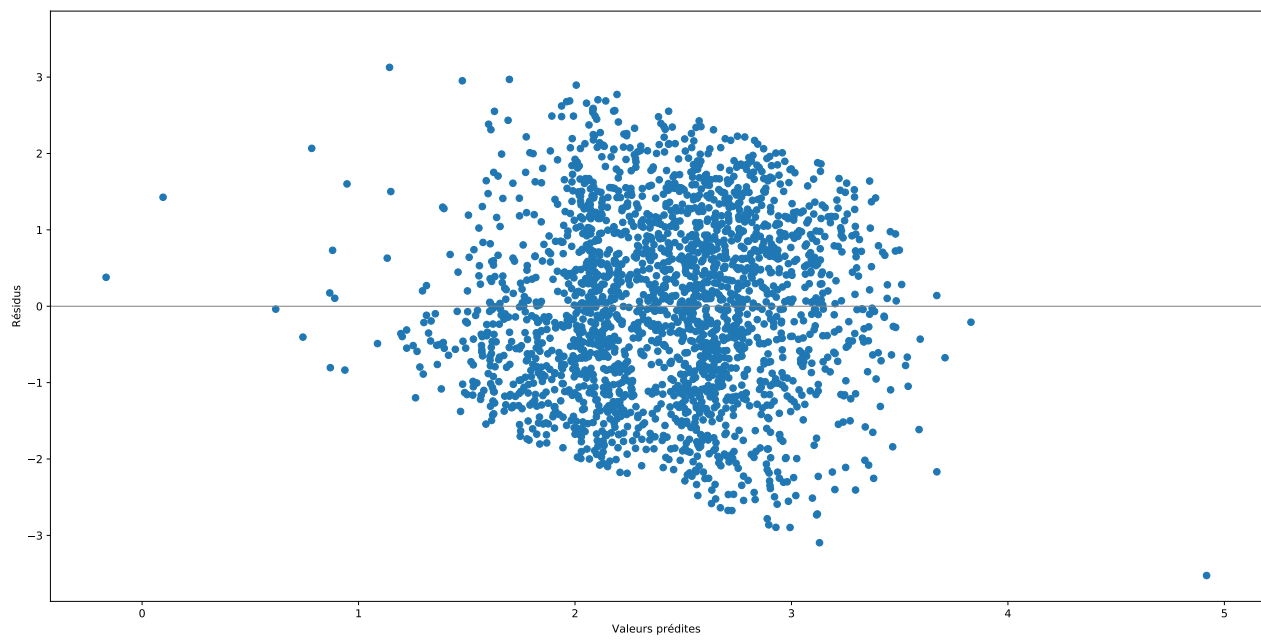


Figure B.2 Résidus du modèle de TTC final.

Modèle du PET final

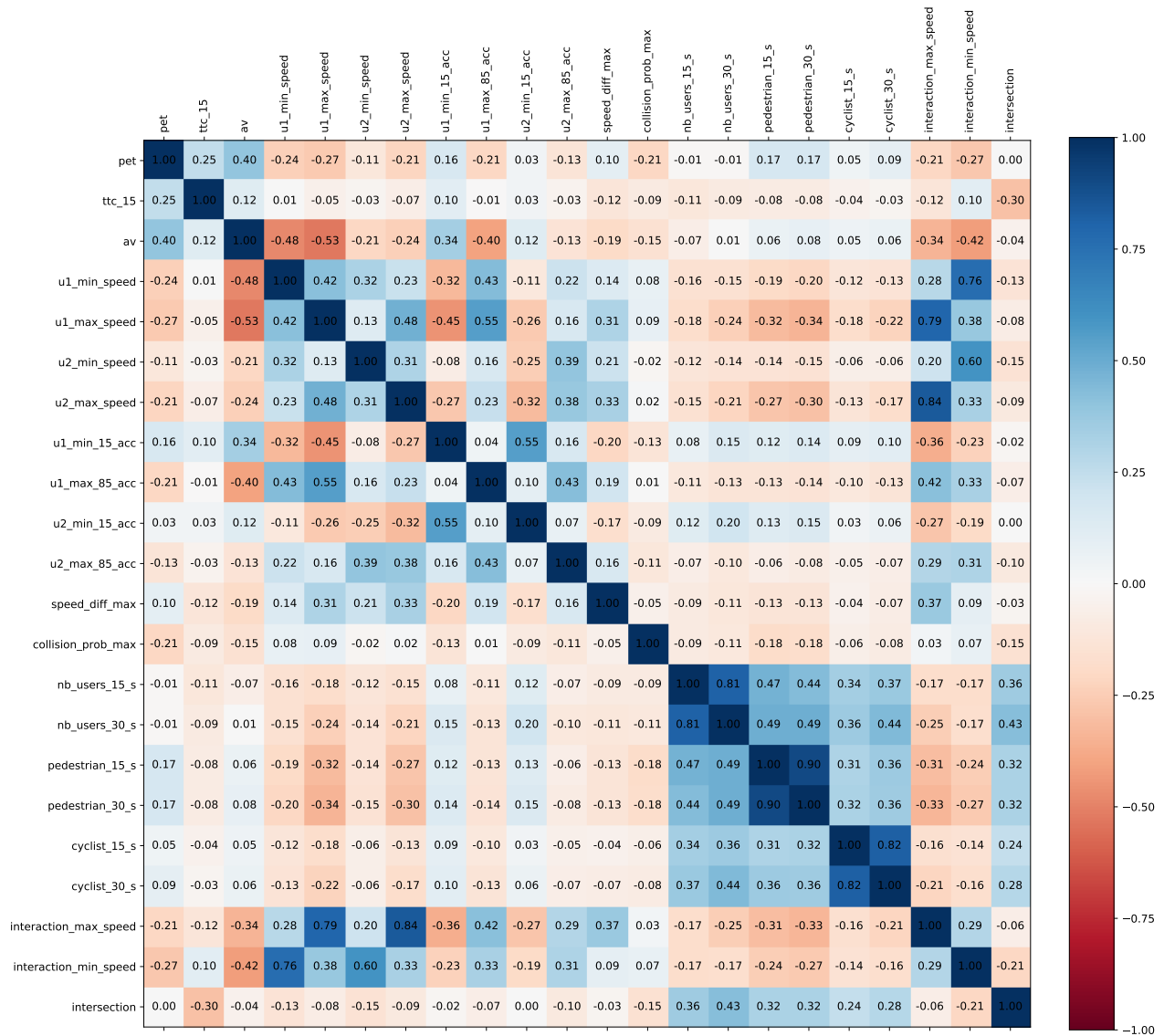


Figure B.3 Matrice des coefficients de corrélation de Pearson des variables continues du modèle de PET final.

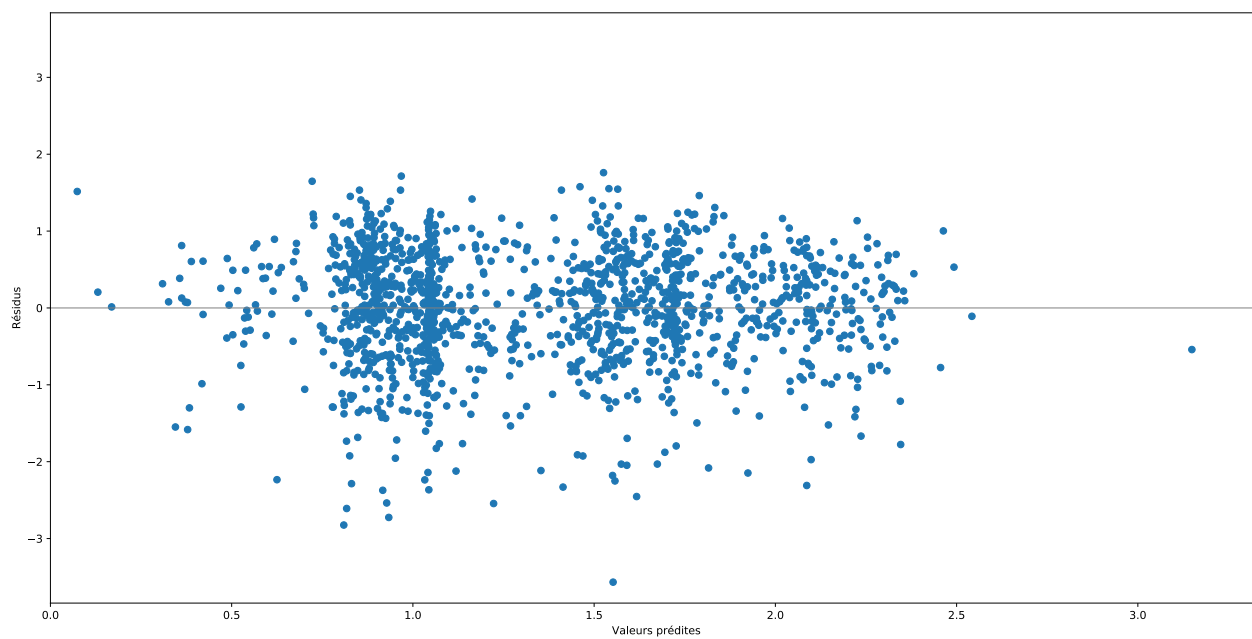


Figure B.4 Résidus du modèle de PET final.

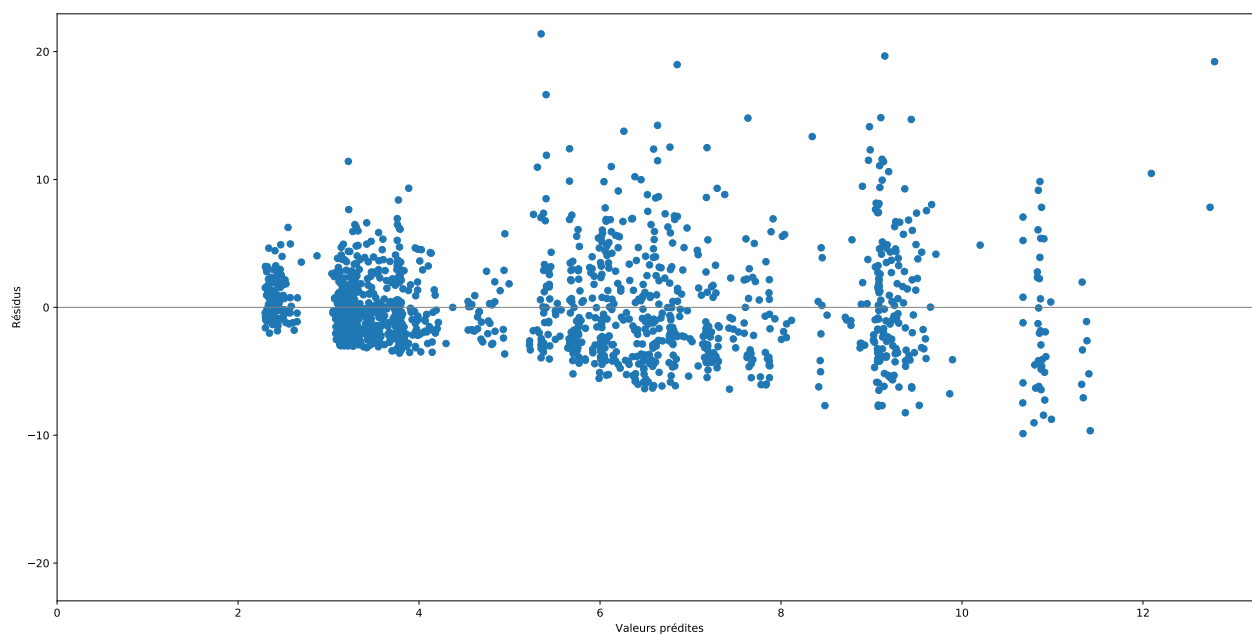


Figure B.5 Résidus du modèle de PET sans log.

Modèle du différentiel de vitesse maximum

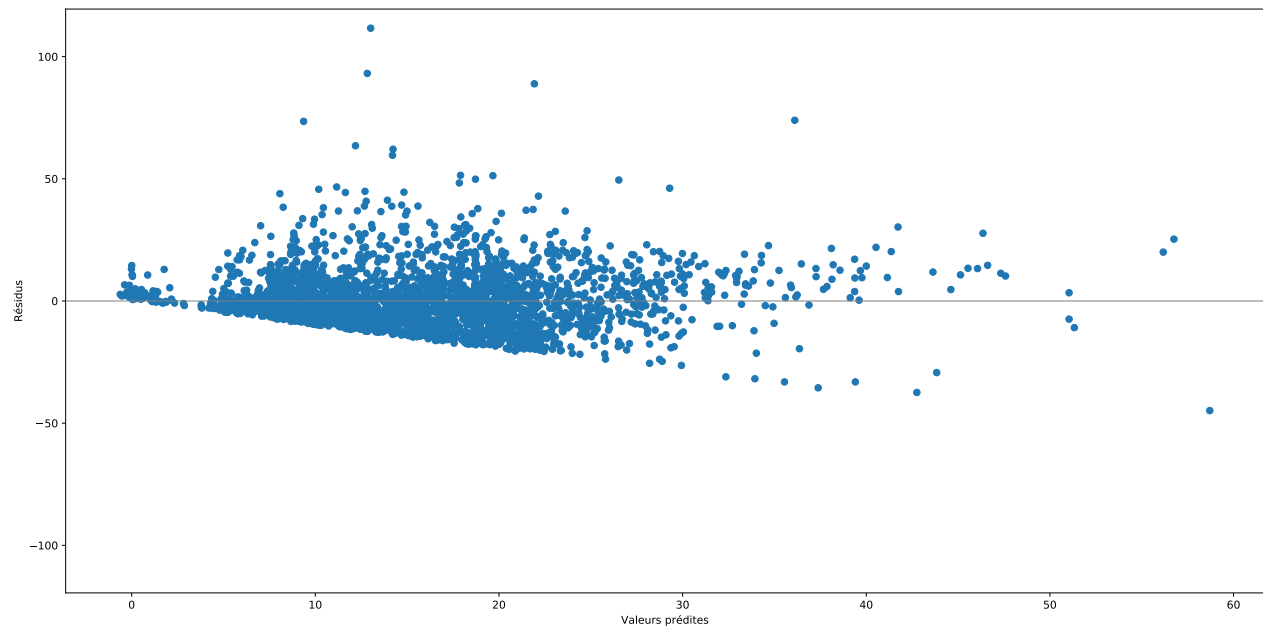


Figure B.6 Résidus du modèle de différentiel de vitesse maximum final.

Modèle du TIV₁₅

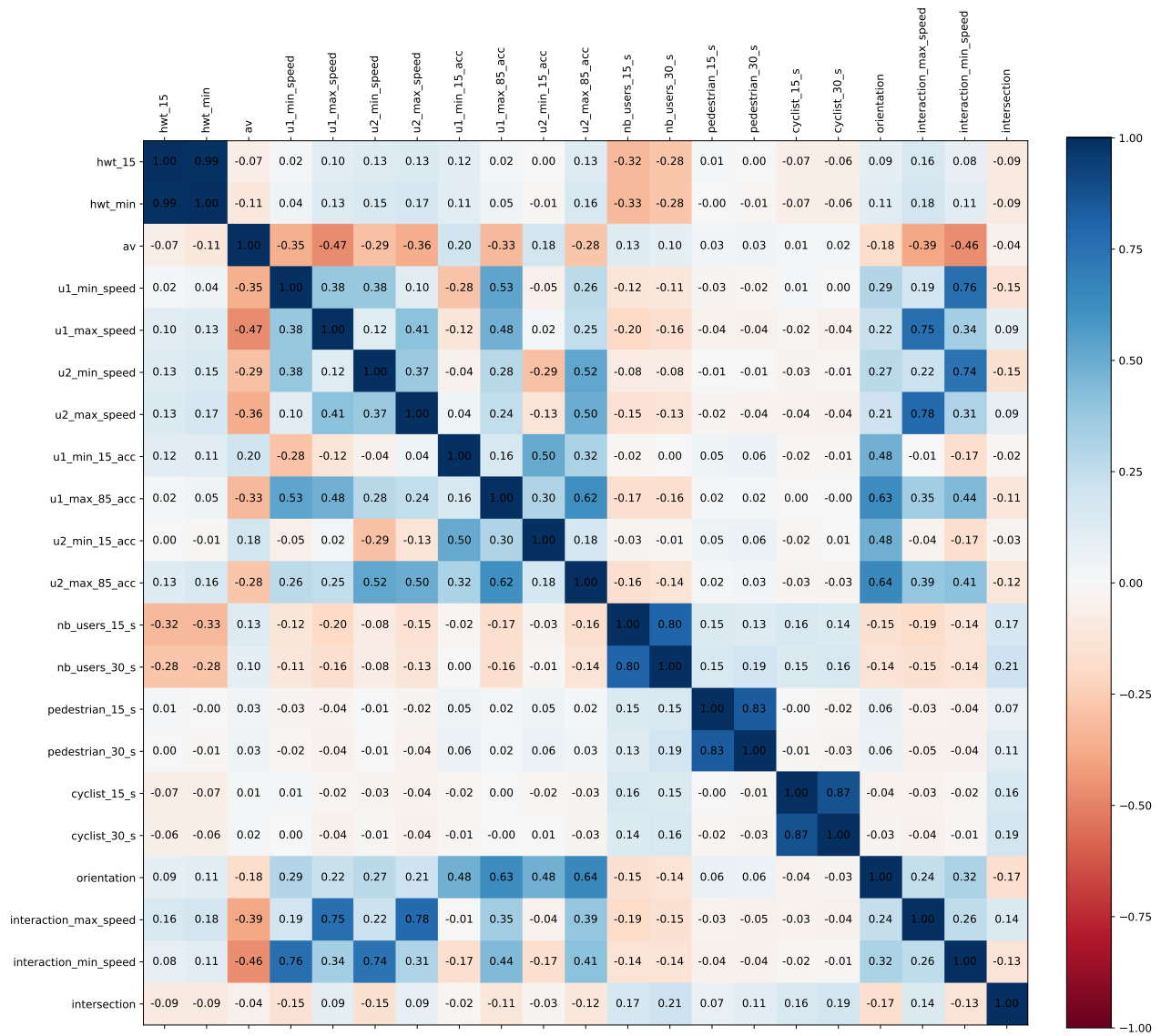


Figure B.7 Matrice des coefficients de corrélation de Pearson des variables continues du modèle de TIV₁₅.

Tableau B.1 Résultat du modèle de régression de TIV₁₅ prédit

Dep. Variable :	np.log(pet)	R-squared :	0.283				
Model :	OLS	Adj. R-squared :	0.269				
Method :	Least Squares	F-statistic :	20.65				
Date :	Sun, 25 Oct 2020	Prob (F-statistic) :	3.44e-83				
Time :	15 :48 :27	Log-Likelihood :	-1607.6				
No. Observations :	1442	AIC :	3271.				
Df Residuals :	1414	BIC :	3419.				
Df Model :	27						
		coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept		1.3792	0.137	10.049	0.000	1.110	1.648
C(other_user_type)[T.car]		-0.0556	0.119	-0.467	0.640	-0.289	0.178
C(other_user_type)[T.pedestrian]		0.3481	0.141	2.465	0.014	0.071	0.625
C(av)[T.1]		0.6508	0.056	11.647	0.000	0.541	0.760
C(most_frequent_category)[T.side]		0.5670	0.063	9.021	0.000	0.444	0.690
C(most_frequent_category)[T.sideleaving]		0.7452	0.147	5.069	0.000	0.457	1.034
C(site)[T.letourneux-hochelaga]		-0.6186	0.175	-3.536	0.000	-0.962	-0.275
C(site)[T.letourneux-ontario]		-0.2611	0.160	-1.632	0.103	-0.575	0.053
C(site)[T.montcalm-chartwell]		-0.2924	0.134	-2.182	0.029	-0.555	-0.030
C(site)[T.montcalm-inverness]		-0.5431	0.121	-4.484	0.000	-0.781	-0.306
C(site)[T.montcalm-victorin]		-0.8965	0.190	-4.716	0.000	-1.269	-0.524
C(site)[T.montcalm-voie]		-0.0027	0.169	-0.016	0.987	-0.335	0.330
C(av)[T.1] :C(most_frequent_category)[T.side]		-0.2455	0.095	-2.575	0.010	-0.432	-0.058
C(av)[T.1] :C(most_frequent_category)[T.sideleaving]		-0.4396	0.193	-2.272	0.023	-0.819	-0.060
u2_max_85_acc		-0.1049	0.025	-4.223	0.000	-0.154	-0.056
u2_max_85_acc :C(site)[T.letourneux-hochelaga]		0.1691	0.055	3.051	0.002	0.060	0.278
u2_max_85_acc :C(site)[T.letourneux-ontario]		0.0835	0.049	1.718	0.086	-0.012	0.179
u2_max_85_acc :C(site)[T.montcalm-chartwell]		0.0832	0.035	2.356	0.019	0.014	0.152
u2_max_85_acc :C(site)[T.montcalm-inverness]		0.0889	0.028	3.224	0.001	0.035	0.143
u2_max_85_acc :C(site)[T.montcalm-victorin]		0.1514	0.038	4.032	0.000	0.078	0.225
u2_max_85_acc :C(site)[T.montcalm-voie]		0.0104	0.053	0.198	0.843	-0.093	0.113
u2_min_speed		0.0102	0.005	1.982	0.048	0.000	0.020
u2_min_speed :C(site)[T.letourneux-hochelaga]		-0.0084	0.010	-0.882	0.378	-0.027	0.010
u2_min_speed :C(site)[T.letourneux-ontario]		0.0002	0.012	0.015	0.988	-0.024	0.024
u2_min_speed :C(site)[T.montcalm-chartwell]		7.834e-05	0.010	0.008	0.994	-0.019	0.019
u2_min_speed :C(site)[T.montcalm-inverness]		0.0052	0.009	0.589	0.556	-0.012	0.022
u2_min_speed :C(site)[T.montcalm-victorin]		0.0367	0.018	2.024	0.043	0.001	0.072
u2_min_speed :C(site)[T.montcalm-voie]		-0.0069	0.018	-0.384	0.701	-0.042	0.028
Omnibus :	116.819	Durbin-Watson :	1.818				
Prob(Omnibus) :	0.000	Jarque-Bera (JB) :	158.160				
Skew :	-0.668	Prob(JB) :	4.53e-35				
Kurtosis :	3.921	Cond. No.	174.				

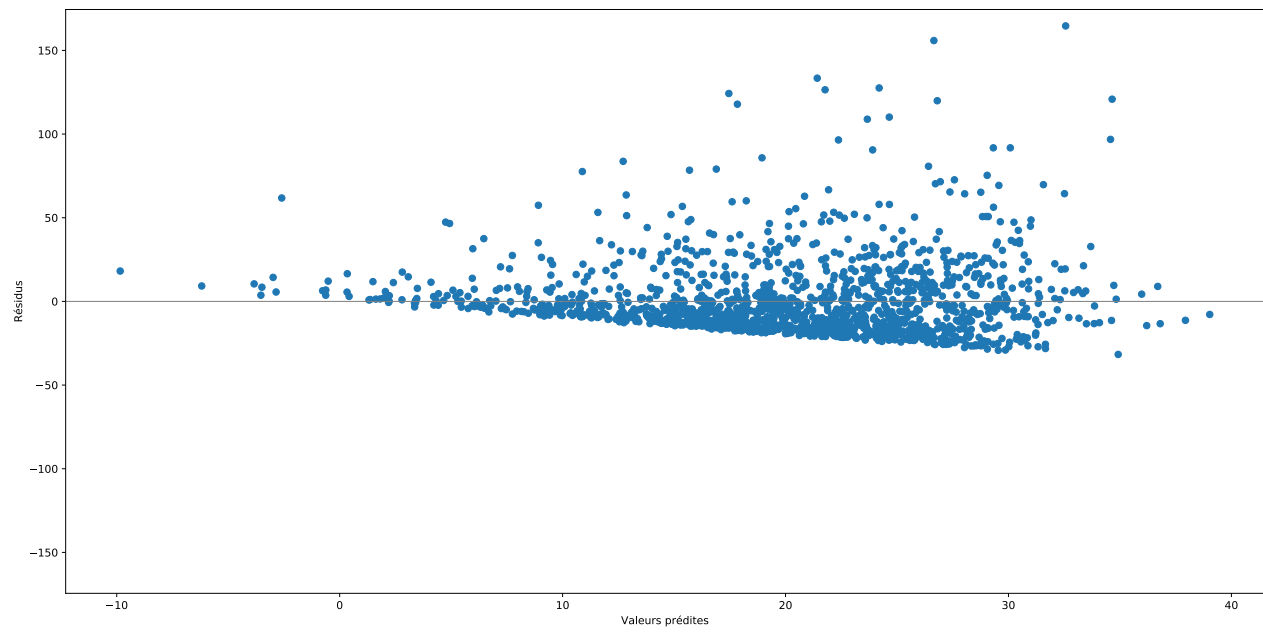


Figure B.8 Résidus du modèle de TIV_{15} .

ANNEXE C DIAGRAMMES FONDAMENTAUX

Rue Hochelaga & avenue Letourneux

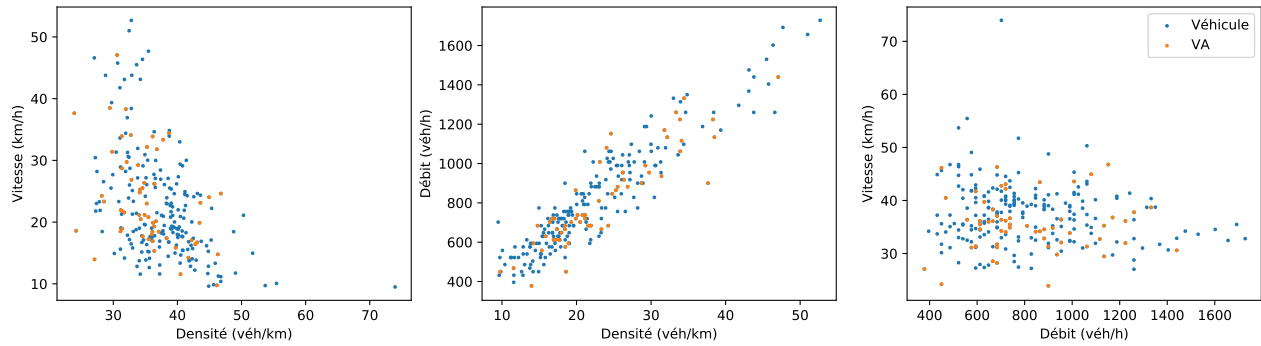


Figure C.1 Diagrammes fondamentaux à l'intersection d'Hochelaga & Letourneux.

Rue Ontario & avenue Letourneux

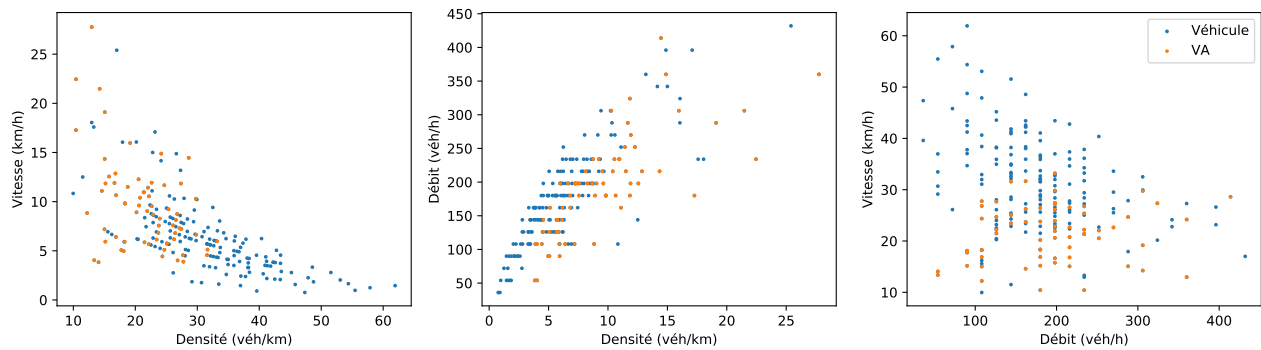


Figure C.2 Diagrammes fondamentaux à l'intersection d'Ontario & Letourneux.

Résidence Chartwell & boulevard Montcalm

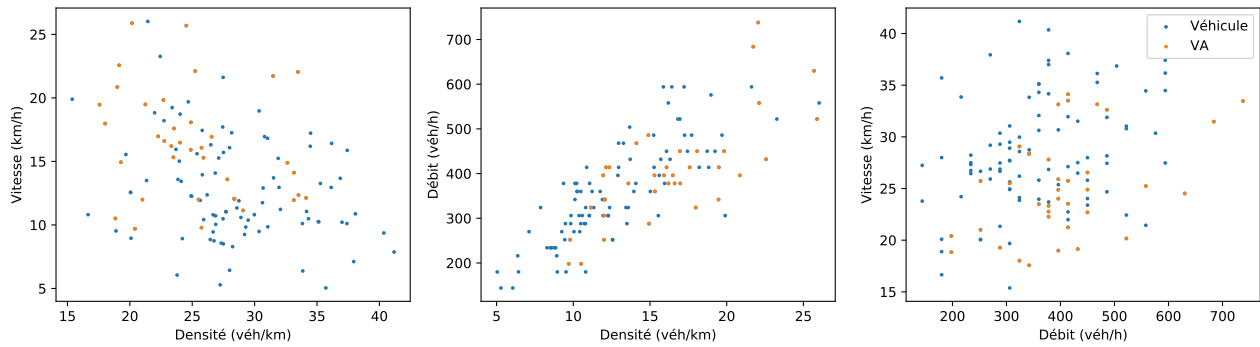


Figure C.3 Diagrammes fondamentaux face à la résidence Chartwell, sur le boulevard Montcalm.

Avenue d'Inverness & boulevard Montcalm

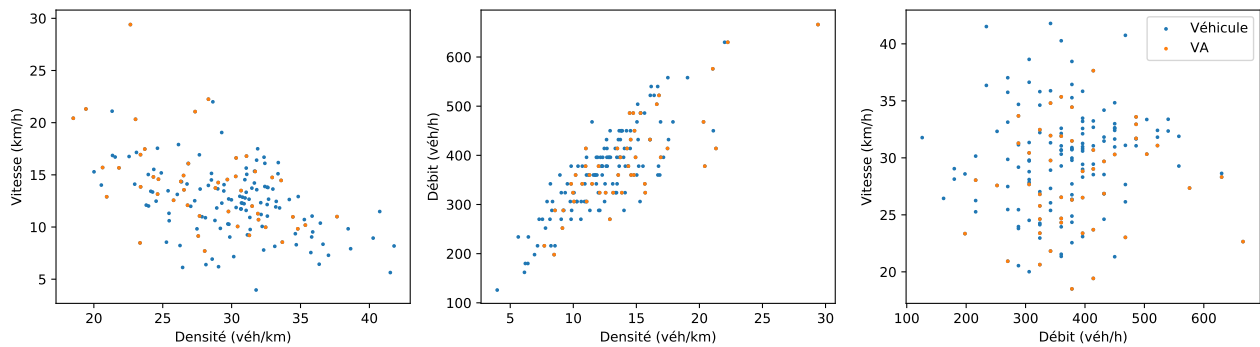


Figure C.4 Diagrammes fondamentaux à l'intersection du boulevard Montcalm & l'avenue d'Inverness.

Voie ferrée & boulevard Montcalm

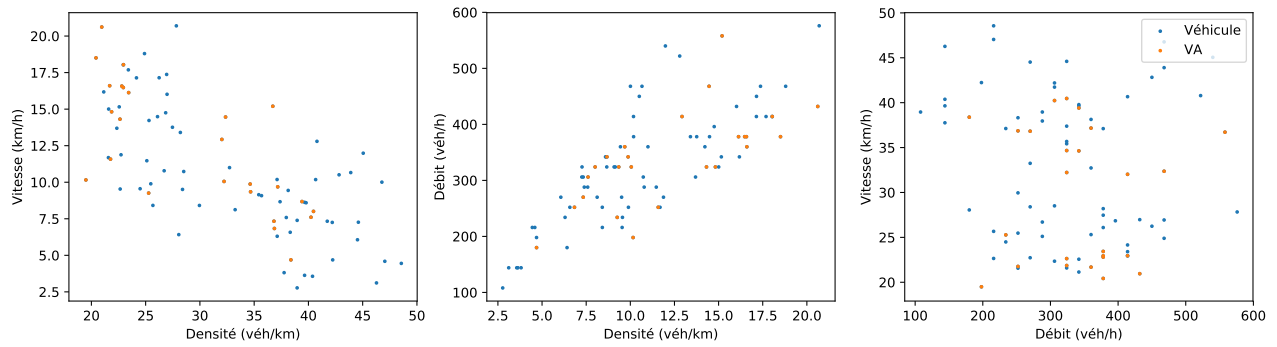


Figure C.5 Diagrammes fondamentaux à l'intersection de la voie ferrée & du boulevard Montcalm.