

Sécurité des carrefours giratoires

Rapport final de recherche

Nicolas Saunier¹
Paul St-Aubin¹
Shaun Burns²
Mario Cano Perdomo³
Jean-Simon Bourdeau¹
Luis Miranda-Moreno²
Zachary Patterson³
Karim Ismail⁴

¹Polytechnique Montréal

²Université McGill

³Université Concordia

⁴ Université Carleton

19 février 2015

Collaborateurs du projet :

Bhagwant Persaud	Université Ryerson
Martin Hétu	WSP Canada

Autres étudiants ayant participé au projet :

François Bélisle	Polytechnique Montréal
Laurent Gauthier	Polytechnique Montréal
Usamah Khan	Université McGill
Bashar Kyumji	Polytechnique Montréal

Table des matières

1	Introduction	11
2	Revue de la littérature	14
2.1	Définition d'un carrefour giratoire	14
2.2	Impact d'un carrefour giratoire sur la sécurité	14
2.2.1	Usagers motorisés	15
2.2.2	Piétons	18
2.2.3	Cyclistes	18
2.2.4	Personnes à mobilité réduite	19
2.3	Autres impacts et caractéristiques	20
2.3.1	Capacité	20
2.3.2	Insertion dans le milieu existant	20
2.3.3	Pollution atmosphérique	20
2.3.4	Géométrie	20
3	Méthodologie	22
3.1	Description des carrefours giratoires	22
3.2	Analyse des accidents	28
3.2.1	Localisation automatique des accidents	28
3.2.2	Analyse avant-après de la fréquence des accidents	34
3.2.3	Analyse de régression de la fréquence des accidents	39
3.2.4	Analyse de la gravité des accidents	41
3.3	Analyse vidéo des comportements et des interactions	43
3.3.1	Analyse vidéo	44
3.3.2	Analyse des vitesses	47
3.3.3	Analyse des interactions	49
3.3.4	Analyse statistique des mesures microscopiques	57
3.4	Analyse des préférences des piétons	58
3.4.1	Les enquêtes avec préférences déclarées sur la sécurité des usagers vulnérables	58
3.4.2	Développement de l'enquête	59
3.4.3	Les modèles statistiques de choix discret pour les préférences des piétons	63
4	Résultats	66
4.1	Inventaire et description des carrefours giratoires	66
4.2	Analyse des accidents	71
4.2.1	Présentation	71
4.2.2	Résultats de la localisation des accidents	73
4.2.3	Analyse avant-après de la fréquence des accidents	73
4.2.4	Analyse de régression de la fréquence des accidents	78
4.2.5	Analyse de la gravité des accidents	78
4.3	Analyse des comportements et interactions observés par vidéo	83
4.3.1	Présentation des quadrants étudiés par analyse vidéo	83
4.3.2	Analyse des vitesses	88
4.3.3	Analyse des créneaux	93
4.3.4	Analyse des interactions	96

4.4	Analyse des préférences des piétons	97
5	Conclusion	104
5.1	Bilan	104
5.2	Recommandations	105
5.3	Limitations et perspectives	105
A	Fiches individuelles des 36 quadrants analysés par vidéo	114
B	Questionnaire sur les préférences des piétons et leur perception de la sécurité	151

Table des figures

1	Schéma de carrefour giratoire (repris de [58])	15
2	Comparaison des points de conflit entre les mouvements dans un carrefour giratoire et un carrefour traditionnel (“Diverging” : divergence ; “Merging” : convergence ; “Crossing” : latéral) (tiré de [68])	16
3	Division d’un carrefour giratoire en quadrants : division typique en 4 quadrants délimités par des approches à angle droit (à gauche) et différents types d’interactions (conflits) entre véhicules dans un quadrant (à droite)	22
4	Schéma des distances caractéristiques d’un quadrant	24
5	Schéma des caractéristiques d’un quadrant	25
6	Schéma des caractéristiques des aménagements pour les piétons sur un quadrant	26
7	Schéma des caractéristiques de la signalisation sur un quadrant	27
8	Comparaison de plusieurs APIs pour l’adresse de l’Université McGill	31
9	Diagramme illustrant la méthode de géolocalisation implémentée dans le langage Python	32
10	Exemple de zones tampon ajustées prenant en compte la zone d’influence des carrefours giratoires dans la municipalité d’Amos	34
11	Illustration des trois catégories de méthodes d’analyse avant-après (tirée de [35]) : méthode naïve (en haut), avec groupe de contrôle (au milieu) et bayésienne empirique (en bas)	36
12	Exemple de sites de comparaison pour les carrefours giratoires de la route R111 avec la rue principale (en haut à gauche) et la route R111 avec la 4ème rue (en bas à gauche) à Amos (images tirées de Google Maps)	38
13	Vue d’ensemble du système d’analyse des comportements et des interactions à l’aide de données vidéo	43
14	Exemples de suivi d’usagers de la route dans différents contextes et études (images en haut tirées de [71], au milieu de [7] et en bas sur un carrefour giratoire de l’étude, de [77])	45
15	Exemple de prise de vue par une caméra avec objectif hypergone et de correction par le logiciel d’analyse vidéo	46
16	Échantillon de trajectoires véhiculaires projetées sur les alignements dans la zone d’analyse d’un carrefour giratoire à une voie sur l’île de Montréal	47
17	Exemple de la zone d’analyse (surface grisée), des alignements (en violet) et de leurs connections (en bleu clair) pour un carrefour à plusieurs voies sur l’anneau (partiellement visible), avec un échantillon de trajectoires en gris clair	48
18	Créneaux de tête et arrière créés par l’entrée d’un véhicule sur l’anneau	51
19	Probabilité de la position d’un usager situé sur l’alignement align_1 dans l’intervalle en rouge (entre 5.94 et 8.9 m) avec une vitesse entre 0.3 et 0.4 m par pas de temps à un instant futur dans $\Delta t = 60$ pas de temps (soit 4 s) (le pas de discrétisation spatiale est 1.5 m)	53
20	Illustration de l’utilisation des patrons de mouvement pour le calcul de la probabilité de collision de deux usagers dans l’espace à deux dimensions pour deux usagers <i>A</i> et <i>B</i> à deux pas de temps successifs	54
21	Illustration du calcul de la probabilité de collision en un point de l’espace en fonction de l’instant futur de prédiction (dimension du temps verticale)	55

22	Le véhicule 304 approche le véhicule 303 qui est entré dans le carrefour giratoire à contresens (voir les images de suivi en bas de la Figure 14). Les mesures de différentiel de vitesse, distance entre les véhicules sont affichées toutes les 8 images au niveau de la position du véhicule 304 à chaque instant t (lié par une ligne en gris clair à la position du véhicule 303 au même instant)	56
23	Séries temporelles du TTC entre les véhicules 303 et 304 présentés dans les Figures 14 et 22 calculé pour trois méthodes de prédiction du mouvement (vitesse et direction constante, adaptation normale du mouvement et patron de mouvement). Pour les deux dernières méthodes qui sont probabilistes, les mesures de TTC pour chaque point de collision potentiel sont représentées individuellement par des points avec le même marqueur que la valeur attendue agrégée	57
24	Comparaison de deux distributions hypothétiques de TTC pour deux sites. Pour les courbes a et b représentant les densités de probabilité et les fonctions de répartitions correspondantes pour deux sites, un site présente une concentration clairement plus élevée d'interactions avec des TTC plus faible. Pour les courbes c et d représentant deux autres densités de probabilité et fonctions de répartitions correspondantes, la différence entre les deux sites est moins claire	58
25	Exemple d'une tâche à choix discret du questionnaire Internet	63
26	Distribution du nombre de carrefours giratoires par direction territoriale, selon qu'ils sont sur le réseau du MTQ ou d'une municipalité	66
27	Distribution du nombre d'approches des carrefours giratoires	67
28	Nombre de carrefours giratoires construits par année (barres bleues) et cumulés depuis leur apparition en 1998 (courbe rouge) (le nombre de carrefours construits par année, en bleu, correspond à l'axe vertical gauche, le nombre cumulé de carrefours construits depuis leur apparition, en rouge, correspond à l'axe vertical droit)	67
29	Carte des 121 carrefours giratoires recensés en fin du projet sur tout le territoire du Québec (en haut) et dans la grande région de Montréal (en bas)	68
30	Distribution des rayons intérieurs, extérieurs et des rayons intérieurs plus bande franchissable des quadrants	69
31	Distribution de la taille angulaire (angle entre les approches) des quadrants	70
32	Distribution des variations de configurations des voies pour les voies sur l'anneau et en entrée-sortie des quadrants	70
33	Distribution de la distance entre le carrefour giratoire, par quadrant, et le carrefour amont ou aval respectivement pour l'approche ou la sortie	71
34	Type d'aménagement piétons par quadrant	71
35	Distribution des types d'îlot séparateur par quadrant	72
36	Distribution des panneaux présents par quadrant	72
37	Carte des carrefours giratoires pris en compte pour l'analyse de gravité	80
38	Carte des 20 carrefours giratoires où des données vidéo ont été collectées	85
39	Matrice de corrélation entre les attributs des carrefours giratoires (t_q ou "Taux des débits" désigne τ_Q)	86
40	Les quatre types de mouvements dans un quadrant selon les origines et destinations	88
41	Boîtes à moustache des vitesses à chaque quadrant à l'entrée de la zone d'entrecroisement (point -1 dans la Figure 40) pour les quatre types de mouvements, triées selon la vitesse médiane pour le mouvement approche-sortie (jaune en bas à droite) (nombre d'observations noté au-dessus de l'axe des abscisses)	90

42	Boîtes à moustache des vitesses à chaque quadrant à la sortie de la zone d'entrecroisement (point +1 dans la Figure 40) pour les quatre types de mouvements, triées selon la vitesse médiane pour le mouvement approche-sortie (jaune en bas à droite) (nombre d'observations noté au-dessus de l'axe des abscisses)	91
43	Boîtes à moustache des créneaux ("Gap time") de tête résultant de l'insertion d'un véhicule sur l'anneau par quadrant, triés selon la médiane (les quadrants dont le troisième quartile est supérieur à 100 s sont aussi présentés séparément dans le graphique à droite sur une échelle adaptée)	94
44	Boîtes à moustache des créneaux ("Gap time") arrière résultant de l'insertion d'un véhicule sur l'anneau par quadrant, triés selon la médiane (les quadrants dont le troisième quartile est supérieur à 100 s sont aussi présentés séparément dans le graphique à droite sur une échelle adaptée)	95
45	Probabilité cumulée du TTC selon différentes méthodes de prédiction des mouvements et d'agrégation pour tous les quadrants analysés	97
46	Probabilité cumulée du TTC selon différentes méthodes de prédiction des mouvements et d'agrégation par groupe de quadrants	98
47	Probabilité cumulée du TTC_{15} calculé avec les patrons de mouvement par groupe de quadrants	99
48	Fréquence d'accès des répondants à des carrefours giratoires selon le mode de transport	100
49	Cartes de la localisation des carrefours giratoires connus lors de l'enquête (ballons jaunes) et des répondants dont les réponses ont été analysées (points rouges) ou exclues (points jaunes)	101

Liste des tableaux

1	Les différents types de carrefours giratoires (adapté d'après [5] et [58])	14
2	Résumé des études internationales sur l'impact des carrefours giratoires sur la sécurité (tiré de [68])	17
3	Comparaison des différentes APIs sur 5 cas dans la ville d'Amos (Inc indique que la localisation est incertaine, Lon. et Lat. indiquent respectivement la longitude et latitude de la localisation identifiée) : une localisation est considérée valide si à une distance acceptable de l'adresse réelle	30
4	Attributs (avec leurs valeurs possibles) des accidents disponibles pour l'analyse de gravité : la gravité est la variable dépendante du modèle, et les autres attributs sont les facteurs explicatifs (variables indépendantes du modèle)	42
5	Attributs et valeurs des attributs utilisés dans la littérature pour analyser la sécurité des usagers vulnérables dans les carrefours giratoires et autres types de carrefour, selon le type de méthode d'analyse (enquête avec préférences déclarées (PD) ou autre) (- indique l'absence de travaux pertinents)	60
6	Nombre total d'accidents N_A sur les territoires des municipalités sélectionnées sur la période 2000-2011	73
7	Résultats de la méthode de localisation des accidents appliquée à l'ensemble des accidents municipaux (N_A nombre d'accidents; N_{Aloc} et $\%_{Aloc}$ nombre et proportion d'accidents avec information de localisation;)	74
8	Résumé des accidents pour chaque carrefour giratoire (avec # le numéro du carrefour giratoire, N_A^{av} , N_A^{pend} et N_A^{ap} le nombre d'accidents respectivement avant, pendant et après la construction du carrefour giratoire)	75
9	Description des périodes d'analyse avant-après	76
10	Description des groupes de carrefours giratoires pour l'analyse avant-après des accidents	76
11	Regroupement des résultats de l'analyse avant-après (Gr. désigne le numéro du groupe de sites, # l'identifiant de chaque carrefour giratoire et les deux dernières colonnes présentent l'intervalle de confiance de $\hat{\theta}$ à 95 %)	77
12	Analyse avant-après de l'ensemble des carrefours giratoires (N_{an}^{av} et N_{an}^{ap} sont respectivement le nombre d'années dans les périodes pré- et post-construction; les nombres d'accidents ajustés dans la période pré-construction N_A^{av*} sont obtenus en multipliant le nombre d'accidents dans la période pré-construction N_A^{av} par le facteur r_d pour corriger les durées de temps différentes entre les périodes pré- et post-construction)	79
13	Résultats de la régression binomiale négative	80
14	Distribution de la gravité des accidents analysés	81
15	Coefficients du modèle logit ordonné pour la gravité des accidents (rapport de vraisemblance de -478.7 et pseudo R^2 de 0.0943)	81
16	Élasticités du modèle de gravité des accidents	83
17	Statistiques descriptives des attributs les plus importants des carrefours giratoires pour les 41 quadrants	84
18	Attributs de l'environnement bâti : occupation du sol et classification fonctionnelle des approches pour les 41 quadrants	84
19	Description des données vidéo collectées et analysées	87
20	Groupes de quadrants obtenus par la méthodes des k-moyennes	87

21	Modèles linéaires de la vitesse moyenne sur l'approche en fonction des attributs des 36 quadrants pour les différents types de mouvements décrits dans la Figure 40	92
22	Modèles linéaires de la moyenne des créneaux de tête et arrière en fonction des attributs des 36 quadrants (<i>w_lane1</i> est la largeur de la première voie (extérieure si plus d'une voie) sur l'anneau)	93
23	Modèle linéaire pour le logarithme de la moyenne du TTC_{15} en fonction des attributs des 36 quadrants (<i>lowerInsSpeed</i> est la moyenne par quadrant de la vitesse plus petite des vitesses des deux usagers au moment où le TTC_{15} est atteint ; <i>inflow_phpl</i> est le nombre de véhicule par heure et par voie mesuré par analyse vidéo en entrée du quadrant sur l'approche et sur l'anneau)	100
24	Résultats du modèle MMNL des préférences des piétons pour les carrefours giratoires (* = Significatif à un niveau de confiance de 90 %, ** = Significatif à 95 %, *** = Significatif à 99 % ; LL_0 et LL log-vraisemblances respectivement du modèle de base et du modèle final)	102
25	Taux marginaux de substitution pour le modèle MMNL	103

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le programme de recherche en sécurité routière financé par le Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT), le Ministère des Transports du Québec (MTQ) et le Fonds de Recherche du Québec - Santé (FRQS). Il tiennent aussi à remercier les chargés de projet du MTQ Stéphanie Tremblay, Guillaume Bertrand et Marie-Anne Parant, ainsi que le comité de suivi.

1 Introduction

Le projet de recherche sur la sécurité des carrefours giratoires au Québec a été approuvé pour financement en mai 2011 dans le cadre du premier concours du programme de recherche en sécurité routière du Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT), le Ministère des Transports du Québec (MTQ) et le Fonds de Recherche du Québec - Santé (FRQS).

L'objectif général de ce projet était l'étude de la sécurité des carrefours giratoires au Québec, au travers des objectifs spécifiques suivants :

1. constituer un inventaire des carrefours giratoires et de leurs caractéristiques au Québec
2. évaluer l'impact des carrefours giratoires sur la sécurité par des modèles de performance de sécurité et des études des statistiques de collisions avant et après leur construction
3. étudier le comportement des usagers, en lien avec la sécurité (étude des conflits et des infractions), et leur compréhension du fonctionnement des carrefours giratoires par des observations, l'analyse automatique de données vidéo et des questionnaires
4. évaluer la cohérence de la signalisation sur les carrefours giratoires et sa compréhension par les usagers
5. identifier les risques et besoins particuliers des usagers vulnérables (piétons et cyclistes)
6. établir un ensemble de recommandations pour la conception des carrefours giratoires aux meilleurs niveaux de sécurité au Québec

Le projet repose sur trois approches complémentaires, à savoir l'analyse de données d'accidents, l'analyse vidéo pour l'analyse des comportements et des interactions et une enquête auprès des usagers.

Il n'a cependant pas été possible d'atteindre tous les objectifs visés au début du projet. Concernant le *premier objectif*, la liste de l'ensemble des carrefours construits au Québec est à jour et comprend les carrefours dont la construction est planifiée. Il a cependant été difficile de collecter toutes les caractéristiques de ces carrefours, par exemple géométriques, car il n'a pas été possible de se rendre sur tous les sites et il n'est pas toujours possible de faire ces mesures par les outils de visite "virtuelle" comme Google Maps¹ et Street View², en particulier s'ils ne sont pas visibles.

Concernant le *second objectif* reposant sur des données d'accidents, les analyses prévues n'ont pu être effectuées à cause du manque de données historiques de débit. Sans les débits qui constituent la mesure classique de l'exposition, il est impossible de calibrer des fonctions de performance et difficile de faire des études avant-après. L'analyse des données d'accident repose donc sur une analyse avant-après des accidents avec un groupe de contrôle de carrefours similaires d'un autre type sans données de débit, et sur une analyse de régression du nombre d'accidents avec un ensemble d'attributs des carrefours. Une analyse de la gravité des accidents a aussi été effectuée.

Le *troisième objectif* a été atteint très largement à l'aide d'analyse automatique de la vidéo et des trajectoires ainsi obtenues. En déduire la compréhension du fonctionnement des carrefours giratoires n'est cependant pas simple de façon automatique. Des essais de détection automatique de certaines violations (e.g. déplacement en sens interdit) ont été effectués, mais n'ont pas été appliqués à l'ensemble des observations vidéo. Les préférences des piétons pour différents attributs des carrefours giratoires ont été aussi étudiées par un questionnaire, ce qui couvre partiellement le *cinquième objectif*. Les risques et besoins des cyclistes n'ont pas été analysés dans ce projet, outre que par la revue de la littérature.

1. <http://maps.google.com>

2. http://www.google.com/intl/en_ALL/help/maps/streetview/

Le *quatrième objectif* a été peu abordé : la cohérence de la signalisation peut être étudiée partiellement à l'aide de l'inventaire des caractéristiques de signalisation des carrefours, mais l'inventaire n'est que partiel actuellement. La compréhension de la signalisation par les piétons a été abordée lors du même questionnaire dans trois questions.

Le *sixième et dernier objectif* est rempli selon les résultats obtenus dans le projet à cette date en conclusion du rapport. Il faut noter que des travaux sont encore en cours, en particulier par l'analyse vidéo automatique des comportements et interactions dans le cadre du doctorat de Paul St-Aubin, et continueront en 2015.

Ce rapport technique se découpe en trois sections principales, soit la revue de littérature (section 2), les différentes méthodologie employées (section 3) et les résultats (section 4), avant les conclusions de ce projet (section 5).

Guide des publications Plusieurs publications et mémoires d'étudiants ont été écrits et publiés dans le cadre de ce travail. Ce rapport repose sur ces écrits, mais certains détails complémentaires peuvent s'y retrouver.

Le travail sur les données d'accident a été fait par Shaun Burns dans le cadre de son travail de maîtrise à l'Université McGill, sous la co-supervision des professeurs Luis Miranda-Moreno et Karim Ismail [8]. Deux articles ont été présentés au congrès annuel du "Transportation Research Board" (TRB) en 2013 et 2014 sur l'analyse de la sévérité des accidents dans les carrefours giratoires [9] et les méthodes de géolocalisation automatique des accidents appliquées à l'ensemble des accidents survenus dans des municipalités fournis pour le projet [10] (ce second article a été accepté pour publication dans la revue "Transportation Research Record" (TRR)).

Le travail sur l'analyse du comportement et de la sécurité des usagers par vidéo a été fait par Paul St-Aubin dans le cadre de son travail de doctorat à Polytechnique Montral, sous la co-supervision des professeurs Nicolas Saunier et Luis Miranda-Moreno, dont la soutenance est attendue pour la fin de l'année 2015. L'idée de l'analyse par quadrant et une première version des outils d'analyse vidéo ont été présentés au congrès annuel du TRB en 2013 avec une application à l'analyse des vitesses sur cinq sites [80] (avec publication dans la revue TRR [81]). La méthode de prédiction des mouvements futurs selon les patrons de mouvements observés pour les indicateurs de sécurité a été présentée au congrès annuel du TRB en 2014 [82]. Le système complet d'analyse vidéo et l'application à un large volume de données a été présenté au colloque "Big Data and Urban Informatics Workshop" en 2014 [77] et une version étendue a été soumise et est en révision pour la revue "Transportation Research Part C : Emerging Technologies" (numéro spécial sur "Big Data"). Enfin, deux articles ont été présentés au congrès annuel du TRB en 2015 sur les méthodes de prédiction des mouvements futurs et d'agrégation des indicateurs de sécurité, et sur la corrélation entre les caractéristiques des carrefours giratoires, la vitesse et l'indicateur de sécurité du temps à la collision [78, 79]. Ce travail est en cours.

Le travail sur les préférences des piétons dans les carrefours giratoires a été fait par Mario Cano Perdomo dans le cadre de son travail de maîtrise à l'Université Concordia, sous la co-supervision des professeurs Zachary Patterson et Nicolas Saunier [59]. Ce travail a été présenté au congrès du TRB en 2014 [61] et publié dans la revue "Accident Analysis & Prevention" [62]. Un travail sur l'analyse des interactions entre piétons et véhicules par vidéo a été effectué pour comparer les perceptions de la sécurité par les piétons obtenues dans l'enquête, leur comportement et risque réel : ce travail a été soumis pour présentation au congrès du TRB en 2015, mais refusé [60].

Ces travaux ont été aussi présentés en 2013 et 2014 dans des congrès locaux comme le congrès de l'AQTr et le colloque du Réseau de Recherche en Sécurité Routière.

Certains travaux complémentaires effectués par d'autres étudiants ne sont pas couverts par ce rapport. L'analyse comparative de corridors de carrefours giratoires et à feux et de leur impact sur les émissions de polluants a été fait par Arthur Dolmajian dans la cadre de son travail de maîtrise en ingénierie à Polytechnique Montréal, sous la co-supervision des professeurs Nicolas Saunier et Luis Miranda-Moreno [22]. Des méthodes pour la détection des infractions et comportements anormaux ont été développées par Laurent Gauthier dans le cadre d'un projet d'initiation à la recherche pour les étudiants du premier cycle à Polytechnique Montréal à l'automne 2013 et l'hiver 2014, sous la direction du professeur Nicolas Saunier (une affiche a été présentée).

2 Revue de la littérature

D'après [4], le Columbus Circle de New York construit en 1905 est le premier rond-point réglementé selon les recommandations d'un ingénieur américain, William Phelps Eno. Si, auparavant, la circulation n'était pas réglementée dans un carrefour circulaire, il propose que les usagers tiennent leur droite de leur entrée à leur sortie. En 1906, un architecte de Paris, Eugène Hénard, publie un fascicule où il concrétise son invention, le carrefour à giration dans lequel les usagers doivent suivre un sens unique de circulation contournant l'obstacle central. Eno propose en 1912 la règle de priorité à droite sur l'anneau, soit aux usagers s'engageant dans l'anneau. Suite aux problèmes de congestion et de sécurité créés par l'augmentation des débits dans les années 1950, le Royaume-Uni adopte en 1966, à la suite d'essais concluants, la règle de priorité à l'anneau. C'est en 1983 que la règle de priorité à l'anneau est officiellement adoptée en France.

Le premier carrefour giratoire moderne canadien est construit au Québec à Ville Saint-Laurent en 1998, quoique l'histoire du giratoire québécois ait débuté en 1996 avec l'introduction de la règle de priorité à l'anneau dans des ronds-points de Sainte-Foy [4].

Cette section propose une courte revue de littérature qui s'est concentrée sur les travaux les plus récents (publiés pendant la période du projet).

2.1 Définition d'un carrefour giratoire

La définition d'un carrefour giratoire (en anglais "roundabout" ou "modern roundabout" pour les distinguer des ronds-points) proposée par le MTQ est la suivante [5] :

"Un carrefour comportant trois branches ou plus, dans lesquelles les courants convergent puis divergent sur une chaussée à sens unique entourant l'îlot central. La circulation sur cette chaussée se fait dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et a priorité sur la circulation entrant dans l'anneau"

Un schéma de carrefour giratoire typique comprenant quatre approches à angles droit, avec le vocabulaire de ses différentes caractéristiques est présenté dans la Figure 1. Les différents types de carrefours giratoires habituellement distingués selon le rayon du carrefour sont listés dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Les différents types de carrefours giratoires (adapté d'après [5] et [58])

Type de giratoire	Rayon extérieur (m)	Remarque
Mini	6–12	En milieu urbain seulement
Petit (compact)	12–15	En milieu urbain, de dimensions réduites
Moyen	15–25	Requiert une géométrie permettant une fluidité de la circulation
Grand	25–30	Sécurité moindre pour les piétons et les cyclistes

2.2 Impact d'un carrefour giratoire sur la sécurité

Les carrefours giratoires ont de très bonnes performances en terme de sécurité, tant sur la probabilité d'accident que sur leur gravité : il y a en général moins d'accidents, et les accidents sont moins graves, sur un carrefour giratoire que sur un autre type de carrefour dans des conditions similaires [67].

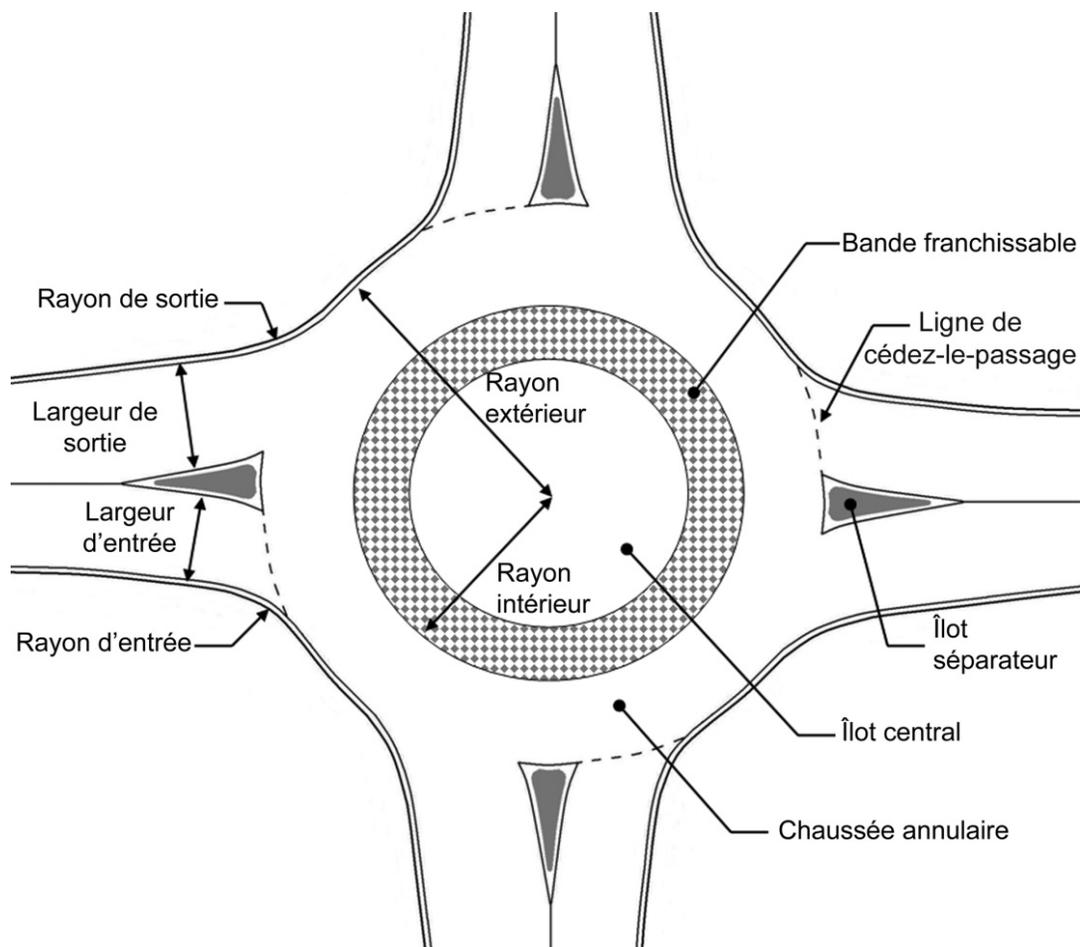


FIGURE 1 – Schéma de carrefour giratoire (repris de [58])

Ces bonnes performances sont typiquement expliquées a priori par l'observation que le nombre de points de conflits potentiels est réduit à un carrefour giratoire comparé à un autre type de carrefour pour tous les types d'utilisateurs (véhicules, piétons et cyclistes) : pour un carrefour de quatre branches, le nombre passe de 32 à 8 (voir Figure 2), et pour un carrefour à trois branches, le nombre passe de 9 à 6, éliminant dans tous les cas les conflits latéraux ou en cisaillement dont les conséquences sont plus graves que les autres catégories d'accidents [5].

La conception d'un carrefour giratoire doit être telle qu'elle amène une réduction des différentiels de vitesses entre les véhicules en conflit. Cela se fait par des approches canalisées, de petits rayons de courbure et une déflexion à l'entrée du carrefour. Dans le cas de carrefours giratoires ruraux avec des vitesses d'approche élevées, il est conseillé d'allonger les îlots centraux et de faire une succession de courbes [63].

2.2.1 Usagers motorisés

Une étude française des accidents survenus durant la période 1993-2005 [33] montre que le nombre d'accidents en giratoire a augmenté dans une proportion bien inférieure au nombre de carrefours giratoires. Le taux d'accidents par an et par giratoire est passé de 0.129 à 0.057, ce qui est plus important que la diminution constatée pour l'ensemble des accidents. La gravité des accidents est aussi plus faible dans les carrefours giratoires que dans les autres carrefours : en considérant les accidents sur la période 1998-2007 dans les régions Bretagne et Pays de la Loire,

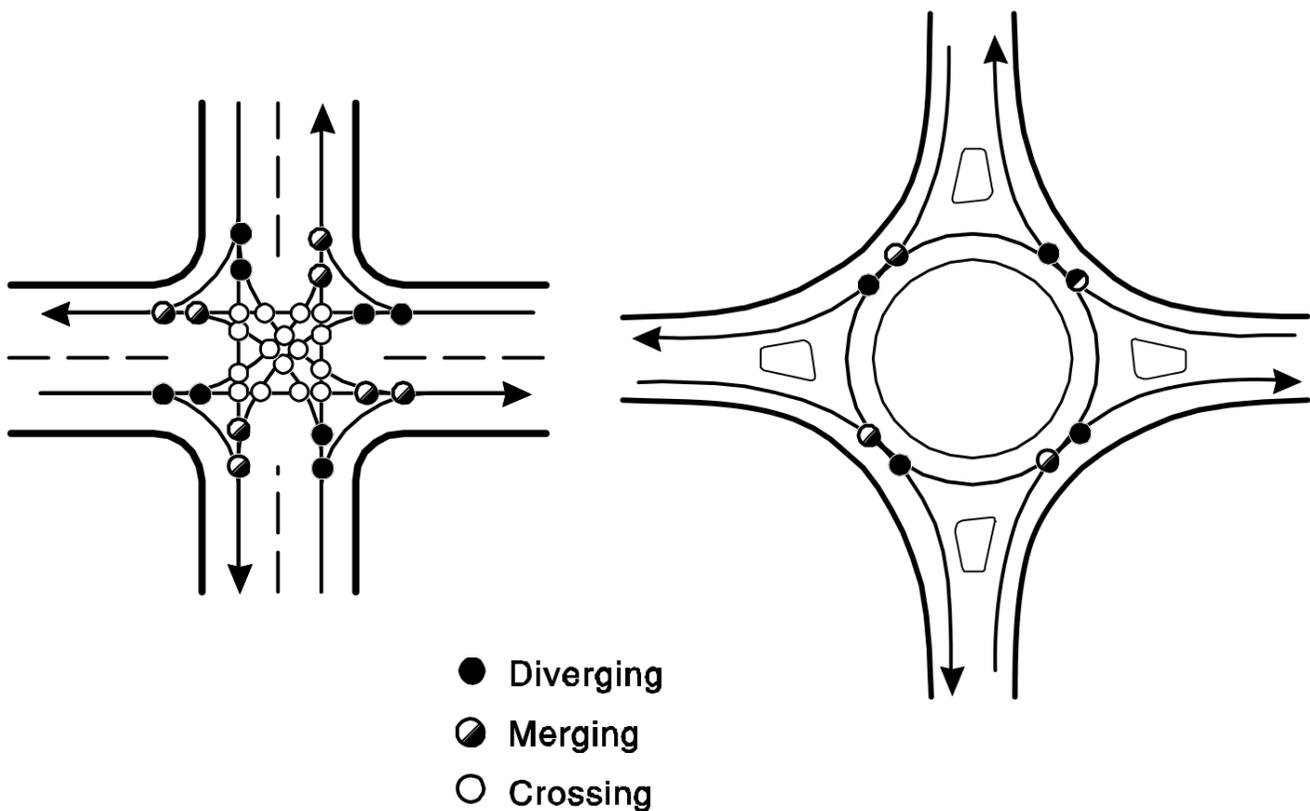


FIGURE 2 – Comparaison des points de conflit entre les mouvements dans un carrefour giratoire et un carrefour traditionnel (“Diverging” : divergence; “Merging” : convergence; “Crossing” : latéral) (tiré de [68])

le pourcentage d’accidents mortels parmi tous les accidents est 15 % plus faible en milieu urbain et 53 % plus faible en milieu rural (“rase campagne”). La principale particularité des accidents dans les carrefours giratoires urbains comparés aux autres carrefours est la part importante des accidents impliquant un seul véhicule.

Dans une étude faite aux États-Unis sur la conversion de 28 carrefours à feux en carrefours giratoires [31], la méthode empirique bayésienne a pu montrer un gain de sécurité en ce qui concerne le nombre total d’accidents, et un gain de sécurité encore plus important en ce qui concerne les accidents avec dommage corporel. Une analyse transversale sur 42 carrefours à feux a corroboré ces résultats. Finalement, des facteurs de modification d’accidents (CMF) ont été calculés, et dans certains cas, l’écart-type des distributions de CMF était plus grand que l’erreur standard de la valeur moyenne du CMF, ce qui semble indiquer une variation des impacts sur la sécurité à travers les sites.

Dans une autre étude faite par Retting [65] sur la conversion en carrefours giratoires de 17 carrefours ruraux avec des vitesses d’approche élevées, une analyse de la fréquence des accidents a pu montrer que celle-ci a été réduite de 36 %, que la fréquence des accidents avec blessures était réduite de 76 % et que la fréquence des accidents mortels était réduite d’environ 90 %.

En ce qui concerne les types d’accidents qui surviennent dans les carrefours giratoires, une étude en Corée du Sud a trouvé que la majorité (65 %) des accidents survient entre un véhicule entrant dans le carrefour et un véhicule circulant dans celui-ci [47]. De plus, le nombre d’accidents impliquant seulement un véhicule semble être plus élevé que dans des carrefours à feux,

et dans certains cas la conversion en carrefour giratoire peut faire doubler le nombre d'accidents avec un seul véhicule impliqué, ce qui a aussi été identifié dans une étude danoise discutée ci-dessous [44].

Les gains en sécurité peuvent varier selon la gravité des accidents [66, 67]. Les gains varient aussi selon le type de carrefour converti. En effet, les gains en sécurité semblent être significatifs dans le cas de conversions de carrefours sans feux, mais les résultats sont moins concluants dans le cas de conversions de carrefours à feux [31]. Dans une étude sur la conversion de 332 carrefours en carrefours giratoires au Danemark [44], les résultats suivants ont été observés :

- réduction du nombre d'accidents total et du nombre d'accidents avec blessures respectivement de 47 % et 60 % ;
- une réduction de 87 % du nombre d'accidents mortels ;
- une réduction du nombre d'accidents avec des dommages matériels seulement de 16 %.

Étant donné que l'étude danoise comporte un grand nombre d'observations [44], des conclusions sur l'effet des caractéristiques géométriques sur les gains de sécurité ont pu être faites :

- les carrefours sans feux convertis ont présenté des gains de sécurité plus importants que les carrefours à feux convertis ;
- les carrefours sans feux à quatre branches ont eu des gains de sécurité plus importants que ceux à trois branches ;
- concernant la conversion, l'implantation de carrefours giratoires à plusieurs voies à 3 branches a entraîné une hausse du nombre d'accidents, alors que l'implantation de carrefours giratoires à plusieurs voies à plus de 3 branches a engendré un gain de sécurité ;
- les îlots centraux ayant une hauteur de plus de 2 m ont produit de meilleurs gains de sécurité ;
- la conversion en mini carrefour giratoire a fait augmenter le nombre total d'accidents mais a diminué le nombre d'accidents avec blessures ;
- la présence d'un îlot séparateur semble diminuer le nombre d'accidents, surtout si celui-ci a une forme triangulaire (ou de "trompette").

Elvik, quant à lui, a recensé 28 études pour un total de 113 estimations d'impacts de carrefours giratoires sur la sécurité [25]. Il a démontré que les résultats n'étaient pas constants selon le type de carrefour giratoire, bien qu'il soit généralement admis que les carrefours giratoires ayant des plus petits diamètres soient plus sécuritaires. Les gains généraux de sécurité routière sont résumés dans le Tableau 2 tiré de [68].

Tableau 2 – Résumé des études internationales sur l'impact des carrefours giratoires sur la sécurité (tiré de [68])

Pays	Réduction moyenne (%)	
	Tous les accidents	Accidents avec blessures
Allemagne	36 %	-
Australie	41-61 %	45-87 %
États-Unis	35 %	76 %
France	-	57-78 %
Pays-Bas	47 %	-
Royaume Uni	-	25-39 %

2.2.2 Piétons

Dans les pays occidentaux, environ 10 à 30 % des décès dans les accidents de la route sont des piétons [15]. L'impact d'une conversion en carrefour giratoire sur la sécurité des piétons est généralement considéré comme positif, avec une réduction du nombre d'accidents impliquant des piétons entre 25 % et 87 % selon la revue de [15]. Cette amélioration est en général attribuée aux caractéristiques suivantes des carrefours giratoires :

- le conducteur a plus de temps afin de réagir face aux piétons ;
- le piéton ne doit porter attention aux véhicules que dans une direction ;
- le conducteur a plus de chances de regarder dans la direction du piéton ;
- étant donné que les usagers décident eux-mêmes quand ils peuvent traverser le carrefour, il y a plus de chances qu'ils soient plus attentifs les uns aux autres [11].

L'analyse de données vidéo collectées en Israël a permis de démontrer que la présence de glissières ou de tout autre obstacle (végétation, barrière en béton) peut faire augmenter le taux de traversées aux traverses pour piétons [15]. En effet, les auteurs de [75] ont suggéré que la localisation d'une traverse de piéton, relative à l'origine et à la destination du piéton, est le facteur décisionnel le plus important dans la décision des piétons de traverser une route à un endroit donné. Le taux de traversées légales augmente si [15] :

- un îlot central est présent lorsque les chaussées ne sont pas séparées ;
- les chaussées sont séparées ;
- les débits de véhicules sont élevés ;
- les piétons sont des femmes.

2.2.3 Cyclistes

L'impact des carrefours giratoires sur la sécurité des cyclistes est plus mitigé [68], quand ce n'est pas clairement négatif. Il est en particulier important d'éviter les voies cyclables sur la chaussée annulaire [5, 20]. Les études divergent à savoir s'il y a un gain ou une perte de sécurité pour les cyclistes [66]. Selon les résultats de l'étude danoise déjà mentionnée plus haut [44], les pistes cyclables offrent des gains de sécurité, alors que les voies cyclables et tous les autres types d'aménagement sont associés à une augmentation du nombre d'accidents impliquant des cyclistes. L'augmentation du nombre d'accidents impliquant des cyclistes concerne les virages à droite des véhicules motorisés. Réduire la vitesse des véhicules par une bonne conception géométrique à la même vitesse que les cyclistes (qui est de l'ordre de 20 à 25 km/h) améliore leur sécurité [66]. Avec une conception appropriée [68] et une sensibilisation des usagers motorisés pour améliorer leur comportement, la sécurité peut même être améliorée pour les cyclistes surtout dans le cas de mini carrefours giratoires ou dans le cas de carrefours giratoires à une voie [63]. L'effet de sécurité par le nombre ("safety in number") est aussi noté dans l'étude belge [20], c'est à dire que la probabilité pour un piéton ou un cycliste d'être impliqué dans un accident diminue avec leur débit au carrefour.

En absence de données d'accident ou lorsque les observations sont trop peu nombreuses, le comportement des usagers est aussi étudié. La conversion en carrefour giratoire peut engendrer un changement comportemental pour le cédez-le-passage de tous les usagers et un mauvais comportement des cyclistes (raccourcis, non-respect de la priorité dans l'anneau) peut être observé dans certains cas [40]. Dans une étude faite à Lund, en Suède [69], le comportement des

cyclistes et des automobilistes a été étudié pour deux types d'aménagements pour les cyclistes : un carrefour giratoire avec des pistes cyclables séparées, et un autre carrefour où les cyclistes étaient intégrés à la circulation motorisée. L'analyse repose sur la technique des conflits de trafic suédoise. L'analyse des données vidéo a permis de déterminer que :

- Dans le carrefour avec piste cyclable, la plupart des conflits sont survenus entre les véhicules qui entrent ou sortent et un cycliste qui circule en sens horaire.
- Dans le carrefour sans aménagement cyclable, le plus gros problème vient du refus de céder le passage des véhicules entrants aux cyclistes. Le problème des véhicules qui quittent en coupant la trajectoire d'un cycliste est aussi important. Le fait que les règles de priorité soient plus ambiguës dans le carrefour giratoire sans aménagement fait en sorte que les usagers sont plus attentifs, ce qui réduit leur mobilité, mais aussi leur risque. Les cyclistes qui circulent en sens inverse sont moins bien vus par les automobiles qui entrent, mais mieux vus par les automobiles qui sortent.

2.2.4 Personnes à mobilité réduite

L'étude de la sécurité des usagers les plus vulnérables et des personnes à mobilité réduite est importante lors de l'analyse des performances des carrefours giratoires. À titre d'exemple, une étude des décès en France a calculé que 81.5 % de tous les décès de piétons dans des carrefours giratoires étaient âgés de plus de 60 ans [33]. Une autre étude de Daniels et al. faite avec un échantillon de 91 carrefours giratoires et analysant la sécurité des usagers vulnérables a montré qu'une augmentation du nombre d'accidents semble se produire [19]. Du fait de leur importance, une étude spécifique a été menée aux États-Unis en 2011 sur les solutions de traversées aux carrefours giratoires pour les piétons avec des problèmes de vision [74]. Les principales solutions identifiées pour améliorer la sécurité des piétons sont les suivantes :

- mesures d'apaisement de la circulation : réduire les limites de vitesse, traverses surélevées ;
- information pour les piétons : altération de la surface (bandes rugueuses), système de priorité couplé à un système de détection, système de détection des intervalles ;
- modifications géométriques de la traverse : traverse surélevée, îlot séparateur surélevé (et non peint), décalage de la traverse sur les voies de sortie ;
- signalisation : feu activé par les piétons pour une traverse en une ou deux étapes, feux "Pedestrian Hybrid Beacon", feu à une traverse surélevée, feu à une traverse en zigzag ;
- traverse sur un niveau séparé : passerelle ou tunnel.

De plus, les chercheurs ont effectué plusieurs visites sur le terrain dont ils ont tiré les conclusions suivantes concernant l'impact du nombre de voies de circulation sur la sécurité des piétons [74] :

- les carrefours giratoires à une voie sont plus accessibles parce qu'ils ont de faibles vitesses de circulation et il y a une plus grande prédisposition à céder le passage aux piétons ;
- les carrefours giratoires à deux voies sont beaucoup moins accessibles, à moins de changements dans les comportements ou bien des modifications au carrefour. Ils mettent les piétons dans des situations beaucoup plus risquées.

2.3 Autres impacts et caractéristiques

2.3.1 Capacité

Le carrefour giratoire présente un avantage en termes d'arrêts, de retards et de files d'attente, pour autant que le carrefour giratoire opère en-dessous de sa capacité [5]. Un carrefour giratoire dont les débits d'opération sont inférieurs à sa capacité produira des retards plus faibles qu'un carrefour à feu [66]. Selon [5], "les carrefours giratoires sont aussi plus performants qu'un carrefour avec deux panneaux d'arrêt si les mouvements de virage à gauche sont nombreux et les débits sur la route secondaire sont relativement importants".

Il est ainsi généralement admis que l'implantation d'un carrefour giratoire en remplacement d'un carrefour, qu'il soit équipé de feux de signalisation ou pas, engendre une hausse de la capacité et une réduction des retards [58, 64]. La capacité d'un carrefour giratoire varie selon le nombre de voies de circulation (sur les approches et l'anneau) : la capacité d'un carrefour giratoire à une voie se situe entre 20000 et 25000 véhicules par jour, et celle d'un carrefour giratoire à deux voies est entre 35000 et 40000 véhicules par jour [6].

2.3.2 Insertion dans le milieu existant

Le carrefour giratoire permet d'assurer une transition entre deux milieux (changement de l'occupation du sol, du type de route, etc.) [5]. En effet, les carrefours giratoires peuvent aider à réduire les vitesses et peuvent être utiles dans le cas de changement de limites de vitesses, par exemple quand une route rurale entre dans une ville [63].

L'implantation de carrefours giratoires au Québec nécessite de tenir compte des spécificités locales, qu'il s'agisse des usagers ou du climat. En effet, une des particularités québécoises est son climat nordique, avec d'importantes accumulations de neige. Il faut donc accorder une attention particulière à l'entretien hivernal. Le déneigement est plus critique, sans nécessairement être plus problématique.

Par ailleurs, étant donné que les carrefours giratoires sont récents au Québec, il est important de faire une campagne de communication lors de l'implantation d'un carrefour giratoire, surtout s'il s'agit de la première implantation dans une région. Il est aussi intéressant de commencer l'implantation des carrefours giratoires avec des carrefours simples (par exemple à une voie), pour habituer les usagers au principe de fonctionnement de ce type d'intersection [58].

2.3.3 Pollution atmosphérique

Dans une étude réalisée à Vaxjo, en Suède sur la conversion de 21 intersections en carrefours giratoires, il a été observé que les émissions de polluants (CO et NOx) augmentent de 4 à 6 % en convertissant une intersection non signalisée en carrefour giratoire, et elles diminuent de 20 à 29 % en faisant la conversion d'une intersection signalisée [40].

2.3.4 Géométrie

L'implantation d'un carrefour giratoire peut s'avérer intéressante pour les intersections non conventionnelles. En effet, le carrefour giratoire permet de gérer plus simplement l'intersection de plus de 4 approches. Les problèmes propres aux intersections en angles peuvent aussi être éliminés par l'implantation d'un carrefour giratoire [12].

Des angles trop importants entre les approches peuvent nécessiter un diamètre de carrefour giratoire plus grand. Dans le meilleur des cas, les branches sont perpendiculaires. On intervient généralement à partir de 105 degrés [68].

3 Méthodologie

Ce projet a reposé sur plusieurs méthodes complémentaires pour étudier l'impact des carrefours giratoires sur le comportement et la sécurité des usagers de la route, motorisés ou non (piétons et cyclistes).

3.1 Description des carrefours giratoires

Le plan et les termes standards d'un carrefour giratoire ont été présentés dans la Figure 1. Un principe original d'analyse complémentaire des carrefours giratoires est proposé : il consiste à diviser les carrefours giratoires en quadrants selon les approches tel que décrit dans la Figure 3. Par construction, la plupart des accidents et interactions (conflits) se déroule indépendamment dans chaque quadrant. Ce découpage met aussi en avant l'importance des mouvements d'entrecroisement entre les véhicules entrant et les véhicules sur l'anneau, ainsi qu'entre les véhicules restant sur l'anneau et les véhicules sortant du carrefour : le carrefour giratoire offre ainsi à chaque quadrant une zone d'entrecroisement plus ou moins longue avec des mouvements similaires aux zones du même nom lors d'entrées-sorties rapprochées sur autoroute. L'échelle du quadrant permet de considérer des unités d'analyse plus petites que l'ensemble du carrefour qui sont plus facilement comparables d'un carrefour à un autre, puisque les carrefours peuvent différer par exemple par l'angle entre les routes d'approche ou le nombre d'approches. Cela simplifie aussi la collecte de données vidéo qui peut ainsi être effectuée avec une caméra traditionnelle placée sur le bord d'une approche.

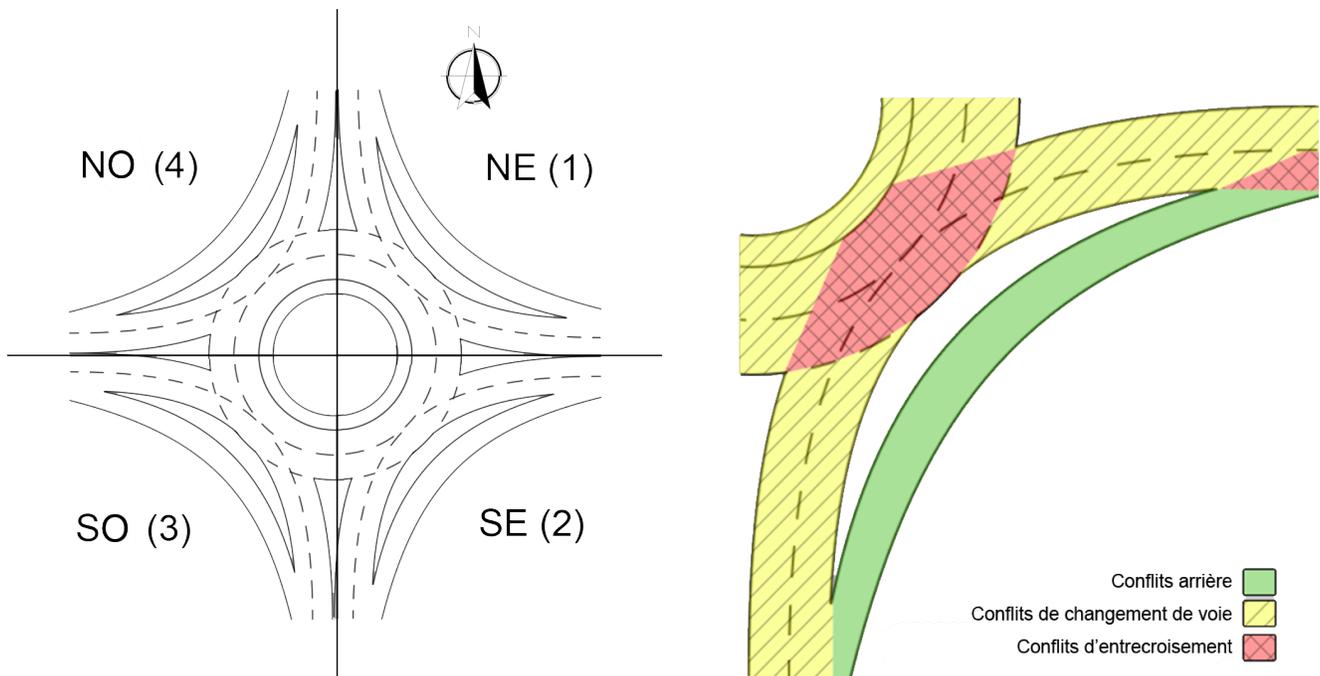


FIGURE 3 – Division d'un carrefour giratoire en quadrants : division typique en 4 quadrants délimités par des approches à angle droit (à gauche) et différents types d'interactions (conflits) entre véhicules dans un quadrant (à droite)

Une base de données a été constituée avec les informations générales suivantes sur chaque

carrefour recensé :

- localisation du centre du carrefour
- municipalité
- présence sur le réseau supérieur du MTQ
- direction territoriale du MTQ
- environnement et occupation du sol (valeurs possibles d'occupation du sol : terrain vague/MTQ, résidentielle, commerciale, industrielle, mixte, institutionnelle)
- construit ou planifié
- date de construction (souvent seule l'année est connue)
- nombre de voies sur l'anneau circulaire
- présence d'une bande franchissable (et largeur si présence)
- diamètre intérieur et extérieur du carrefour giratoire
- vitesse recommandée sur l'anneau
- nombre d'approches
- classification fonctionnelle des approches (valeurs possibles : route privée, collectrice, artère, autoroute régionale, bretelle d'accès)
- densité de population (valeurs possibles : aucune (terrain vague), faible (logements détachés), moyenne (logements en bandes, de 2-3 étages au maximum), forte (immeubles de plus de 3 étages) [4])

De plus, les caractéristiques des approches et des quadrants ont été relevées : ces deux organisations étant duales, le quadrant a été choisi comme unité d'analyse car il est plus adapté pour l'analyse des interactions entre véhicules par vidéo. La plupart des paramètres déjà mentionnés sont déclinés au niveau du quadrant et sont représentés sur les Figures 4 et 5 :

- `n_start_lanes` : nombre de voies sur l'anneau au début du quadrant
- `n_end_lanes` : nombre de voies sur l'anneau à la fin du quadrant
- `n_app_lanes` : nombre de voies sur l'approche entrante du quadrant
- `n_exit_lanes` : nombre de voies sur l'approche sortante du quadrant
- `n_slip_lane` : nombre de voies de contournement (canalisées)
- `b_app_med_type` : type d'îlot séparateur à l'entrée du quadrant (surélevé, peint, hybride)
- `a_quad_size` : taille angulaire du quadrant
- `r_in_start` : rayon intérieur
- `r_out_start` : rayon extérieur
- `w_appron` : largeur de la bande franchissable
- `d_app_inter` : distance entre le carrefour giratoire et le carrefour amont (distances entre les chaussées annulaires)
- `app_speed_limit` : limite de vitesse sur l'approche entrante du quadrant

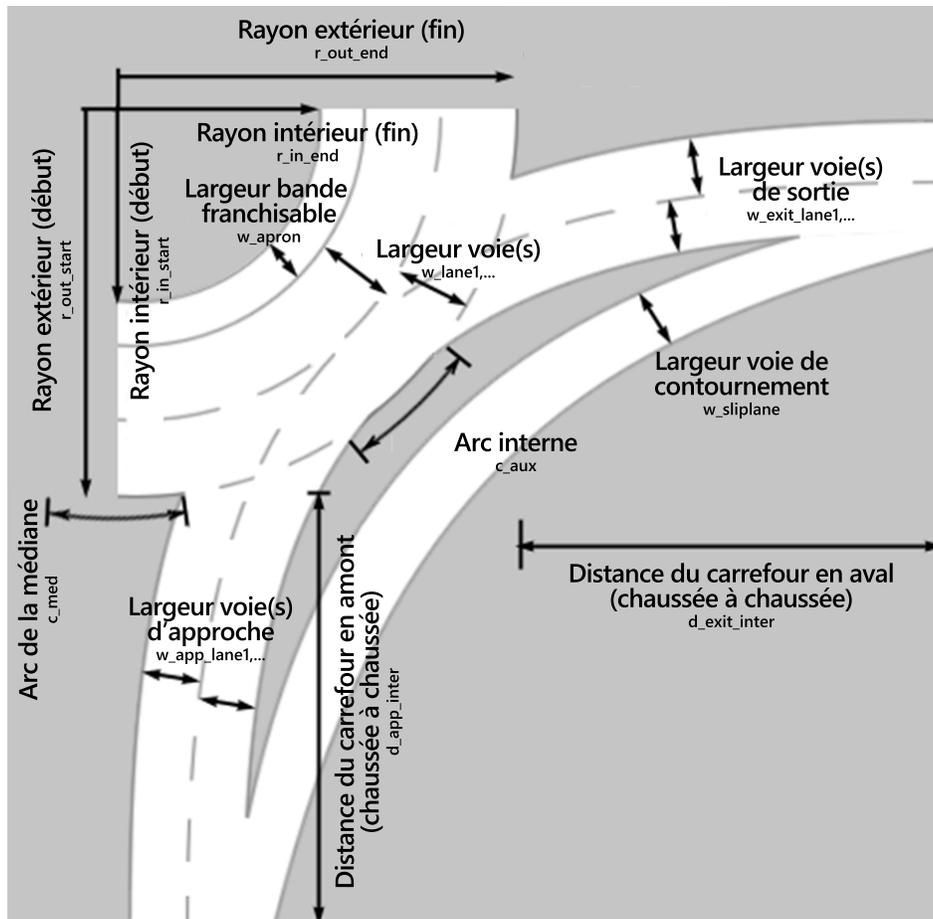


FIGURE 4 – Schéma des distances caractéristiques d'un quadrant

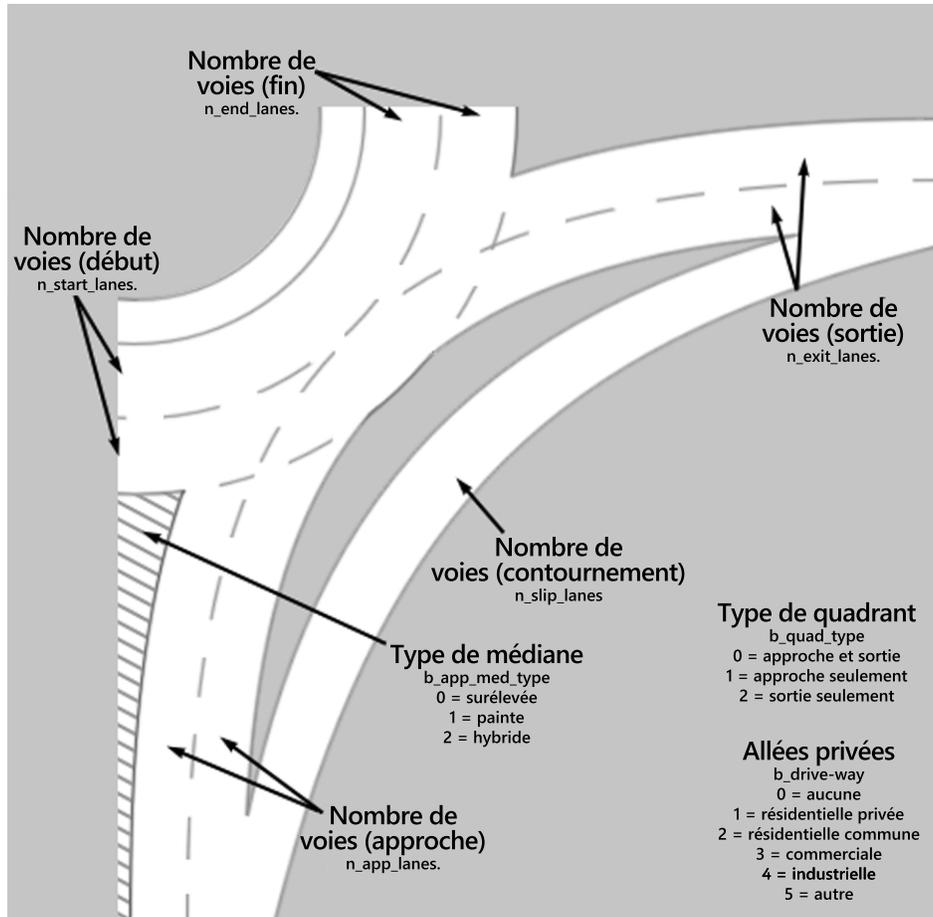


FIGURE 5 – Schéma des caractéristiques d'un quadrant

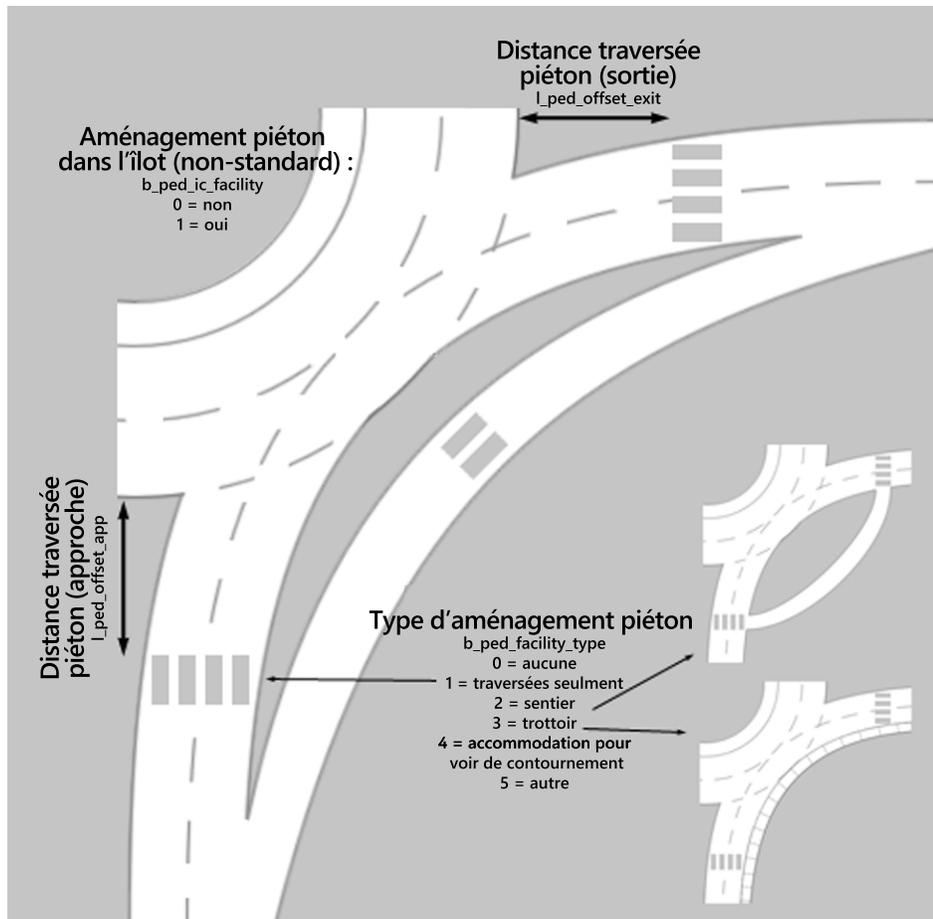


FIGURE 6 – Schéma des caractéristiques des aménagements pour les piétons sur un quadrant



FIGURE 7 – Schéma des caractéristiques de la signalisation sur un quadrant

Ces variables sont utilisés dans la suite et en particulier dans les modèles statistiques qui mettent en relation ces caractéristiques, le comportement et la sécurité des usagers. Les caractéristiques des aménagements pour piétons et de la signalisation ont aussi été considérées et sont décrites dans les Figures 6 et 7 (les aménagements pour les cyclistes ont aussi été relevés le cas échéant, mais ne sont pas représentés sur une figure).

La base de données a été constituée à partir de diverses sources telles que des fichiers du MTQ, des plans de constructions obtenus auprès des municipalités, des visites “virtuelles” (à l’aide des outils Google Maps³ et Google Street View⁴) et sur le terrain. L’inventaire ainsi qu’une carte des carrefours giratoires est visible sur le site Internet du projet⁵ (le site n’a pas été mis à jour depuis début 2013).

La méthode de classification non-supervisée des k-moyennes [17] a été employée pour identifier les grandes catégories de quadrants selon les principales caractéristiques listées ici et quelques caractéristiques de la circulation observée : une telle catégorisation permet de décrire de façon plus simple les échantillons de site analysés.

3.2 Analyse des accidents

Deux ensembles de données d’accident ont été mis à notre disposition pour le projet :

1. les accidents survenus entre 2000 et 2010 inclusivement sur 28 carrefours giratoires du réseau du MTQ construits entre 2002 et 2009 ;
2. les accidents survenus entre 2000 et 2011 inclusivement sur le réseau routier de 21 municipalités du Québec ayant au moins un carrefour giratoire.

Si le premier ensemble de données “MTQ” est géolocalisé (i.e. la position approximative du lieu de l’accident est connue au moyen d’une coordonnée géographique, par exemple en latitude/longitude), ce n’est pas le cas pour le second ensemble de données “municipal”. La précision de la localisation des accidents est importante car leur analyse repose généralement en partie sur la mise en relation avec des éléments du réseau (carrefours et routes) et leurs caractéristiques. Des travaux préliminaires ont donc été nécessaires pour effectuer de façon aussi automatique que possible la localisation des accidents de l’ensemble municipal, afin d’identifier les accidents qui se sont produits dans ou à proximité des carrefours giratoires, ainsi que des sites de contrôle.

3.2.1 Localisation automatique des accidents

Il existe plusieurs méthodes et solutions logicielles pour la localisation des accidents à partir des informations textuelles d’adresse ou de distance sur une route à un point de référence comme un carrefour ou un marqueur routier. La difficulté de cette tâche provient de l’absence de standardisation des champs textuels de description de la localisation et de leur qualité variable, selon le lieu de l’accident et le soin apporté à leur saisie. Le processus de géolocalisation consiste généralement en trois étapes [30] :

1. standardisation des données (incomplètes, fautes d’orthographe, utilisation de notation, raccourcis et différents noms pour désigner le même lieu) ;

3. <http://maps.google.com/>

4. <https://www.google.com/maps/views/>

5. <http://giratoires.confins.net>

2. mise en correspondance des adresses avec les données géographiques de référence ;
3. génération de la localisation finale de l'accident (coordonnées spatiales).

Deux grands types d'erreur sont possibles : erreur de précision spatiale (distance entre l'emplacement réel de l'accident et le résultat) et erreur complète (très grande distance entre l'emplacement réel de l'accident et le résultat). Les causes de ces erreurs sont multiples, par exemple la qualité des méthodes de standardisation et de mise en correspondance ou la qualité des données géographiques de référence. Une autre mesure de qualité est la proportion d'accidents localisés par la méthode (ce qui ne veut pas dire que les accidents ont été correctement localisés).

Ces méthodes appartiennent à deux grandes catégories, les méthodes déterministes et probabilistes : les méthodes déterministes retournent seulement un résultat, qui peut être un échec, tandis que les méthodes probabilistes retournent une liste de solutions possibles, selon un score décroissant de correspondance.

Si certains systèmes d'information géographique comprennent des outils de géolocalisation, il sont coûteux et peu flexibles et il a été choisi d'évaluer l'utilisation des services Internet de requête en ligne, ou "web" "Application Programming Interface" (API). Les APIs considérées pour ce travail sont celles des compagnies Yahoo!⁶, MapQuest⁷, Google Maps⁸, ainsi que les services gratuits et libres (code "open source") Gisgraphy⁹ et Nominatim¹⁰ qui reposent sur les données de OpenStreetMap¹¹.

Plusieurs facteurs ont été pris en compte pour choisir le service, comme la couverture spatiale (incluant le Québec), le niveau de détail et la fiabilité du résultat. Plusieurs tests furent effectués pour ce choix. La comparaison a été simplifiée par un outil disponible sur le site de Gisgraphy¹². Un exemple de comparaison est montré dans la Figure 8. Le Tableau 3 montre cinq cas d'adresses d'accidents survenus dans la municipalité d'Amos. Nominatim n'est pas indiquée dans le tableau car elle n'a retourné aucun résultat valide, ce qui a pu être lié à une erreur de notre part. Gisgraphy est aussi écarté à cause de la mauvaise qualité des résultats : aucun ne tombait même dans la municipalité d'intérêt. Yahoo! et MapQuest ont la même performance, avec seulement la moitié des cas. Le service de Google Maps a été finalement choisi car il retourne le plus de résultats qui semblent aussi de meilleure précision. Cette API est aussi très adaptée car elle accepte en entrée différents formats d'information de localisation, que ce soit une adresse ou une distance à un point de référence. Le dernier cas proposant une adresse incomplète a donné lieu à des résultats incertains pour Yahoo!, MapQuest et Google Maps.

L'algorithme de géolocalisation a été écrit dans le langage Python. Comme on peut le voir dans la Figure 9, le programme lit en entrée un fichier d'accidents et interprète les champs de texte décrivant la localisation de l'accident. Les champs utilisés sont les suivants :

- ADR_NUMR_IMMBL : numéro sur la rue d'un bâtiment à proximité de l'accident
- ADR_NOM_VOIE : nom de la rue
- VAL_NUMR_ROUTE : numéro de route inscrit sur le rapport d'accident, si applicable
- NOM_VOIE_INTSC : nom de la rue transversale si l'accident a eu lieu dans un carrefour ou à proximité

6. <https://developer.yahoo.com/boss/geo/>

7. <http://developer.mapquest.com/web/products/dev-services/geocoding-ws>

8. <https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/>

9. <http://www.gisgraphy.com/>

10. <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Nominatim>

11. <http://www.openstreetmap.org>

12. <http://www.gisgraphy.com/compare/>

Tableau 3 – Comparaison des différentes APIs sur 5 cas dans la ville d’Amos (Inc indique que la localisation est incertaine, Lon. et Lat. indiquent respectivement la longitude et latitude de la localisation identifiée) : une localisation est considérée valide si à une distance acceptable de l’adresse réelle

Adresse (à Amos, Québec)	Google Maps			Yahoo!			MapQuest			GISgraphy		
	Lon.	Lat.	Valide	Lon.	Lat.	Valide	Lon.	Lat.	Valide	Lon.	Lat.	Valide
Des Metiers et Av Du Parc	-78.1229	48.5608	Oui	-78.1231	48.5607	Oui	-78.1231	48.5607	Non	-73.7058	45.5531	Non
343 6e Rue Ouest	-78.1309	48.5693	Oui	-78.0121	48.611	Non	-78.1311	48.5686	Oui	-73.8667	45.548	Non
94 Principale Sud et Du Metro	-78.1158	48.5697	Oui	-78.0121	48.611	Non	-78.116	48.5736	Non	-73.3233	45.3214	Non
4e Rue Est et Gravel	-78.1063	48.565	Oui	-78.1065	48.5649	Oui	-78.1065	48.5649	Oui	-73.6299	45.6001	Non
82 1e	-78.133	48.5731	Inc	-78.1133	48.5719	Inc	-78.1176	48.5719	Inc	78.1064	48.5659	Non

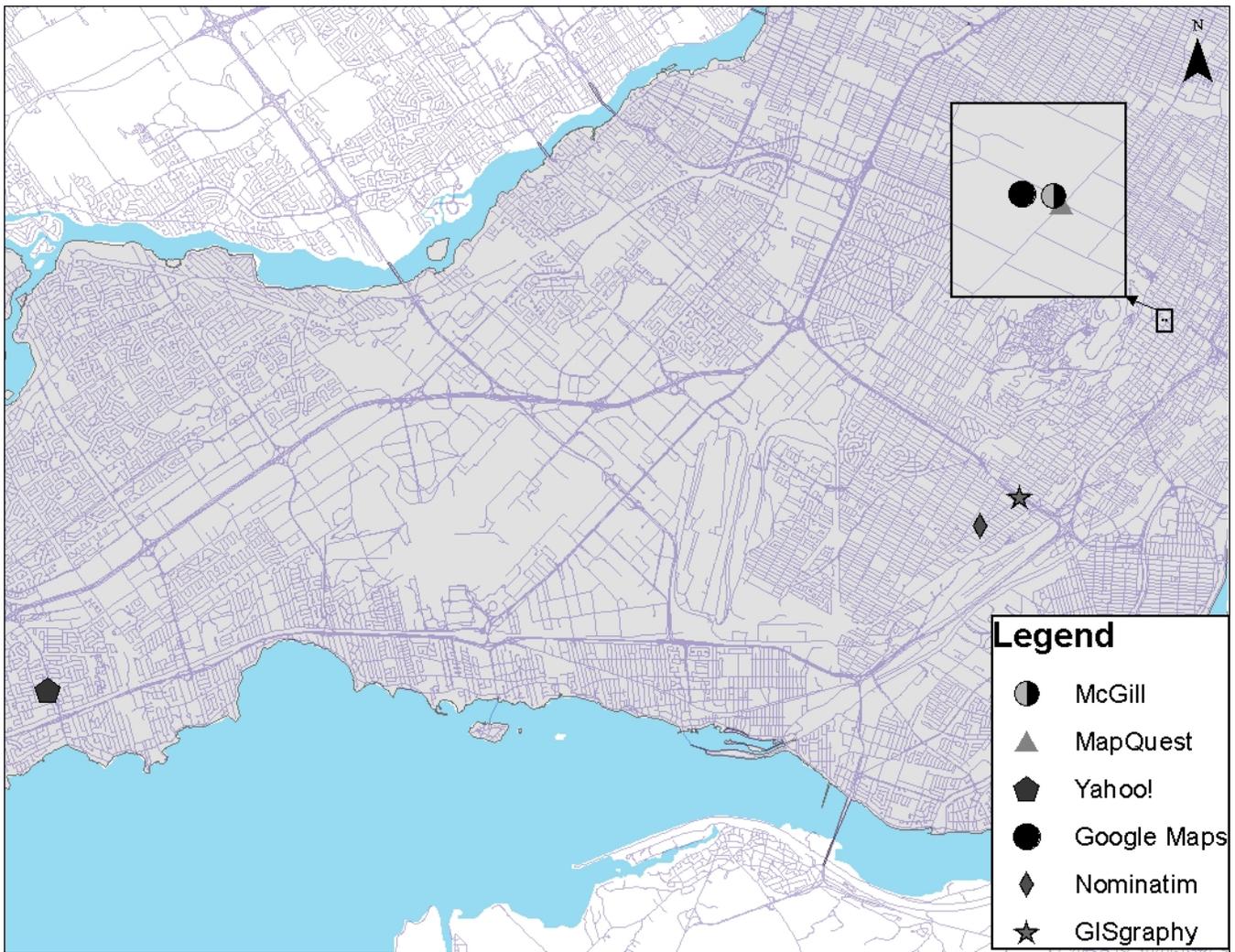


FIGURE 8 – Comparaison de plusieurs APIs pour l’adresse de l’Université McGill

- VAL_AUTRE_IDENT_REPR : nom d’une autre référence géographique si disponible
- VAL_DISTN_REPR : distance (en mètres) au carrefour ou à la référence
- DES_TYPE_DIRCT : direction du point de référence vers le lieu de l’accident (si la distance est non nulle)

L’algorithme nettoie en premier les champs d’adresse en supprimant les informations redondantes (e.g. par exemple répétée dans plusieurs champs) et en corrigeant les caractères spéciaux (e.g. caractères en majuscule, caractères accentués qui peuvent être mal interprétés et la ponctuation). L’algorithme peut aussi remplacer des mots fréquemment mal orthographiés, selon le choix de l’utilisateur.

L’étape suivante consiste à appeler l’API de géolocalisation de Google Maps à l’aide d’un message de requête “Hypertext Transfer Protocol” (HTTP). Un avantage particulier est qu’il n’est pas nécessaire d’identifier les composants de l’adresse (e.g. le nom de rue, de ville) : l’ensemble des informations de localisation est passé et interprété par les outils de Google Maps, selon sa base de données géographiques propriétaire. Ces traitements sur les serveurs de Google Maps simplifient grandement la tâche de l’utilisateur.

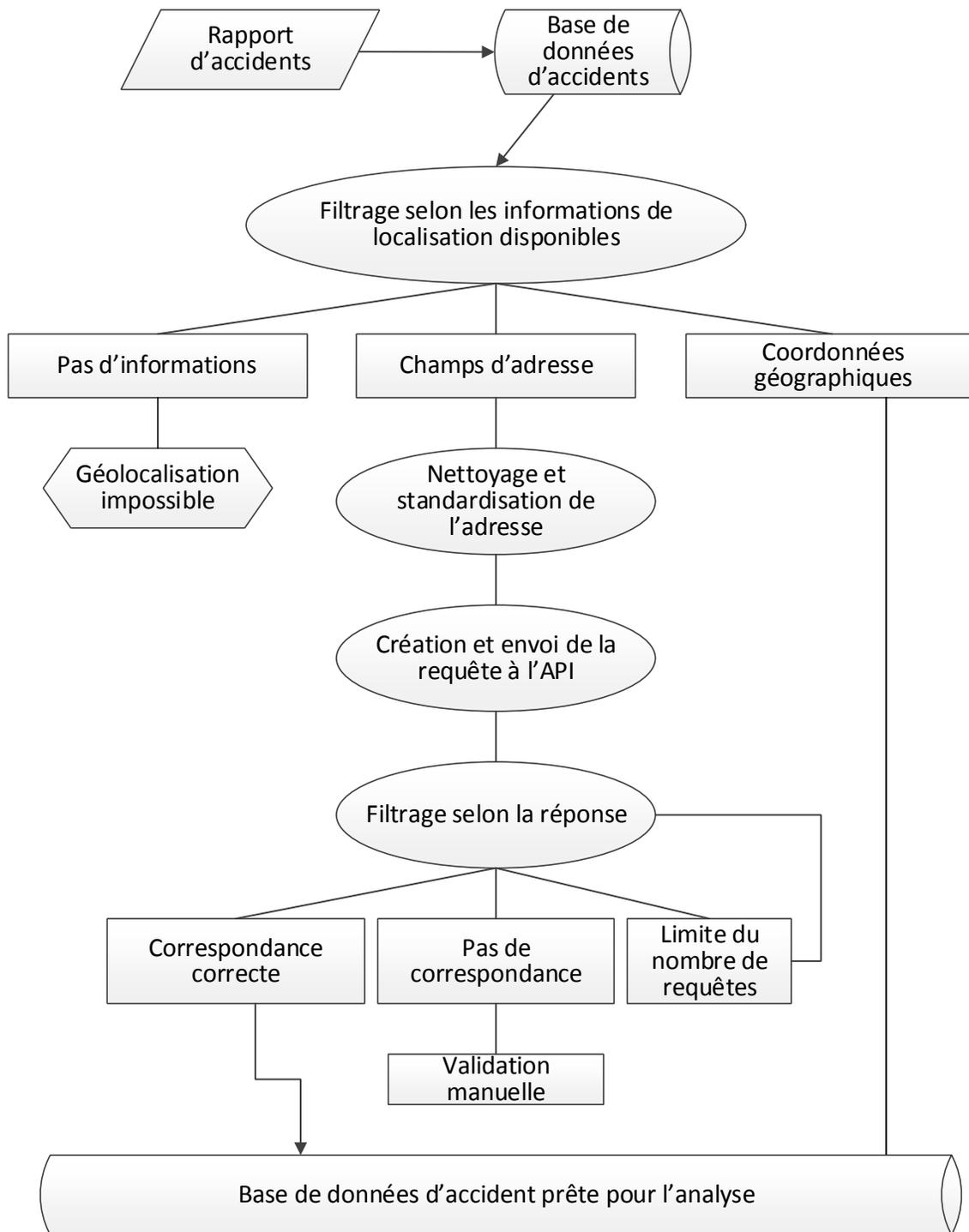


FIGURE 9 – Diagramme illustrant la méthode de géolocalisation implémentée dans le langage Python

Le résultat de la requête peut être au format JSON (“JavaScript Object Notation”) ou XML (“eXtended Markup Language”). Pour évaluer la précision de la localisation identifiée par l’outil de Google Maps, le résultat inclut un attribut indiquant son type de précision, qui peut être une des catégories suivantes :

- “street_address” : indique que le résultat est une adresse précise avec numéro et nom de rue
- “intersection” : indique que le résultat est à un carrefour de deux rues
- “route” : indique que le résultat est une route nommée
- “political”, “country”, “administrative_area_level_1”, “administrative_area_level_2”, “administrative_area_level_3”, “locality”, “sublocality”, “neighborhood” : indique que le résultat est à l’intérieur d’une entité civile ou politique (e.g. municipalité, province, etc.)
- “colloquial_area”, “premise”, “subpremise” : indique que le résultat est un lieu nommé, e.g. le nom d’un bâtiment
- “postal_code” : indique que le résultat est une zone postale
- “natural_feature”, “airport”, “park” : indique qu’il s’agit respectivement d’un site naturel, un aéroport ou un parc
- “point_of_interest” : indique que le résultat est un lieu d’intérêt local qui ne correspond à aucune autre catégorie

Les réponses de l’API sont classées en ordre décroissant de correspondance, de la plus précise à la moins précise. Pour les besoins de ce travail, seuls les trois premières catégories (“street_address”, “intersection” et “route”) sont considérées comme utiles et les autres sont ignorées. La catégorie “route” est moins précise que les deux premières car elle indique seulement que l’accident s’est produit sur une route donnée : l’hypothèse a été faite cependant que cela pouvait être interprété comme indiquant que l’accident ne s’est pas produit à un carrefour, et doit donc être exclus de toute analyse de la sécurité à des carrefours.

Une fois les accidents localisés spatialement avec cette méthode automatique, les accidents sans localisation ont été investigués manuellement afin d’identifier des accidents survenus très probablement dans des carrefours giratoires qui furent rajoutés à l’ensemble de données analysé. De façon similaire, les accidents furent filtrés pour identifier les accidents survenus hors du réseau routier, par exemple dans des parcs de stationnement, qui ne sont pas associés aux types d’aménagements étudiés (les carrefours).

La prochaine étape est d’importer les données d’accident dans un système d’information géographique afin de filtrer les accidents qui se sont produits dans la zone d’influence d’un carrefour giratoire (ou d’un carrefour d’un autre type pour les sites de comparaison), c’est à dire la zone dans laquelle les conducteurs commencent à réagir aux caractéristiques du carrefour et de sa périphérie. La zone tampon pour filtrer les accidents était initialement un cercle centré sur chaque carrefour giratoire de rayon 100 m : comme les aménagements pour un carrefour giratoire commencent en amont de l’anneau (diminution de la limite de vitesse, début des terre-pleins centraux, courbes successives inversées, etc.), la zone d’influence est plus grande que ne le serait une zone d’influence habituelle pour un carrefour d’un autre type. Cette valeur de rayon est dans l’intervalle de valeurs utilisées dans la littérature (et la même que dans[18] par exemple). La zone tampon a ensuite été ajustée pour chaque carrefour giratoire : la nouvelle zone tampon prend en compte le tracé et la signalisation du carrefour giratoire pour établir la zone d’influence la plus représentative, tout en maintenant la zone tampon circulaire d’un rayon de 100 m comme

la zone d'influence maximale pour tous les carrefours giratoires. Pour chaque approche, la zone tampon est la plus petite zone de la zone tampon initiale de 100 m et du point le plus éloigné sur l'approche avec un aménagement spécifique au carrefour giratoire. On considère que tout élément d'infrastructure spécifique à un carrefour giratoire pourrait influencer l'occurrence d'un accident à proximité. Un exemple de zone tampon ajustée pour deux carrefours giratoires de la municipalité d'Amos est montré dans la Figure 10. Tout accident localisé à l'intérieur de la zone tampon d'un carrefour giratoire est considéré dans la zone d'influence du carrefour, c'est à dire que son occurrence pourrait être associée au carrefour giratoire et à ses caractéristiques. Une attention particulière a été portée dans le cas où un autre carrefour se trouve dans la zone d'influence d'un carrefour giratoire : les accidents ont été examinés de sorte à ne considérer que les accidents potentiellement influencés par le carrefour giratoire, selon la proximité de l'accident aux carrefours, la direction du déplacement des véhicules impliqués, etc.



FIGURE 10 – Exemple de zones tampon ajustées prenant en compte la zone d'influence des carrefours giratoires dans la municipalité d'Amos

Une fois les accidents localisés, une analyse de la fréquence (nombre) des accidents a été effectuée selon deux méthodes :

1. une comparaison avant-après la construction d'un sous-ensemble de carrefours giratoires,
2. un modèle de régression binomiale négative pour identifier les facteurs associés avec l'occurrence des accidents dans les carrefours giratoires

3.2.2 Analyse avant-après de la fréquence des accidents

La méthode naïve d'analyse de la sécurité d'un site avant-après compare le nombre d'accidents qui se sont produits sur le site dans les périodes avant et après : la différence est attribuée à

l'aménagement du site (le traitement) effectué entre les deux périodes. Cette approche souffre du problème de régression vers la moyenne et ne prend pas en compte les facteurs temporels et les autres facteurs non-observés. Le phénomène de régression vers la moyenne se produit lorsque des sites avec un nombre anormalement élevé d'accidents sont ciblés pour des aménagements de sécurité. Une baisse du nombre d'accidents tend à se produire à ces sites après les aménagements, puisque le nombre d'accident au site retourne "naturellement" vers leur moyenne sur le long terme. Toute comparaison avant-après d'aménagement effectués pour améliorer la sécurité peut être affectée par ce phénomène s'il n'est pas pris en compte.

Une méthode plus appropriée est l'analyse avant-après avec des groupes de comparaison : la méthode capture les effets des facteurs non-observés dans le groupe de comparaison et permet une meilleure prédiction du nombre attendu d'accidents dans la période après. Cette méthode ne permet cependant pas de prendre en compte le phénomène de régression vers la moyenne. C'est pourquoi la méthode bayésienne empirique ("Empirical Bayes", EB) est préférée car elle prend en compte ce phénomène. Les trois méthodes sont illustrées dans la Figure 11 : la méthode EB repose sur une régression statistique pour déterminer l'influence de différents facteurs sur le nombre d'accidents appelée fonction de performance. De cette façon, la méthode EB prend en compte le caractère aléatoire inhérent aux accidents en établissant une relation entre le nombre d'accidents et des facteurs prédictifs comme le débit [89]. La méthode EB est largement utilisée dans la littérature sur la sécurité des carrefours giratoires, par exemple dans une récente étude historique de la réduction des taux d'accident dans des carrefours giratoires aux États Unis [31], mais encore peu au Canada.

Bien que la méthode EB soit la méthode recommandée pour une étude avant-après, les ensembles de données à notre disposition n'ont pas permis d'employer cette méthode, en particulier à cause du manque de données d'exposition pour les périodes avant et après la construction des carrefours giratoires (convertis à partir d'un carrefour existant au préalable). En l'absence de comptages de circulation suffisants pour estimer le débit journalier moyen annuel (DJMA), il est impossible d'estimer une fonction de prédiction du nombre d'accidents. C'est pourquoi l'approche employée dans ce travail est une étude avant-après avec un groupe de contrôle comparable dans le but de prendre en compte les évolutions temporelles pendant la période d'analyse et les effets de facteurs autres que le traitement (la conversion en carrefour giratoire). Les résultats de cette analyse doivent ainsi être pris avec des précautions.

L'étape suivante pour l'analyse avant-après est de catégoriser les accidents selon leur date par rapport à la date de construction du carrefour giratoire. Du fait de l'incertitude sur la date exacte de construction de la plupart des carrefours giratoires, un intervalle de ± 6 mois autour de la date de construction a été utilisé. Cet intervalle a été choisi pour simplifier les hypothèses lorsque seule la date de construction est connue : dans ces cas, l'année entière, du 1er janvier au 31 décembre de l'année, est considérée comme la période de construction. Le carrefour giratoire est supposé complètement opérationnel après la période de construction. De plus, l'intervalle relativement large considéré pour la période de construction permet de prendre en compte la période d'adaptation des conducteurs à un nouvel aménagement, qui peut être associée avec un nombre d'accidents plus élevé et pourrait mener à des conclusions faussées. La catégorisation des accidents selon la période de construction de chaque carrefour giratoire mène à ignorer plusieurs sites pour l'analyse finale : les sites dont la date de construction est inconnue, avec aucun accident dans les périodes pré- ou post-construction, ou avec des périodes pré- ou post-construction de longueur inférieure à un an. Une période de moins d'une année est trop sensible à des erreurs du fait du caractère aléatoire des accidents.

Il faut ensuite sélectionner les sites de comparaison, i.e. des sites non traités (non convertis en

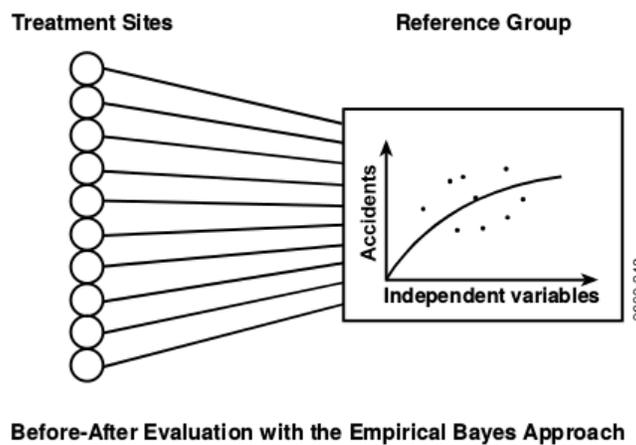
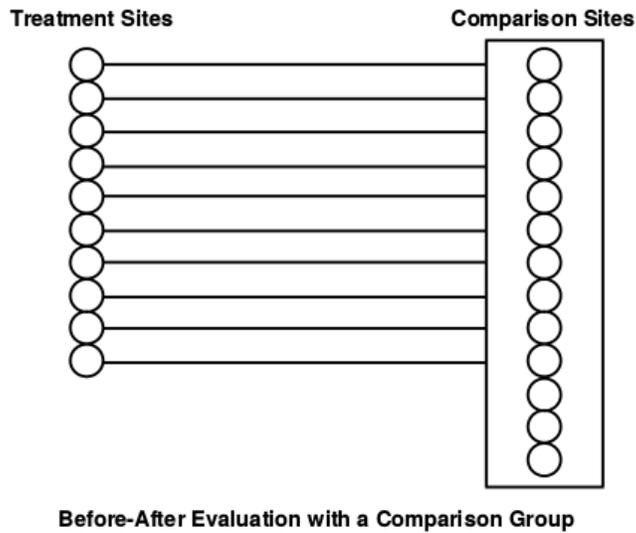
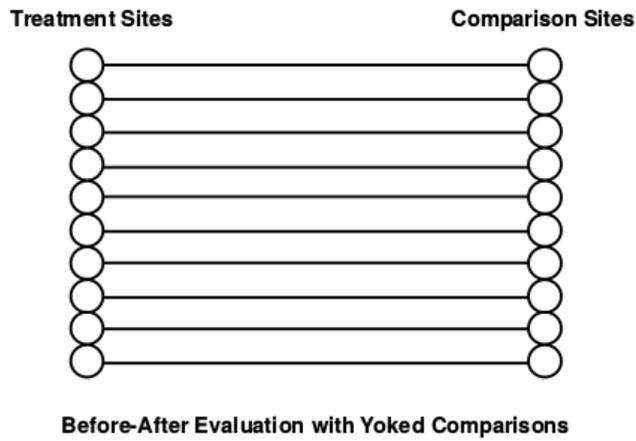


FIGURE 11 – Illustration des trois catégories de méthodes d’analyse avant-après (tirée de [35]) : méthode naïve (en haut), avec groupe de contrôle (au milieu) et bayésienne empirique (en bas)

carrefours giratoires) avec des caractéristiques aussi proches que possible de chaque carrefour giratoire. Puisque de tels sites sont rares et que les caractéristiques des sites trouvés peuvent n'approximer que partiellement les caractéristiques de chaque carrefour giratoire, un groupe de comparaison est utilisé pour chaque carrefour giratoire dans la même municipalité. Le principe est de moyenniser le nombre d'accidents dans un groupe de comparaison pour compenser les effets individuels de chaque site et obtenir une estimation de la tendance de l'évolution du nombre des accidents (affectée par des facteurs environnementaux comme les changements de circulation, etc.). En utilisant le groupe de comparaison comme base d'analyse, il est possible d'extrapoler les effets de la conversion du carrefour giratoire sur la sécurité d'un site particulier.

Les facteurs considérés pour sélectionner les sites de comparaison sont les suivants : le type de contrôle du carrefour, le nombre d'approches, la classification fonctionnelle des approches, l'occupation du sol et les caractéristiques physiques (nombre des voies, largeurs, etc.). La Figure 12 illustre des sites de comparaison possibles pour deux carrefours giratoires à Amos : les sites ont des caractéristiques similaires à leurs carrefours giratoires respectifs, mais il existe des différences de géométrie, d'occupation du sol et de type de circulation. Ceci est d'autant plus difficile que les carrefours giratoires sont souvent installés sur des sites et dans des environnements distincts tels qu'aux entrées de ville/village, dans les échangeurs des autoroutes et aux croisements d'une ou plusieurs routes du réseau supérieur (routes numérotées). C'est pourquoi il est souvent difficile de trouver des carrefours similaires dans les petites municipalités rurales où les carrefours giratoires sont souvent construits.

Un ensemble de dix sites de comparaison a été initialement identifié pour chaque groupe de comparaison (pour chaque carrefour giratoire), afin d'avoir un ensemble de sites assez grand pour la sélection finale des sites de comparaison et d'avoir des estimés plus précis. Cependant, au fur et à mesure de la progression de l'analyse, plusieurs sites ont été écartés parce que leurs périodes pré- ou post-construction étaient trop courtes, ou que le nombre d'accident dans la période pré-construction était de plusieurs ordres de grandeur plus grand ou petit que celles observées aux autres carrefours, giratoires et de comparaison (une telle différence pouvant indiquer d'autres incompatibilités entre les sites). Dans tous les cas, au moins deux sites de comparaison ont été utilisés pour chaque carrefour giratoire, et dans la majorité des cas, le groupe de comparaison comprenait entre quatre et six sites.

Bien qu'aucune donnée d'exposition ne soit disponible pour cette analyse, il est possible de faire l'hypothèse que le nouveau carrefour giratoire (après conversion du carrefour pré-existant) doit servir des débits de circulation égaux ou plus grands que ceux attendus avant la conversion, avec une augmentation de la circulation probable si aucune autre modification du réseau n'a eu lieu à proximité pendant la période d'étude. Cette hypothèse permet de commenter les résultats de l'analyse.

En utilisant les groupes de comparaison identifiés dans l'approche avant-après, le nombre d'accidents $\hat{\pi}$ si aucun traitement n'avait été appliqué à un carrefour donné estimé défini de la façon suivante [36, 35] :

$$\hat{\pi} = \hat{r}_c r_d K \quad (1)$$

où

- $\hat{r}_c = \frac{N/M}{1+1/M}$ est le rapport du nombre d'accidents dans les périodes avant et après pour le groupe de comparaison ;
- $r_d = \frac{t_a}{t_b}$ est le rapport des durées des périodes avant et après utilisées pour ajuster les données aux période de durées différentes ;

FIGURE 12 – Exemple de sites de comparaison pour les carrefours giratoires de la route R111 avec la rue principale (en haut à gauche) et la route R111 avec la 4ème rue (en bas à gauche) à Amos (images tirées de Google Maps)



- K et M sont les nombres d'accidents dans les périodes avant respectivement du site traité et du groupe de comparaison ;
- N est le nombre d'accidents dans la période après du groupe de comparaison.

Le nombre d'accidents attendu à un site si le carrefour giratoire n'avait pas été construit (sous l'hypothèse de débit constant dans le temps) est prédit en multipliant le nombre d'accidents de la période avant par le rapport du nombre d'accident du groupe de comparaison dans la période après sur le nombre dans la période avant. La différence du nombre d'accidents $\hat{\delta}$ causée par la construction du carrefour giratoire (le traitement) à un site donné est la suivante :

$$\hat{\delta} = \hat{\pi} - \hat{\lambda} \quad (2)$$

où $\hat{\lambda}$ est le nombre d'accidents après le traitement. Sous cette forme, si la différence $\hat{\delta}$ est positive, on estime qu'il y a une réduction du nombre d'accidents dans la période après ; sinon,

on estime qu'il y a une augmentation du nombre d'accidents. L'indice d'efficacité $\hat{\theta}$ peut être défini de la façon suivante :

$$\hat{\theta} = \frac{\hat{\lambda}}{\hat{\pi}} \quad (3)$$

L'indice d'efficacité est le rapport entre le nombre observé d'accidents avec le traitement (la conversion en carrefour giratoire ici) et l'estimation du nombre d'accidents si le traitement n'avait pas été appliqué. Pour considérer qu'un traitement est efficace, i.e. améliore la sécurité, il faut que $\hat{\theta} < 1$. Il est possible de déduire la proportion de réduction du nombre d'accidents (en pourcentage) selon la formule suivante :

$$\%Reduction = 100(1 - \hat{\theta}) \quad (4)$$

Cependant, comme il est montré dans [36], la formule précédente pour l'indice d'efficacité $\hat{\theta}$ est un estimé biaisé qui peut être corrigé simplement selon la formule suivante :

$$\hat{\theta} = \frac{\hat{\lambda}/\hat{\pi}}{1 + Var(\hat{\pi})/\hat{\pi}^2} \quad (5)$$

où la variance $Var(\hat{\pi})$ de $\hat{\pi}$ est définie de la façon suivante :

$$Var(\hat{\pi}) = \hat{\pi}^2 \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{M} + \frac{1}{N} + var(\omega) \right) \quad (6)$$

où la valeur $var(\omega)$ est un facteur utilisé pour prendre en compte des groupes de comparaison non-idéaux. Alors qu'un groupe de comparaison idéal aura des tendances annuelles du nombre d'accidents identiques à ce qui est observé dans le groupe traité, ce n'est pas toujours le cas en pratique. Cependant, il est accepté de prendre un facteur relativement petit. Il est recommandé dans [32] d'estimer la variance sans ce facteur, tout en reconnaissant que l'estimation de la variance qui est résulte est basse. La formule simplifiée est $Var(\hat{\pi}) = \hat{\pi}^2 \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{M} + \frac{1}{N} \right)$. De plus, la variance $Var(\hat{\theta})$ de $\hat{\theta}$ peut être calculée de la façon suivante :

$$Var(\hat{\theta}) = \hat{\theta}^2 \frac{\frac{Var(\hat{\lambda})}{\hat{\lambda}^2} + \frac{Var(\hat{\pi})}{\hat{\pi}^2}}{1 + \frac{Var(\hat{\pi})}{\hat{\pi}^2}} \quad (7)$$

De façon à faciliter l'interprétation des résultats, les calculs des indices d'efficacité sont agrégés à l'échelle des groupes de carrefours et de l'ensemble des carrefours. Les calculs sont effectués selon les méthodes de calculs pour des regroupements d'observations présentées dans [36].

3.2.3 Analyse de régression de la fréquence des accidents

Plusieurs modèles de régression du nombre d'accidents en fonction de facteurs explicatifs ont été utilisés dans la littérature [24], mais peu ont été appliqués à des études des carrefours giratoires au Canada. Les accidents étant des événements rares et dont l'occurrence est aléatoire avec de grandes fluctuations sur une période de temps donnée, le nombre d'accidents est typiquement relié par régression avec des facteurs explicatifs par une fonction de lien de Poisson ou binomiale négative. À cause de l'incapacité de la régression de Poisson à représenter la surdispersion du nombre d'accidents (la variance est en général différente de la moyenne, ce qui est une contrainte d'une variable aléatoire suivant une loi de Poisson), la régression binomiale négative est considérée comme mieux adaptée [88].

Les variables indépendantes ou explicatives sont les attributs des carrefours giratoires suivants :

- Attributs binaires :
 - Aménagement paysager sur l'îlot central (0 : aménagement paysager ou 1 : construit/avec une structure)
 - Type de terre-plein sur l'approche (0 : surélevé ou 1 : peint)
 - Présence d'une bande franchissable
 - Type de carrefour giratoire (0 : moderne ou 1 : rond-point converti)
 - Présence d'aménagement piétons ou cyclistes
 - Présence de voie de contournement
 - Présence de voies d'accès à proximité
 - Présence de plus d'un carrefour giratoire dans la municipalité
 - Présence de zones d'arrêt sur une approche (arrêt de bus, zone de dépôt de passagers)
 - Présence d'un feu pour piétons
 - Le carrefour est sur le réseau du MTQ
 - Distance angulaire entre les approches (0 : 90 degrés ou 1 : autre)
 - Configuration de l'approche (0 : perpendiculaire ou 1 : tangentielle)
 - Utilisation de courbes successives sur les approches
- Attributs numériques :
 - Limite de vitesse sur l'approche (km/h)
 - Vitesse recommandée sur l'anneau (km/h)
 - Distance au carrefour le plus proche (m)
 - Diamètre extérieur (m)
 - Nombre de voies d'approche
 - Nombre de voies sur l'anneau

Les variables étudiées dépendent de leur disponibilité dans l'ensemble de données collectées et des variables utilisées dans des études comparables [31, 63]. Il faut noter que d'autres variables étaient disponibles, mais la petite taille de l'ensemble de données ainsi que l'absence de comptages de circulation ne permettaient pas d'étudier un trop grand nombre de variables.

La variable dépendante du modèle est le nombre d'accidents observés sur un carrefour giratoire (après sa construction). Dans le cas de carrefours convertis, cette approche ne tient pas compte des accidents survenus dans la période pré-construction, ce qui permet de considérer des sites qui ne pouvaient être pris en compte dans l'analyse avant-après et résulte en un ensemble de sites un peu plus grand.

Si on suppose que le nombre d'accidents Y_i à un site i suit une distribution de Poisson de moyenne μ_i , la forme générale du modèle de Poisson est la suivante [26] :

$$\mu_i = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_{i,1} + \beta_2 X_{i,2} + \dots + \beta_n X_{i,n}) \quad (8)$$

où $\mathbf{X}_i = X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,n}$ est le vecteur de variables indépendantes considérées dans le modèle et $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ sont les coefficients du modèle à estimer. On peut écrire $E(y_i | \mathbf{X}_i) = \mu_i$.

Dans le modèle binomial négatif, un terme τ_i suivant une distribution $Gamma(\theta, \theta)$ ($E(\tau_i) = 1$ et $Var(\tau_i) = 1/\theta$) est introduit de sorte que $E(y_i|\mathbf{X}_i, \tau_i) = \mu_i\tau_i$. Conditionnellement à \mathbf{X}_i et τ_i , le nombre d'accidents Y_i suit toujours la loi de Poisson. Conditionnellement seulement à \mathbf{X}_i , Y_i suit la loi binomiale négative [26] :

$$P(Y_i = y_i|\mathbf{X}_i) = \left(\frac{\theta}{\theta + \mu_i}\right)^\theta \frac{\Gamma(\theta + y_i)}{y_i! \Gamma(\theta)} \left(\frac{\mu_i}{\mu_i + \theta}\right)^{y_i} \quad (9)$$

L'espérance conditionnelle est μ_i et la variance conditionnelle $\mu_i(1+(1/\theta)\mu_i)$. On pose souvent $\alpha = 1/\theta$ comme terme de dispersion. Les modèles Poisson et binomial négatif sont reliés puisque lorsque α tend vers 0, la distribution binomiale négative tend vers la distribution de Poisson. La régression binomiale négative a été appliquée à l'ensemble de données à l'aide du logiciel de statistique Stata¹³. À cause de différentes dates de construction, les périodes d'analyse changent selon le site. Ces périodes d'exposition de différentes durées doivent être prises en compte, ce qui est fait dans Stata avec l'option "offset" appliquée au logarithme de la variable d'exposition, c'est à dire le nombre d'années de la période post-construction pour chaque site¹⁴.

3.2.4 Analyse de la gravité des accidents

À notre connaissance, ce travail est la première étude sur la gravité des accidents en Amérique du Nord (Canada et États-Unis). Une autre étude a été effectuée en Flandre, Belgique [20]. L'analyse de la gravité des accidents et des blessures de chaque personne impliquée dans un accident a reposé sur un modèle logit, prédisant soit des blessures mortelles, soit des blessures mortelles ou graves. Les résultats montrent que la gravité d'un accident dépend fortement du type d'utilisateur impliqué, et qu'en particulier les usagers vulnérables (piétons, cyclistes, conducteurs de deux roues motorisés) ont une probabilité plus forte d'être tués ou grièvement blessés dans un accident que les conducteurs de véhicules à quatre roues. La gravité des accidents augmente avec l'âge, les accidents de nuit et en dehors des zones urbaines sont plus graves. Les accidents impliquant un seul véhicule sont plus graves que ceux impliquant plusieurs véhicules. Certains effets observés pourraient être liés à la vitesse d'impact qui n'est pas disponible dans les données d'accident.

Parmi les caractéristiques des accidents disponibles (enregistrées dans les rapports de police), les attributs utilisés pour cette analyse sont décrits dans le Tableau 4.

Il ne faut cependant pas oublier que la gravité des accidents est une variable ordonnée Y , du moins grave au plus grave : dommages matériels seulement (pas de blessure), blessure légère, blessure grave et blessure mortelle. Il est donc essentiel de modéliser le caractère ordonné de cette variable. Un des types de modèle le plus courant pour étudier les associations entre une variable ordonnée (dépendante) et plusieurs variables explicatives (indépendantes) est le modèle logit ordonné.

Ce modèle suppose qu'il existe une variable dépendante quantitative non-observée (latente) $Y^* = \mathbf{A}\mathbf{X} + \epsilon$ où \mathbf{X} est le vecteur des variables indépendantes décrivant un accident, \mathbf{A} est le vecteur des coefficients à estimer pour chaque variable indépendante et ϵ est le terme d'erreur, suivant une distribution normale centrée. On observe la gravité Y de chaque accident qui peut

13. <http://www.stata.com>

14. La commande Stata utilisée est de la forme suivante :
`nbreg var_dependante var1 var2 ... varN, offset(ln(exposition))`

Tableau 4 – Attributs (avec leurs valeurs possibles) des accidents disponibles pour l’analyse de gravité : la gravité est la variable dépendante du modèle, et les autres attributs sont les facteurs explicatifs (variables indépendantes du modèle)

Attributs	Valeurs
Gravité	Dommmage matériel seulement, blessures légères, blessures graves et mortelles
Saison	Hiver (déc-jan-fév-mar), autre
Jour de la semaine	Jour de semaine, vendredi, jour de fin de semaine
Moment de la journée	Jour (6h00-18h00), soirée (18h00-24h00), nuit (24h00-6h00)
Éclairage	Jour, nuit, sombre (nuit, pas d’éclairage), pénombre
Nombre de véhicules	Nombre entier
Type de véhicule	Camion, autobus, autre
Type de collision	Animal (le véhicule frappe un animal), poteau (le véhicules frappe un poteau électrique ou de signalisation), véhicule (le véhicule frappe un autre véhicule), structure (le véhicules frappe un bâtiment, un pont), pas d’impact (le véhicule fait un tonneau, tombe dans un fossé), barrière (le véhicule frappe une barrière), autre
État de la chaussée	Sec, mouillée, neige/glace, mauvais (humide et enneigé)
Conditions météorologiques	Clair, pluie/neige, neige
Type d’accident	Un seul véhicule, carrefour (l’accident s’est produit dans un carrefour), changement de voie, délit de fuite, autre

prendre K valeurs ordonnées :

$$Y = \begin{cases} \text{categorie}_1 & \text{si } Y^* \leq \mu_1 \\ \text{categorie}_2 & \text{si } \mu_1 \leq Y^* \leq \mu_2 \\ \text{categorie}_3 & \text{si } \mu_2 \leq Y^* \leq \mu_3 \\ \dots & \dots \\ \text{categorie}_K & \text{si } \mu_{K-1} \leq Y^* \end{cases} \quad (10)$$

Les coefficients A et seuils μ_k sont estimés en maximisant la vraisemblance On en déduit les probabilités qu’un accident ait une certaine gravité :

$$\begin{aligned} P(Y = 1) &= F(\mu_1 - \mathbf{A}\mathbf{X}) \\ P(Y = 2) &= F(\mu_2 - \mathbf{A}\mathbf{X}) - F(\mu_1 - \mathbf{A}\mathbf{X}) \\ &\dots \\ P(Y = K - 1) &= 1 - F(\mu_{K-1} - \mathbf{A}\mathbf{X}) \end{aligned} \quad (11)$$

où F est la fonction de répartition de la distribution du terme d'erreur ϵ qui est la fonction logistique dans le cas de ce modèle. Les coefficients du modèle sont estimés à l'aide du logiciel Stata.

3.3 Analyse vidéo des comportements et des interactions

Le système d'analyse vidéo des comportements et des interactions est décrit dans la Figure 13.

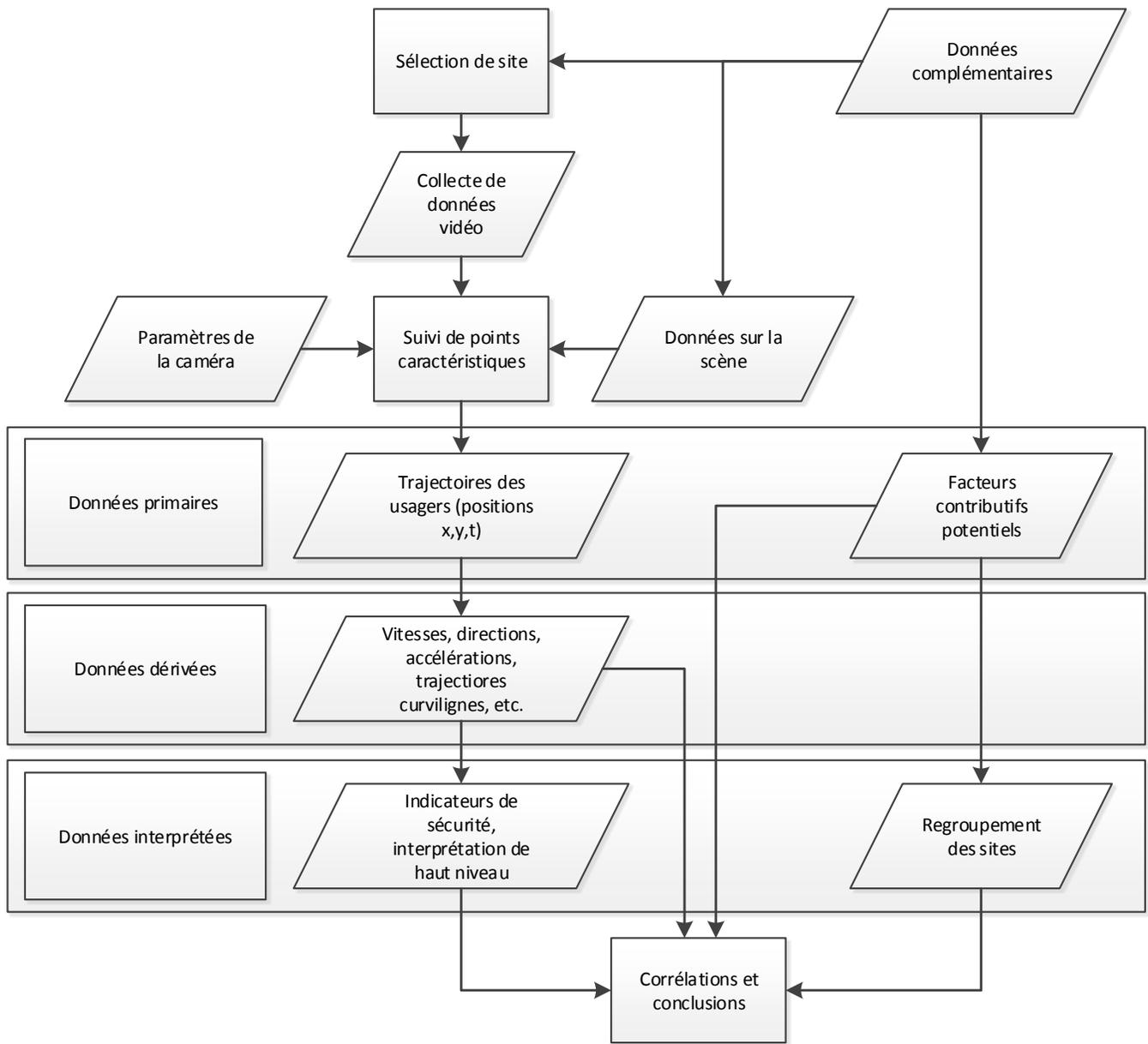


FIGURE 13 – Vue d'ensemble du système d'analyse des comportements et des interactions à l'aide de données vidéo

3.3.1 Analyse vidéo

Les données vidéo ont plusieurs avantages pour les études de comportement des usagers et de leurs interactions pour la sécurité :

1. facilité d'installation (ou installation préexistante)
2. coût modéré
3. riche description du trafic
4. couverture d'une large zone
5. capteur non-intrusif (son installation ne nécessite pas d'intervention sur la chaussée)
6. interprétation automatique par des méthodes de vision par ordinateur
7. possibilité de vérification ultérieure des données

L'analyse automatique des données vidéo recourt à des méthodes de vision par ordinateur qui permettent de détecter et suivre d'image en image les mouvements des différents usagers de la route [90]. Il existe plusieurs méthodes de détection et de suivi selon [28] :

- suivi par détection, en particulier par modélisation et soustraction de l'arrière-plan ou modèle d'apparence des objets d'intérêt ;
- suivi par flux optique : des points distinctifs (fort contraste) sont détectés et suivis d'image en image ;
- suivi par probabilité : le problème de suivi est vu comme un problème d'inférence probabiliste dans un cadre bayésien, par exemple avec des filtres de Kalman ou des filtres à particule.

Il faut noter que le suivi de tous les usagers de la route de différents types (piétons, cyclistes et véhicules de différentes tailles) dans des conditions de circulation de toute densité, en particulier les plus élevées, reste un problème ouvert. La méthode utilisée dans ce projet est le suivi par flux optique (aussi appelé "feature-based tracking"), reposant sur une méthode adaptée de [16] pour les carrefours [71]. Cette méthode est implémentée dans une boîte à outil logicielle disponible sous une licence libre ("open source") développée à Polytechnique Montréal depuis 2011 sous le nom de "Traffic Intelligence" [70].

Des exemples de résultats de détection et suivi sont montrés dans la Figure 14. Un grand nombre de paramètres contrôle la détection et le suivi dans la méthode employée : un travail récent sur l'optimisation de ces paramètres [27], 11 paramètres principaux pour la détection des points caractéristiques et 3 paramètres principaux pour leurs groupements ont été identifiés. La méthode d'optimisation est cependant trop récente et n'a pas encore été testée pour les véhicules. Une fois qu'un nombre suffisant de trajectoires de points caractéristiques est obtenu, les paramètres les plus importants sont la distance de connexion $d_{\text{connexion}}$ des points caractéristiques et la distance de segmentation $d_{\text{segmentation}}$ des points caractéristiques (seuil sur la différence maximale entre le maximum et le minimum des distances entre deux points caractéristiques dans le temps).

Le résultat du suivi est l'ensemble des trajectoires des points caractéristiques sur chaque usager de la route en mouvement et le regroupement de ces trajectoires par usager (soit un ensemble de trajectoires par usager, souvent représenté par sa trajectoire moyenne) : ces informations sont enregistrées dans une base de données SQLite¹⁵. Les trajectoires, pendant l'analyse vidéo, sont

15. <http://sqlite.org/>



FIGURE 14 – Exemples de suivi d’usagers de la route dans différents contextes et études (images en haut tirées de [71], au milieu de [7] et en bas sur un carrefour giratoire de l’étude, de [77])

projetées de l’espace de la caméra (coordonnées en pixel) dans l’espace réel des usagers à la surface de la route (coordonnées en unité de distance réel, e.g. en mètres) à l’aide d’une homographie calibrée à partir d’au moins quatre points non-colinéaires dont les coordonnées sont connues dans les deux espaces [42]. Un outil graphique de calibration de l’homographie à partir d’une image de la vidéo et d’une image aérienne est disponible dans “Traffic Intelligence”. Enfin, une nouvelle fonctionnalité pour la correction des images ayant une distorsion radiale

causée par l'objectif hypergone ("fish eye") d'une des caméras utilisées (caméra "GoPro") a été ajoutée pour les données collectées dans le cadre de ce projet (voir Figure 15 pour un exemple de correction à un carrefour giratoire).

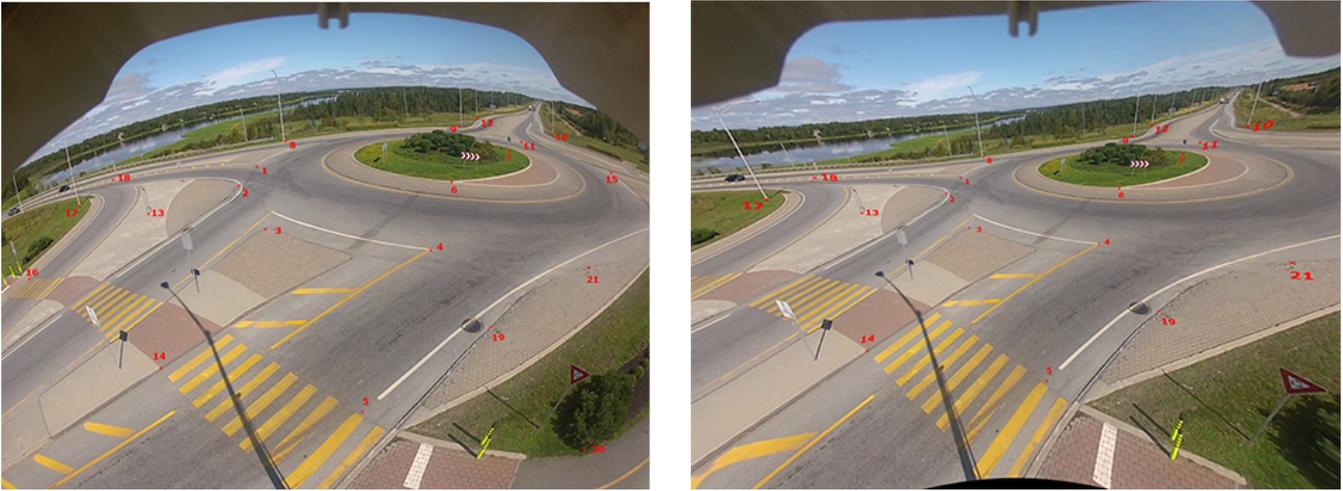


FIGURE 15 – Exemple de prise de vue par une caméra avec objectif hypergone et de correction par le logiciel d'analyse vidéo

Afin de nettoyer et d'interpréter plus facilement les trajectoires des véhicules, les trajectoires dans l'espace réel orthonormé sont converties dans un nouvel espace curviligne défini par l'ensemble des alignements des voies du carrefour giratoire, i.e. les lignes au centre de chaque voie. Chaque point de coordonnées cartésiennes (x, y) est converti en coordonnées curvilignes (l, s, γ) en projetant le point sur l'alignement l le plus proche où s est la distance curviligne du début de l'alignement l au point le plus proche sur l'alignement et γ est la position latérale mesurant la distance entre le point et l'alignement. Ces nouvelles coordonnées permettent d'étudier facilement les véhicules qui se suivent sur une voie, ainsi que les changements de voie d'un véhicule. Les alignements sont tracés manuellement selon les trajectoires observées des véhicules. Un exemple de trajectoires véhiculaires extraites par analyse vidéo et des alignements correspondants est présenté dans la Figure 16 et les trajectoires extraites sur tous les quadrants analysés sont incluses dans les fiches détaillées de l'annexe A. Une zone d'analyse est un polygone qui définit la zone étudiée dans chaque quadrant, où l'analyse vidéo produit des données de qualité satisfaisante : les zones d'analyse sont définies de façon similaire pour chaque quadrant afin d'assurer la comparabilité des analyses subséquentes. Un exemple de zone d'analyse avec les alignements utilisés est présenté dans la Figure 17 : les alignements sont connectés pour définir les mouvements possibles entre eux, entre voies adjacentes et à leurs jonctions.

Une validation quantitative de la performance de détection et suivi de l'analyse vidéo est en cours. Elle a été jugée satisfaisante dans plusieurs travaux antérieurs [71, 72, 76]. Des variables opérationnelles traditionnelles peuvent en être dérivées pour caractériser la circulation sur le carrefour, comme les vitesses et les débits sur les approches et l'anneau. Une caractéristique importante pour le bon fonctionnement d'un carrefour giratoire est l'équilibre entre les débits d'entrée sur les différentes approches [12] : si les débits d'entrée sont très déséquilibrés, il sera difficile pour les véhicules sur les approches les moins achalandées d'entrer dans l'anneau [12]. L'équilibre des débits d'entrée est aussi directement lié aux interactions possibles entre usagers, en particulier les interactions dans la zone d'entrecroisement de chaque quadrant. La mesure

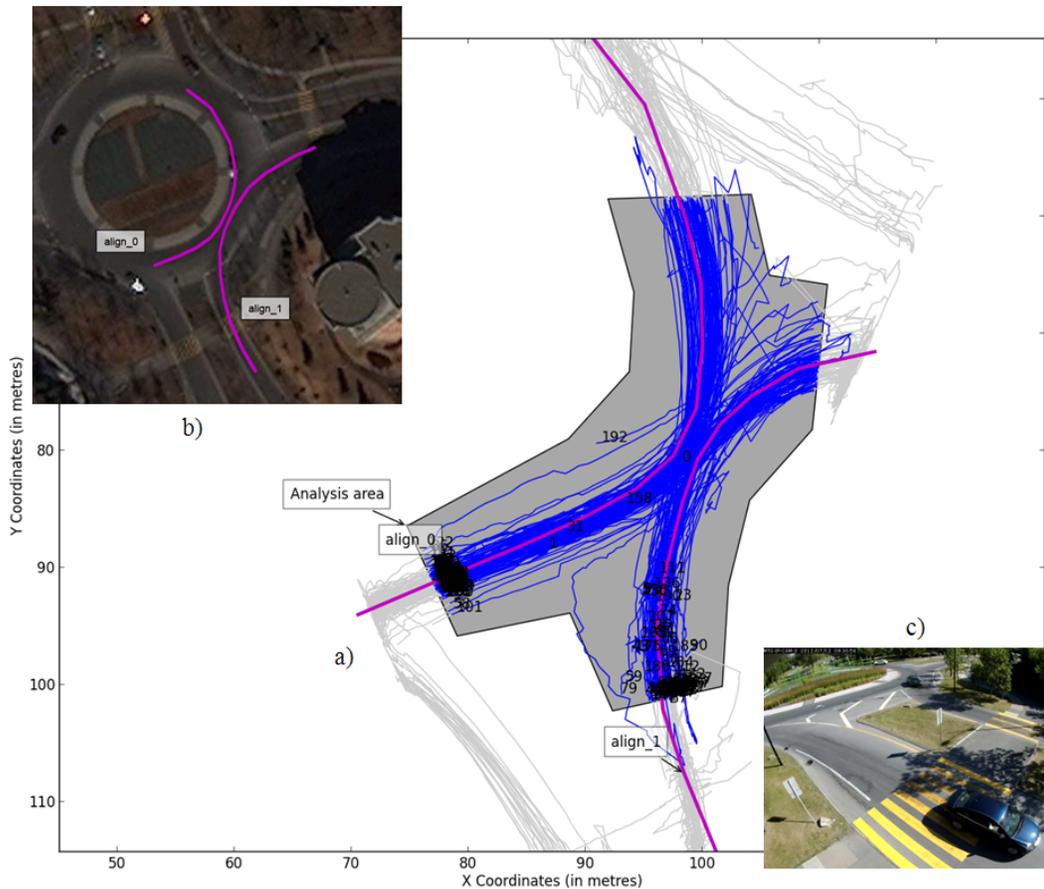


FIGURE 16 – Échantillon de trajectoires véhiculaires projetées sur les alignements dans la zone d’analyse d’un carrefour giratoire à une voie sur l’île de Montréal

suivante de rapport des débits d’entrée est proposée pour caractériser chaque quadrant :

$$\tau_Q = \frac{Q_{app} - Q_{ann}}{Q_{app} + Q_{ann}} \quad (12)$$

où Q_{app} et Q_{ann} sont respectivement les débits entrants venant de l’approche et de l’anneau. Le rapport des débits d’entrée est nul si les deux débits d’entrée sont égaux et tend vers +1 ou -1 respectivement selon que Q_{app} ou Q_{ann} est très grand devant l’autre débit : on parle dans ces cas de débits polarisés.

3.3.2 Analyse des vitesses

Un grand nombre d’observations peut être dérivé des données microscopiques très détaillées obtenues par l’analyse vidéo. La vidéo a un nombre d’images par seconde très élevé, typiquement de 15 ou 30 images par seconde, ce qui fournit des mesures aussi fréquentes de position, vitesse, etc. pour chaque usager. Représenter et analyser le large ensemble de données résultant, selon ses différentes dimensions, spatiale, temporelle et individuelle, constitue un travail complexe qui nécessite de nouvelles méthodes.

La vitesse d’un usager peut être représentée individuellement dans l’espace en deux dimensions ou le long d’un alignement. Des statistiques de vitesse, comme la moyenne ou la médiane,

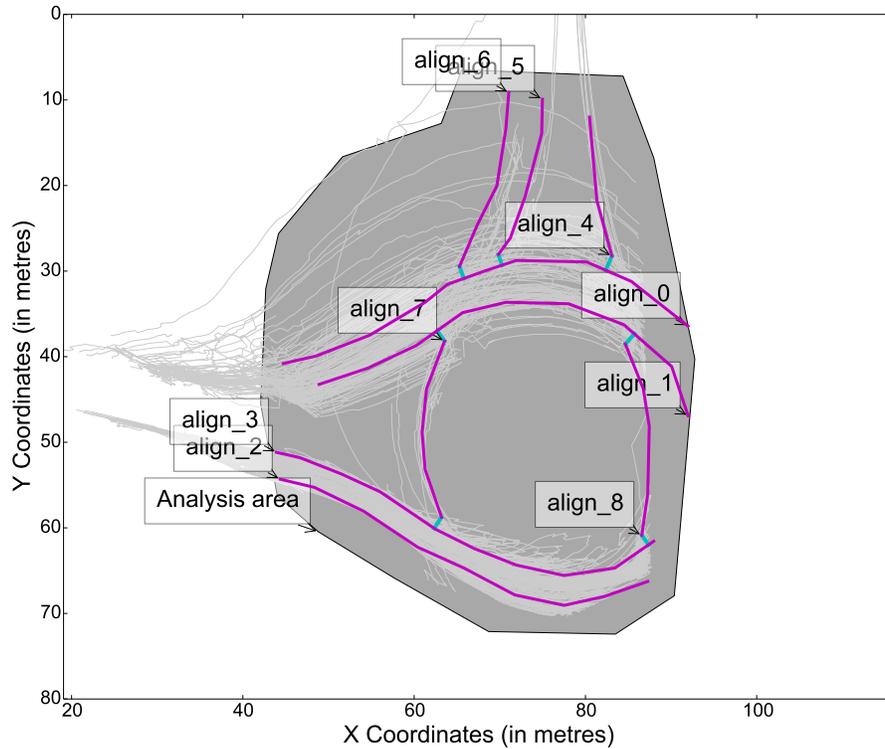


FIGURE 17 – Exemple de la zone d’analyse (surface grisée), des alignements (en violet) et de leurs connections (en bleu clair) pour un carrefour à plusieurs voies sur l’anneau (partiellement visible), avec un échantillon de trajectoires en gris clair

d’un ensemble d’usagers à un site peuvent être représentées pour des unités spatiales dans l’espace à deux dimensions ou en fonction de la position sur un alignement, en ré-échantillonnant les mesures si nécessaire. L’alignement peut être normalisé en fonction du début (-100 %) et de la fin (+100 %) de la zone d’entrecroisement pour des comparaisons plus simples entre quadrants (sur le même carrefour ou sur des carrefours différents). Des statistiques des vecteurs-vitesses peuvent aussi être représentées spatialement.

Les résultats comprennent des représentations de la distribution des vitesses (sous forme de boîte à moustache¹⁶) à l’entrée et la sortie de la zone d’entrecroisement de chaque quadrant pour chaque type de mouvement entre l’anneau et les approches (voir Figure 40). Les distributions spatiales de la moyenne des vitesses et des vecteur-vitesses par unité spatiale (discrétisation de la zone d’analyse en unités hexagonales) ainsi que les vitesses moyennes (avec enveloppe à plus ou moins un écart-type) en fonction des alignements normalisés pour les différents types de mouvements sont présentées dans des fiches individuelles des quadrants analysés dans l’annexe A.

16. https://fr.wikipedia.org/wiki/Bo%C3%A0ete_%C3%A0_moustaches

3.3.3 Analyse des interactions

Les méthodes proactives de sécurité routière Les méthodes traditionnelles de diagnostic de la sécurité routière reposent sur des bases de données d'accidents constituées essentiellement à partir des rapports de police, d'assurance et des services d'urgence. Ces méthodes peuvent être qualifiées de réactives puisqu'elles nécessitent d'attendre que l'accident se produise et elles souffrent de problèmes bien connus [41] :

1. la difficulté de l'attribution et l'identification de la cause et des mécanismes de l'accident,
2. la rareté des accidents qui implique de longues périodes d'observation,
3. la qualité des données, obtenues par reconstitution des événements, et le biais des rapports vers les accidents les plus graves, et
4. le paradoxe éthique de l'analyste contraint d'attendre l'occurrence d'accidents pour évaluer et améliorer la sécurité routière.

Les données d'accident sont ainsi intrinsèquement peu adaptées pour faire un diagnostic de sécurité et pour comprendre les facteurs et mécanismes qui mènent à l'accident. Des méthodes proactives de sécurité, qui ne nécessitent pas d'attendre que des accidents se produisent, ont ainsi été développées depuis la fin des années 1960 pour dépasser ces limitations, compléter et, in fine, remplacer l'approche traditionnelle de diagnostic de la sécurité routière. Les méthodes les plus connues reposent sur l'observation des conflits de trafic : un conflit de trafic est une situation observable dans laquelle deux usagers ou plus s'approchent l'un de l'autre dans le temps et l'espace à un tel point que la collision est imminente si leurs mouvements restent inchangés [1]. Les techniques des conflits de trafic (TCT) ont été développées pour observer, évaluer la fréquence et la sévérité des conflits de trafic en un lieu donné et estimer la sécurité, i.e. l'espérance du nombre d'accidents. La sévérité des conflits est mesurée à l'aide de plusieurs indicateurs comme le temps à la collision ("Time-to-Collision", TTC), le temps post-empiètement ("Post-Encroachment Time", PET), différents indicateurs basés sur la vitesse etc. Plus de 100 indicateurs sont recensés dans la thèse d'Aliaksei Laureshyn de 2010 [49]. Ces indicateurs font partie d'une classe plus générale de mesures substituts de la sécurité routière ("surrogate measures of safety") qui ont vu un important regain d'intérêt depuis le début des années 2000 [84].

Les TCTs traditionnelles reposent sur la définition d'une catégorie de conflits avec une relation simple aux accidents, typiquement une relation linéaire entre le nombre de conflits observés et la sécurité : la validation de ces travaux est controversée et partage la communauté des chercheurs en sécurité. Une autre vision de la circulation voit l'ensemble des interactions entre usagers sur un *continuum* en relation avec la sécurité et les accidents potentiels. Ce continuum constitue la *hiérarchie de sécurité* [83], dans laquelle les accidents sont au sommet, les conflits de trafic ou quasi-accidents viennent ensuite, car leurs processus sont très similaires aux mécanismes d'accident, et ainsi de suite en continuant à définir récursivement de nouvelles catégories d'interactions de plus en plus "loin" des accidents, i.e. de moins en moins sévères, jusqu'à des interactions "normales" entre usagers. Un indicateur de sécurité devrait refléter la position d'une catégorie d'interaction dans la hiérarchie de sécurité, soit une mesure de la probabilité pour un événement de cette catégorie de mener à un accident. En comprenant mieux les relations et similarités entre les interactions de différents niveaux de sévérité, en particulier les conflits les plus sévères et l'accident, il sera possible de mieux comprendre les facteurs et mécanismes d'accident et de construire de meilleurs estimateurs de la sécurité.

De bons indicateurs substituts de la sécurité devraient avoir les propriétés suivantes :

- leurs résultats sont *reproductibles*, ce qui est amélioré par le partage de code sous licence libre et d'ensembles de données sur lesquels les résultats ont été obtenus ;
- les indicateurs sont *fiables* [49], i.e. ils mesurent de façon répétable la même quantité indépendamment des facteurs externes, rendant les résultats transférable d'une étude à l'autre, d'un site à l'autre, etc. ;
- les indicateurs sont *valides* [49], i.e. ils représentent bien la grandeur qu'ils sont supposés mesurer, ici la sécurité ou une grandeur en relation directe et déterministe avec la sécurité (soit le nombre attendu d'accident, par niveau de gravité).

Les interactions et les créneaux à l'insertion L'unité d'analyse est l'interaction entre usagers de la route, constituée par la présence simultanée de deux usagers (paire) dans la zone d'analyse (pour simplifier, les interactions impliquant trois usagers ou plus sont naturellement décomposées en interactions entre usagers deux à deux). Une telle interaction est une condition nécessaire à une collision dans la zone d'analyse, donc constitue une exposition à ce risque d'accident. Considérer des paires d'usagers peut résulter en un grand nombre d'observations qui croît au maximum comme le carré du nombre d'usagers. Des heuristiques sont utilisées pour identifier les interactions impossibles ou extrêmement peu probables dans l'horizon temporel de prédiction des collisions potentielles décrit ci-dessous et ainsi éviter des calculs inutiles. Une interaction est caractérisée par la période de temps pendant laquelle les usagers coexistent.

Des interactions particulières dans les carrefours giratoires se produisent régulièrement lors de l'insertion des véhicules sur l'anneau. Les véhicules arrivant sur l'approche n'ayant pas la priorité, ils doivent trouver un créneau assez grand dans la circulation sur l'anneau pour traverser le carrefour. La distribution des créneaux acceptés par les véhicules à l'approche est déterminante pour le calcul de la capacité d'un carrefour giratoire [87]. Les créneaux acceptés permet aussi de caractériser les interactions entre les véhicules entrant et les véhicules sur l'anneau : plus le créneau accepté par le véhicule entrant est petit, plus les créneaux avant et arrière résultant de son insertion avec les véhicules avant et arrière sont petits (voir Figure 18) et plus une collision est probable cas de freinage brusque d'un véhicule meneur par exemple. Le créneau pour des véhicules qui se suivent dans une même voie correspond à la mesure de sécurité du PET bien connue dans les TCT (le PET est l'intervalle de temps entre le passage des deux usagers au point d'intersection de leurs trajectoires [49]). Les créneaux avant et arrière à l'insertion des véhicules sur l'anneau sont donc systématiquement mesurés pour tous les quadrants (il faut noter qu'ils incluent des valeurs très grandes puisqu'ils sont mesurés pour tous les véhicules entrant, avec le véhicule précédent et suivant sur l'anneau, aussi éloigné que leur instant de passage puisse être).

Les méthodes de prédiction du mouvement Il y a deux grandes catégories de mesures ou indicateurs substitués de sécurité, selon qu'elles sont calculées directement à partir de mesures sur la position et les vitesses des usagers impliqués, ou qu'elles reposent sur une simulation de ce qui pourrait se passer en l'absence de réaction des usagers. Le PET est un exemple d'indicateur appartenant à la première catégorie, tandis que le TTC, qui est l'indicateur le plus connu et utilisé, appartient à la seconde catégorie. Il est défini comme le temps nécessaire à un instant donné pour que deux usagers atteignent un point de collision potentiel "si leurs mouvements restent inchangés" selon la définition originale des conflits de trafic. Il est ainsi nécessaire de prédire les mouvements possibles des usagers à chaque instant pour identifier leurs points de collision potentiels. Si un point de collision potentiel existe, les usagers sont sur une trajectoire de collision.

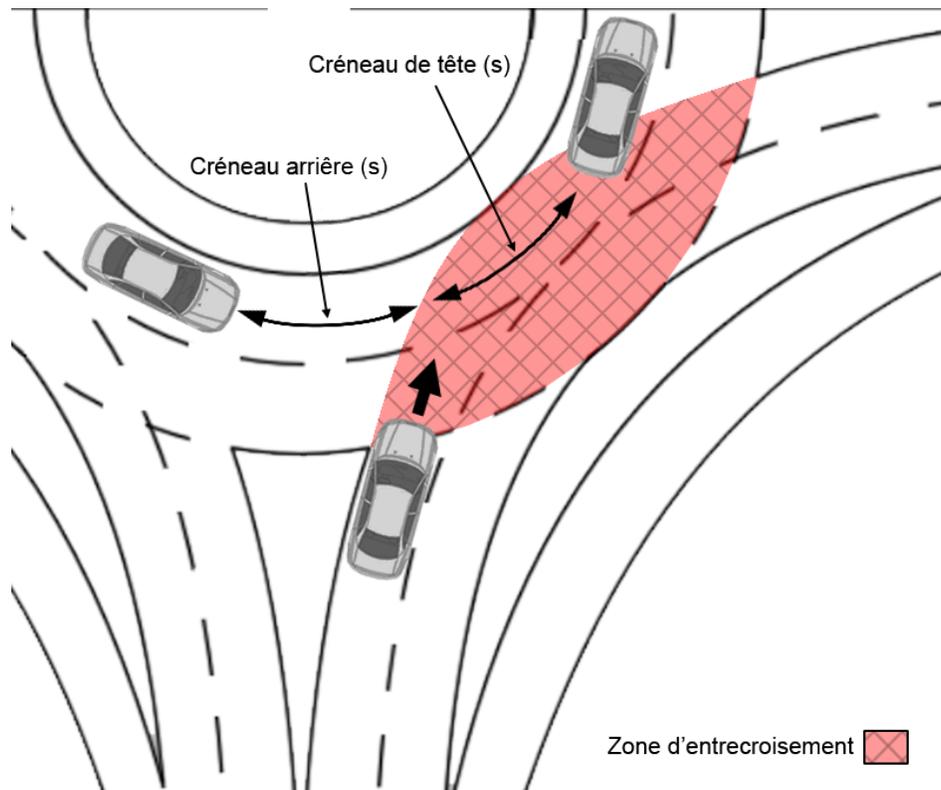


FIGURE 18 – Créneaux de tête et arrière créés par l’entrée d’un véhicule sur l’anneau

Le TTC, et d’autres indicateurs de sécurité comme la décélération nécessaire pour éviter une collision (“deceleration to safety time”, DST), dépendent donc d’une méthode de prédiction des mouvements futurs. La méthode la plus utilisée, souvent implicitement et sans justification, est l’extrapolation des mouvements à vecteur-vitesse constant (i.e. à vitesse et direction constantes) : hormis sur des sections de routes linéaires, cette méthode est souvent inadaptée au contexte. En réalité, plusieurs trajectoires peuvent mener deux usagers à un point de collision potentiel. Les méthodes utilisées dans ce projet reposent sur des travaux antérieurs et parallèles sur un cadre probabiliste prenant en compte plusieurs trajectoires possibles par usagers et leurs probabilités associées [72, 54].

Les méthodes qui semblent les plus prometteuses utilisent les mouvements observés des usagers pour prédire leurs positions futures. Une première phase de ces méthodes nécessite d’apprendre ou estimer des modèles des mouvements ou patrons de mouvement (“motion patterns”). Ces patrons ont été représentés par des trajectoires dans nos travaux précédents [73, 72], ce qui peut être très coûteux en temps de calcul. Une nouvelle représentation a été développée et explorée dans ce projet, en utilisant des cartes des probabilités des positions futures dans la zone d’analyse discrétisées dans le temps et l’espace [81]. Ces cartes représentent la probabilité qu’un usager A à une position initiale (x_0, y_0) à l’instant t_0 soit à une position (x_i, y_j) à un instant futur $t_k = t_0 + \Delta t_k$, notée $P(A_{x_i, y_j, t_k})$.

Ces probabilités sont apprises ou calibrées à partir de trajectoires observées dans des dimensions discrétisées, ce qui crée des matrices multidimensionnelles de tailles variables selon la représentation des conditions initiales à t_0 et la précision spatio-temporelle de la prédiction. L’espace de prédiction est un espace à trois dimensions, constitué par la position dans l’espace physique d’analyse à deux dimensions et l’instant de prédiction t_k , tous discrétisés sur

des intervalles prédéfinis avec des pas respectifs s_x , s_y et s_t ($\Delta t_k = k s_t$). Ces pas dépendent de la précision voulue et de la quantité de données disponibles pour estimer la probabilité $P(A_{x_i, y_j, t_k}) = P(x(t_k) \in [x_i, x_i + s_x], y(t_k) \in [y_j, y_j + s_y])$ pour t_k compris entre s_t et un horizon $h_{max} = k_{max} s_t$ de prédiction raisonnable correspondant au TTC maximum pouvant être calculé. Le pas dimensionnel est typiquement choisi égal à la fréquence de collecte des données sur les usagers, soit la fréquence des images de la vidéo (1/15 ou 1/30 s).

Les conditions initiales doivent aussi être représentées de façon discrétisée pour être apprises : prédire les positions futures d'un usager dépend minimalement de sa position et sa vitesse initiales, et du type d'usager. La position est représentée dans l'espace curviligne par une abscisse s le long d'un alignement l (voie de circulation) et la vitesse dérivée de cette abscisse \dot{s} . D'autres informations pourraient être ajoutées, comme la vitesse latérale, la position des véhicules les plus proches pouvant contraindre les mouvements futurs. Les patrons de mouvements consistent donc à estimer à partir d'un ensemble de trajectoires obtenues par analyse vidéo l'association suivante :

$$(l(t_0), s(t_0), \dot{s}(t_0)) \mapsto P(A_{x_i, y_j, t_k=t_0+\Delta t}) = P(x(t_k) \in [x_i, x_i + s_x], y(t_k) \in [y_j, y_j + s_y]) \quad (13)$$

Pour chaque position le long de chaque alignement et chaque intervalle de vitesse, pour chaque instant futur jusqu'à un horizon h_{max} , une matrice des probabilités qu'un usager soit positionné dans une case de l'espace d'analyse est estimée. Un exemple d'une telle matrice est représenté dans la Figure 19. Il est important que les intervalles et pas de temps des dimensions continues (espace, temps) soient suffisamment précis, par exemple pour distinguer des usagers qui se suivent sur une voie. Ce besoin de précision est cependant contraint par deux facteurs : la taille des patrons appris qui doivent être sauvegardés et chargés en mémoire lors de leur utilisation, et la quantité de données disponibles pour estimer les probabilités de façon suffisamment fiable. Si la résolution est trop importante, il y aura trop peu d'observations pour chaque condition initiale dans chaque case et pour chaque instant futur. La taille des matrices est optimisée par l'utilisation de matrices creuses (dont la plupart des termes sont nuls). Dans le cas d'une distribution très concentrée des observations pour une dimension, comme pour la vitesse, les intervalles de discrétisation des patrons correspondent à des centiles de la distribution.

Une fois qu'il est possible de prédire la position des usagers dans le futur, il est possible de prédire leur probabilité de collision. La probabilité de collision de deux usagers A et B est la probabilité $P(AB_{x_i, y_j, t_k})$ qu'ils se trouvent simultanément au même point (x_i, y_j) à un instant futur t_k . On fait l'hypothèse qu'il est possible de prédire les positions des usagers indépendamment, ce qui semble raisonnable pour prédire des collisions (si les usagers étaient conscients les uns des autres, ils ne s'approcheraient pas à un point tel qu'une collision serait imminente). On peut alors écrire

$$P(AB_{x_i, y_j, t_k}) = P(A_{x_i, y_j, t_k})P(B_{x_i, y_j, t_k}) \quad (14)$$

L'utilisation des patrons de mouvements pour le calcul de la probabilité de collision en un point à un instant futur donné est illustrée dans la Figure 20. D'un point de vue des calculs, l'avantage des modèles utilisés pour les patrons de mouvements est que le calcul de la probabilité de collision est un simple produit terme à terme de deux matrices.

Une collision en un point de l'espace est l'union de l'ensemble des occurrences d'une collision à ce point à tous les instants futurs t_k , $k = 1 \dots k_{max}$, ce qui est illustré dans la Figure 21 et calculé dans l'équation 15. Il est important de noter que ces collisions futures ne sont pas indépendantes. Il en résulte que la somme des probabilités de chaque collision à un instant futur

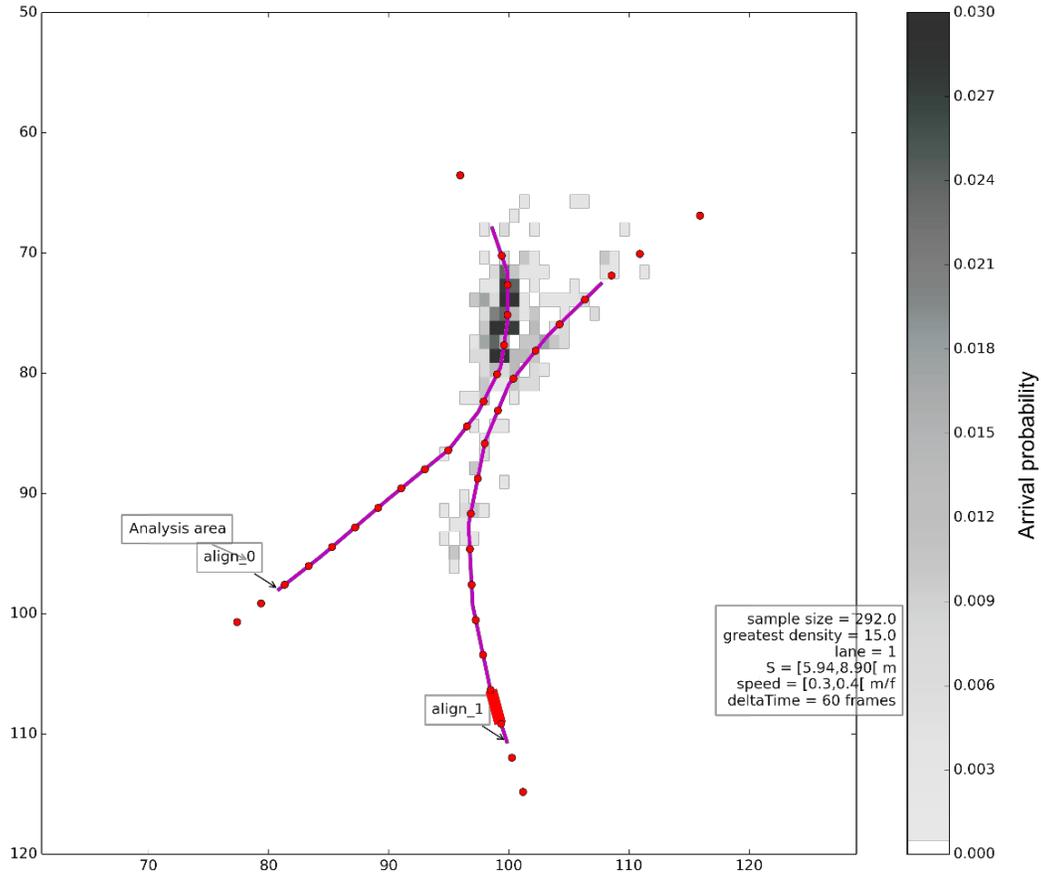


FIGURE 19 – Probabilité de la position d’un usager situé sur l’alignement align_1 dans l’intervalle en rouge (entre 5.94 et 8.9 m) avec une vitesse entre 0.3 et 0.4 m par pas de temps à un instant futur dans $\Delta t = 60$ pas de temps (soit 4 s) (le pas de discrétisation spatial est 1.5 m)

(dernière égalité de l’équation 15) constitue en fait une borne supérieure de la probabilité de collision en ce point. Le résultat peut donc surestimer la probabilité de collision en un point, voire obtenir une valeur plus grande que 1, s’il est prédit que les usagers seront précisément au même point pour plusieurs instants futurs simultanément.

$$P(AB_{x_i, y_j, t_0}) = P\left(\bigcup_{k=1}^{k_{max}} AB_{x_i, y_j, t_k}\right) \approx \sum_{k=1}^{k_{max}} P(AB_{x_i, y_j, t_k}) \quad (15)$$

La probabilité totale de collision future à un instant t_0 est calculée grâce à l’équation 16 en sommant sur l’espace de prédiction des mouvements. Une approximation sur l’espace est faite similaire à l’approximation de l’équation 15 dans le temps¹⁷.

$$P(AB_{t_0}) = P\left(\bigcup_{i=0}^{i_{max}} \bigcup_{j=0}^{j_{max}} AB_{x_i, y_j, t_0}\right) \approx \sum_{i=0}^{i_{max}} \sum_{j=0}^{j_{max}} P(AB_{x_i, y_j, t_0}) \quad (16)$$

17. Il faudrait soustraire les probabilités que la collision ait lieu à des endroits distincts dans l’espace. Ces probabilités conjointes sont relativement faibles si la discrétisation de l’espace est telle que deux véhicules sont contenus dans une même unité de l’espace.

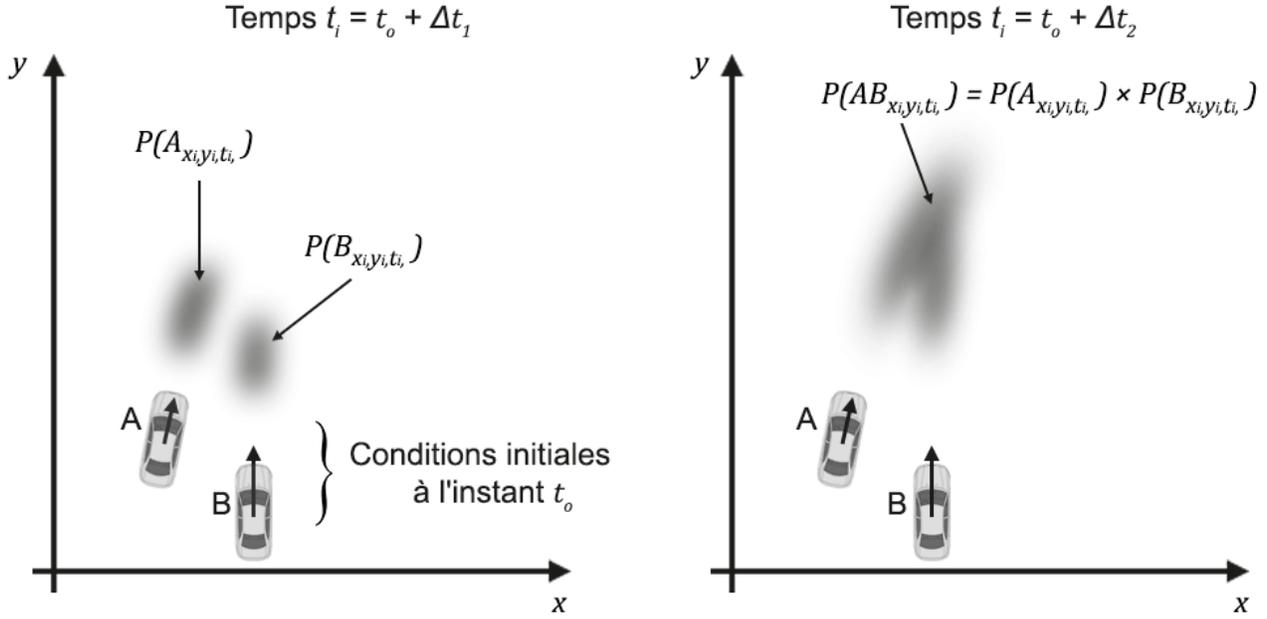


FIGURE 20 – Illustration de l'utilisation des patrons de mouvement pour le calcul de la probabilité de collision de deux usagers dans l'espace à deux dimensions pour deux usagers A et B à deux pas de temps successifs

Si la probabilité de collision en un point de l'espace à un instant $t_k = t_0 + \Delta t$ est non nulle, Δt est le TTC de cette collision potentielle en ce point. En tenant compte de tous les points de collisions potentiels à différents instants futurs, il est possible de généraliser le TTC "classique" lorsqu'une seule trajectoire est considérée pour chaque usager en espérance du TTC dans le temps et l'espace. Le TTC attendu à t_0 en un point est donné par l'équation 17 et le TTC attendu à t_0 pour l'ensemble des trajectoires possibles dans le futur par l'équation 18.

$$TTC_{x_i, y_j, t_0} = \frac{\sum_{k=1}^{k_{max}} P(AB_{x_i, y_j, t_k}) \Delta t_k}{\sum_{k=1}^{k_{max}} P(AB_{x_i, y_j, t_k})} \quad (17)$$

$$TTC_{t_0} = \frac{\sum_{i=0}^{i_{max}} \sum_{j=0}^{j_{max}} P(AB_{x_i, y_j, t_0}) TTC_{x_i, y_j, t_0}}{\sum_{i=0}^{i_{max}} \sum_{j=0}^{j_{max}} P(AB_{x_i, y_j, t_0})} \quad (18)$$

Une limite des patrons de mouvement tels qu'ils sont appris et représentés actuellement est qu'ils ne permettent pas de prédire des mouvements en dehors de la zone d'analyse, à la différence de méthodes qui ne dépendent pas de l'observation des trajectoires des usagers. Ces dernières ont cependant notre préférence puisqu'elles nécessitent le moins d'hypothèses sur les mouvements futurs des usagers (supposer qu'un usager continue en ligne droite sur un horizon de plusieurs secondes est au contraire une hypothèse très forte).

Agrégation des indicateurs continus de sécurité et interprétation La question de l'agrégation des mesures spatio-temporelles obtenues par analyse vidéo se pose particulièrement pour les indicateurs de sécurité caractérisant les interactions des usagers. Les figures 22 et 23 illustrent les mesures faites à chaque instant pour une interaction, et en particulier pour le TTC. Il existe alors deux possibilités, de prendre en compte et d'analyser soit toutes les mesures instantanées de

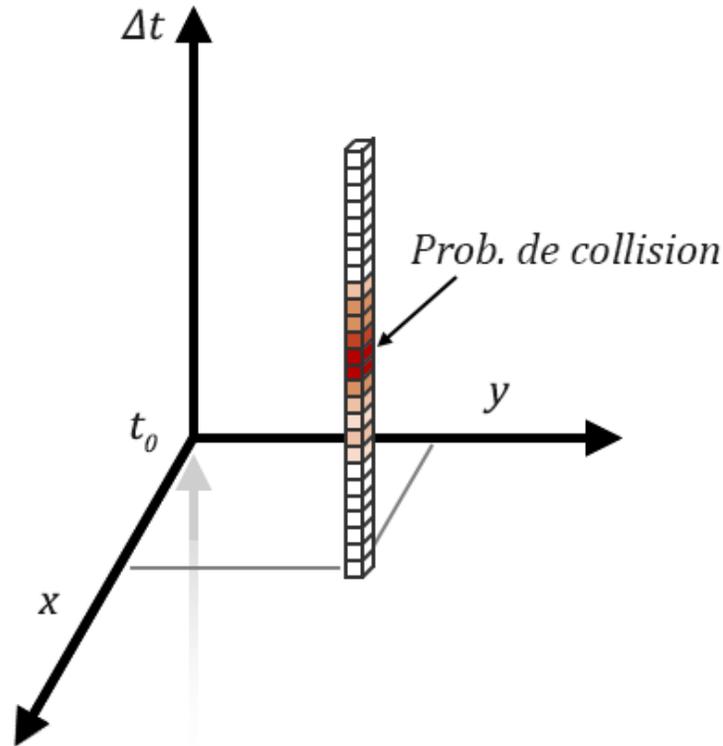


FIGURE 21 – Illustration du calcul de la probabilité de collision en un point de l’espace en fonction de l’instant futur de prédiction (dimension du temps verticale)

TTC, soit seulement une valeur représentant la sécurité de l’interaction. La seconde méthode est a priori préférée car elle maintient un lien logique entre des événements entre paires d’usager et la collision potentielle qui pourrait se produire entre eux, qui correspond au lien prédictif fait par les TCT traditionnelles entre un nombre de conflits sévères observés et un nombre d’accidents attendus. Tenir compte de toutes les mesures instantanées de TTC a l’avantage d’offrir de larges ensembles de données moins bruités à analyser, mais les moments pour lesquels le TTC est calculé sont sujets eux-mêmes au bruit et la méthode sur-représente les valeurs plus faibles de TTC (plus fréquente) ainsi que les TTC des véhicules plus lents qui resteront plus longtemps dans la zone d’analyse. Le choix naturel pour un indicateur de sécurité serait de choisir la valeur la plus extrême, c’est à dire la valeur minimale pour le TTC TTC_{min} , par interaction : la valeur minimale de la série temporelle pouvant être très influencée par le bruit dans les données de trajectoire, le 15^{ème} centile noté TTC_{15} est proposé comme alternative plus robuste. Une autre possibilité d’agrégation serait par usager, prenant une valeur représentant toutes les interactions dans lesquels un usager est impliqué dans la zone d’analyse.

La méthode classique d’interprétation des interactions est celle des TCT, c’est à dire d’identifier les interactions ou conflits les plus sévères et de calibrer leur relation, typiquement linéaire, au nombre attendu d’accident : l’un des indicateurs le plus courant est TTC_{min} , tandis que la TCT suédoise utilise le TTC et la vitesse juste avant que l’un des usagers entreprenne une manœuvre d’évitement.

Une méthode plus récente consiste à étudier la distribution de toutes les mesures d’un indicateur de sécurité ou des mesures uniques par interaction, afin d’effectuer un diagnostic plus

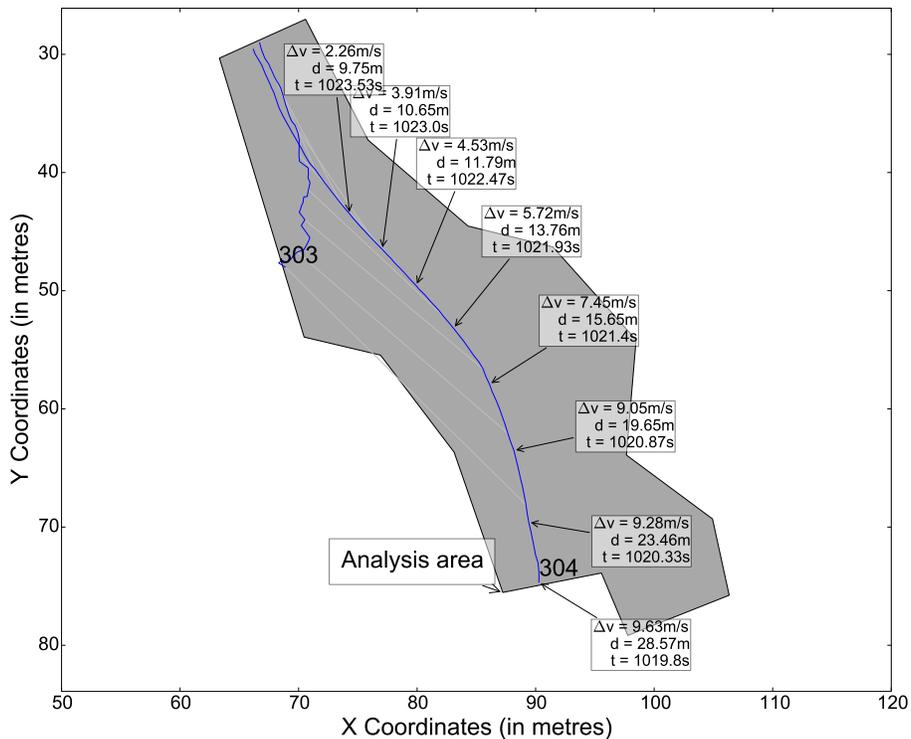


FIGURE 22 – Le véhicule 304 approche le véhicule 303 qui est entré dans le carrefour giratoire à contresens (voir les images de suivi en bas de la Figure 14). Les mesures de différentiel de vitesse, distance entre les véhicules sont affichées toutes les 8 images au niveau de la position du véhicule 304 à chaque instant t (lié par une ligne en gris clair à la position du véhicule 303 au même instant)

nuancé et complet de la sécurité d'un site pour une période de temps donné en interprétant des interactions de tous les niveaux de sécurité (ou sévérité) et non seulement les plus sévères comme dans les TCT classiques. Deux méthodes sont possibles, soit en représentant la fréquence d'interactions (nombre d'interactions par heure) en fonction de l'indicateur, soit en normalisant par le nombre total d'interactions (proportion d'interaction) pour représenter la distribution de l'indicateur pris comme variable aléatoire (ces deux graphiques peuvent être représentés sous forme cumulée pour éviter les effets de discrétisation des distributions par intervalles de valeur d'indicateur)¹⁸. Avec l'exemple du TTC, la Figure 24 illustre les possibilités et les difficultés d'interprétation de la distribution d'un indicateur de sécurité. Les courbes a et b, où les densités de probabilité se croisent une seule fois et les fonctions de répartition ne se croisent pas, démontrent un décalage clair de la distribution des TTC, à la différence des courbes c et d. Dans tous les cas, l'interprétation est impossible sans validation, i.e. comparaison à des données d'accident, car le lien des interactions à chaque niveau de TTC avec la sécurité n'est pas connu.

18. Dans le cas de l'interprétation de toutes les mesures de l'indicateur, les distributions seront en nombre d'interaction-instants par niveau de l'indicateur.

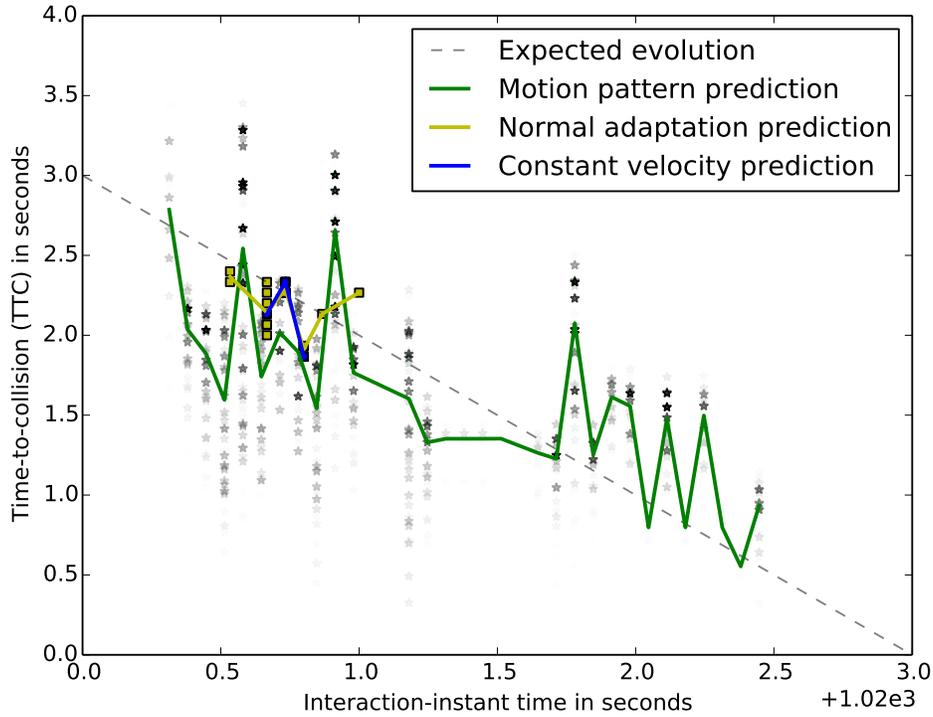


FIGURE 23 – Séries temporelles du TTC entre les véhicules 303 et 304 présentés dans les Figures 14 et 22 calculé pour trois méthodes de prédiction du mouvement (vitesse et direction constante, adaptation normale du mouvement et patron de mouvement). Pour les deux dernières méthodes qui sont probabilistes, les mesures de TTC pour chaque point de collision potentiel sont représentées individuellement par des points avec le même marqueur que la valeur attendue agrégée

3.3.4 Analyse statistique des mesures microscopiques

L'un des objectifs du projet est d'identifier des caractéristiques des carrefours giratoires, de leur environnement et de la circulation ayant un effet sur la sécurité. Les mesures microscopiques principales pour la sécurité obtenues par analyse vidéo sont les suivantes : vitesse, créneaux à l'insertion sur l'anneau et les TTC des interactions. L'unité d'analyse étant le quadrant, la méthode la plus simple est d'étudier le lien entre la valeur moyenne de chaque mesure par quadrant pour une période de temps fixe avec les attributs du quadrant par régression linéaire.

Des modèles statistiques plus complexes permettent de prendre en compte comme variables explicatives à la fois des attributs des quadrants et des attributs microscopiques de chaque passage de véhicule ou de chaque interaction. Cela revient à considérer les données par quadrant comme des panels, où chaque panel (quadrant) comprend des ensembles de tailles variables d'observations microscopiques. Les modèles à effets aléatoires utilisent la formule suivante :

$$Y_{ij} = \mu + U_i + \sum_{k=1}^n \beta_k X_{ijk} + \epsilon_{ij} \quad (19)$$

où Y_{ij} est l'indicateur microscopique étudié pour le $j^{\text{ème}}$ usager sur le $i^{\text{ème}}$ quadrant, les β_k sont les n coefficients des attributs explicatifs de valeurs X_{ijk} pour le le $j^{\text{ème}}$ usager sur le

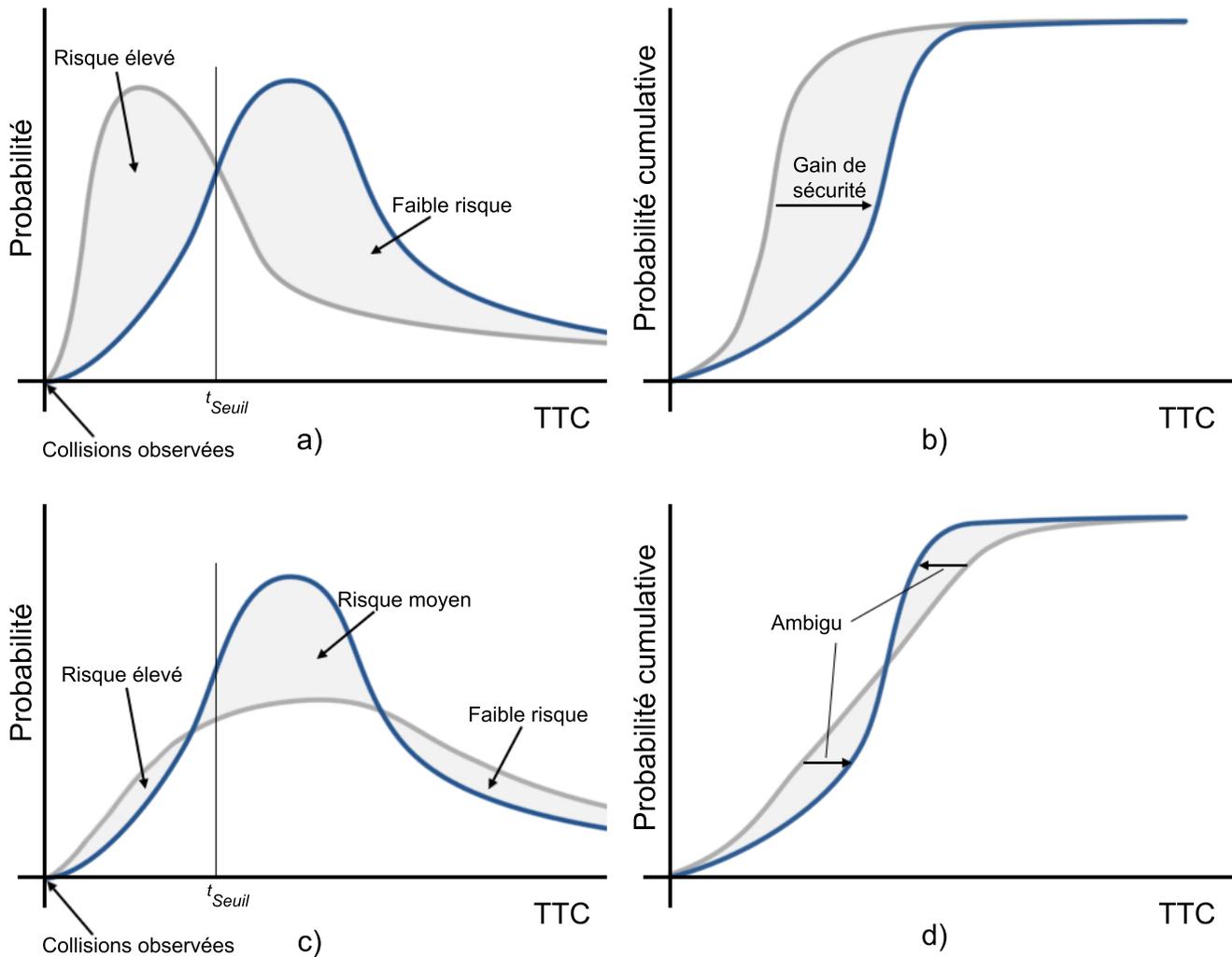


FIGURE 24 – Comparaison de deux distributions hypothétiques de TTC pour deux sites. Pour les courbes a et b représentant les densités de probabilité et les fonctions de répartition correspondantes pour deux sites, un site présente une concentration clairement plus élevée d’interactions avec des TTC plus faible. Pour les courbes c et d représentant deux autres densités de probabilité et fonctions de répartition correspondantes, la différence entre les deux sites est moins claire

$i^{\text{ème}}$ quadrant et μ est la moyenne de l’indicateur sur l’ensemble des données. U_i et ϵ_{ij} sont les erreurs respectivement entre les quadrants (panels) et à l’intérieur de chaque quadrant (panel). Les ϵ_{ij} sont supposés suivre une loi normale centrée et ne pas être corrélés avec les U_i .

Cependant, à ce stade de la recherche, les observations microscopiques ne sont pas encore intégrées dans les modèles présentés, et les modèles à effets aléatoires sont équivalents à des modèles linéaires de la moyenne de chaque variable dépendante par site.

3.4 Analyse des préférences des piétons

3.4.1 Les enquêtes avec préférences déclarées sur la sécurité des usagers vulnérables

S’il est un domaine où la littérature indique d’une part une plus grande hétérogénéité des impacts des carrefours giratoires et d’autre part un manque général de connaissances, il s’agit

de la sécurité et du comportements des usagers vulnérables dans les carrefours giratoires [62]. Comme noté dans le guide du MTQ [5], les carrefours giratoires sont connus pour les inconvénients qu'ils peuvent causer aux piétons, comme "l'inconfort ou le sentiment d'insécurité en traversée, causé par le fait que les véhicules ne s'arrêtent pas", l'"allongement des parcours" et les "difficultés particulières des personnes atteintes de déficience visuelle". Dans le projet, le choix a été de mieux comprendre les besoins et préférences des piétons qui ont été peu étudiés dans la littérature. Une enquête incluant des questions avec préférences déclarées a donc été développée pour cet objectif. À la différence des questions à préférence révélée, qui révèlent les choix faits par les répondants, les questions avec préférences déclarées proposent des tâches à choix discret, dans lesquelles le répondant doit choisir une réponse entre plusieurs alternatives, par exemple un type d'aménagement.

Les enquêtes avec préférences déclarées ont été utilisées dans quelques études antérieures pour comprendre les préférences et le comportement des usagers vulnérables, par exemple pour mieux comprendre les préférences des cyclistes [48], mais pas dans le contexte des carrefours giratoires. Les analyses des préférences et des comportements des piétons ont été confinées aux sujets suivants : les choix d'itinéraire et le comportement aux carrefours [57], l'influence du niveau de sécurité perçu à un carrefour et les lieux de traversée des piétons [50], les préférences par rapport aux aménagements des traversées pour les piétons [75] et les interactions entre piétons et usagers motorisés aux carrefours [45].

Une autre particularité de l'enquête effectuée est d'utiliser des aides visuelles dans des enquêtes avec préférences déclarées pour le transport. Plusieurs études [48, 85, 2] montrent les bons résultats de l'utilisation d'aides visuelles dans les enquêtes avec préférences déclarées. L'article [48] est particulièrement intéressant puisque l'utilisation d'aides visuelles (des clips vidéo de 10 s de pistes cyclables) y est présenté comme ayant amélioré notablement les réponses au questionnaire.

3.4.2 Développement de l'enquête

Une enquête avec préférences déclarées implique un processus de développement assez long passant par les étapes de conception, administration et analyse des données du questionnaire [51, 2, 14, 57, 46, 45]. La première étape est de relever dans la littérature les caractéristiques et facteurs identifiés précédemment comme ayant une influence sur les préférences des piétons en terme de sécurité dans les carrefours giratoires. Le Tableau 5 présente ainsi un résumé des travaux les plus pertinents sur la sécurité des piétons et des usagers vulnérables en général, dans les carrefours giratoires et autres types de carrefours. Il est ainsi possible de voir que les attributs suivants ont été considérés dans la littérature : le débit de circulation motorisée, la vitesse de la circulation, le débit de piétons, la signalisation (panneaux et marquages au sol), la position du passage pour les piétons et la présence de barrières physiques (e.g. des îlots séparateur).

Cette liste d'attributs et leurs valeurs possibles doit être ensuite validée et confirmée par des études complémentaires : des groupes de discussion ("focus group") et des tests pilotes du questionnaire. C'est la seconde étape dans le développement du questionnaire. L'organisation d'un groupe de discussion permet de demander à un groupe de répondants potentiels d'identifier les attributs qu'ils considèrent importants dans les questions d'intérêt, ainsi que les valeurs ou intervalles de valeurs appropriés pour ces attributs. Pour l'étude, un groupe de huit personnes a été contacté par une société de sondage spécialisée. Les participants devaient habiter dans la région de Montréal, à moins d'un kilomètre d'un carrefour giratoire et y avoir marché dans les trois derniers mois. Le groupe recruté avait une bonne diversité en terme de sexe et d'âge. La

Tableau 5 – Attributs et valeurs des attributs utilisés dans la littérature pour analyser la sécurité des usagers vulnérables dans les carrefours giratoires et autres types de carrefour, selon le type de méthode d’analyse (enquête avec préférences déclarées (PD) ou autre) (- indique l’absence de travaux pertinents)

Attributs	Valeurs	Analyse de la sécurité des usagers vulnérables dans tous les types de carrefour		Analyse de la sécurité des usagers vulnérables dans tous les types de carrefour	
		Autres méthodes	Enquête avec PD	Autres méthodes	Enquête avec PD
Débit de circulation motorisée	Bas, moyen, élevé	[75, 34, 56]	[14, 57, 46, 45]	[38, 55, 20, 18, 52, 74]	-
Vitesse de la circulation	Basse, moyenne, élevée	[75, 34, 56]	[14, 57, 46, 45]	[38, 55, 20, 18, 52, 74]	-
Débit de piétons	Bas, moyen, élevé	[75, 3, 56]	[57, 45]	-	-
Signalisation	Aucune signalisation, cédez-le-passage, limite de vitesse, passage piéton	[75, 13]	[14, 57, 46]	[21, 55, 74]	-
Passage pour piétons	À l’entrée du carrefour, près de l’entrée, loin de l’entrée	[75]	[14, 57, 46]	-	-
Barrières physiques	Végétation, médiane, absence de barrière	[75, 56]	[14]	[53, 74]	-

discussion a commencé par des échanges sur ce que les répondants pensaient des carrefours giratoires, suivis par des questions sur leurs perceptions de la sécurité en fonction des attributs des carrefours giratoires.

Le groupe de discussion a ainsi permis de confirmer cinq attributs identifiés dans la revue de littérature [38, 20, 18] : la signalisation, la position du passage piéton, i.e. la distance du carrefour (bien qu'aucune préférence claire pour une valeur de cet attribut n'émerge), le débit de la circulation motorisée (avec une préférence pour débit plus faible), la vitesse de la circulation et le débit des piétons (avec une préférence pour un débit plus élevé). Les participants proposèrent deux attributs supplémentaires : le nombre de voies (avec une préférence pour un nombre plus faible) et la présence d'un îlot directionnel pour les piétons (avec une préférence pour leur présence). Ils suggérèrent aussi une nouvelle possibilité pour la signalisation : des feux clignotants (avec une préférence pour leur présence). La première version du questionnaire incluait tous ces attributs.

Une enquête pilote a ensuite été effectuée pour identifier les problèmes, pour tester non seulement le questionnaire, mais aussi les outils d'administration et les procédures de collecte de données mises en œuvre dans l'enquête finale. La structure de l'enquête pilote était identique à celle de l'enquête finale. Six tâches à choix discret pour deux carrefours giratoires alternatifs ont été montrées à 48 participants. Ces réponses ont mené à redéfinir les attributs de la vitesse et le débit de la circulation motorisée de sorte que les différences entre les valeurs basses et élevées soit facilement perceptible tout en restant réalistes. Ces valeurs furent testées une nouvelle fois dans une enquête Internet plus simple. Ce test permit de plus de montrer que le débit des piétons ne semblait pas affecter les préférences des répondants et que les répondants n'étaient pas capables de distinguer différentes valeurs pour cet attribut, qui ne fut donc pas inclus dans les tâches à choix discret.

La structure finale du questionnaire était la suivante :

Première section Six questions générales socio-démographiques sur le répondant et son ménage ;

Deuxième section Deux questions sur le mode de transport et la fréquence d'accès à un carrefour giratoire pour chaque mode (voiture conducteur, voiture passager, transport en commun, vélo et marche) dans les trois derniers mois

Troisième section Trois questions sur la perception de sécurité et les connaissances du fonctionnement des carrefours giratoires

Quatrième section Six questions/tâches à choix discret

Les tâches à choix discret de la version finale ont testé les six attributs et valeurs possibles suivants :

Signalisation absence, présence des panneaux standards pour les passages piétons et cyclistes et panneaux avec feux clignotants pour les passages piétons et cyclistes
Selon la littérature et le groupe de discussion, il était attendu que les piétons préfèrent les panneaux, en particulier avec feux clignotants.

Nombre de voies une ou deux voies par direction

Il était attendu que les piétons préfèrent une plus courte distance à traverser (une seule voie).

Présence d'un îlot piétonnier

Il était attendu que les piétons préfèrent la présence d'un îlot piétonnier.

Distance entre le passage pour piétons et l'entrée du carrefour absence de passage pour les piétons, position du passage à l'entrée du carrefour, position du passage à 5 m de l'entrée du carrefour

La préférence n'était pas claire dans le groupe de discussion, mais la littérature et les résultats de l'enquête pilote indiquent une préférence pour la position la plus éloignée de l'entrée du carrefour.

Débit de circulation motorisée débit faible et élevé (100 et 500 véh/h)

Ces valeurs furent choisies selon les résultats de l'enquête pilote, de sorte que les différences entre les débits soient facilement perceptibles, tout en gardant des débits réalistes. Il était attendu que les piétons préfèrent des débits faibles.

Vitesse moyenne de la circulation vitesse faible et élevée (22 et 65 km/h)

De même que pour les débit de circulation, les valeurs ont été choisies de sorte que les différences de valeur soit facilement visibles, tout en gardant des vitesses réalistes. Il était attendu que les piétons préféreraient des vitesses plus faibles.

Chaque tâche à choix discret présentait deux carrefours giratoires alternatifs, avec des valeurs différentes pour tout ou partie de ces six attributs : le répondant devait choisir le carrefour qu'il préférait en terme de sécurité. Chaque carrefour était présenté sous forme d'une animation générée à l'aide du logiciel de simulation microscopique de la circulation VISSIM développé par la compagnie PTV Group¹⁹. Aucune autre information n'était fournie sur les attributs différents entre les alternatives (hormis dans l'introduction générale aux tâches à choix discret). La Figure 25 montre un exemple de tâche à choix discret avec des images fixes des simulations utilisées pour représenter les carrefours alternatifs (les vidéos étaient hébergées sur le site YouTube²⁰ et insérées dans le questionnaire Internet). La première alternative montre un carrefour giratoire avec une seule voie de circulation dans chaque sens, pas d'îlot piétonnier, des panneaux standards pour les passages piétons et le passage piéton à l'entrée du carrefour. La seconde alternative est un carrefour giratoire avec deux voies de circulation dans chaque sens, des panneaux pour les passages piétons avec feux clignotants, un îlot piétonnier et le passage piéton éloigné de l'entrée du carrefour. Il est possible de distinguer la différence de débit de circulation, mais pas la vitesse, dans les images statiques de la Figure 25. Le questionnaire complet de l'enquête est disponible en annexe B.

Les combinaisons de valeurs des attributs pour les alternatives doivent être choisies avec beaucoup de précautions dans les enquêtes avec préférences déclarées. On a alors recours à des méthodes de conception de plan d'expériences ("design of experiments") [51]. Étant donné le nombre d'attributs et de valeurs possibles par attributs, le nombre total de carrefours giratoires différents est de 144 et il existe donc $144^2 = 20736$ tâches à choix discret possibles, qui se comparent à une cible de 500 répondants (fois six tâches à choix discret par répondant). Les six tâches à choix discret par répondants ont été générées par le logiciel de développement de questionnaire Internet et d'enquête avec préférences déclarées Sawtooth Software²¹.

La méthode de génération des tâches à choix discret choisie est la stratégie de chevauchement équilibré ("balanced-overlap strategy") qui est un compromis entre une stratégie aléatoire et l'énumération exhaustive. La stratégie aléatoire consiste en un tirage aléatoire avec remplacement des valeurs des attributs, de sorte que certains attributs, mais pas tous, peuvent être identiques entre deux alternative d'une même tâche. L'énumération complète permet de mesurer

19. <http://vision-traffic.ptvgroup.com/fr/produits/ptv-vissim/>

20. Les vidéos sont visibles à l'adresse <https://www.youtube.com/channel/UCAhaa2169pmruByIqqnOY-A/videos>.

21. <http://www.sawtoothsoftware.com/>

Français

If you were a PEDESTRIAN, which roundabout would you prefer?
(The videos may take a few seconds to load)

ATTRIBUTES VARYING IN SCENARIOS



FIGURE 25 – Exemple d’une tâche à choix discret du questionnaire Internet

au mieux les effets des différents attributs indépendamment. En terme d’efficacité du questionnaire, mesurée par la minimisation de l’écart-type des estimations des coefficients, la stratégie de chevauchement équilibré est moins efficace que les stratégie avec un chevauchement minimal (chaque valeur d’attribut apparaît aussi peu souvent que possible dans une tâche), mais permet généralement des réponses des répondants plus réfléchies en encourageant des compromis entre les alternatives et permet de capturer les interactions entre les attributs.

Une compagnie de sondage, Groupe Altus, fut engagée pour recruter les 500 répondants à l’enquête finale et pour administrer les outils de l’enquête sur Internet. Les critères de participation à l’enquête étaient les suivants : être âgé de 18 ans et plus, habiter à moins de 1 km d’un carrefour giratoire (similairement à certains travaux antérieurs ayant sélectionné les répondants dans certaines zones [46, 48], avoir marché dans un carrefour giratoire dans les trois derniers mois. Les coordonnées des carrefours giratoires collectées dans l’inventaire du projet furent fournies à la compagnie de sondage.

L’enquête fut conduite pendant la première semaine de juillet 2013, générant 501 questionnaires remplis. Avant de pouvoir estimer le modèle présenté ci-dessous, il est nécessaire de nettoyer les données. Suivant la méthode présentée dans [39], les tâches à choix discret furent examinées et les répondants dont les réponses aux tâches à choix discret étaient “dominées” (i.e. l’alternative, non choisie, avait au moins un attribut préféré et aucun moins désirable, basé sur les préférences des piétons identifiées dans la littérature et confirmées dans les groupes de discussion) étaient supprimés de l’analyse. 14 % des répondants ont ainsi été retirés de l’ensemble de données pour l’analyse.

3.4.3 Les modèles statistiques de choix discret pour les préférences des piétons

La dernière partie de l’enquête est l’analyse des réponses et en particulier l’analyse des réponses aux tâches à choix discret. Ce type d’analyse est fait en général avec des modèles statis-

tiques discrets. La brève présentation qui suit s’inspire du livre [86] que le lecteur est invité à consulter pour des détails complémentaires.

Les modèles logit et multinomial logit (MNL) sont utilisés pour expliquer des choix discrets entre plusieurs alternatives mutuellement exclusives, i.e. pour prédire une variable catégorielle ou nominale. Selon la théorie de l’utilité aléatoire, une personne n prendra la décision i qui lui donne la plus grande utilité. Il est important de se rappeler que seul la personne connaît, intuitivement, l’utilité de chaque alternative, alors que le chercheur ne peut qu’observer les choix faits par la personne et certaines de ses caractéristiques. En analysant les choix de la personne, le chercheur peut estimer une fonction d’utilité correspondante (la partie déterministe de l’utilité), typiquement représenté par l’équation 20.

$$U_{ni} = V_{ni} + \varepsilon_{ni} \quad (20)$$

où U_{ni} est l’utilité de l’alternative i pour la personne n , V_{ni} est la portion déterministe de l’utilité et ε_{ni} est l’erreur aléatoire. V_{ni} peut s’écrire selon l’équation 21 comme une combinaison linéaire des coefficients du modèle β et du vecteur x_{ni} des attributs de l’alternative i et de la personne n .

$$V_{ni} = \beta x_{ni} \quad (21)$$

L’erreur n’est pas observée et c’est en fait l’hypothèse sur sa distribution qui détermine le modèle utilisé pour estimer la fonction d’utilité. S’il est fait l’hypothèse que l’erreur est indépendante et identiquement distribuée selon une loi d’extremum, alors la probabilité que la personne n choisisse l’alternative i est définie par la formule explicite du MNL dans l’équation 22 :

$$P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_j e^{V_{nj}}} \quad (22)$$

Bien que cette forme du MNL le rende facile à estimer, interpréter et utiliser, les hypothèses liées à l’erreur dans ce modèle sont questionnables dans différentes situations d’enquêtes à préférences déclarées, par exemple lorsque les observations comprennent plus d’une réponse par répondant. C’est pourquoi on utilise des modèles comme le modèle logit multinomial mixte (“mixed multinomial logit model”, MMNL) qui reposent sur des hypothèses plus flexibles et des méthodes d’intégration numériques.

Dans le modèle MNL, les coefficients β sont fixes pour toutes les personnes, alors que le modèle MMNL permet d’avoir un vecteur de coefficients aléatoires. En supposant que l’utilité change entre les personnes mais est constante pour chaque choix d’une personne donnée, l’utilité de l’alternative i dans le choix t (le temps) pour la personne n est $U_{nit} = \beta_n X_{nit} + \varepsilon_{nit}$, où l’erreur ε_{nit} est indépendante et identiquement distribuée selon une loi d’extremum sur le temps, les personnes et les alternatives. En considérant une série d’alternatives $i = \{i_1, \dots, i_T\}$ pour chaque période de temps, la probabilité $L_{ni}(\beta)$ qu’une personne fasse cette série de choix est le produit des probabilités de chaque choix (voir équation 22) puisque les erreurs sont indépendantes par rapport au temps :

$$L_{ni}(\beta) = \prod_{i=i_1}^{i_T} \frac{e^{\beta_n X_{nit}}}{\sum_j e^{\beta_n X_{njt}}} \quad (23)$$

L'intégrale de ce produit sur toutes les valeurs de β est la probabilité non-conditionnelle P_{ni} :

$$P_{ni} = \int L_{ni}(\beta) f(\beta) d\beta \quad (24)$$

où f est la fonction de densité de probabilité des paramètres β dans la population des répondants. Cette intégrale sur toutes les valeurs de β permet de capturer la corrélation des erreurs sur les choix d'une personne donnée.

4 Résultats

4.1 Inventaire et description des carrefours giratoires

L'inventaire a été fait lors des visites pour la collecte de données vidéo, mais surtout par l'utilisation des outils de visite "virtuelle" comme Google Maps et Street View qui ne permettent cependant pas de collecter les mesures descriptives de tous les sites, soit parce que les données de ces services sont trop anciennes (avant ou juste pendant leur construction), soit parce que les données ne sont pas assez précises (par exemple la vue aérienne ne permet pas toujours de déterminer des distances ou des angles précisément entre des éléments des carrefours). Il a été possible à date de ce rapport d'identifier 121 carrefours dans la province, dont 55 sur le réseau du MTQ. Leurs répartitions sur le territoire et par direction territoriale du MTQ sont présentée dans les Figures 29 et 26 : les régions plus urbaines ont en général une proportion plus grande de carrefours sur le réseau municipal. La distribution du nombre d'approches par carrefour est aussi représentée dans la Figure 27 : le type de carrefour le plus courant a quatre approches, suivi par trois approches. Ces deux types les plus courants constituent 92 % de tous les carrefours construits. Il est à noter que les trois carrefours n'ayant qu'une seule approche sont des carrefours permettant des demi-tours sur le bord du Boulevard Sainte-Anne au nord de Québec. Les années de construction ne sont connues que pour 60 carrefours parmi ces 121 carrefours (voir Figure 28) : la croissance du nombre de carrefours en fonction de l'année est à peu près linéaire de 2001 à 2014, avec l'ajout d'une moyenne de 4.3 carrefours par an entre 2001 et 2014 sur cet ensemble, soit probablement environ 8.5 carrefours par an sur toute la province en extrapolant à l'ensemble de 121 carrefours.

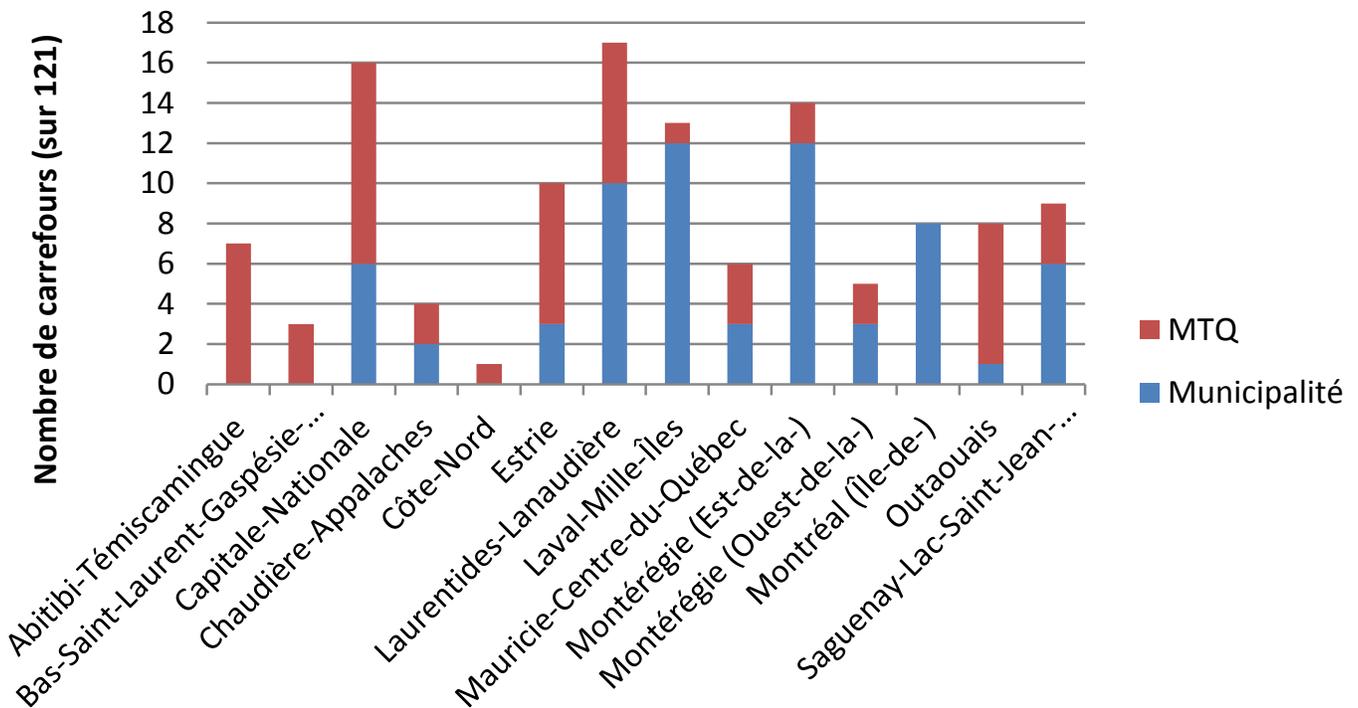


FIGURE 26 – Distribution du nombre de carrefours giratoires par direction territoriale, selon qu'ils sont sur le réseau du MTQ ou d'une municipalité

Les descriptions suivantes concernent l'unité des analyses vidéo, soit le quadrant. Certains attributs sont connus pour 160 quadrants dans 40 carrefours giratoires (comprenant les sites aux-

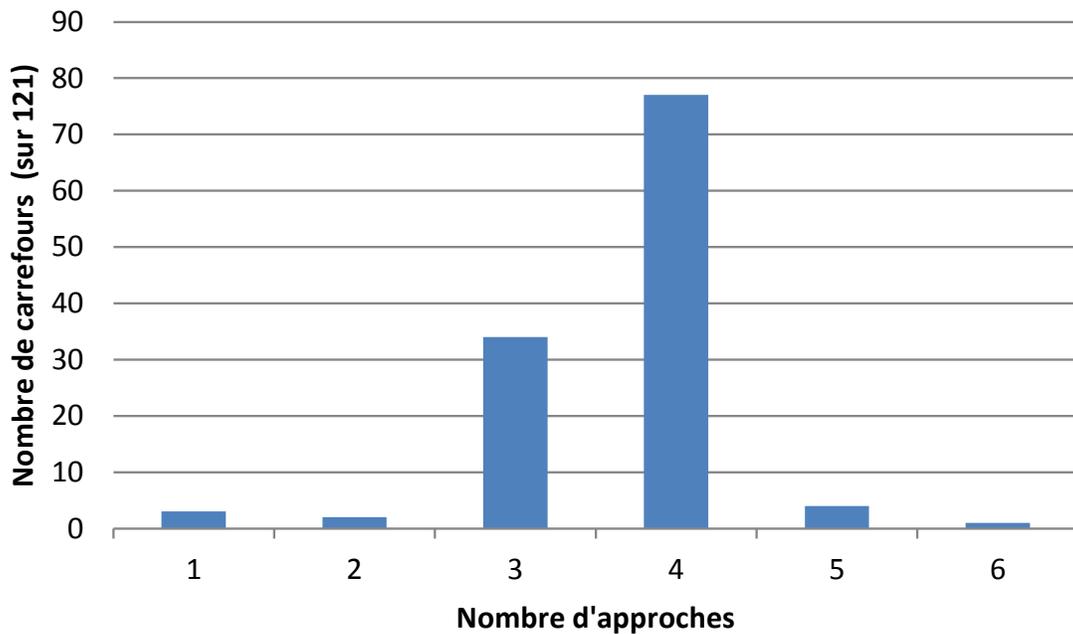


FIGURE 27 – Distribution du nombre d’approches des carrefours giratoires

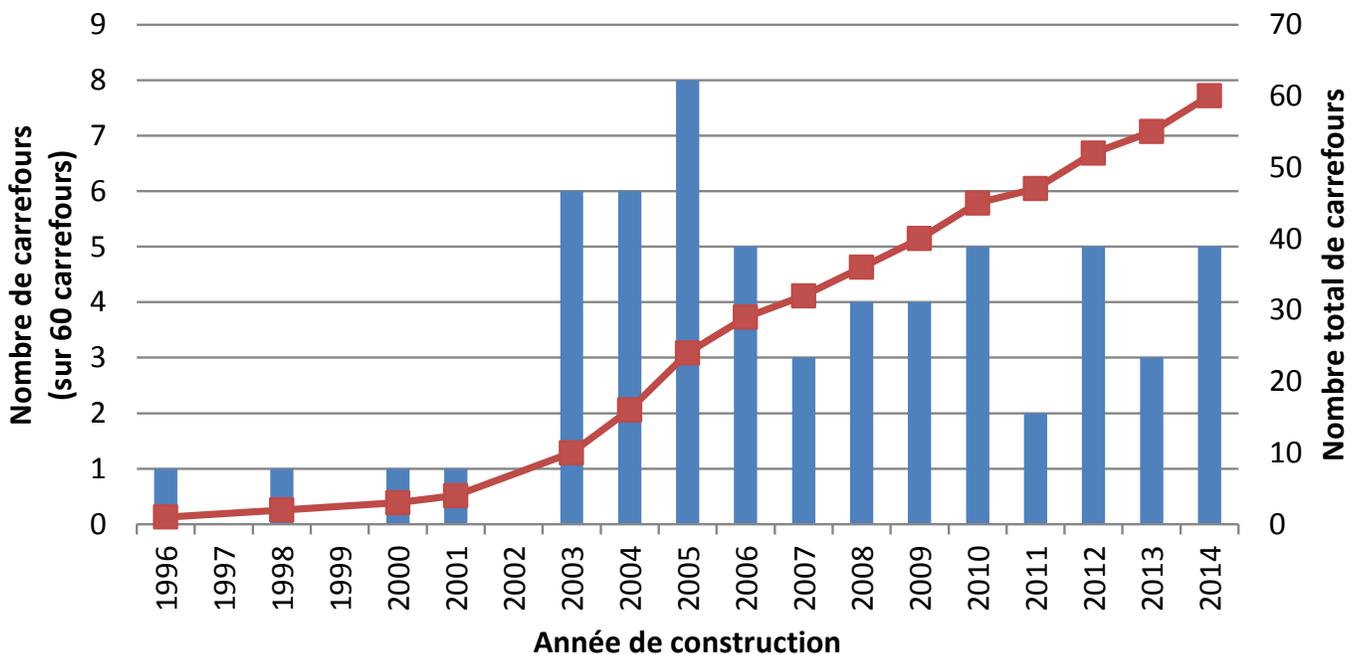


FIGURE 28 – Nombre de carrefours giratoires construits par année (barres bleues) et cumulés depuis leur apparition en 1998 (courbe rouge) (le nombre de carrefours construits par année, en bleu, correspond à l’axe vertical gauche, le nombre cumulé de carrefours construits depuis leur apparition, en rouge, correspond à l’axe vertical droit)

quels des données vidéo ont été collectées et qui sont analysés en détail dans la suite). Les différents rayons sont présentés dans la Figure 30, où l’on peut voir que la majorité correspondent à des carrefours moyens (rayon extérieur entre 15 et 25 m), puis à des grands carrefours (rayon extérieur supérieur à 25 m) et à quelques petits carrefours (rayon extérieur inférieur à 15 m) (voir Tableau 1). La Figure 31 montre que la majorité des quadrants présentent un angle de 90 ° entre

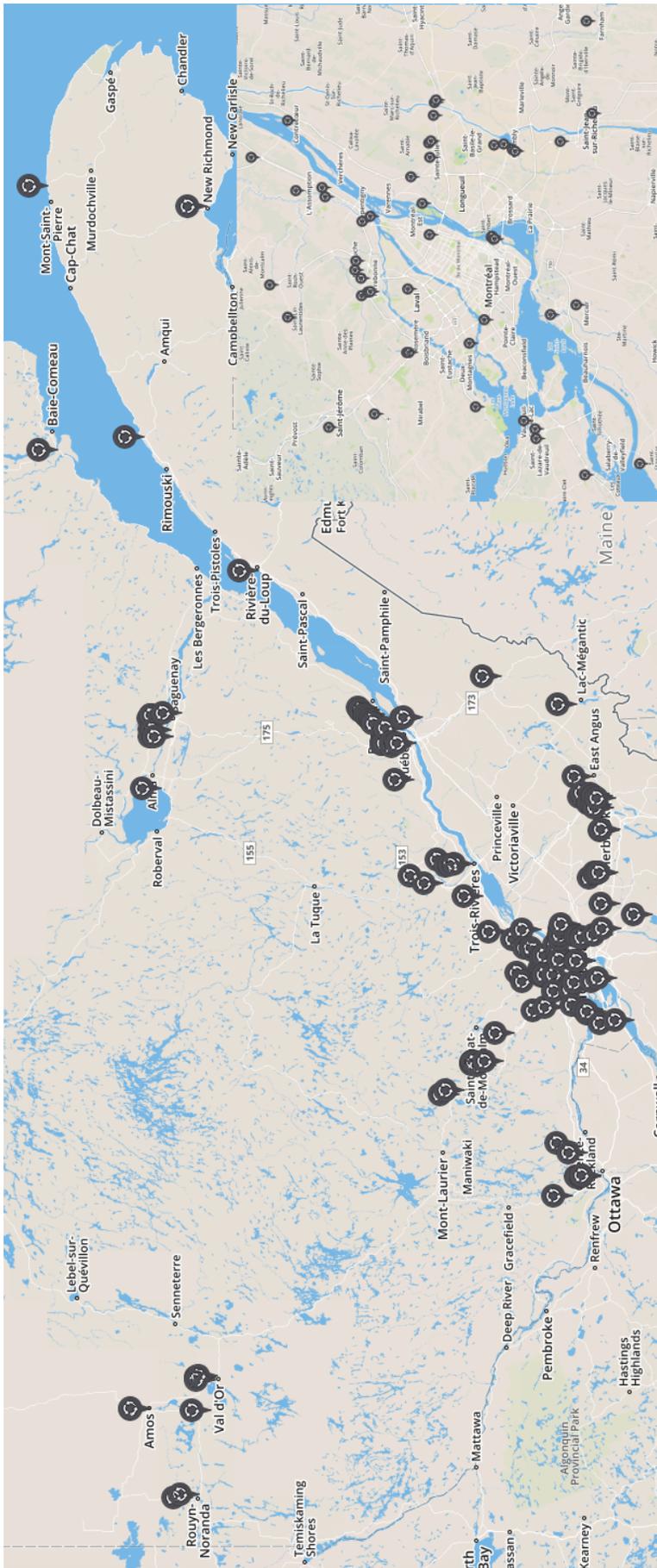


FIGURE 29 – Carte des 121 carrefours giratoires recensés en fin du projet sur tout le territoire du Québec (en haut) et dans la grande région de Montréal (en bas)

les approches, en général sur des carrefours à quatre approches. On observe quelques valeurs extrêmes, petites et grandes.

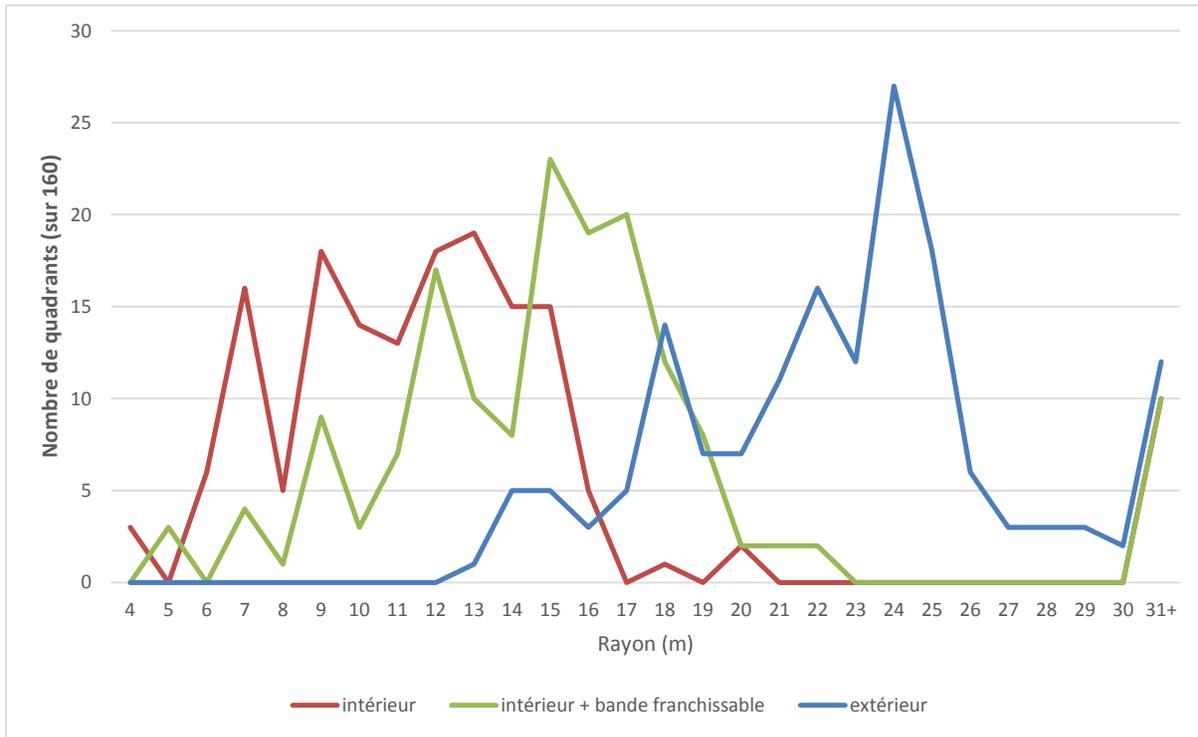


FIGURE 30 – Distribution des rayons intérieurs, extérieurs et des rayons intérieurs plus bande franchissable des quadrants

Les attributs suivants n’ont été relevés que pour 108 ou 109 quadrants. La variation du nombre de voies entre l’approche et la sortie, ainsi qu’entre le début et la fin de l’anneau sur le quadrant, illustre que ce nombre est essentiellement constant pour l’anneau (hormis dans 6 quadrants), mais change pour 28 % des quadrants entre la voie d’entrée et la voie de sortie, avec une majorité de rétrécissement. Ces variations sont susceptibles de rendre les interactions plus complexes entre usagers qui ne s’y attendent pas. Concernant la distance entre le carrefour giratoire (l’entrée sur ou la sortie de l’anneau) et le carrefour le plus proche respectivement en amont ou aval, la plupart sont à une distance inférieure à 600 m. Une proportion non-négligeable présente des valeurs bien plus grandes pour des carrefours isolés typiquement en milieu rural.

Des éléments d’aménagement pour les usagers vulnérables ont aussi été relevés. Si la majorité des quadrants ont des aménagements pour les piétons (voir Figure 34), près d’un quart (23 %) n’en ont aucun, ce qui inclut cependant un nombre important de carrefours giratoires placés sur des bretelles d’autoroutes. Le type d’aménagement plus courant pour les piétons est une traverse avec un chemin connectant les traverses qui ne suit pas la chaussée. Concernant les aménagements pour les cyclistes, 25.7 % des quadrants ont une piste cyclable (sur 105 quadrants). L’îlot séparateur est un élément de conception important pour contrôler la trajectoire des véhicules en approche, et donc leur vitesse, et pour la sécurité des piétons lors de leur traversée. Selon la Figure 35, la plupart présentent un mélange (hybride) de peinture et de structure surélevée, et le second aménagement le plus courant est un îlot surélevé.

Finalement, pour les 108 quadrants dont les informations de signalisation sont disponibles et présentés dans la Figure 36, plusieurs types de panneaux sont manquants ou (beaucoup plus

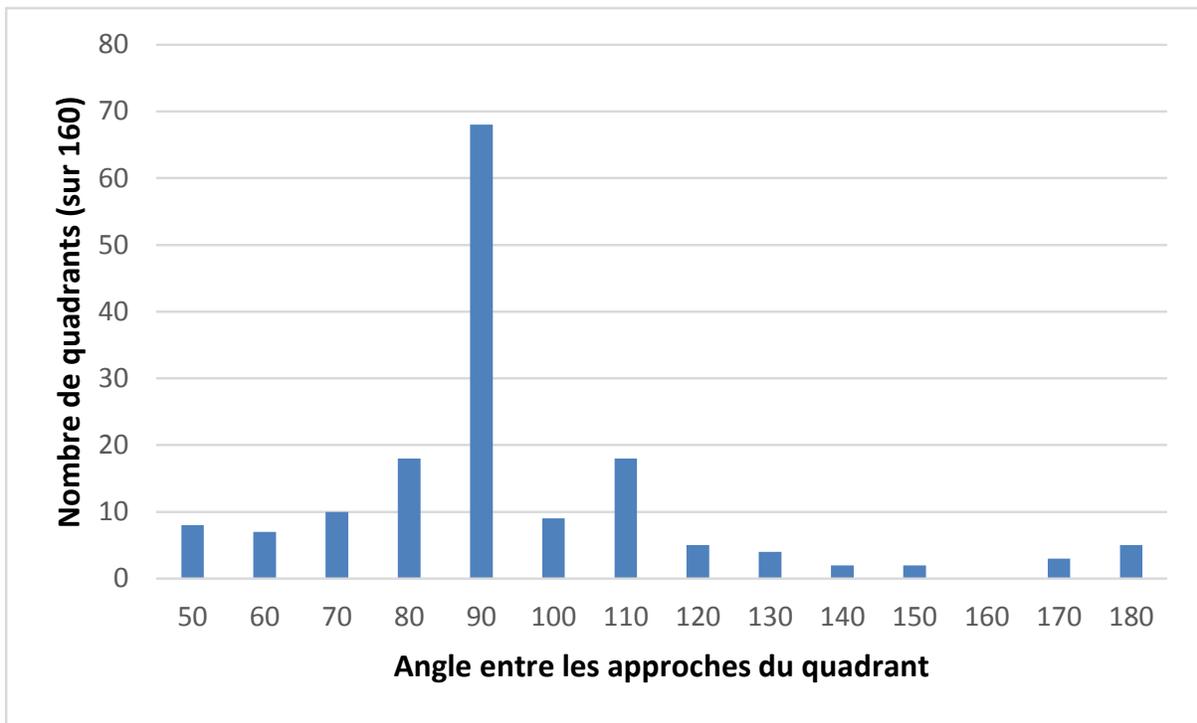


FIGURE 31 – Distribution de la taille angulaire (angle entre les approches) des quadrants

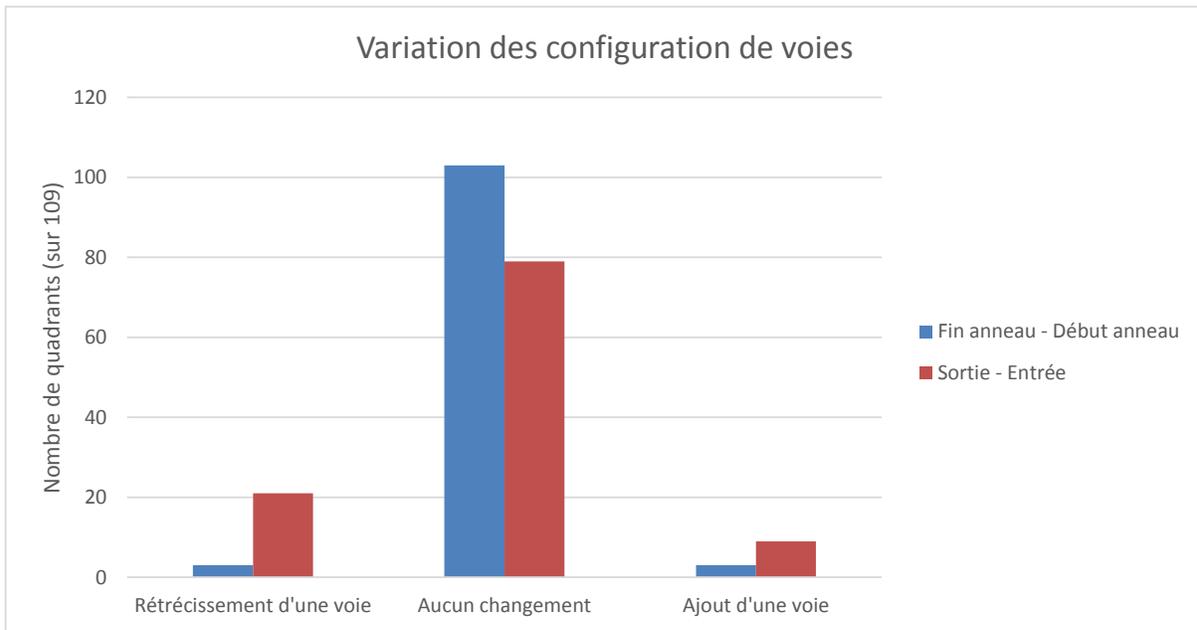


FIGURE 32 – Distribution des variations de configurations des voies pour les voies sur l’anneau et en entrée-sortie des quadrants

rarement) mal placés dans 20 à 40 % des cas. Cette information illustre de façon partielle le quatrième objectif de ce projet sur la cohérence de la signalisation dans les carrefours giratoires, à savoir qu’elle semble suivre les normes et recommandations dans la plupart des cas, mais qu’une certaine variabilité est observée dans un nombre trop important de sites.

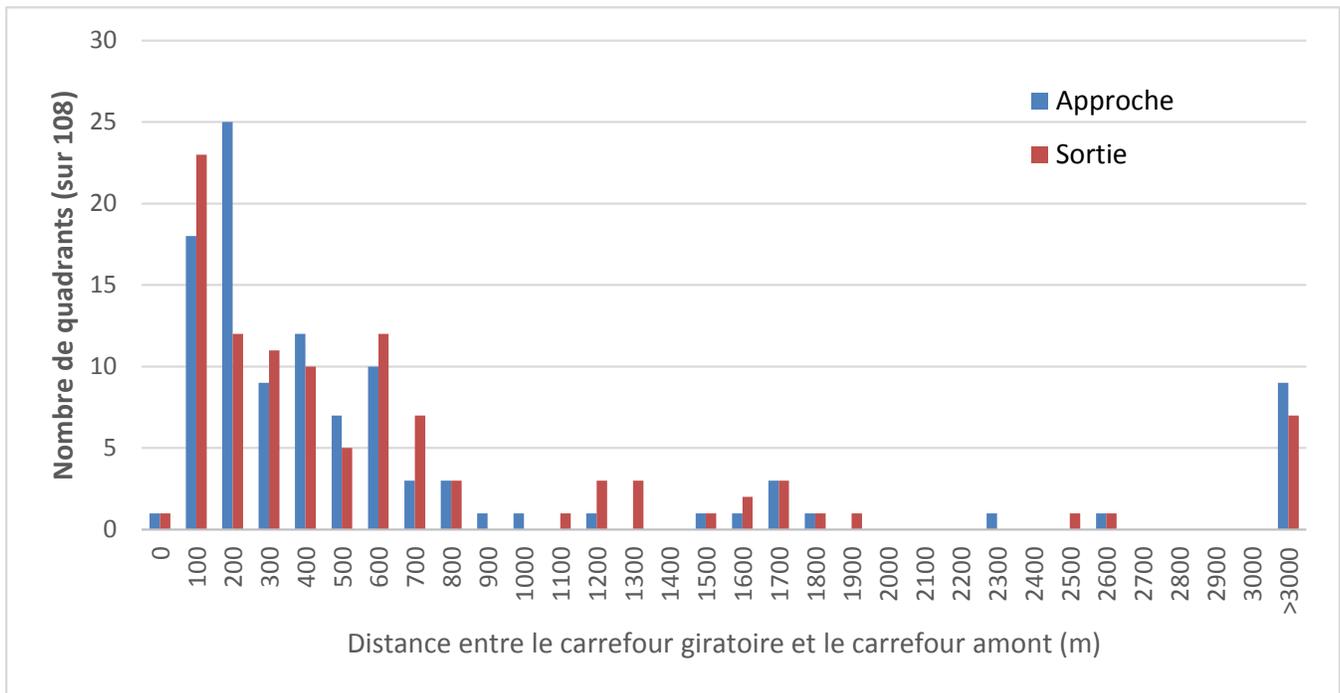


FIGURE 33 – Distribution de la distance entre le carrefour giratoire, par quadrant, et le carrefour amont ou aval respectivement pour l'approche ou la sortie

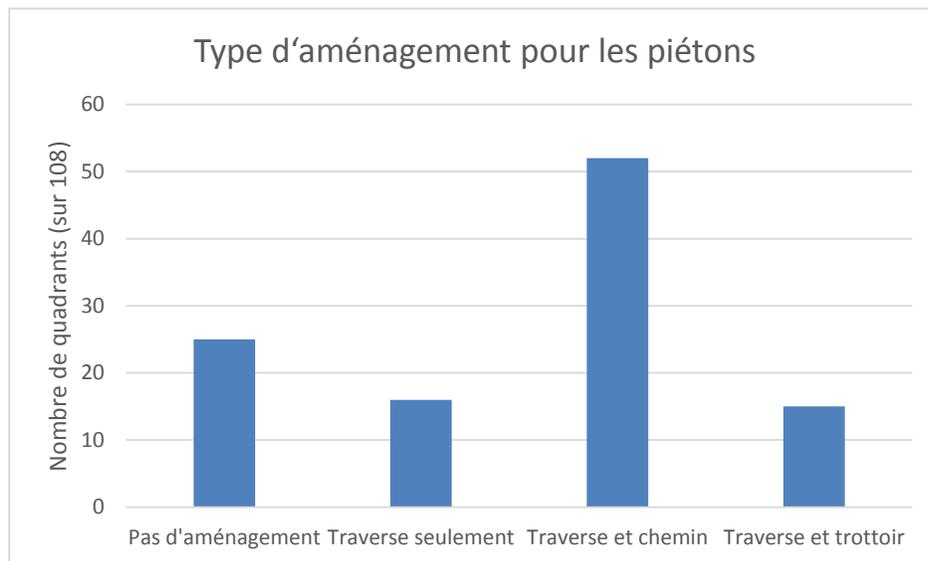


FIGURE 34 – Type d'aménagement piétons par quadrant

4.2 Analyse des accidents

4.2.1 Présentation

Les 21 municipalités pour lesquels des données d'accident ont été obtenues sont présentées dans le Tableau 6 : elles ont été choisies car leur territoire comprend 65 carrefours giratoires (selon l'inventaire du projet à l'été 2011). Parmi ces accidents, 295 619 (soit 38.8 %) n'ont pas de coordonnées de localisation et ont donc été traités à l'aide de la procédure de localisation

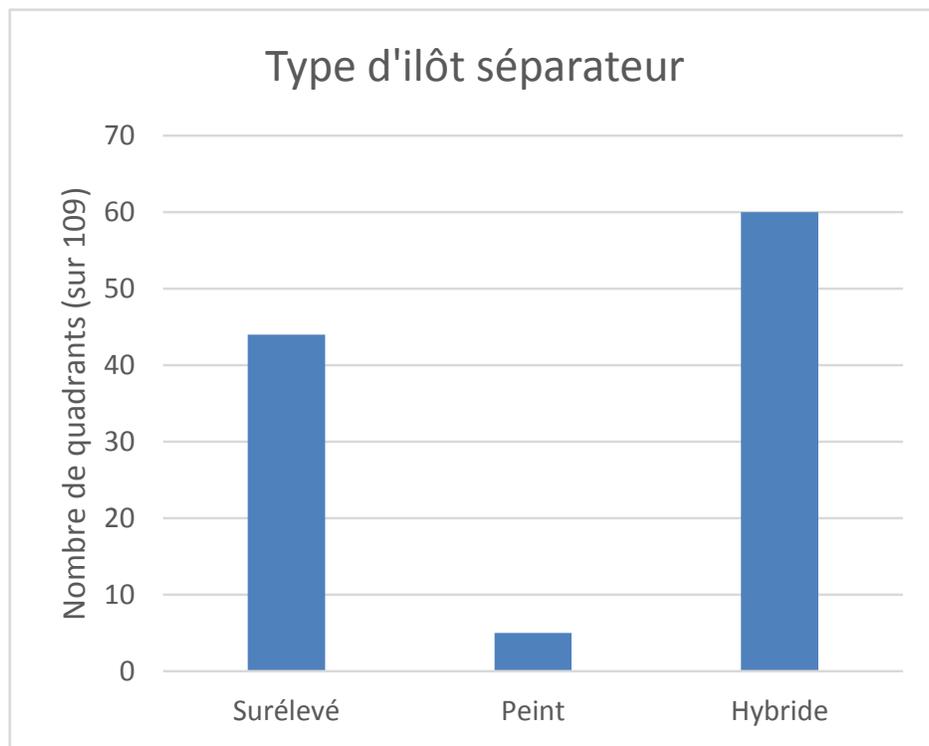


FIGURE 35 – Distribution des types d'îlot séparateur par quadrant

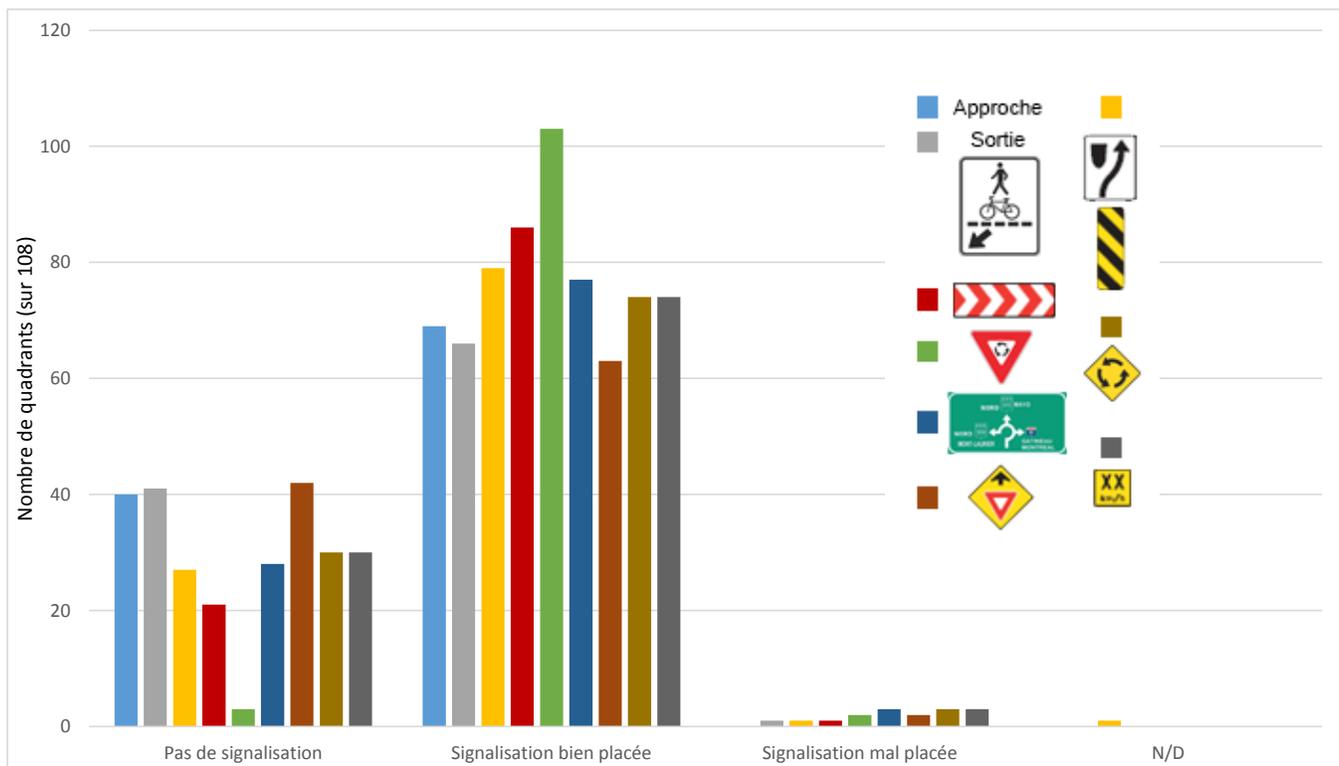


FIGURE 36 – Distribution des panneaux présents par quadrant

automatique présentée dans la section méthodologique.

Tableau 6 – Nombre total d’accidents N_A sur les territoires des municipalités sélectionnées sur la période 2000-2011

Municipalité	Nombre d’accidents
Amos	6641
Boucherville	8049
Chambly	5432
Gatineau	80540
Granby	10063
Montréal	464400
Mont-Saint-Hilaire	4221
Mont-Tremblant	6771
New Richmond	1430
Pointe-Lebel	400
Saguenay	64641
Sainte-Agathe-des-Monts	4888
Saint-Julie	5498
Saint-Gédéon	690
Saint-Henri	1436
Saint-Irénée	227
Shawinigan	20127
Trois-Rivières	51471
Val-d’or	13116
Vaudreuil-Dorion	11540
Yamachiche (Louiseville)	1137
Total	762718

4.2.2 Résultats de la localisation des accidents

Le Tableau 7 présente les résultats de la localisation automatique des 762718 accidents de l’ensemble “municipal” par municipalité. Les accidents localisés automatiquement représentent 94.0 % de l’ensemble des données initiales. Par comparaison avec la littérature, c’est un taux très élevé qui devrait garantir que les accidents analysés par la suite sont bien représentatifs de l’ensemble des accidents. De plus, un effort complémentaire de vérification manuelle des accidents rejetés permet d’identifier des accidents survenus dans des carrefours giratoires.

4.2.3 Analyse avant-après de la fréquence des accidents

Tel qu’il a été indiqué dans la section méthodologique, il ne faut pas oublier que la méthode d’analyse avant-après est une comparaison avec groupe de contrôle qui ne permet pas de prendre en compte le phénomène de régression vers la moyenne. De plus, en l’absence de comptages de circulation à un nombre suffisant de sites pour les périodes étudiées, la circulation est supposée constante sur la période (c’est à dire que son effet n’est pas pris en compte). Les différences avant-après ne peuvent donc pas être complètement attribués à la conversion des carrefours en carrefours giratoires.

Parmi les 54 carrefours giratoires pour lesquels des données suffisantes (accidents sur une période d’observation assez longue et caractéristiques des carrefours) étaient disponibles, les 37 sites considérés pour l’analyse de la fréquence des accidents sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 7 – Résultats de la méthode de localisation des accidents appliquée à l’ensemble des accidents municipaux (N_A nombre d’accidents ; N_{Aloc} et $\%_{Aloc}$ nombre et proportion d’accidents avec information de localisation ;)

Municipalité	N_A	Initialement		Après localisation	
		N_{Aloc}	$\%_{Aloc}$	N_{Aloc}	$\%_{Aloc}$
Amos	6641	3322	50.00 %	5908	89.00 %
Boucherville	8049	5933	73.70 %	6673	82.90 %
Chambly	5432	4471	82.30 %	4826	88.80 %
Gatineau	80540	64859	80.50 %	72356	89.80 %
Granby	10063	8167	81.20 %	9106	90.50 %
Montréal	464400	248726	53.60 %	45,8044	98.60 %
Mont-Saint-Hilaire	4221	3391	80.30 %	3612	85.60 %
Mont-Tremblant	6771	5245	77.50 %	5829	86.10 %
New Richmond	1430	1286	89.90 %	1323	92.50 %
Pointe-Lebel	400	305	76.30 %	331	82.80 %
Saguenay	64641	48957	75.70 %	56198	86.90 %
Sainte-Agathe-des-Monts	4888	3782	77.40 %	4109	84.10 %
Saint-Julie	5498	4588	83.40 %	4869	88.60 %
Saint-Gédéon	690	541	78.40 %	591	85.70 %
Saint-Henri	1436	1224	85.20 %	1270	88.40 %
Saint-Irénée	227	157	69.20 %	175	77.10 %
Shawinigan	20127	10493	52.10 %	15871	78.90 %
Trois-Rivières	51471	32969	64.10 %	43818	85.10 %
Val-d’or	13116	6917	52.70 %	10142	77.30 %
Vaudreuil-Dorion	11540	10810	93.70 %	11224	97.30 %
Yamachiche (Louiseville)	1137	956	84.10 %	995	87.50 %
Total	762718	467099	61.20 %	716029	94.00 %

Pour l’analyse finale, un minimum de deux ans pour les périodes pré- et post-construction fut appliqué, ce qui mena à un ensemble de 25 carrefours giratoires analysés. Les statistiques des périodes d’analyse sont présentées dans le Tableau 9.

Afin de présenter des résultats de manière plus synthétique, les carrefours giratoires furent regroupés pour identifier des tendances plus générales. Ces groupes, décrits dans le Tableau 10, furent sélectionnés manuellement selon leurs attributs, mais sont en accord avec les groupes obtenus par la méthode des k-moyennes sur l’ensemble des quadrants analysés par vidéo présenté dans la suite.

Les résultats de l’analyse avant-après selon ces groupes sont présentés dans le Tableau 11. Les résultats sont très variés dans l’ensemble de sites. Parmi les 25 sites analysés, 13 carrefours giratoires ont vu une augmentation du nombre d’accidents dans la période post-construction par rapport au nombre d’accidents attendu selon le groupe de comparaison. Si deux groupes montrent une amélioration de la sécurité (groupes 2 et 4), le reste des groupes a vu une détérioration de la sécurité en moyenne. Il faut noter par ailleurs que les intervalles de confiance de l’estimation de l’indice d’efficacité θ sont très grands. La plupart des intervalles ont une borne inférieure en-dessous de 1.0 et une borne supérieurs autour ou au-dessus de 2.0 : puisque la valeur de 1.0 est dans la plupart des intervalles de confiance de θ , on ne peut rejeter la possibilité que l’indice d’efficacité soit 1.0, c’est à dire que la conversion n’ait eu aucun effet. Le manque

Tableau 8 – Résumé des accidents pour chaque carrefour giratoire (avec # le numéro du carrefour giratoire, N_A^{av} , N_A^{pend} et N_A^{ap} le nombre d'accidents respectivement avant, pendant et après la construction du carrefour giratoire)

#	Nom	Municipalité	N_A	N_A^{av}	N_A^{pend}	N_A^{ap}
2	Frechette/Brassard	Chambly	58	15	6	37
3	Bourgogne/deSalaberry	Chambly	47	12	2	33
4	FerACheval/JulesChoquet	Sainte-Julie	20	12	1	7
5	R132/deMontarville /Rene-Levesque	Boucherville	17	4	1	12
6	A10/A15	Montréal	3	1	1	1
8	IleDesSoeurs/duGolf	Montréal	65	17	6	42
12	Ryan/Duplesis	Mont-Tremblant	55	10	3	42
15	R327/Ryan	Mont-Tremblant	107	57	14	36
16	Principale/Desjardins	Sainte-Agathe -des-Monts	100	46	11	43
20	R105/Montcalm	Gatineau	77	16	4	57
21	R138/Sherbrooke	Montréal	19	9	1	9
23	R218/R277	Saint-Henri	39	16	7	16
24	R132/Cyr	New Richmond	58	47	3	8
25	Station/delaBaie	Shawinigan	137	37	17	83
26	R138/PaysBrule	Louiseville	139	63	14	62
29	R148/desLaurentides	Gatineau	48	22	5	21
30	PierreL/Bruce	Granby	52	29	5	18
33	R111/Principale (R395)	Amos	63	13	7	43
34	R111/4e	Amos	63	18	9	36
35	R117/3e	Val-d'Or	57	20	7	30
36	R117/R397	Val-d'Or	169	53	15	101
37	R117/Hydro	Val-d'Or	57	20	4	33
38	R111/R117	Val-d'Or	109	48	7	54
41	R138/Granier	Pointe-Lebel	89	36	8	45
42	R170/deQueen	Saint-Gédéon	53	41	7	5
43	A40/CitédesJeunes	Vaudreuil-Dorion	23	1	2	20
44	R172/Roussel/du pont	Saguenay	87	81	2	4
45	R173/277	Saint-Henri	37	19	7	11
74	Talbot/Jacques-Cartier	Saguenay	83	27	10	46
75	duFoyer/Jacques-Cartier	Saguenay	27	1	4	22
86	desSousBois/delaForet	Mont-Tremblant	7	4	2	1
87	desSousBois	Mont-Tremblant	2	1	0	1
88	R138/Royale	Trois-Rivières	90	38	15	37
89	DesRecollets/Laviolette	Trois-Rivières	288	100	30	158
95	MarcA/Mousseau	Saguenay	16	14	1	1
96	SaintEmilie/SaintDenis	Saguenay	13	9	0	4
144	R362/Rang Terrebonne	Saint-Irenee	15	11	2	2
Total			2389	968	240	1181

Tableau 9 – Description des périodes d’analyse avant-après

Statistique	Période	
	pré-construction (ans)	post-construction (ans)
Moyenne	4.5	5.3
Écart-type	1.4	1.3
Minimum	2.0	3.0
Maximum	7.0	7.5

Tableau 10 – Description des groupes de carrefours giratoires pour l’analyse avant-après des accidents

#	Description
1	Carrefours giratoires situés sur des échangeurs d’autoroutes
2	Petits carrefours giratoires à une voie généralement situés dans des quartiers résidentiels
3	Carrefours giratoires plus grands, à plusieurs voies sur des rues locales
4	Mélange de types de carrefours giratoires et de configurations de voies sur des routes principales et des autoroutes régionales, avec circulation à haute vitesse
5	Ronds-points convertis en carrefours giratoires : grands rayons, plusieurs voies et approches tangentielles
6	Carrefours giratoires situés à l’entrée de villes ou développements résidentiels

de significativité peut être attribué à des accidents non-rapportés, la mauvaise localisation des accidents, la régression vers la moyenne et la petite taille de l’échantillon.

Il est cependant possible de faire quelques observations supplémentaires pour les groupes identifiés. Dans l’ensemble, les sites d’un même groupe subissent une même évolution du nombre d’accidents. Par exemple, tous les carrefours giratoires du groupe 4 observent une amélioration de la sécurité. Selon les résultats des groupes 1 et 6, il semble que les carrefours giratoires où différents types de conducteurs sont forcés d’interagir, comme les échangeurs d’autoroute ou les carrefours aux entrées de villes/villages avec des débits polarisés et des différences de vitesse importantes, voient une détérioration de leur sécurité. De même, comme suggéré dans la littérature [5, 58, 68], le groupe 3 confirme que les carrefours giratoires à plusieurs voies sont typiquement moins sécuritaires que des carrefours plus petits avec moins de voies. Enfin, les deux carrefours du groupe 5 voient une augmentation du nombre d’accidents après leur conversion en carrefour giratoire (dans ce cas, aucune modification géométrique n’a eu lieu, seule la signalisation a changé pour se conformer au fonctionnement d’un carrefour giratoire).

Par ailleurs, les carrefours giratoires servant principalement une circulation plus homogène, locale ou régionale (groupes 2 et 4), avec peu de changements de limite de vitesse à proximité des carrefours semblent faire l’expérience d’une réduction du nombre d’accidents après leur conversion, en comparaison à leur valeur attendue. Ce résultat est attendu, la littérature contenant un grand nombre de carrefours giratoires dans des environnements urbains et ruraux avec une bonne performance de sécurité [68, 31].

Afin de mesurer l’impact général des carrefours giratoires sur la sécurité, il est possible de considérer les données dans leur ensemble. Une taille d’échantillon plus grande réduit la variance des estimations et augmente la possibilité d’identifier des effets significatifs. Les résultats

Tableau 11 – Regroupement des résultats de l’analyse avant-après (Gr. désigne le numéro du groupe de sites, # l’identifiant de chaque carrefour giratoire et les deux dernières colonnes présentent l’intervalle de confiance de $\hat{\theta}$ à 95 %)

Gr.	Municipalité	#	λ	$\hat{\pi}$	$\hat{\delta}$	$\hat{\theta}$	$Var(\hat{\theta})$	Intervalle de $\hat{\theta}$	
								Borne inf	Borne sup
1	Boucherville	5	12	11.3	-0.7	0.583	0.093	-0.014	2.357
	Louiseville	26	62	31.5	-30.5	1.772	0.323	0.659	2.851
	Effet de groupe						1.547	0.251	0.566
2	Chambly	3	33	34.6	1.6	0.758	0.104	0.124	2.388
	Saguenay	74	46	46.1	0.1	0.930	0.071	0.408	2.297
	Mont-Tremblant	86	1	13.1	12.1	0.052	0.002	-0.032	2.005
	Saguenay	96	4	9.7	5.7	0.333	0.035	-0.035	2.183
	Effet de groupe						0.770	0.035	0.406
3	Chambly	2	37	33.0	-4.0	0.867	0.144	0.124	2.483
	Montréal	8	42	35.0	-7.0	1.072	0.132	0.360	2.455
	Gatineau	20	57	36.7	-20.3	1.295	0.253	0.309	2.716
	Effet de groupe						1.217	0.097	0.608
4	Sainte-Julie	4	7	9.2	2.2	0.718	0.091	0.125	2.354
	Mont-Tremblant	12	42	48.2	6.2	0.600	0.081	0.041	2.326
	Mont-Tremblant	15	36	101.0	65.0	0.340	0.008	0.166	2.057
	Shawinigan	25	83	69.1	-13.9	1.122	0.090	0.535	2.350
	Gatineau	29	21	29.4	8.4	0.674	0.043	0.266	2.212
	Val-d’Or	36	101	169.4	68.4	0.545	0.026	0.230	2.147
	Val-d’Or	37	33	38.0	5.0	0.781	0.070	0.263	2.294
	Val-d’Or	38	54	65.4	11.4	0.799	0.031	0.454	2.167
	Effet de groupe						0.699	0.010	0.508
5	Trois-Rivières	88	37	32.4	-4.6	1.113	0.061	0.629	2.268
	Trois-Rivières	89	158	81.0	-77.0	1.932	0.058	1.458	2.260
	Effet de groupe						1.707	0.035	1.342
6	Saint-Henri	45	11	9.0	-2.0	1.189	0.162	0.399	2.526
	Montréal	21	9	9.3	0.3	0.887	0.133	0.172	2.458
	Saint-Henri	23	16	11.1	-4.9	1.368	0.201	0.489	2.610
	Amos	33	43	24.7	-18.3	1.446	0.330	0.321	2.864
	Amos	34	36	34.9	-1.1	0.899	0.108	0.256	2.396
	Val-d’Or	35	30	27.2	-2.8	1.031	0.097	0.420	2.369
	Effet de groupe						1.216	0.049	0.784

de l'analyse d'ensemble sont présentés dans le Tableau 12 : l'indice d'efficacité $\hat{\theta}$ est estimé à 1.012, avec une variance de 0.008, pour un intervalle de confiance à 95 % entre 0.8 et 1.2. Puisque l'intervalle de confiance contient la valeur 1.0, il est impossible de rejeter l'hypothèse que le traitement n'a eu aucun effet sur le nombre d'accidents. Même si la valeur de $\hat{\theta}$ avait été estimée significativement différente de 1.0, le résultat aurait pu être remis en question puisqu'il repose sur l'hypothèse que l'effet de tous les carrefours giratoires sur la sécurité est uniforme, ce qui ne semble pas être corroboré par les résultats par groupe du Tableau 11 qui montrent des résultats très différents selon la configuration et l'environnement de chaque site.

4.2.4 Analyse de régression de la fréquence des accidents

Les résultats de la régression binomiale négative et les variables significatives du modèle estimé avec le logiciel Stata sur les 36 carrefours giratoires avec suffisamment de données dans la période post-construction sont présentés dans le Tableau 13. Le test de log-vraisemblance indique que l'hypothèse nulle de $\alpha = 0$ devrait être rejetée, ce qui valide l'utilisation d'un modèle binomial négatif plutôt que de Poisson puisque les données présentent une sur-dispersion. Bien qu'aucune donnée d'exposition (comptages) ne soit disponible pour ce modèle, plusieurs variables comme le nombre de voies sont directement corrélées avec les débits de véhicules et peuvent être considérées comme des variables de substitution pour les variables manquantes.

Il est notable que toutes les variables significatives avec un niveau de confiance de 90 % ou plus sont liées à la conception, essentiellement géométrique, des carrefours giratoires. Similairement aux résultats précédents et à la littérature, le modèle suggère que plus un carrefour giratoire est grand, plus le nombre d'accidents augmente : cette observation s'appuie sur les attributs de présence d'une bande franchissable, de limite de vitesse sur l'approche et de nombre de voies sur l'anneau qui sont typiquement associés avec des carrefours giratoires de plus grande taille. Il est cependant encore possible que ces variables soit significatives car les variables associées avec des carrefours giratoires de plus grande taille sont généralement corrélées avec des débits plus élevés, ce qui ne peut être validé en l'absence de telles données.

Les deux autres variables positivement associées avec une augmentation du nombre d'accidents sont les carrefours giratoires avec des approches tangentielles typiquement trouvées dans les ronds-points convertis en carrefours giratoires, et la présence de zones d'arrêt sur les approches. Une approche tangentielle sur l'anneau ne fournit pas la déflexion nécessaire pour forcer les véhicules arrivant sur le carrefour à réduire leur vitesse. Ce résultat est en accord avec l'analyse avant-après du groupe 5, où les deux ronds-points convertis à Trois-Rivières subissent une détérioration de leur sécurité. Le petit nombre d'observations pour les deux analyses ne permet cependant pas de conclure définitivement sur ce point.

L'analyse de régression fournit donc des éléments suggérant comme l'analyse avant-après que les carrefours giratoires de petite taille, à une seule voie sur l'anneau, sont en moyenne plus sécuritaires que les carrefours giratoires plus grands. Ces résultats ne sont cependant pas concluants étant donné la largeur des intervalles de confiance des paramètres obtenus dans l'analyse avant-après.

4.2.5 Analyse de la gravité des accidents

Cette analyse ayant été effectuée tôt dans le projet, elle repose sur un sous-ensemble des données d'accidents. Certains accidents étant présents dans les ensembles de données MTQ et municipal, un filtrage a été nécessaire pour éviter les doublons. Les 37 carrefours giratoires dont

Tableau 12 – Analyse avant-après de l’ensemble des carrefours giratoires (N_{an}^{av} et N_{an}^{ap} sont respectivement le nombre d’années dans les périodes pré- et post-construction ; les nombres d’accidents ajustés dans la période pré-construction N_A^{av*} sont obtenus en multipliant le nombre d’accidents dans la période pré-construction N_A^{av} par le facteur r_d pour corriger les durées de temps différentes entre les périodes pré- et post-construction)

Municipalité	Sites traités										Sites de comparaison									
	#	N_{an}^{av}	N_{an}^{ap}	N_A^{av}	N_A^{av*}	N_A^{ap}	N_A^{av}	N_A^{av*}	N_A^{ap}	r_d	λ	\hat{r}_c	$\hat{\pi}$	$Var(\hat{\pi})$						
Chambly	2	3.0	7.0	15	35.0	37	35.0	81.7	78.0	2.3	37.0	0.9	33.0	318.5						
Chambly	3	4.0	6.0	12	18.0	33	17.0	25.5	51.0	1.5	33.0	1.9	34.6	308.8						
Sainte-Julie	4	7.0	3.0	12	5.1	7	34.0	14.6	28.0	0.4	7.0	1.8	9.2	4.7						
Boucherville	5	2.0	5.0	4	10.0	12	24.0	60.0	69.0	2.5	12.0	1.1	11.3	104.9						
Montréal	8	4.0	6.0	17	25.5	42	81.0	121.5	168.0	1.5	42.0	1.4	35.0	146.9						
Mont-Tremblant	12	2.5	7.5	10	30.0	42	32.0	96.0	156.0	3.0	42.0	1.6	48.2	1050.9						
Mont-Tremblant	15	4.5	5.5	57	69.7	36	81.0	99.0	145.0	1.2	36.0	1.5	101.0	477.9						
Gatineau	20	3.5	6.5	16	29.7	57	40.0	74.3	93.0	1.9	57.0	1.2	36.7	268.9						
Montréal	21	6.0	4.0	9	6.0	9	70.0	46.7	74.0	0.7	9.0	1.6	9.3	7.8						
Saint-Henri	23	6.0	4.0	16	10.7	16	81.0	54.0	57.0	0.7	16.0	1.0	11.1	7.1						
Shawinigan	25	3.5	6.5	37	68.7	83	190.0	352.9	356.0	1.9	83.0	1.0	69.1	332.9						
Louiseville	26	5.5	5.5	63	63.0	62	31.0	31.0	16.0	1.0	62.0	0.5	31.5	109.8						
Gatineau	29	5.0	5.0	22	22.0	21	124.0	124.0	167.0	1.0	21.0	1.3	29.4	51.4						
Amos	33	3.5	6.5	13	24.1	43	58.0	107.7	111.0	1.9	43.0	1.0	24.7	125.1						
Amos	34	3.5	6.5	18	33.4	36	81.0	150.4	158.0	1.9	36.0	1.0	34.9	180.0						
Val-d’Or	35	5.0	5.0	20	20.0	30	80.0	80.0	110.0	1.0	30.0	1.4	27.2	52.8						
Val-d’Or	36	3.0	7.0	53	123.7	101	80.0	186.7	257.0	2.3	101.0	1.4	169.4	2706.8						
Val-d’Or	37	4.0	6.0	20	30.0	33	74.0	111.0	142.0	1.5	33.0	1.3	38.0	160.8						
Val-d’Or	38	5.0	5.0	48	48.0	54	137.0	137.0	188.0	1.0	54.0	1.4	65.4	143.0						
Vaudreuil-Dorion	43	6.5	3.5	1	0.5	20	76.0	40.9	74.0	0.5	20.0	1.8	1.0	0.5						
Saint-Henri	45	7.0	3.0	19	8.1	11	93.0	39.9	45.0	0.4	11.0	1.1	9.0	2.5						
Saguenay	74	4.0	6.0	27	40.5	46	165.0	247.5	283.0	1.5	46.0	1.1	46.1	154.4						
Mont-Tremblant	86	4.0	4.0	4	4.0	1	6.0	6.0	23.0	1.0	1.0	3.3	13.1	79.5						
Trois-Rivières	88	6.0	4.0	38	25.3	37	166.0	110.7	143.0	0.7	37.0	1.3	32.4	26.0						
Trois-Rivières	89	6.0	4.0	100	66.7	158	412.0	274.7	335.0	0.7	158.0	1.2	81.0	63.1						
Saguenay	96	4.0	5.0	9	11.3	4	27.0	33.8	30.0	1.3	4.0	0.9	9.7	22.4						
Total					829.1	1031.0						1031.0	1011.4	6907.3						
Résultats d’ensemble				$\hat{\theta}$			$Var(\hat{\theta})$		Borne inf.		Borne sup.	Intervalle de $\hat{\theta}$								
				1.012			0.008		0.8		1.2									

Tableau 13 – Résultats de la régression binomiale négative

Log-vraisemblance -168.01				
Variable	Coefficient	Erreur std	Valeur p	Élasticité
Présence d'une bande franchissable	2.194	1.231	0.075	0.889
Limite de vitesse sur l'approche	0.021	0.008	0.011	1.188
Nombre de voies sur l'anneau	0.606	0.284	0.033	0.454
Configuration de l'approche	2.467	1.350	0.068	0.915
Présence de zones d'arrêt	1.012	0.329	0.002	0.636
Constante	-2.535	1.291	0.049	-
Durée de la période post-construction	exposition	-	-	-
$\ln(\alpha)$	-0.783	0.237	-	-
α	0.457	0.108	-	-

les données d'accident ont été utilisées pour cette analyse sont représentés sur la Figure 37.

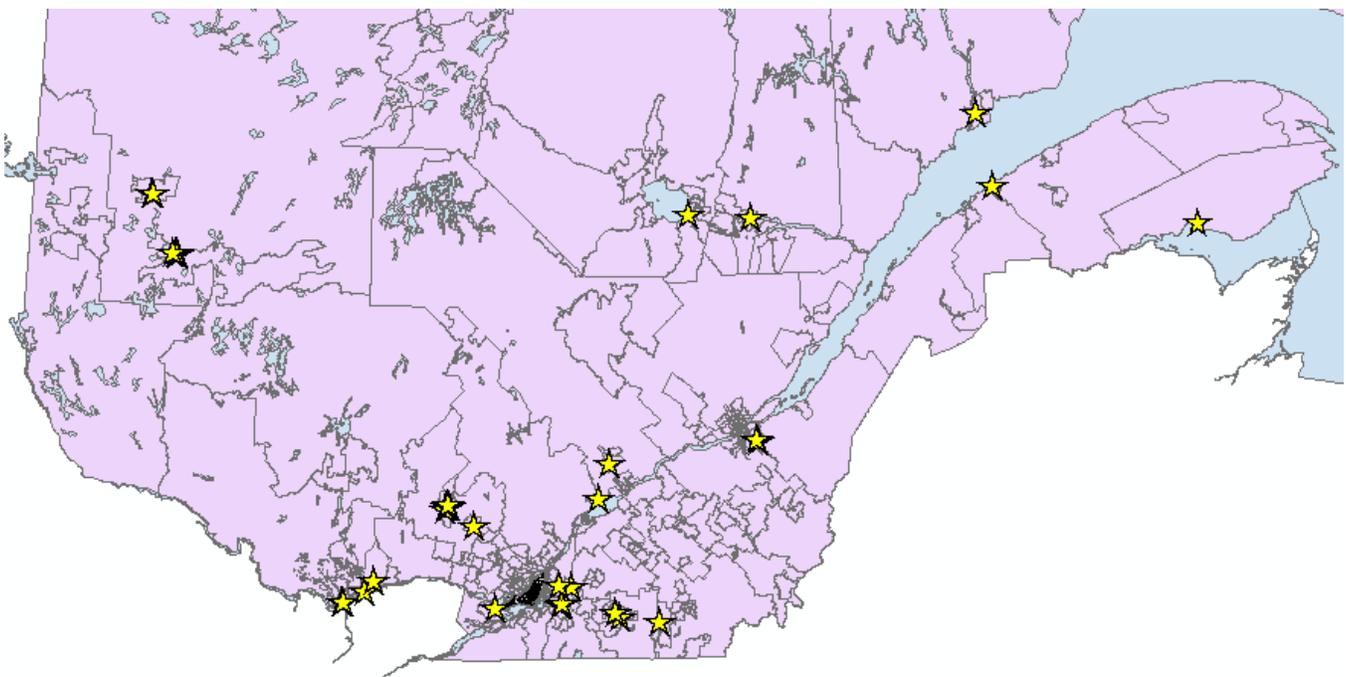


FIGURE 37 – Carte des carrefours giratoires pris en compte pour l'analyse de gravité

Il en résulte un ensemble de 1675 accidents, dont 1200 sont tirés du jeu de données municipal et 475 du jeu de données MTQ. Le Tableau 14 présente la distribution de la gravité de ces accidents (la gravité de l'accident est définie comme la gravité la plus élevée parmi les personnes blessées dans l'accident). Il est notable que la vaste majorité des accidents n'a eu pour conséquence que des dommages matériels, ce qui est cohérent avec les observations dans la littérature que la gravité des accidents diminue dans les carrefours giratoires. Il ne faut cependant pas oublier que cette distribution peut être faussée par des taux de déclaration et signalement des accidents variables selon la catégorie de gravité, les moins graves étant les moins probables d'être rapportés. À cause du faible nombre d'accidents mortels et avec blessures graves, et de la similarité de leurs conséquences, il a été choisi de regrouper ces deux catégories pour l'analyse. Il reste ainsi trois catégories pour le modèle de gravité de l'accident : dommage matériel

seulement ($Y = 0$), blessures légères ($Y = 1$) et blessures graves ou mortelles ($Y = 2$).

Tableau 14 – Distribution de la gravité des accidents analysés

Catégorie de gravité	Nombre d'accidents	Proportion
Domage matériel seulement	1527	91.2 %
Blessures légères	141	8.4 %
Blessures graves	5	0.3 %
Mortel	2	0.1 %
Total	1675	100.0 %

Différentes combinaisons de variables indépendantes ont été testées pour obtenir le meilleur modèle selon le test du rapport de vraisemblance (chaque ajout de variable dans le modèle devait améliorer la qualité du modèle mesurée par le rapport de vraisemblance). De plus, les variables non-significatives (à un niveau de confiance de 90 %) ont été retirées du modèle. Une analyse de corrélation a de plus été effectuée pour éviter les variables trop corrélées. Le résultat est présenté dans le Tableau 15.

Tableau 15 – Coefficients du modèle logit ordonné pour la gravité des accidents (rapport de vraisemblance de -478.7 et pseudo R^2 de 0.0943)

Variable Indépendante	Coefficient	Valeur t	Valeur p
Nombre de véhicules	1.0838	4.18	0.000
Carrefour	0.6750	2.96	0.003
2 véhicules impliqués	-2.1676	-7.24	0.000
Animal	-2.2385	-2.11	0.035
Pas d'impact	0.5806	2.00	0.046
Autobus	1.4109	2.59	0.010
Sombre (pas d'éclairage)	1.0914	2.61	0.009
Délit de fuite	-0.5178	-1.83	0.067
Neige	0.8153	2.16	0.031
Neige/glace (chaussée)	-0.6449	-2.05	0.040
Constante μ_1	2.9305		
Constante μ_2	6.1716		

La plupart des variables du modèle étant binaires hormis le nombre de véhicules impliqués, il est possible de quantifier l'effet d'une variable indépendante sur la variable de gravité latente. Une liste des variables significatives du modèle, avec une brève explication des raisons possibles expliquant le signe du coefficient, est présentée ci-dessous. Plusieurs coefficients du modèle ont des signes négatifs, indiquant que les variables correspondantes sont associées à une baisse de la gravité des accidents :

- présence de neige/glace sur la chaussée : plusieurs études [23, 29] montrent que les conducteurs font plus attention sur des routes couvertes de neige et de glace, ce qui annule un risque d'accident plus élevé ;
- collision entre deux véhicules, collision avec un animal : comparé aux autres catégories de collision incluses dans les modèles, ces deux catégories engendrent des conséquences moins graves, ce qui pourrait être lié à la vitesse plus faible autour et dans le carrefour

giratoire ainsi qu'à une plus grande attention et une meilleure détection des autres usagers et objets en mouvements dans et autour du carrefour ;

- délit de fuite : les accidents dans lesquels un conducteur a un véhicule suffisamment fonctionnel pour quitter le lieu de l'accident sont liés à des dommages faibles sur le véhicule et probablement à une absence de blessure ou des blessures légères.

Plusieurs coefficients du modèle ont des signes positifs, indiquant que les variables correspondantes sont associées à une hausse de la gravité des accidents :

- nombre de véhicules ;
- neige : la gravité peut augmenter lorsqu'il neige à cause de la baisse de visibilité (à ne pas confondre avec la présence de neige et glace sur la chaussée) ;
- carrefour : la gravité des accidents dans le carrefour semble plus élevée que sur les approches, ce qui peut être lié à la vitesse et au type de collision (en particulier l'angle d'impact) ;
- pas d'impact : les accidents sans impact comme les sorties de route avec tonneau ou dans un fossé sont plus graves que les accidents avec impact ;
- autobus : la gravité plus élevée des accidents impliquant un autobus peut être attribuée à leur masse et taille, et à l'absence de ceinture de sécurité pour les passagers ;
- sombre (pas d'éclairage) : les accidents qui se produisent sur des routes sans éclairage sont associés à une gravité plus élevée ce qui pourrait être lié au manque de visibilité.

Les élasticités du modèle sont présentées dans le Tableau 16. Les effets des variables sur les probabilités des différents niveaux de gravité sont calculés en fixant les variables binaires du modèle à 0 et les variables continues (le nombre de véhicules impliqués) à sa valeur moyenne dans le jeu de données : l'élasticité d'une variable donnée est obtenue en changeant la valeur de cette variable à 1 pour une variable binaire, ou en ajoutant une certaine quantité à la valeur moyenne de la variable continue (le nombre de véhicules impliqués étant un entier, la quantité ajoutée est 1 véhicule). Une seule variable est modifiée à la fois pour chaque calcul d'élasticité. Si la variable indépendante X_j passe de la valeur x_1 à x_2 , la probabilité $P(Y = k)$ d'un niveau de gravité k passant de $P_1 = P(Y = k|X_j = x_1)$ à $P_2 = P(Y = k|X_j = x_2)$, l'élasticité du modèle pour la variable X_j est dans le cas général :

$$\frac{(P_2 - P_1)/P_1}{(x_2 - x_1)/x_1} \quad (25)$$

Ce travail utilise l'équation simplifiée du numérateur seul puisque toutes les variables sont binaires ou prennent des valeurs entières.

Les élasticités présentées dans le Tableau 16 permettent de mieux comparer les effets relatifs de chaque variable sur les niveaux de gravité, dans le but d'identifier les interventions les plus prometteuses. L'effet le plus grand est celui de la variable autobus : un accident impliquant un autobus diminue de moitié la probabilité qu'il n'y ait que des dommages matériels, double la probabilité de blessures mineures et multiplie la probabilité de blessure grave ou mortelle par près de quatre. Deux autres variables ont des effets importants : l'augmentation d'un véhicule dans le nombre de véhicules impliqués (de deux à trois) et l'occurrence d'un accident de nuit sont associés à une baisse de la probabilité de dommages matériels seulement de 39 %, et à des augmentations respectives des probabilités de blessures légères ou graves et mortelles de 76 % et 186-188 %. Cependant, les élasticités des niveaux de gravité plus élevés sont plus importantes

Tableau 16 – Élasticités du modèle de gravité des accidents

Variable indépendante	Niveau de gravité		
	$P(Y = 0)$	$P(Y = 1)$	$P(Y = 2)$
Nombre de véhicules	-0.383	0.761	1.856
Carrefour	-0.235	0.478	0.931
2 véhicules impliqués	0.392	-0.838	-0.884
Animal	0.397	-0.849	-0.892
Pas d'impact	-0.200	0.410	0.762
Autobus	-0.496	0.956	2.884
Sombre (pas d'éclairage)	-0.386	0.766	1.877
Délit de fuite	0.147	-0.311	-0.400
Neige	-0.286	0.578	1.210
Neige/glace (chaussée)	0.178	-0.377	-0.471
Probabilité de référence (%)	68.2	30.0	1.8

car leur probabilité de référence sont relativement faibles : il faut rappeler que la très grande majorité des accidents (91.2 %) entraîne des dommages matériels seulement.

4.3 Analyse des comportements et interactions observés par vidéo

4.3.1 Présentation des quadrants étudiés par analyse vidéo

Parmi les plus de 100 carrefours identifiés dans la province dans l'inventaire au début du projet à l'été 2011, les sites ont été choisis pour collecter des données vidéo selon les critères de choix suivants :

- la disponibilité de données historiques d'accidents ;
- la distance et le regroupement géographique afin de diminuer les coûts de collecte de données ;
- la représentativité de l'échantillon : couverture du territoire de la province, de différents types d'environnement (voir Tableau 18), carrefours de différents types (géométrie), sur le réseau du MTQ et des municipalités ;
- la disponibilité de structures verticales comme des lampadaires pour installer l'équipement de collecte de données vidéo et l'absence d'objets créant des occlusions de la scène.

Les données vidéo ont été enregistrées à l'aide du système mobile présenté dans [43] dans lequel une caméra est montée à environ 10 m du sol. Parmi une trentaine de sites candidats, des données vidéo ont été collectées sur 41 quadrants parmi 20 sites présentés sur la carte de la Figure 38, bien que l'analyse vidéo n'ait pu être effectuée que pour 36 quadrants à ce jour, les autres souffrant de problèmes de vibration de la caméra. Les statistiques des principaux attributs et les moins corrélés des 41 quadrants sont présentées dans le Tableau 17. Les distributions des attributs nominaux d'occupation du sol et de classification fonctionnelle par quadrant sont présentées dans le Tableau 18. Les coefficients de corrélation linéaire de Pearson sont présentés pour les 41 quadrants dans le Tableau 39 et sont utilisés dans les modèles statistiques pour éviter d'utiliser dans un même modèle des variables trop corrélées. On note quelques groupes d'attributs très corrélés, par exemple entre les différents rayons ou entre les différents nombres de voies, entre les rayons et les nombres de voies, entre les largeurs de voie et le nombre de voies.

Tableau 17 – Statistiques descriptives des attributs les plus importants des carrefours giratoires pour les 41 quadrants

Attribut	Minimum	Moyenne	Maximum	Unité
n_start_lanes	1	1.29	2	-
n_app_lanes	0	1.31	2	-
n_exit_lanes	1	1.21	2	-
n_slip_lane	0	.024	1	-
a_quad_size	45	91.07	145	Degrés
r_out_start	13.5	24.90	54	m
r_in_start	6.5	13.36	41	m
w_apron	0	2.98	7.75	m
d_app_inter	36	381.35	2924	m
app_speed_limit	30	59.02	90	km/h

Tableau 18 – Attributs de l’environnement bâti : occupation du sol et classification fonctionnelle des approches pour les 41 quadrants

Variables binaires	Description	Nombre de quadrants
Classification fonctionnelle		
nc0	route privée	0
nc1	collectrice	6
nc2	artérielle	20
nc3	autoroute régionale	10
nc4	bretelle d’accès	5
Occupation du sol		
lu1	terrain vague/MTQ	8
lu2	résidentielle	16
lu3	commerciale	1
lu4	industrielle	7
lu5	mixte	5
lu6	institutionnelle	4

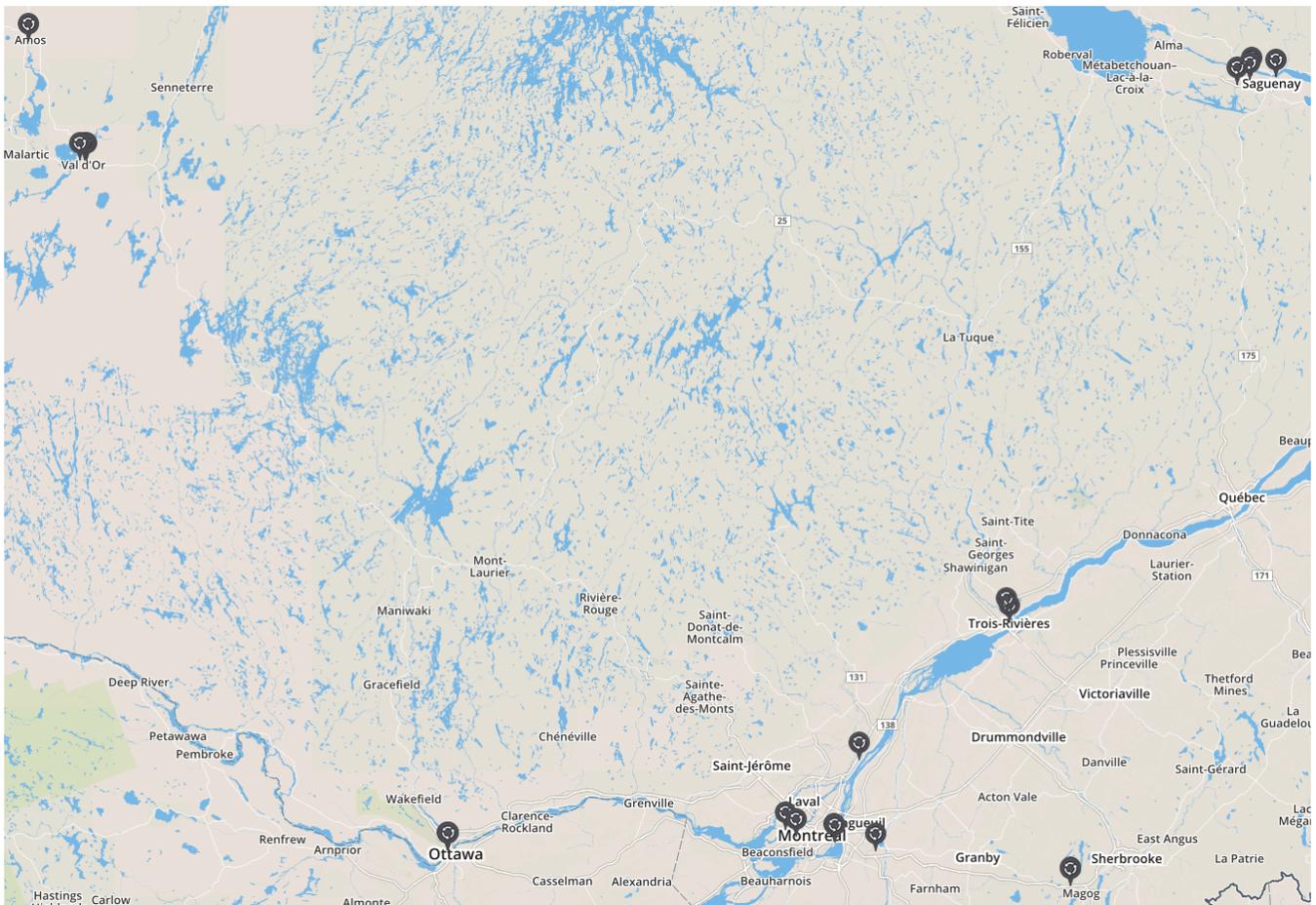


FIGURE 38 – Carte des 20 carrefours giratoires où des données vidéo ont été collectées

Les débits sont corrélés à plusieurs variables géométriques, ainsi que les attributs d’occupation du sol et de classification fonctionnelle.

Les données vidéo de chaque site ont été enregistrées un jour ouvrable en été entre 6h00 et 19h00 ou 22h00, capturant ainsi les deux périodes de pointe de la journée. Les statistiques du volume de données collectées et leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau 19 : ces valeurs placent ce travail dans le domaine des grands volumes de données (“big data”), volumes bien plus importants que toute autre étude de ce type à notre connaissance. Pour donner un ordre de grandeur, un débit de 500 véhicules par heure parcourant une distance de 50 m à une vitesse de 30 km/h enregistrés avec une caméra à 30 images par seconde génère 90000 observations de positions. Cela est multiplié par le nombre moyen de points caractéristiques suivis sur chaque usager. Chaque quadrant génère en moyenne pour 13-16 h de vidéo un fichier de données de 500 MB. L’objectif premier de ce travail n’est pas en temps réel. Pour une résolution de 800 par 600 pixels à 30 images par seconde, l’analyse vidéo est accomplie en temps à peu près réel sur des ordinateurs récents (une heure de vidéo est traitée en une heure). Ces chiffres varient grandement en fonction de la résolution, des traitements appliqués (par exemple pour corriger la distorsion de la lentille), etc.

Enfin, pour aider dans l’analyse des quadrants et des facteurs qui influencent les mesures microscopiques (vitesses) et indicateurs de sécurité (créneaux et TTC), les 41 quadrants ont été regroupés selon leurs caractéristiques physiques et de circulation en six groupes à l’aide de la méthode des k-moyennes. Ces six groupes sont décrits dans le Tableau 20.

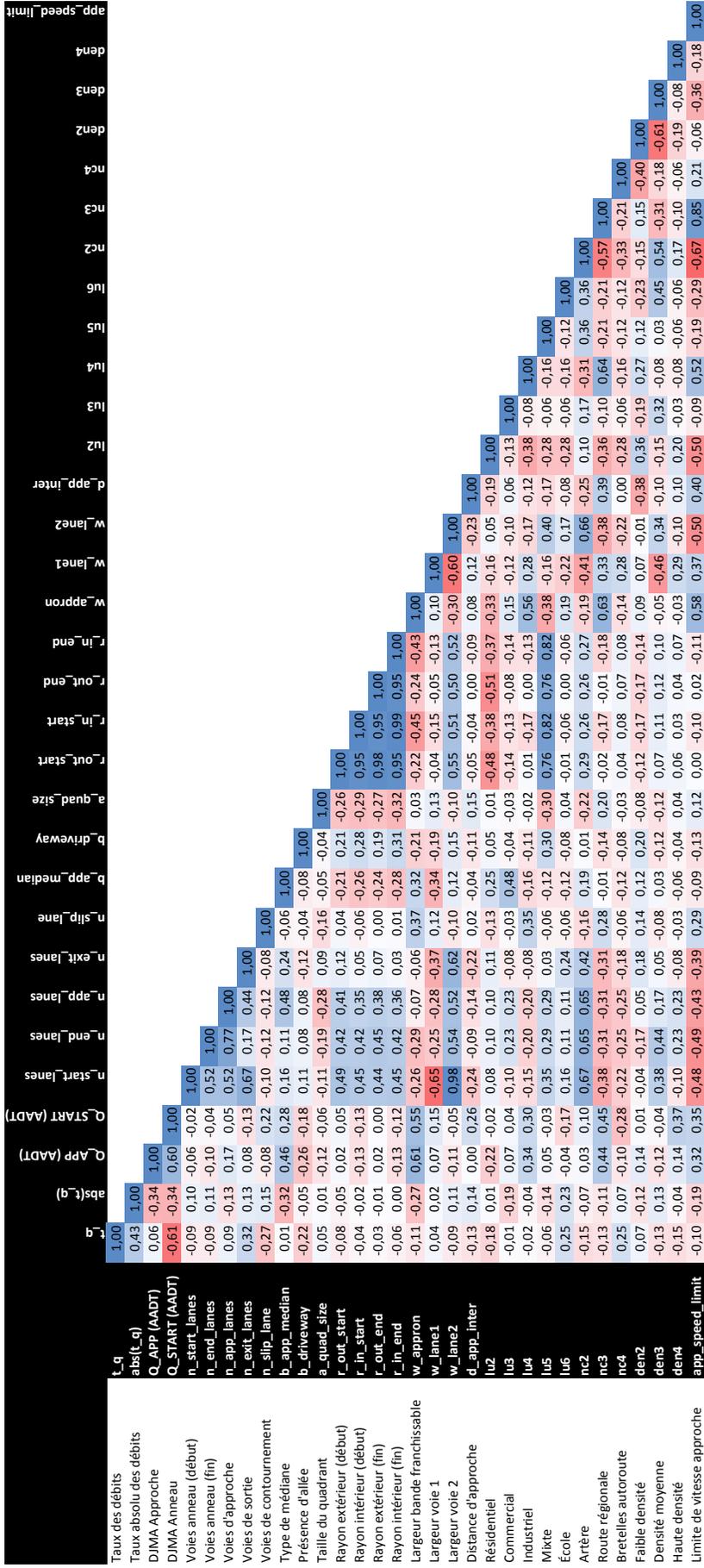


FIGURE 39 – Matrice de corrélation entre les attributs des carrefours giratoires (t_q ou “Taux des débits” désigne τ_Q)

Tableau 19 – Description des données vidéo collectées et analysées

Nombre de carrefours giratoires	20
Nombre de zones d'analyse (quadrants)	41
Données vidéo analysées	473 h
Nombre estimé total de véhicules	79432
Quantité de données (vidéo + données extraites)	1.9 TB
Distance parcourue	9505 véh-km

Tableau 20 – Groupes de quadrants obtenus par la méthodes des k-moyennes

Groupe	Description	Nombre de quadrants
cl_1	Petite taille, une ou deux voies, collectrices résidentielles	11
cl_2	Une voie, autoroutes régionales et artérielles avec des limites de vitesse de 70-90 km/h, débits d'entrée très déséquilibrés	16
cl_3	Artérielles, deux voies, débits d'entrée très déséquilibrés	5
cl_4	Configurations de voies hybride (changement du nombre de voies entre l'entrée et la sortie), artérielles, débits d'entrée très déséquilibrés	3
cl_5	Ronds-points convertis sans modification géométrique : deux voies, diamètres très grands, angle d'approche tangentielle	4
cl_6	Une voie, autoroutes régionales, grande taille angulaire, débits d'entrée équilibrés	2

Les résultats des analyses vidéo sont présentés pour chaque quadrant analysé dans une fiche individuelle dans l'annexe A.

4.3.2 Analyse des vitesses

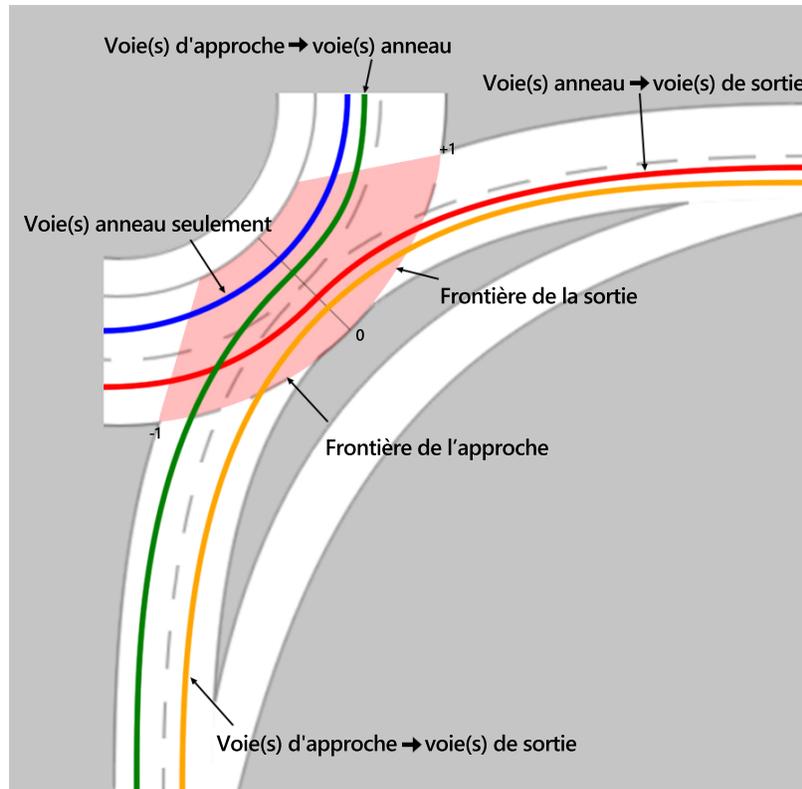


FIGURE 40 – Les quatre types de mouvements dans un quadrant selon les origines et destinations

Les distributions des vitesses à l'entrée et la sortie de la zone d'entrecroisement sont présentées respectivement dans les Figures 41 et 42 pour les quatre types de mouvements possibles entre les origines et destinations de la zone d'entrecroisement décrits dans la Figure 40. La distribution n'est pas représentée lorsqu'il n'y a aucune observation ou moins de 50 observations (s'il y a moins de 50 observations pour les quatre mouvements, le quadrant n'est pas représenté dans la figure). Une première observation est que les distributions semblent généralement symétriques, suivant probablement des distributions normales dans la plupart des cas. Si les extrêmes des observations peuvent atteindre des valeurs très élevées, les médianes suivent des valeurs proches des recommandations entre 25 et 35-40 km/h. Les distributions des quadrants étant triées selon la médiane du mouvement voie d'approche-voie de sortie, il est visible que les vitesses médianes pour le mouvement voie d'approche-voie anneau suivent un ordre assez similaire, et que l'ordre est moins respecté pour les autres mouvements venant de l'anneau.

En comparant les médianes des vitesses en entrée et sortie de l'entrecroisement pour tous les mouvements, il apparaît que les mouvements venant de l'anneau affichent majoritairement une augmentation de vitesse, alors que c'est plus équilibré pour le mouvement approche vers la voie de sortie et l'inverse pour le mouvement approche vers l'anneau (la médiane des vitesses diminue dans ce cas). En étudiant les corrélations entre les médianes des vitesses en entrée et sortie de l'entrecroisement pour tous les mouvements, les similarités fonctionnent selon l'origine : en

entrée et en sortie (séparément), les médianes des vitesses sont très similaires (corrélation entre 0.84 et 0.99) entre les mouvements anneau-anneau et anneau-voie de sortie d'une part, entre les mouvements approche-anneau et approche-voie de sortie d'autre part. On note aussi une corrélation pour chaque mouvement entre la médiane de la vitesse en entrée et sortie d'entrecroisement, un peu plus forte pour les mouvements venant de l'anneau (0.55-0.58) que pour les mouvements venant de l'approche (0.42-0.43). On note aussi des corrélations élevées similaires pour les intervalles inter-quartiles, indiquant une dispersion similaire des vitesses entre ces mouvements.

Les fiches individuelles par quadrant (dans l'annexe A) présentent des informations plus détaillées spatialement, le long des alignements et sur la zone d'analyse. Le ralentissement des véhicules à l'approche y est clairement visible pour la plupart des sites, hormis pour ceux avec des débits faibles et/ou polarisés (e.g. le quadrant 3 du carrefour des rues Mouettes et des Alouettes à Saguenay ou le quadrant 1 des boulevards des Sources et Riverdale à Montréal).

Suivant la méthodologie présentée, des modèles de régression linéaire entre la vitesse moyenne sur l'approche et les attributs des quadrants sont présentés dans l'ensemble des Tableaux 21, en cherchant à garder un nombre d'attributs significatifs ($p < 0.1$ hormis pour le modèle anneau seulement) relativement petit et similaire entre modèles. Si un modèle est présenté pour la vitesse moyenne pour le mouvement anneau-anneau, ce modèle n'est pas significatif, même si les coefficients des attributs, la distance avec le carrefour en amont d_app_inter et le rapport des débits d'entrée τ_Q , ont les mêmes signes que pour le modèle de la vitesse moyenne du mouvement anneau-sortie. Le seul attribut ayant une association significative ($p = 0.093$) négative avec la vitesse en entrée pour le mouvement sur l'anneau seulement est le nombre de voies sur l'approche au début du quadrant n_app_lanes , ce qui ne semble pouvoir être expliqué logiquement. La relation avec les attributs d_app_inter τ_Q semble par contre raisonnable : une valeur élevée de d_app_inter indique un carrefour plus isolé, ce qui est lié à des vitesses plus importantes en approche, et une distance plus grande pour l'approche concernée peut être liée à des débits plus faibles en approche ; des débits déséquilibrés diminuent la probabilité d'une interaction et de la nécessité de freiner en entrée du carrefour pour trouver un créneau ou laisser entrer un véhicule.

Le second type de modèle concerne les deux mouvements avec la voie de sortie pour destination (second modèle pour le mouvement anneau-sortie) : ces deux modèles ont les attributs explicatifs significatifs rayon extérieur r_out_start , largeur de la bande franchissable w_appron et limite de vitesse sur l'approche entrante du quadrant app_speed_limit . Le changement de signe du rayon extérieur entre les deux modèles n'est pas évident à interpréter : sa corrélation positive avec les différents attributs de nombre de voies indique qu'il peut être lié à des débits plus élevés et donc des vitesses plus faibles. En approche, ce pourrait être associé avec des carrefours à grand rayon où la vitesse est élevée. La largeur de la bande, corrélée avec une occupation du sol industrielle et des routes régionales, est associée à des vitesses plus faibles. Enfin, la limite de vitesse est associée à des vitesses plus élevées.

Le dernier modèle concerne le mouvement approche vers l'anneau : la largeur angulaire du quadrant a_quad_size et la valeur absolue du rapport des débits τ_Q sont négativement associés à la vitesse moyenne en entrée de la zone d'entrecroisement. Un angle plus grand nécessite de freiner plus fortement pour le véhicule qui entre sur l'anneau et ne sort pas à la sortie suivante. La relation avec τ_Q est plus difficile à expliquer.

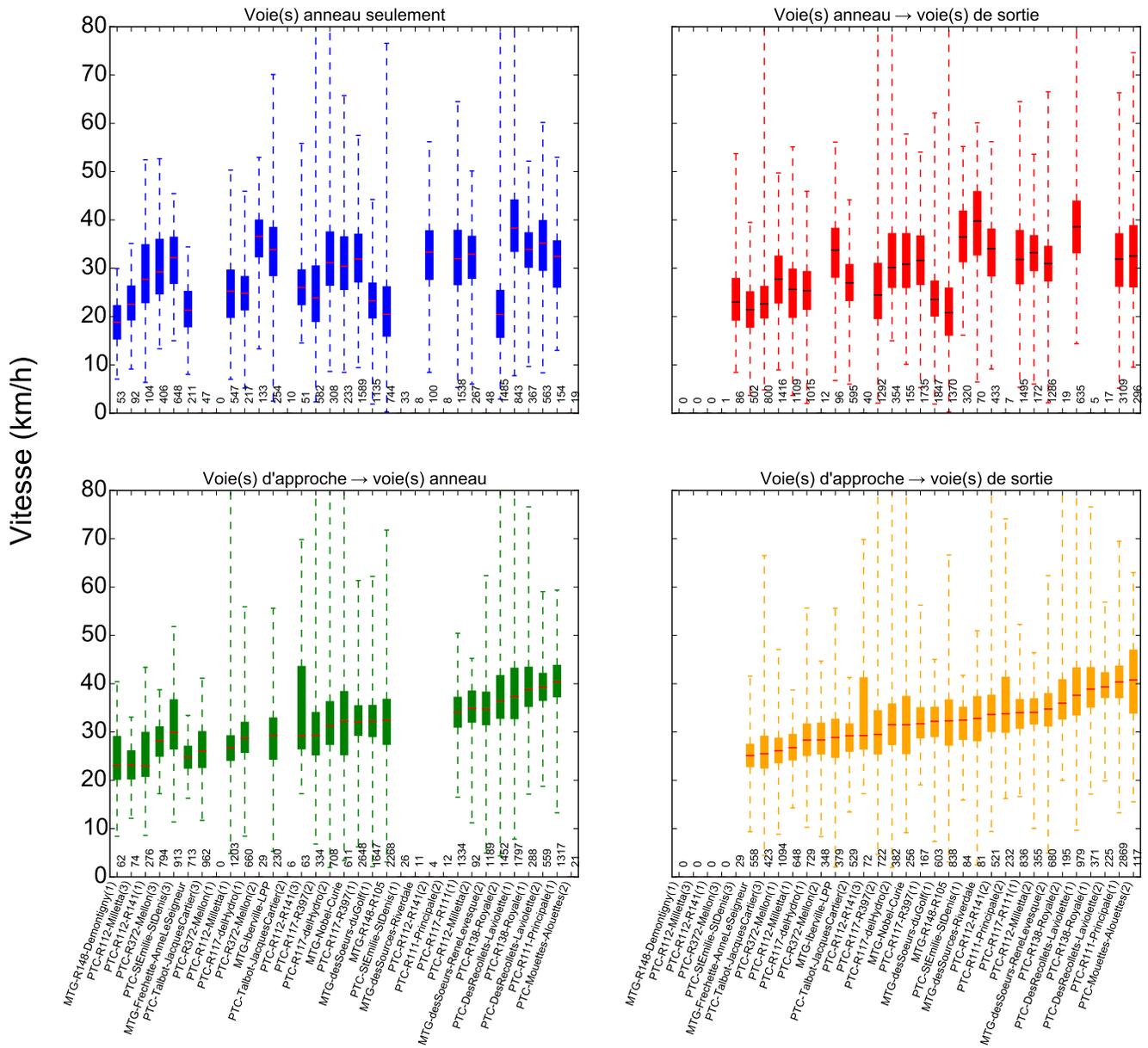


FIGURE 41 – Boîtes à moustache des vitesses à chaque quadrant à l’entrée de la zone d’entrecroisement (point -1 dans la Figure 40) pour les quatre types de mouvements, triées selon la vitesse médiane pour le mouvement approche-sortie (jaune en bas à droite) (nombre d’observations noté au-dessus de l’axe des abscisses)

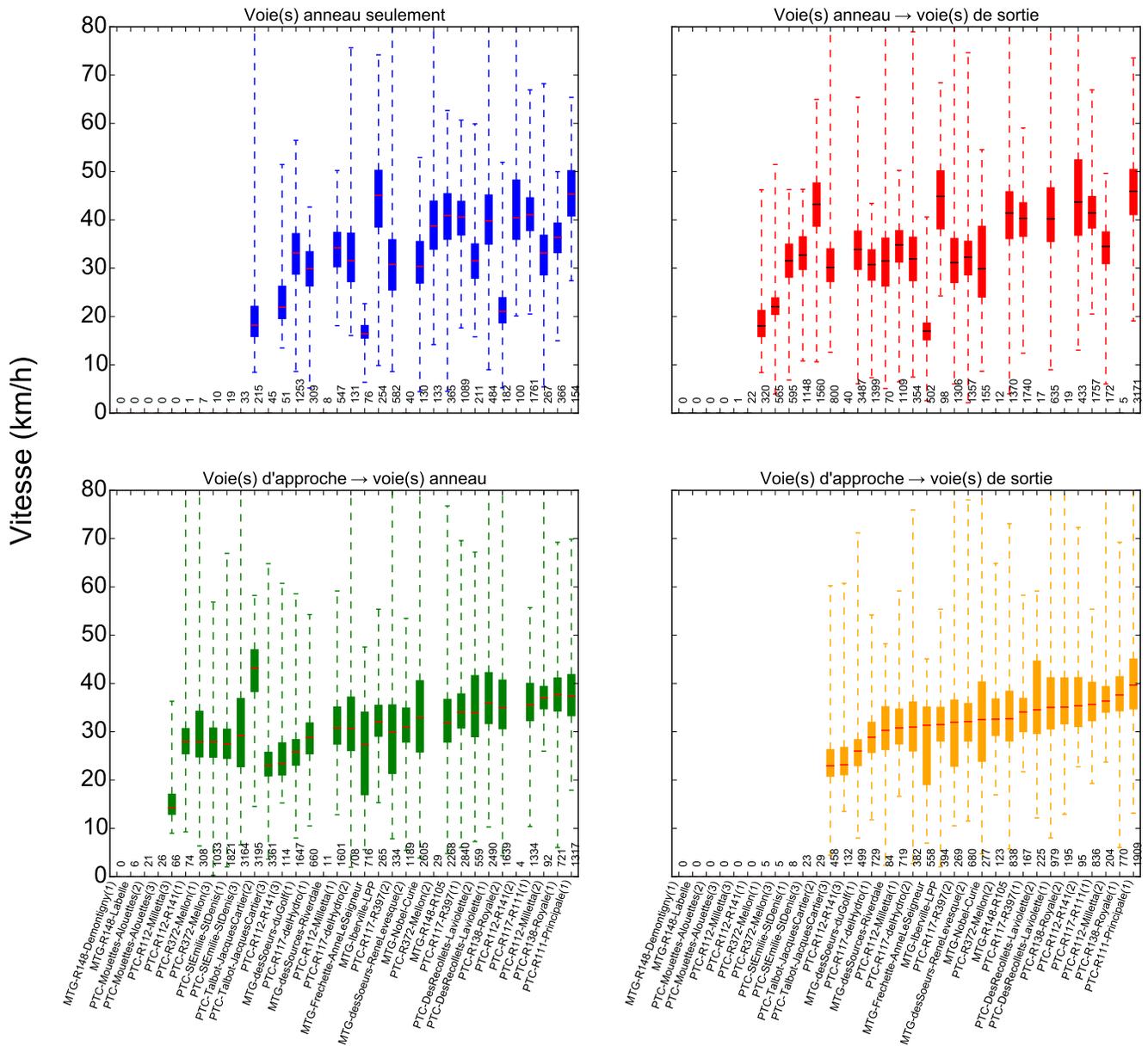


FIGURE 42 – Boîtes à moustache des vitesses à chaque quadrant à la sortie de la zone d’entrecroisement (point +1 dans la Figure 40) pour les quatre types de mouvements, triées selon la vitesse médiane pour le mouvement approche-sortie (jaune en bas à droite) (nombre d’observations noté au-dessus de l’axe des abscisses)

Tableau 21 – Modèles linéaires de la vitesse moyenne sur l’approche en fonction des attributs des 36 quadrants pour les différents types de mouvements décrits dans la Figure 40

	Anneau seulement		Anneau-Sortie	
Attributs	Coeff.	(Err. Std.)	Coeff.	(Err. Std.)
d_app_inter	0.003	(0.002)	0.003	(0.002)
τ_Q	1.799	(2.505)	3.882	(2.083)
constante	29.813	(1.630)	29.781	(1.294)
R^2	0.0521		0.1490	
$R^2_{ajusté}$	-0.00364		0.0923	

	Anneau-Sortie		Approche-Sortie	
Attributs	Coeff.	(Err. Std.)	Coeff.	(Err. Std.)
r_out_start	-0.052	(0.111)	0.290	(0.094)
w_appron	-1.655	(0.644)	-0.970	(0.544)
app_speed_limit	0.193	(0.078)	0.181	(0.066)
Constante	26.084	(4.608)	17.372	(3.947)
R^2	0.2100		0.4316	
$R^2_{ajusté}$	0.1283		0.3708	

	Approche-Anneau	
Attribut	Coeff.	(Err. Std.)
a_quad_size	-0.124	(0.043)
$ \tau_Q $	-8.765	(3.468)
Constante	48.147	(4.646)
R^2	0.2680	
$R^2_{ajusté}$	0.2236	

4.3.3 Analyse des créneaux

Les distributions des créneaux de tête et arrière à l'insertion des véhicules sur l'anneau triés selon la médiane sont représentées respectivement dans les Figures 43 et 44. L'ordre des quadrants est sensiblement le même entre les deux créneaux, comme on peut le voir dans les distributions cumulées par quadrant dans les fiches individuelles dans l'annexe A : les créneaux disponibles sur l'anneau sont fonction du débit sur l'anneau et les créneaux résultants sont proches, quoique le créneau arrière soit systématiquement plus petit pour la majorité des quadrants, surtout pour les quadrants dont le créneau médian arrière est inférieur à 6 s. La similarité dans l'ordre des quadrants selon les créneaux médians se traduit par un très fort coefficient de corrélation linéaire de Pearson de 0.993, similaire pour les intervalles inter-quartiles. La forme de la plupart des distributions correspond à une distribution exponentielle négative, comme il est aussi possible de le voir dans les fiches individuelles de quadrants : c'est attendu dans le cas de carrefours isolés, car une arrivée aléatoire de véhicule se traduit par une distribution négative exponentielle pour les temps inter-véhiculaires, et donc aussi approximativement pour les créneaux.

Les créneaux indiquent aussi la sécurité des insertions des véhicules sur l'anneau et on peut noter une proportion importante d'insertions avec des valeurs résultantes très faibles. La moitié des quadrants présentent des médianes ou premiers quartiles de 1 ou 2 s. À l'autre extrémité des quadrants se trouvent des sites avec des valeurs très élevées qui résultent de débits faibles et/ou très polarisés et correspondent à la quasi-absence d'interaction entre usagers puisque les usagers restent à des distances très importantes (un créneau de 40 s à 30 km/h correspond à une distance de 333 m).

Tous les coefficients des modèles pour les créneaux de tête et arrière présentés dans le Tableau 22 sont significatifs ($p < 0.01$). Les créneaux sont significativement associés négativement avec le nombre de voies sur l'anneau, la largeur de la bande franchissable w_{appron} et la largeur de la première voie sur l'anneau w_{lane1} , variables corrélées avec les routes régionales (et des débits d'entrée plus élevés), et positivement avec le rapport τ_Q . La première association avec le nombre de voie sur l'anneau est difficile à expliquer pour un débit donné. Les corrélations de w_{appron} et w_{lane1} fournissent des explications plausibles de leur association avec les créneaux. Enfin, plus les débits d'entrée sont déséquilibrés, plus il devrait être facile de trouver un créneau pour s'insérer sur l'anneau.

Tableau 22 – Modèles linéaires de la moyenne des créneaux de tête et arrière en fonction des attributs des 36 quadrants (w_{lane1} est la largeur de la première voie (extérieure si plus d'une voie) sur l'anneau)

Attribut	Créneaux de tête		Créneaux arrière	
	Coeff.	(Err. Std.)	Coeff.	(Err. Std.)
$n_{\text{start_lanes}}$	-194.038	(57.206)	-164.319	(46.877)
w_{appron}	-27.274	(9.721)	-23.356	(7.965)
w_{lane1}	-35.837	(12.572)	-29.882	(10.302)
τ_Q	138.066	(39.443)	124.114	(32.321)
constante	625.102	(154.561)	530.480	(126.654)
R^2	0.4604		0.4903	
$R^2_{\text{ajusté}}$	0.3950		0.4285	

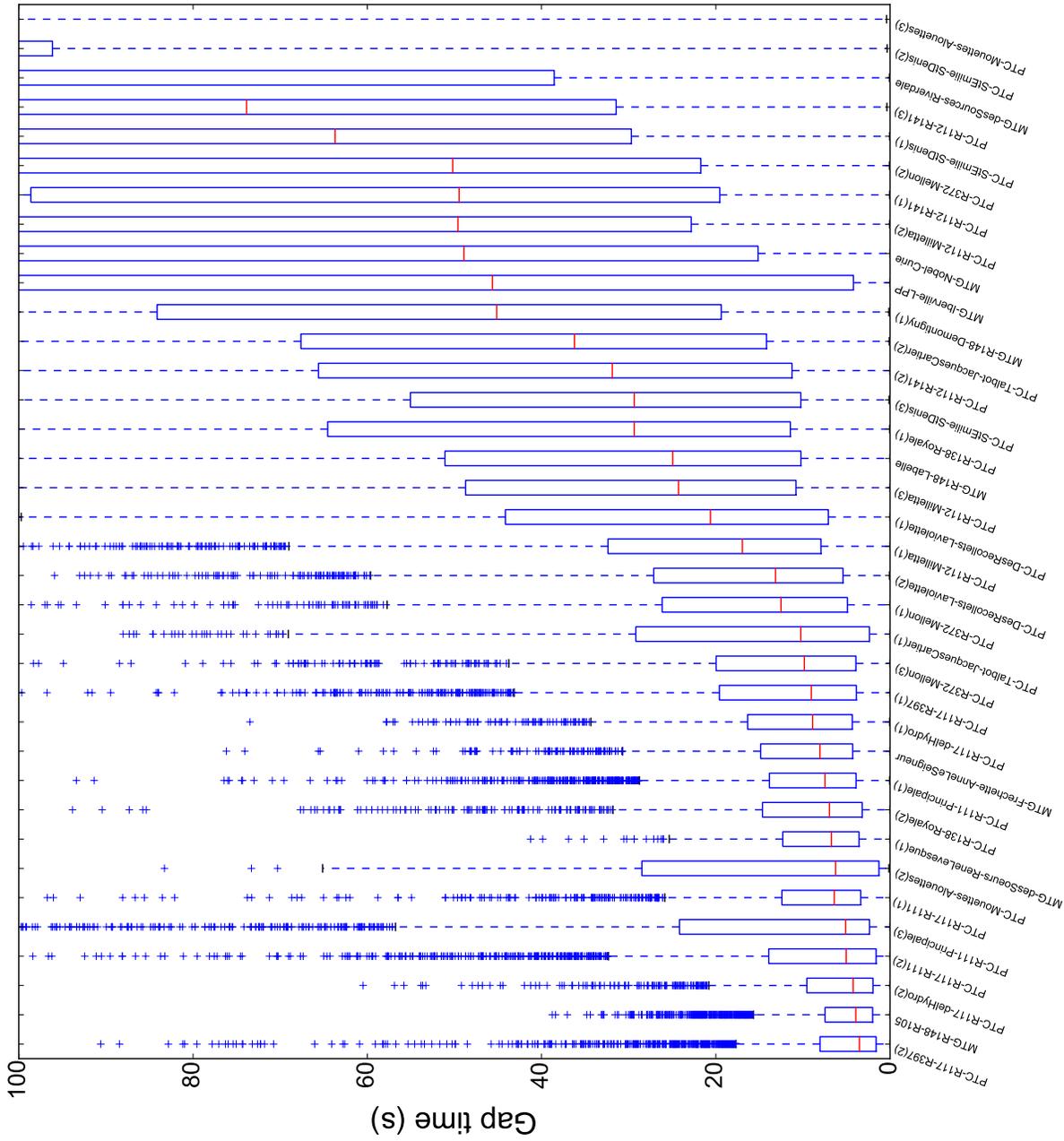
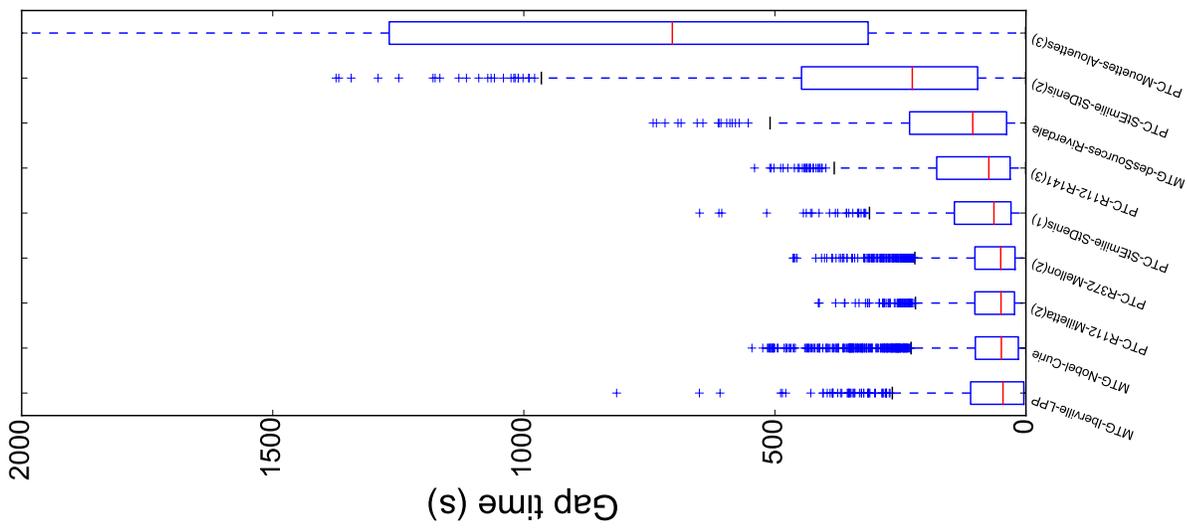


FIGURE 43 – Boîtes à moustache des créneaux (“Gap time”) de tête résultant de l’insertion d’un véhicule sur l’anneau par quadrant, triés selon la médiane (les quadrants dont le troisième quartile est supérieur à 100 s sont aussi présentés séparément dans le graphique à droite sur une échelle adaptée)

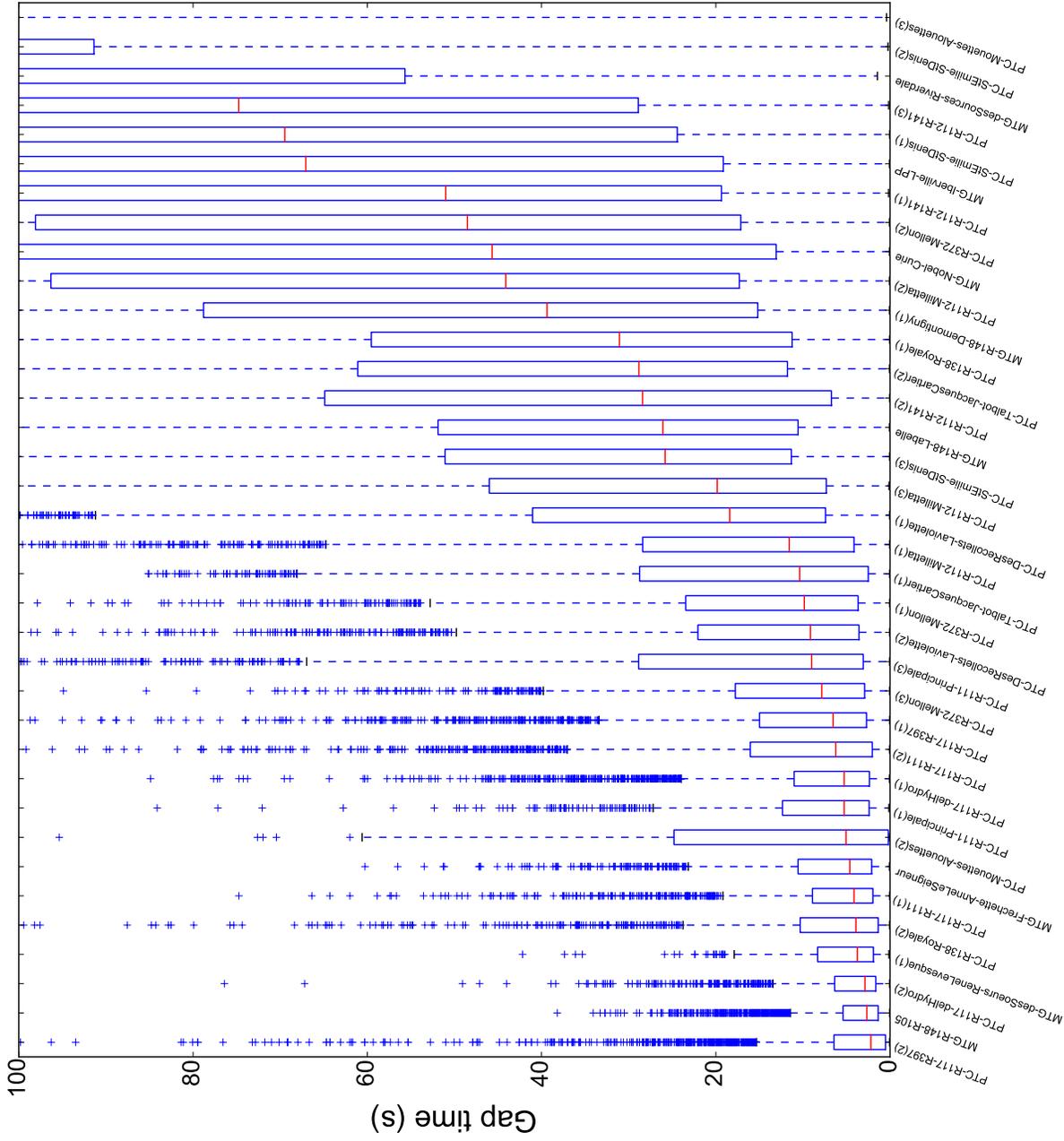
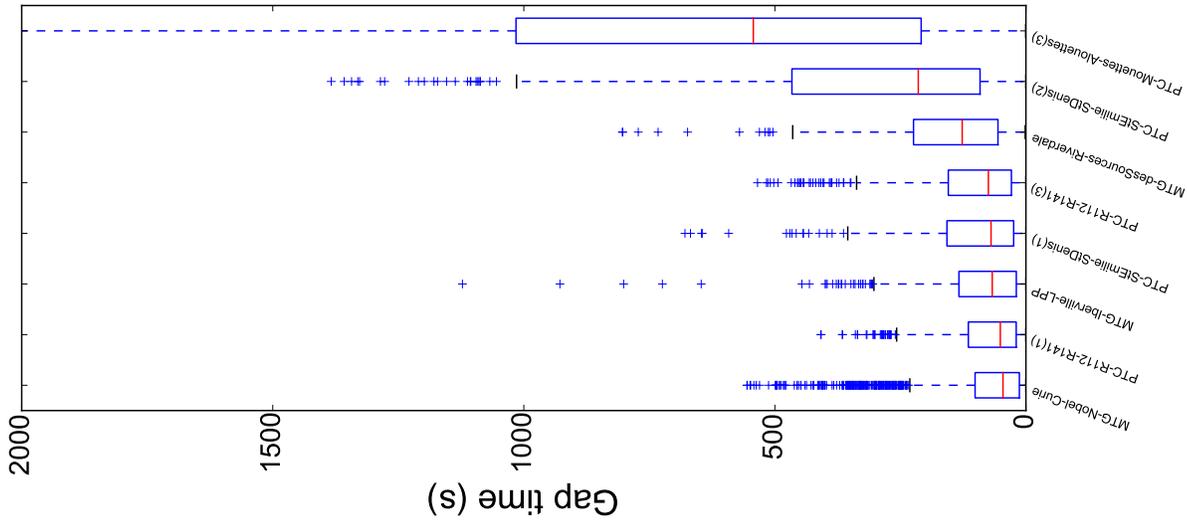


FIGURE 44 – Boîtes à moustache des créneaux (“Gap time”) arrière résultant de l’insertion d’un véhicule sur l’anneau par quadrant, triés selon la médiane (les quadrants dont le troisième quartile est supérieur à 100 s sont aussi présentés séparément dans le graphique à droite sur une échelle adaptée)

4.3.4 Analyse des interactions

Tel que décrit dans la section méthodologique, il existe plusieurs méthodes de prédiction des mouvements futurs qui peuvent être utilisées pour le calcul du TTC, ainsi que plusieurs méthodes d'agrégation du TTC, par interaction ou pas. Les méthodes de prédiction des mouvements testés sont la prédiction à vecteur-vitesse constant, la prédiction avec adaptation normale et la prédiction selon les patrons de mouvements observés. La première et la dernière ont été présentées dans la section méthodologique. La prédiction avec adaptation normale est une méthode probabiliste reposant sur le vecteur-vitesse instantané de chaque usager, auquel un léger bruit d'accélération et changement de direction est ajouté pour prendre en compte les adaptations inconscientes faites par un usager conduisant en ligne droite, sans prise en compte particulière du contexte de l'interaction. Les méthodes d'agrégation du TTC testées sont l'utilisation de toutes les mesures de la série temporelle, la valeur minimale ou le 15^{ème} centile par interaction ("paire unique") sur toute la série temporelle.

Les distributions cumulées du TTC pour les 36 quadrants analysés sont présentées en matrice selon la méthode de prédiction et la méthode d'agrégation dans la Figure 45. La même présentation est utilisée pour les distributions des TTC mis ensembles par groupe de quadrants dans la Figure 46. Tel qu'attendu, l'utilisation de toutes les mesures de TTC sans agrégation par interaction tend à décaler la distribution vers des valeurs plus élevées (ajout de valeurs supérieures TTC_{min} ou TTC_{15}). L'agrégation par valeur minimale décale quant à elle les distributions vers des valeurs plus faibles, dont une portion doit résulter de bruit et possiblement d'erreurs de l'analyse vidéo, ce qui est particulièrement visible pour les valeurs les plus faibles entre 0 et 0.25 s. Ce problème semble corrigé par l'utilisation du 15^{ème} centile.

Par ailleurs, la prédiction avec adaptation normale semble n'offrir aucun avantage par rapport à la méthode à vecteur-vitesse constant, et implique des coûts de calcul nettement supérieurs. La méthode de prédiction selon les patrons de mouvements semble préférable car la plus réaliste, et il faut noter que les distributions sont bien différentes pour cette méthode comparée à la prédiction à vecteur-vitesse constant. En particulier, la "position" relative du groupe cl_1 parmi les autres groupes, donc l'interprétation de sa sécurité relative, est affectée selon les choix de méthodes de prédiction des mouvements et d'agrégation, et l'interprétation du groupe cl_5 est affectée par la méthode de prédiction des mouvements. La méthode de prédiction selon les patrons de mouvements devrait ainsi être plus transférable entre sites et donc mieux se prêter à des comparaisons entre sites.

Il est enfin possible de comparer les distributions du TTC_{15} obtenues avec les méthodes de prédiction des mouvements et d'agrégation sélectionnées par groupes de quadrants présentées dans la Figure 47. Il est visible que les quadrants des groupes cl_5 (ronds-points convertis sans modification géométrique) et cl_6 (une voie sur les autoroutes régionales avec de grands angles entre approches) ont les TTC les plus faibles, c'est à dire qu'ils ont les proportions d'interactions dangereuses les plus élevées ; les quadrants du groupe cl_3, avec des rapports τ_Q entre les débits d'entrées (entre l'approche et l'anneau) élevés sont les plus sécuritaires, ce qui correspond à une faible probabilité d'interaction entre véhicules venant de l'approche et de l'anneau.

Le modèle linéaire présenté dans le Tableau 23 est estimé en utilisant le logarithme de la moyenne du TTC_{15} par quadrant comme variable dépendante. Il montre qu'il est significativement ($p < 0.1$) associé positivement au nombre de voies sur l'anneau au début du quadrant n_start_lanes et au débit total en entrée du quadrant, et négativement à la taille angulaire du quadrant a_quad_size et à la vitesse au moment où le TTC_{15} est atteint. Il semble donc que plus le carrefour est achalandé, plus le TTC augmente ce qui correspondrait à un bon niveau de stimu-

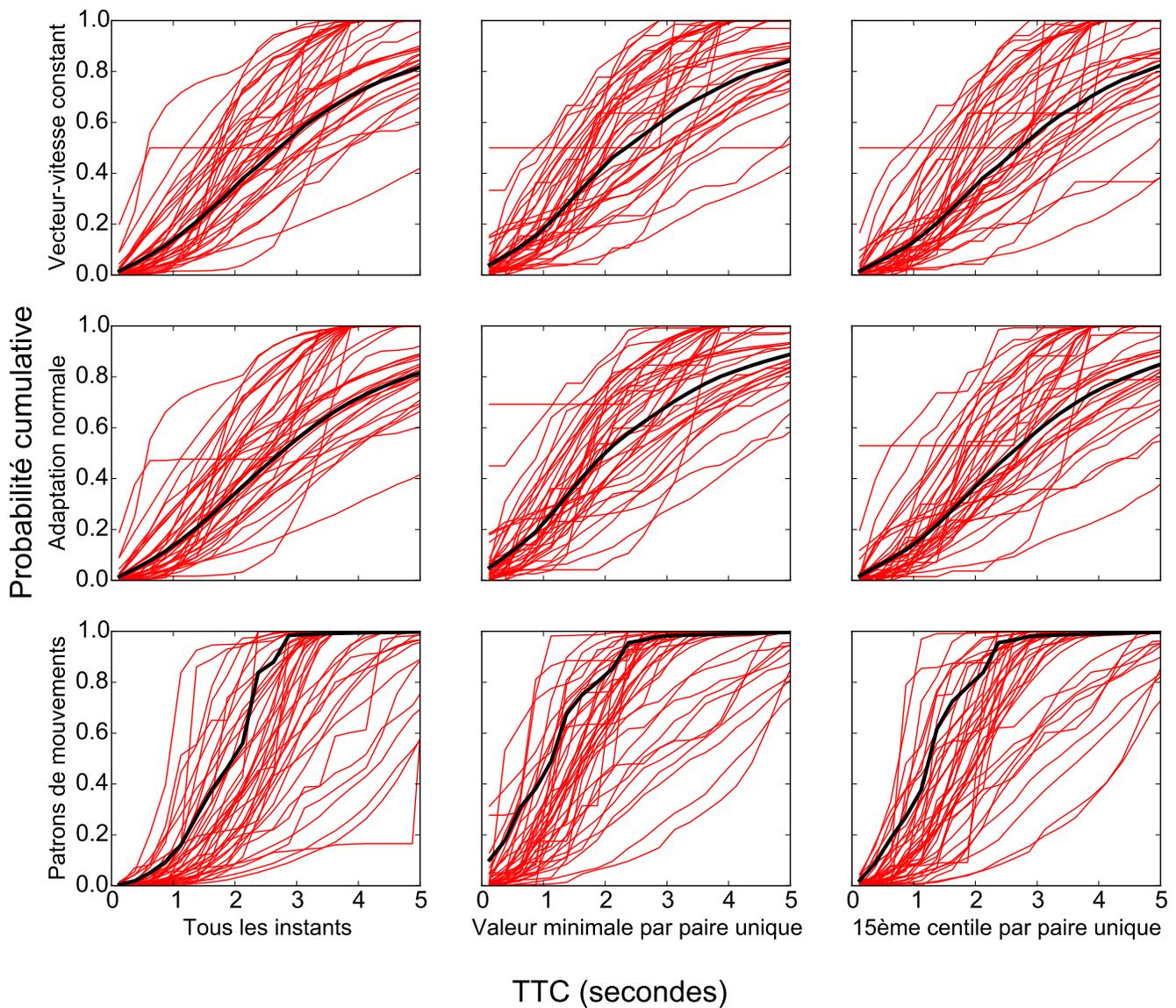


FIGURE 45 – Probabilité cumulée du TTC selon différentes méthodes de prédiction des mouvements et d’agrégation pour tous les quadrants analysés

lation pour de bonnes interactions entre usagers. De grand rayons angulaires et un nombre de voies sur l’approche plus grand correspondent à de grands carrefours giratoires qui permettent des vitesses élevées, vitesse qui est justement associée avec des TTC plus faible.

4.4 Analyse des préférences des piétons

Les caractéristiques des 431 répondants gardés après nettoyage parmi les 501 réponses à l’enquête Internet sont tout d’abord présentées. 53 % des répondants étaient des femmes, 85 % ont choisi la version française du questionnaire et seulement 3 % ont déclaré être étudiants. La distribution des moyens de transport utilisés par les répondants et de leur fréquence d’accès est présentée dans la Figure 48 : le mode le plus fréquent semble être la marche (ce qui était une condition pour participer à l’enquête), suivi par l’automobile, les transports en commun et le

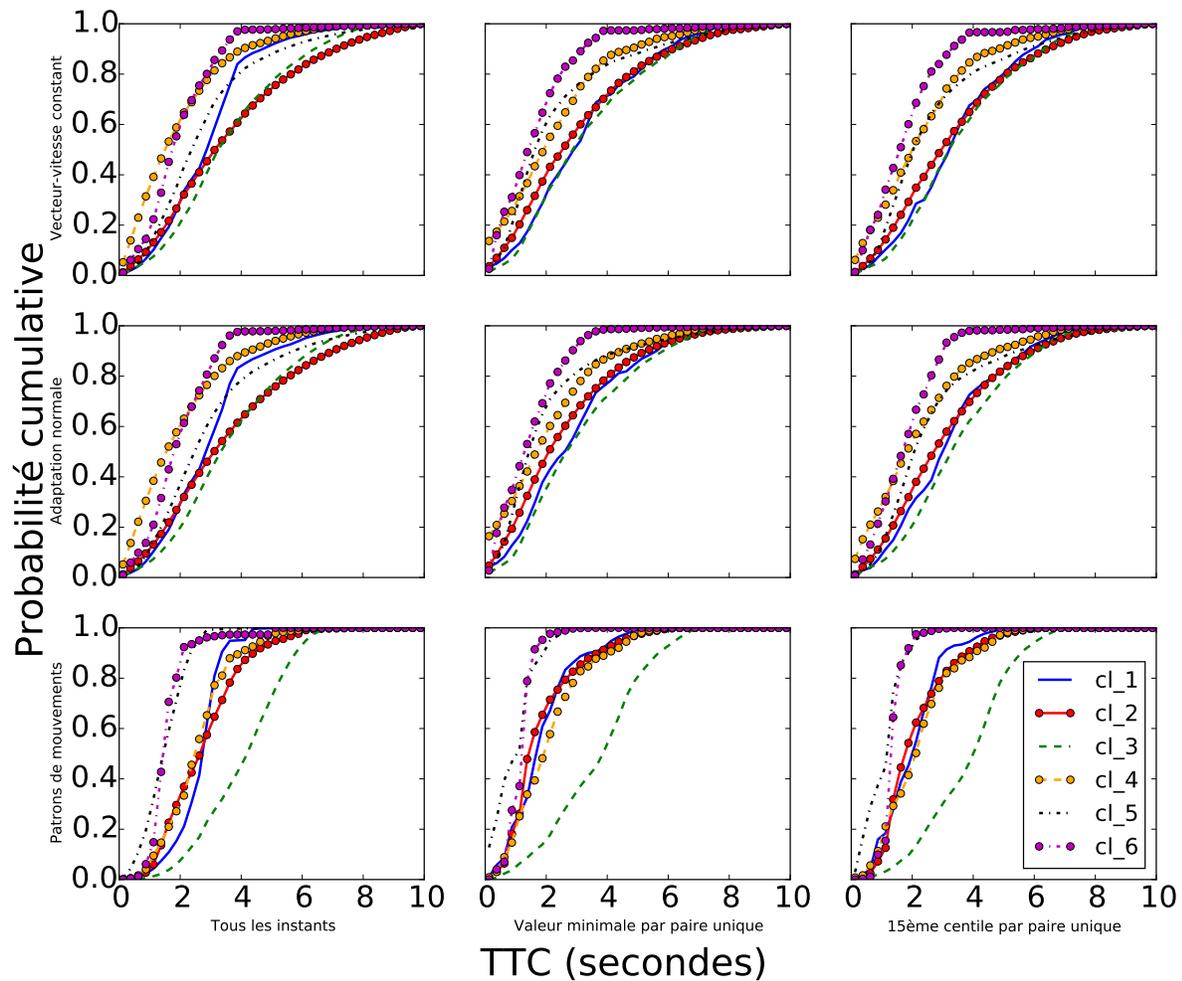


FIGURE 46 – Probabilité cumulée du TTC selon différentes méthodes de prédiction des mouvements et d’agrégation par groupe de quadrants

vélo. La carte de la localisation des répondants présentée dans la Figure 49 permet de voir que la localisation des répondants suit bien la répartition des carrefours giratoires sur tout le territoire du Québec (telle que connue à mi-projet).

Concernant la connaissance du fonctionnement des carrefours giratoires, 62.5 % des répondants savaient que la priorité est aux véhicules dans le carrefour giratoire, et 24.4 % cédaient la priorité aux piétons traversant les approches (réponse acceptable) : il reste ainsi 13.1 % des répondants qui ne connaissent pas les règles de priorité sur un carrefour giratoire (4.6 % pensent que les véhicules entrant dans le carrefour giratoire ont la priorité, 0.2 % que les cyclistes ont priorité, et 8.3 % ne savent pas). De même, 12 % des répondants ne connaissaient pas la signification du panneau indiquant le sens de circulation sur l’anneau et 9 % le sens du panneau indiquant la localisation du passage pour les piétons (voir la question de l’enquête page 159). Une part non-négligeable de la population ne semble donc pas bien connaître le fonctionnement des carrefours giratoires et la signalisation qui lui est attachée. De façon surprenante, les usagers qui se sentent les moins en sécurité dans les carrefours giratoires sont les conducteurs ou passagers d’automobile (65 %, comparé à 43-44 % pour les piétons et les cyclistes), ce qui trahit peut

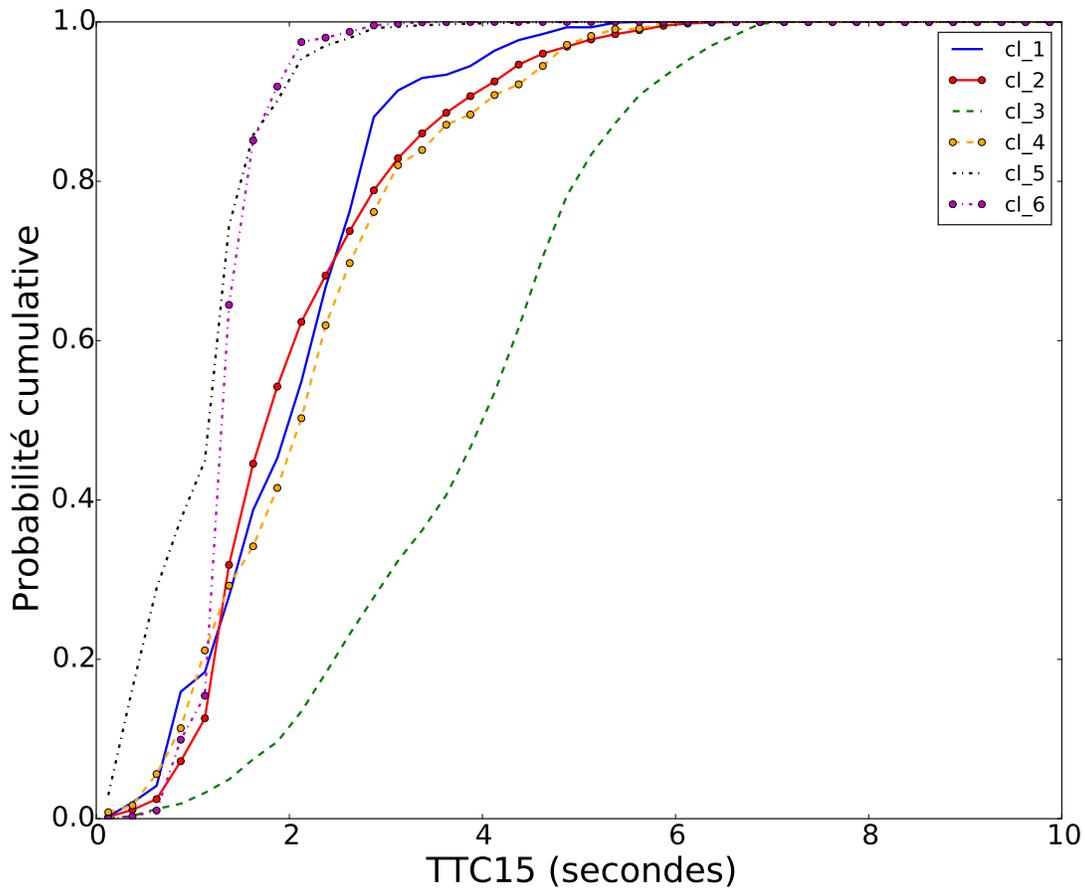


FIGURE 47 – Probabilité cumulée du TTC_{15} calculé avec les patrons de mouvement par groupe de quadrants

être encore la mauvaise compréhension des carrefours giratoires.

Le Tableau 24 montre les résultats du modèle MMNL estimé à l'aide des données du questionnaire considérées comme des données de panel puisque chaque personne répondait à plusieurs tâches à choix discret, ce qui permet de tenir compte des corrélations entre les choix des répondants. Les coefficients du modèle significatifs à un niveau de confiance d'au moins 90 % ont les bons signes, cohérents avec la littérature et les résultats du groupe de discussion. Le test de taux de log-vraisemblance du modèle montre que ce modèle a un pouvoir explicatif plus grand que le modèle de base avec un niveau de confiance de 99 %.

La localisation du passage pour les piétons loin de l'entrée du carrefour est l'attribut qui augmente le plus la cote (pour le choix d'un carrefour giratoire avec cet attribut), visible dans la dernière colonne du Tableau 24. Les interactions identifiées dans le modèle indiquent que les répondants qui ne vivent pas dans le grand Montréal sont moins sensibles au nombre de voies. Cela peut s'expliquer en supposant que les répondants ne vivant pas dans le grand Montréal sont plus habitués à des routes et des carrefours avec plus de voies. Les répondants qui accèdent aux carrefours giratoires majoritairement à pieds en dehors du grand Montréal sont plus sensibles à la vitesse de la circulation que le reste des répondants, ce qui pourrait s'expliquer par une vitesse moyenne plus grande de la circulation dans les zones péri-urbaines et rurales. Quatre attributs (nombre de voies, présence d'un îlot piétonnier, passage pour piéton à l'entrée du carrefour et à 5 m de l'entrée) ont des coefficients suivant une distribution normale selon le modèle.

Tableau 23 – Modèle linéaire pour le logarithme de la moyenne du TTC_{15} en fonction des attributs des 36 quadrants (lowerInsSpeed est la moyenne par quadrant de la vitesse plus petite des vitesses des deux usagers au moment où le TTC_{15} est atteint ; inflow_phpl est le nombre de véhicule par heure et par voie mesuré par analyse vidéo en entrée du quadrant sur l’approche et sur l’anneau)

Attribut	Coeff.	(Err. Std.)
n_start_lanes	0.226	(0.118)
inflow_phpl	0.002	(0.000)
a_quad_size	-0.005	(0.003)
lowerInsSpeed	-0.039	(0.009)
Constante	1.095	(0.402)
R^2	0.5908	
$R^2_{ajusté}$	0.5397	

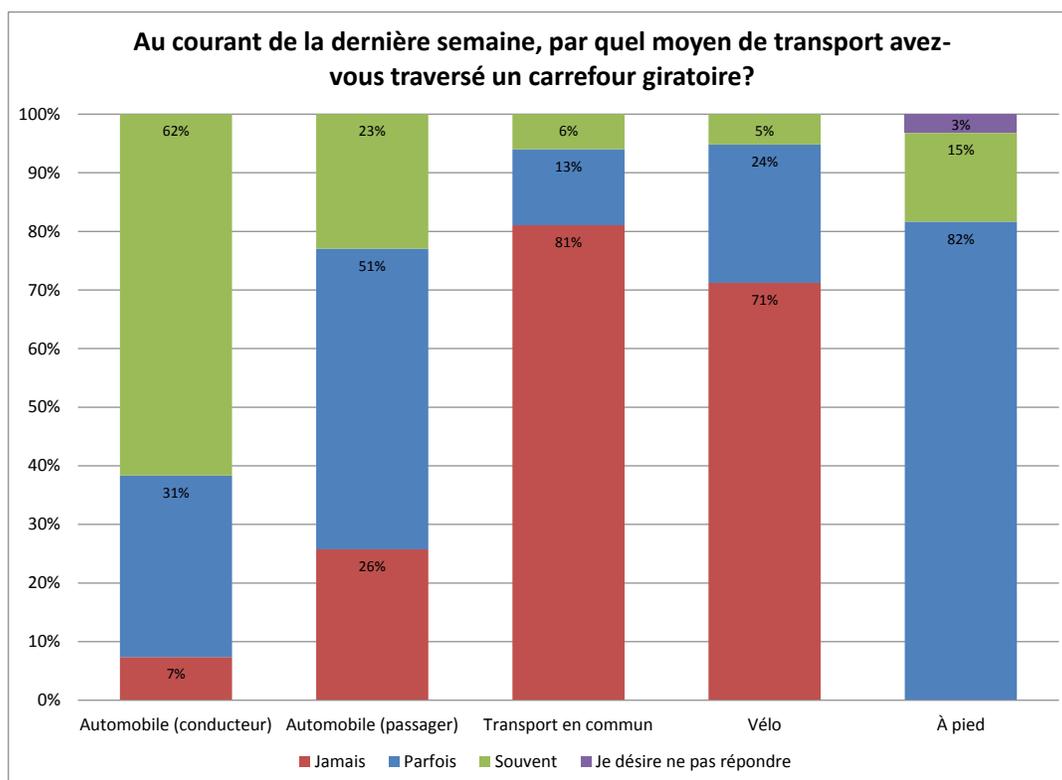


FIGURE 48 – Fréquence d’accès des répondants à des carrefours giratoires selon le mode de transport

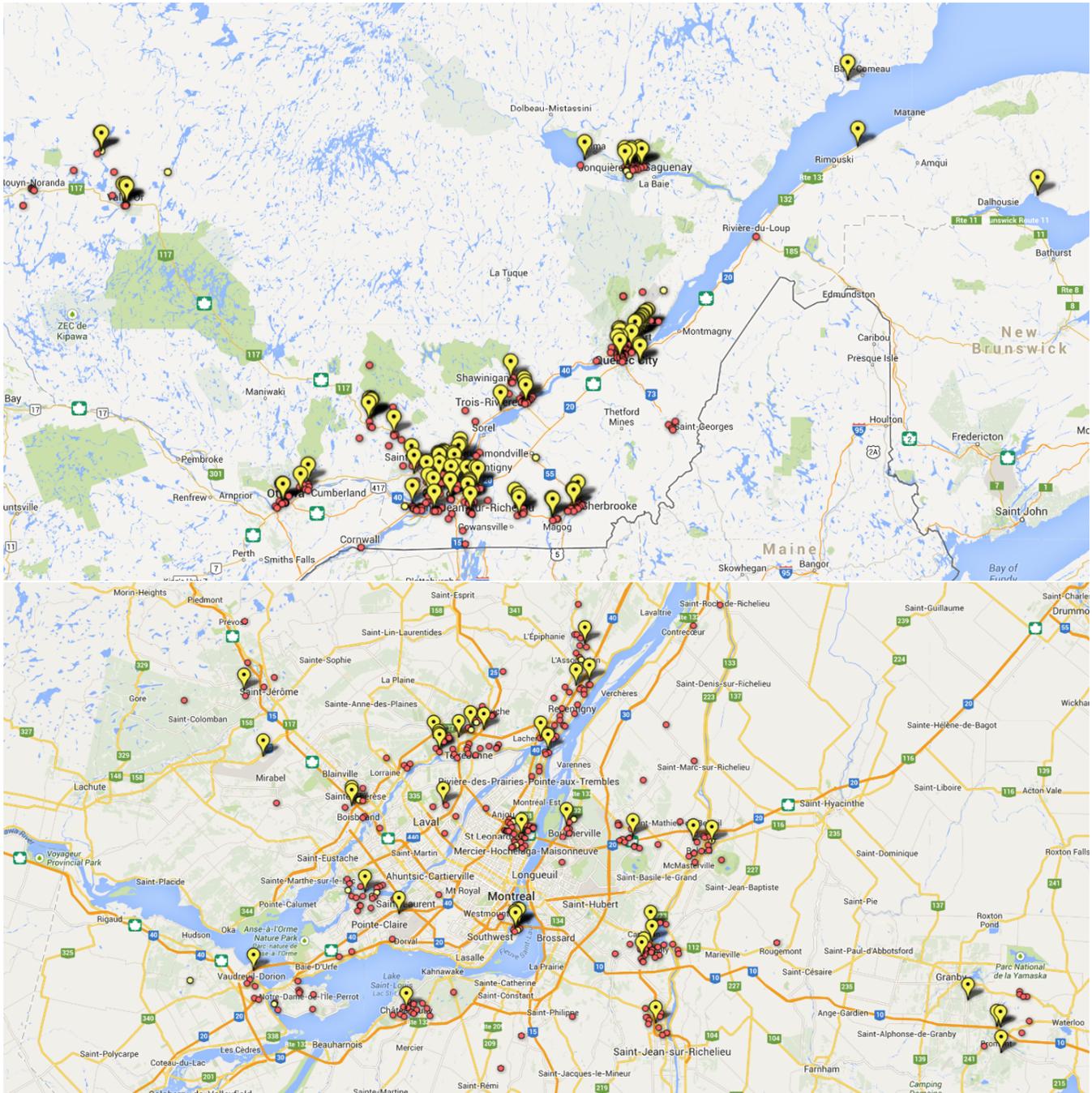


FIGURE 49 – Cartes de la localisation des carrefours giratoires connus lors de l'enquête (ballons jaunes) et des répondants dont les réponses ont été analysées (points rouges) ou exclues (points jaunes)

Tableau 24 – Résultats du modèle MMNL des préférences des piétons pour les carrefours giratoires (* = Significatif à un niveau de confiance de 90 %, ** = Significatif à 95 %, *** = Significatif à 99 %; LL_0 et LL log-vraisemblances respectivement du modèle de base et du modèle final)

Modèle MMNL			
	Coefficient	Valeur t	$exp(\beta)$
Panneaux standards	0.422	1.67*	1.526
Panneaux avec feux clignotants	1.117	4.29***	3.055
Nombre de voies	-0.997	-6.25***	0.369
Pour les personnes hors du grand Montréal	0.370	1.88***	1.448
Présence d'un îlot directionnel	0.737	6.78***	2.091
Passage pour piétons à l'entrée	2.689	8.45***	14.71
Passage pour piétons à 5 m de l'entrée	4.273	10.67***	71.736
Débit motorisé	-0.163	-6.64***	0.849
Vitesse de la circulation	-0.648	-2.72***	0.523
Vitesse de la circulation (pour les piétons passant sur des carrefours giratoires hors du grand Montréal)	-1.190	-2.00**	0.304
Nombre de coefficients aléatoires		4	
Écart-type du nombre de voies	0.686	2.96***	-
Écart-type de la présence d'un îlot directionnel	0.716	3.50***	-
Écart-type de la présence d'un passage pour piétons à l'entrée	1.373	5.38***	-
Écart-type de la présence d'un passage pour piétons à 5 m de l'entrée écart-type	2.129	6.91***	-
Log vraisemblance finale		-961.57	
Pseudo R^2		0.4623	
Nombre de paramètres		14	
Degré de liberté (au-dessus du modèle MNL de base)		6	
$\chi^2_{observé} = -2[LL_0 - LL]$		106.56	

Le modèle suggère une certaine variabilité dans les préférences des répondants pour ces quatre attributs, en particulier pour la localisation du passage pour les piétons à 5 m de l'entrée du carrefour. Cette variabilité avait aussi été observée dans le groupe de discussion : certains piétons semblent se sentir plus en sécurité en traversant plus loin du carrefour, alors que d'autres préfèrent une trajectoire plus directe pour traverser le carrefour. Il est aussi intéressant de noter que la variabilité des préférences des répondants concerne des attributs de l'infrastructure et non opérationnels, montrant que la perception par les répondants du débit et de la vitesse de la circulation est plus uniforme.

Si ce modèle est instructif, il est utile de comparer l'importance relative des attributs testés pour mieux comprendre les résultats. Pour cela, une analyse des taux marginaux de substitution a été effectuée. Le taux marginal de substitution est un concept économique défini comme "la quantité d'un certain élément qui doit être donnée à un agent pour le compenser exactement pour la perte d'une unité d'un autre élément" [51]. Dans le cas de modèles logit, ce taux est obtenu en divisant un coefficient d'un attribut par le coefficient d'un autre. Les taux marginaux de substitution entre attributs du modèle MMNL sont présentés dans le Tableau 25 : par exemple, l'effet négatif de passer d'une à deux voies de circulation dans un carrefour giratoire peut être compensé par la présence de panneaux avec feux clignotants (le coefficient pour la présence de

panneaux avec feux clignotants divisé par le coefficient du nombre de voie est égal à 1.12). La localisation du passage pour les piétons à l'entrée du carrefour a le même effet sur les préférences des répondants qu'une diminution de la vitesse de la circulation d'environ 41 km/h (le taux marginal de substitution présenté dans le Tableau 25 est pour une variation de 10 km/h).

Ces taux marginaux de substitution peuvent aider les concepteurs de carrefours giratoires en suggérant comment certains éléments peuvent se compenser dans un carrefour giratoire pour maintenir le même niveau de satisfaction ressentie par les piétons. Il est particulièrement utile de pouvoir compenser les impacts d'attributs opérationnels difficiles à contrôler (débit et vitesse de la circulation) par des attributs géométriques plus faciles à mettre en œuvre (par exemple la signalisation et la localisation du passage pour les piétons).

Tableau 25 – Taux marginaux de substitution pour le modèle MMNL

	Nombre de voies	Nombre de voies (hors Montréal)	Débit de circulation (véh/h)	Vitesse de la circulation (10 km/h)	Vitesse de la circulation (hors Montréal)
Panneaux standards	0.42	0.67	2.59	0.65	0.23
Panneaux avec feux clignotants	1.12	1.78	6.85	1.72	0.61
Présence d'un îlot directionnel	0.74	1.18	4.52	1.14	0.4
Passage pour piétons à l'entrée	2.7	4.3	16.5	4.15	1.46
Passage pour piétons à 5 m de l'entrée	4.29	6.82	26.21	6.59	2.32

5 Conclusion

5.1 Bilan

La plupart des objectifs de ce projet ont été atteints au travers des trois approches proposées, à savoir l'analyse de données d'accident, l'analyse vidéo des comportements et interactions entre usagers et une enquête sur les préférences des usagers piétons. Les plus grosses difficultés ont été rencontrées pour l'analyse des données d'accidents, leur localisation et surtout l'absence de données suffisamment complètes de débit pour prendre en compte ce facteur essentiel d'explication du nombre d'accidents.

Pour résumer, un inventaire des carrefours construits au Québec a été constitué : la liste est complète en date de la fin 2014 au mieux de nos efforts, mais tous les attributs descriptifs n'ont pu être collectés pour tous les carrefours. Cet inventaire partiel permet d'esquisser une image des carrefours plutôt homogène dans leur ensemble, avec cependant des variations pour une petite proportion et des manques par exemple en terme de panneaux de signalisation.

Malgré les résultats non-concluants de l'analyse de la fréquence des accidents, il ressort une hétérogénéité des impacts sur le nombre d'accidents qui a aussi été relevée dans la littérature et correspond à une hétérogénéité dans la conception des carrefours giratoires. Il ressort aussi des éléments qui pointent vers la mauvaise performance des ronds-points convertis sans modification géométrique et des questions sur les carrefours giratoires de grande taille (grands rayons, avec bande franchissable et deux voies ou plus sur l'anneau) qui permettent aux usagers de maintenir une vitesse élevée lors de la traversée d'un carrefour giratoire. La gravité n'a pas été étudiée de façon comparative avec d'autres types de carrefours et ne permet pas de conclusion sur la sécurité relative des carrefours giratoires, mais il faut constater la faible gravité d'ensemble de ces accidents. L'analyse de gravité indique aussi quelques éléments de conception à surveiller, à savoir pour les véhicules de grande taille (pour les accidents impliquant des autobus dans cette étude) et la qualité de l'éclairage.

Le volet d'étude des comportements et de la sécurité des usagers par analyse vidéo a largement porté ses fruits. Des outils ont été développés pour l'analyse d'un grand ensemble de données vidéo collectées à 20 sites dans tout le Québec permettant d'étudier 36 zones d'entrecroisement avec les voies d'approche et de sortie (quadrants). Plus de 470 h ont ainsi été traitées et ont permis l'analyse des vitesses par quadrant et type de mouvement, des créneaux lors de l'insertion des véhicules sur l'anneau et des interactions par l'indicateur du TTC. Les débits déséquilibrés entre l'approche et l'entrée de chaque quadrant sont liés à des vitesses plus élevées, à des créneaux et des TTC plus importants. Cela requiert plus d'investigation puisque des vitesses plus élevées sont liées au moins à des accidents potentiellement plus graves, tandis que des créneaux et TTC plus grands devraient être plus sécuritaires. L'apparition d'attributs comme le nombre de voies et la taille angulaire du quadrant pointent comme l'analyse des accidents vers la problématique des grands carrefours. Le débit est lié à des TTC plus élevés, ce qui pourrait indiquer une meilleure stimulation des usagers lorsqu'il y a suffisamment de circulation à laquelle il faut faire attention, et la vitesse est liée à des TTC plus faibles, ce qui est logique étant donné la définition du TTC, toute chose étant égales par ailleurs.

Le projet a amené des éléments indiquant globalement une bonne compréhension du fonctionnement des carrefours giratoires, un respect des vitesses recommandées, mais il est notable qu'une portion non-négligeable de la population (autour de 10 %) ne connaît pas bien la règle de priorité et la signalisation qui lui est attachée. Des éléments plus anecdotiques de comportements observés indiquent au moins qu'un temps d'adaptation est nécessaire pour les usagers,

particulièrement pour un aménagement encore très nouveau au Québec.

Les préférences et besoins des piétons ont été étudiées par une enquête Internet et permis d'identifier l'importance relative des caractéristiques des carrefours et de la circulation, et comment ces éléments pourraient être utilisés pour compenser des caractéristiques moins contrôlables liées à la circulation, par exemple mieux protéger les passages pour piétons si la circulation est perçue comme trop rapide.

5.2 Recommandations

La première recommandation de ce projet concerne la nécessité de collecter des données complémentaires, en particulier des débits sur plusieurs années, pour mieux comprendre les accidents se produisant dans les carrefours giratoires et dans les carrefours comparables d'un autre type.

En terme de conception des carrefours, plusieurs observations confirment que les ronds-points convertis ont une mauvaise performance en terme de sécurité. Les carrefours plus grands, avec plusieurs voies et à grands rayons, semblent associés à une moins bonne sécurité. Par ailleurs, les carrefours giratoires sur les routes régionales sont associés avec des créneaux à l'insertion sur l'anneau plus faible et se retrouvent dans le second groupe de quadrants associé à des TTC faibles, comme les ronds-points convertis. Ces carrefours doivent être étudiés avec plus d'attention pour éviter une dégradation de la sécurité.

Le rapport des débits d'entrée semble être associé à des vitesses plus élevées pour le mouvement anneau-sortie et plus basses pour le mouvement approche-anneau, mais aussi des créneaux et des TTC plus grands (groupe cl_3 dans les distributions des TTC_{15} par quadrant). S'il est certain que des débits déséquilibrés offrent moins d'opportunités d'interaction, cet attribut n'est pas facilement contrôlable et une telle situation peut avoir des impacts négatifs pour l'insertion des véhicules venant d'approches très peu achalandées. Le déséquilibre des débits d'entrée est un des critères à surveiller lors du choix de l'installation d'un carrefours giratoire [12].

L'enquête sur les préférences des piétons fournit des éléments concrets, plutôt bien connus, pour le choix de conception des carrefours giratoires. La demande de l'ajout de panneaux clignotants par le groupe de discussion et leur significativité dans les résultats de l'enquête constituent un élément relativement nouveau qui devrait être considéré.

Les problèmes de mauvaise connaissance du fonctionnement des carrefours giratoires rappellent qu'il est toujours important de bien communiquer auprès de la population lors de l'implantation d'un nouvel aménagement, surtout dans le cas d'un type d'aménagement encore assez nouveau au Québec comme le carrefour giratoire [58]. Une bonne connaissance des règles de priorité est essentielle au bon fonctionnement d'un carrefour giratoire, tant pour la sécurité que pour sa fluidité (en évitant les arrêts ou hésitations inutiles).

Enfin, la variabilité de certaines caractéristiques des carrefours giratoires, surtout en milieu municipal, incite à promouvoir un guide de recommandations pratiques, voire des normes, pour assurer une bonne conception de ces carrefours dans lesquels la conception géométrique est la clef d'une bonne performance.

5.3 Limitations et perspectives

La limitation principale de ce projet est le manque de données historiques de circulation qui permettraient d'interpréter complètement les données historiques d'accident. D'autres données sur les accidents auraient permis des analyses complémentaires, par exemple des informations

sur les occupants des véhicules impliqués dans les accidents (âge, sexe, position dans le véhicule, blessure, etc.). Le nombre faible des accidents les plus graves limite la puissance de l'analyse pour ces types d'accident. Un problème de fonds reste celui de la qualité des données d'accident dans la province de Québec, en particulier concernant la géolocalisation des accidents qui a occupé une partie importante du temps de ce projet pour développer une méthode automatique de localisation à partir des informations textuelles de l'accident et pourrait être grandement améliorée par l'usage d'appareils GPS. Le manque d'information pour les accidents sans dommages corporels est aussi problématique. Plusieurs attributs des accidents n'ont pu être analysés car ils comprenaient trop de valeurs manquantes. Une analyse de la gravité comparative entre les accidents aux carrefours giratoires et à d'autres types de carrefour serait une prolongation naturelle de l'analyse effectuée dans ce projet.

La principale limitation des analyses de comportement et des interactions par vidéo provient de l'absence de lien formel avec la sécurité, le nombre attendu d'accidents par niveau de gravité. Si les indicateurs utilisés ont une valeur en eux-mêmes, en particulier la vitesse, leur interprétation en terme de sécurité n'est pas certaine. Il n'est par exemple pas établi que des vitesses plus élevées sont liées à une fréquence plus grande d'accidents [37]. Les mesures substitués de sécurité comme le TTC ont une histoire encore plus complexe : si les interactions les plus sévères sont indistinguables des accidents, la relation entre les interactions de différents niveaux de sévérité et l'accident est complexe. En particulier, il existe probablement de bonnes interactions, pas trop sévères mais suffisamment sévères pour stimuler les conducteurs et nécessiter leur attention dans leurs interactions avec les autres usagers comme à l'approche d'un carrefour giratoire, et des interactions trop peu sévères qui ne préparent pas les usagers aux accidents potentiels [83]. S'il était initialement prévu de travailler sur la validation des mesures substitués de sécurité à l'aide des relevés vidéos et des données d'accidents disponibles pour les mêmes sites, cela semble impossible étant donné le manque de données historiques de circulation. L'exposition et ses différents usages est un autre aspect de la sécurité qui nécessite d'être exploré plus en profondeur.

La vitesse est aussi un sujet qui mériterait plus d'investigation. Si la vitesse recommandée est généralement respectée, on observe une grande variation entre sites qui est en particulier reliée à leur géométrie. Une caractéristique fondamentale des carrefours giratoires est de forcer les véhicules en approche à freiner par l'enchaînement des courbes sur l'approche : si la géométrie de l'approche est mal conçue, les effets attendus sur la vitesse ne se réaliseront pas. Caractériser quantitativement et objectivement cette géométrie est cependant difficile à faire de façon comparable entre carrefours et devrait faire l'objet de travaux futurs en relation avec la vitesse observée.

Des modèles statistiques plus complexes comme les modèles à effets aléatoires seront utilisés pour intégrer les attributs des quadrants et des interactions individuelles dans le même modèle et mieux comprendre leurs effets relatifs. Il reste plusieurs heures de vidéo déjà collectées à analyser, en particulier pour deux analyses spécifiques. Des données ont été collectées à un carrefour à Montréal lors d'une tempête de neige qui seront intéressantes à comparer avec des données collectées dans des conditions météorologiques normales. Des données ont aussi été collectées à Gatineau, avant et après la construction d'un nouveau carrefour giratoire en 2014, et permettront de mieux comprendre les changements de comportement engendrés par le nouvel aménagement et comment les usagers s'adaptent.

Des travaux sont aussi en cours pour estimer objectivement et quantitativement la précision du suivi par analyse vidéo, et un article explorera la relation entre la précision du suivi et la précision des mesures dérivées comme la vitesse et le TTC. Des méthodes ont été testées pour

détecter des comportements anormaux et des violations comme la conduite en sens interdit, mais n'ont pas été appliquées à l'ensemble des données. Des méthodes plus générales de détection des comportement anormaux, c'est à dire peu fréquents et déviant des comportements "normaux", seront explorées dans le futur. La question de l'adaptation, à court, moyen et long terme, du comportement des usagers mériterait aussi de s'y attarder pour mieux comprendre l'impact sur la sécurité. Une telle étude nécessiterait cependant des investissements importants sur le long terme pour être réalisée.

L'enquête sur les préférences des piétons envers les carrefours giratoires a attiré de l'intérêt de la part de groupes représentant les personnes handicapées, mais il n'a pas été possible de recueillir assez de réponses de la part de ces personnes pour en faire l'analyse et contraster leurs réponses de celles de la population générale. Les carrefours giratoires sont une source d'inquiétude pour ces usagers car ils en sont moins familiers et les considèrent moins sécuritaires que les carrefours à feu (qui peuvent être équipés d'un signal sonore). Une suite à ce travail est d'explorer le rapport entre les perceptions et préférences des usagers avec leur sécurité objective. Cela a été tenté dans ce projet, mais le travail est limité par le nombre d'observations d'interactions entre piétons et véhicules [60].

Étant donné que les cyclistes sont les usagers dont la sécurité est affectée le plus négativement dans les carrefours giratoires selon la littérature, il semble important de compléter les travaux faits dans ce projet par des analyses de la sécurité des cyclistes dans les carrefours giratoires, tant par analyse des données d'accident que par analyse vidéo des interactions.

Concernant l'inventaire des carrefours giratoires, il sera publié sur le site Internet public du projet : il serait intéressant de verser une partie de ces données dans les données ouvertes de OpenStreetMap pour qu'elles bénéficient au plus grand nombre.

Enfin, une demi-journée de présentation avec le partenaire industriel WSP sera organisée dans l'année 2015 pour diffuser les résultats du projet auprès des autres chercheurs et des utilisateurs potentiels des méthodes et des résultats du projet.

Références

- [1] F. AMUNDSEN et C. HYDÉN, éditeurs. *Proceedings of the first workshop on traffic conflicts*, Oslo, Norway, 1977. Institute of Transport Economics.
- [2] T. ARENTZE, A. BORGERS, H. TIMMERMANS et R. DELMISTRO : Transport stated choice responses : effects of task complexity, presentation format and literacy. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 39(3):229–244, 2003.
- [3] M. ASANO, T. IRYO et M. KUWAHARA : Microscopic pedestrian simulation model combined with a tactical model for route choice behaviour. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 18(6):842–855, 2010.
- [4] A. BEAUPRÉ : Évaluation et recommandation pour le développement des carrefours à sens giratoire au québec. Mémoire de D.E.A., École de Technologie Supérieure, 2011.
- [5] C. BERTHOD, N. CHEVALIER, M. DROUIN, E. FERLAND, P. GUIMOND, D. HAMEL, Y. JULIEN, C. LAROCQUE, S. T. LÊ, A. SENNEVILLE et D. VIENS : Le carrefour giratoire : un mode de gestion différent. Rapport technique, Ministère des Transports, 2002.
- [6] J. P. BOENDER : Carrefours giratoires : les nouvelles directives néerlandaises. *Routes/Roads*, 301:57–63, 1999.
- [7] M. BROSSEAU, S. ZANGENEHPOUR, N. SAUNIER et L. MIRANDA-MORENO : The impact of waiting time and other factors on dangerous pedestrian crossings and violations at signalized intersections : a case study in montreal. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 21:159–172, 2013.
- [8] S. BURNS : Safety at quebec’s roundabouts : Investigating injuries and accident occurrence. Master of Engineering Thesis, McGill University, décembre 2014.
- [9] S. BURNS, L. MIRANDA-MORENO, N. SAUNIER et K. ISMAIL : Crash severity analysis at roundabouts : A case study in quebec, canada. In *Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, 2013. 13-4527.
- [10] S. BURNS, L. F. MIRANDA-MORENO, J. STIPANCIC, N. SAUNIER et K. ISMAIL : Accessible and practical geocoding method for traffic collision record mapping : Quebec case study. In *Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, 2014. 14-4605. Accepted for publication in *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*.
- [11] N. BUTTON et R. HENDERSON : Pedestrian safety in roundabouts. In *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, 2013.
- [12] J. R. CHAPMAN et R. F. BENEKOHAL : Roundabout warrants : Proposed framework for future development. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1801(1):39–45, 2002.
- [13] N. CHAURAND et P. DELHOMME : Cyclists and drivers in road interactions : a comparison of perceived crash risk. *Accident Analysis and Prevention*, 50:1176–1184, 2013.
- [14] X. CHU, M. GUTTENPLAN et M. BATES : Why people cross where they do : The role of street environment. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1878(1):3–10, 2004.
- [15] A. COHEN, H. BAR-GERA, Y. PARMET et A. RONEN : Guardrail influence on pedestrian crossing behavior at roundabouts. *Accident Analysis and Prevention*, 59:452–458, 2013.

- [16] B. COIFMAN, D. BEYMER, P. MCCLAUCHLAN et J. MALIK : A real-time computer vision system for vehicle tracking and traffic surveillance. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 6(4):271–288, 1998.
- [17] A. CORNUÉJOLS, L. MICLET et Y. KODRATOFF : *Apprentissage Artificiel*. Eyrolles, 2002.
- [18] S. DANIELS, T. BRIJS, E. NUYTS et G. WETS : Externality of risk and crash severity at roundabouts. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6):1966–1973, 2010.
- [19] S. DANIELS, E. NUYTS et G. WETS : The effects of roundabouts on traffic safety for bicyclists : An observational study. *Accident Analysis & Prevention*, 40(2):518–525, 2008.
- [20] Stijn DANIELS, Tom BRIJS, Erik NUYTS et Geert WETS : Explaining variation in safety performance of roundabouts. *Accident Analysis & Prevention*, 42(2):393–402, 2010.
- [21] B. DE BRABANDER et L. VEREECK : Safety effects of roundabouts in flanders : Signal type, speed limits and vulnerable road users. *Accident Analysis & Prevention*, 39(3):591–599, 2007.
- [22] A. DOLMAJIAN : Comparative study on speed profiles and emission rates on a series of consecutive intersections : Roundabouts vs. signalized intersections. Mémoire de D.E.A., Polytechnique Montreal, 2013.
- [23] J. B. EDWARDS : The relationship between road accident severity and recorded weather. *Journal of Safety Research*, 29(4):249–262, 1998.
- [24] K. EL-BASYOUNY et T. SAYED : Comparison of two negative binomial regression techniques in developing accident prediction models. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1950(-1):9–16, janvier 2006.
- [25] R. ELVIK : Effects on road safety of converting intersections to roundabouts : Review of evidence from non-u.s. studies. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1847(1):1–10, 2003.
- [26] D. ERDMAN, L. JACKSON et A. SINKO : Zero-inflated poisson and zero-inflated negative binomial models using the countreg procedure. In *SAS Global Forum*, pages 1–11, 2008.
- [27] D. ETTEHADIEH, B. FAROOQ et N. SAUNIER : Systematic parameter optimization and application of automated tracking in pedestrian-dominant situations. In *Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, 2015. 15-2400.
- [28] D.A. 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*, 1(2-3):77–254, 2005.
- [29] L. FRIDSTRØM, J. IFVER, S. INGEBRIGTSEN, R. KULMALA et L. K. THOMSEN : Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. *Accident Analysis & Prevention*, 27(1):1–20, 1995.
- [30] D. W. GOLDBERG, C. A. KNOBLOCK et J. P. WILSON : From text to geographic coordinates : The current state of geocoding. *Journal of the Urban and Regional Information Systems Association*, 19(1):33–46, 2007.
- [31] F. GROSS, C. LYON, B. PERSAUD et R. SRINIVASAN : Safety effectiveness of converting signalized intersections to roundabouts. *Accident Analysis and Prevention*, 50:234–241, janvier 2013.
- [32] F. GROSS, B. PERSAUD et C. LYON : A guide to developing quality crash modification factors. Rapport technique FHWA-SA-10-032, U.S. Department of Transportation, 2010.

- [33] B. GUICHET : Les accidents dans les carrefours giratoires urbains. Rapport technique, CERTU, 2009.
- [34] H. GUO, W. WANG, W. GUO, X. JIANG et H. BUBB : Reliability analysis of pedestrian safety crossing in urban traffic environment. *Safety Science*, 50(4):968–973, 2012.
- [35] D. HARWOOD, K. BAUER, I. POTTS, D. TORBIC, K. RICHARD, E. RABBANI, E. HAUER, L. ELEFTERIADOU et M. GRIFFITH : Safety effectiveness of intersection left- and right-turn lanes. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1840:131–139, 2003.
- [36] E. HAUER : *Observational Before-After Studies in Road Safety*. Pergamon, 1997.
- [37] Ezra HAUER : Speed and safety. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2103:10–17, 2009.
- [38] T. HELS et I. OROZOVA-BEKKEVOLD : The effect of roundabout design features on cyclist accident rate. *Accident Analysis & Prevention*, 39(2):300–307, 2007.
- [39] S. HESS, J. M. ROSE et J. POLAK : Non-trading, lexicographic and inconsistent behaviour in stated choice data. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 15(7):405–417, 2010. Specification and interpretation issues in behavioural models used for environmental assessment.
- [40] C. HYDÉN et A. VÁRHELYI : The effects of safety, time consumption and environment of large scale use of roundabouts in an urban area : a case study. *Accident Analysis & Prevention*, 32:11–23, 2000.
- [41] K. ISMAIL : *Application of computer vision techniques for automated road safety analysis and traffic data collection*. Thèse de doctorat, University of British Columbia, 2010.
- [42] 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*, 40(1):57–67, 2013.
- [43] S. JACKSON, L. MIRANDA-MORENO, P. ST-AUBIN et N. SAUNIER : A flexible, mobile video camera system and open source video analysis software for road safety and behavioural analysis. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2365:90–98, 2013. presented at the 2013 Transportation Research Board Annual Meeting.
- [44] S. U. JENSEN : Safety effects of converting intersections to roundabouts. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2389:22–29, 2013. presented at the 2013 Transportation Research Board Annual Meeting.
- [45] I. KAPARIAS, M.G.H. BELL, A. MIRI, C. CHAN et B. MOUNT : Analysing the perceptions of pedestrians and drivers to shared space. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 15(3):297–310, 2012.
- [46] C.E. KELLY, M.R. TUGHT, F.C. HODGSON et M.W. PAGE : A comparison of three methods for assessing the walkability of the pedestrian environment. *Journal of Transport Geography*, 19(6):1500–1508, 2011.
- [47] S. KIM et J. CHOI : Safety analysis of roundabout designs based on geometric and speed characteristics. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(6):1446–1454, septembre 2013.
- [48] K. J. KRIZEK : Two approaches to valuing some of bicycle facilities' presumed benefits : Propose a session for the 2007 national planning conference in the city of brotherly love. *Journal of the American Planning Association*, 72(3):309–320, 2006.

- [49] A. LAURESHYN : *Application of automated video analysis to road user behaviour*. Thèse de doctorat, Lund University, 2010.
- [50] C. LI : User preferences, information transactions and location-based services : A study of urban pedestrian wayfinding. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(6):726–740, 2006.
- [51] J. LOUVIERE, D. HENSHER et J. SWAIT : *Stated Choice Methods : analysis and applications*. Numéro 9780521788304. Cambridge University Press, novembre 2000.
- [52] E. MACIOSZEK, G. SIERPINSKI et L. CZAPKOWSKI : Methods of modeling the bicycle traffic flows on the roundabouts. In J. MIKULSKI, éditeur : *Transport Systems Telematics*, volume 104 de *Communications in Computer and Information Science*, pages 115–124. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [53] C. MENEGUZZER et R. ROSSIA : Evaluating the impact of pedestrian crossings on roundabout entry capacity. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20(0):69–78, 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.
- [54] M. G. MOHAMED et N. SAUNIER : Motion prediction methods for surrogate safety analysis. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2386:168–178, 2013. presented at the 2013 Transportation Research Board Annual Meeting.
- [55] M. MØLLER et T. HELS : Cyclists' perception of risk in roundabouts. *Accident Analysis & Prevention*, 40(3):1055–1062, 2008.
- [56] E. PAPADIMITRIOU, A. THEOFILATOS et G. YANNIS : Patterns of pedestrian attitudes, perceptions and behaviour in europe. *Safety Science*, 53:114–122, 2013.
- [57] E. PAPADIMITRIOU, G. YANNIS et J. GOLIAS : A critical assessment of pedestrian behaviour models. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 12(3):242–255, 2009.
- [58] L. PELLECUER et M. ST-JACQUES : Dernières avancées sur les carrefours giratoires. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(5):542–553, may 2008.
- [59] M. PERDOMO : Visual approaches to understanding pedestrian safety in roundabouts. Master of Science Thesis, Concordia University, décembre 2014.
- [60] M. PERDOMO, Z. PATTERSON, N. SAUNIER et L. MIRANDA-MORENO : Obtaining pedestrian safety indicators in roundabouts through automated video data collection - a case study. In *Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, 2015.
- [61] M. PERDOMO, A. REZAEI, Z. R. PATTERSON, L. F. MIRANDA-MORENO et N. SAUNIER : Pedestrian preferences with respect to roundabouts - a video-based stated preference survey. In *Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, 2014. 14-5528.
- [62] M. PERDOMO, A. REZAEI, Z. R. PATTERSON, L. F. MIRANDA-MORENO et N. SAUNIER : Pedestrian preferences with respect to roundabouts - a video-based stated preference survey. *Accident Analysis & Prevention*, 70:84–91, septembre 2014. Available as report reference CIRRELT-2013-82.
- [63] Bhagwant PERSAUD, Craig LYON et Yongsheng CHEN : Tools for estimating the safety and operational impacts of roundabouts. Report prepared for transport canada, Ryerson University, 2010.
- [64] R. A. RETTING, S. MANDAVILLI, , A.T. MCCARTT et E.R. RUSSELL : Roundabouts, traffic flow and public opinion. *Traffic engineering and control*, 47:268–272, 2006.

- [65] R.A. RETTING, B.N. PERSAUD, P.E. GARDER et D. LORD : Crash and injury reduction following installation of roundabouts in the united states. *American Journal of Public Health*, 91(4):628–631, avril 2001.
- [66] B. ROBINSON, L. RODEGERDTS, W. SCARBOROUGH, W. KITTELSON, R. TROUTBECK, W. BRILON, L. BONDZIO, K. COURAGE, M. KYTE, J. MASON, A. FLANNERY, E. MYERS, J. BUNKERS et G. JACQUEMART : Roundabouts : An informational guide. Rapport technique FHWA-RD-00-068, Federal Highway Administration, mars 2000.
- [67] L. RODEGERDTS : Roundabouts in the united states. Rapport technique 572, NCHRP, 2007.
- [68] L. RODEGERDTS : Roundabouts : An informational guide - second edition. Rapport technique 672, NCHRP, 2010.
- [69] L. SAKSHAUG, A. LAURESHYN, Å. SVENSSON et C. HYDÉN : Cyclists in roundabouts—different design solutions. *Accident Analysis & Prevention*, 42(4):1338–1351, 2010.
- [70] N. SAUNIER : Traffic Intelligence. <https://bitbucket.org/Nicolas/trafficientelligence>, 2011-2014. Software under the open source MIT License.
- [71] N. SAUNIER et T. SAYED : A feature-based tracking algorithm for vehicles in intersections. *In Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, Québec, juin 2006. IEEE.
- [72] N. SAUNIER, T. SAYED et K. ISMAIL : Large scale automated analysis of vehicle interactions and collisions. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2147:42–50, 2010. presented at the 2010 Transportation Research Board Annual Meeting.
- [73] N. SAUNIER, T. SAYED et C. LIM : Probabilistic Collision Prediction for Vision-Based Automated Road Safety Analysis. *In The 10th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 872–878, Seattle, octobre 2007. IEEE.
- [74] B. SCHROEDER, R. HUGHES, N. ROUPHAIL, C. CUNNINGHAM et K. SALAMATI : Crossing solutions at roundabouts and channelized turn lanes for pedestrians with vision disabilities. Rapport technique 674, National Cooperative Highway Research Program, 2011.
- [75] V. P. SISIOPIKU et D. AKIN : Pedestrian behaviors at and perceptions towards various pedestrian facilities : an examination based on observation and survey data. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 6:249–274, 2003.
- [76] 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*, 36:284–295, 2013.
- [77] P. ST-AUBIN, N. SAUNIER et L. MIRANDA-MORENO : Big brother is watching you... to predict crashes. *In Big Data and Urban Informatics Workshop*, Chicago, août 2014.
- [78] P. ST-AUBIN, N. SAUNIER et L. MIRANDA-MORENO : Comparison of various objectively defined surrogate safety analysis methods. *In Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, 2015. 15-4629.
- [79] P. ST-AUBIN, N. SAUNIER et L. MIRANDA-MORENO : Large-scale microscopic traffic behaviour and safety analysis of québec roundabout design. *In Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, 2015. 15-5317.
- [80] P. ST-AUBIN, N. SAUNIER, L. MIRANDA-MORENO et K. ISMAIL : Detailed driver behaviour analysis and trajectory interpretation at roundabouts using computer vision data. *In Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, 2013. 13-5255.

- [81] P. ST-AUBIN, N. SAUNIER, L. MIRANDA-MORENO et K. ISMAIL : Use of computer vision data for detailed driver behavior analysis and trajectory interpretation at roundabouts. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2389:65–77, 2013. presented at the 2013 Transportation Research Board Annual Meeting.
- [82] P. ST-AUBIN, N. SAUNIER et L. F. MIRANDA-MORENO : Road user collision prediction using motion patterns applied to surrogate safety analysis. *In Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers*, 2014. 14-5363.
- [83] Å. SVENSSON et C. HYDÉN : Estimating the severity of safety related behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2):379–385, mars 2006.
- [84] A. TARKO, G. A. DAVIS, N SAUNIER, T. SAYED et S. WASHINGTON : Surrogate measures of safety. White paper, ANB20(3) Subcommittee on Surrogate Measures of Safety, avril 2009.
- [85] Dean TAYLOR et Hani MAHMASSANI : Analysis of stated preferences for intermodal bicycle-transit interfaces. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1556(-1):86–95, 1996.
- [86] K. E. TRAIN : *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press, 2009.
- [87] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD : *Highway Capacity Manual (HCM 2000)*. National Academy of Sciences, Washington, D.C., 2000.
- [88] T. USMAN, L. FU et L. MIRANDA-MORENO : Accident prediction models for winter road safety. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2237(-1): 144–151, 2011.
- [89] World Road Association (PIARC). *Road Safety Manual*, 2003.
- [90] A. YILMAZ, O. JAVED et M. SHAH : Object tracking : A survey. *ACM Computing Surveys*, 38(4):13, 2006.

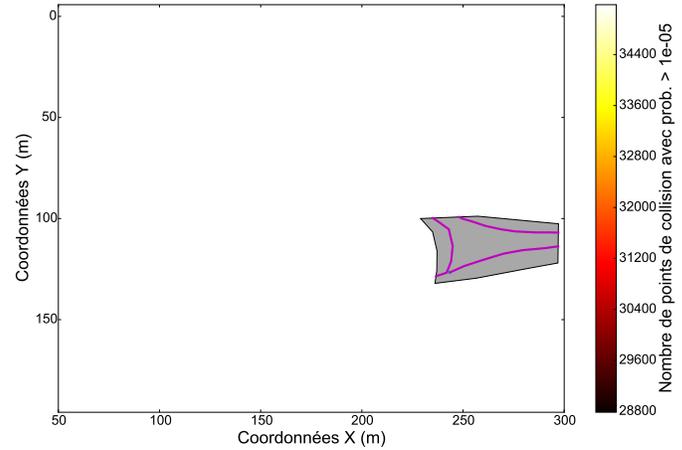
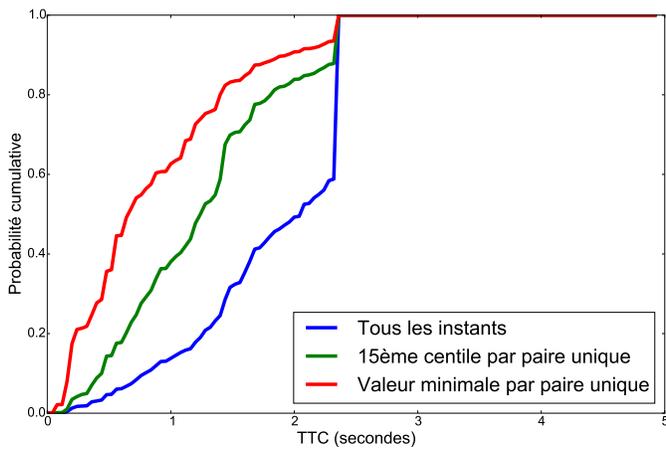
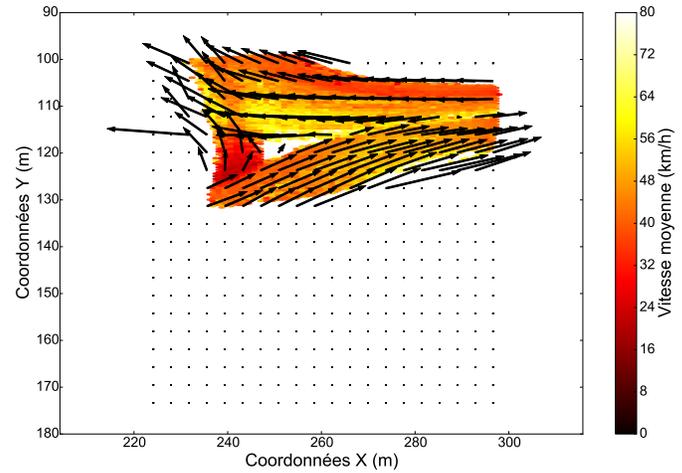
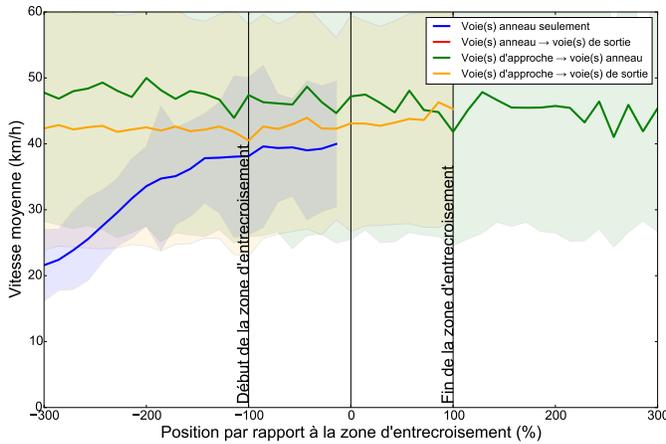
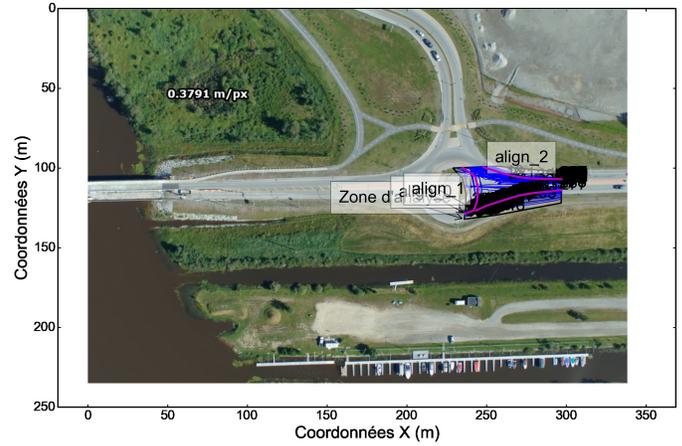
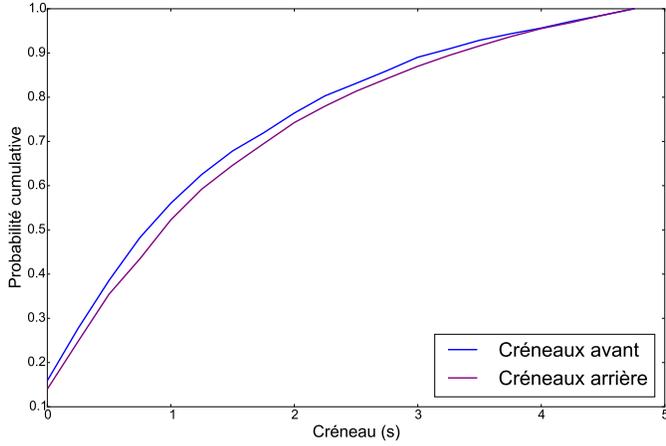
A Fiches individuelles des 36 quadrants analysés par vidéo

Les fiches sont toutes présentées de la même façon. Un petit tableau présente tout d'abord une synthèse descriptive du quadrant analysé, la date et la période de collecte des données vidéo, la municipalité, le DJMA estimé, le rapport des débits d'entrée τ_Q , le nombre d'interactions et d'instant-interactions. La partie principale de la fiche inclut les graphiques suivants :

- première ligne : distributions cumulatives des créneaux résultants pour chaque véhicule venant de l'approche qui s'insère sur l'anneau, avec le véhicule meneur (de tête) et suiveur (arrière) ; trajectoires des véhicules surimposées sur une image aérienne (en bleu foncé), avec les alignements (en violet) et la zone d'analyse (en noir) ;
- deuxième ligne : vitesses moyennes, avec l'enveloppe à plus ou moins un écart-type, des usagers le long de chaque alignement (-100 % et +100 % marquent respectivement le début et la fin de la zone d'entrecroisement), selon l'origine et la destination (approche ou anneau) (voir les quatre types de mouvements résultant sur la Figure 40) ; distribution spatiale des vitesses moyennes et des vecteurs-vitesses moyens par unité hexagonale dans la zone d'analyse ;
- troisième ligne : distributions cumulatives des TTC obtenus par prédiction selon les patrons de mouvement, sans agrégation ("Tous les instants") ou avec agrégation (valeur minimale ou 15ème centile par interaction) ; distribution spatiale du nombre de points de collision potentiels (avec probabilité de collision supérieure à 10^{-5}) par unité hexagonale dans la zone d'analyse.

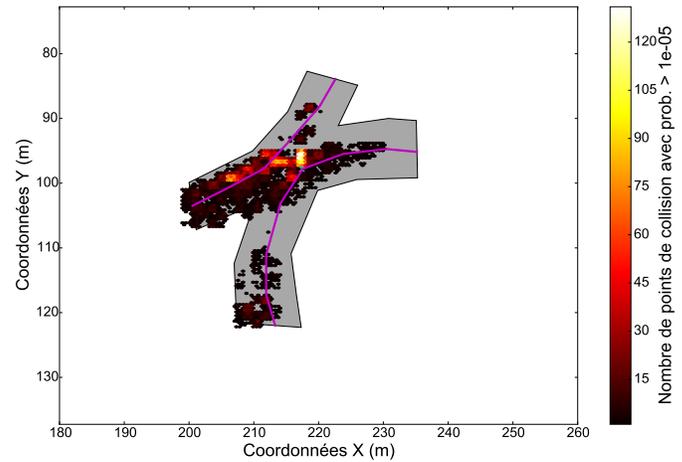
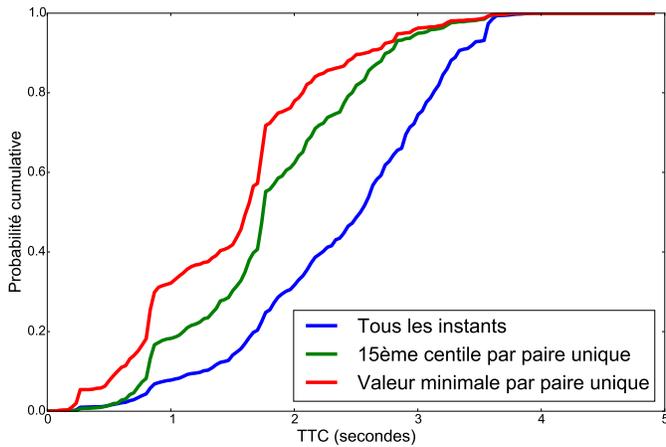
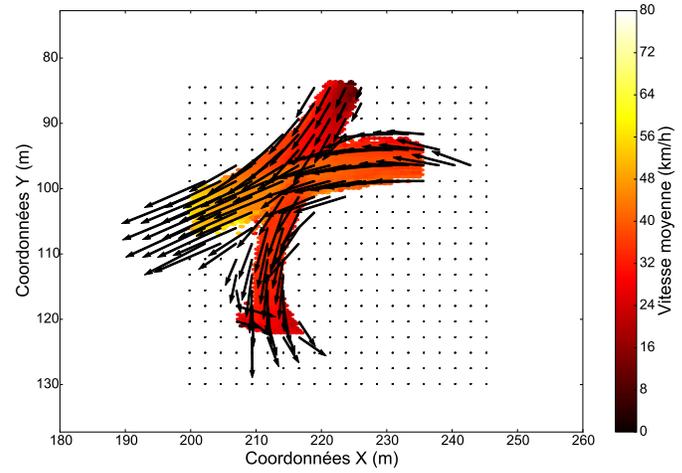
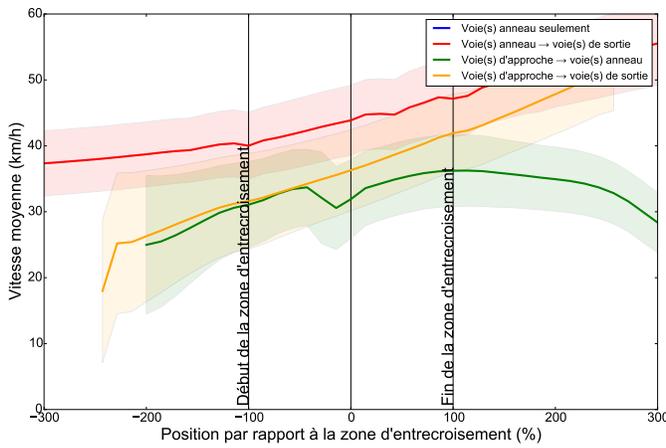
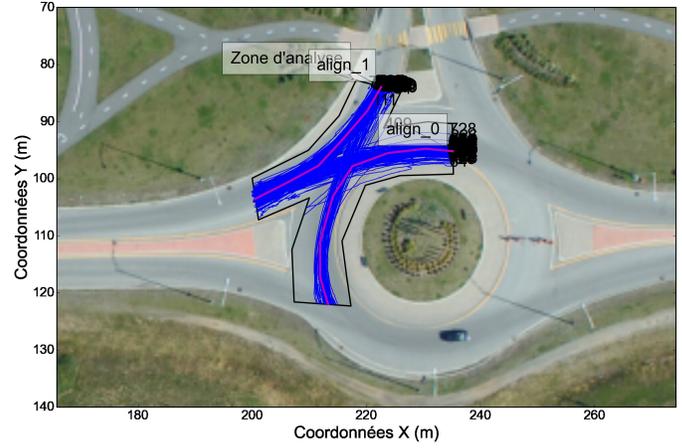
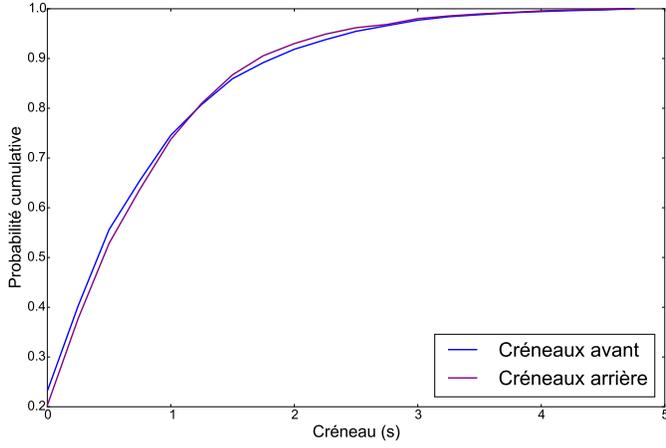
Fiche du carrefour R111/Rue Principale, quadrant #2

DJMA* :	17263 véh/j	Date :	2013-8-28
Rapport des débits :	**Error : please run analysis first	Heure :	06 :00 :00-12 :00 :00
Interactions (paires) :	11328 int/j	Municipalité :	Amos
Interactions (instants) :	618096 int/j		



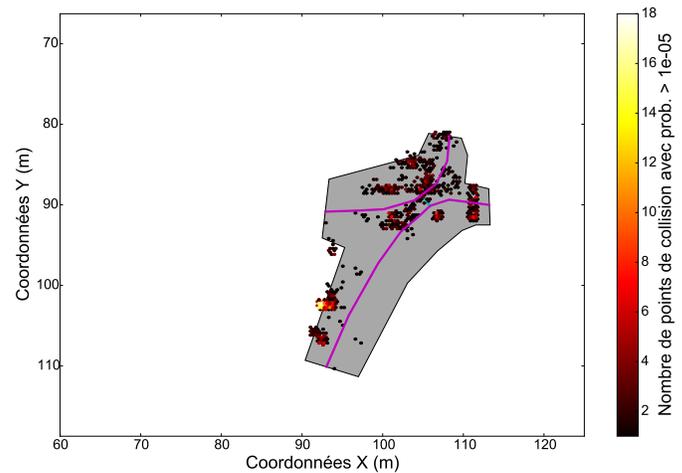
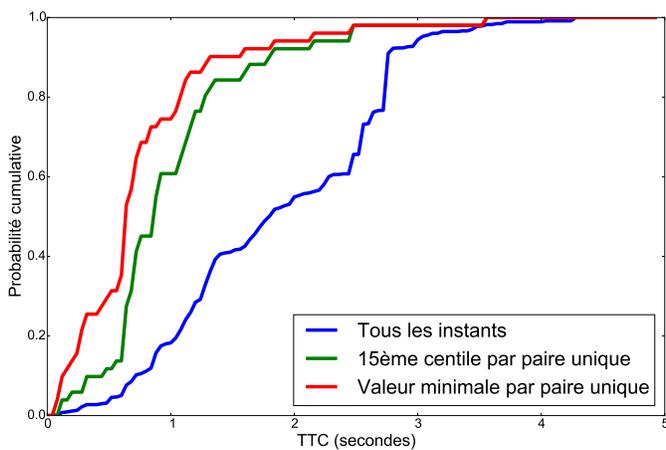
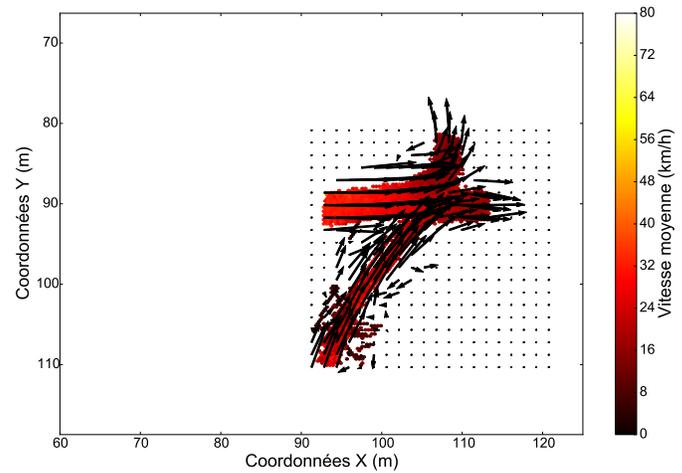
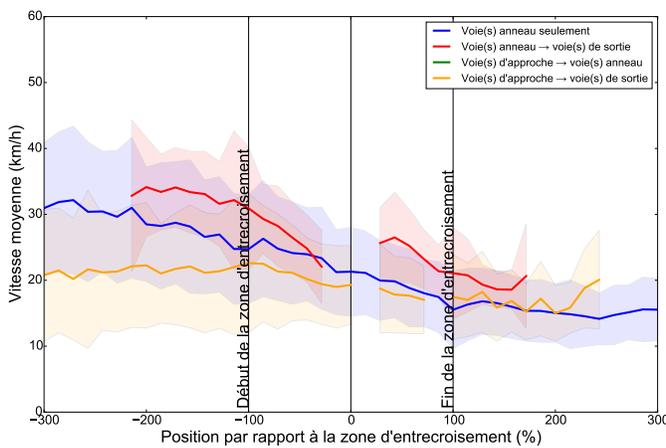
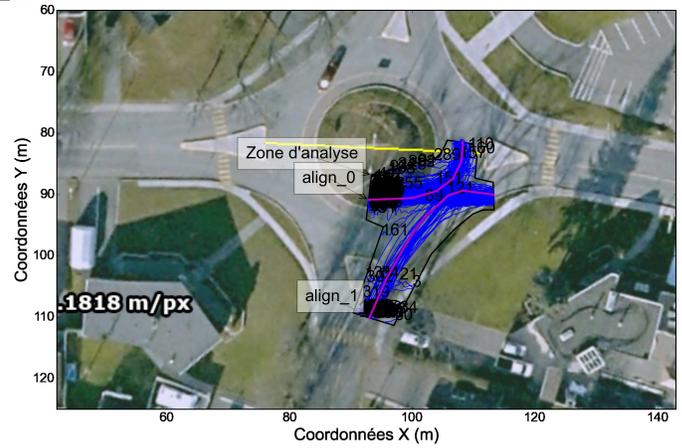
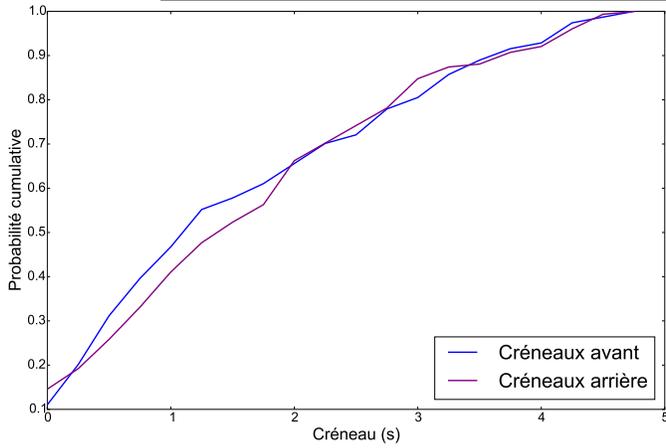
Fiche du carrefour R111/Rue Principale, quadrant #1

DJMA* :	15626 véh/j	Date :	2013-8-28
Rapport des débits :	0.2	Heure :	06 :00 :00-16 :14 :48
Interactions (paires) :	15698 int/j	Municipalité :	Amos
Interactions (instants) :	630072 int/j		



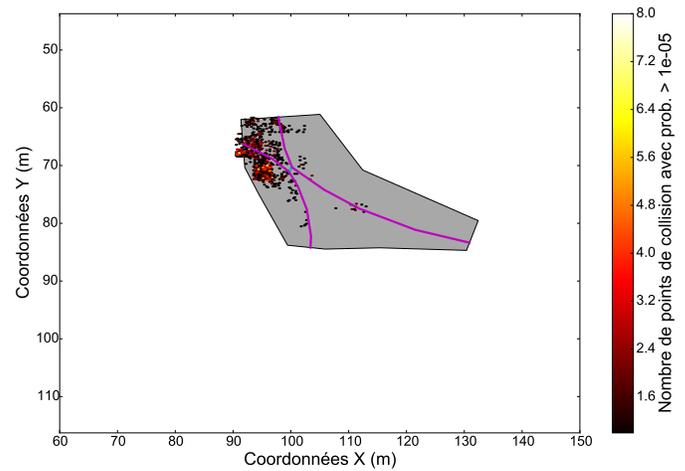
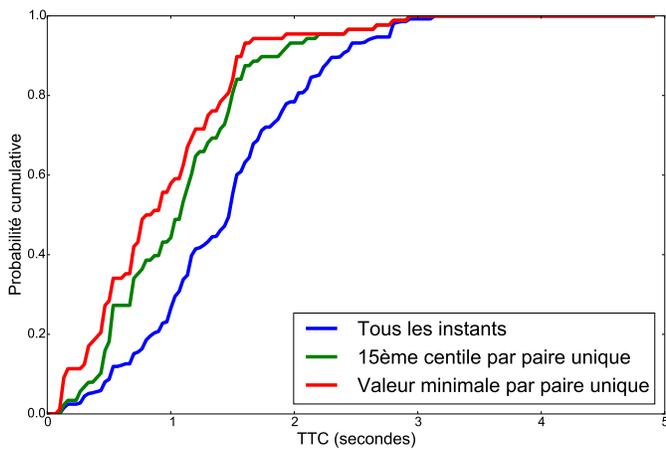
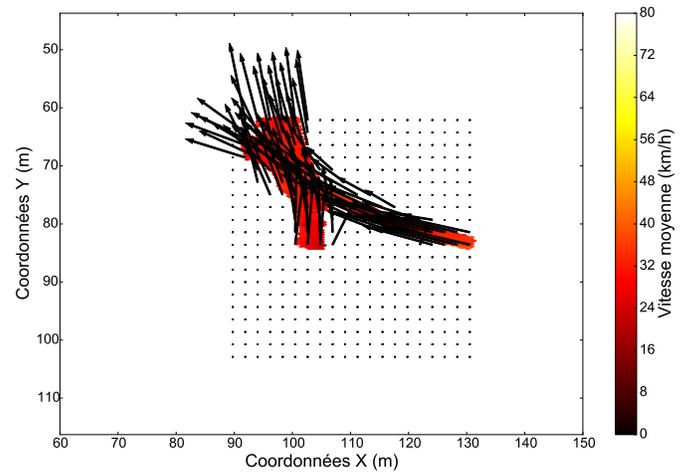
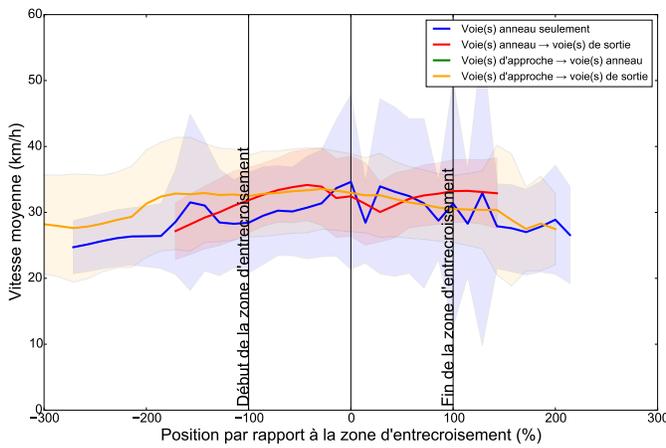
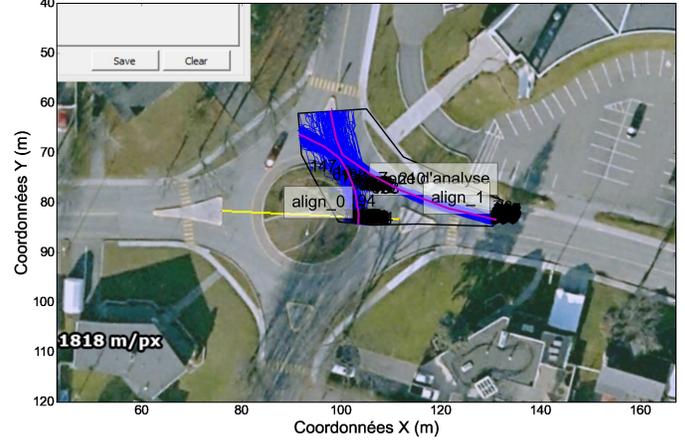
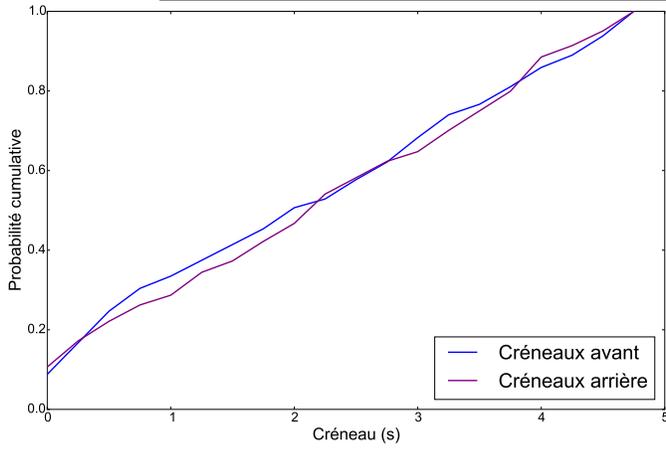
Fiche du carrefour Rue Saint Émilie/Rue Saint Denis, quadrant #3

DJMA* :	1764 véh/j	Date :	2013-8-13
Rapport des débits :	-0.67	Heure :	07 :00 :00-20 :00 :00
Interactions (paires) :	240 int/j	Municipalité :	Saguenay
Interactions (instants) :	8514 int/j		



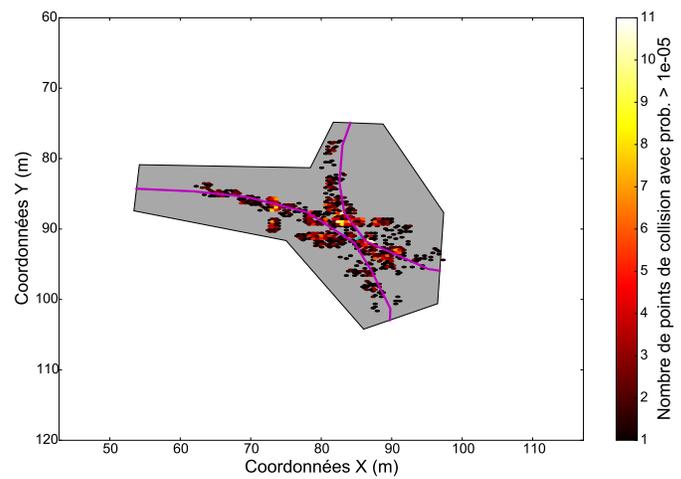
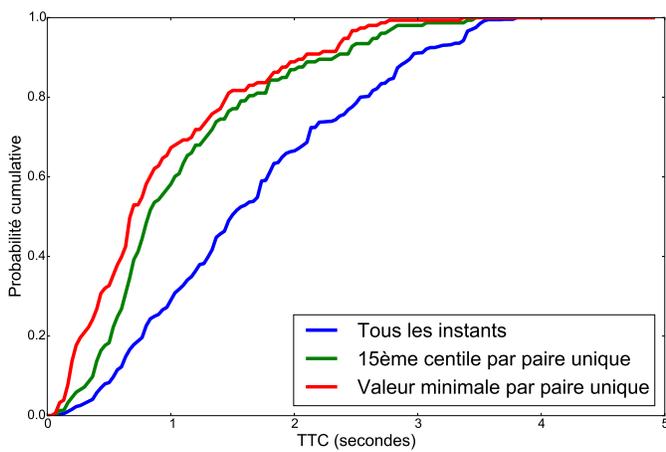
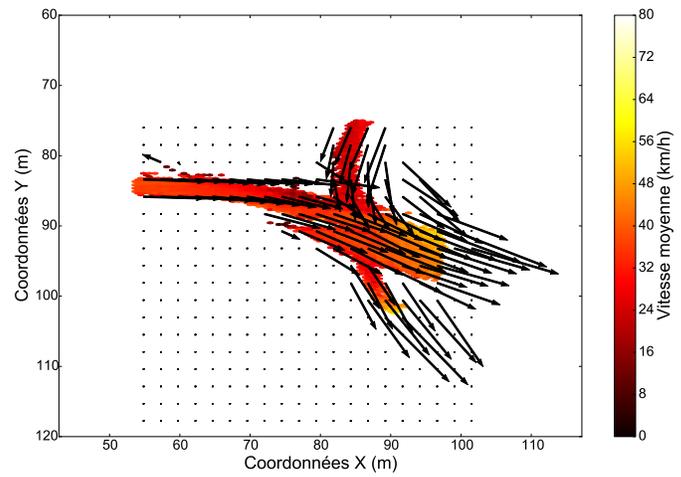
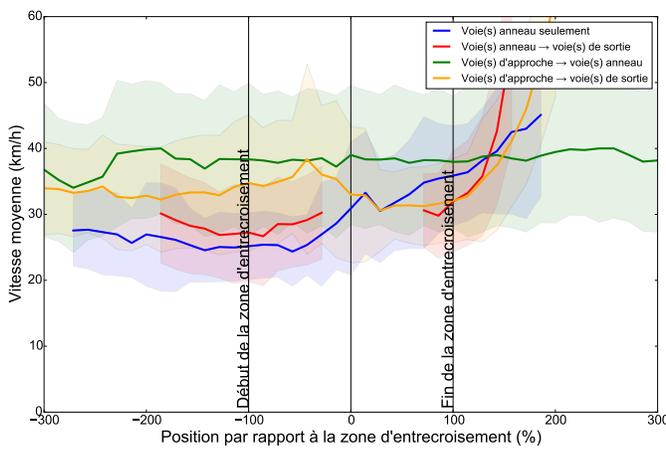
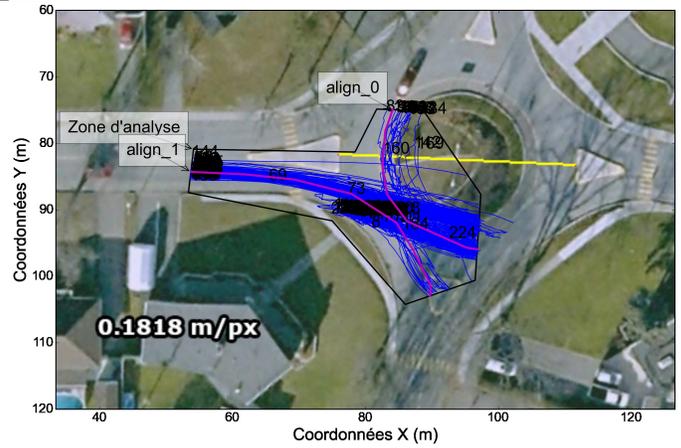
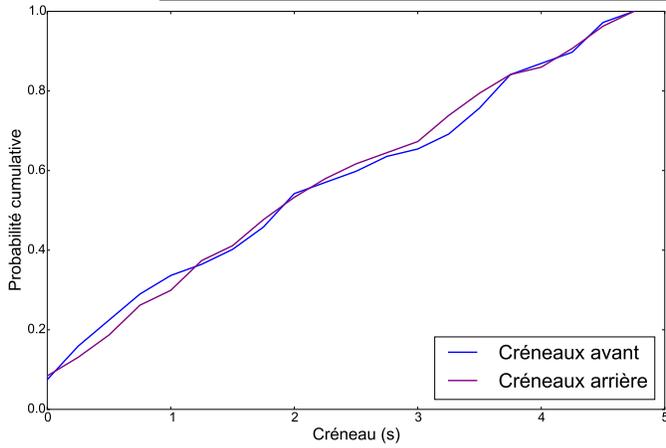
Fiche du carrefour Rue Saint Émilie/Rue Saint Denis, quadrant #1

DJMA* :	1728 véh/j	Date :	2013-8-13
Rapport des débits :	0.07	Heure :	07 :00 :00-17 :28 :53
Interactions (paires) :	616 int/j	Municipalité :	Saguenay
Interactions (instants) :	21826 int/j		



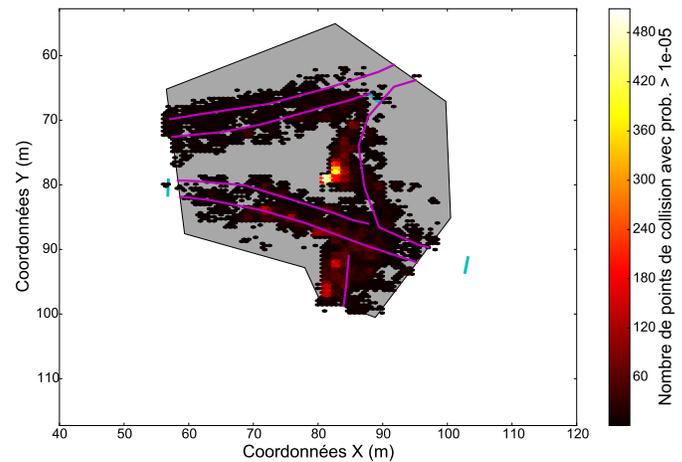
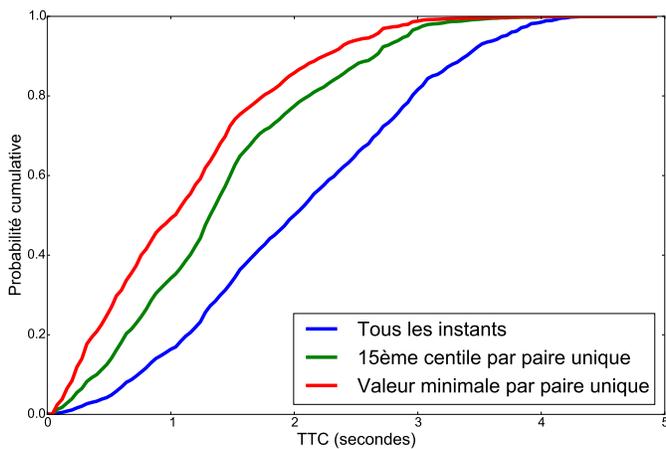
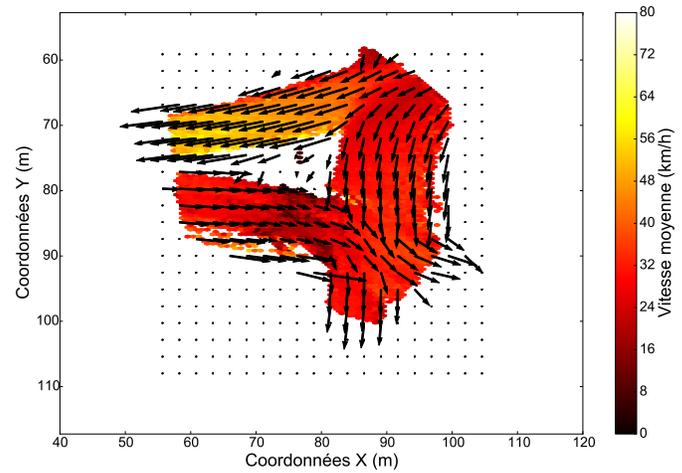
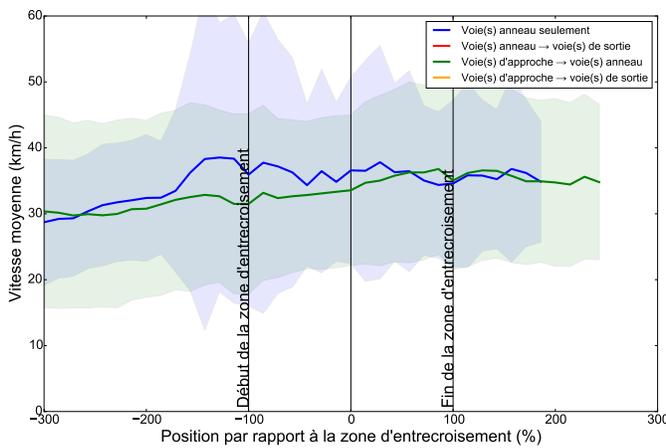
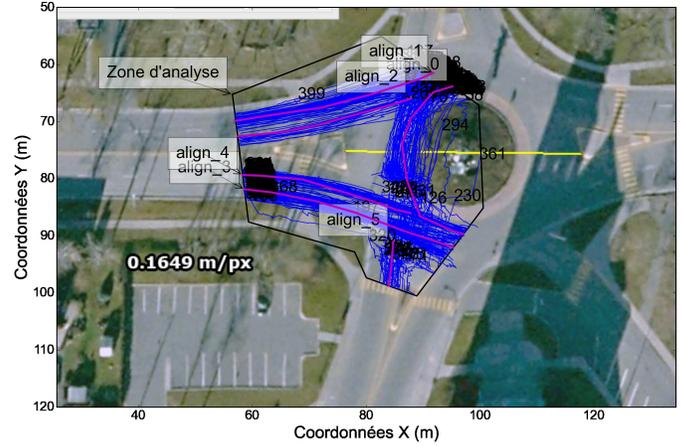
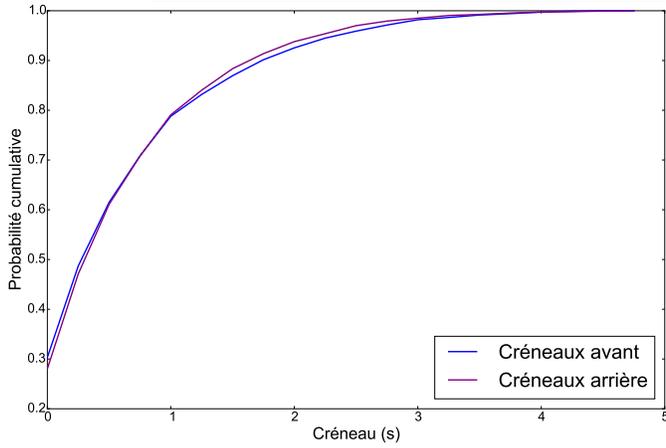
Fiche du carrefour Rue Saint Émilie/Rue Saint Denis, quadrant #2

DJMA* :	2336 véh/j	Date :	2013-8-13
Rapport des débits :	0.76	Heure :	07 :00 :00-17 :32 :17
Interactions (paires) :	1312 int/j	Municipalité :	Saguenay
Interactions (instants) :	37597 int/j		



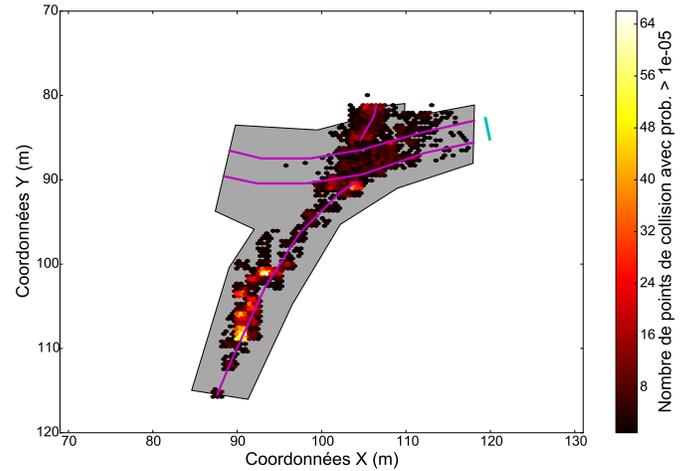
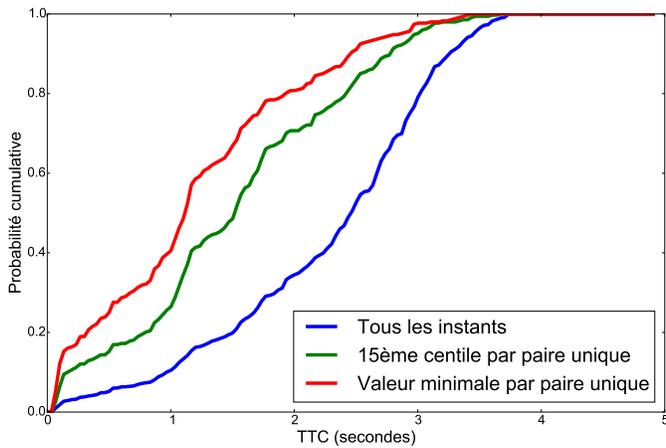
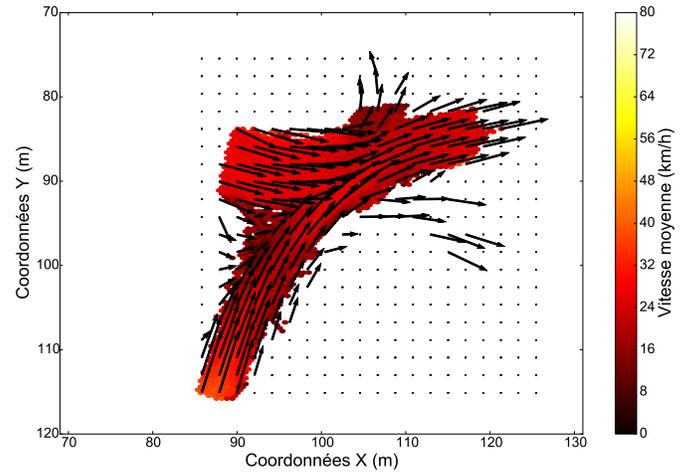
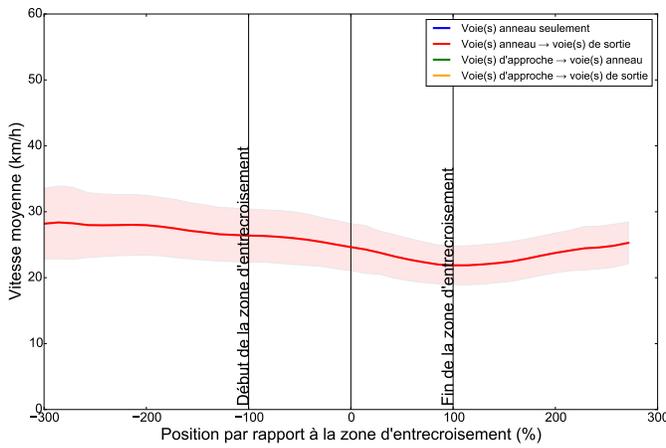
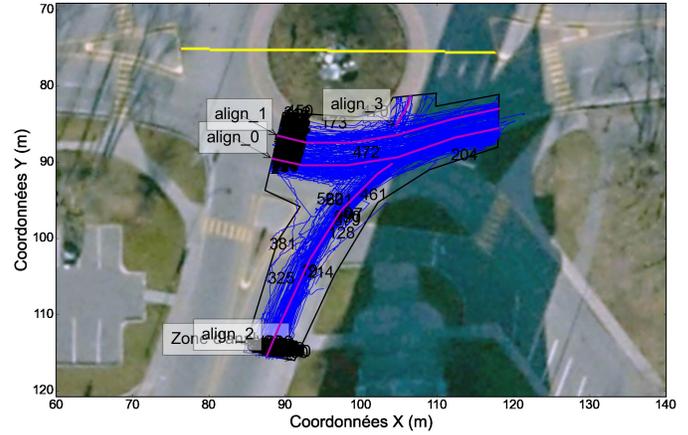
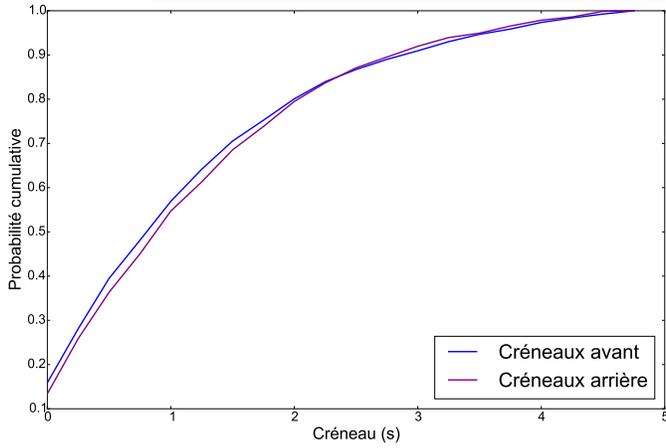
Fiche du carrefour R372/Rue Moissan, quadrant #3

DJMA* : 12863 véh/j Date : 2013-8-14
 Rapport des débits : -0.13 Heure : 06 :02 :00-19 :53 :00
 Interactions (paires) : 19603 int/j Municipalité : Saguenay
 Interactions (instants) : 869308 int/j



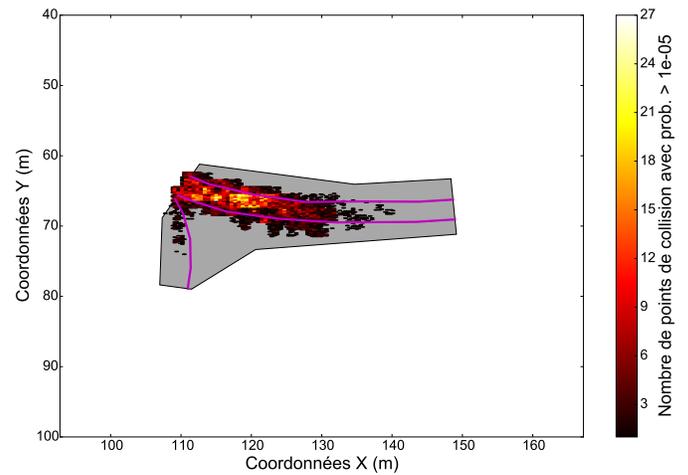
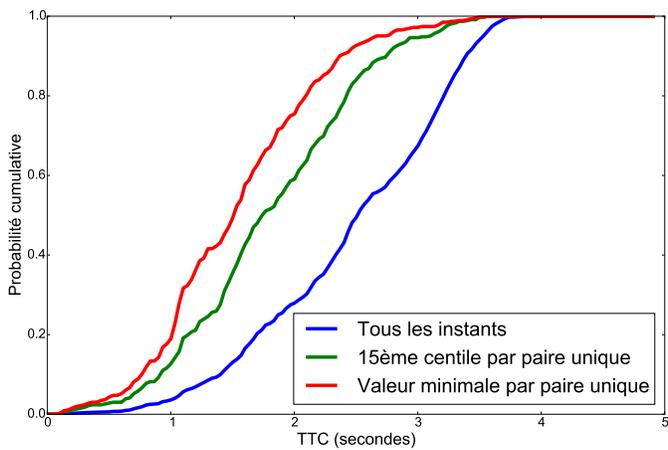
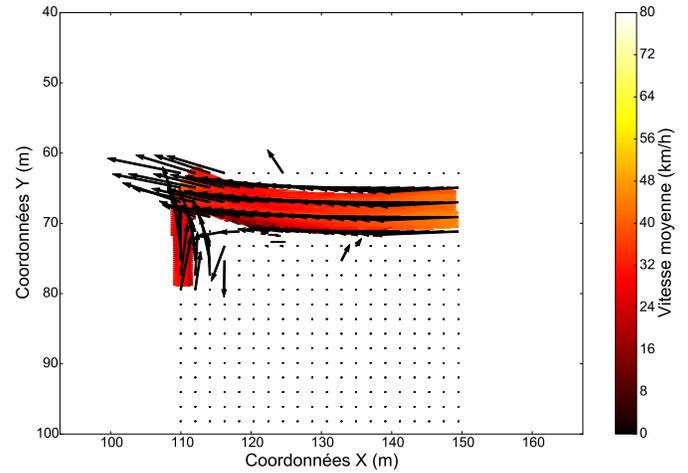
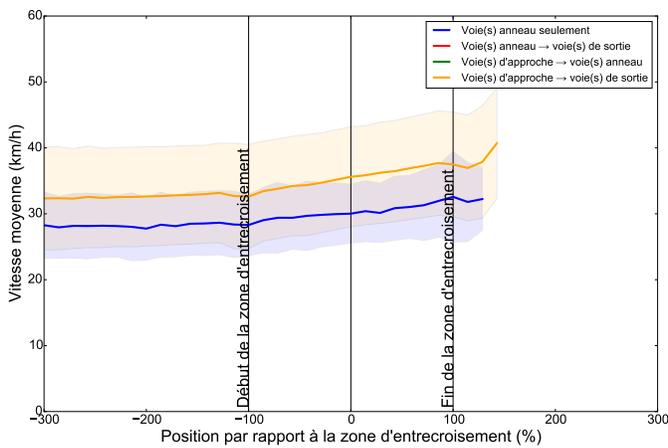
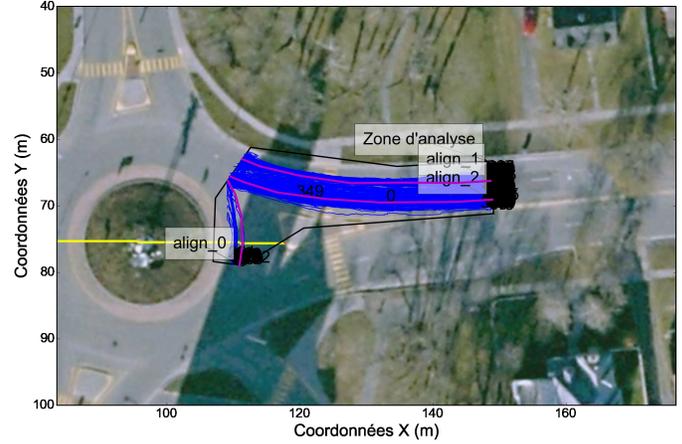
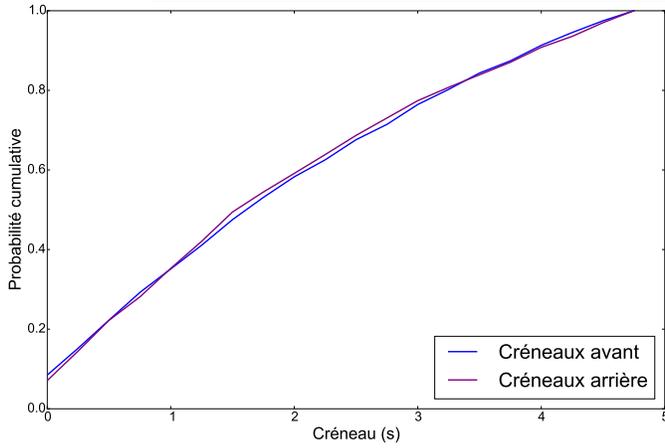
Fiche du carrefour R372/Rue Moissan, quadrant #1

DJMA* : 7805 véh/j Date : 2013-8-14
 Rapport des débits : 0.0 Heure : 07 :04 :21-17 :05 :05
 Interactions (paires) : 6252 int/j Municipalité : Saguenay
 Interactions (instants) : 399600 int/j

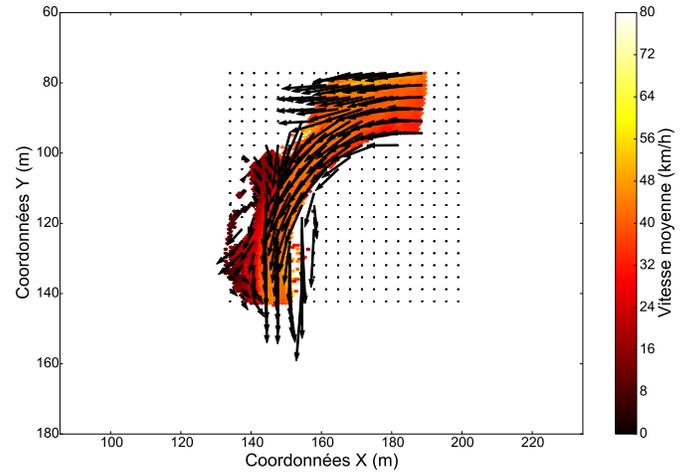
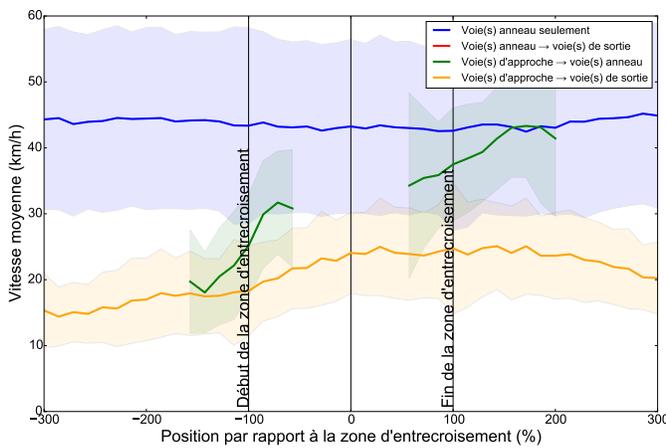
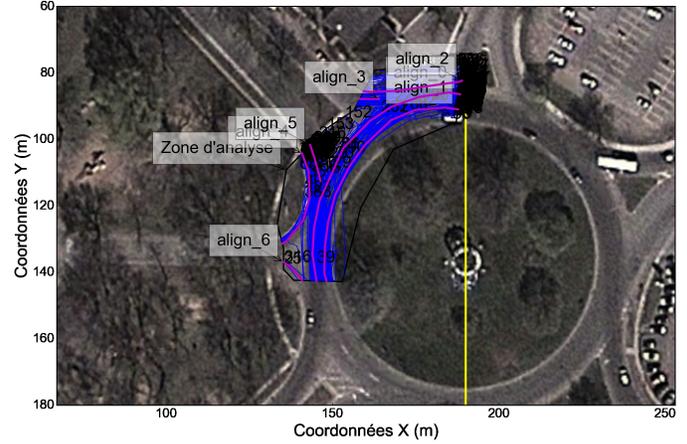
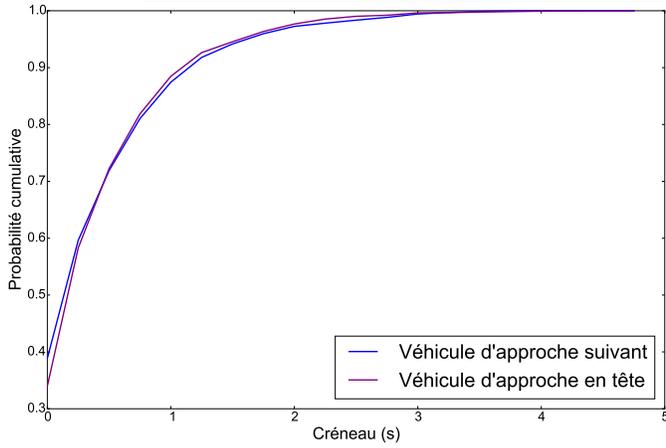


Fiche du carrefour R372/Rue Moissan, quadrant #2

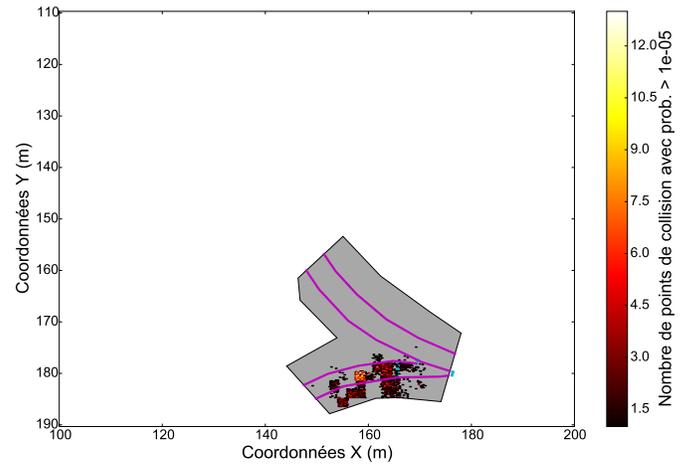
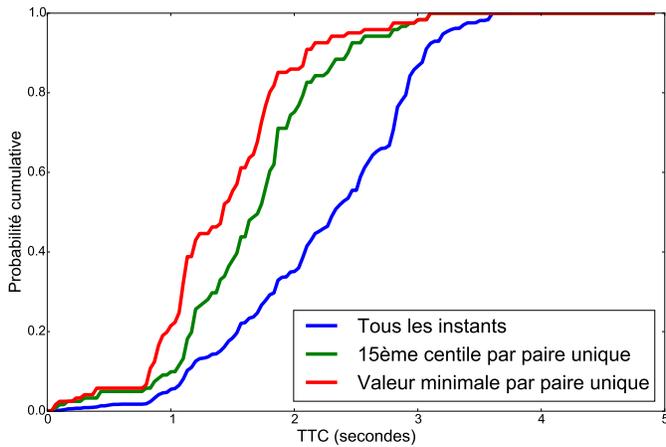
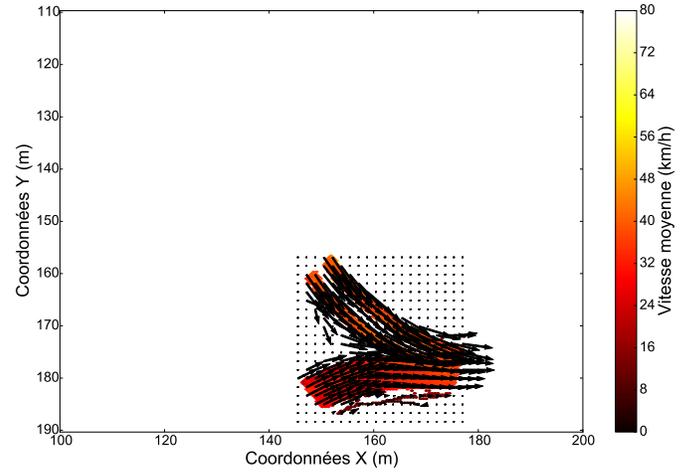
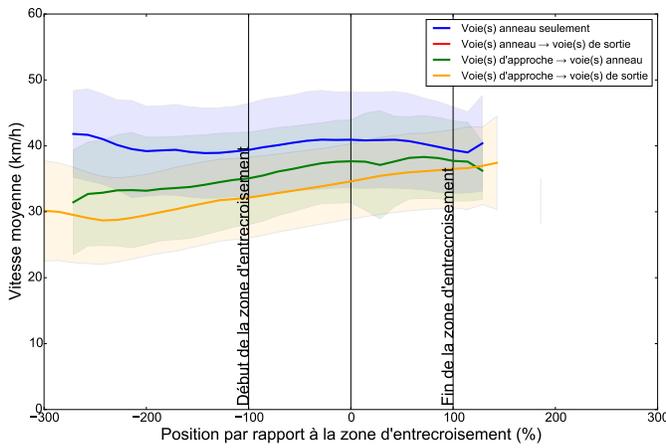
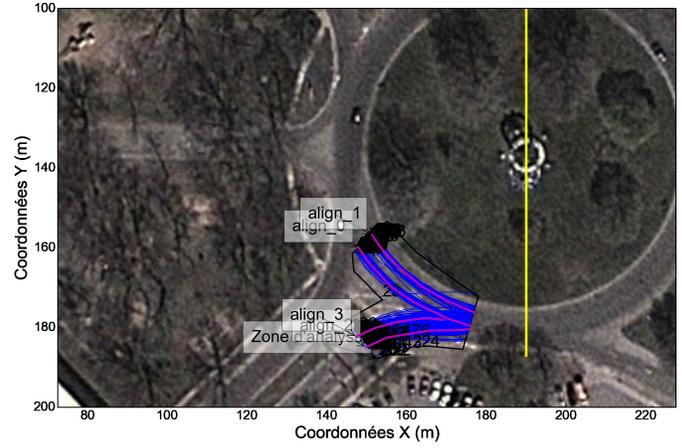
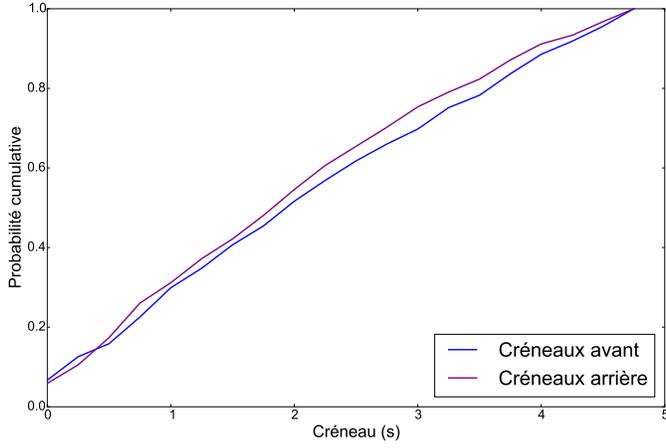
DJMA* : 6756 véh/j Date : 2013-8-14
 Rapport des débits : 0.71 Heure : 06 :34 :44-17 :07 :40
 Interactions (paires) : 4324 int/j Municipalité : Saguenay
 Interactions (instants) : 206215 int/j



Fiche du carrefour R138/Rue Royale, quadrant #2			
DJMA* :	12133 véh/j	Date :	2013-7-17
Rapport des débits :	-0.41	Heure :	05 :10 :07-18 :48 :44
Interactions (pairs) :	22526 int/j	Municipalité :	Trois-Rivières
Interactions (instants) :	1204411 int/j		

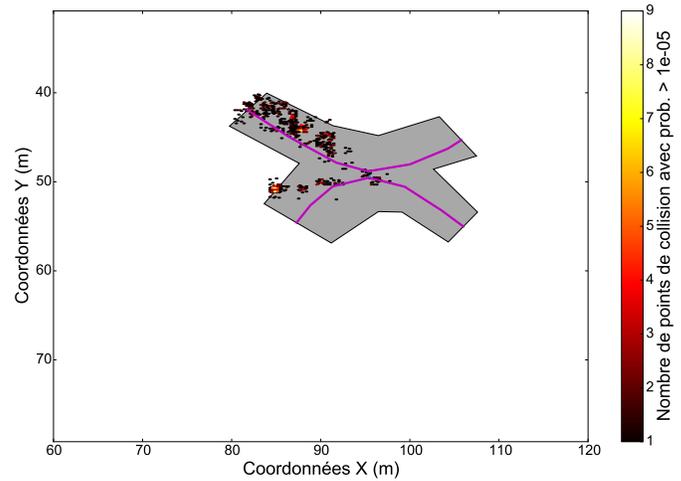
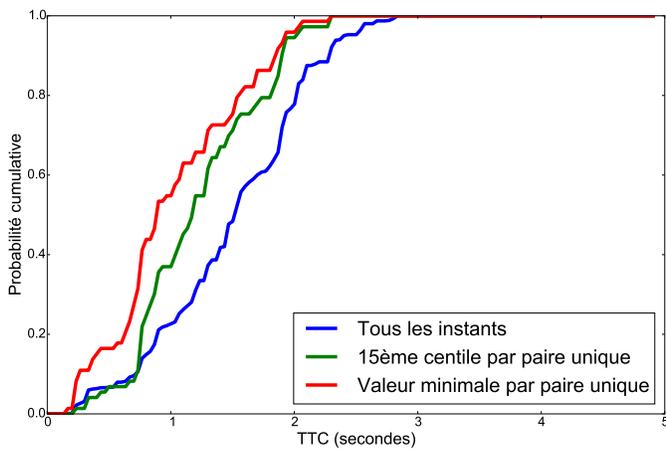
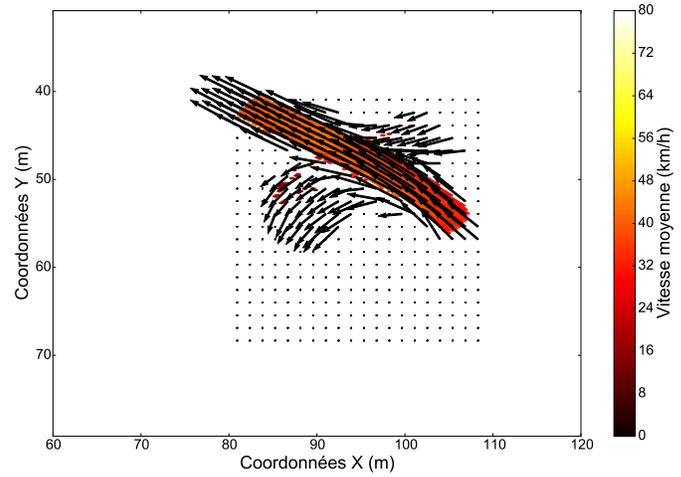
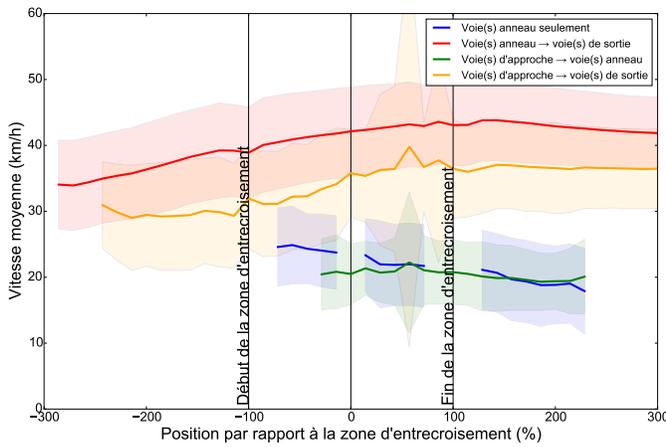
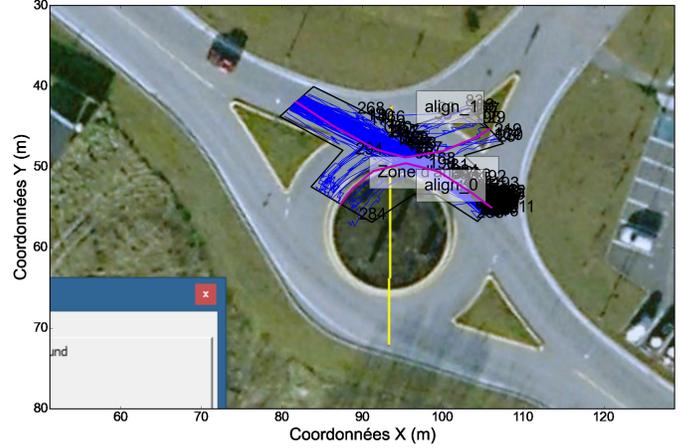
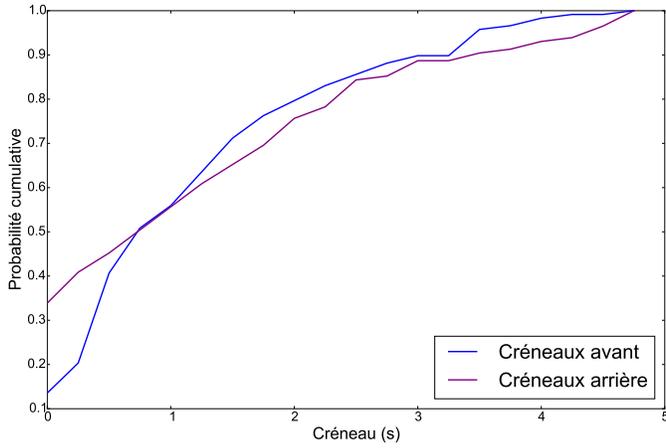


Fiche du carrefour R138/Rue Royale, quadrant #1			
DJMA* :	5867 véh/j	Date :	2013-7-17
Rapport des débits :	0.58	Heure :	05 :45 :43-11 :20 :41
Interactions (paires) :	3248 int/j	Municipalité :	Trois-Rivières
Interactions (instants) :	122143 int/j		



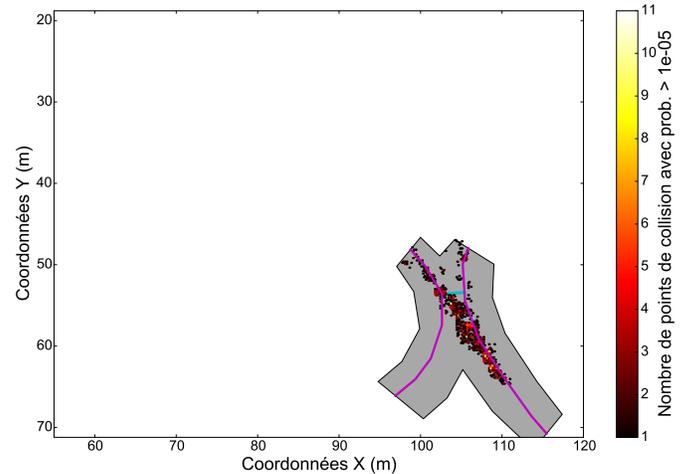
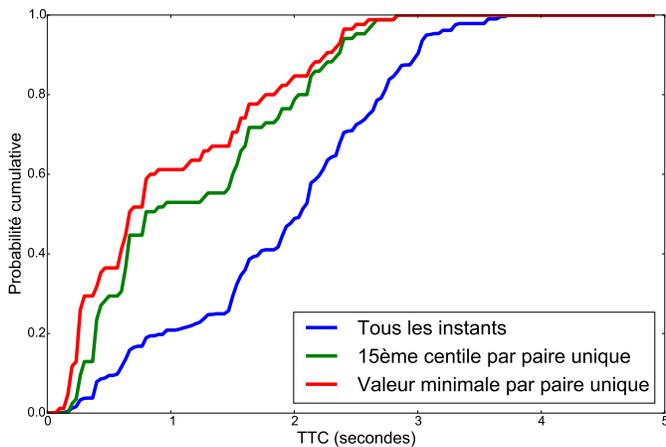
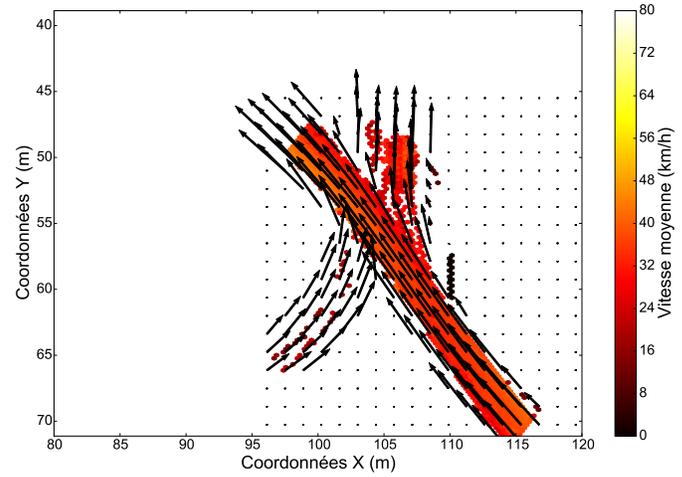
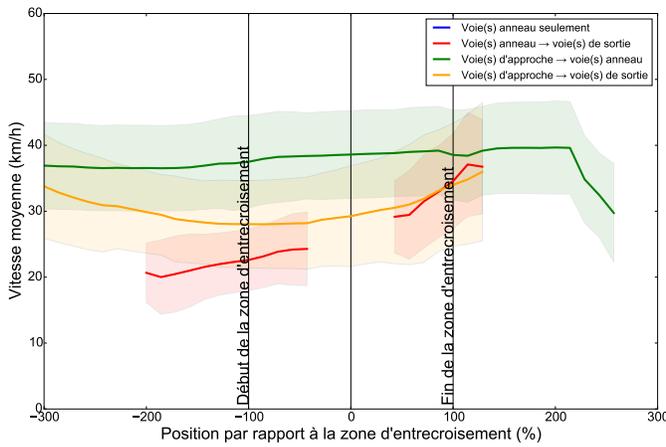
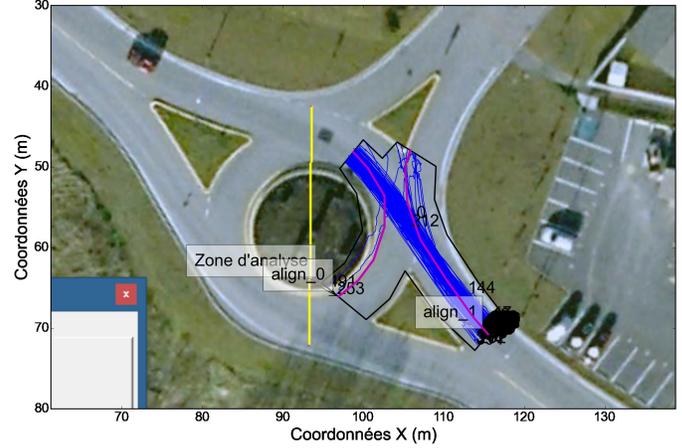
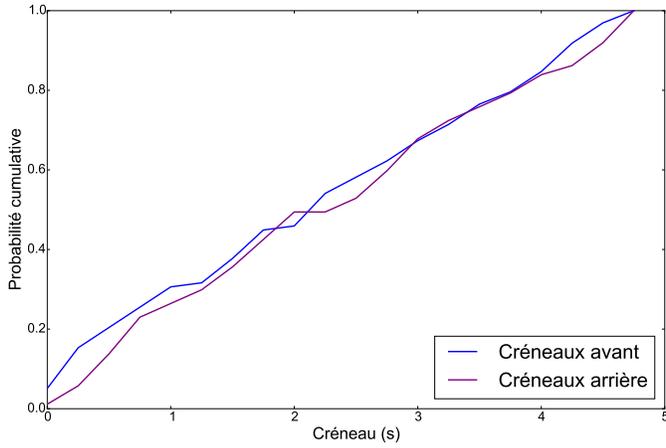
Fiche du carrefour Rue des Mouettes/Rue des Alouettes, quadrant #2

DJMA* :	3257 véh/j	Date :	2013-8-15
Rapport des débits :	-0.83	Heure :	06 :00 :00-15 :21 :39
Interactions (paires) :	951 int/j	Municipalité :	Saguenay
Interactions (instants) :	23229 int/j		



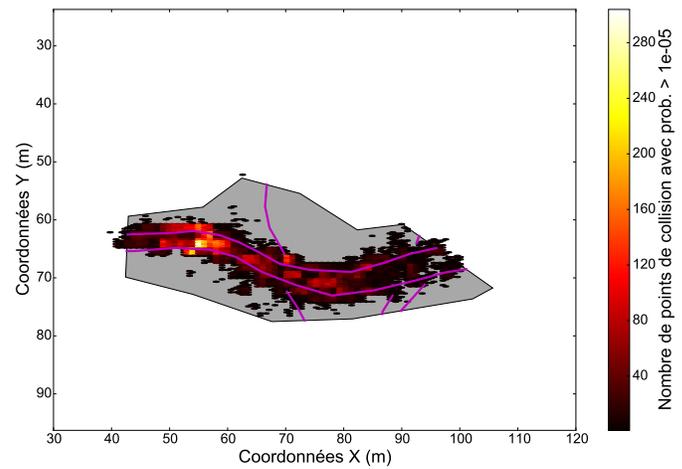
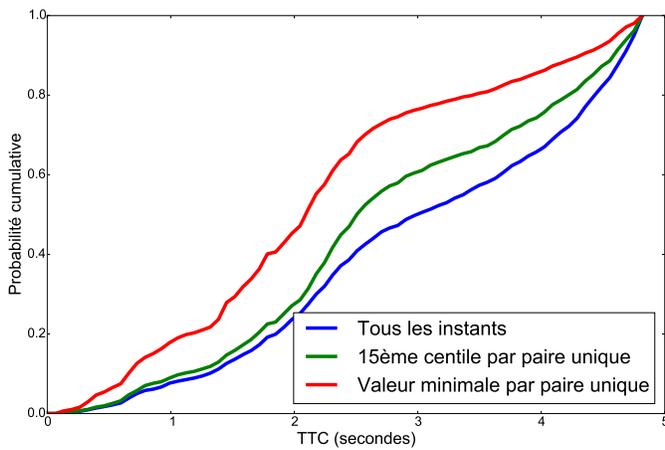
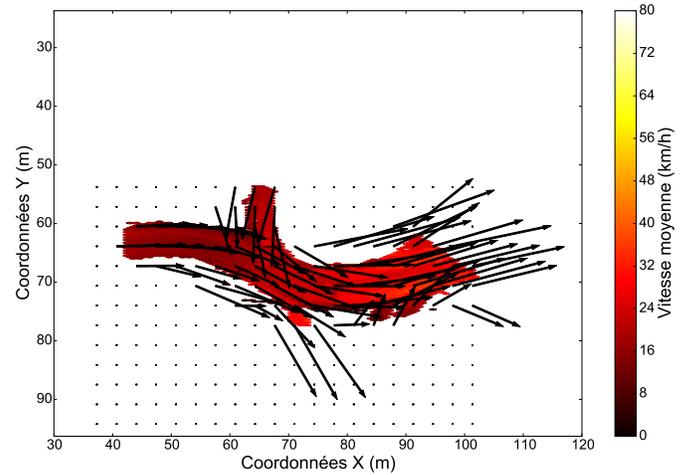
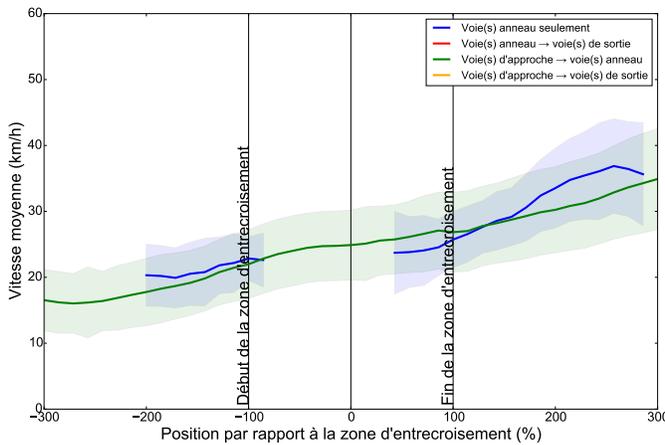
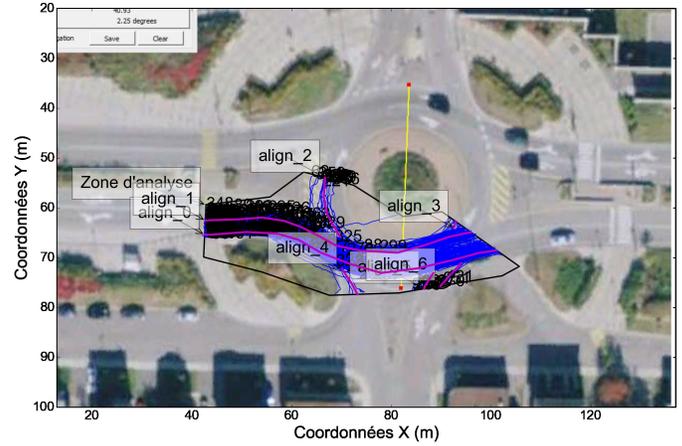
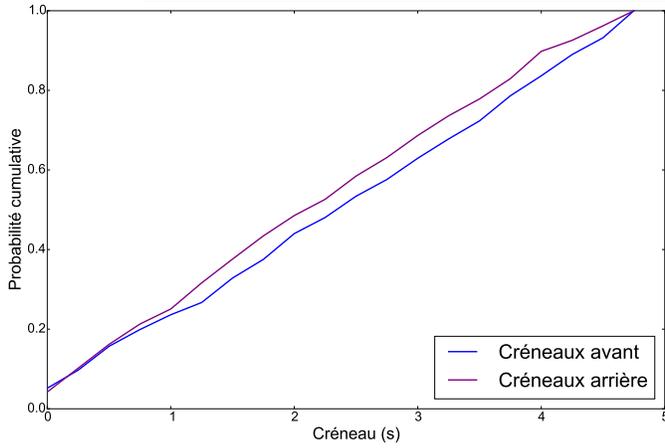
Fiche du carrefour Rue des Mouettes/Rue des Alouettes, quadrant #3

DJMA* : 3000 véh/j Date : 2013-8-15
 Rapport des débits : 0.95 Heure : 06 :26 :42-15 :52 :17
 Interactions (paires) : 628 int/j Municipalité : Saguenay
 Interactions (instants) : 16759 int/j



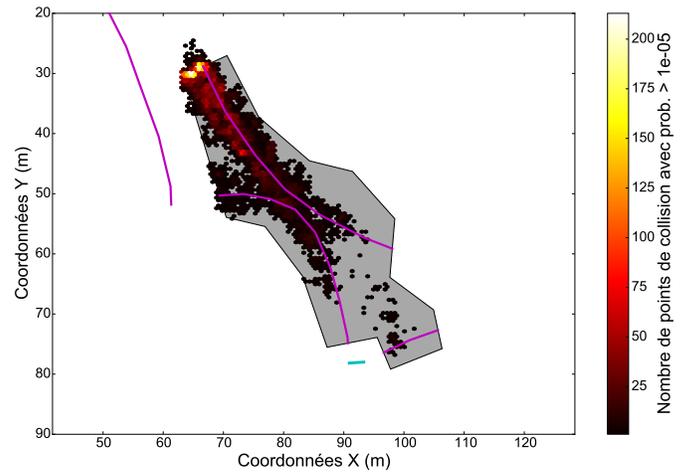
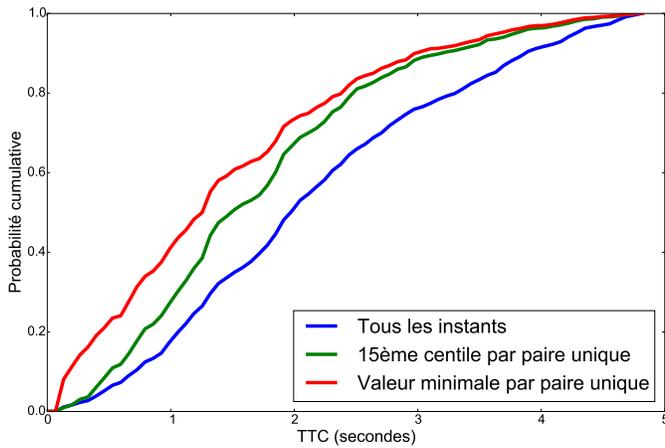
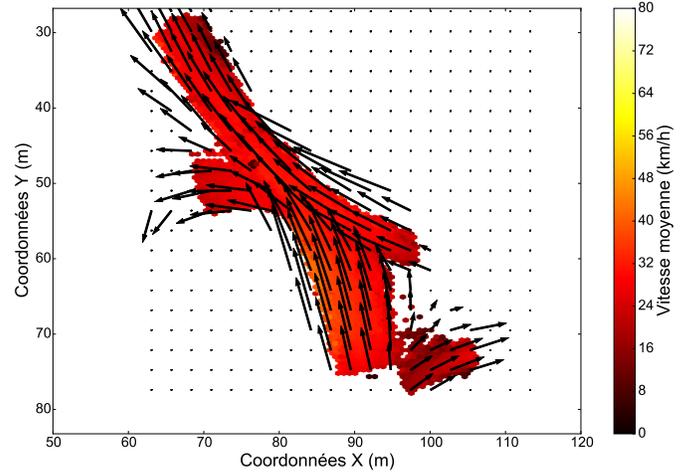
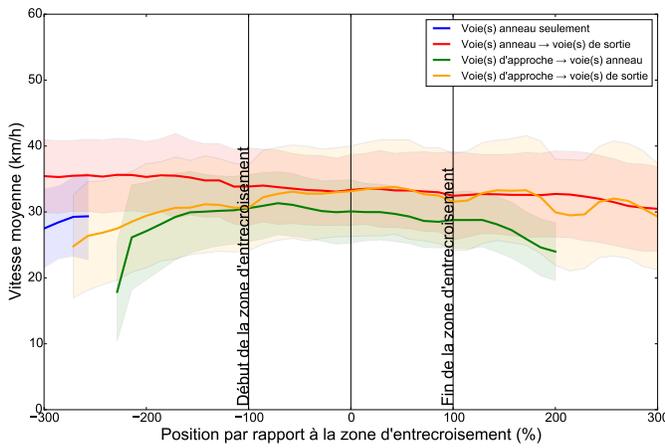
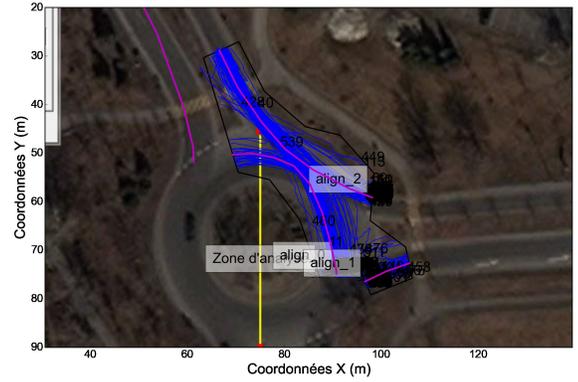
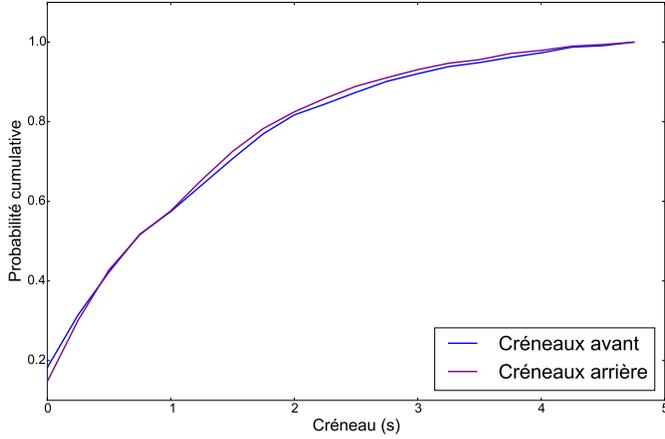
Fiche du carrefour R148/Rue Demontigny, quadrant #1

DJMA* :	21132 véh/j	Date :	2012-8-22
Rapport des débits :	0.92	Heure :	07 :00 :00-10 :00 :00
Interactions (paires) :	133176 int/j	Municipalité :	Gatineau
Interactions (instants) :	7264207 int/j		



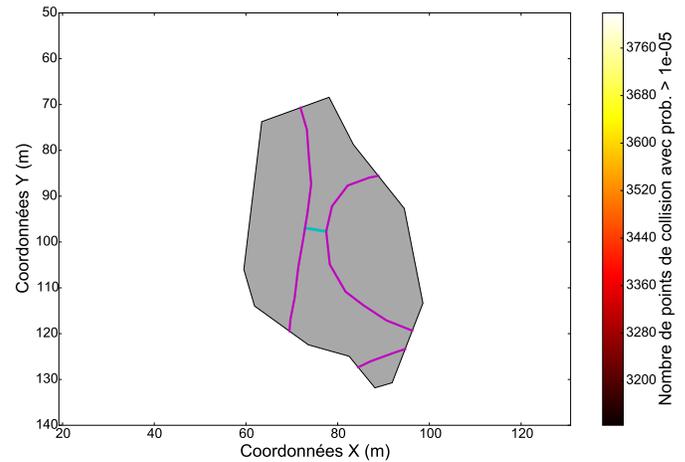
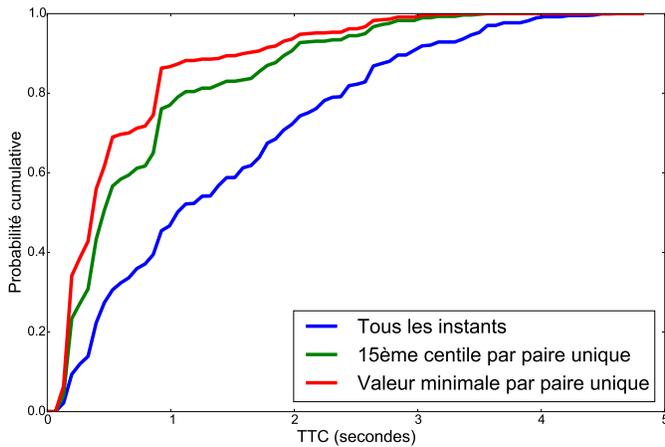
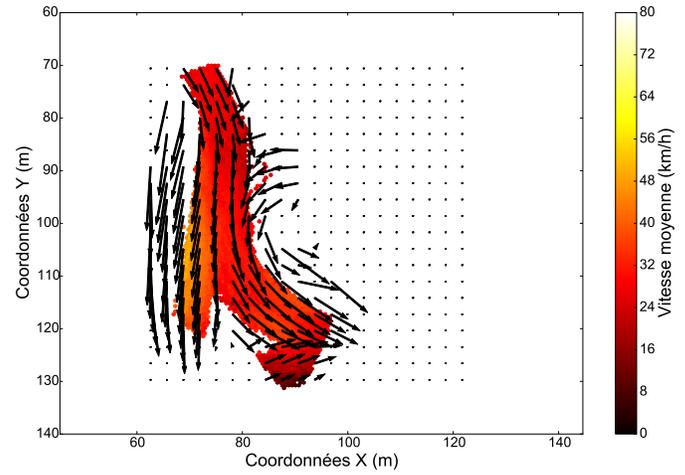
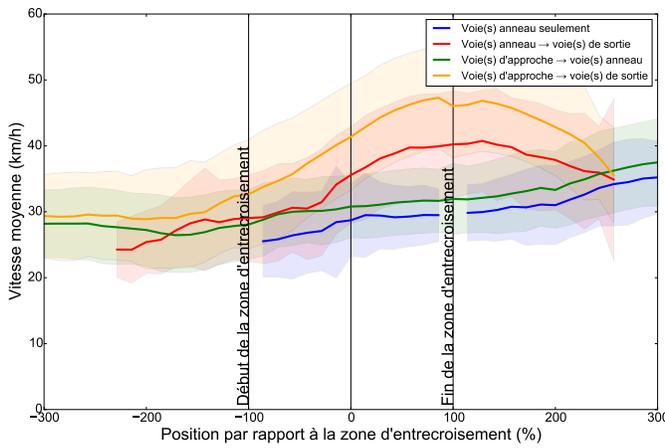
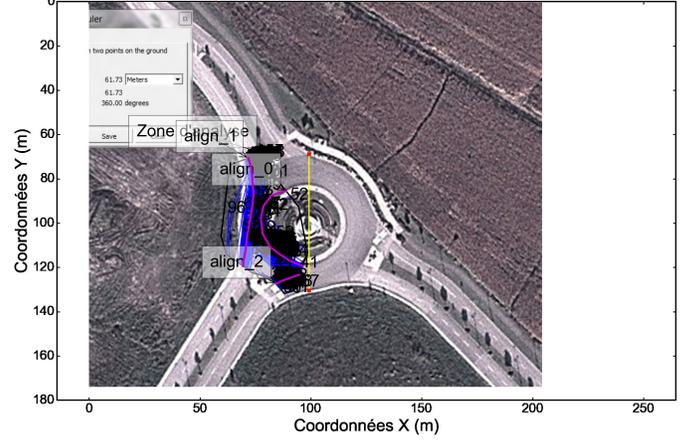
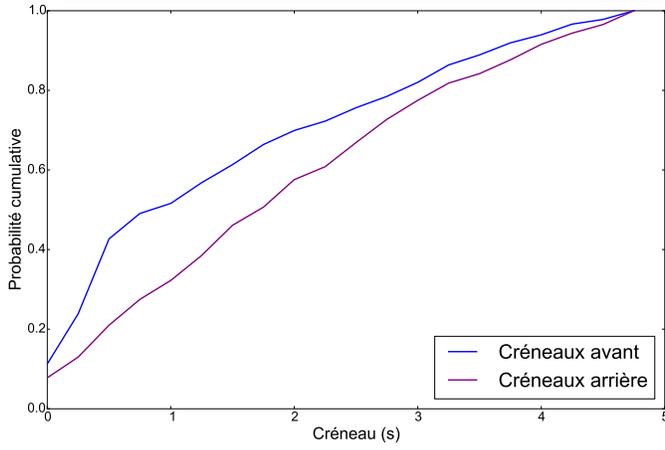
Fiche du carrefour Boulevard de l'Île des Soeurs/Boulevard René Lévesque, quadrant #2

DJMA* :	9674 véh/j	Date :	2012-7-11
Rapport des débits :	**Error : please run analysis first	Heure :	10 :20 :00-19 :44 :32
Interactions (paires) :	10292 int/j	Municipalité :	Montréal
Interactions (instants) :	388561 int/j		



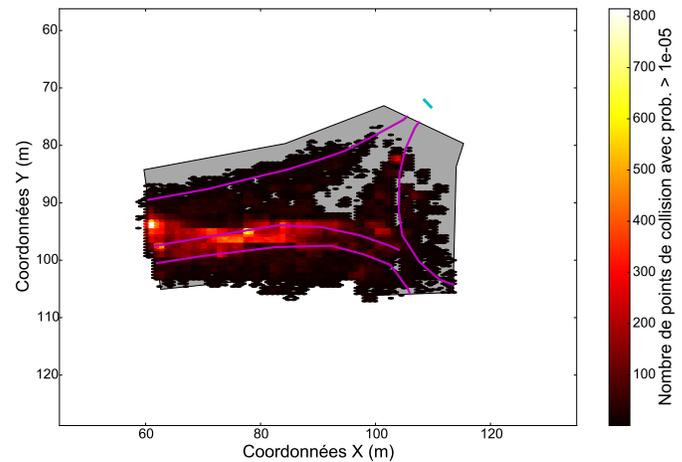
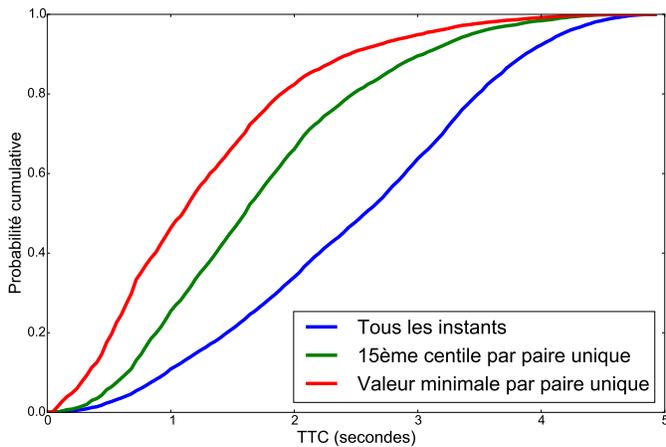
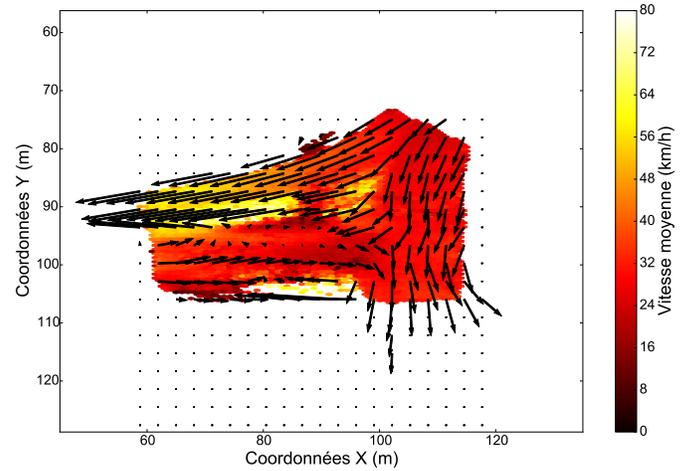
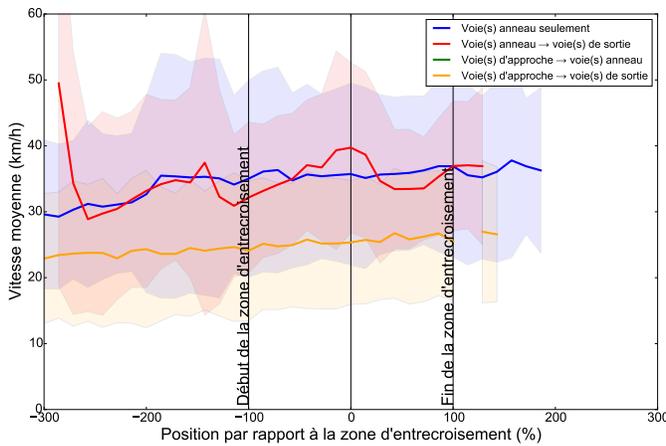
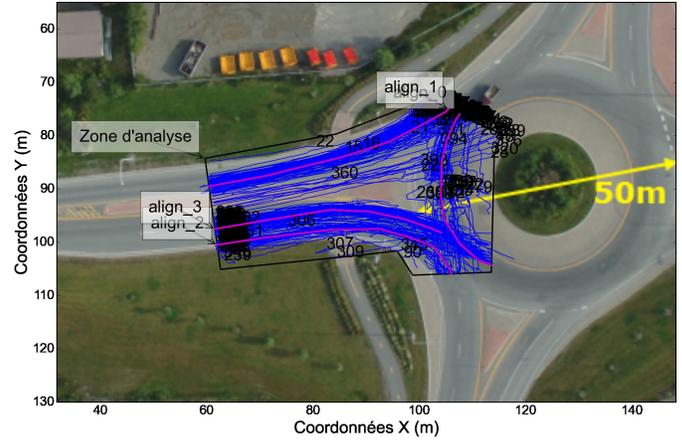
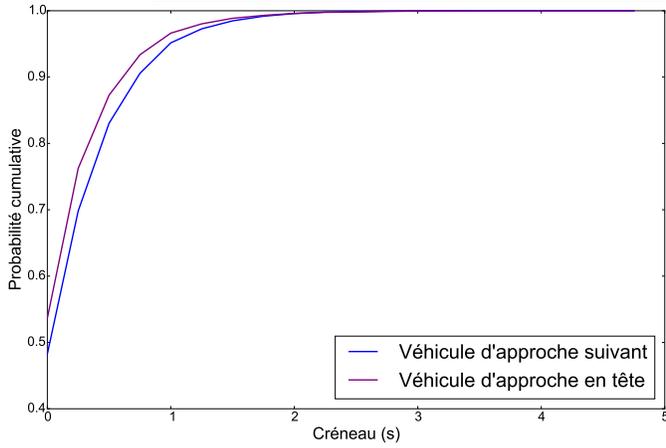
Fiche du carrefour Boulevard Iberville/Boulevard Louis Philippe Picard, quadrant #1

DJMA* : 3927 véh/j Date : 2012-7-5
 Rapport des débits : 0.52 Heure : 09 :14 :25-20 :00 :00
 Interactions (paires) : 3059 int/j Municipalité : Repentigny
 Interactions (instants) : 3137 int/j



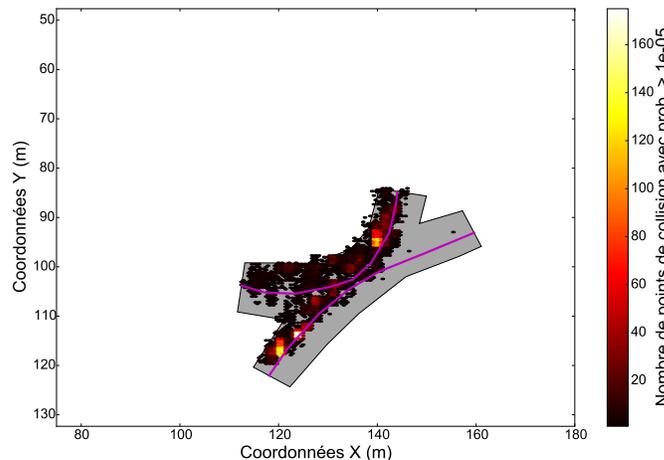
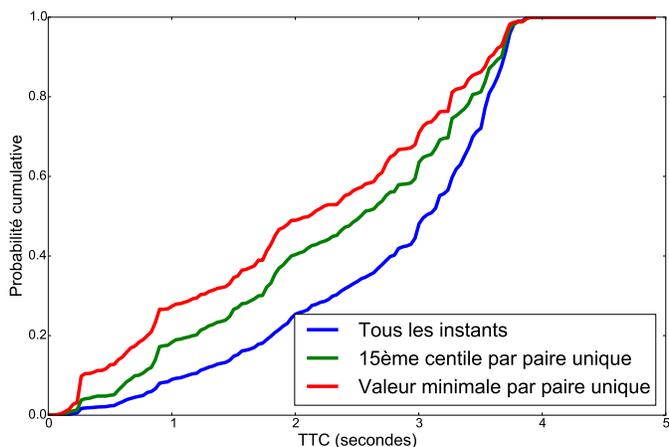
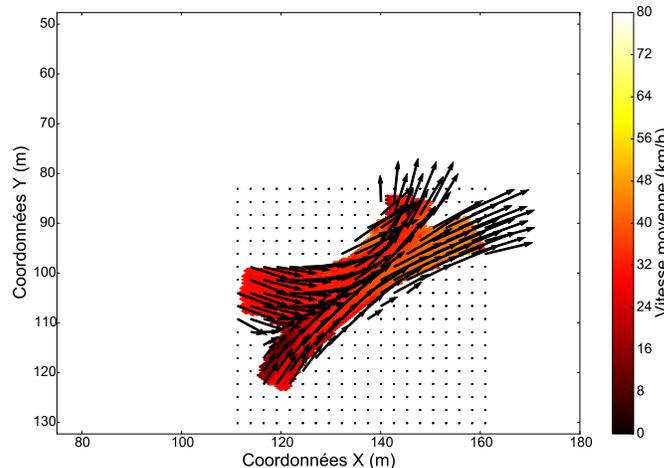
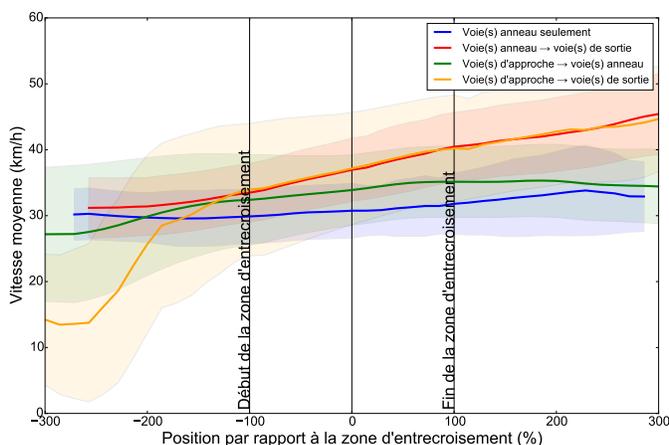
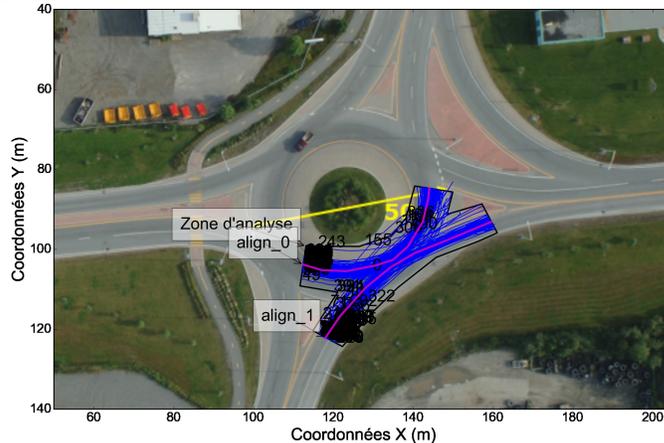
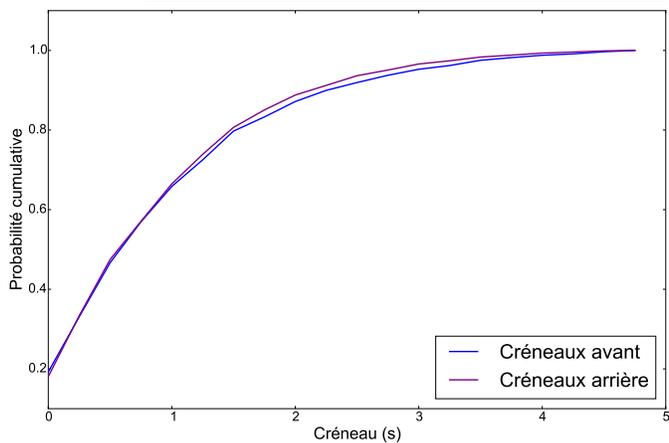
Fiche du carrefour R117/R397, quadrant #2

DJMA* :	17440 véh/j	Date :	2013-8-26
Rapport des débits :	-0.22	Heure :	06 :00 :00-22 :00 :00
Interactions (pairs) :	39190 int/j	Municipalité :	Val-d'Or
Interactions (instants) :	62683 int/j		

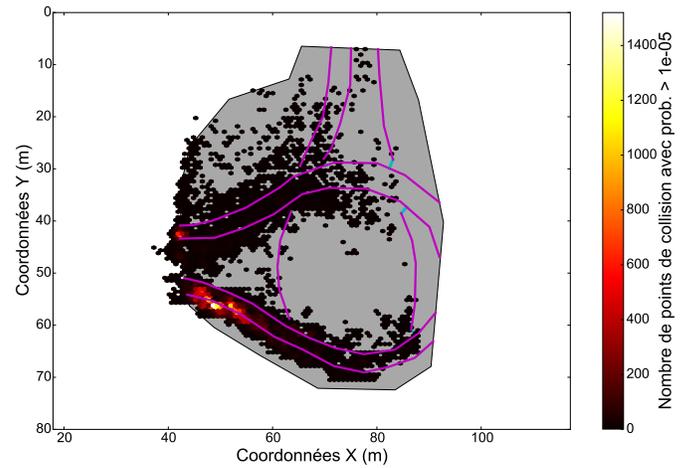
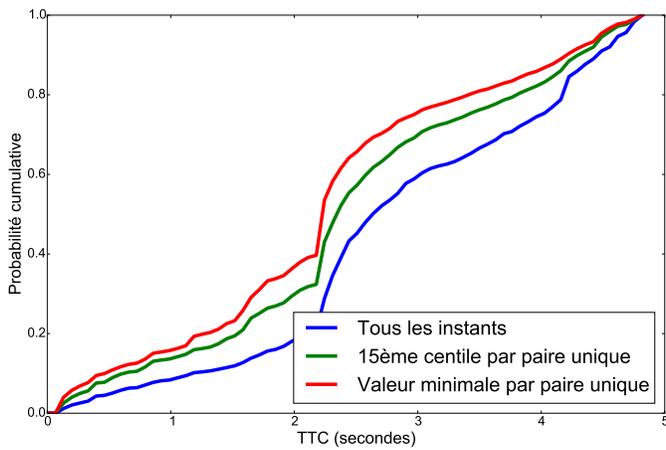
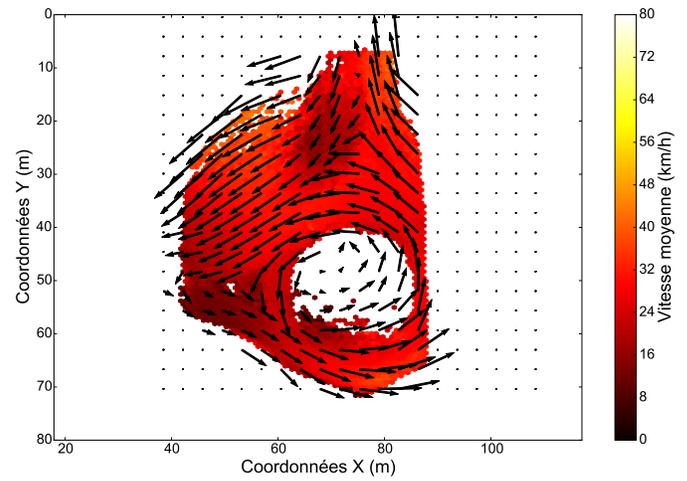
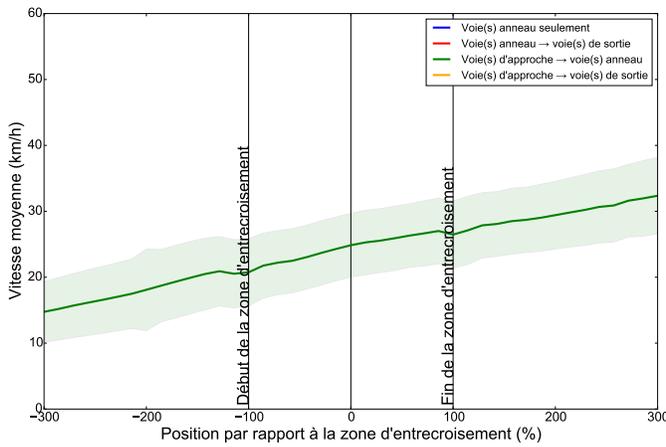
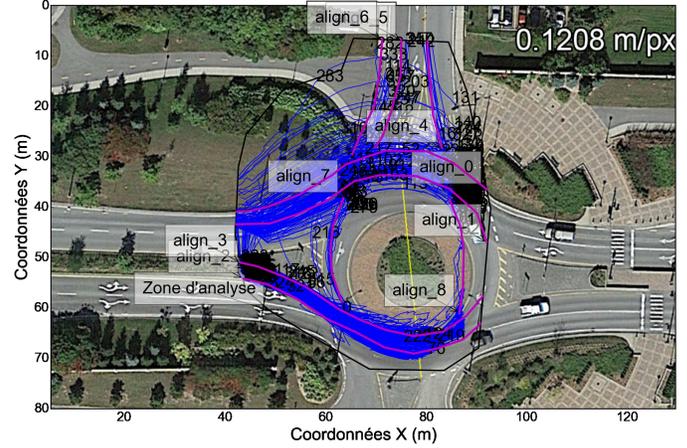
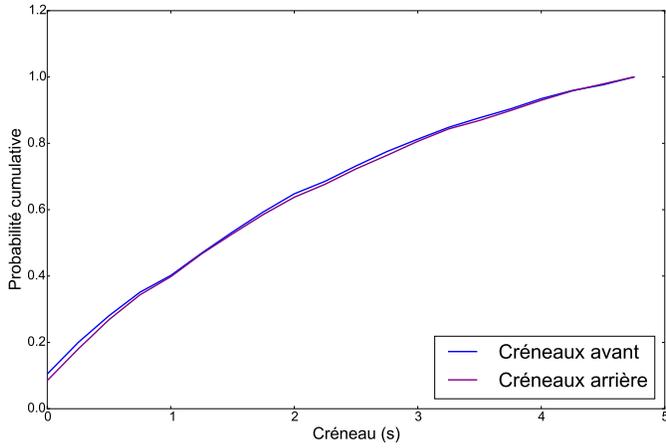


Fiche du carrefour R117/R397, quadrant #1

DJMA* : 12927 véh/j Date : 2013-8-26
 Rapport des débits : 0.08 Heure : 05 :09 :36-16 :49 :17
 Interactions (paires) : 18997 int/j Municipalité : Val-d'Or
 Interactions (instants) : 1307724 int/j

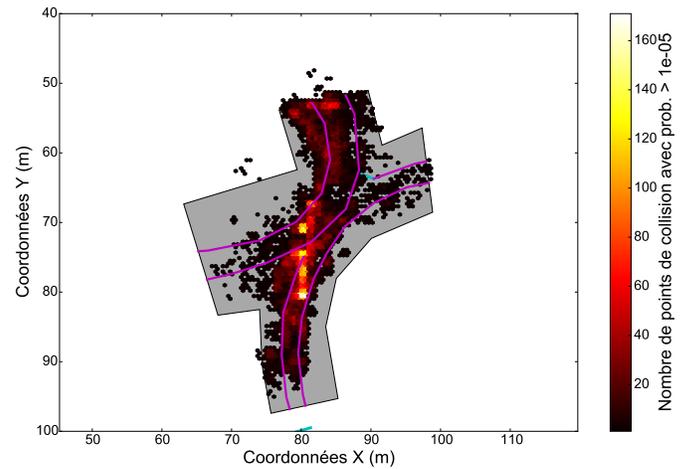
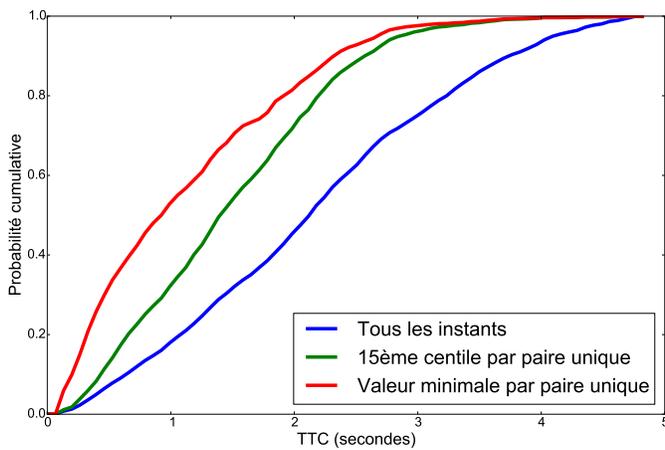
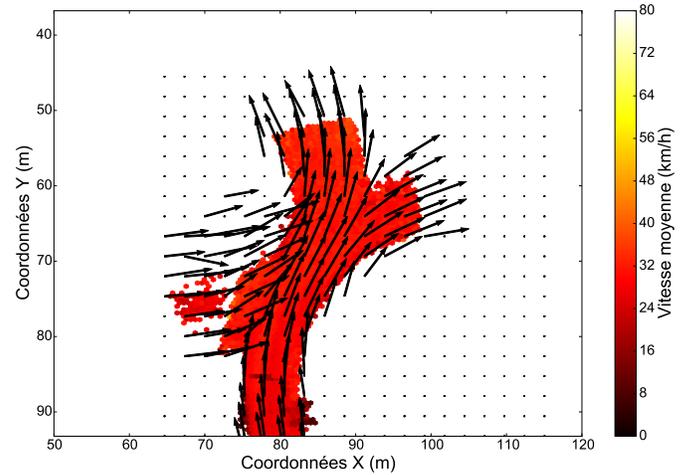
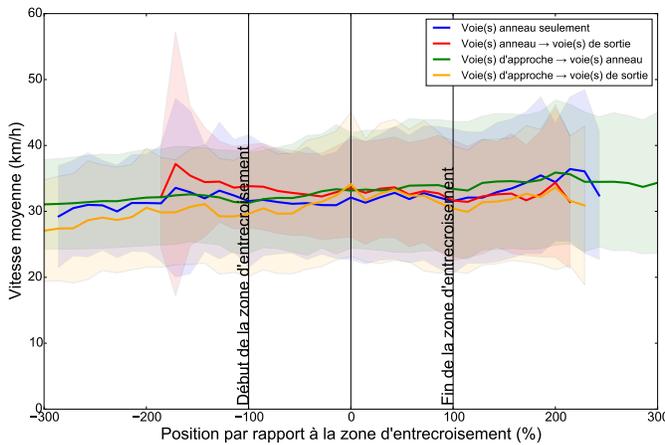
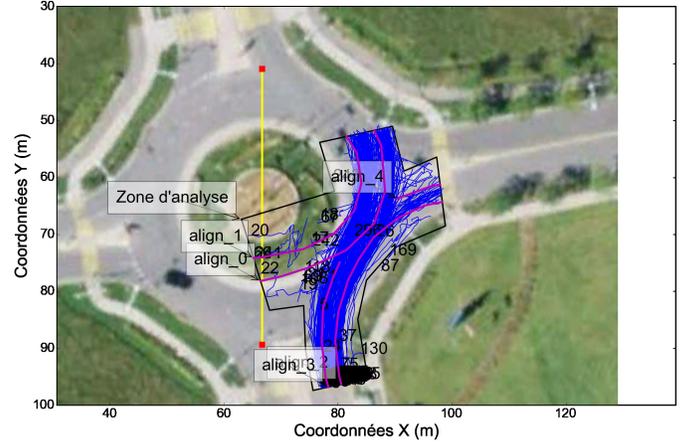
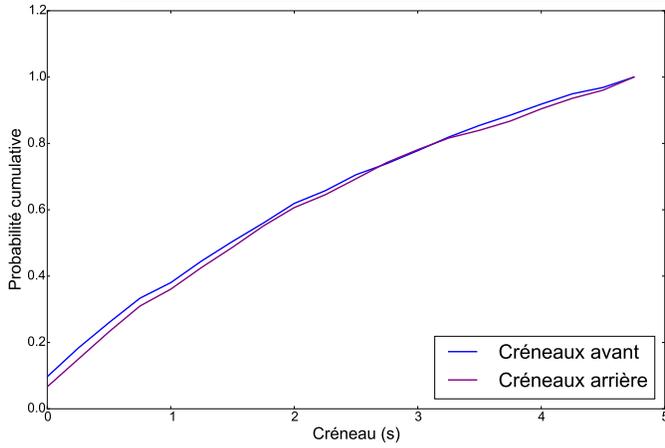


Fiche du carrefour R148/Rue Labelle, quadrant #1			
DJMA* :	23928 véh/j	Date :	2012-8-23
Rapport des débits :	0.82	Heure :	06 :00 :00-18 :26 :00
Interactions (paires) :	107982 int/j	Municipalité :	Gatineau
Interactions (instants) :	5951918 int/j		



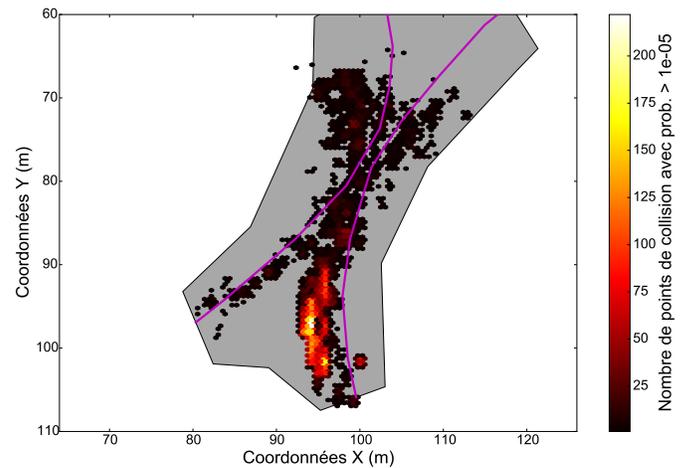
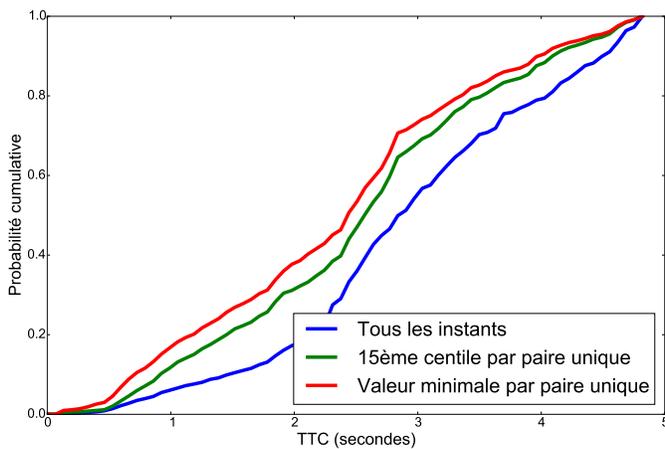
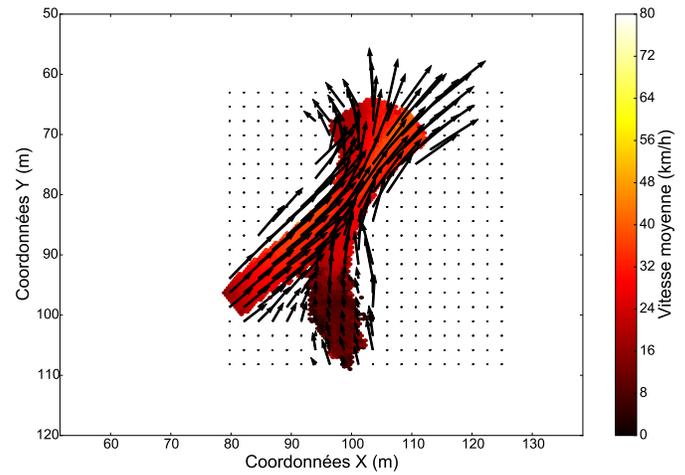
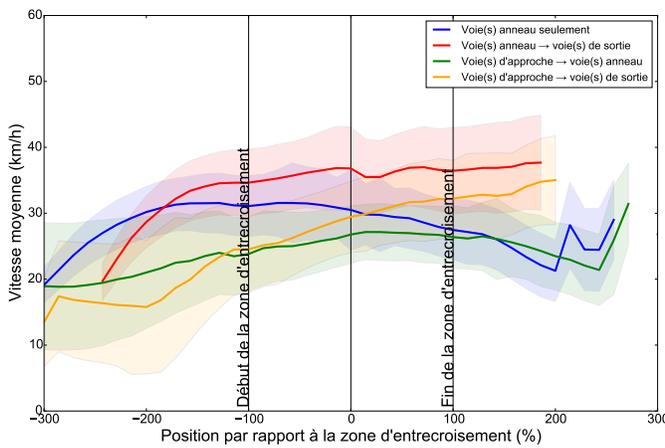
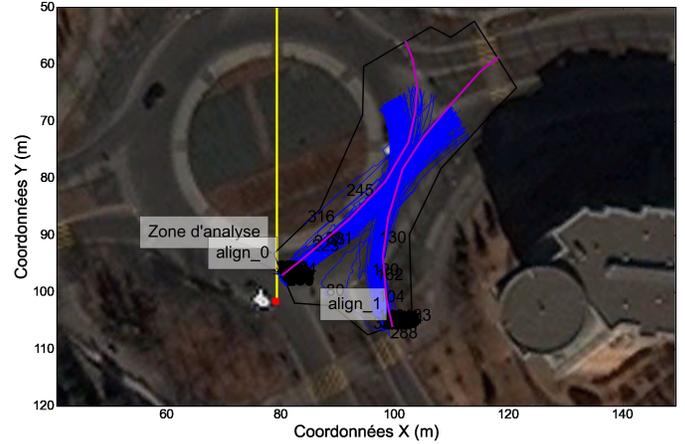
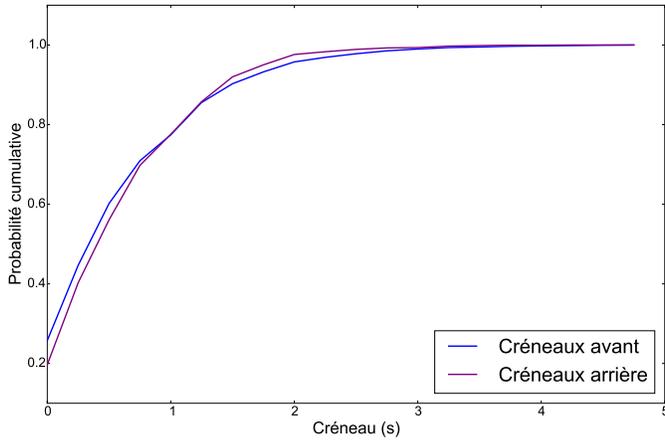
Fiche du carrefour Boulevard Alfred Nobel/Avenue Marie Curie, quadrant #1

DJMA* :	6430 véh/j	Date :	2012-6-20
Rapport des débits :	0.72	Heure :	06 :21 :23-17 :29 :21
Interactions (paires) :	9828 int/j	Municipalité :	Montréal
Interactions (instants) :	324480 int/j		

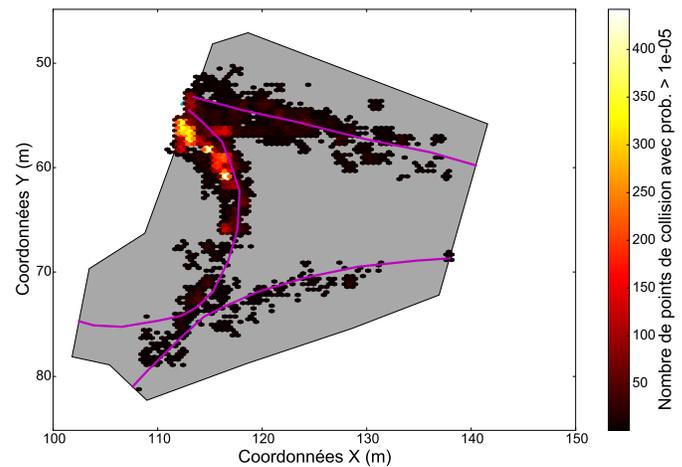
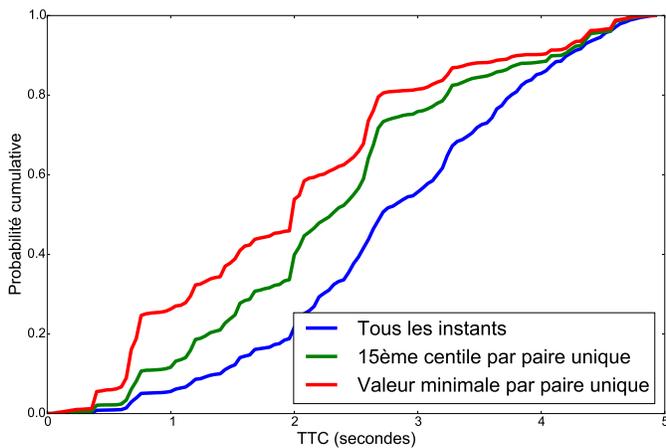
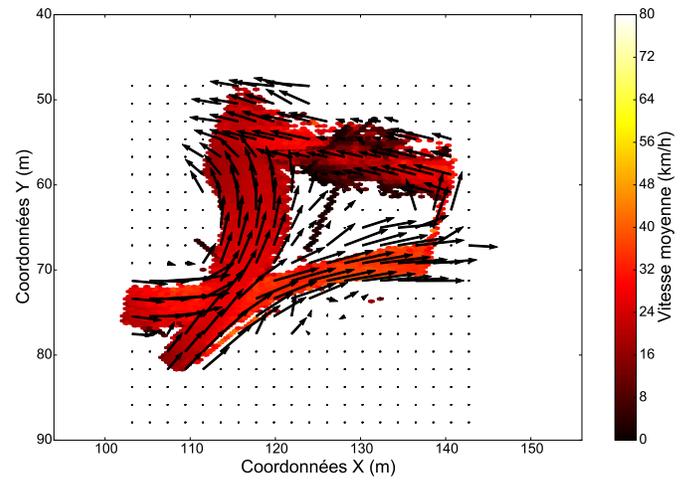
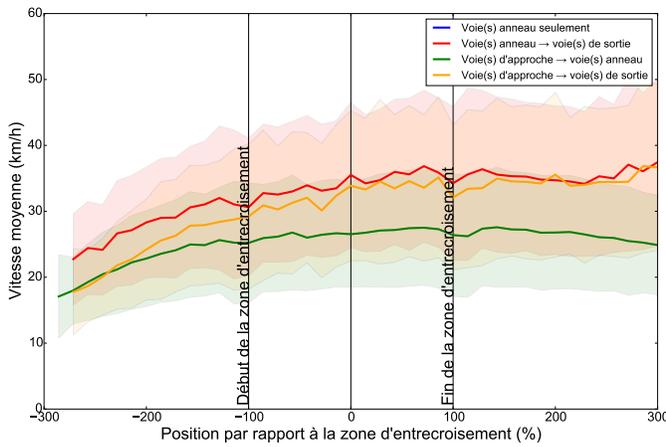
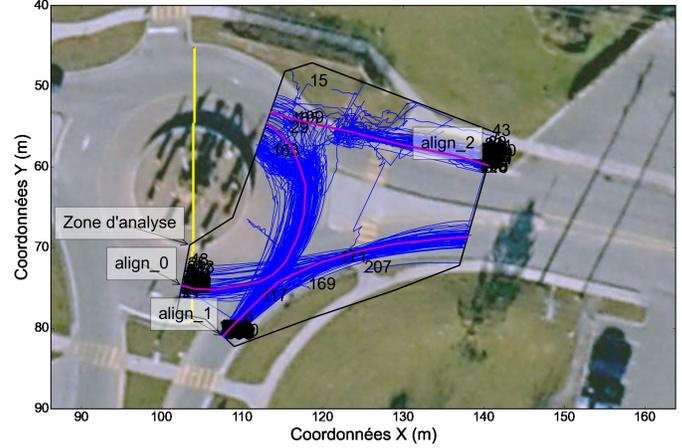
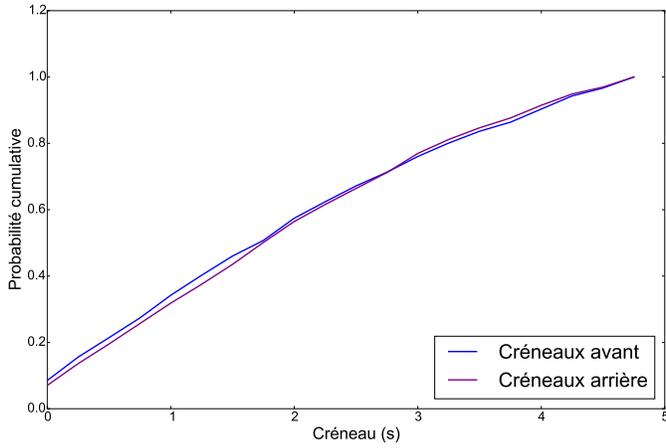


Fiche du carrefour Boulevard de l'Île des Soeurs/Chemin du Golf, quadrant #1

DJMA* : 19876 véh/j Date : 2012-7-12
 Rapport des débits : **Error : please run analysis first Heure : 07 :00 :00-13 :00 :00
 Interactions (paires) : 46891 int/j Municipalité : Montréal
 Interactions (instants) : 2047735 int/j

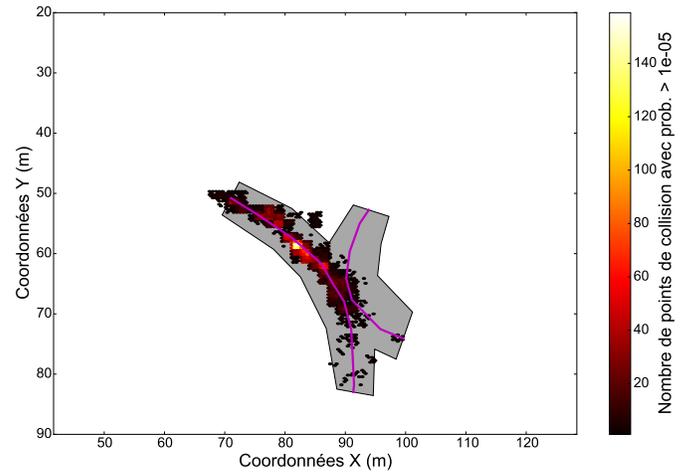
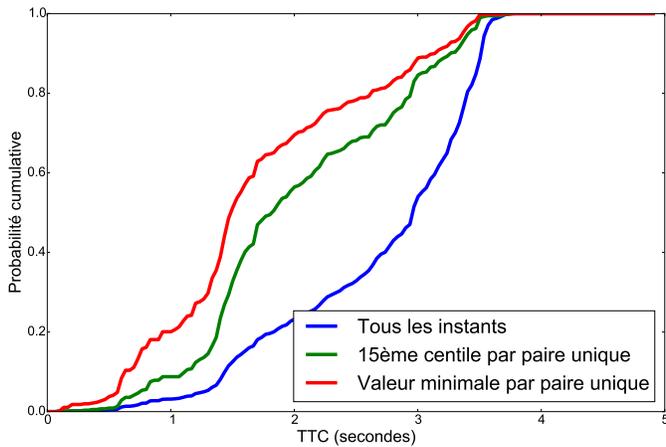
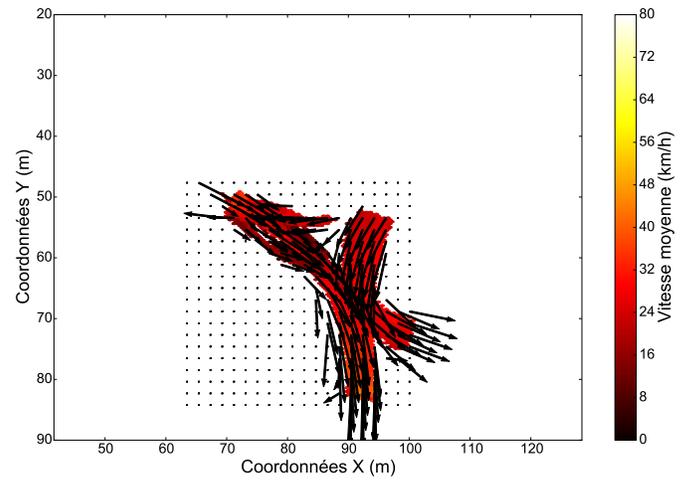
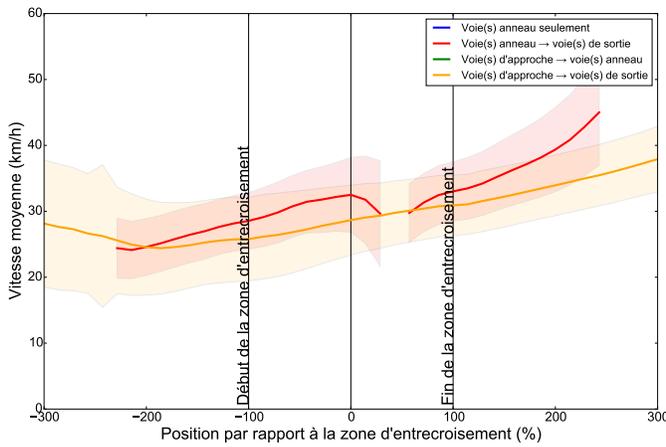
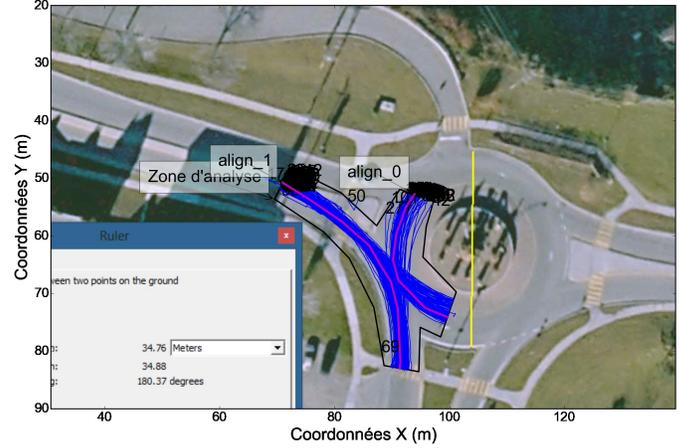
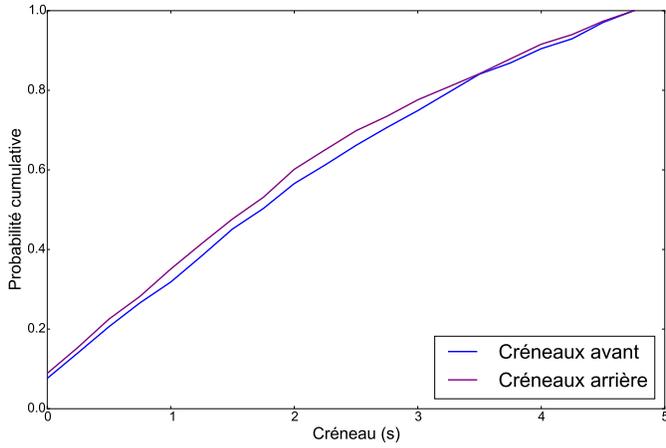


Fiche du carrefour Boulevard Talbot/Rue Jacques-Cartier, quadrant #3			
DJMA* :	9986 véh/j	Date :	2013-8-16
Rapport des débits :	0.72	Heure :	06 :15 :39-16 :39 :14
Interactions (paires) :	16011 int/j	Municipalité :	Saguenay
Interactions (instants) :	905855 int/j		



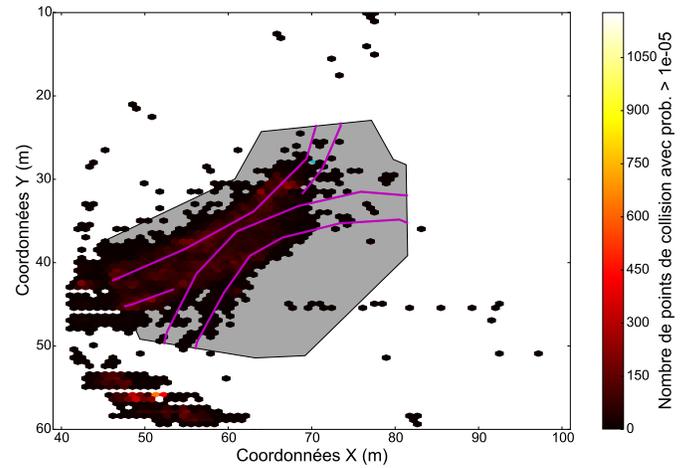
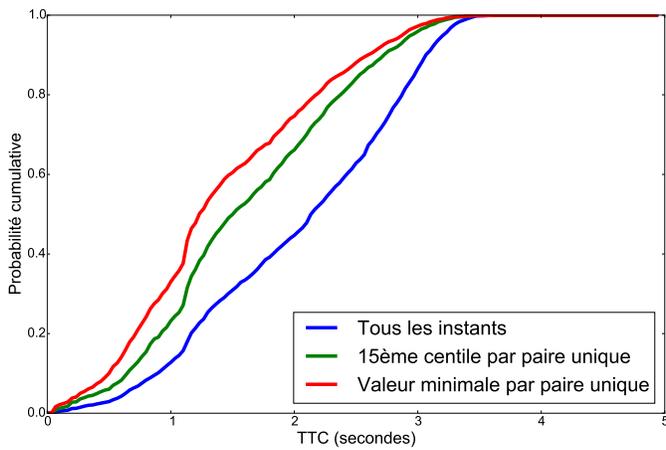
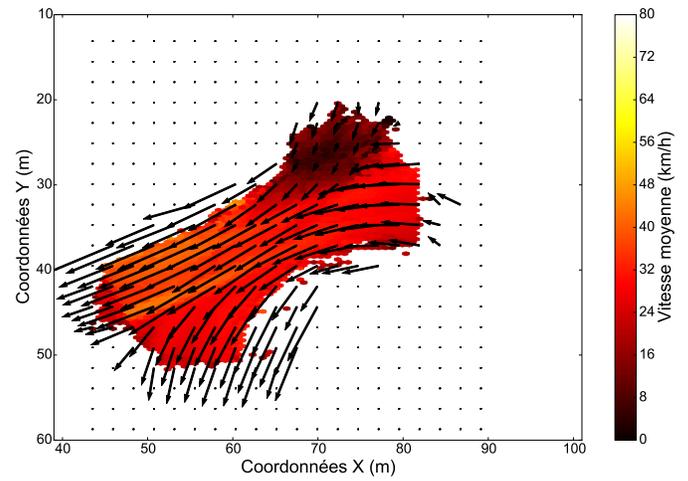
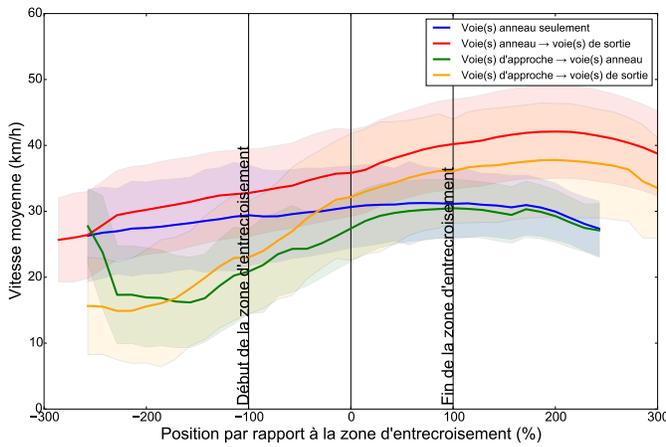
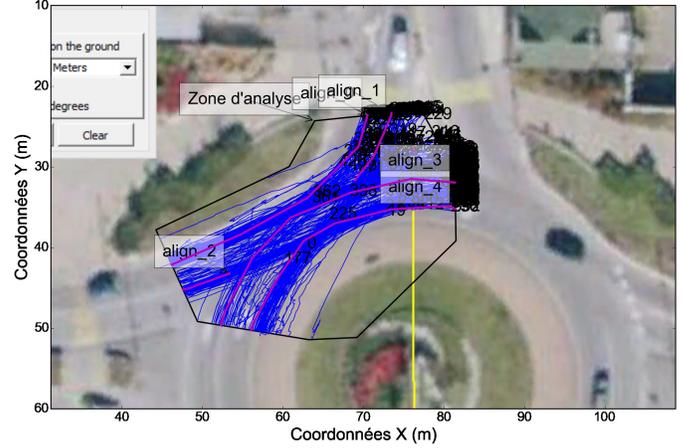
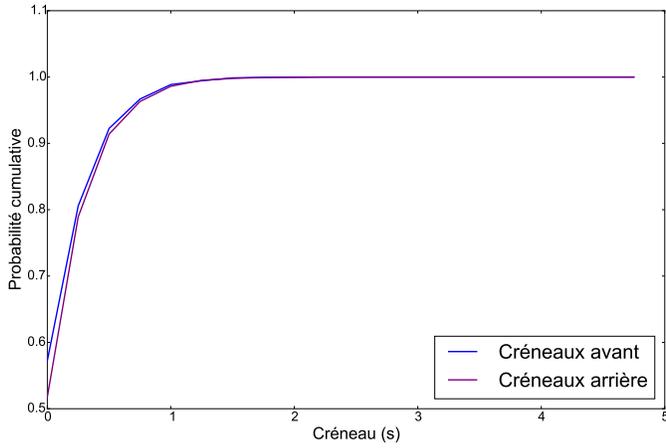
Fiche du carrefour Boulevard Talbot/Rue Jacques-Cartier, quadrant #2

DJMA* :	6389 véh/j	Date :	2013-8-16
Rapport des débits :	0.57	Heure :	06 :16 :55-16 :54 :03
Interactions (paires) :	5014 int/j	Municipalité :	Saguenay
Interactions (instants) :	271271 int/j		



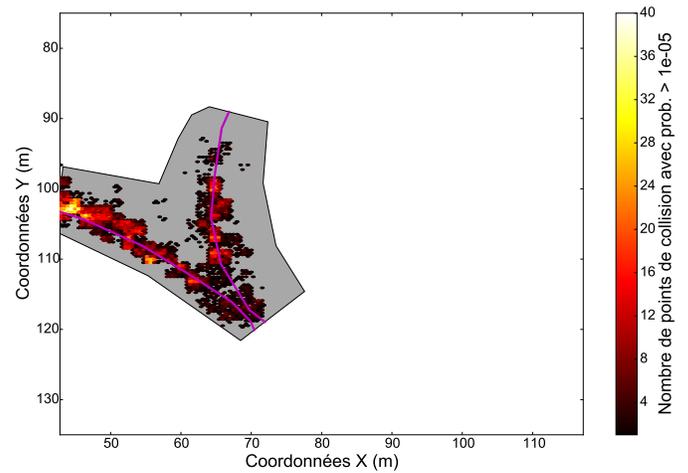
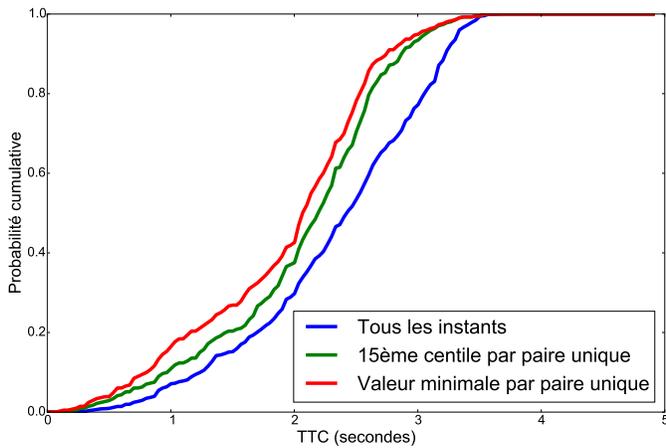
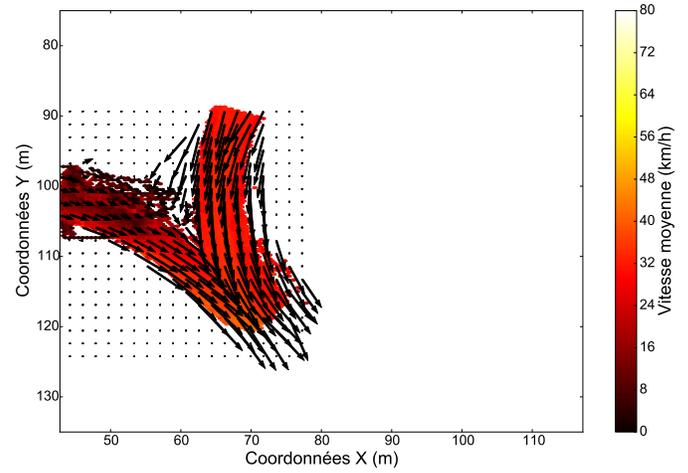
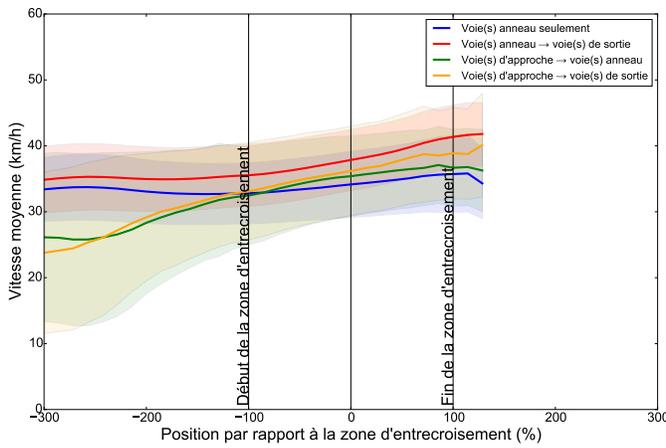
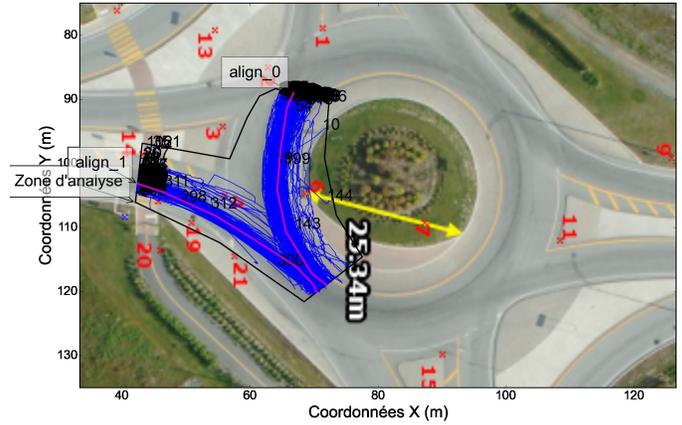
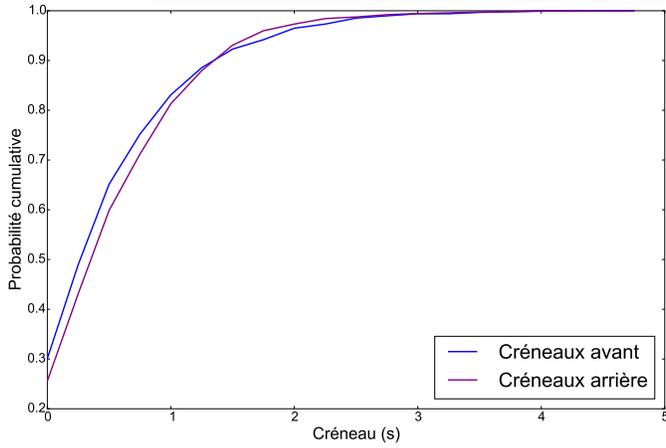
Fiche du carrefour R148/R105, quadrant #1

DJMA* : 22326 véh/j Date : 2012-8-21
 Rapport des débits : -0.22 Heure : 07 :00 :00-21 :00 :00
 Interactions (paires) : 44455 int/j Municipalité : Gatineau
 Interactions (instants) : 2483460 int/j



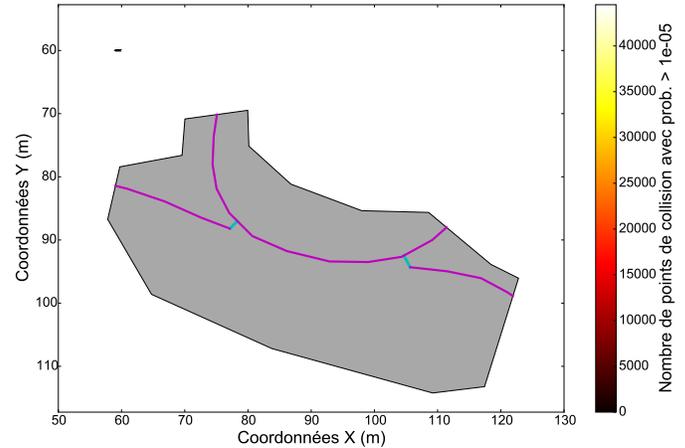
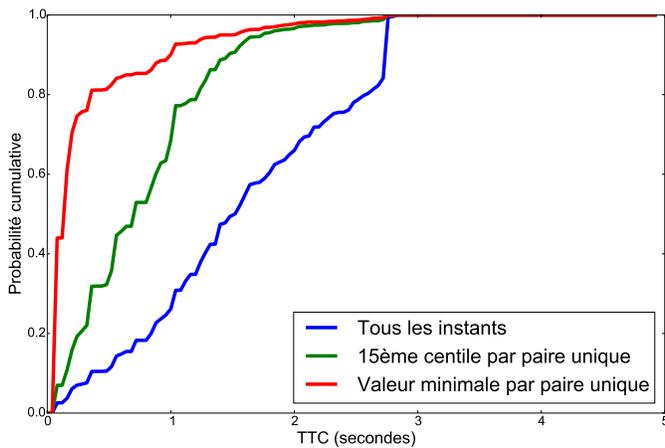
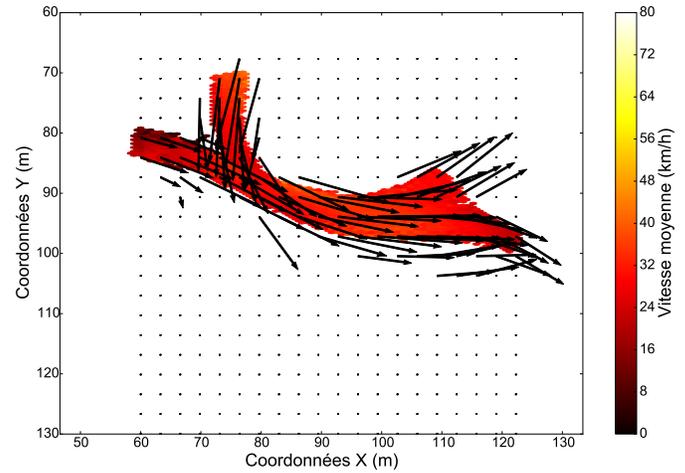
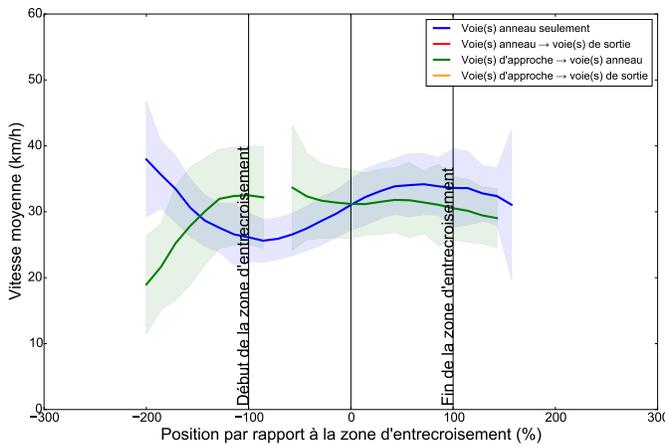
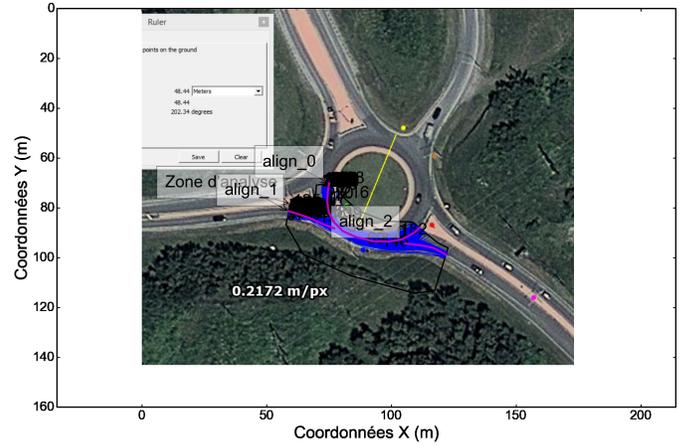
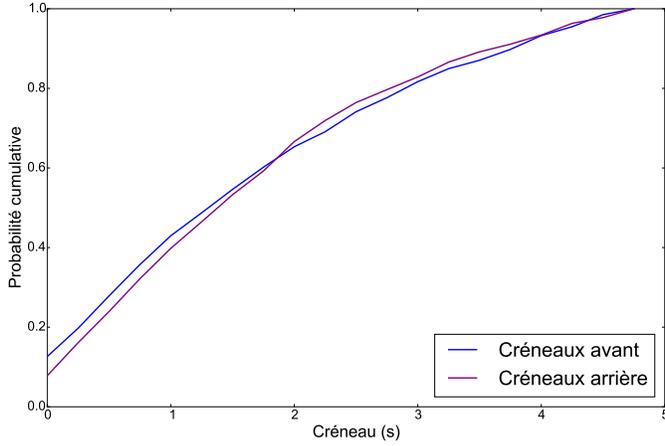
Fiche du carrefour R111/R117, quadrant #1

DJMA* : 12603 véh/j Date : 2013-8-27
 Rapport des débits : -0.38 Heure : 05 :18 :35-15 :52 :26
 Interactions (paires) : 15796 int/j Municipalité : Val-d'Or
 Interactions (instants) : 967183 int/j



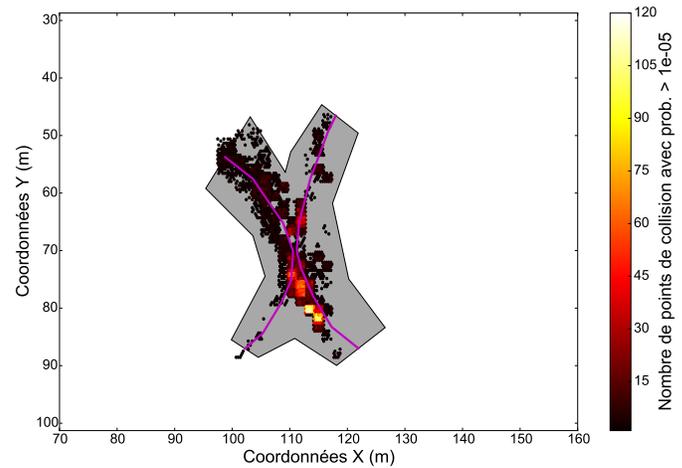
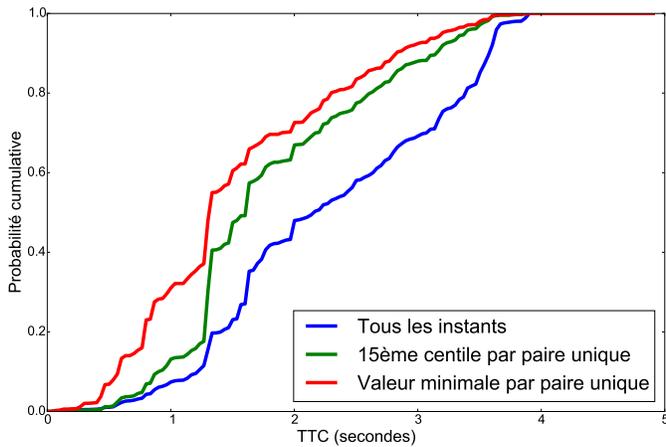
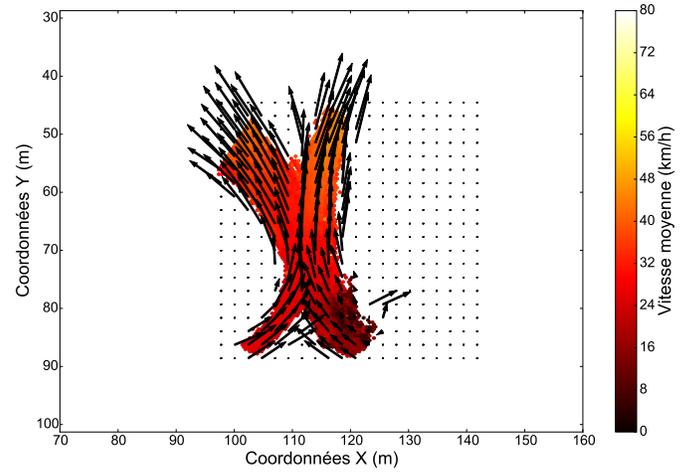
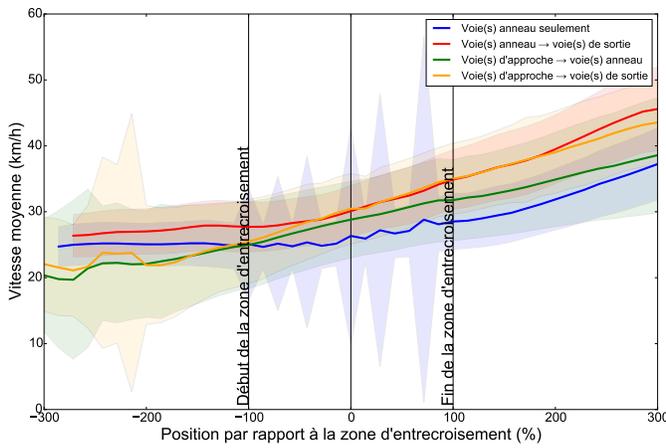
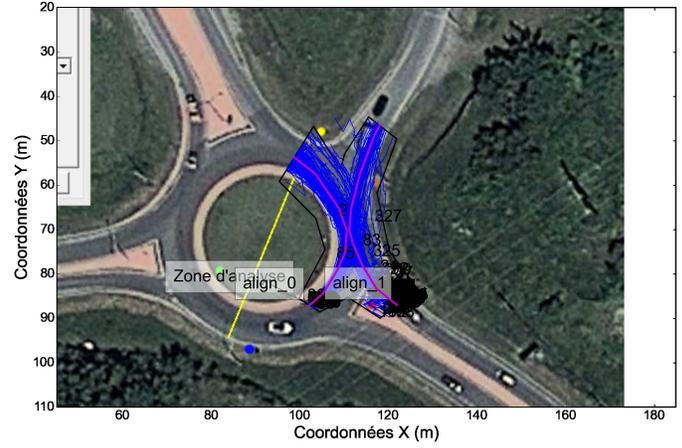
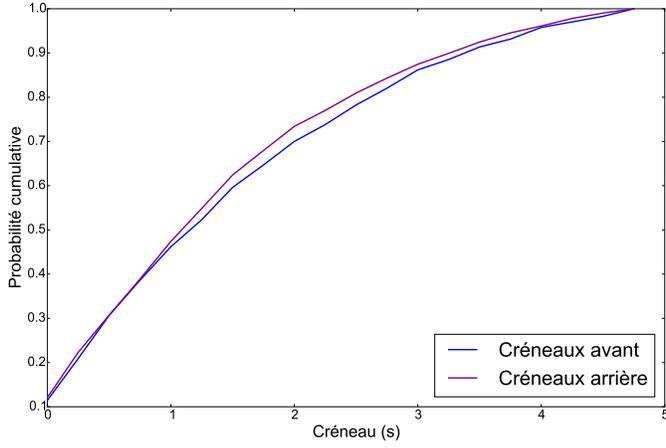
Fiche du carrefour R112/Chemin Milletta, quadrant #3

DJMA* : 5292 véh/j Date : 2013-9-12
 Rapport des débits : 0.26 Heure : 06 :00 :00-16 :35 :07
 Interactions (paires) : 5223 int/j Municipalité : Magog
 Interactions (instants) : 475642 int/j

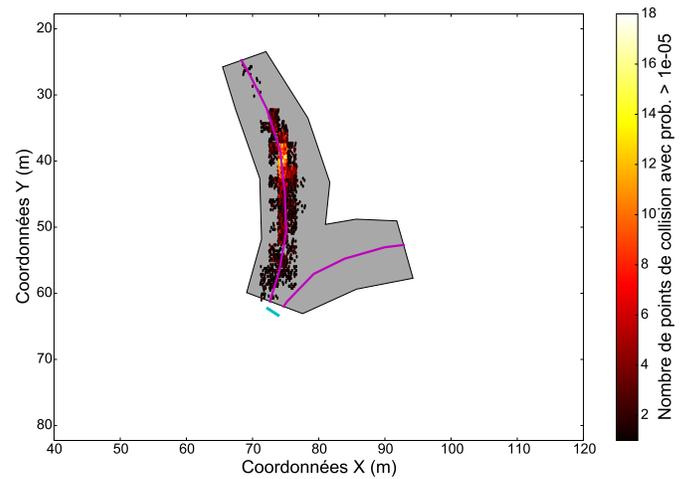
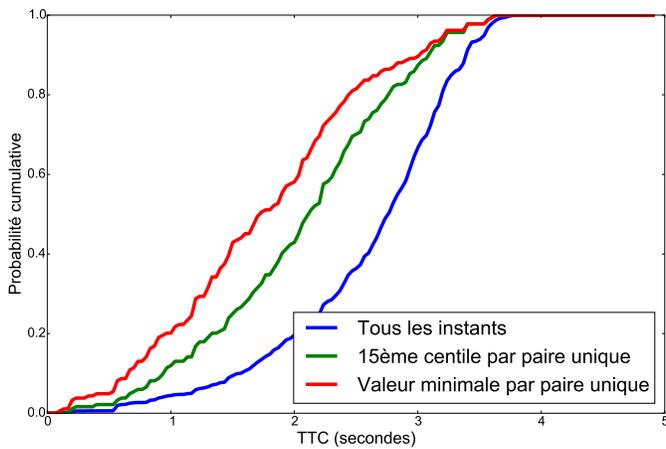
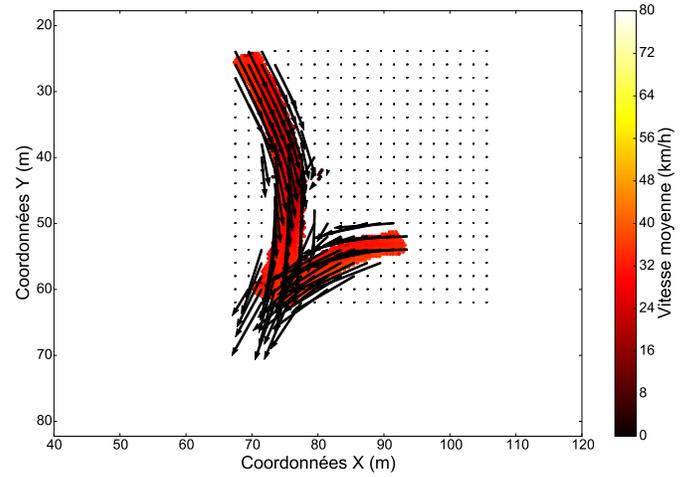
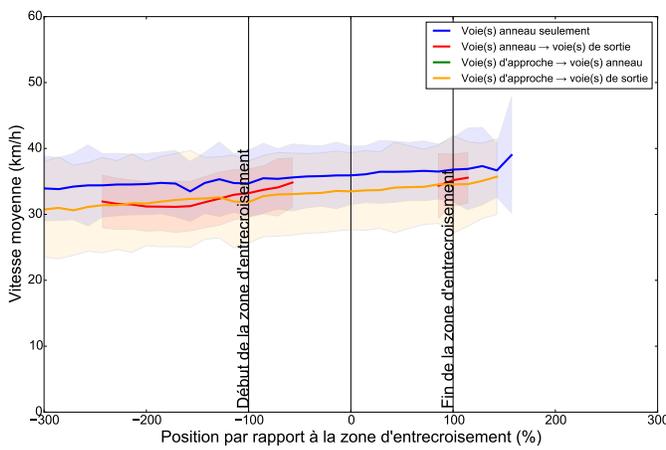
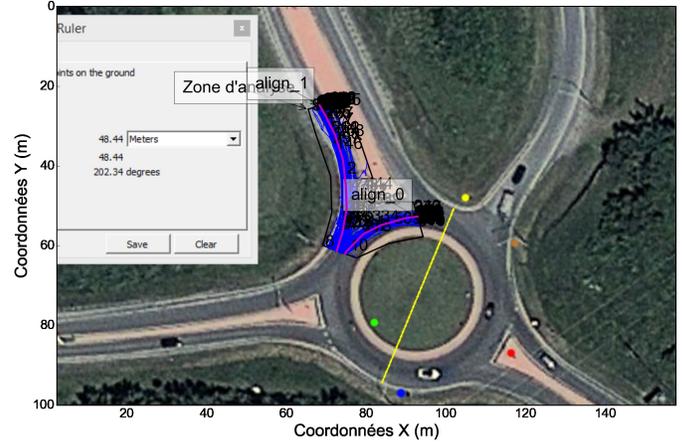
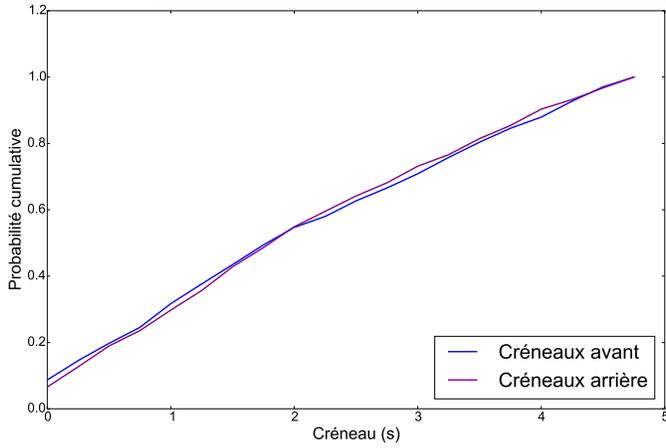


Fiche du carrefour R112/Chemin Milletta, quadrant #1

DJMA* :	7882 véh/j	Date :	2013-9-12
Rapport des débits :	0.38	Heure :	06 :00 :00-16 :30 :20
Interactions (paires) :	10234 int/j	Municipalité :	Magog
Interactions (instants) :	507581 int/j		

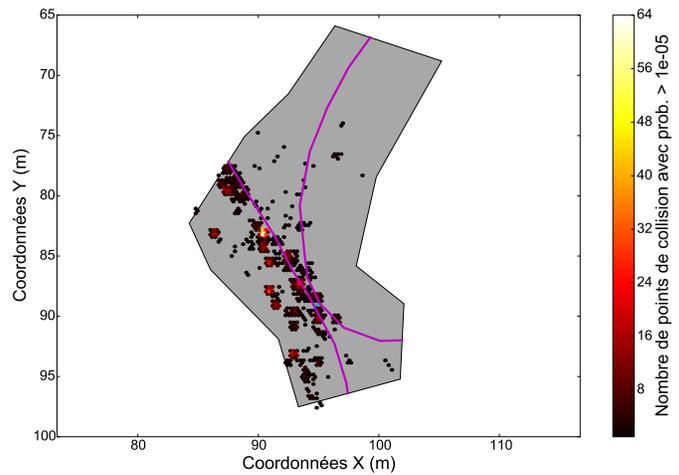
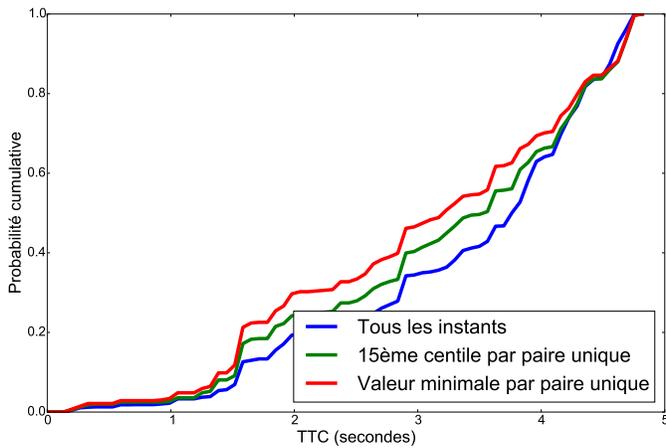
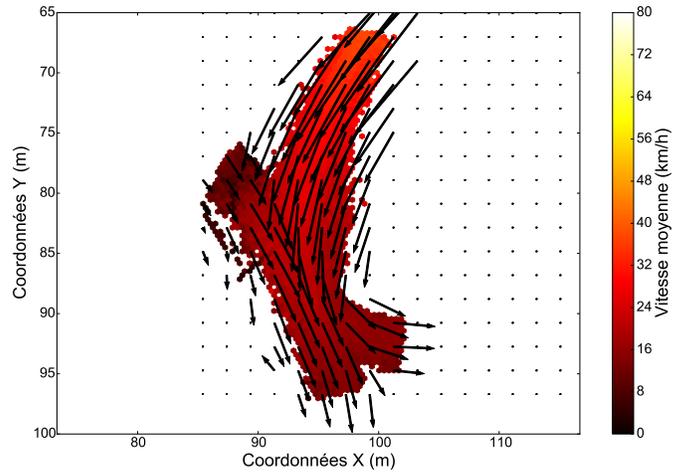
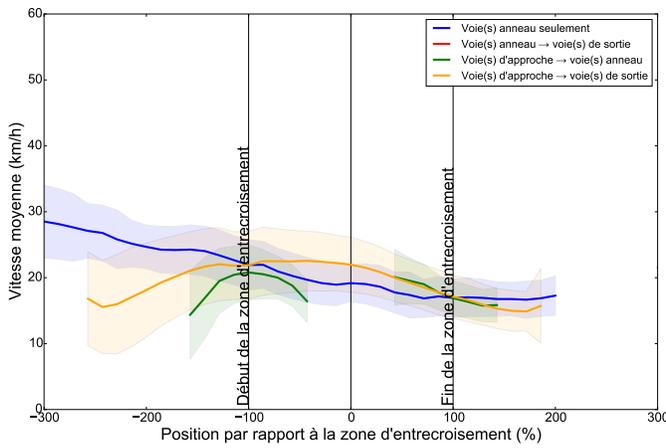
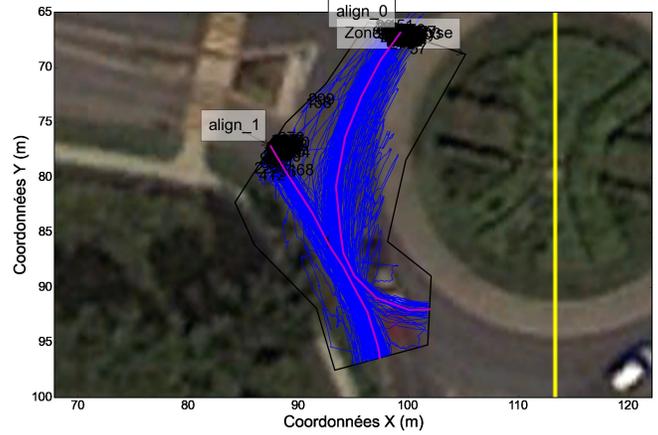
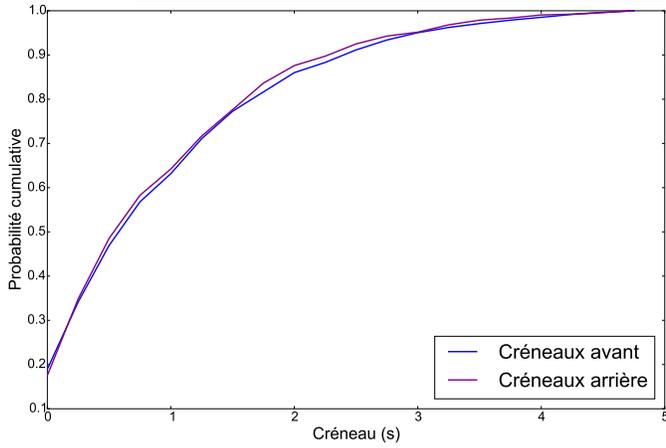


Fiche du carrefour R112/Chemin Milletta, quadrant #2			
DJMA* :	4572 véh/j	Date :	2013-9-12
Rapport des débits :	0.59	Heure :	06 :00 :00-15 :42 :49
Interactions (paires) :	2285 int/j	Municipalité :	Magog
Interactions (instants) :	134557 int/j		



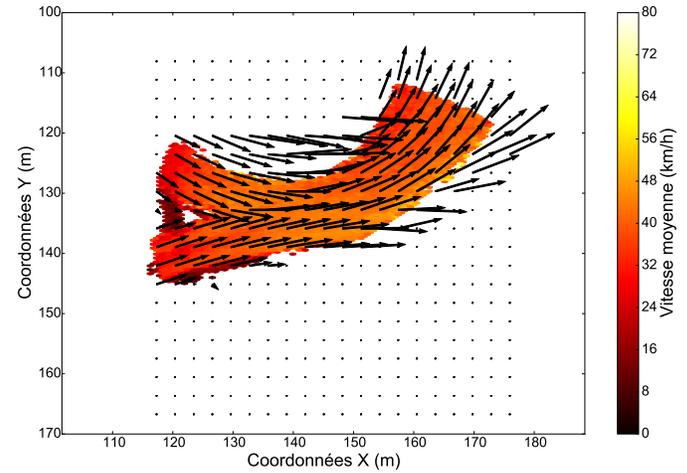
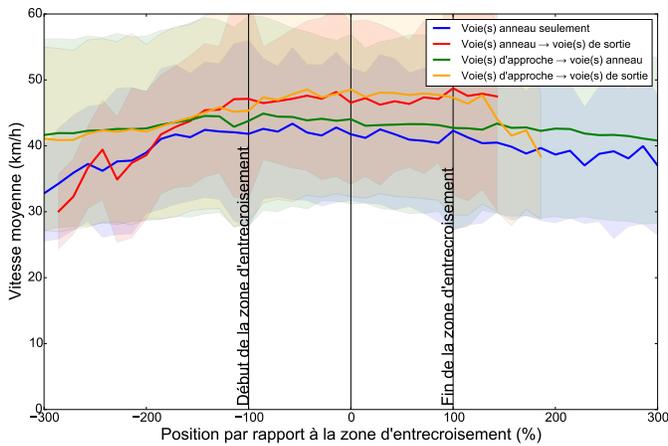
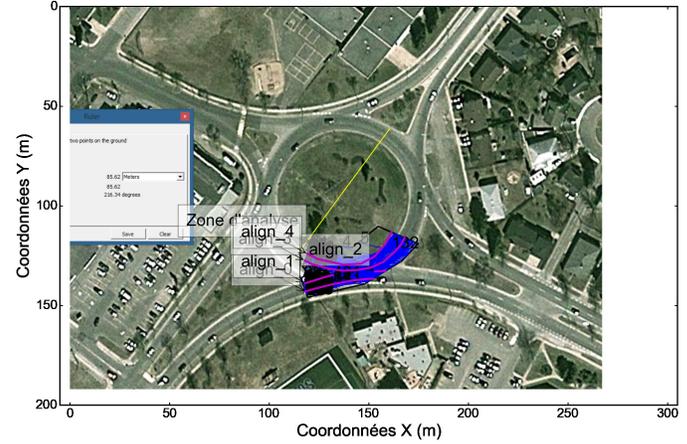
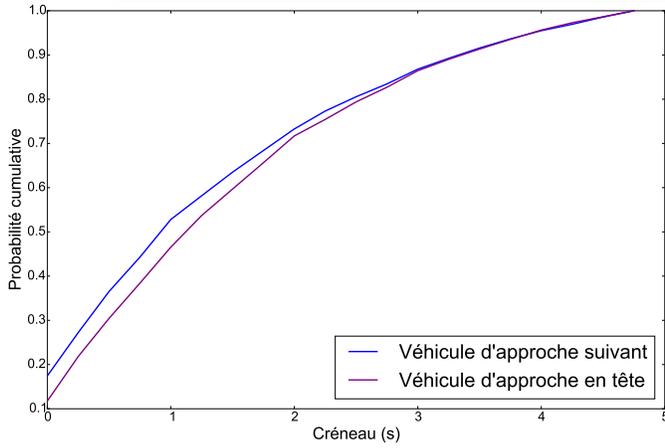
Fiche du carrefour Boulevard Fréchette/Rue Anne le Seigneur, quadrant #1

DJMA* : 9448 véh/j Date : 2012-7-19
 Rapport des débits : -0.21 Heure : 06 :50 :00-15 :00 :00
 Interactions (paires) : 7762 int/j Municipalité : Chambly
 Interactions (instants) : 196882 int/j



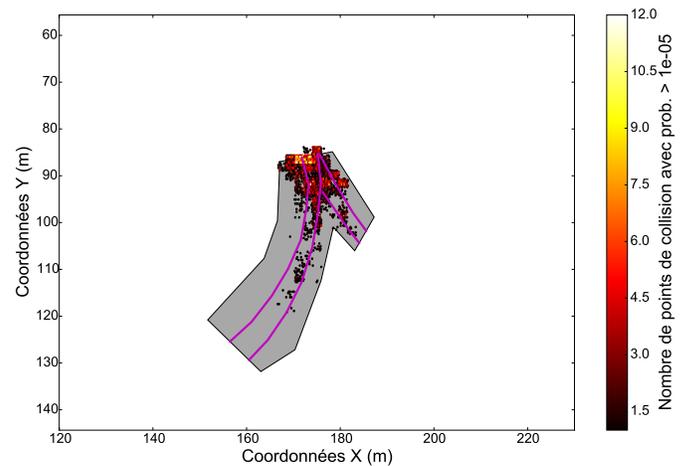
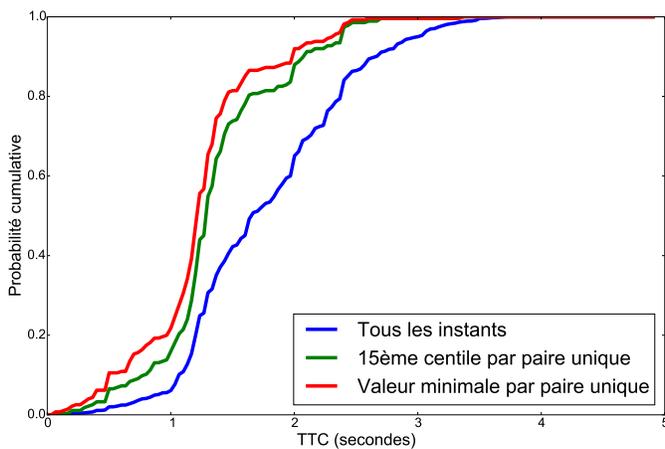
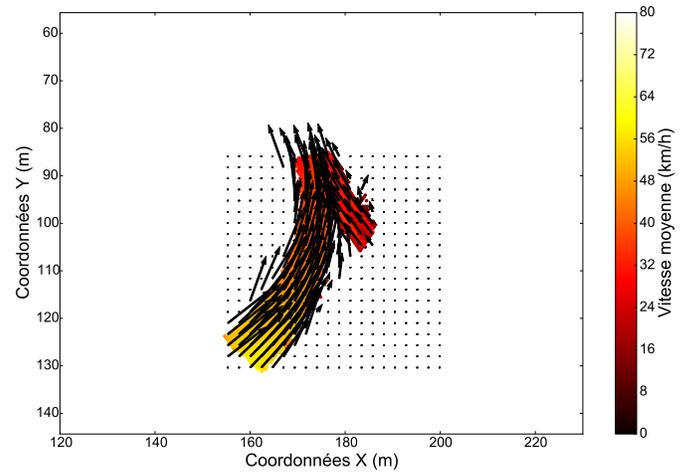
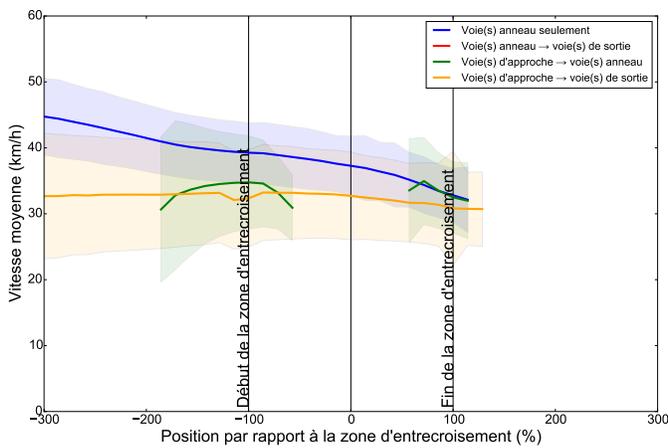
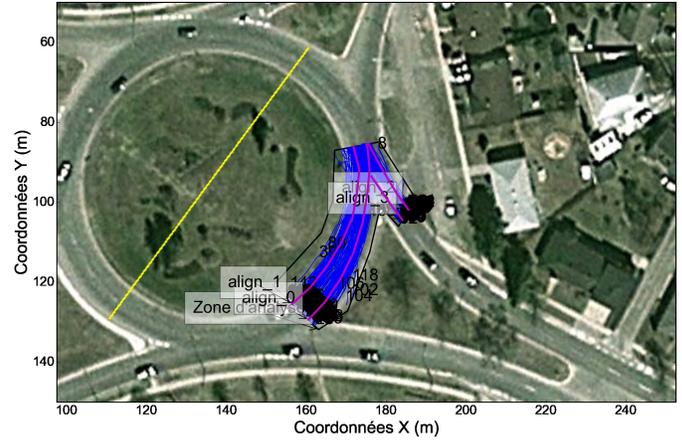
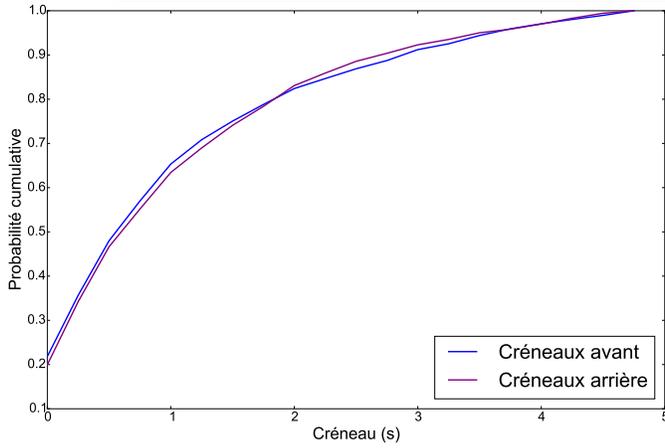
Fiche du carrefour Boulevard des Récollets/Boulevard Laviolette, quadrant #1

DJMA* :	8548 véh/j	Date :	2013-7-16
Rapport des débits :	0.62	Heure :	05 :40 :00-20 :30 :00
Interactions (pairs) :	10402 int/j	Municipalité :	Trois-Rivières
Interactions (instants) :	457201 int/j		



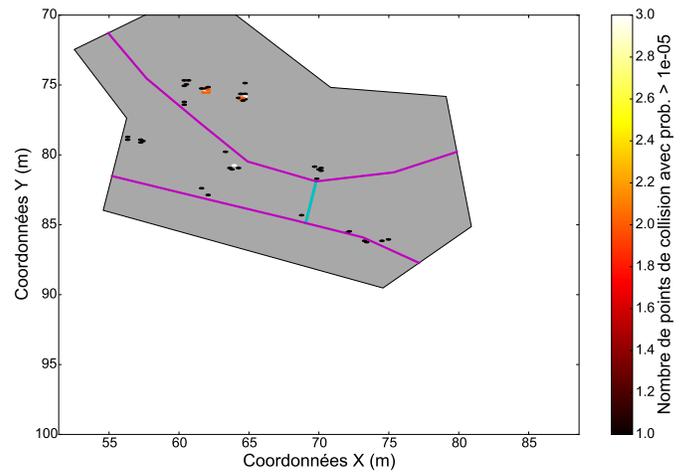
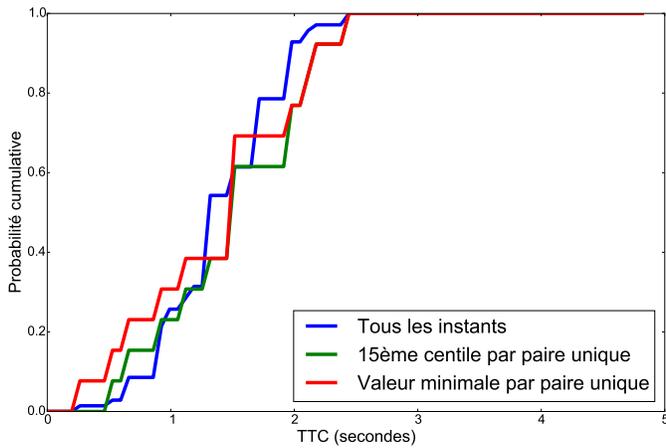
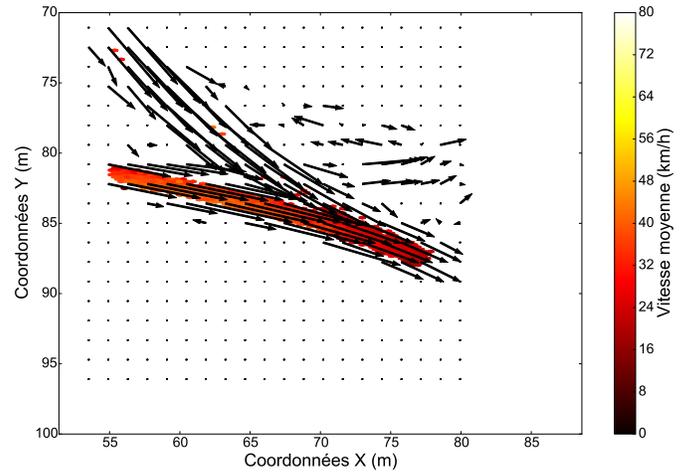
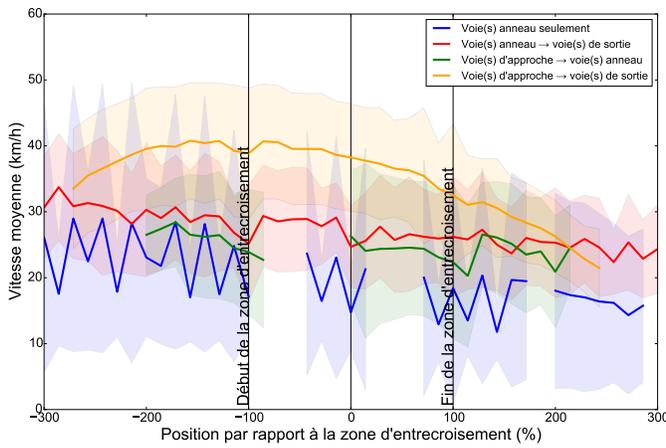
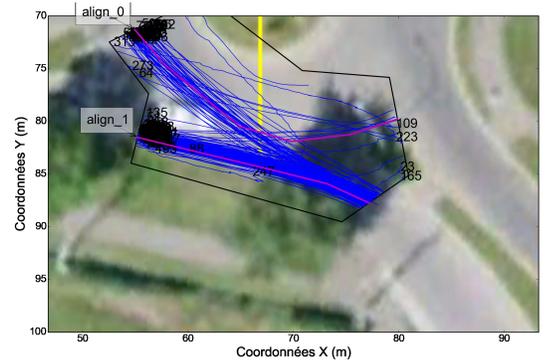
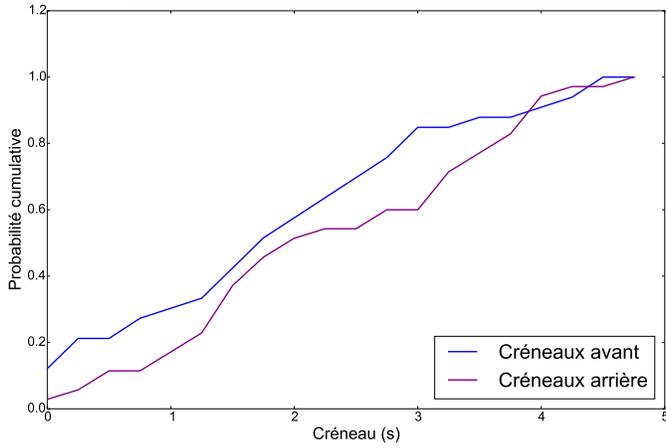
Fiche du carrefour Boulevard des Récollets/Boulevard Laviolette, quadrant #2

DJMA* :	9046 véh/j	Date :	2013-7-16
Rapport des débits :	-0.02	Heure :	05 :22 :39-18 :33 :41
Interactions (paires) :	5957 int/j	Municipalité :	Trois-Rivières
Interactions (instants) :	245101 int/j		



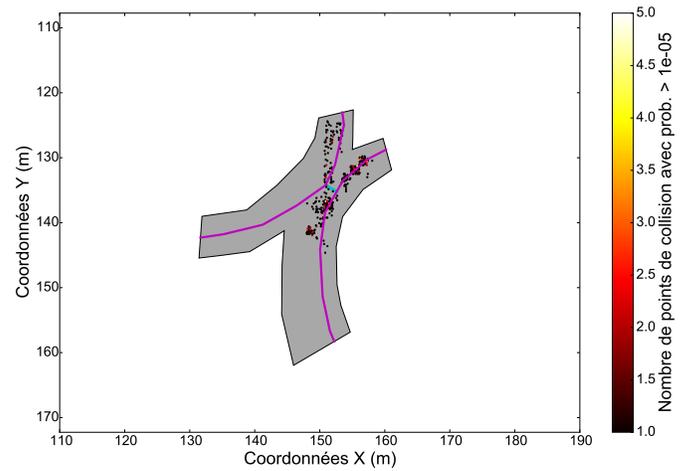
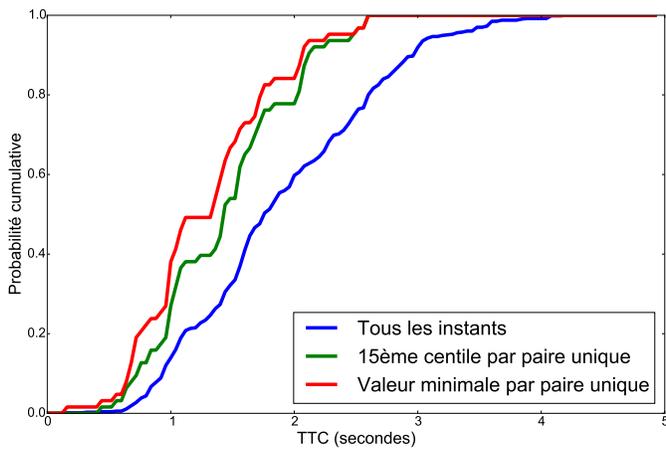
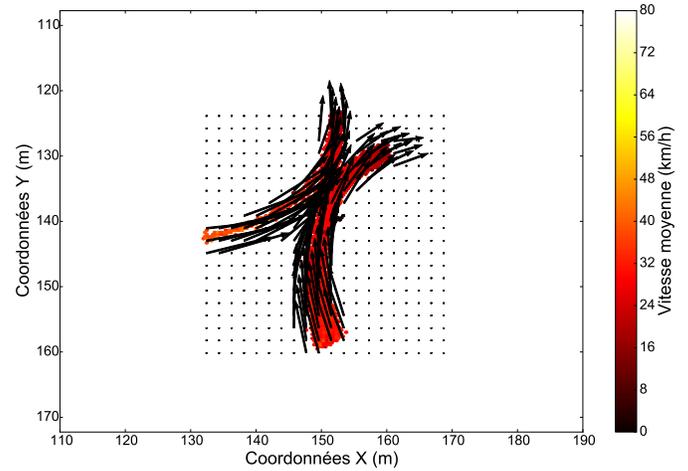
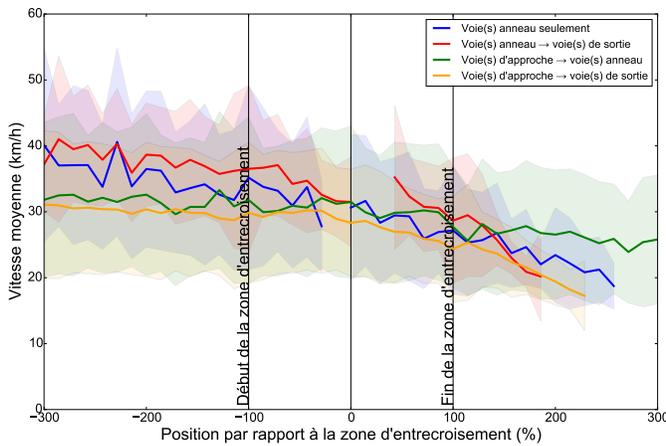
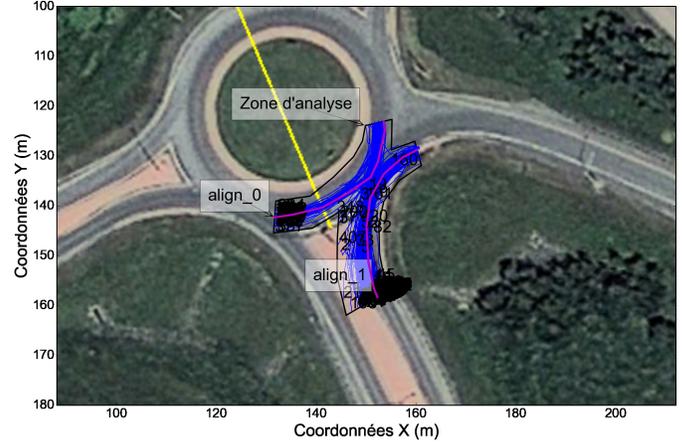
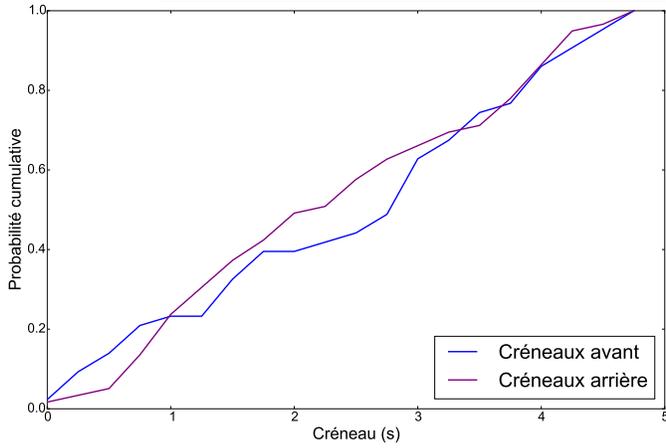
Fiche du carrefour Boulevard des Sources/Boulevard Riverdale, quadrant #1

DJMA* :	1892 véh/j	Date :	2012-6-21
Rapport des débits :	0.65	Heure :	11 :20 :00-15 :05 :00
Interactions (paires) :	436 int/j	Municipalité :	Montréal
Interactions (instants) :	8824 int/j		



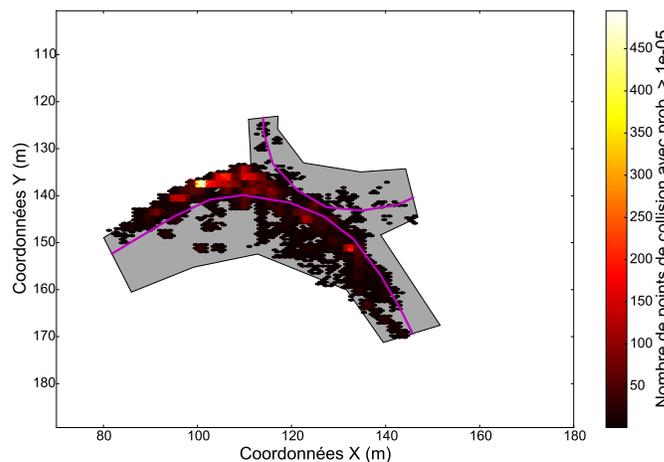
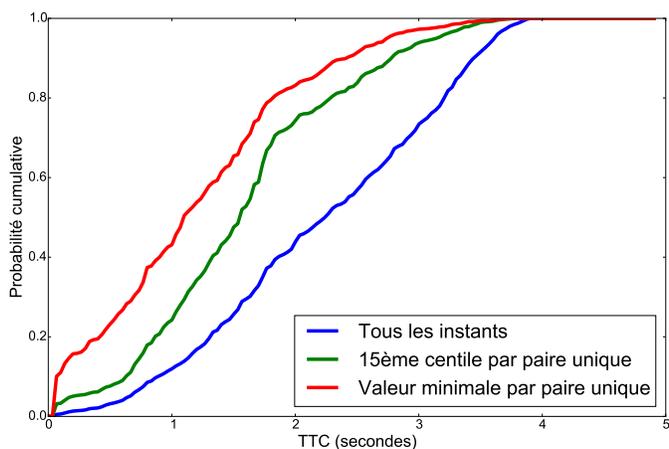
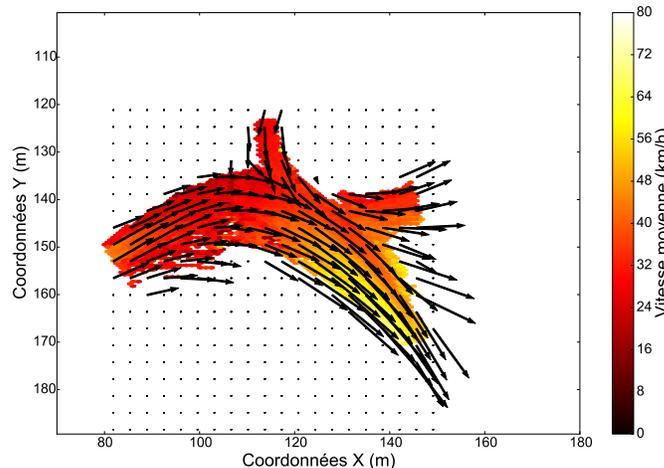
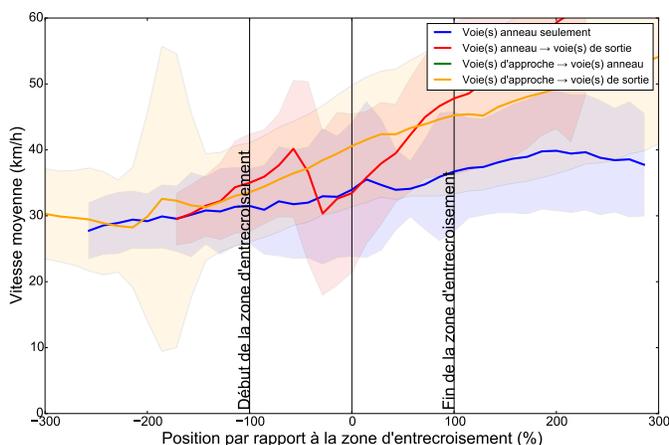
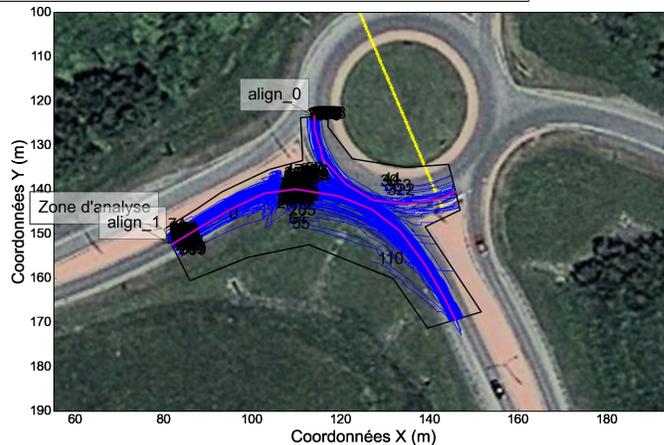
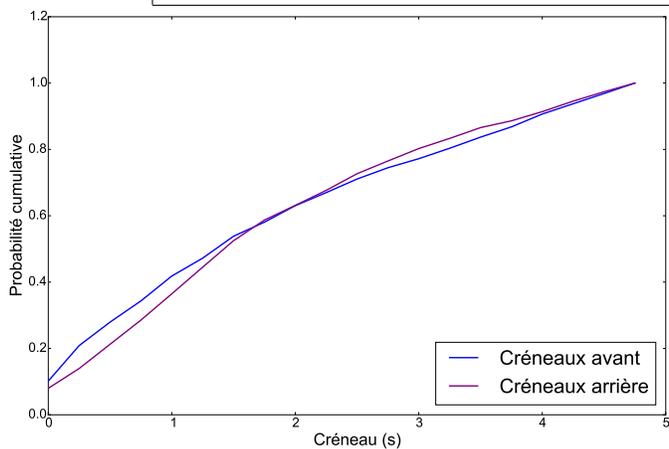
Fiche du carrefour R112/R141, quadrant #3

DJMA* : 3159 véh/j Date : 2013-9-11
 Rapport des débits : 0.7 Heure : 06 :00 :00-09 :00 :00
 Interactions (paires) : 1440 int/j Municipalité : Magog
 Interactions (instants) : 65431 int/j



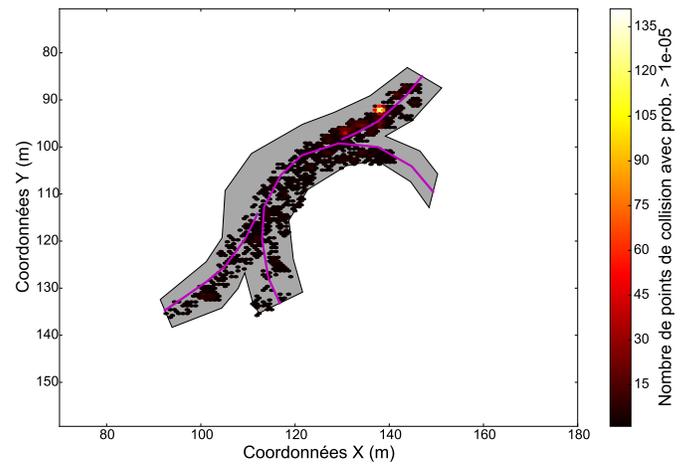
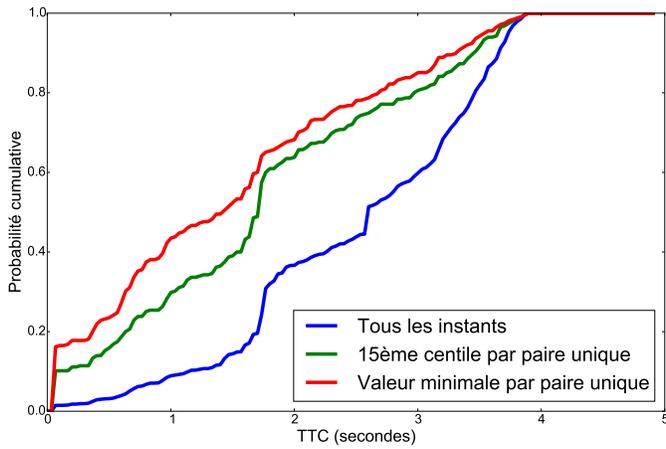
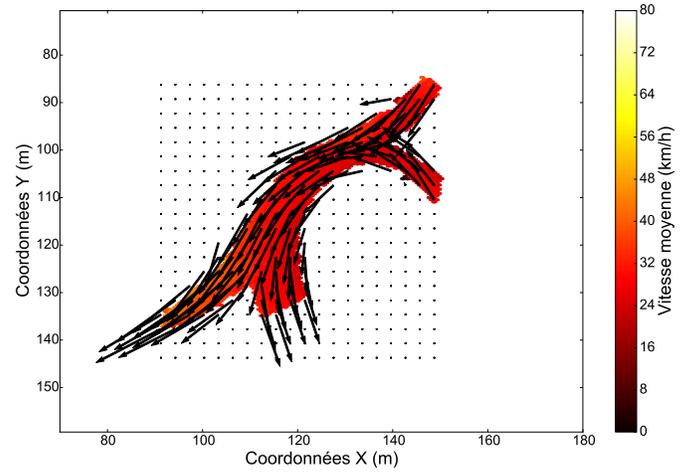
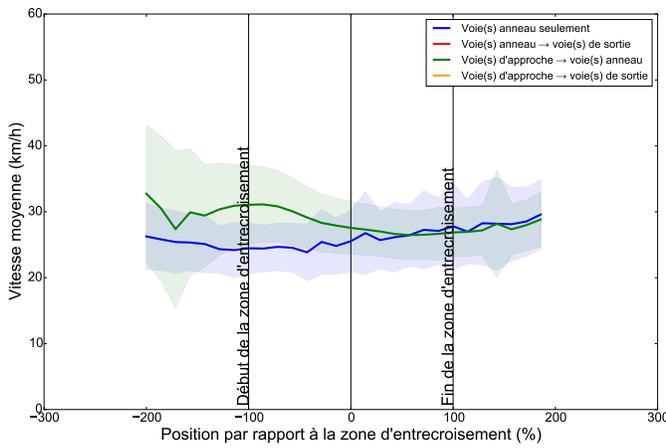
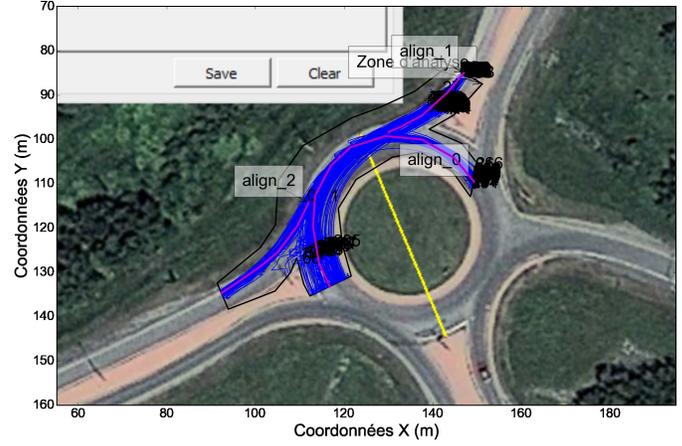
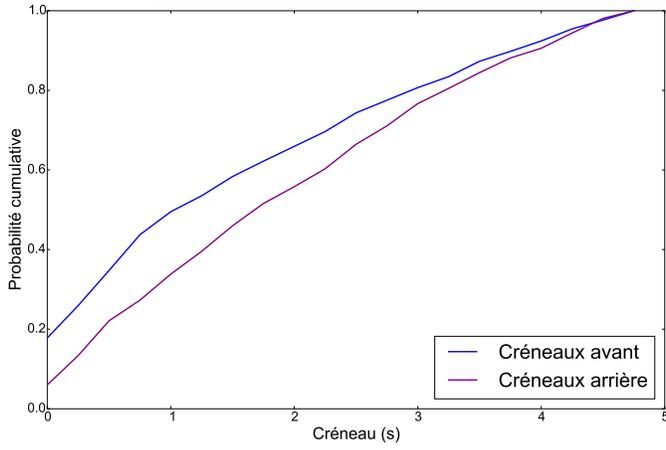
Fiche du carrefour R112/R141, quadrant #2

DJMA* : 6313 véh/j Date : 2013-9-11
 Rapport des débits : 0.6 Heure : 06 :08 :48-18 :53 :59
 Interactions (paires) : 8425 int/j Municipalité : Magog
 Interactions (instants) : 519904 int/j



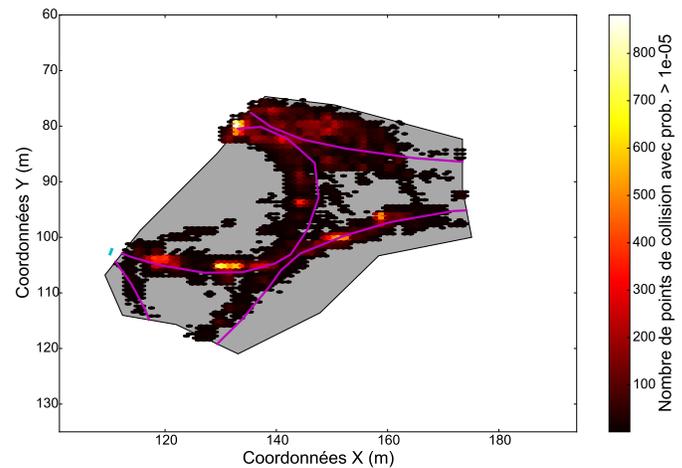
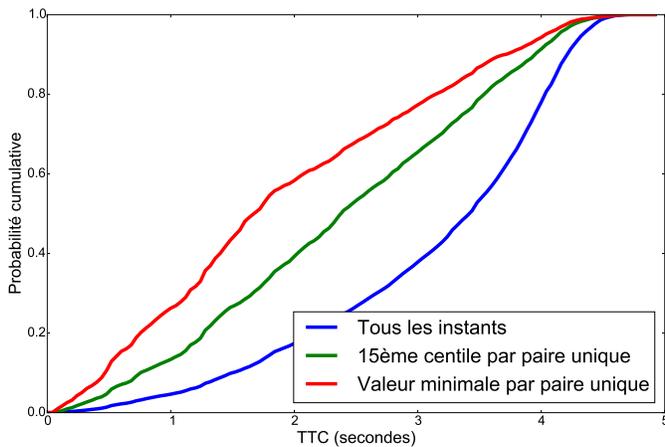
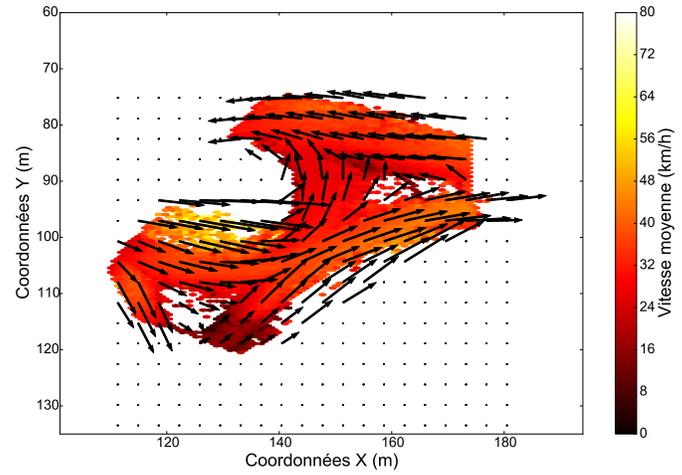
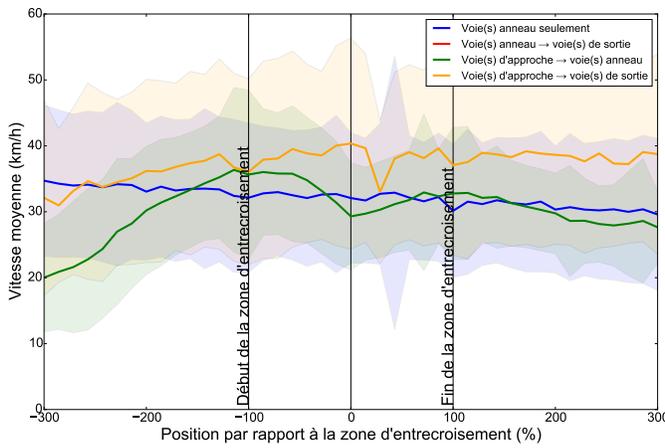
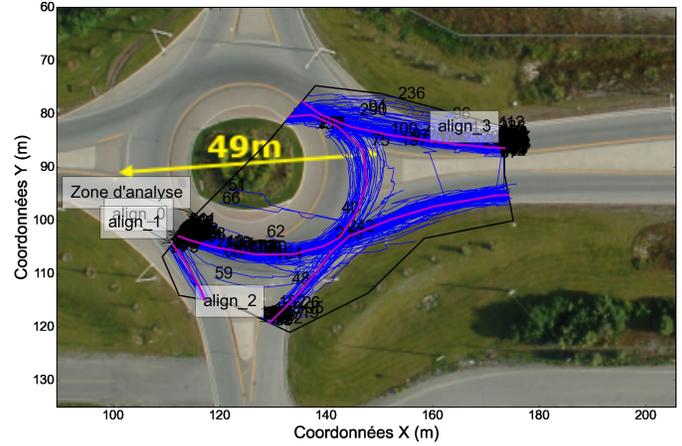
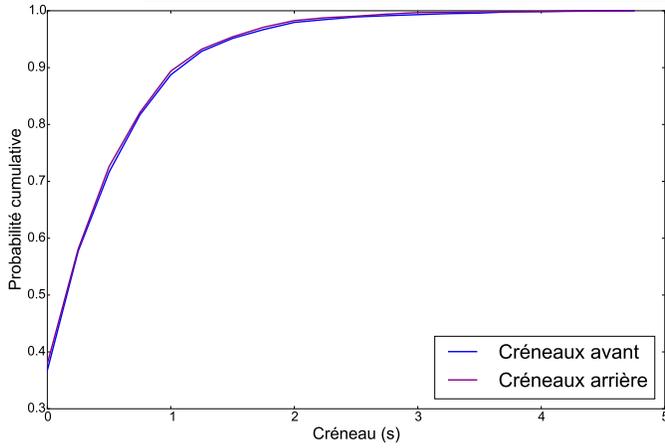
Fiche du carrefour R112/R141, quadrant #1

DJMA* : 2680 véh/j Date : 2013-9-11
 Rapport des débits : 0.27 Heure : 06 :26 :28-18 :30 :09
 Interactions (paires) : 2113 int/j Municipalité : Magog
 Interactions (instants) : 140349 int/j



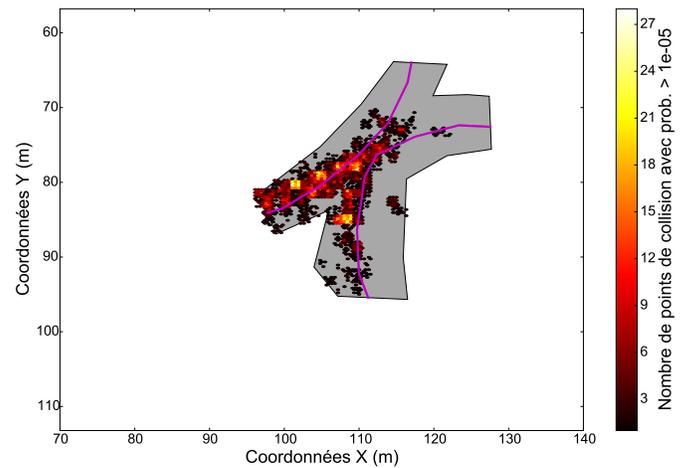
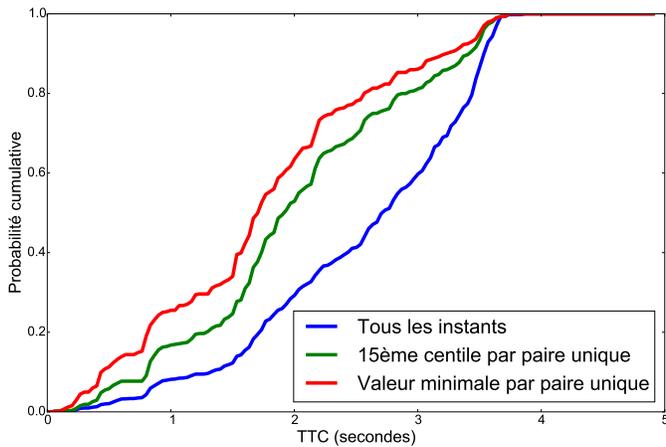
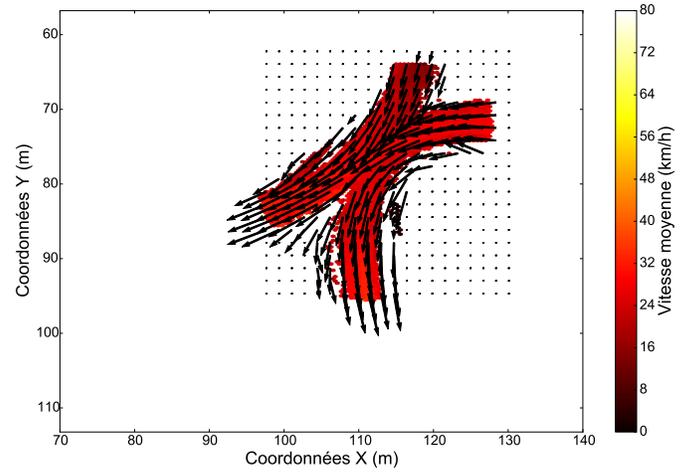
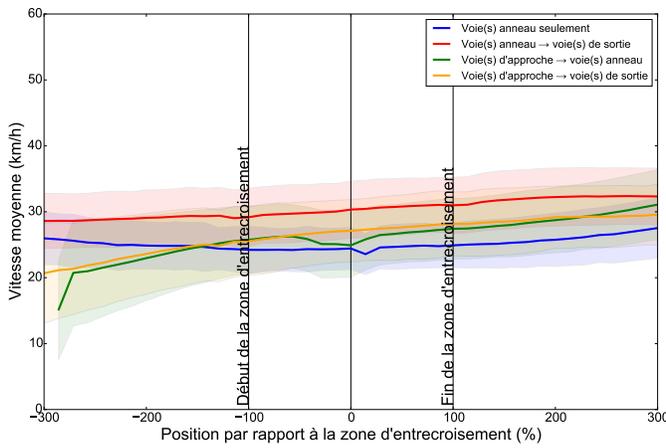
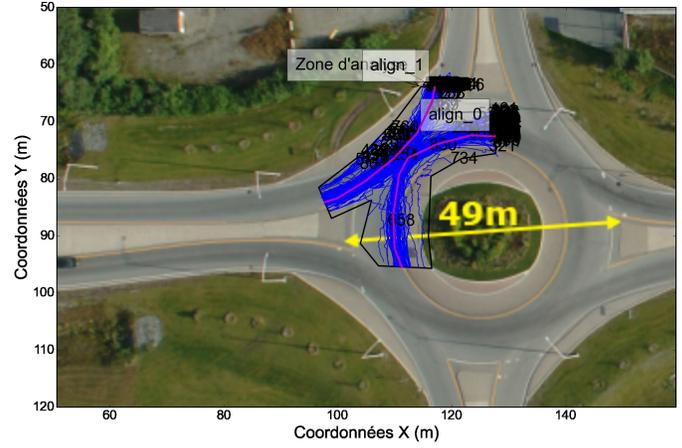
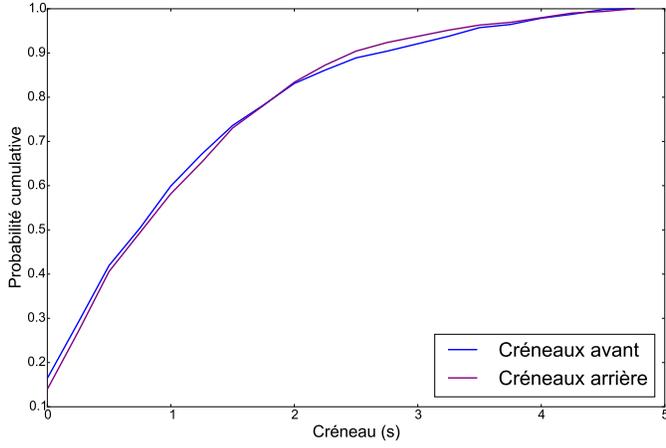
Fiche du carrefour R117/Rue de l'Hydro, quadrant #2

DJMA* : 20820 véh/j Date : 2013-8-29
 Rapport des débits : -0.49 Heure : 06 :00 :00-16 :50 :00
 Interactions (paires) : 52530 int/j Municipalité : Val-d'Or
 Interactions (instants) : 2967467 int/j



Fiche du carrefour R117/Rue de l'Hydro, quadrant #1

DJMA* :	9680 véh/j	Date :	2013-8-29
Rapport des débits :	-0.37	Heure :	06 :00 :00-13 :54 :49
Interactions (paires) :	13729 int/j	Municipalité :	Val-d'Or
Interactions (instants) :	653426 int/j		



B Questionnaire sur les préférences des piétons et leur perception de la sécurité

Les pages suivantes présentent le formulaire de consentement et les questions posées en version française (une version anglaise était aussi disponible).

Sécurité des carrefours giratoires au Québec

Sondage

Cliquez sur « Suivant » pour commencer

Titre du projet de recherche :

Sécurité des carrefours giratoires au Québec (projet financé par le FRQNT)

Équipe de recherche:

Prof. Nicolas Saunier
École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, succ. Centre-ville
Montréal (Québec)
H3C 3A7
Tél. (514) 340-4711 poste 4962
Courriel : nicolas.saunier@polymtl.ca

Prof. Zachary Patterson
Université Concordia
1455, blvd. De Maisonneuve ouest
Montréal (Québec)
H3G 1M8
Tél. (514) 848-2424 poste 3492
Courriel : zachary.patterson@concordia.ca

Mario Cano-Perdomo
Candidat à la maîtrise, Géographie, urbanisme et environnement
Montréal (Québec)
H3G 1M8
Tél. (514) 848-2424 poste 3310
Courriel : icimcp@gmail.com

Préambule :

Nous vous demandons votre aide dans un projet de recherche qui vise à mieux comprendre les perceptions des carrefours giratoires par les piétons au Québec.

Présentation du projet de recherche et de ses objectifs :

L'objectif général de ce projet est d'étudier la sécurité des carrefours giratoires au Québec, au travers des objectifs spécifiques suivants : 1. constituer un inventaire des carrefours giratoires et de leurs caractéristiques au Québec ; 2. évaluer l'impact des carrefours giratoires sur la sécurité par des études des statistiques de collisions avant et après leur construction ; 3. étudier le comportement des usagers, en lien avec la sécurité (étude des

conflits et des infractions), et leur compréhension du fonctionnement des carrefours giratoires par des observations, l'analyse automatique de données vidéo et des questionnaires ; 4. évaluer la cohérence de la signalisation sur les carrefours giratoires et sa compréhension par les usagers ; 5. identifier les risques et besoins particuliers des usagers vulnérables (piétons et cyclistes) ; et 6. établir un ensemble de recommandations pour la conception des carrefours giratoires aux meilleurs niveaux de sécurité au Québec.

Pour atteindre ces objectifs, nous 1. conduirons une analyse statistique des accidents aux carrefours giratoires et à d'autres types de carrefours, 2. utiliserons des enregistrements vidéo de carrefours giratoires pour observer et analyser le comportement et les interactions des conducteurs et 3. conduirons une enquête avec vous pour comprendre votre expérience et perception de la sécurité ainsi que votre compréhension du fonctionnement des carrefours giratoires.

Nature et durée de votre participation au projet de recherche :

Votre participation à ce projet vous exigera à répondre à une série de questions sur vos préférences par rapport aux carrefours giratoires. Toutes vos informations demeureront confidentielles. Le sondage sera d'une durée de 10 à 15 minutes. Si vous acceptez d'y participer, veuillez le compléter.

Afin de participer à l'enquête, vous devez avoir au moins 18 ans et avoir déjà marché dans un carrefour giratoire.

Avantages pouvant découler de votre participation au projet de recherche :

En participant à cette étude, vous contribuerez à la recherche sur les expériences et perceptions de sécurité des carrefours giratoires par les piétons. Si vous le désirez, les résultats de la recherche vous seront envoyés pour vous remercier de votre participation.

Inconvénients pouvant découler de votre participation au projet de recherche :

Votre participation à cette étude occupera de 10 à 15 minutes de votre temps. En dehors de cela, il n'existe aucun inconvénient.

Risques pouvant découler de votre participation au projet de recherche :

Votre participation à cette enquête ne pose aucun risque particulier pour vous. Dans le cas où vous n'êtes pas certain de la réponse à une question, soyez à l'aise de ne pas la répondre.

Compensation financière :

Aucune compensation financière ne vous sera fournie, étant donné que ceci n'est qu'un test pilote du sondage.

Participation volontaire et possibilité de retrait :

Votre participation à ce projet de recherche est volontaire. Vous êtes libre de refuser d'y participer et pouvez à tout moment décider de vous retirer du projet en cessant l'achèvement du sondage.

Confidentialité :

Dès la complétion du sondage, vos réponses seront transmises automatiquement à l'équipe de recherche.

Seules les informations nécessaires pour cette étude seront collectées (par exemple le sexe). L'accès aux données personnelles que vous fournirez sera restreint à l'équipe de recherche décrite dans ce document. Votre information sera gardée sur un disque dur protégé par un mot de passe, sous clef à l'Université Concordia. Cette information ne sera utilisée que pour les objectifs de ce projet de recherche.

Les données du projet de recherche pourront être publiées dans des revues scientifiques ou partagées avec d'autres personnes lors de discussions scientifiques. Toutefois, aucune publication ou communication scientifique ne renfermera quelque information que ce soit pouvant permettre de vous identifier. À des fins de surveillance et de contrôle, votre dossier de recherche pourra être consulté par une personne mandatée par le Comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal et de l'Université Concordia ou encore une personne mandatée par les organismes subventionnaires de recherche. Toutes ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de confidentialité.

Veillez également noter que vous avez le droit de consulter votre dossier de recherche pour vérifier l'exactitude des renseignements recueillis aussi longtemps que le chercheur responsable du projet de recherche, ou l'établissement détiennent ces informations. Cependant, afin de préserver l'intégrité scientifique du projet de recherche, vous n'aurez accès à certaines de ces informations qu'une fois l'étude terminée. Les données seront conservées pour une durée de 10 ans et détruites après cette période.

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche, vous pouvez communiquer avec Mario Cano-Perdomo (514) 848-2424 x 3492 ou encore par courriel (icimcp@gmail.com, carrefoursgiratoiresquebec@gmail.com).

Si vous avez des questions concernant votre participation au projet de recherche, vous pouvez communiquer avec la présidente du Comité d'éthique de la recherche de l'École Polytechnique, Mme Farida Cheriet, au (514) 340-

4711, poste 4277 ou encore par courriel à farida.cheriet@polymtl.ca.

Consentement :

En soumettant ce sondage dûment complété, vous acceptez de participer à ce projet de recherche sujet aux conditions précisées ci-dessus.

Date de formulaire: 11 April 2013

Informations générales :

S.V.P. indiquez votre sexe :

- 1 Homme
- 2 Femme

S.V.P. indiquez votre âge :

- 1 18 - 29
- 2 30 - 39
- 3 40 - 49
- 4 50 - 59
- 5 60 - 69
- 6 70 et plus

Êtes-vous étudiant?

- 1 Oui
- 2 Non

Situation d'emploi :

- 1 Je travail à temps-plein
- 2 Je travail à temps-partiel
- 3 Je suis retraité
- 4 Je suis sans emploi.

Informations concernant votre foyer :

Combien de personnes habitent votre foyer?

- 1 J'habite seul
- 2 2
- 3 3
- 4 4
- 5 5
- 6 6
- 7 7 ou plus

Combien de voitures comptez-vous dans votre foyer?

- 1 Aucune
- 2 1
- 3 2

- 4 3
- 5 4 ou plus

S.V.P. entrez votre code postal entier :

Veillez noter que votre adresse précise ne peut être déterminée à partir de cette information.

Au courant du dernier mois, combien de fois avez-vous traversé un carrefour giratoire?

- 1 Aucune
- 2 1 or 2
- 3 3 or 4
- 4 5 ou plus

Au courant de la dernière semaine, par quel moyen de transport avez-vous traversé un carrefour giratoire?

Automobile (conducteur)

- 1 Jamais
- 2 Parfois
- 3 Toujours

Automobile (passager)

- 1 Jamais
- 2 Parfois
- 3 Toujours

Transport en commun

- 1 Jamais
- 2 Parfois
- 3 Toujours

Vélo

- 1 Jamais
- 2 Parfois
- 3 Toujours

À pied

- 1 Jamais
- 2 Parfois
- 3 Toujours

Selon votre expérience, quel est le niveau de sécurité que vous percevez lorsque vous traversez un carrefour giratoire...

En automobile?

- 1 Pas sécurée du tout
- 2 Plus ou moins sécurée
- 3 Sécurée

En vélo?

- 1 Pas sécurée du tout
- 2 Plus ou moins sécurée
- 3 Sécurée

À pied?

- 1 Pas sécurée du tout
- 2 Plus ou moins sécurée
- 3 Sécurée

Selon votre expérience, lesquelles des situations présentées ci-dessous considérez-vous comme étant dangereuses?

Dangereux en tant que CONDUCTEUR

Dangereux en tant que CYCLISTE

Dangereux en tant que PIÉTON

- 1 Conduite à haute vitesse
- 2 Piétons traversant en présence de véhicules qui conduisent à haute vitesse
- 3 Piétons traversant en présence de pistes cyclables
- 4 Cyclistes en présence de véhicules
- 5 Conducteurs de véhicules cédant le passage imprévisiblement

Qui a la priorité dans un carrefour giratoire?

- 1 Véhicules dans le carrefour giratoire
- 2 Véhicules entrant dans le carrefour giratoire
- 3 Piétons
- 4 Cyclistes

Quelle est la signification des panneaux suivants?



- 1 Cédez-le-passage au trafic dans le carrefour giratoire
- 2 Voie centrale pour virage à droite et demi-tours
- 3 Priorité aux piétons
- 4 Passage pour piétons et cyclistes
- 5 Voie externe pour virage à gauche

TÂCHES À CHOIX DISCRET

Dans chacune des questions suivantes, deux scénarios différents de carrefours giratoires seront présentés. Un ou plusieurs des attributs suivants varieront dans chaque scénario :

Panneaux

Nombre de voies

Présence d'un îlot directionnel

Distance entre le passage pour piétons et l'entrée du carrefour giratoire

Volume de trafic

Vitesse du trafic

Volume de piétons

Vous serez demandé laquelle des options vous préféreriez en tant que PIÉTON. Veuillez tenir compte que les vidéos démontrant les scénarios peuvent prendre quelques secondes à charger. À chaque question, il sera possible de vous rappeler des attributs variables en plaçant votre curseur sur un lien comme celui ci-dessous :

ATTRIBUTS VARIABLES DANS LES SCÉNARIOS



En tant que PIÉTON, quel carrefour giratoire préféreriez-vous?
(Les vidéos peuvent prendre quelques secondes à charger)

Quel est votre tranche salariale?

- 1 Moins de \$20,000
- 2 De \$21,000 à \$40,000
- 3 De \$41,000 à \$60,000
- 4 De \$61,000 à \$80,000
- 5 De \$81,000 à \$100,000
- 6 Plus de \$100,000

MERCI!