

*Étude concernant l'utilisation d'une ligne continue de
délimitation à gauche de la voie 1 (LCGV1) vis-à-vis des entrées
et des sorties d'autoroutes*

Présenté à :

Marie Beauchemin, ingénieure

Service de l'exploitation

Direction du soutien aux opérations

418 644-4490, poste : 2486

Courriel : marie.beauchemin@mtq.gouv.qc.ca

Préparé par

Luis Miranda-Moreno, Dr.¹

Paul St-Aubin, ing. jr, adjoint à la recherche ¹

Nicolas Saunier, ing. jr, Dr.²

¹Département de génie civil et de mécanique appliquée
Université McGill

²Département des génies civil, géologique et des mines
École Polytechnique de Montréal

Novembre 2011

Table des matières

Résumé.....	4
Chapitre 1 : Introduction.....	5
1.1 Problématique	5
1.2 Les objectifs du document	8
1.3 La conception de la LCGV1 et les éléments de la bretelle	9
1.4 Analyse documentaire des études de sécurité traditionnelle et de substitution, et comparaison	12
Chapitre 2 : Sélection des sites et acquisition des données	15
2.1 La sélection des sites pour l’analyse des données d’accidents	15
2.2 Les variables de conception géométrique	19
2.3 Le débit routier aux bretelles	26
2.4 Les données d’accidents : sources et répartition spatiale.....	28
Chapitre 3 : Analyse des accidents et résultats	30
3.1 Analyse exploratoire	30
3.2 Analyse statistique	38
Chapitre 4 : Collecte des données vidéo	44
4.1 Les sources de données vidéo du MTQ et leurs limitations	44
4.2 La construction d’un outil de collecte de données vidéo.....	47
4.3 La collecte de données vidéo : sélection des sites et enjeux.....	51
4.4 Le prétraitement des données vidéo.....	55
Chapitre 5 : Analyse des données vidéo	57
5.2 Les résultats de l’analyse de conflit	65
5.2.1 Étude cas-témoin.....	65
5.2.3 Analyse supplémentaire	84
Chapitre 6 : Conclusions et orientations pour de futurs travaux.....	87
6.1 Conclusions de recherche	87
6.2 Recommandations immédiates	89
Remerciements.....	90
Références.....	90
Appendice	93

Résumé

L'objectif de cette étude de sécurité des autoroutes est d'examiner l'efficacité d'une ligne de marquage au sol (désignée sous le nom technique LCGV1) visant à interdire le changement de voie aux usagers sur les autoroutes. Cette ligne a été appliquée sur des sections d'autoroute en zone urbaine au niveau des bretelles de sortie et d'entrée, dans la région métropolitaine de Montréal. Elle est utilisée depuis quelques années sur des sections d'insertion de bretelles inférieures aux normes. Cependant l'aspect sécuritaire de cet aménagement n'a jamais été formellement évalué. Cette étude vise donc à examiner l'efficacité de la LCGV1 afin de savoir si cette ligne doit être normalisée et son application élargie aux bretelles d'autoroutes du Québec. Lors de notre travail, d'importants efforts ont été réalisés pour élaborer une méthodologie originale ainsi que pour rechercher et combiner différentes sources de données.

Pour cette étude, nous avons suivi deux approches distinctes. La première consiste en une analyse traditionnelle des accidents et la deuxième en une analyse de substitution (ou de conflit). L'analyse transversale des accidents se base sur un modèle de régression et sur un inventaire de sites comprenant les débits, les données géométriques et les données historiques des accidents. L'analyse substitutive de sécurité explore comme mesure de conflit le temps estimé avant collision TEC (*time-to-collision TTC*) qui est calculé à partir de l'extrapolation automatique de données vidéo de trajectoires de véhicules. Cette mesure de conflit est utilisée pour définir le type de comportement microscopique et les interactions contradictoires.

Notre étude conclut généralement que pour tous les sites sous analyse, la ligne LCGV1 ne conduit pas à des changements appréciables de survenue d'accident, pas plus qu'elle ne produit des configurations différentes de répartition des conflits. Les facteurs géométriques semblent jouer un rôle plus actif dans la survenue d'accident et dans la répartition des temps estimés avant collision TEC. L'étude a permis de remarquer l'existence d'un écart significatif entre les facteurs contributifs et les résultats, et d'observer un léger effet de migration des accidents. Les conclusions ont conduit aux recommandations suivantes (i) l'efficacité de la LCGV1 en matière de sécurité n'est pas prouvée ou est négligeable dans la plupart des cas à l'étude, aussi (ii) la LCGV1 ne devrait pas être appliquée systématiquement. Il est possible cependant d'y recourir dans certains cas. Davantage d'analyses et d'éléments probants sont nécessaires pour définir les conditions optimales d'efficacité de ce marquage au sol.

Chapitre 1 : Introduction

1.1 Problématique

Cette étude de sécurité routière examine l'efficacité d'une ligne de marquage au sol appelée « ligne-de-délimitation-continue-à-gauche-de-la-voie-1 (désignation technique : LCGV1) ». Ce marquage est comparable à une ligne d'interdiction de changement de voie qui vise à décourager tout rabattement allant de l'intérieur vers la première voie (ou voie extérieure, en excluant les voies d'insertion et les voies auxiliaires), mais il permet les changements dans le sens opposé. La LCGV1 prend la forme d'une double ligne peinte au sol entre la première et la deuxième voie. La ligne proche de la deuxième voie est continue, tandis que celle proche de la première voie est discontinue.

Bien que l'utilisation de la LCGV1 s'étende au-delà de la zone d'insertion pour de nombreuses sorties, cette ligne est tout d'abord conçue de manière à encourager les usagers à s'engager tôt sur la première voie ou pour protéger les usagers entrant sur l'autoroute de ceux présents sur les voies intérieures. Les véhicules déjà engagés sur la première voie peuvent y rester. La **Figure 1** schématise la LCGV1, les comportements modèles des usagers y sont représentés. La **section 1.3** propose une discussion détaillée des mécanismes théoriques à l'origine du marquage.

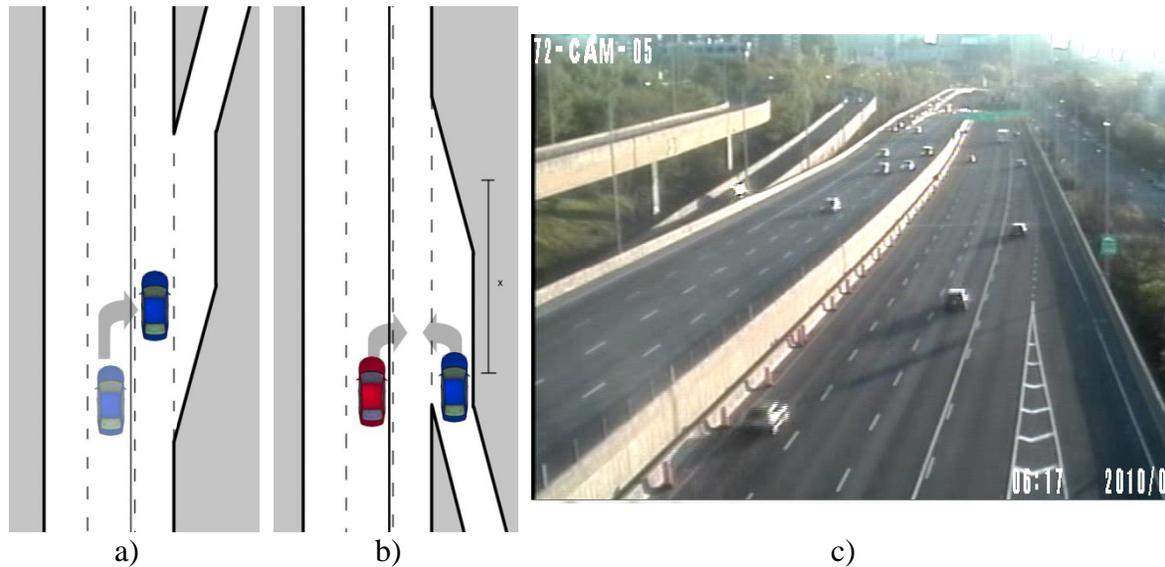


Figure 1 – Conception LCGV1 typique. a) Sortie d'autoroute avec LCGV1, dissuadant les changements de voie de dernière minute en interdisant les usagers de sortir de l'autoroute depuis la deuxième voie ou les voie intérieures. b) Entrée d'autoroute avec LCGV1, dissuadant les usagers de

la deuxième voie ou des voies de l'intérieure de nuire à l'insertion des usagers entrant. c) Autoroute et entrée avec LCGV1; Autoroute 720 "Ville-Marie" en direction est, entrée 3, "Avenue Greene", vue depuis Cam720-05-DirEst.

Ce dossier remonte à plus de 20 ans, probablement autour de l'année 1987. La ligne LCGV1 a d'abord été proposée, évaluée et appliquée sur un site unique : la bretelle de sortie Christoph-Colomb sur l'autoroute 40 à Montréal. L'idée directrice était d'inciter les usagers à s'engager rapidement sur la bretelle de sortie, celle-ci étant de courte longueur. Le marquage a par la suite été reproduit sur d'autres courtes bretelles d'entrée et de sortie sur la portion élevée de l'autoroute 40 à trois voies dans chaque direction, « l'autoroute métropolitaine » à Montréal, toujours en réponse à des conditions d'entrée et de sortie *inférieures* sur cette autoroute. Cependant la prolifération de la ligne s'est produite sans que celle-ci soit normalisée.

Il est important de noter qu'au Québec la LCGV1 s'est multipliée sur différentes autoroutes ainsi que sur les entrées. Pourtant l'aspect sécuritaire de la ligne sur d'autres sites n'a jamais été évalué, et jusqu'à ce jour, aucune étude sur l'efficacité de ce marquage au sol n'a été faite. De plus, il n'existe pas d'emplacement normalisé pour le début ou pour la fin de la ligne, ni de formule établie ou de longueur calculée de conception de la LCGV1. Généralement cette longueur couvre les zones d'entrée et de sortie, et souvent s'étend bien au-delà. En fait, parfois certaines lignes contigües sont tellement longues qu'elles se chevauchent, d'autres fois l'espacement entre celles-ci est de moins de 50 m. La LCGV1 s'étend sur la majeure partie de diverses sections d'autoroute, ce qui provoque de vives critiques quant à son utilité et pose la question du bien-fondé de la restriction des changements de voies en rapport avec la fluidité de la circulation et la sécurité routière. D'autres questions ont été soulevées concernant le respect de la ligne par les usagers, la difficulté du contrôle de l'application et la possibilité que la LCGV1 désoriente les usagers ne connaissant pas la zone.

Bien que la bretelle d'échangeur associée serve de référence à chaque site, la portée de l'analyse se situe sur la section d'autoroute qui précède ou qui suit immédiatement les bretelles, là où la LCGV1 est appliquée -ou serait appliquée, et non sur les bretelles en soi. Cette région s'appelle la zone d'influence de la bretelle et mesure généralement 450 m de long. Elle est documentée par le FHWA dans le manuel « *Highway Capacity Manual (HCM) 2000* » (voir **section 2.2** pour de plus amples détails).

La notation utilisée pour les bretelles d'autoroute dans cette étude suit le format suivant *A20-E-E56-3*, où la première lettre représente le réseau routier (A = autoroute, I = route inter-état, etc.), le nombre suivant représente le numéro de l'autoroute, suivi d'un tiret puis d'une lettre indiquant la direction (E = est, O = ouest, N = nord, S = sud), suivi d'un autre tiret puis d'une lettre pour le type de bretelle (E = entrée, S = sortie), suivi par un nombre représentant le repère kilométrique correspondant. Le dernier nombre optionnel représente le numéro d'une bretelle, dans un ordre descendant, lorsque l'échangeur a plusieurs entrées et sorties.

La **section 1.2** se concentre sur les objectifs de l'étude en approfondissant le débat sur l'efficacité de la LCGV1. La **section 1.4** résume les méthodes utilisées. Le **chapitre 2** traite des collectes des données des accidents, de la géométrie et de la circulation. Ces données sont soumises à des méthodes statistiques qui sont décrites ainsi que leurs résultats dans le **chapitre 3**. Le **chapitre 4** couvre les méthodes de collecte des données vidéo avec les inventaires. L'analyse de ces méthodes ainsi que les résultats sont présentés dans le **chapitre 5**. Le **chapitre 6** soumet des recommandations sur la conception du marquage à partir des résultats trouvés dans les chapitres 3 et 5.

1.2 Les objectifs du document

Ce document a pour objectif de répondre aux questions suivantes : (i) est-ce qu'en matière de sécurité routière, la ligne LCGV1 est efficace ? et (ii) est-ce que ce marquage doit être normalisé et généralisé sur l'ensemble des bretelles d'autoroute du Québec ?

Afin de répondre à ces questions les objectifs précis de cette étude sont les suivants :

1. La réalisation d'une analyse documentaire sur la sécurité des autoroutes au niveau des bretelles et en particulier concernant les stratégies de marquage au sol.
2. L'élaboration d'une analyse transversale de fréquence des accidents basée sur les données historiques d'accidents, afin d'établir l'effet de la ligne LCGV1 sur la survenue d'accident.
3. L'analyse de l'effet de la LCGV1 sur le comportement du conducteur et sur la sécurité, en comparant des bretelles avec ou sans ligne LCGV1.

Cette recherche élabore et utilise deux méthodes distinctes et complémentaires afin de répondre à ces questions. Auparavant, l'analyse historique traditionnelle était considérée comme le « passage obligatoire » de toute recherche. Cependant, du fait d'un manque de données historiques (notamment des spécifications de conception et des dates de l'application originale de chaque ligne) et en raison de problèmes de géocodage des accidents, l'analyse historique a été complétée par des méthodologies transversales et d'analyse vidéo, chacune avec ses avantages et ses inconvénients. Un seul site disposait de données vidéo avec et sans ligne LCGV1, ce site a par conséquent été étudié lors d'une analyse avant-après.

1.3 La conception de la LCGV1 et les éléments de la bretelle

Avant de commencer l'analyse de la LCGV1, il faut bien comprendre les principes de conception, ainsi que les éléments caractérisant cette conception. Malgré le manque de normalisation et une apparence simple sur la chaussée, le marquage à l'étude est en fait un élément complexe, particulièrement en ce qui concerne son emplacement vis-à-vis des autres éléments routiers.

Comme déjà mentionné, la LCGV1 a initialement été conçue pour A40-E-S73 (Christophe Colomb, autoroute 40), à la sortie d'un viaduc dont la bretelle d'insertion est particulièrement courte, avec une signalisation médiocre, cela dans le but d'éviter que les véhicules s'engagent trop tard sur les voies extérieures. Sous la pression de diverses agences, le marquage s'est répété sur d'autres sorties et entrées, sans analyse approfondie. Le problème est que la conception de la ligne n'a jamais été examinée pour d'autres sites et en particulier pour les entrées.

Afin de comprendre le raisonnement à l'origine de la conception de la LCGV1, on doit analyser le comportement des usagers dans les diverses régions d'influence, comme défini dans le HCM 1985 (le manuel de conception utilisé lorsque la ligne a été proposée pour la première fois), le HCM 2000 et par les régions soumises au marquage. Le lecteur est aussi invité à consulter le rapport original du MTQ qui souligne le débat lancé au sujet de l'origine, de la conception et de la normalisation de la ligne (1).

La **Figure 2** illustre les sous-régions d'une bretelle avec marquage, avec les délimitations imposées par les changements de géométrie, LCGV1 incluse. Chaque bretelle avec marquage comprend cinq zones. Les bretelles sans marquage ne se distinguent pas par des zones protégées et non protégées, elles comprennent donc un total de trois zones.

Dans la zone de « pré-sortie », en amont des bretelles de sortie, les conducteurs doivent être dynamiques en ce qui concerne les décisions de navigation et les opérations de contrôle pour s'insérer sur la première voie, en anticipation des manœuvres de sortie. La LCGV1 commence toujours dans cette zone, sauf s'il y a chevauchement avec une ligne en amont. D'après le HCM 1985, la zone d'influence de la bretelle de sortie débute dans cette zone, à 762 m en amont de la sortie (bien que le centre de la bretelle ne soit pas clairement défini). Dans le HCM 2000, cette longueur a été écourtée à 450 m. Dans la zone de sortie, les véhicules sortant s'insèrent sur la bretelle de sortie ou sur la voie auxiliaire qui conduit éventuellement à la sortie de l'autoroute. Certains véhicules sur les

deuxième et troisième voies de la zone de sortie peuvent aussi tenter un rabattement de dernière minute afin d'accéder à la zone de sortie ou à la voie auxiliaire. Ce type de comportement est généralement découragé de par l'objectif premier de la ligne. La zone de « post-sortie » est caractérisée par un débit égal ou inférieur à celui en amont. Souvent alors que toute manœuvre de sortie a pris fin, l'utilisation de la ligne est étendue sans raison jusqu'à cette zone. Dans certains cas extrêmes, des conducteurs empiètent sur les chevrons pour faire une sortie de dernière minute. C'est peut-être pour cette raison que le HCM 1985 étend la zone d'influence de la bretelle à 152,4 m en aval de la sortie. Le HCM 2000 élimine complètement cette mesure.

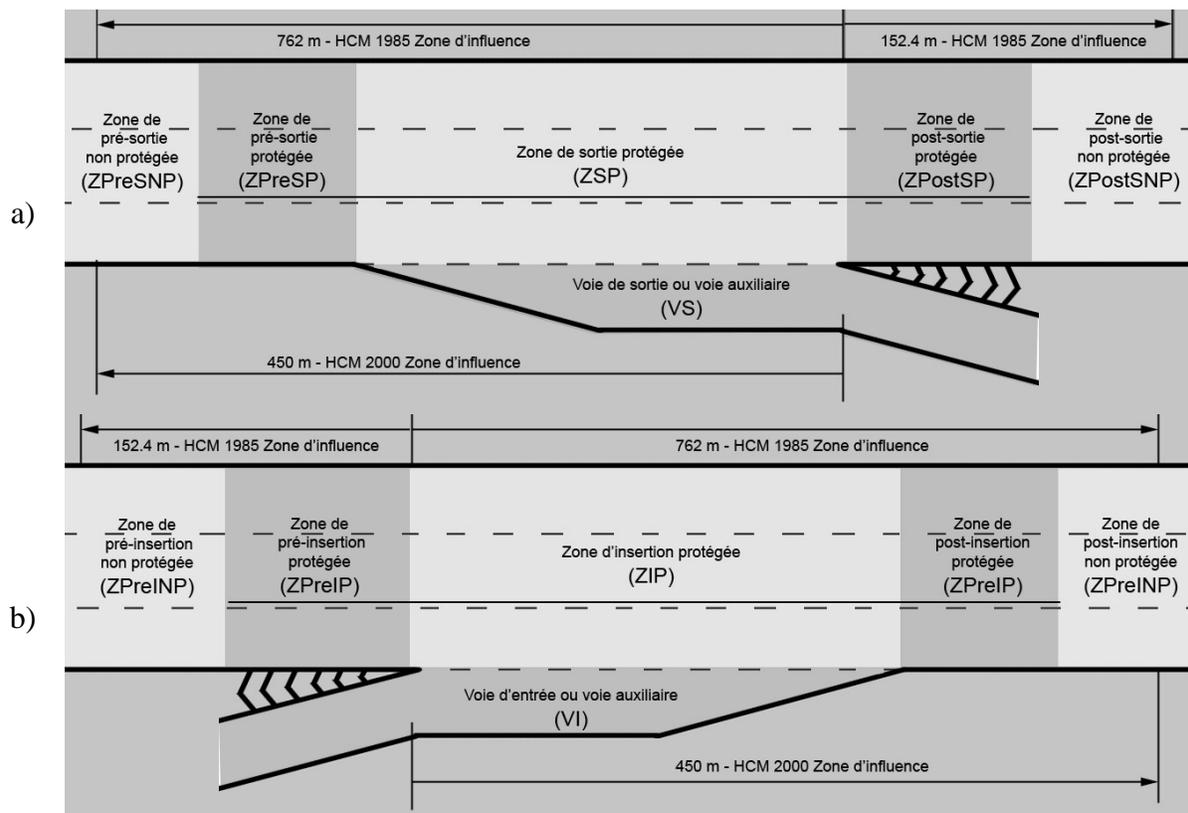


Figure 2 – Sous-sections délimitées par géométrie et marquage LCGV1 : a) bretelle de sortie; b) bretelle d'entrée. Les bretelles sans marquage LCGV1 n'ont pas de zone protégée; la zone de sortie non protégée (ZSNP) et la zone d'insertion non protégée (ZINP) correspondent donc aux emplacements de la ZSP et de la ZIP respectivement.

Les entrées sont un peu plus complexes. Dans la zone de « pré-insertion », en amont de la bretelle d'entrée, les véhicules amorcent leur approche de la bretelle. Dans cette zone, les usagers sur la première voie doivent être alertes à tout conflit potentiel avec les véhicules prêts à entrer sur l'autoroute. On comprend que la ligne directe de visibilité est alors essentielle. Bien que selon la loi du Québec, les véhicules s'insérant doivent céder le passage aux véhicules sur l'autoroute, il est communément accepté et sécuritaire que les véhicules sur l'autoroute cèdent le passage et assistent les véhicules

s'insérant lorsque nécessaire. Le HCM 1985 établit le commencement de la zone d'influence à 152,4 m en amont de l'entrée, alors que le HCM 2000 ne préconise pas de débiter la zone d'influence avant la bretelle. Dans la zone d'insertion, les véhicules doivent entrer sur la première voie, il est donc avantageux de la maintenir dégagée, particulièrement d'éviter que les usagers sur les deuxième et troisième voies s'insèrent sur la première voie. La zone de « post-insertion » constitue pour les usagers une zone de transition permettant de suivre les créneaux appropriés. Le HCM 1985 étend la zone d'influence de cette bretelle à 762 m dans cette zone. Le HCM 2000 convient d'une distance de 450 m en aval de la bretelle d'entrée. On note également l'habitude de certains conducteurs de s'insérer au-delà de la zone d'entrée, depuis l'accotement, peut-être à cause de difficultés à trouver une ouverture dans la circulation ou à cause d'une accélération tardive. De la même façon, on constate parfois des conducteurs s'insérant très tôt, par exemple, dans la zone des chevrons.

Les équations de conception actuelles prévoient des zones d'influence appropriées. Lorsque la zone d'influence de la bretelle en chevauche une autre, on peut s'attendre à ce que le comportement des conducteurs soit complexe, avec des configurations de débit qui dépendent fortement de la proximité des deux bretelles, des débits relatifs et des types de bretelle. Pour sa part, la LCGV1 est à l'origine de bien des critiques, particulièrement parce que certaines sections d'autoroute ont une densité d'échangeurs telle que les lignes LCGV1 s'étendent sur pratiquement toute, si ce n'est pas sur toute, la longueur de l'autoroute, empêchant tout changement de voie vers l'extérieur sur un ou plusieurs kilomètres. Le HCM 2000 couvre seulement certaines catégories de bretelles selon un ensemble d'équations de prédiction du débit. Outre la longueur de la bretelle et la longueur de la zone d'insertion associée au débit, peu de mesures de conception de bretelle précises sont publiées. Une analyse détaillée des mesures géométriques et des caractéristiques de bretelles d'autoroute est présentée en section 2.2.

1.4 Analyse documentaire des études de sécurité traditionnelle et de substitution, et comparaison

Il existe deux approches très répandues en matière de sécurité routière. La première repose sur une analyse traditionnelle d'accidents et la deuxième sur une analyse de substitution basée sur l'étude des conflits. Ces deux approches complémentaires sont examinées séparément puis associées pour une analyse approfondie. Les avantages et les inconvénients de chaque approche sont commentés ci-dessous.

L'approche traditionnelle basée sur une analyse statistique des données historiques d'accidents est bien connue. Une grande partie de la documentation actuelle décrivant les analyses de sécurité des autoroutes, notamment sur les bretelles et sur les marquages au sol, repose sur des méthodes traditionnelles. Ces méthodes comprennent l'étude classique d'observations avant-après et l'étude transversale basée sur des techniques de régression. Malgré la robustesse de cette technique bien établie, on doit noter certains inconvénients en ce qui concerne notre étude (2) (3). Premièrement le manque de précision provenant de rapports d'accident incomplets ou erratiques : il peut s'agir de données de localisation géographique qui sont manquantes ou approximatives, ou qui sont réinterprétées lors de la constitution de la base de données. Par exemple, pour cette étude, les rapports de la police du Québec ne fournissaient pas de coordonnées géographiques marquant les emplacements des accidents. Par ailleurs, malgré l'existence d'un formulaire de rapport, beaucoup de ceux-ci sont remplis avec différents degrés de précision et omettent parfois des informations rétrospectivement importantes, informations qui doivent être réinterprétées par le personnel de compilation. On remarque aussi une insuffisance de l'enregistrement des accidents, particulièrement pour les incidents mineurs, et des limitations dans la conception du formulaire (manque de détails concernant les conditions géométriques, météorologiques et sur le milieu en général).

Bien qu'une analyse substitutive de sécurité soit moins commune, il ne s'agit pas d'un nouveau sujet de recherche. Beaucoup d'articles de sécurité routière commentent positivement ou négativement l'utilisation d'une analyse de conflit comme mesure adéquate de la sécurité, à la fois sur le plan de la sévérité et de la fréquence des collisions. Le lecteur est invité à consulter (2), (4) et (5) pour un résumé des résultats d'études de conflit. Un argument récurrent allant contre les études de conflit repose sur la difficulté d'obtenir des données en quantité suffisante et objectivement mesurées ainsi qu'une définition trop vague de l'application de la méthodologie.

Cependant, il est actuellement plus facile d'obtenir des données objectives pour les analyses substitutives de sécurité grâce aux progrès effectués en matière d'algorithmes de suivi vidéo, à des capacités de traitement plus économiques, à une

meilleure gestion des données et à l'émergence de systèmes de technologie de l'information des transports. Les analyses vidéo en génie de la circulation font l'objet d'une utilisation en forte croissance. De nombreuses études de comportement des usagers sont basées sur des données réunies grâce à des caméras [voir Sarvi et coll. (6)], des données vidéo ont été utilisées pour l'étalonnage de simulations et en théorie de la circulation routière [voir le programme NGSIM (7)], et certaines entreprises proposent à présent des solutions de comptage automatique par vidéo détection. L'analyse automatique de données vidéo pour l'étude de conflit a été approfondie et extensivement utilisée par Sayed, Saunier et Ismail principalement pour l'étude de la sécurité aux intersections, dont l'analyse des conflits entre véhicules (8), entre véhicule et piéton (3) (9) et autres.

La vision par ordinateur pour l'analyse automatique de données vidéo de la circulation routière connaît un intérêt croissant. Il s'agit d'un élément clé en matière de développement de mesures précises qui permet d'obtenir des données de circulation multiples le long de sections de routes. Versavel propose la liste suivante :

- Les données de circulation : le débit, la vitesse, la densité, le temps inter-véhiculaire et la position.

- Les données individuelles de véhicule : le comptage, la vitesse (accélération), la longueur du véhicule, la catégorie, le type et la position (10).

Le lecteur est invité à consulter (11), (12) et (13) pour de plus amples informations sur les spécificités du suivi de véhicule à l'aide de points caractéristiques.

Des études antérieures définissent les avantages principaux de l'analyse automatique de données vidéo pour la sécurité routière. Ceux-ci sont doubles. Premièrement, elle constitue une méthode pratique et économique de mesurer des paramètres du comportement du conducteur, adaptée à des chaussées diverses et à différentes régions (sans avoir recours à une installation d'équipement de contrôle intrusif). Deuxièmement, elle fournit un outil souple, capable d'analyser des comportements complexes, ce qui est particulièrement utile lors d'une analyse microscopique de la sécurité routière dans le cadre d'une démarche de substitution.

Cependant, la vidéo analytique n'est pas sans limitations, par exemple, la complexité des algorithmes de vision par ordinateur, la sensibilité -au champ de vision et à la visibilité- ainsi que les difficultés liées au suivi de véhicules individuels dans des conditions de densité de circulation élevée. La précision des mesures dépend fortement de la qualité de l'installation de la caméra ainsi que des conditions de débit. À cet effet, du matériel mobile conçu pour les opérations de collecte de données vidéo est en voie de développement, en particulier pour la collecte de données au niveau des autoroutes. Les conditions météorologiques (visibilité), les obstacles (panneaux de signalisation, poteaux, passages supérieurs), le champ de vision et l'angle de la caméra, les sections d'autoroute

courbes, et les occlusions dues à une circulation dense et aux longs véhicules (camions) constituent autant de sources potentielles de suivi erratique. Il est possible de parvenir à une plus grande précision en limitant les problèmes de ligne visuelle. Bien sûr, beaucoup de ces limitations ne sont spécifiques à aucune technologie de suivi de trajectoire en particulier, ni à l'observateur humain. Dans des conditions idéales, le taux de précision de détection de circulation au moyen d'une analyse automatique de données vidéo se situe dans un intervalle de 95 à 99 % pour une reconnaissance basique (10). Les mesures de performance des algorithmes de suivi sont cependant moins clairement définies et rendent les résultats de différents systèmes difficiles à comparer. L'analyse automatique présente l'avantage significatif de ne pas avoir de baisse d'attention, ni de faire d'erreurs de jugement. Sa mesure des vitesses et des positions est continue. Finalement, l'analyse de données vidéo peut être utilisée comme un outil de collaboration où de grandes quantités de données vidéo sont filtrées automatiquement pour être interprétées par les experts en sécurité routière.

L'origine des algorithmes utilisés pour l'analyse de conflit est relativement élaborée, elle sera approfondie au chapitre 5.

Chapitre 2 : Sélection des sites et acquisition des données

Le chapitre 2 présente les méthodes de sélection des sites et d'acquisition des données. Plusieurs considérations sont ensuite émises et les limites et contraintes associées à cette approche sont soulignées. Un inventaire des données est collecté sur les sites sélectionnés, celui-ci comprend les facteurs contributifs potentiels affectant, en matière de sécurité, les éléments routiers sous analyse. Ces facteurs sont à ajuster lors de l'analyse transversale. Cela est réalisé en suivant les directives de la documentation sur la sécurité des autoroutes et en reconnaissant les facteurs contributifs représentatifs associés à la survenue d'accident tels que les caractéristiques géométriques et les conditions de circulation. Des données historiques d'accidents sont aussi utilisées pour définir les facteurs contributifs associés à la survenue d'accident, en particulier, l'effet de la ligne LCGV1. Ces données historiques d'accidents proviennent de deux sources distinctes. Chaque ensemble de données présente des avantages et des inconvénients à prendre en compte.

2.1 La sélection des sites pour l'analyse des données d'accidents

La sélection de sites adaptés et représentatifs est déterminée par un ensemble de contraintes. Les sites (bretelles) doivent être situés sur l'Île de Montréal, étant donné qu'il s'agit du territoire à l'étude. De plus, en sélectionnant les sites dans la même ville, on s'assure d'une certaine cohérence en ce qui concerne la conception des routes et les comportements des usagers. Par ailleurs, l'obtention de données comparables en provenance de régions éloignées est logistiquement complexe. Lors de la sélection des sites, les critères suivants sont pris en compte :

- *Le milieu* : urbain/semi-urbain sur l'Île de Montréal
- *La configuration géométrique* : une configuration de trois voies principales et d'une voie d'insertion, les voies auxiliaires sont évitées, on considère les jonctions mineures seulement.
- *Les autoroutes majeures* : 80 000 + DJMA/direction, vitesse à écoulement libre de 60-100 km/h min-max, heures régulières matin/après-midi, heures de pointe.
- *Débit de circulation et données d'accidents* : les sites considérés sont ceux disposant de données de circulation microscopiques (rassemblées manuellement par une équipe de chercheurs ou par des détecteurs à boucle magnétique du MTQ) et de données d'accidents.
- *Équilibre de l'échantillon* : une quantité égale d'entrées et de sorties disposant chacune de données avant et après l'utilisation de la ligne. Ou une sélection aléatoire afin de limiter les effets de biais de sélection.

Comme noté dans le dernier point, il est souhaitable d'éviter les biais de sélection par une sélection aléatoire. Bien sûr, le pool n'est pas représentatif de chaque site car certains d'entre eux ont des données manquantes et donc ne peuvent pas être inclus. On retient que les sites écartés pour cause de données manquantes le sont purement en raison de contraintes logistiques et ne biaisent pas les sites restants en terme de facteurs. Les sites éliminés pour non-conformité au critère de cohérence géométrique n'influencent pas les résultats et donc peuvent être ignorés.

Les sources de données géométriques, historiques d'accidents et de circulation sont les suivantes :

- *Les données géométriques* : ces données sont publiques et accessibles sur les sites *navurb.com*, *Google Maps*, *Google StreetView* ou sur les banques d'images satellites. L'intervalle des erreurs de mesure est de 100 à 400 mm. Voir section 2.2.
- *Les données de débit de circulation* : pour certains sites, un détecteur à boucle a recueilli ces données. Pour d'autres sites, elles ont été manuellement collectées lors de visites de terrain et par vidéo (avec observateurs). Des coefficients de redressement propres aux sections d'autoroutes (sites permanents) ont servi à corriger les comptages manuels, et ceux provenant du détecteur à boucle, afin de produire le DJMA. Pour chaque bretelle, les débits en amont, en aval et de la bretelle ont été estimés selon des considérations expliquées plus loin. Voir section 2.3.
- *Les données historiques d'accidents* : elles proviennent des rapports de la police provinciale et des services paramédicaux, et sont fournies respectivement par la SAAQ et Urgences-santé. Voir section 2.4.

Le comptage de toutes les bretelles d'autoroutes d'accès limité sur l'Île de Montréal est présenté sur le **Tableau 1**. Les jonctions mineures se distinguent des jonctions majeures par un nombre constant de voies en amont et en aval des bretelles, ce qui n'est pas le cas pour les jonctions majeures. Les entrées à gauche de l'autoroute constituent une exception car ces bretelles se situent sur la partie intérieure de la section d'autoroute. Voir section 2.2 pour plus de détails. À noter que bien que l'on observe sur l'autoroute 40 la densité de bretelle moyenne la plus faible, la variabilité de la densité est considérable, avec des densités de bretelles très faibles aux extrémités est et ouest de Montréal et des densités de bretelles très fortes sur la portion élevée de l'autoroute métropolitaine.

Tableau 1 – Total des bretelles sur l’île de Montréal, selon type et autoroute.

Autoroute	Bretelles	Jonctions Majeures	Entrées gauches	Total	% Tout	Densité
20, 720	65	14	1	80	25.32%	1.09/km
40	87	18	0	105	33.32%	1.00/km
520	23	0	0	23	7.28%	1.58/km
13, (138)	25	5	0	30	9.49%	1.31/km
10, 15, (117)	39	11	2	52	16.46%	1.21/km
25	13	12	1	26	8.23%	1.55/km
Total	252	60	4	316		
Moyenne	42	10	0.667	52.667		1.29/km
% Tout	79.75%	18.99%	1.27%			

Le **Tableau 2** correspond à la liste de la population et de la sous-population des sites par catégorie pour chaque critère appliqué. Il existe actuellement 252 bretelles d’autoroute d’accès limité sur l’Île de Montréal (selon les critères de sélection). Sur ces 252 sites, il est possible d’extraire facilement les données géométriques de 247 sites (les tunnels cachent les sections d’autoroute des capteurs d’imagerie satellite). Sur ces 247 sites, 185 sont écartés pour cause de données erronées et de difficultés d’accessibilité (valeur aberrante de débit, de polarisation, géométriques, etc), il reste alors 62 sites (illustrés en **Figure 3**). Sur ces 62 sites, 47 possèdent des données de circulation détaillées et sont conservés. Sur ces 47 sites, 23 disposent de données d’accidents de la SAAQ (données de localisation médiocres, mais rapports détaillés) et 47 possèdent des données d’accidents provenant d’Urgences-santé (bonne localisation, mais moins de détails).

Tableau 2 – disponibilité des données après intersection des contraintes.

Critère	Intersection avec	Nombre de sites disponibles
Montréal	-	252
Données géométriques	Montréal	247
Similarité des sites	Données géométriques	62
Données de débit	Similarité des sites	47
Données d’accidents SAAQ	Données de débit	23
Données d’accidents	Données de débit	47
Urgences-santé		

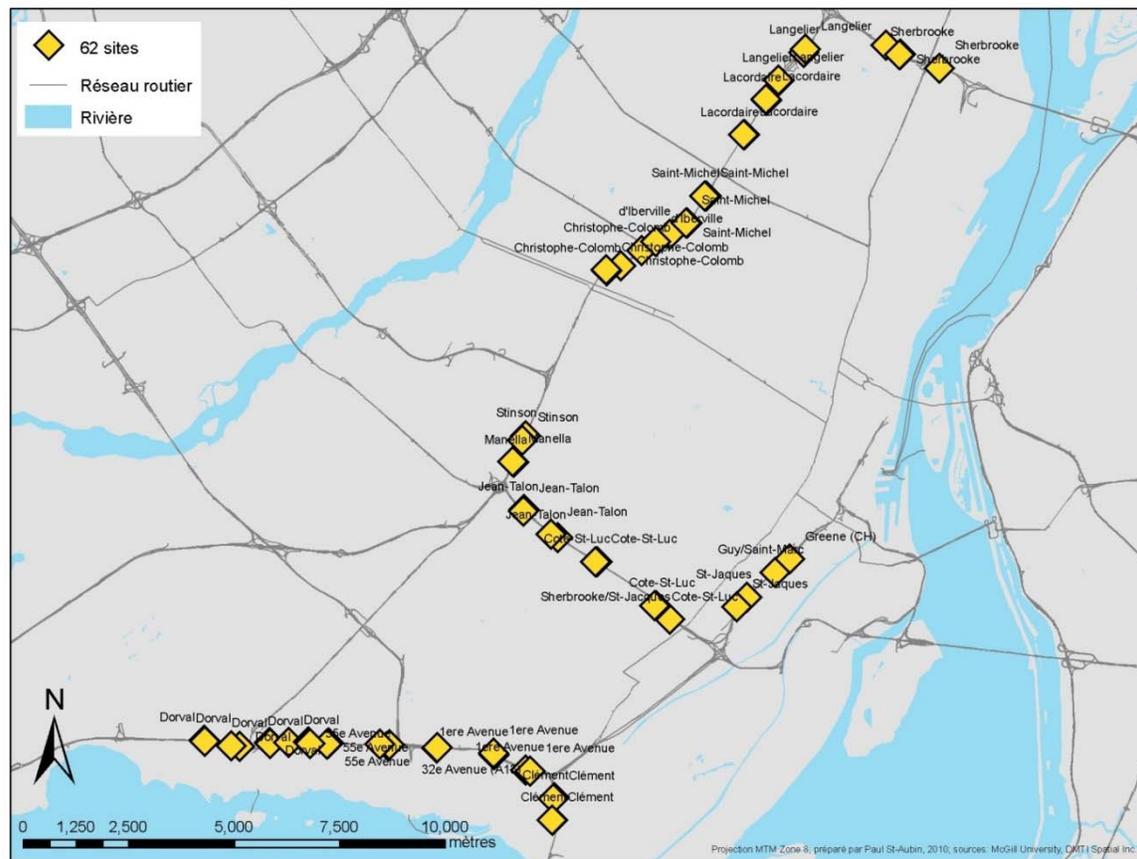


Figure 3 – Carte des entrées et des sorties avec et sans LCGV1 choisis selon la similarité géométrique et des débits.

2.2 Les variables de conception géométrique

La **Figure 4** illustre les éléments représentatifs de la conception géométrique pour les sections d'insertion d'autoroute. Ces éléments sont choisis, dans le cadre de l'inventaire de conception géométrique utilisé pour cette étude, en suivant la théorie de la circulation routière, la théorie de sécurité des autoroutes (HCM 2000) et les observations faites en (1). Les jonctions mineures conservent un nombre constant de voies principales (numéroté par ordre croissant de l'extérieur vers l'intérieur) en amont et en aval de toute bretelle, tandis que les jonctions majeures ont moins de voies en aval des bretelles de sortie et ont plus de voies en aval des entrées. Dans le cas de sorties majeures, les voies qui sont en amont des voies principales extérieures deviennent des bretelles de sortie. Dans le cas d'entrées majeures, les bretelles d'entrée deviennent en aval des voies principales extérieures. En général, ces types de voies ne convergent pas. Seules les jonctions mineures emploient une voie d'insertion qui commence au point b) pour les bretelles de sortie et termine au point e) pour les bretelles d'entrée. Certaines jonctions majeures (principalement les sorties) peuvent recourir à des voies d'insertion additionnelles afin d'accommoder les files d'attente et d'éviter qu'un embouteillage ne se forme sur l'autoroute. Certaines conceptions utilisent de courtes voies auxiliaires qui relient une entrée avec une sortie proche en aval, ce qui cause une augmentation temporaire de voies sur l'autoroute. Les voies auxiliaires diffèrent des voies non-convergentes des sorties ou des entrées des jonctions principales, en ce qu'elles ne sont jamais utilisées par les usagers qui ne sont pas directement engagés dans des manœuvres d'entrée ou de sortie d'autoroute (HCM 2000).

Tous les sites étudiés sont situés au niveau de jonctions mineures avec des bretelles d'accès sur la droite. Il existe plusieurs cas de bretelles d'accès sur la gauche à Montréal, mais pour la plus grande part le marquage ne les concerne pas (la conception de la ligne serait très différente). La conception des bretelles d'accès sur la gauche est exposée plus en détail dans la documentation (HCM 2000).

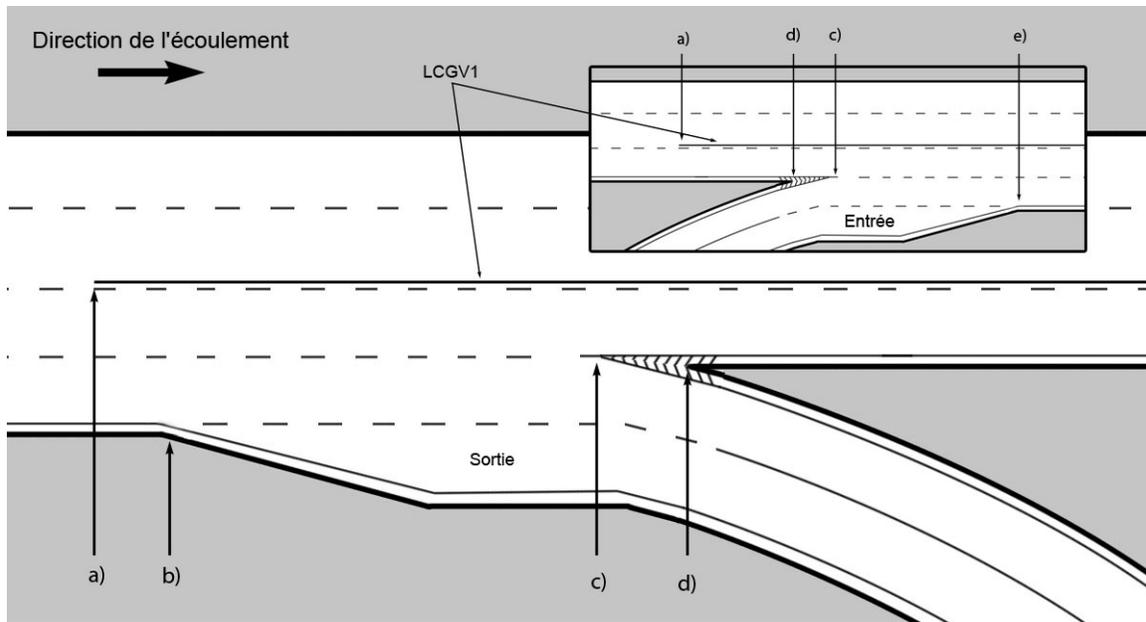


Figure 4 – Diagramme énumérant les points saillants d’une sortie/entrée typique. a) début de la LCGV1, b) début de la voie de sortie (bretelle de sortie seulement), c) chevrons, d) musoir, e) fin de la voie d’insertion (bretelle d’entrée seulement).

Dans cette étude, le centre géométrique de toute bretelle est pris au point c) de la **Figure 4**, toutes les autres mesures définies découlent de ce point. Pour les analyses de conception et d’accidents, les distances par rapport au centre sont mesurées en parallèle et le long du tracé routier, les mesures négatives pointent vers l’amont (direction opposée au courant de circulation) et les mesures positives pointent vers l’aval (direction du courant de circulation). Les rayons positifs horizontaux définissent des courbes tournant vers la gauche (du point de vue du conducteur). Les courbes verticales sont définies par leur pente approximative en degré, avec les pentes positives horizontales représentant une pente montante.

Une liste non exhaustive des points donnés des bretelles sont illustrés en **Figure 4**. Cette liste inclut a) le début de la ligne, b) le début de la voie d’insertion (bretelles de sortie seulement), c) l’extrémité des chevrons, d) le musoir, e) la fin de la voie d’insertion (bretelles d’entrée seulement). Les distances de conception entre ces points représentent une fraction des variables de conception géométrique générées pour cette étude. Elles sont énumérées dans le **Tableau 3** et illustrées en **Figure 5**.

Tableau 3 – Variables de conception géométrique pour une bretelle d'entrée ou de sortie typique.

Nom de la variable	Description	Équivalent HCM 2000 (25-1)
$l_{diffuseur}$	Longueur d'insertion	L_A/L_D
$l_{visibilité}$	Distance des chevrons au musoir	-
d_{bret_amont}	Distance entre bretelles en amont	L_{up}
d_{bret_aval}	Distance entre bretelles en aval	L_{down}
b_{voie1}	Largeur de la première voie principale	-
$b_{voie_bretelle}$	Largeur de la voie auxiliaire et/ou d'insertion	-
b_{accot_ext}	Largeur de l'accotement externe	-
$b_{accot_bret_int}$	Largeur de l'accotement interne, bretelle	-
$b_{accot_bret_ext}$	Largeur de l'accotement externe, bretelle	-
$no_voies_autoroute$	Nombres de voies d'autoroute	Voie 1 et 2 seulement
$no_voies_bretelle$	Nombres de voies de bretelle	Cas spécial
$no_voies_non-dif$	Nombres de voies auxiliaires ou de jonction majeure	Exhibits 25-6 et 25-13
sh_merge_lane	Nombres de voies auxiliaires (explicit)	Exhibits 25-6 et 25-13
r_v_curve	Courbure verticale (autoroute)	Descriptif
r_h_curve	Courbure horizontale (autoroute)	Descriptif
$r_v_bretelle$	Courbure verticale (bretelle)	-
$r_h_bretelle$	Courbure horizontale (bretelle)	-
d_{treat}	Longueur de la LCGV1	-

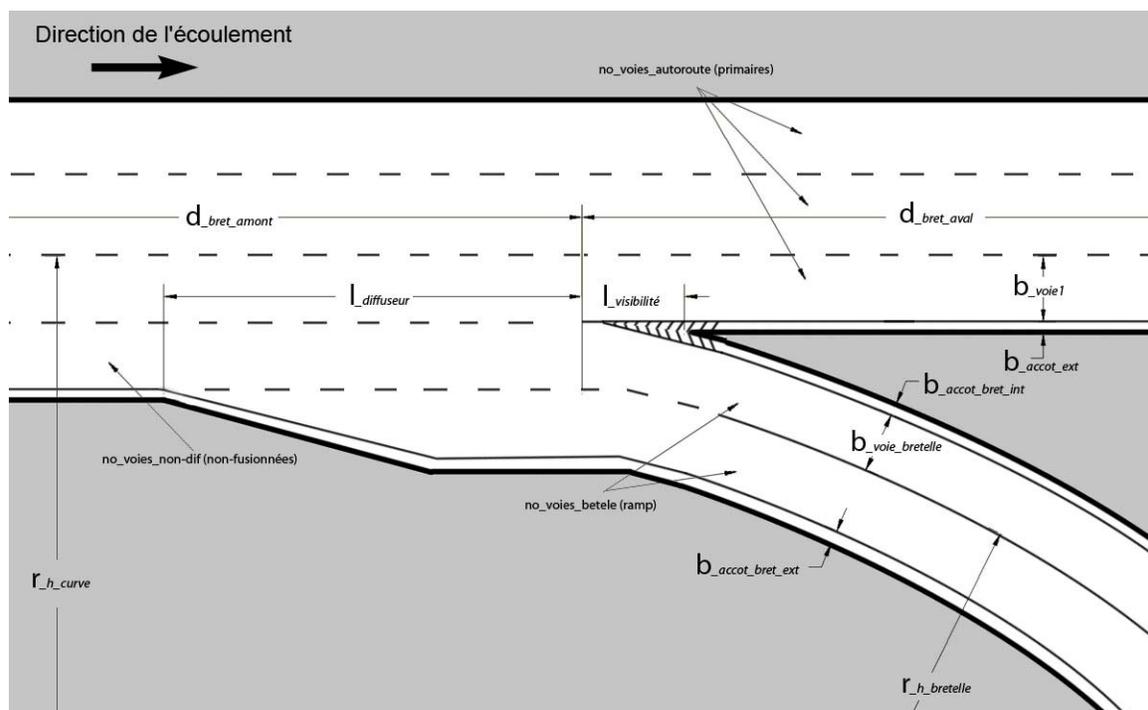


Figure 5 – Diagramme énumérant les éléments géométriques typiques d'une sortie. On peut renverser le schéma pour trouver les éléments géométriques des entrées.

La mesure de la longueur d'insertion ($l_{diffuseur}$) est la longueur de route conventionnelle dont les conducteurs disposent pour sortir d'une voie principale pour la première fois (bretelles de sortie) ou la longueur de route conventionnelle dont les

conducteurs disposent pour s'insérer sur une voie principale pour la première fois. Elle est égale à la longueur de la voie auxiliaire, s'il en existe une. Cette variable est importante car elle représente la distance, et donc le temps en fonction de la vitesse, dont tout véhicule entrant ou sortant dispose pour une manœuvre d'insertion en souplesse. La distance des chevrons au musoir ($l_{visibilité}$) est la distance entre l'extrémité des chevrons peints et le musoir. Dans le cas des sorties, les conducteurs peuvent entreprendre des manœuvres dangereuses de dernière minute et rouler sur cette zone de la chaussée. Dans le cas des entrées, cette zone garantit la visibilité nécessaire d'une part aux véhicules entrant pour trouver des créneaux d'insertion dans la circulation et d'autre part aux véhicules sur l'autoroute prêts à céder le passage ou à accommoder les véhicules entrant.

La distance entre bretelles en amont (d_{bret_amont}) ou la distance entre bretelles en aval (d_{bret_aval}) représente, du centre géométrique au centre géométrique, la distance d'une bretelle particulière à une autre bretelle, en amont ou en aval respectivement. Ces variables, de même que le taux d'entrée/de sortie (voir section 2.3), semblent fortement influencer la densité de changement de voie, et dans le cas de la distance en amont particulièrement, elles semblent aussi être un facteur notable à l'origine des débordements de files d'attente de bretelles de sortie en aval.

Il est important de commenter la configuration caractéristique des bretelles sur les autoroutes de Montréal, particulièrement en ce qui concerne la proximité des bretelles dans un milieu urbain où la densité des échangeurs est élevée, ce qui est à l'opposé des bretelles en milieu rural. La distance moyenne entre échangeurs (passage inférieur/supérieur à un passage inférieur/supérieur) est beaucoup plus courte sur les autoroutes de Montréal que sur les autoroutes en région rurale (voir Tableau 1), de telle sorte que la distance « inter-bretelle » est réduite par rapport à la distance entre échangeurs. En effet, une grande partie de la distance entre échangeurs est occupée par les bretelles elles-mêmes. À part quelques exceptions, la configuration caractéristique d'un échangeur sur les autoroutes du Québec suit la configuration classique en losange : les sorties sont situées en amont des échangeurs et les entrées en aval. Cette configuration est utilisée avec les passages supérieurs et inférieurs, les viaducs, les autoroutes en déblai et au niveau du sol. Elle peut être reliée au réseau par diverses conceptions, comme par exemple une route de service, un rond-point ou un échangeur en losange à point unique. Parce que les dimensions des bretelles sont statiques et que la densité des échangeurs dépend généralement du développement urbain local, les distances entre bretelles sur l'Île de Montréal (en particulier pour les bretelles qui se font face) sont fortement réduites en

comparaison avec les distances entre bretelles à l'extérieur de Montréal. De façon générale, l'échelle même de l'autoroute suit cette tendance.

La **Figure 6** illustre deux échangeurs en losange quasiment de bout en bout avec les distances de conduite entre les éléments de bretelle. Les longueurs de bretelle étant en grande partie fixes, plus deux échangeurs sont rapprochés, plus les distances internes et externes de bretelle à bretelle diminuent. Alors que ces mesures diminuent, les zones d'influence commencent à se chevaucher : dans le cas le plus courant, le comportement d'insertion se mêle au comportement de sortie précoce. Par exemple, des distances entre échangeurs de 1 km ou moins (si on considère quatre des sept distances entre échangeurs de la portion élevée de l'autoroute 40 « métropolitaine » qui font moins de 1 000 m avec une distance combinée moyenne de 1 182 m) avec des bretelles de longueur de 300 à 500 m, raccordement au réseau compris, laissent peu d'espace aux distances externes de bretelle à bretelle (parfois moins de 300 m observé).

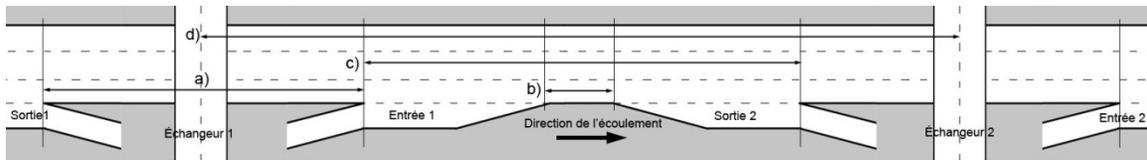


Figure 6 – Distances entre bretelles et échangeurs en losange typiques : a) distance entre bretelles à l'intérieur des échangeurs, b) distance entre bretelles extérieures, c) distance entre bretelles intérieures, d) distance entre échangeurs.

Dans le cas d'une distance externe de bretelle à bretelle suffisamment petite, la plupart des conceptions ont recours à une voie auxiliaire continue qui combine les entrées et les sorties situées face à face l'une de l'autre. Bien qu'il soit peu répandu, cet aménagement a été utilisé sur certaines sections de la partie élevée de l'autoroute 40 ainsi que dans d'autres quartiers de l'Île de Montréal (par exemple : A40-E-E75 suivie par A40-E-S76). Quoiqu'il en soit, cela ne change pas le fait que les manœuvres d'entrée et de sortie s'entrecroisent. Les voies auxiliaires conçues à cet effet ne doivent pas être confondues avec les voies créées spécifiquement dans le cadre d'échangeurs en trèfle (par exemple : A20-W-S50). Par ailleurs, on doit noter que les voies auxiliaires ne sont pas exclusivement employées à ces usages.

Certaines largeurs basiques sont mesurées pour la première voie principale (b_{voie1}), la voie auxiliaire et/ou d'insertion moyenne ($b_{voie_bretelle}$), l'accotement externe en aval des sorties ou en amont des entrées (b_{accot_ext}), ainsi que l'intérieur ($b_{accot_bret_int}$) et l'extérieur ($b_{accot_bret_ext}$) de l'accotement de la bretelle. On

doit noter que ces largeurs, particulièrement celles des accotements, sont souvent irrégulières le long d'un même site, il n'est donc pas pratique de les documenter et d'en faire une comparaison détaillée.

Les nombres de voies d'autoroute (*no_voies_autoroute*), de voies de bretelle (*no_voies_bretelle*) et de voies auxiliaires ou de jonctions majeures (*no_voies_non-dif*) sont enregistrés. On s'attend à ce que le nombre de voies complique le changement de voie simplement parce que les usagers ont plus de choix. En général, une combinaison de trois voies d'autoroute, une voie de bretelle et pas de voie auxiliaire est préférée car il s'agit de la combinaison de voies la plus cohérente, la plus fréquente et la plus proche du site original avec LCGV1.



Figure 7 – Autoroute 40 “Autoroute métropolitaine” en direction est, entrée 73, “Christophe-Colomb”, vue depuis Cam40-11-DirOuest, avec marquage LCGV1. Le différentiel des courbes verticales entre la bretelle et l’autoroute peut entraîner à une visibilité affaiblie, particulièrement en anticipation des manœuvres d’insertion.

Des mesures de courbure horizontale ($r_{h_curve}/r_{h_bretelle}$) et verticale ($r_{v_curve}/r_{v_bretelle}$) sont suggérées, ces variables peuvent être associées avec des facteurs tels que la distance de visibilité d’arrêt (14) ou la visibilité nécessaire pour tout type de manœuvre d’insertion, ou en particulier, le différentiel de courbure verticale entre bretelle et autoroute. La visibilité est un facteur essentiel du comportement d’insertion, concernant à la fois la navigation (surtout chez les usagers ne connaissant pas la zone) et les manœuvres d’entrée sur les autoroutes. En ce qui concerne la navigation, la visibilité

sur la bretelle peut être affectée par des facteurs tels que la signalisation verticale et dans le cas de l'interdiction de changement de voie, par la signalisation horizontale (marquage au sol). Les mesures de visibilité ont une utilité pratique limitée à cause de leur nature complexe et subjective. La **Figure 7** illustre un différentiel de courbure verticale important entre bretelle et autoroute qui entraîne une visibilité d'insertion réduite. La visibilité dépend aussi du type de véhicule et des aptitudes et compétences du conducteur.

La vitesse à écoulement libre n'est pas explicitement testée. En effet, les mesures approximatives de vitesse (par exemple, la vitesse de section mesurée par le détecteur à boucle) sont des fonctions du débit. Les mesures précises annuelles moyennes de vitesse (par exemple, par voie, dynamique de bretelle en accélération/décélération, vitesse instantanée moyenne) ne sont pas disponibles. Quoi qu'il en soit, la vitesse semble refléter davantage la gravité d'accident (voir section 3.1).

2.3 Le débit routier aux bretelles

Dans cette étude, le principe de conservation du débit s'applique aux autoroutes. De toute évidence, la différence entre la sommation des débits entrant et la sommation des débits sortant devrait être égale au changement de débit sur le réseau. Par exemple, on coupe la bretelle de telle sorte que le segment obtenu est de la même longueur que la zone d'influence, avec un débit fixe égal à la sommation de tous les véhicules présents en tout temps sur ce segment. Tous les débits en amont sont nécessairement des débits entrant et tous les débits en aval sont nécessairement des débits sortant. Le taux du débit des entrées et des sorties est généralement compté sur une heure par segments de 15 minutes. Puisque le débit instantané est négligeable sur une période de 15 minutes de circulation ou plus, la conservation du débit atteint un équilibre entre toutes les sommations d'entrées et de sorties.

Comme on le voit sur la **Figure 8**, les bretelles d'entrée ont deux débits d'entrée ($q_{entrée}$, q_{amont}) et un débit de sortie (q_{aval}). De la même façon, les bretelles de sortie ont un débit d'entrée (q_{amont}) et deux débits de sortie (q_{sortie} , q_{aval}). La séparation des débits entre le débit sur la bretelle et le débit sur l'autoroute dans cette direction est critique parce que cette relation est le premier indicateur de l'activité sur le site, sauf si un autre site considérablement plus important existe à proximité, de telle sorte qu'une proportion de l'activité déborde sur le site. Le ratio entre les deux débits est appelé le **ratio de débit**. Il est calculé selon les équations 1 et 2.

$$q_{\% \text{ de sortie}} = \frac{q_{sortie}}{q_{aval} + q_{sortie}} \quad (1)$$

$$q_{\% \text{ d'entrée}} = \frac{q_{entrée}}{q_{amont} + q_{entrée}} \quad (2)$$

Pour chaque cas, si on considère une proportion de véhicules entrant/sortant constante, on remarque que plus le ratio est grand, plus l'activité d'insertion est importante. On note aussi que pour chaque bretelle, il existe exactement trois débits. Deux mesures de débit sont recueillies sur le terrain puisque la troisième peut être calculée à partir de la loi de conservation des débits. Par ailleurs, parce qu'il n'existe pas

de débits d'entrée ou de sortie additionnels entre les bretelles, on peut dire que, pour toute bretelle A, toute bretelle B, directement en aval de la bretelle A, doit avoir un débit en amont égal à celui en aval de la bretelle A.

Pour faciliter la comparaison entre les sites et l'analyse statistique, les mesures des débits prises toutes les heures sont converties, à partir des coefficients de redressement des sites permanents à proximité, en une valeur unique du débit journalier moyen annuel. Les mesures sont prises pour chaque voie, mais elles sont normalement combinées par la suite de façon à obtenir une seule mesure de débit par entrée et par sortie. Ces mesures n'offrent pas beaucoup d'informations sur les changements de voie, sauf si elles sont prises à intervalles réguliers à des emplacements normalisés et régulièrement espacés le long de l'autoroute (environ 5 m), ce qui n'est pas le cas. On comprend alors que des données de changement de voie ne peuvent être obtenues qu'à partir d'une analyse vidéo.

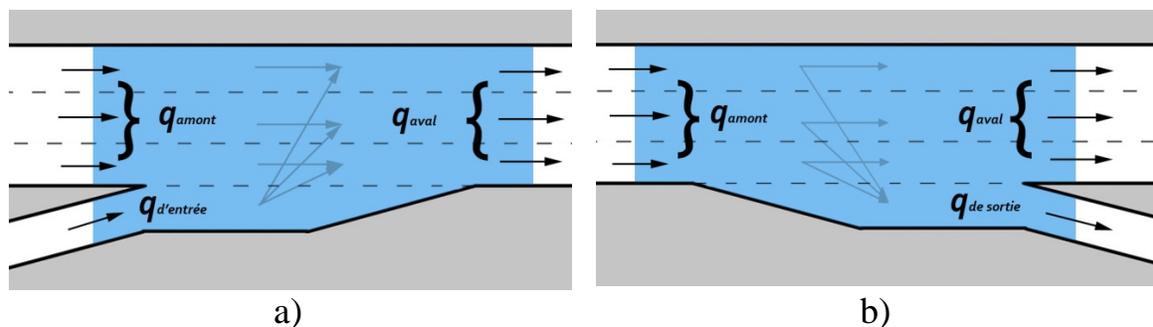


Figure 8 – Débit aux bretelles a) d'entrée, b) de sortie.

Le HCM 2000 se réfère principalement aux débits sur les première et deuxième voies, ainsi que sur la bretelle. Cependant on ne sait pas si la présence de la ligne LCGV1 affecte la répartition des débits sur les différentes voies (ce qui est, après tout, l'effet souhaité direct du marquage) et donc les débits sur toutes les voies doivent être pris en compte.

2.4 Les données d'accidents : sources et répartition spatiale

Pour cette étude, nous avons eu accès à deux sources de données historiques d'accidents.

Les données de la SAAQ : la première source de données d'accidents est administrée par la SAAQ (Société de l'assurance automobile du Québec) et fournie par le MTQ aux fins de ce projet. Elle est élaborée à partir des rapports d'accidents remplis par des officiers de police présents sur les lieux et soumis à la SAAQ. Le problème majeur de cette source de donnée est que les officiers de police ne géocodent pas leur rapport, ce qui signifie que les emplacements des accidents doivent être déduits à partir du champ indiquant la rue transversale qui est souvent inintelligible ou incomplet (d'autant plus difficile que les autoroutes n'ont pas de rue transversale logique). Le résultat final est que la base de données n'est pas très fiable en ce qui concerne l'étude d'éléments géométriques détaillés. Par ailleurs, beaucoup de sites ne disposent d'aucune donnée, l'emplacement approximatif d'un accident est donné avec une marge d'erreur de +/- 50 à 100 m et les zones tampons ne sont pas explicitement définies. De plus, bien que trois années consécutives de données d'accidents pour chaque site soient disponibles, les années absolues d'enregistrement des rapports ne sont pas les mêmes pour tous les sites (les trois années se trouvent n'importe quand entre 2002 et 2009). Cependant, l'avantage de cet ensemble de données est qu'il fournit une richesse d'informations supplémentaires, comme par exemple, le type de collision, les conditions des routes et la gravité, ce qui peut être utile pour une analyse macroscopique. Une analyse exploratoire est donc menée à partir des données de la SAAQ dans le but de se faire une meilleure idée du profil des accidents à Montréal.

Les données d'Urgences-santé : Urgences-santé, l'agence québécoise qui supervise les services paramédicaux, est notre deuxième source de données d'accidents. Les données sont disponibles pour toutes les autoroutes de Montréal. Cet ensemble de données couvre tous les sites sur l'île avec une précision de géocodage d'environ +/- 10 m et comprend les accidents de véhicule à moteur ayant fait l'objet d'un appel 911 entre 1999 et 2008 inclus (l'adresse de la personne faisant l'appel est envoyée automatiquement à Urgences-santé et l'emplacement de la victime est validé par téléphone, cet emplacement est instantanément cartographié sur SIG pour envoyer et

guider une ambulance) (7). On note que cet ensemble de données peut ne pas être très représentatif des accidents ne nécessitant pas d'ambulance ou d'appel 911 (dommages matériels seulement). En ce qui concerne les accidents corporels, contrairement aux données de la SAAQ, les données d'Urgences-santé sont en quantité plus importantes et ont moins de problèmes de repérage.

En général, toutes les sources de données historiques d'accidents se basant sur des services d'urgence remplissant des formulaires ont un point en commun : la subjectivité. On comprend facilement que le personnel paramédical et les officiers de police ne sont pas forcément concernés par le même type d'observations que les spécialistes en reconstruction d'accidents ou les ingénieurs en sécurité routière. Par ailleurs, différents individus de la même agence peuvent faire preuve d'un souci du détail ou d'une concentration différente au moment de remplir le rapport d'accident.

Chapitre 3 : Analyse des accidents et résultats

Ce chapitre expose l'analyse et les résultats de l'analyse traditionnelle de sécurité à partir des données de la SAAQ et d'Urgences-santé comme définies dans la section 2.4. La section 3.1 fournit une analyse exploratoire comprenant la migration potentielle des accidents, déterminée à partir des distances relatives à chaque bretelle telles que calculées grâce aux données de la SAAQ et d'Urgences-santé. La section 3.2 présente une analyse statistique de la fréquence des accidents.

Alors que les bretelles peuvent être assimilées à des nœuds, la zone d'influence des bretelles peut s'étendre jusqu'à 700 m en amont ou en aval des entrées et des sorties (et probablement bien plus loin selon la zone d'influence indiquée par le manuel de conception utilisé, choix du HCM). Ainsi, les accidents assignés à un site donné (bretelle) sont ceux survenant à l'intérieur d'une zone tampon choisie (200 ou 400 m) d'après les données d'accidents collectées par Urgences-santé. On note que les données de la SAAQ ont été compilées par un groupe externe et qu'aucune information explicite sur la longueur de la zone tampon n'a été fournie. De plus, la voie sur laquelle l'accident a eu lieu n'est mentionnée dans aucun des ensembles de données. Ainsi, une répartition d'accidents unidimensionnelle a été construite pour chaque site conformément à la distance de tracé mesurée à partir du centre géométrique de chaque bretelle.

Il faut noter que l'orientation et la distance au centre de la bretelle sont très importantes. Parce que la géométrie d'une section d'autoroute au niveau d'une bretelle peut varier considérablement sur de courtes distances, la cause des accidents situés le long de différentes sous-sections peut être attribuée à différents facteurs. Par ailleurs, des décalages de répartitions semblent indiquer des effets de migration des accidents.

3.1 Analyse exploratoire

Les données d'accidents avant utilisation de la LCGV1 sont éparses, et de toute façon, il n'existe pas de document indiquant la date d'application de la ligne. Pour aborder ce problème, nous avons eu recours à une analyse transversale des différents facteurs potentiels d'accident. La **Figure 9** présente de façon naïve le total des accidents durant une période récente de trois ans (2002 – 2009) sur des sites sélectionnés pour lesquels des données d'accidents de la SAAQ sont disponibles. Il est immédiatement

évident que les sites avec ligne LCGV1 font l'objet de plus d'accidents que les sites sans ligne. Le problème avec cette observation est qu'il n'est pas possible d'attribuer la cause des accidents seulement au marquage, même après le contrôle des débits. En fait, il est très possible que l'inverse soit vrai : les sites où se produisent le plus grand nombre d'accidents sont les premiers sélectionnés par les agents publics pour l'application de la ligne LCGV1.

La gravité des accidents est brièvement commentée (blessures graves, légères et dommages matériels seulement) à la fois pour les sites avec ou sans ligne LCGV1. La **Figure 10** montre la proportion des accidents par gravité et par type de marquage (avec ou sans ligne) selon les données d'accidents de la SAAQ. D'après ce graphique, on peut voir que le niveau de gravité des accidents ne reflète pas de façon univoque la présence de la ligne LCGV1. Les accidents occasionnant des dommages matériels d'une valeur de 1 000 \$ ou plus constituent la majeure partie des accidents, tandis que les accidents légers entraînant des dégâts matériels au-dessous de 1 000 \$ représentent une proportion inférieure ou presque égale. Les accidents graves (dont les fatalités) quant à eux constituent une proportion minime de la totalité des accidents.

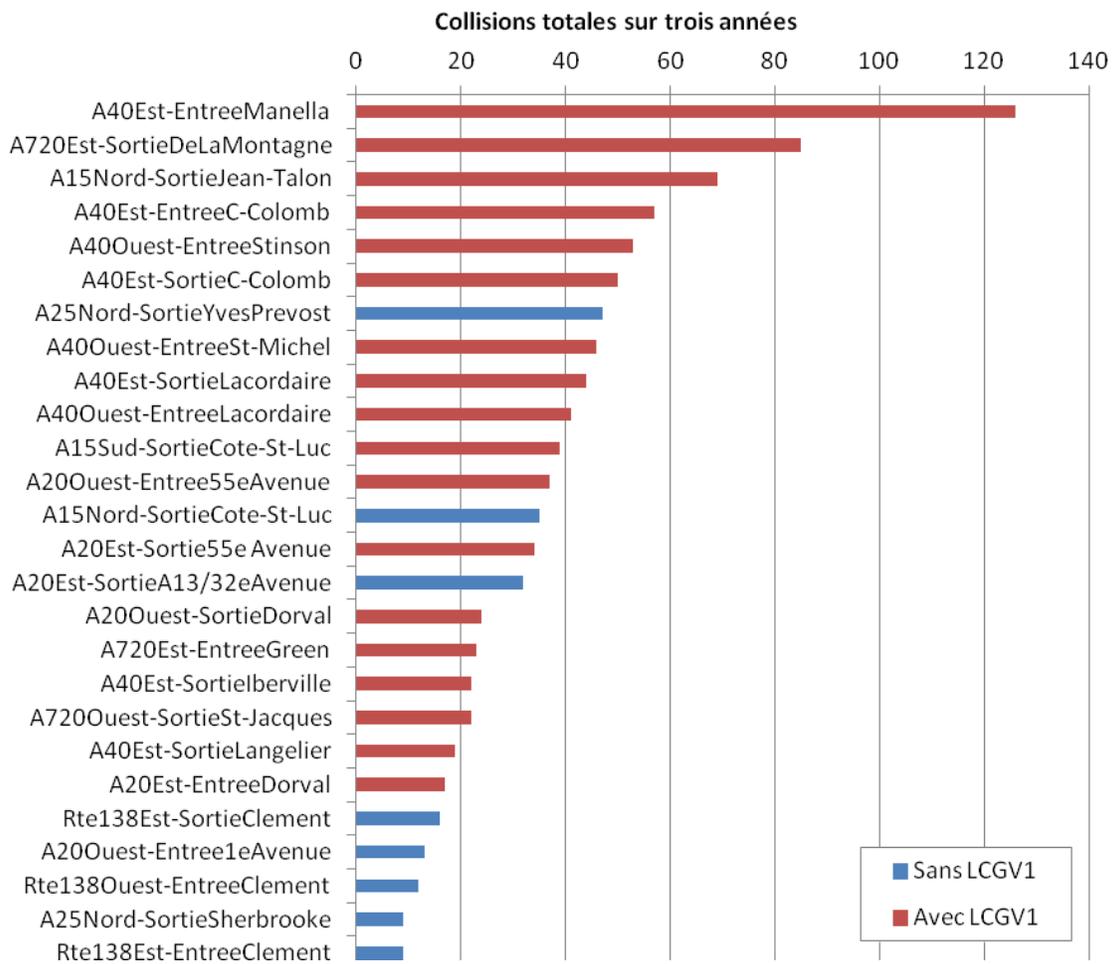


Figure 9 – Collisions totales sur trois années aux sites sélectionnés. Source des données : SAAQ.

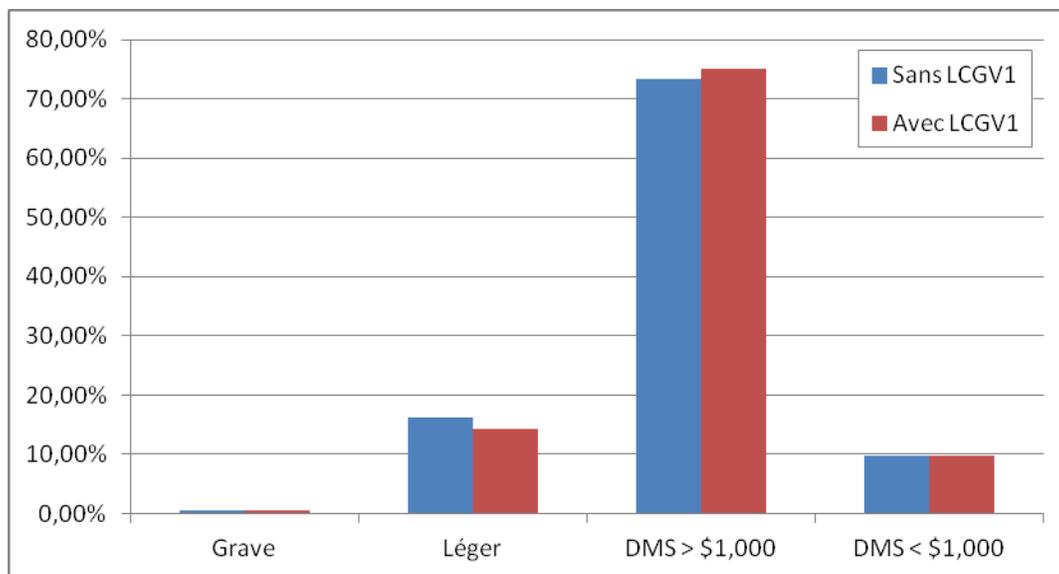


Figure 10 – Répartition des collisions par gravité et application de la LCGV1. Source des données : SAAQ.

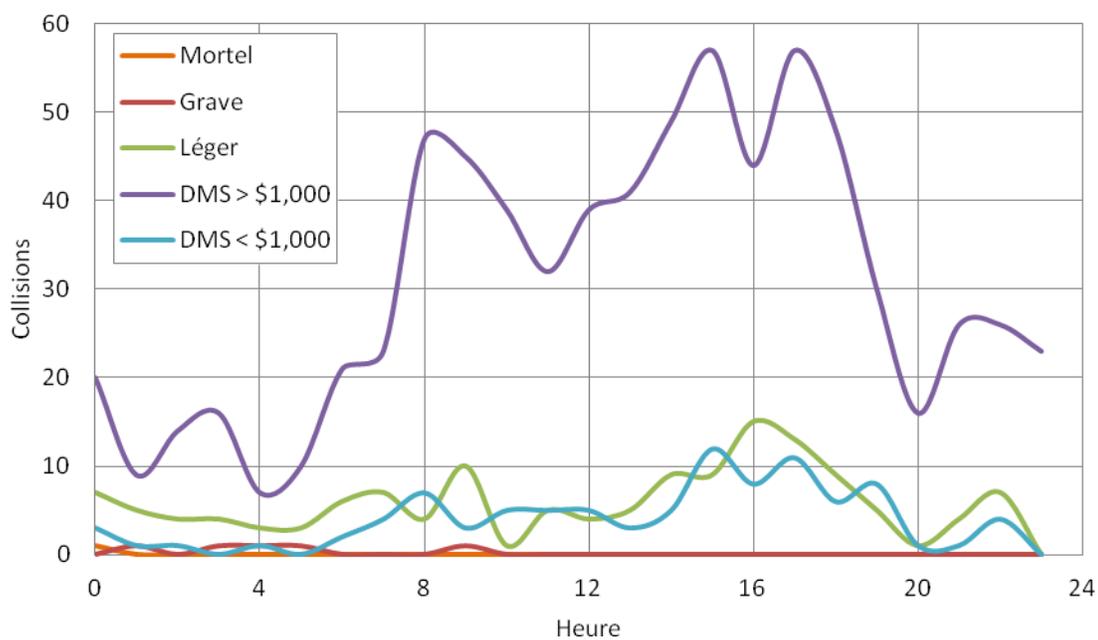


Figure 11 – Répartition des collisions par heure selon la gravité. Source des données : SAAQ.

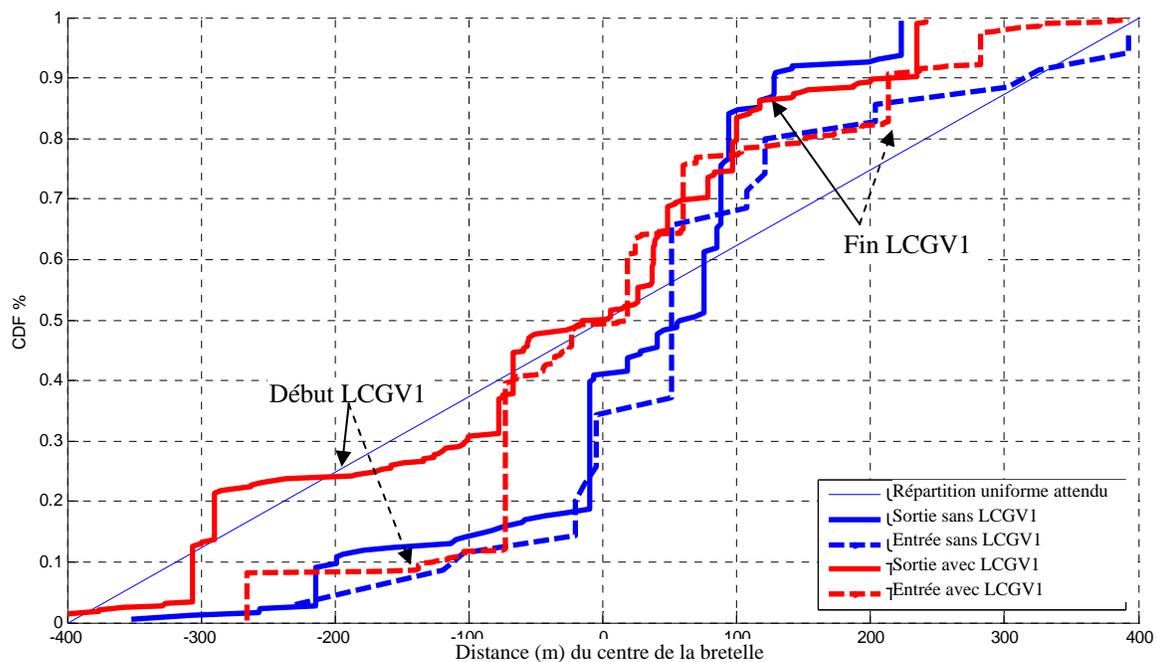


Figure 12 – Taux d’accidents cumulatif selon la distance du centre des bretelles entrée et sortie (- amont, + aval). Les débuts et fins moyens du marquage LCGV1 y sont indiqués. Source des données : SAAQ.

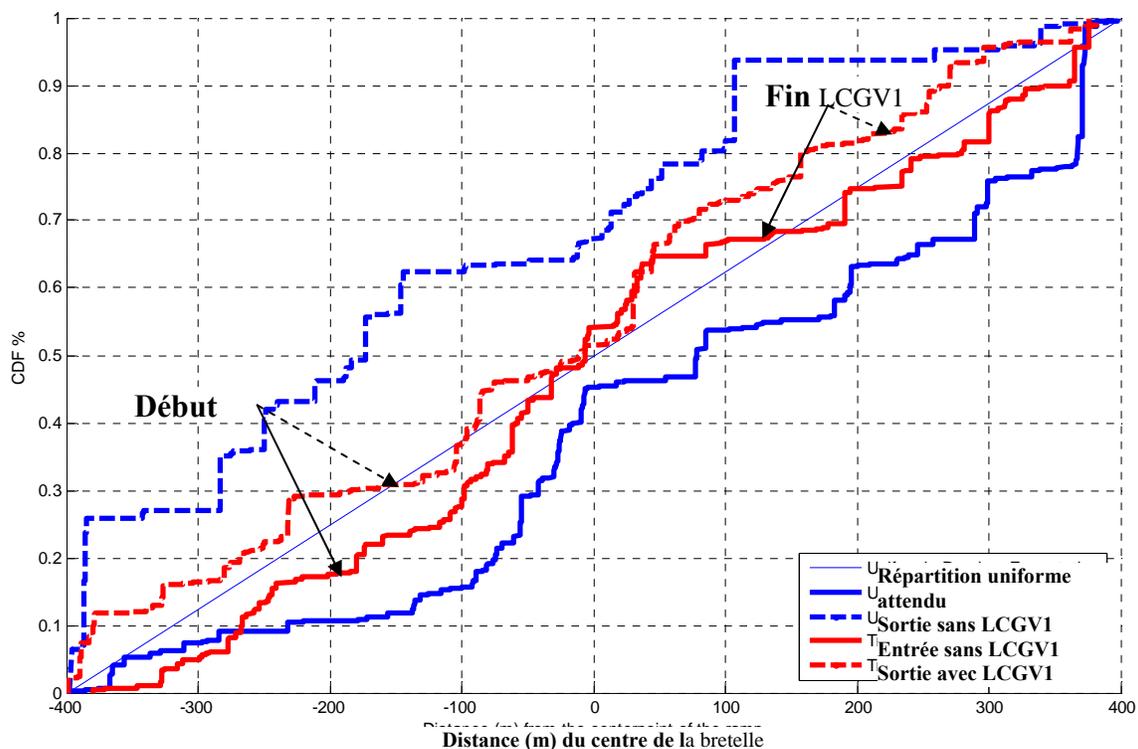


Figure 13 – Taux d’accidents cumulatif selon la distance du centre des bretelles entrée et sortie (- amont, + aval). Les débuts et fins moyens du marquage LCGV1 y sont indiqués. Source des données : Urgences-santé.

La répartition temporelle des accidents (par heure) est présentée en **Figure 11**. On remarque que, dans chaque catégorie, la plupart des accidents entraînant seulement des dégâts matériels, surviennent principalement pendant les heures de pointe, tandis que la plupart des accidents graves, voire mortels, surviennent en dehors des heures de pointe. En sachant que les débits élevés correspondent à des vitesses basses (pendant les heures de pointe), l'observation antérieure confirme le point de vue communément accepté que la gravité des accidents est fortement liée à la vitesse : les collisions survenant à grande vitesse ont plus d'énergie cinétique à dissiper et causent des dommages matériels et personnels importants.

Les répartitions unidimensionnelles des accidents en fonction de la distance au centre des bretelles, pour les données de la SAAQ et d'Urgences-santé respectivement, sont explorées en **Figures 12 et 13**. Pour l'analyse, on s'attend à ce qu'un taux d'accidents uniforme entraîne une accumulation linéaire et qu'un regroupement d'accidents entraîne une accumulation marquée. Les données de la SAAQ tendent à indiquer que les regroupements d'accidents se produisent juste en amont de la LCGV1 pour les sorties avec ligne, au niveau du musoir pour les entrées avec ligne, à l'intérieur de la longueur d'insertion pour les bretelles d'entrée avec et sans ligne et le long des chevrons près du musoir des sorties avec et sans ligne. En général, pour les sites avec ligne, on remarque un décalage vers l'amont des accidents, ce qui témoigne d'un effet de migration des accidents. Sur tous les sites, les accidents sont prédominants en aval du marquage, plutôt qu'en amont, ce qui peut s'expliquer par le fait que l'emplacement final des accidents est en général en aval de l'origine du conflit. Cependant, cela ne devrait pas affecter l'uniformité de la répartition des accidents, sauf si la géométrie est en partie responsable de l'espacement entre l'origine et l'emplacement final de l'accident. Les données d'Urgences-santé sont moins suggestives d'une migration associée aux caractéristiques spécifiques de géométrie car les répartitions des accidents sont plus uniformes, bien qu'une tendance commune existe : pour les sorties avec ligne, il se produit un effet de migration vers l'amont, particulièrement à proximité du commencement de la LCGV1. On note avec intérêt que les entrées avec ligne, au contraire des données de la SAAQ, indiquent un décalage des accidents vers l'amont par rapport aux entrées sans ligne.

Les différences entre les deux sources de données peuvent simplement être expliquées par un échantillon de données de la SAAQ plus petit (particulièrement des entrées) ainsi que par une précision moindre de la géolocalisation. De façon générale, on

peut conclure qu'aux sorties, il existe suffisamment d'évidences montrant que la LCGV1 entraîne un effet de migration des accidents vers l'amont. En ce qui concerne les entrées, aucune conclusion n'est possible.

La **Figure 14** illustre la densité d'accidents à partir des données d'Urgences-santé, pour les autoroutes sous analyse à Montréal, dont l'autoroute 20 et l'autoroute 720 de Dorval à la rue De la Montagne, l'autoroute 15 de l'autoroute 20 à l'autoroute 40, l'autoroute 40 de l'autoroute 25 à l'autoroute 25, l'autoroute 25 de l'autoroute 40 au pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine et l'autoroute 138 de l'autoroute 20 au pont Honoré Mercier. La plus grande densité d'accidents est située sur l'autoroute métropolitaine, particulièrement aux abords de l'échangeur Christophe-Colomb, et de l'autoroute 15, notamment à proximité de l'autoroute 40 et de la Savane. Les deux segments d'autoroute sont connus pour être des axes de circulation très encombrés, incidemment, ils sont aussi de conception non conforme aux normes.

En regardant la Figure 14 et les cartes des caractéristiques géométriques (voir appendice), on prend conscience d'une corrélation existant entre les accidents et les sites de conception inférieure. Les sites où les taux d'accidents sont les plus élevés correspondent géographiquement aux sites dont les débits sont les plus importants et dont les caractéristiques géométriques sont les plus petites, tout comme : la longueur des chevrons ($l_{visibilité}$), la longueur d'insertion de la bretelle ($l_{diffuseur}$), et la distance entre bretelles en amont (d_{bret_amont}) (section 2.2). Cette constatation est rigoureusement testée dans la section suivante grâce à une analyse statistique.

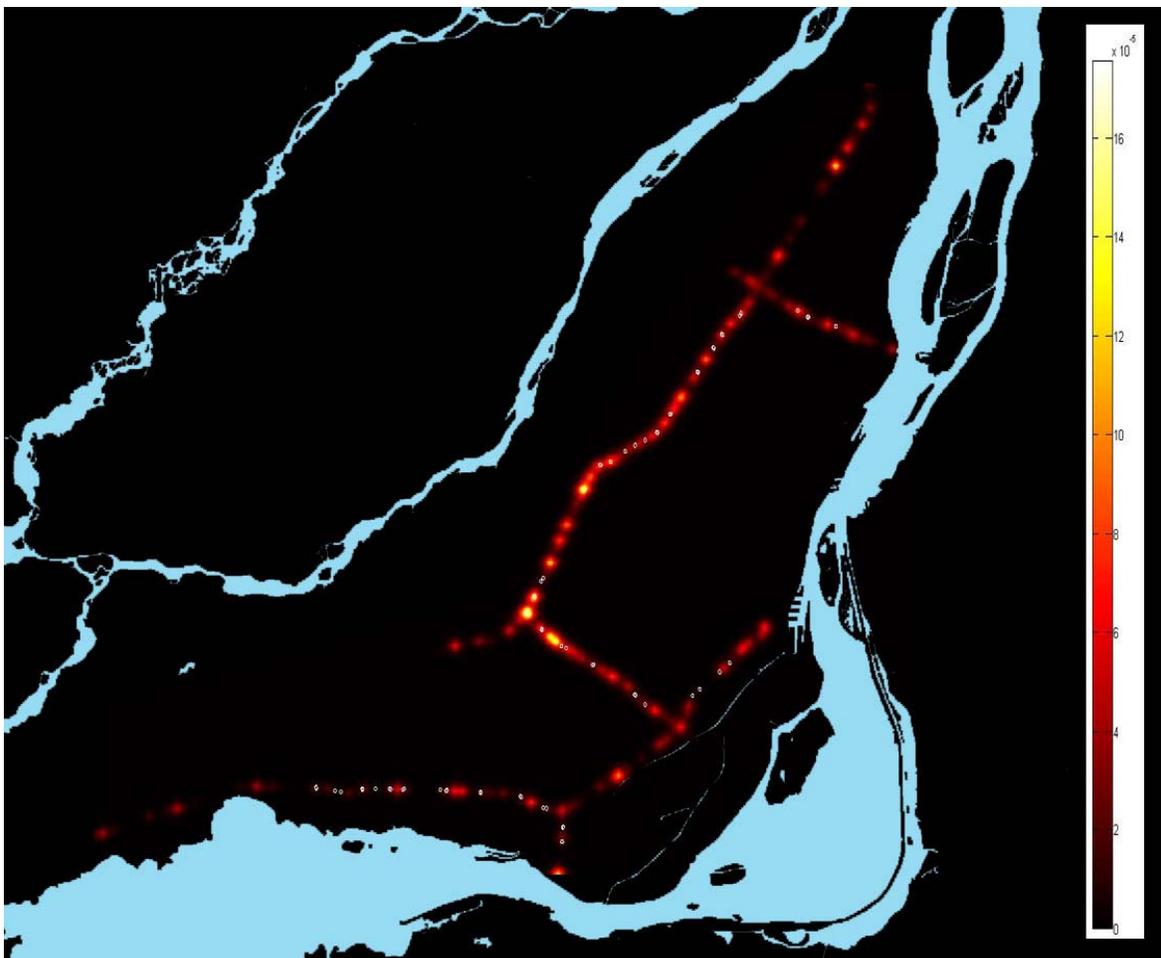


Figure 14 – Densité des collisions sur les sections d'autoroute à l'étude sur l'Île de Montréal; les points blancs représentent les sites étudiés. Source des données : Urgences-Santé, période: 2000-2010.

3.2 Analyse statistique

Cette section expose une analyse approfondie des données d'accidents à partir des données d'Urgences-santé. Ces données sont choisies car elles sont géocodées à la source. Les coordonnées sont enregistrées au moyen d'un GPS chaque fois qu'une ambulance est envoyée sur les lieux d'un accident. De plus, on dispose de données sur plusieurs années (1999 - 2008), pour tous les emplacements sous analyse. À noter que, comme cela a déjà été mentionné, les données de la SAAQ ne couvrent pas tous les sites et ne sont pas géocodées.

L'analyse des accidents est présentée en trois parties : la génération de variables, l'analyse exploratoire et l'analyse du modèle de régression.

a. Génération de variables d'accidents et analyse exploratoire

Les zones tampons de chaque site ont servi à déterminer les taux d'accidents sur chaque site. Les zones tampon sont prises à partir du centre géométrique de chaque bretelle (comme défini en section 2.2), la longueur maximale arbitrairement choisie étant de 400 m (la zone d'influence définie par le HCM 2000 est de 450 m, le 85^e centile de la distance entre bretelles est d'environ 400 m). Un deuxième ensemble de zones tampon d'une longueur deux fois plus petite, de 200 m, est aussi utilisé pour contrôler la variation spatiale (Figure 12 et 13 présentaient un certain degré de variation spatiale).

Les zones tampon générées sont les suivantes :

- Accidents total sur 200 m et 400 m en amont et en aval
- Accidents en amont seulement sur 200 m et 400 m
- Accidents en aval seulement sur 200 m et 400 m

Une fois le nombre d'accidents pour chaque zone défini, les résultats sont inclus dans l'inventaire géométrique et de débit. Un résumé statistique de la liste des variables générées pour cette étude est donné en **Tableau 4**.

À partir de ces résultats, on observe que :

- Le nombre moyen des accidents est plus important que celui reporté dans notre analyse antérieure (données SAAQ). En plus du nombre d'années des données, cela peut s'expliquer par l'utilisation de longueurs de zones tampon différentes pour générer les résultats d'accidents, par le non-enregistrement d'accidents mineurs et par le fait que certains accidents ne pouvaient pas être localisés étant donné le manque d'information spatiale des données de la SAAQ.
- Le nombre moyen des accidents est relativement plus grand au niveau des bretelles de sortie qu'au niveau des bretelles d'entrée. Cependant, les taux des accidents (en tenant compte des conditions de circulation) sont assez semblables.
- En ce qui concerne les bretelles de sortie, les accidents sont en moyenne plus nombreux dans la zone située en amont que dans la zone située en aval. Le contraire est vrai pour les bretelles d'entrée, où la concentration des accidents est plus importante en aval.

Tableau 4 – Fréquence moyenne des collisions aux entrées et aux sorties. Source des données : Urgences-Santé, période: 2000-2010.

Type de bretelle	Variable	Obs.	Moyenne	Écart type	Min	Max
Entrée	Taux totaux (200 m)	29	40.9	47.2	0.0	152.0
	Taux totaux (400 m)	29	20.1	21.9	0.0	75.0
	Taux en amont (200 m)	29	8.3	14.0	0.0	68.0
	Taux en aval (200 m)	29	11.8	15.1	0.0	51.0
	DJMA amont	24	53,887.1	18,051.6	24,632.1	103,389.8
	DJMA aval	24	63,986.2	21,901.0	27,460.4	114,299.1
	DJMA bretelle	24	10,099.1	6,105.0	771.0	22,778.0
	Ratio des débits	24	0.1	0.1	0.0	0.3
Sortie	Taux totaux (200 m)	31	53.4	38.7	0.0	147.0
	Taux totaux (400 m)	31	29.6	28.4	0.0	141.0
	Taux en amont (200 m)	31	18.5	17.6	0.0	75.0
	Taux en aval (200 m)	31	11.1	17.3	0.0	66.0
	DJMA amont	20	55,330.8	20,011.5	21,451.0	86,737.9
	DJMA aval	20	44,335.2	19,286.6	15,609.0	77,577.1
	DJMA bretelle	20	10,995.6	8,608.7	2,080.3	41,905.0
	Ratio des débits	20	0.2	0.1	0.1	0.7

En plus d'une analyse exploratoire à partir du nombre brut moyen des accidents, le taux des accidents a été examiné pour chaque site (avec et sans ligne LCGV1) comme suit :

$$R_i = \frac{y_i \times 10^6}{365 (T \times DJMA_i)} \quad (3)$$

R_i représente le taux des accidents sur le site i (accidents par millions de véhicules), y_i représente la fréquence des accidents sur le site i durant la période d'analyse T (en années), et $DJMA_i$ représente le débit journalier moyen annuel du site i . On note que pour les bretelles de sortie, le $DJMA_i$ correspond au débit en amont et que pour les bretelles d'entrée le $DJMA_i$ correspond au débit en aval.

Le **Tableau 5** présente les taux moyens d'accidents correspondant aux différentes longueurs des zones tampon. Les taux sont montrés séparément pour les entrées et pour les sorties, ainsi que pour les bretelles avec et sans ligne. À partir de ce tableau, on peut voir qu'en général, le taux moyen des accidents pour les bretelles d'entrée avec ligne est légèrement plus élevé que le taux moyen pour les sites sans ligne. Cependant, en ce qui concerne les sorties, ces taux sont légèrement plus élevés pour les sorties sans ligne, en particulier lorsque l'on considère une zone tampon de 400 m. Les différences entre les sites avec et sans ligne semblent marginales dans une majorité des cas. Cela est ensuite confirmé par une analyse de régression et des tests statistiques rigoureux.

Tableau 5 – Taux de collisions aux sites sans et avec LCGV1. Source des données : Urgences-Santé, période: 2000-2010.

Type de bretelle	LCGV1	Variable	Obs.	Taux moyen	Écart type	Min	Max
Entrée	Sans LCGV1	Taux totaux (200 m)	10	0.17	0.20	0.00	0.68
		Taux totaux (400 m)	10	0.17	0.20	0.00	0.68
		Taux amont (200 m)	10	0.04	0.06	0.00	0.21
		Taux aval (200 m)	10	0.12	0.13	0.00	0.43
	Avec LCGV1	Taux totaux (200 m)	14	0.22	0.20	0.00	0.72
		Taux totaux (400 m)	14	0.22	0.20	0.00	0.72
		Taux amont (200 m)	14	0.10	0.08	0.00	0.20
		Taux aval (200 m)	14	0.11	0.16	0.00	0.54
Sortie	Sans LCGV1	Taux totaux (200 m)	11	0.17	0.13	0.04	0.41
		Taux totaux (400 m)	11	0.44	0.30	0.06	1.05
		Taux amont (200 m)	11	0.04	0.08	0.00	0.26
		Taux aval (200 m)	11	0.11	0.08	0.03	0.30
	Avec LCGV1	Taux totaux (200 m)	9	0.15	0.10	0.02	0.32
		Taux totaux (400 m)	9	0.24	0.12	0.08	0.43
		Taux amont (200 m)	9	0.04	0.04	0.00	0.11
		Taux aval (200 m)	9	0.09	0.07	0.01	0.20

b. Analyse de régression

Lors de cette étape, l'analyse statistique est élargie grâce à une analyse rigoureuse de fréquence des accidents, afin de pouvoir vérifier les répercussions de l'utilisation de la ligne LCGV1. On utilise le modèle statistique le plus répandu en analyse de sécurité des autoroutes, le modèle de régression binomiale négative (BN). Ce modèle peut s'écrire : $Y_i \sim \text{Poisson}(T_i \theta_i)$, où Y_i représente le nombre d'accidents (survenue d'accident) à un emplacement donné i ($i=1, \dots, n$). θ_i représente la fréquence moyenne d'accidents et se définit mathématiquement tel que $\theta_i = \mu_i \exp(\varepsilon_i)$, où $\mu_i = f(F_{i1}, F_{i2}, X_{ik})$ est le nombre moyen d'accidents, aussi appelé la fonction de performance de sécurité et $\exp(\varepsilon_i)$ est l'erreur du modèle, $\exp(\varepsilon_i)$ assume la distribution gamma avec le paramètre α (paramètre de dispersion) déterminant la forme et l'échelle inverse. De plus, F_{i1} et F_{i2} représentent les conditions de circulation et X_{ik} , les attributs géométriques spécifiques au site étudié.

Dans le cadre de l'analyse, plusieurs fonctions de performance de sécurité sont définies et testées. La forme générale utilisée est la suivante :

$$\theta_i = \alpha \text{DJMA}_i \beta_1 \exp(\beta_2) \exp(\beta_3) \exp(\beta_4 X_{i1} + \dots + \beta_k X_{ik}) \quad (4)$$

où DJMA_i représente le DJMA en amont pour les bretelles d'entrée et le DJMA en aval pour les sorties. β_1 est le ratio de débit comme défini en section 2.3. Le débit en amont est utilisé pour les entrées et le débit en aval pour les sorties. Au lieu d'un ratio de débit,

le DJMA de la bretelle même, peut être utilisé. $X_{i1} \dots X_{ik}$ représentent les caractéristiques géométriques sur un site donné.

Afin de définir les variables géométriques potentiellement associées avec le nombre moyen d'accidents (μ_i), on calcule d'abord une matrice de corrélation. Il devient alors clair, qu'en addition des débits, de la visibilité et de la distance à la bretelle antérieure (en amont), il existe d'autres facteurs aussi associés avec le nombre d'accidents. Différents modèles avec un, deux ou trois facteurs géométriques sont adaptés aux données. Les meilleurs modèles sont choisis sur la base de critères d'importance pour chaque paramètre individuel et d'un ajustement bien adapté en général. Les modèles finaux sont présentés dans le **Tableau 6**.

Tableau 6 – Modèles pour bretelles d'entrées. * DJMA en amont, ** en multiples de 100, *** en multiples de 1000, numéros en gras indiquent une signification statistique de 10% ou moins.

Variables	Collisions totales (400 m)		Collisions totales (200 m)		Collisions amont (200 m)		Collisions aval (200 m)	
	Coef.	Valeur-p	Coef.	Valeur-p	Coef.	Valeur-p	Coef.	Valeur-p
DJMA *	0.93*	0.07	1.00	0.07	2.00	0.00	0.44	0.67
Ratio de débit	0.75	0.02	0.28	0.46	0.97	0.02	0.16	0.83
l_visibilite**	-0.78	0.10	-1.22	0.05	-1.30	0.04	-1.05	0.35
d_bret_amont***	-0.47	0.40	-0.46	0.46	-2.66	0.00	0.84	0.45
LCGV1	0.26	0.49	0.37	0.38	-0.14	0.77	0.48	0.42
Constant	-4.41	0.44	-6.41	0.31	-14.82	0.03	-2.57	0.83
alpha	0.53		0.61		0.50		1.34	

Tableau 7 – Modèles pour bretelles de sortie. * DJMA en aval, ** en multiples de 100, *** en multiples de 1000, numéros en gras indiquent une signification statistique de 10% ou moins.

Variables	Collisions totales (400 m)		Collisions totales (200 m)		Collisions amont (200 m)		Collisions aval (200 m)	
	Coef.	Valeur-p	Coef.	Valeur-p	Coef.	Valeur-p	Coef.	Valeur-p
DJMA *	0.57	0.07	0.15	0.60	0.52	0.12	0.01	0.99
Ratio de débit	0.41	0.08	0.24	0.29	0.18	0.36	0.61	0.25
l_visibilite**	-1.18	0.12	-2.32	0.00	-1.97	0.00	-3.97	0.01
d_bret_amont***	-0.20	0.58	-0.90	0.01	-1.16	0.00	0.66	0.42
LCGV1	-0.63	0.07	-0.11	0.71	-0.20	0.49	-0.19	0.82
Constant	-0.08	0.98	4.33	0.14	-0.08	0.98	4.68	0.54
alpha	0.33		0.24		0.21		1.07	

Les résultats de ce modèle sont en accord avec les tendances déjà observées lors de l'analyse exploratoire. Après ajustement des conditions de circulation et de la géométrie, la ligne LCGV1 a un effet positif qui n'est pas statistiquement significatif au niveau des bretelles d'entrée dans la plupart des zones tampon (total 400 m, total 200 m et en aval 200 m). Cependant, pour les sorties, l'effet est négatif, là aussi, de façon non statistiquement significative, à l'exception du modèle pour lequel les accidents surviennent dans une zone tampon de 400 m.

D'après cette analyse, on peut aussi observer que les caractéristiques de la circulation et de la géométrie (telles que le DJMA, le ratio de débit, la visibilité et parfois la distance en amont) semblent être, en général, les facteurs les plus statistiquement significatifs selon un niveau de signification de 0 % à 10 %. Ces résultats confirment à nouveau le rôle important que les conditions de circulation et la géométrie peuvent jouer en matière de survenue d'accident. De plus, l'effet de la ligne LCGV1 semble être marginal après la prise en compte d'autres conditions de circulation et de géométrie.

Il est important de réaliser que cette analyse comporte des limitations. Premièrement l'échantillon représente un ensemble de données très petit. Une partie des DJMA a été générée à partir de comptages manuels et vidéo puis élargie grâce à des coefficients de redressement connus. Dans plusieurs cas, les sites avec ligne présentent des conditions géométriques différentes, ce qui peut produire des biais de sélection lors de l'analyse.

Chapitre 4 : Collecte des données vidéo

4.1 Les sources de données vidéo du MTQ et leurs limitations

Avant qu'une méthodologie d'analyse automatique de données vidéo ne soit proposée, certaines vidéos furent prises dans le passé par le Ministère des Transports du Québec (MTQ), qui fournissent des preuves visuelles des changements de voies. Il a été conclu que certaines vidéos étaient utilisables pour une analyse de conflit plus systématique et automatique, mais d'autres vidéos étaient alors nécessaires. Le premier lot de vidéos, datant de la fin de l'année 2009 jusqu'au début 2010, concerne principalement les sites non conformes aux normes le long de l'autoroute 40, dont la jonction Christoph-Colomb, et des sites assez similaires le long de l'autoroute 20 et de l'autoroute 720.

Tableau 8 – Résumé des données vidéo recueillies par les caméras de sécurité du MTQ. *Des données vidéo ont été prises un an après l'application de la LCGV1 à ce site en mai 2011.

Identificateur de camera	Autoroute	Entrée/sortie	LCGV1	Qualité visuelle
		Novembre 2009		
Cam40-11-CC	40-W	Entrée	Avec	Moyenne : circulation dense, angle de vue
Cam40-13-d'Iberville	40-W	Sortie	Avec	Faible : hors de porte
		Mai 2010		
Cam20-16-Dorval*	20-W	Entrée (2)	Sans	Bonne
Cam20-14-32e_avenue	20-W	Sortie	Avec	Faible : obstructions
Cam20-11-1ere_avenue	20-E	Entrée	Sans	Faible : circulation dense, angle de vue
Cam138-03-Clément	138-E	Entrée	Sans	Bonne
Cam720-05-Greene	720-W	Entrée	Avec	Bonne
Cam720-04-St-Jaques	720-W	Sortie	Avec	Faible : hors de porte, secousses
		Novembre 2010		
Cam40-17-Langelier	40-W	Entrée	Avec	Faible : hors de porte, pluie
Cam40-17-Langelier	40-W	Sortie	Avec	Faible : hors de porte, pluie
Cam40-18-G.Anjou	40-W	Échangeur	Sans	Faible : circulation dense, pluie
Cam25-02-Anjou	25-S	Échangeur	Sans	Faible : circulation dense, pluie
Cam20-16-Dorval	20-W	Entrée (1)	Sans	Faible : obstruction échangeur
		Mai 2011		
Cam20-16-Dorval *	20-W	Entrée (2)	Avec	Bonne

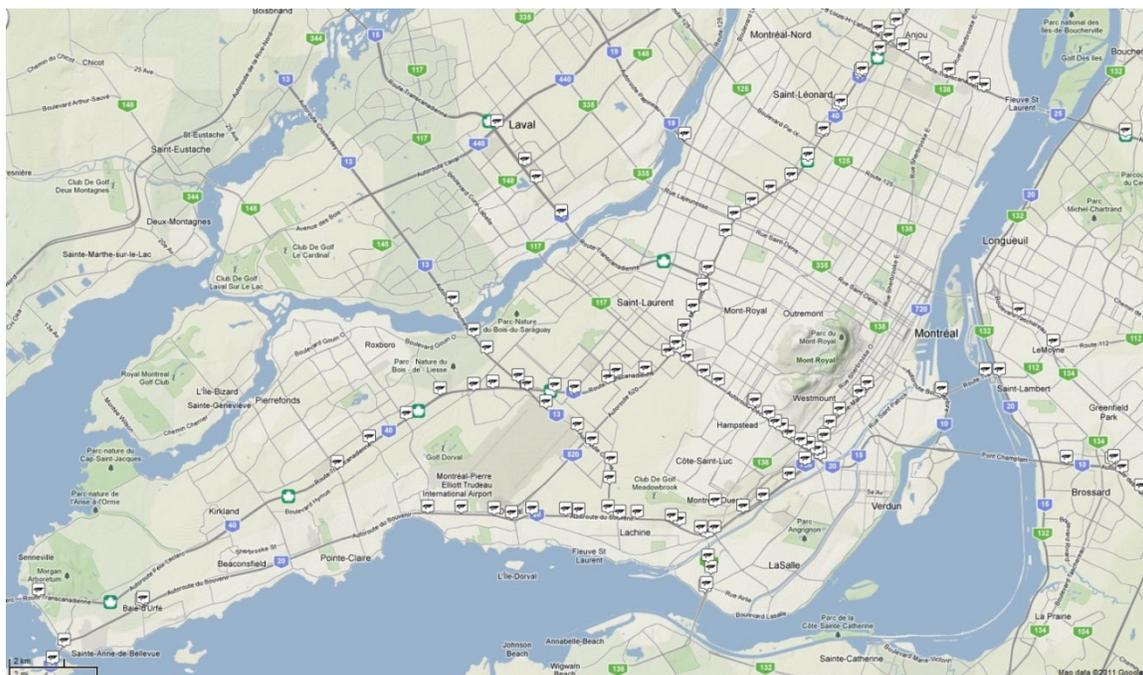


Figure 15 – Carte indiquant l'emplacement des caméras de sécurité du MTQ sur l'Île de Montréal en septembre 2011. Source : Québec 511.

Une carte des autoroutes de Montréal est présentée en **Figure 15** avec les emplacements des caméras du MTQ le long des autoroutes. Des prises de vues de ces caméras sont présentées en **Figures 1, 7 et 16**. Alors que les vues des Figures 1 et 7 sont bonnes et utilisables pour l'analyse vidéo (voir ci-dessous), la vue de la Figure 16 n'est

pas particulièrement utile car une grande partie est bloquée par une superstructure de signalisation et par des lampadaires.

De plus, alors que les véhicules s'éloignent à l'horizon, leur projection pixélisée sur le capteur d'image est réduite, ce qui signifie que les pixels représentent des traits de plus en plus grand pour chaque objet. Ainsi, lorsque la distance entre l'objet et la caméra grandit, il se produit une perte de la précision du suivi. Avec des caméras de moyenne et de faible résolution, telles que celles utilisées sur les autoroutes, le suivi devient difficile à des distances importantes. La distance pratique de visée par temps clair d'une caméra fixée à 60 pieds de hauteur et d'une résolution de 720x480 pixels est d'environ 500 m, alors que la distance pratique de suivi est de 50 à 100 m, de plus, le suivi s'arrête complètement entre 200 et 300 m.



Figure 16 – a) Autoroute 20 “Autoroute Jean-Lesage” direction est, sortie 60, “32e Avenue/A-13”, vue depuis Cam20-14-DirEst; b) Installation Cam20-14 (poteau à gauche).

4.2 La construction d'un outil de collecte de données vidéo

Étant donné les limitations importantes des caméras du MTQ et le manque de données existantes, nous avons construit un outil de collecte de données. Lors de la conception de cet outil, les caractéristiques suivantes ont été prises en compte :

- La mobilité : le premier impératif d'un dispositif de collecte de données vidéo mobile est qu'il doit pouvoir être installé à des emplacements -et couvrir des angles- que les caméras fixes de surveillance ne peuvent pas accéder.
- La taille : plus la caméra est en hauteur par rapport à l'autoroute, plus l'angle de prise de vue est à pic et plus l'aire d'observation est grande. Aussi, plus un angle de prise de vue est petit plus l'erreur de parallaxe de la voie est réduite. Un minimum de 7 m de hauteur est fortement conseillé.
- La sensibilité aux intempéries : les composants électroniques doivent être abrités de la pluie, des vents sévères et de la lumière directe. L'objectif devrait aussi être muni d'un viseur pour réduire l'éblouissement du soleil.
- L'éloignement : il n'existe pas de prises de courant sur le terrain, ni d'accès internet. Tous les systèmes électriques doivent être complètement indépendants et capables d'opérer de façon autonome un fois sur le terrain.
 - L'électricité : l'appareil a besoin d'électricité pour fonctionner. Chaque appareil doit alors être muni d'un bloc-batterie d'une autonomie de 24 h continues, dont les modes de tournage et de pause.
 - Les données : les données vidéo occupent beaucoup d'espace sur le disque. Chaque appareil doit disposer de matériel d'enregistrement détachable d'une autonomie de 8 à 16 heures d'enregistrement continu.
- La stabilité : une amplitude moyenne de tremblement peut être corrigée par un logiciel de stabilisation, cependant celui-ci diminue la qualité de la vidéo et ajoute un délai de traitement. De plus, le logiciel de stabilisation ne corrige pas les tremblements excessifs. Les deux sources principales de tremblement présentes autour des autoroutes sont les vibrations des véhicules (particulièrement des camions) et les vents forts (voir section 4.4). Enfin, on doit noter que la structure de l'équipement doit être solide avec une redondance à sécurité intégrée afin d'éviter que l'équipement ne tombe sur l'autoroute.

- À l'épreuve du vandalisme : le vandalisme de propriété publique et particulièrement celui de caméra ou d'autre matériel de surveillance n'est pas un fait exceptionnel, même au beau milieu d'une autoroute. Une surveillance constante n'est pas une solution très pratique et donc les caméras doivent être protégées contre le vol, les tentatives d'altération (particulièrement des câbles coupés), et les chutes accidentelles sur l'autoroute causée par un acte de vandalisme.
- La discrétion : la présence d'un équipement imposant et d'autres activités en général peuvent distraire le conducteur et représenter un risque en matière sécurité.
- L'installation : un budget limité, les contraintes d'un milieu autoroutier en mouvement constant et des installations de courte durée et fréquentes font que la caméra doit être facile et rapide à installer. Son installation doit pouvoir se faire sans l'intervention d'une grue, d'une nacelle, d'une échelle lourde ou d'outils électriques.
- Le budget : celui-ci est très restreint. En raison des choix de conception, on ne peut construire et opérer qu'un seul dispositif de collecte de données vidéo mobile.



Figure 17 – Équipement MioVision modifié, version 1.0: a) installation de la base, b) avec mât étendu.

On peut voir la conception retenue (essentiellement une longue perche UCV *MioVision* recâblée et renforcée) pendant les essais en **Figure 17**. Le dispositif atteste d'un compromis favorisant la facilité de l'installation, la légèreté et la discrétion au détriment d'une meilleure stabilité. Ce dispositif s'attache à d'autres poteaux pour une stabilité, une discrétion et une sécurité accrues, bien que cela limite quelque peu les capacités de mise en place. Le procédé d'installation est illustré en **Figure 18**, avec les sangles *winch*, les chaînes et la corde.

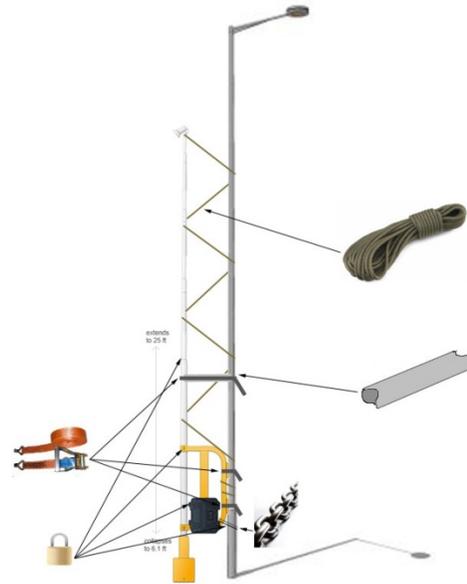


Figure 18 – Installation de l'équipement.

4.3 La collecte de données vidéo : sélection des sites et enjeux

Le dispositif portatif de collecte de données vidéo présenté en section 4.2 a été installé sur plusieurs sites sur différentes autoroutes durant l'été 2011. Le choix des sites s'est fait principalement selon des critères d'accessibilité et de disponibilité d'une infrastructure sur laquelle installer le dispositif, sous la supervision d'un représentant du MTQ.

Les viaducs n'ont pas pu être accédés en raison de difficultés logistiques car ils n'incorporent pas d'accotements assez larges et/ou d'aménagements adjacents accessibles. Pour ces emplacements, certaines voies devraient être complètement ou partiellement fermées en vue d'une installation. Les aménagements situés au centre d'une autoroute à chaussées séparées (à l'inverse d'une autoroute séparée par un fossé) ne sont pas non plus généralement accessibles sans une fermeture complète ou partielle de voies. Malheureusement, ces sites constituent une portion significative des autoroutes de Montréal, particulièrement les sections les plus fréquentées et respectant le moins les normes, tels que sur l'autoroute 40 et l'autoroute 720.



Figure 19 – Installation de l'équipement (vue de la base) au site MTG-Cam20-E-55e-Sortie.

Les sites comprenant un accotement assez large et/ou avec 2 m ou plus de terres provinciales accessibles à pied ou par véhicule ont été sélectionnés pour l'installation du dispositif de collecte de données vidéo mobile. Voir **Figures 19 et 20**. Certains équipements d'infrastructure se trouvent généralement à proximité ou le long des bretelles d'insertion, comme des lampadaires ou des superstructures. L'autoroute 20, l'autoroute 13 et l'autoroute 25 comportent beaucoup de ces aménagements. En milieu rural, presque aucun des sites n'a présenté des difficultés d'accès. Ceux-ci ont alors été choisis de façon à représenter un échantillon équilibré avec des entrées, des sorties, des sites avec et sans ligne LCGV1.



Figure 20 –Installation sur superstructure pour le site MTG-Cam25-N-Sherbrooke-Sortie.

Les sites filmés à l'aide du dispositif de collecte de données vidéo mobile sont présentés sur le **Tableau 9**. Pratiquement toutes ces installations ont fourni une qualité visuelle supérieure à celle des caméras de surveillance de la MTQ, car elles s'adaptent aux contraintes imposées par l'analyse de trajectoire. L'angle de vue a constitué le premier facteur limitant, la hauteur de la caméra étant restreinte par la taille physique du dispositif et sa stabilité. Ces limitations ont cependant été compensées par la possibilité d'obtenir des prises de vue rapprochées à une meilleure résolution et avec un meilleur ajustement du cadrage.

Tableau 9 – Résumé des données vidéo collectées par l'équipe de recherche.

Identificateur de camera	Autoroute	Entrée/sortie	LCGV1	Qualité visuelle
		Juin 2011		
MTG-Cam20-Dorval	20-W	Entrée	Avec	Moyenne : secousses
MTG-Cam20-E-55e-Sortie	20-W	Sortie	Avec	Bonne
MTG-Cam20-E-55e-Entree	20-W	Entrée	Avec	Bonne
MTG-Cam20-1ere	20-E	Entrée	Sans	Bonne
MTG-Cam25-S-Sherbrooke-Sortie	25-S	Sortie	Sans	Moyenne : angle de vue
MTG-Cam25-N-Sherbrooke-Sortie	25-N	Sortie	Avec	Moyenne : angle de vue
MTG-Cam13-520E-Sortie	13-N	Sortie	Sans	Bonne

4.4 Le prétraitement des données vidéo

Avant que les données puissent être traitées, une étape de prétraitement doit être suivie si des problèmes de stabilité et de cadrage ont affecté les données vidéo. La stabilité est fréquemment un problème avec les équipements mobiles, il faut donc stabiliser la vidéo. Les caméras fixes ont souvent un format propriétaire qui doit être corrigé pour que les données vidéo soient compatibles avec le logiciel de traitement vidéo. Dans tous les cas, un choix de compression est requis, ce qui affecte la qualité et la taille des données vidéo. Un compromis entre la précision de traitement des trajectoires et la complexité de la gestion des données s'impose alors. Un fichier vidéo de meilleure qualité va produire des extrapolations de trajectoires plus précises, aux dépens de données vidéo plus grandes, nécessitant un temps de traitement plus long et une mémoire plus grande (une heure sur un site peut utiliser entre 1 GB et 20 GB de données, métadonnée et données extrapolées inclus).

Par ailleurs, il faut noter que toute opération de compression vidéo introduit des phénomènes secondaires qui ont une répercussion sur la qualité de la vidéo, de la même façon que la qualité d'un document en papier est éprouvée chaque fois que celui-ci est photocopié. Cela comprend aussi toute compression réalisée par la caméra elle-même. Cependant, avec les technologies actuelles, la mise en mémoire ou l'émission d'une vidéo non comprimée n'est pas facile.

Le format vidéo cible a les caractéristiques suivantes : numérique, avec résolutions d'au moins 800 pixels par 600 pixels, un ratio de pixel carré, désentrelacé (balayage progressif), 25 images par seconde ou plus (29,97 format *NTSC* normalisé), sans audio. Les images doivent être correctement synchronisées de façon à obtenir des vitesses réalistes et cohérentes. Plus le nombre de pixel est élevé, plus la précision augmente particulièrement au niveau des zones à l'horizon, mais cet avantage suit la loi des rendements décroissants.

L'algorithme de compression choisi est le H.264 avec un débit binaire de 2,5 Mbit/s en utilisant le conteneur *.avi*. On note que le H.264 présente des problèmes de compatibilité avec le conteneur *.avi* et qu'il a été principalement conçu pour une utilisation sur un conteneur *.mp4*. L'utilisation du *.avi* pour codec H.264 est découragée, cependant elle est adoptée ici à cause des limitations inhérentes aux bibliothèques d'analyses vidéo en utilisation. Le moteur de compression utilisé est le code source libre x264, qui a le support approprié pour *.avi* avec le paquet codec *ffdshow*.

Dans des conditions normales, deux sources principales de tremblement existent : les vibrations des véhicules et le vent. Le tremblement de la caméra se manifeste dans les

prises de vue. La magnitude et la fréquence de ces tremblements dépend fortement de l'installation de la caméra. La stabilisation est le procédé qui élimine les mouvements globaux des vues. Cela est généralement réalisé en suivant le mouvement (changements locaux de couleur) de multiples pixels et en calculant un motif de mouvement d'ensemble. En appliquant l'inverse du mouvement à toute l'image, on parvient à compenser le tremblement.

Chapitre 5 : Analyse des données vidéo

Des progrès récents en analyse de conflit semi-automatique de vidéo de la circulation sont exploités dans cette étude afin de compenser certaines faiblesses de la méthode d'analyse historique. Les vidéos sont semi-automatiquement analysées à partir d'un suivi par ordinateur pour produire des trajectoires de véhicule en temps et en espace. Plusieurs mesures de comportement du conducteur (reposant sur des relations spatiales observées entre les véhicules et la géométrie de la route) sont introduites et reportées dans ce document. Ces mesures comprennent comme mesure de conflit le temps estimé avant collision TEC (*time-to-collision*), le taux de changement de voie, la densité de trajectoire et les ratios de débit. Chaque site est analysé de cette façon à partir d'un segment d'autoroute, de 50 à 75 m de long, situé à un endroit précis par rapport à la bretelle.

5.1 Méthodologie

Pour le suivi des véhicules, cette étude emploie un outil d'analyse vidéo créé à l'Université de Colombie Britannique (11) (15). Les pixels individuels sont localisés, suivis sur plusieurs images et enregistrés comme trajectoires de points caractéristiques.

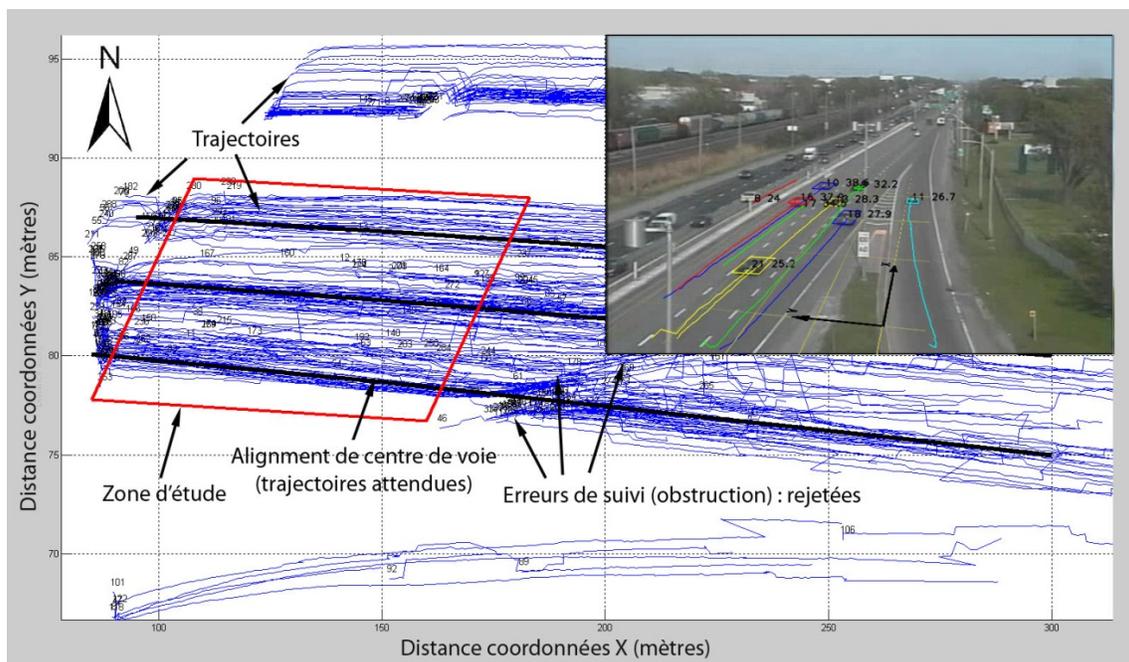


Figure 21 – Échantillon de trajectoires en espace X, Y pour l'entrée 56 (« Bouchard »), Autoroute 20 direction est, Dorval, Montréal. Les trajectoires sont filtrées pour n'inclure que la zone d'étude (50 m de longueur et 10 m de largeur).

Les coordonnées de pixel en espace-image doivent être projetées précisément en coordonnées du monde réel reposant sur une surface de référence dont le modèle est connu (la surface de la chaussée), afin de pouvoir analyser le positionnement des véhicules. Quand les données vidéo sont collectées par un tiers parti, l'accès à la caméra n'est pas possible et donc tous les paramètres de la caméra doivent être déduits à partir des observations et d'une image orthographique (aérienne) de l'intersection. Cela est réalisé grâce à une méthode de calibration robuste qui repose sur plusieurs caractéristiques telles que la forme, la position et la longueur d'objets notables à la fois sur l'image et dans les espaces réels (3). Des difficultés additionnelles, causées par une légère dérive de l'orientation de la caméra avec le temps, sont résolues en suivant automatiquement une portion immobile du terrain. Le temps est mesuré en trames : un point de données (position par objet par trame) est collecté pour chaque nouvelle image vidéo, à raison de 29,96 trames par seconde. Un déplacement de 1 m, d'un point de données à un autre (1 m/t) représente un objet se déplaçant à une vitesse de 29,96 m/s soit à 107,86 km/h. Ce taux élevé de scrutation produit des ensembles de données très larges avec des incréments minimes.

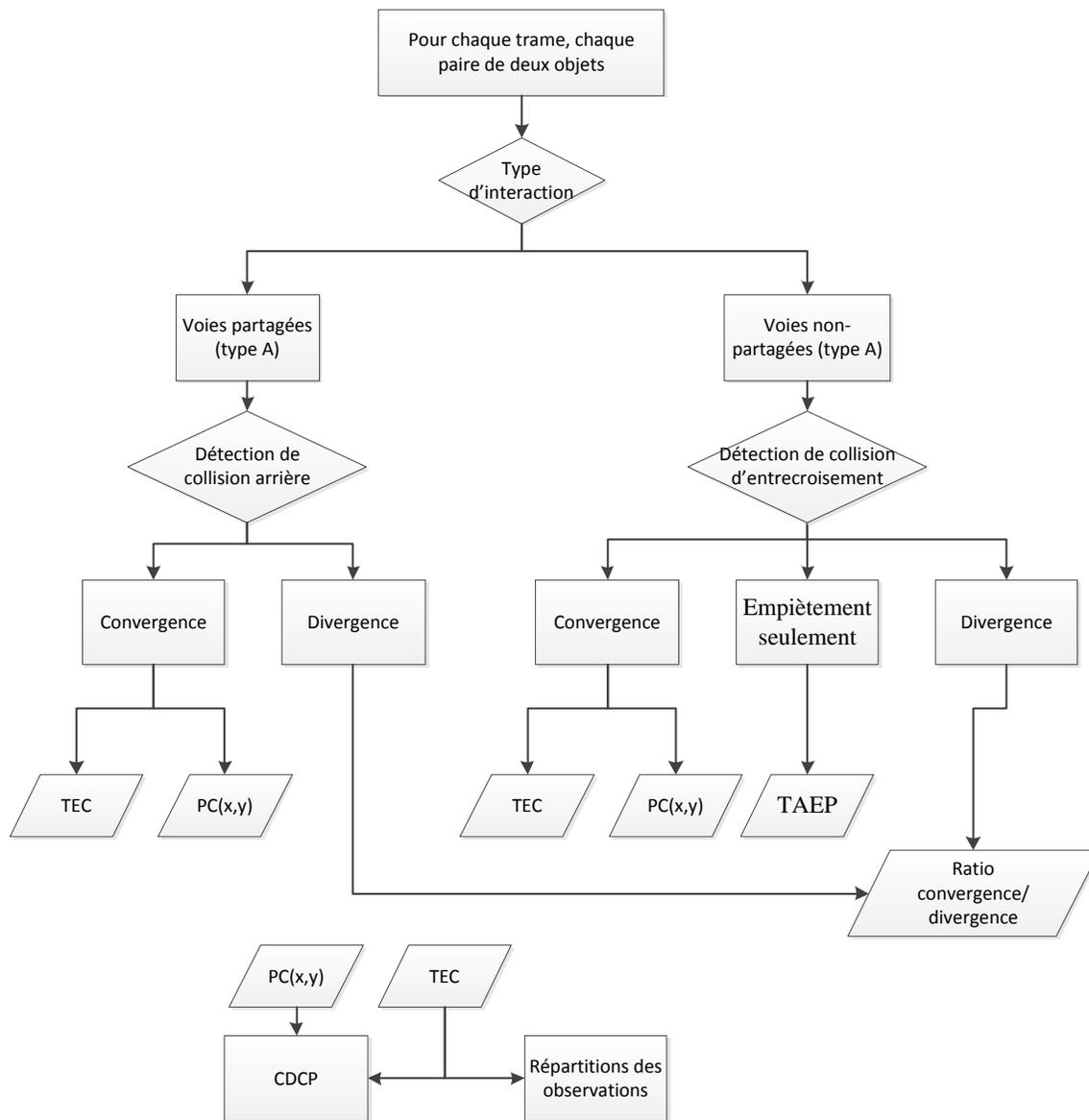


Figure 22 – Schéma de classification des interactions. PC : point de conflit, TAEP : temps d'après empiètement prédit.

Une deuxième phase de filtrage des données a été élaborée spécifiquement pour cette étude de manière à optimiser la fiabilité du suivi, étant donné les contraintes imposées par le débit d'autoroute et par le type d'angles de caméra choisis pour enregistrer les séquences vidéo. Cette phase inclut la troncature des contours et des réchauffements, la transformation des coordonnées de trajectoire attendue, la réduction du bruit et le signalement des erreurs de détection (telles que des objets doubles, de multiples véhicules par objet, des objets coupés, etc.) lors d'un examen effectué manuellement. Ces routines de filtrage ont été empiriquement validées.

Un échantillon de trajectoires extrapolées ainsi que la sélection d'une zone d'étude pour l'élimination de trajectoires improbables sont présentés en **Figure 21**. Les

véhicules ont été assignés à une voie et à un ensemble de coordonnées transformées pour des calculs d'espacements de suivi basés sur une trajectoire attendue représentant le cheminement moyen des groupements de trajectoires associés à chaque voie.

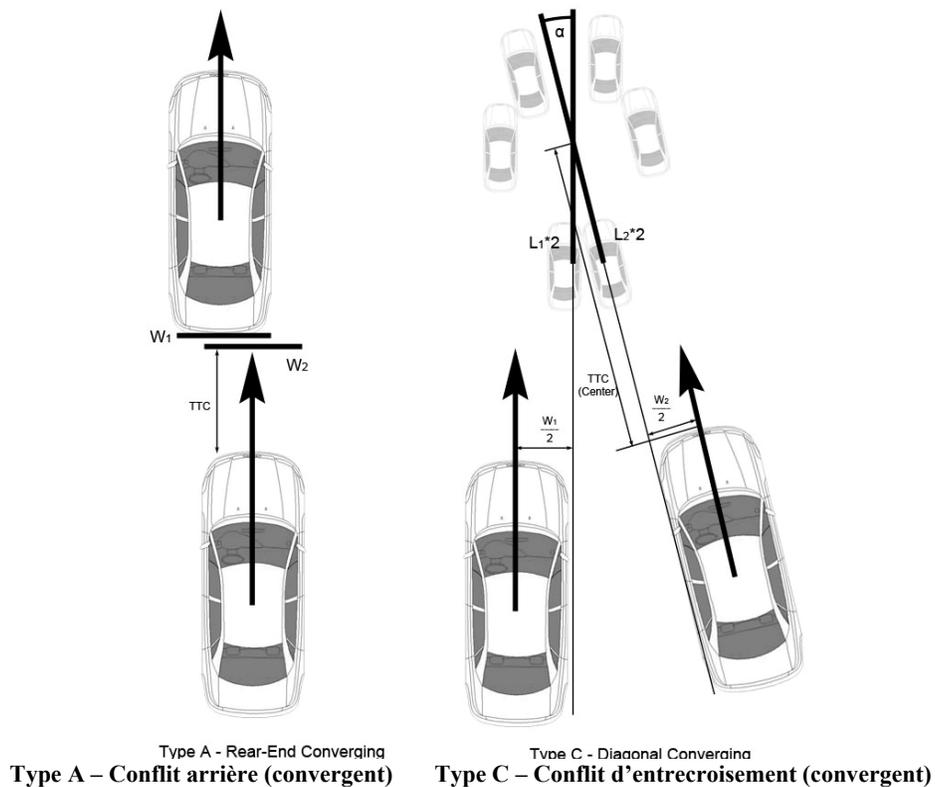


Figure 23 – Types de conflits (interactions convergentes) et méthode de projection des trajectoires. Le TEC est calculé depuis la vitesse, la position, les largeurs (W) et longueurs (L) de véhicules et l'angle d'approche.

Les mesures de conflit ont été définies sommairement dans beaucoup de publications, mais en général, elles ont tendance à provenir de trois variables : des positions x et y de deux véhicules ou plus en fonction du temps t . Dans un rapport publié en 2003 (16), Gettman et Head ont compilé une liste des mesures de substitution principales récurrentes de sécurité utilisées dans la documentation. Ce rapport définit sept mesures principales : le temps de créneau (*gap time GT*), le temps d'empiètement (*encroachment time ET*), le taux de décélération (*deceleration rate DR*), la proportion de la distance d'arrêt (*proportion of stopping distance PSD*), le temps d'après empiètement TAE (*post-encroachment time PET*), le temps d'après empiètement initial (*initially attempted post-encroachment time IAPT*) et le temps estimé avant collision TEC (*time to collision TTC*). Le rapport du FHWA compare ces mesures à des indicateurs de probabilité de collision. On doit noter que la relation exacte entre les conflits et les collisions reste toujours à définir clairement.

Aux fins de l'analyse de conflit d'autoroute, on assume qu'aucune situation de conflit à angle d'incidence de plus de 90° n'est possible. On se concentre alors sur deux interactions principales : les conflits venant de l'arrière (type A) et les conflits venant de l'entrecroisement (type C). Chacune peut être convergente ou divergente (voir Figure 22 et

Figure 23 pour la classification). De toutes les mesures déjà mentionnées, TEC est considérée comme la plus fiable, elle est aussi généralement colinéaire avec les autres mesures et il s'agit de la grandeur la plus fréquemment examinée dans les études d'autoroute. TEC est donc la principale mesure de comparaison sélectionnée (8).

La mesure TEC peut être définie comme étant la durée avant que deux objets - dont les trajectoires définies par une vitesse constante au moment précis de la mesure- se croisent, se rencontrent et entrent en collision (17). Aux fins de ce document, un chemin en ligne droite est utilisé pour générer les projections d'impacts et les mesures TEC. L'algorithme de calcul des mesures TEC est basé sur le travail de Laureshyn et autres collaborateurs (6). Pour toute mesure TEC, la position (x, y) de chaque point de collision prévu PC est aussi enregistrée. Dans les situations où les trajectoires convergent, sans que la collision entre véhicules ne soit prédite (pas de parcours de collision, pas de TEC), une mesure TAE prévue est calculée et enregistrée. Voir Figure 23 pour une illustration des projections de trajectoires et de l'algorithme de mesure employé.

Pour que la mesure TEC soit *absolument* utile dans un contexte de sécurité routière, il est important de comprendre sa relation avec la probabilité de collision, si celle-ci est fiable. Malheureusement, plus de recherche est nécessaire pour établir une relation formelle entre ces deux mesures. Sur le plan de la conception, comme déjà mentionné, il est clair que le TEC est une mesure du temps restant, à n'importe quel temps t , avant que deux véhicules entrent en collision, sans que le conducteur ne réagisse. Ainsi, le résultat observé d'un tel événement, en moyenne, est proposé comme méthode de mesure empirique de la probabilité de collision au temps t , étant donné un TEC et d'autres facteurs, tels le temps de réaction du conducteur, la visibilité, la performance, la déficience du véhicule, et un nombre suffisamment grand d'observations, ainsi selon le champ d'application :

$$\text{Probabilité de collision } (t) = f(\text{TEC}(t), \text{facteurs}) \quad (5)$$

Par définition du TEC, la probabilité d'une collision pour $\text{TEC} = 0$ est 1 :

$$PC(\text{TEC}(t) = 0, \text{facteurs}) = 1 \quad (6)$$

De plus, on peut estimer que la relation générale entre la probabilité de collision et le TEC est exponentiellement décroissante, étant donné des facteurs autres fixes : alors que le TEC augmente, les conducteurs ont d'autant plus de temps pour réagir, de changer

leur trajectoire prévue et d'éviter la collision. Pour illustrer la méthodologie, on peut considérer la forme du modèle empirique exponentiellement décroissant :

$$DCP(TEC(t)) = \frac{1}{e^{TEC(t)}} \quad (7)$$

où $DCP(TEC(t))$ représente la pondération d'un conflit au temps t selon le TEC au temps t . La calibration de ce modèle, ainsi que l'exploration d'autres fonctions mathématiques feront l'objet de futurs travaux dont l'objectif sera de définir un modèle général, à partir de facteurs tels que les conditions de la route, les répartitions des temps de réaction des conducteurs, etc.

Un échantillon d'un rapport d'analyse de conflit où figurent les désignations d'éléments caractéristiques est présenté en exemple en **Figure 24**. Les éléments 1) à 5) et l'élément 8) fournissent des métadonnées sur le site analysé. On doit noter que la présence de la ligne LCGV1 sur certaines imageries satellitaires 4) est en contradiction avec ce que la vue de la caméra communique 5), cependant les conditions présentées par la caméra l'emportent. L'élément 6) est la carte de densité de conflits pondérés (« *heat map* »), elle transmet la géo-répartition et la densité de conflits pondérés : les couleurs « plus chaudes » indiquent une densité de petites mesures de TEC plus importante, ce qui suggère un risque d'accident imminent à cet emplacement (dans ce cas, sur les voies 2 et 3, avec une marque de densité plus longue sur la voie 3). L'élément 7) est la zone d'analyse qui délimite les interactions étudiées. On doit noter que les marques des cartes de densité sortent souvent de cette zone. Ces conflits sont projetés par des mouvements confinés dans la zone d'analyse et vont certainement se chevaucher avec des conflits mesurés à l'intérieur d'une zone d'analyse plus en aval. De la même façon, tout conflit examiné dans une zone d'analyse en amont de cette zone va aussi se chevaucher avec d'autres conflits. Les cartes de densité de conflits pondérés doivent alors seulement être comprises comme des conflits extrapolés provenant de comportements à l'intérieur de la zone d'analyse. L'élément 8) recouvre la géométrie aux fins de la visualisation. Cet élément et tous les autres éléments de la carte de densité, sont géo référencés, bien que les axes ne soient pas toujours à la même échelle afin de mieux s'adapter à l'information sur le graphe. L'élément 9) fournit la gamme de couleurs utilisée pour différencier les densités sur les sites. L'élément 10) fournit les cartes de densité pour des types de conflits particuliers. Dans cet exemple, les conflits de type A (venant de l'arrière) présentent des similarités avec la carte de densité originale, ce qui suggère qu'il s'agit du type de conflit dominant. Les conflits de type C (venant de l'entrecroisement) ont une plus forte densité pondérée sur la deuxième voie, avec une répartition relativement uniforme si ce n'est bruitée. Sur le graphe de répartition des conflits, les éléments 11) à 13) fournissent un TEC (mesuré en secondes) en fonction d'un taux d'observation (pourcentage par 0,5 s). Alors que la densité des conflits converge vers 0, on s'attend à ce que la probabilité

d'accidents augmente. Le graphe compare numériquement les répartitions entre les conflits de type A et de type C, ainsi que les conflits réduits à toutes les interactions (moyenne en fonction du temps) ou selon l'observation minimale pour chaque unique paire d'interaction (ce dernier comprend généralement plus de bruit et est plus sensible aux erreurs de suivi, mais c'est une représentation plus réaliste de la définition originale d'un conflit ainsi que de son observation). Finalement, on doit mentionner que toutes les queues de répartition convergent vers 0 alors que le TEC tend vers l'infini. Pour toutes les répartitions, on observe que la zone bornée par les répartitions après 40 s représente approximativement 5 % de la zone de répartition et est largement composée d'erreurs ou de conflits non significatifs. Les conflits de plus de 40 s (ou même de plus de 10 s) sont moins importants en ce qui concerne la prédiction des accidents, étant donné que le temps moyen de réaction du conducteur est de 1,5 s (14).

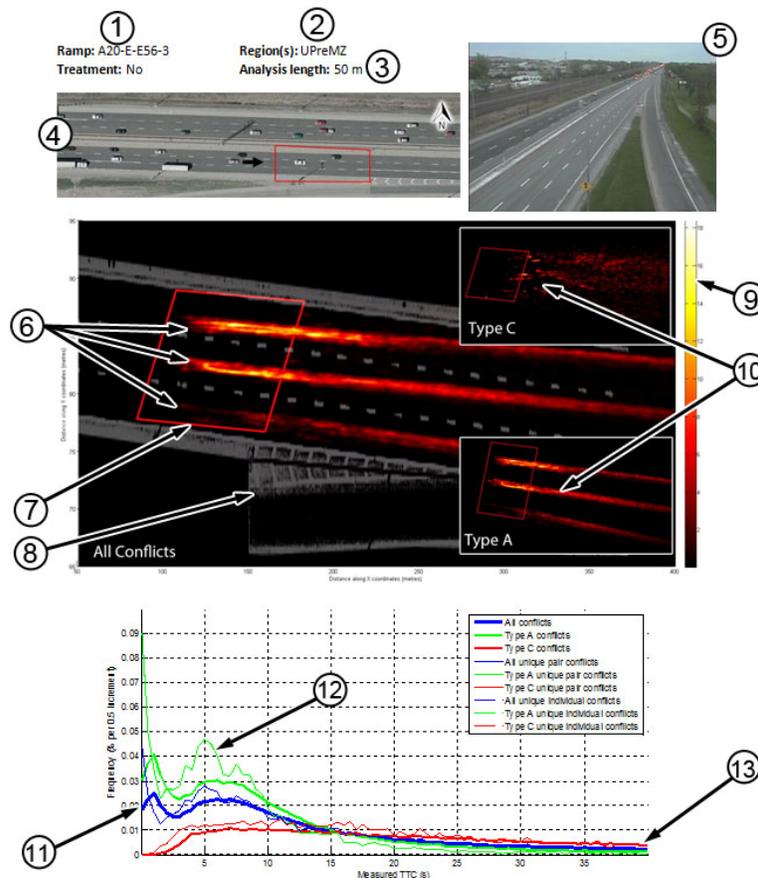


Figure 24 – 1) Identificateur de site, voir section 1.1; 2) Sous-section de bretelle correspondante (section 1.3); 3) longueur de la zone d'étude; 4) orthophotos de calibration avec zone d'étude superposée en rouge, direction d'écoulement de gauche à droite; 5) échantillon de la vue de la camera; 6) carte de densité des conflits pondérés; 7) zone d'étude; 8) géométrie superposé approximativement pour fin de visualisation, les échelles des axes ne sont pas proportionnelles; 9) échelle de couleur normalisé indiquant la densité des conflits pondérés; 10) carte de densité des conflits pondérés par type de conflit; 11) répartition des conflits, TEC en seconds contre la fréquence, ou bleu = tous conflits, vert = conflits de type A, rouge = conflits de type C; 12) les répartitions

varient selon la méthode d'agrégation; 13) les répartitions de conflit convergent vers 0 observations après un TEC de 40 secondes.

La répartition caractéristique de vitesse comme mesurée par l'algorithme de suivi est présentée en **Figure 25**. En général, les vitesses sont normalement réparties (loi normale). On constate que le site moyen affiche une vitesse moyenne de 90 à 110 km/h, avec une déviation standard de 10 à 15 km/h (voir Tableaux 10 et 12 des sections 5.2.1 et 5.2.2 pour l'intégralité des résultats). Pour certains sites, près de 70 % des usagers sont enregistrés alors qu'ils conduisent à des vitesses supérieures à la limite (100 km/h), bien qu'une partie de ce pourcentage puisse être attribuée à des erreurs de projection/calibration (principalement les mesures au-dessus de 140 km/h). Les vitesses aux bretelles sont réparties normalement autour de 75 km/h avec une déviation standard plus importante de 25 km/h (accélération/décélération). Ces vitesses sont en fait hypothétiques; les mesures n'ont pas été systématiquement prises et les dynamiques d'accélération et de décélération sur une bretelle imposent des vitesses normales sensiblement différentes à différents emplacements.

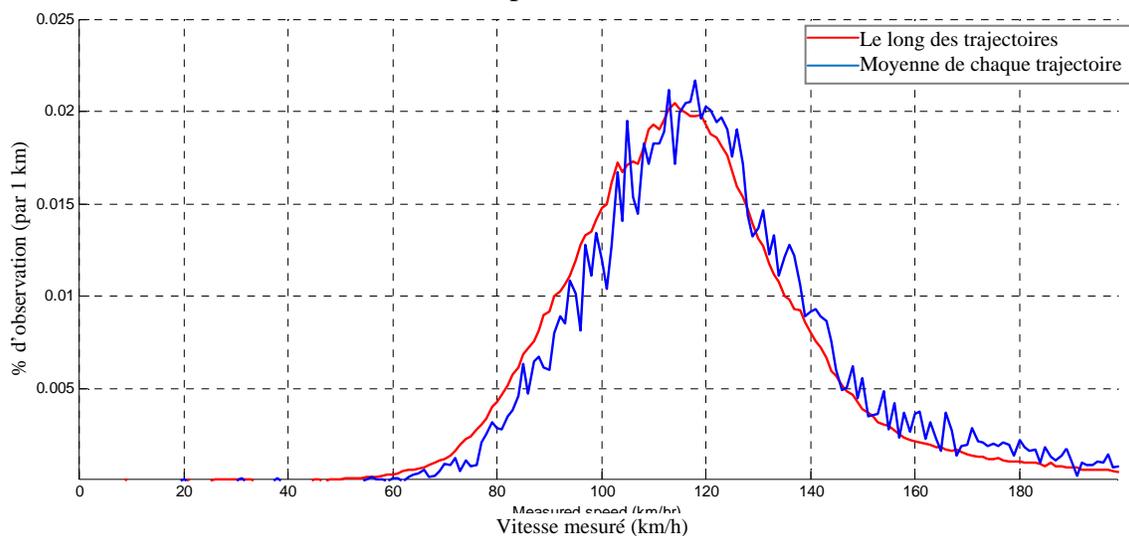


Figure 25 – Répartition typique des vitesses observées (site A13-N-S3-1). En rouge: vitesses observées le long de toutes les trajectoires; en bleu: vitesse moyenne de chaque trajectoire.

5.2 Les résultats de l'analyse de conflit

Un rapport d'analyse de conflit est rédigé pour chaque ensemble de données vidéo. Ces ensembles sont répartis sur un total de huit différents sites. Les rapports sont comparés un à un dans le cadre de l'étude cas-témoin (les sites sont choisis pour des conditions de géométrie et de débit similaires –autres que les variables testées). De plus, un des sites dispose de données vidéo avant et après LCGV1, les rapports associés sont comparés pour une brève étude avant-après.

5.2.1 Étude cas-témoin

Un total de huit sites disposant de données vidéo sont analysés pour l'étude cas-témoin. Tous les détails des données vidéo extrapolées et analysées sont présentés dans le **Tableau 10**. Une majorité des séquences utilisées pour l'analyse de conflit ont été prises lors d'un niveau de service de classification A, B et C seulement, pour les raisons suivantes :

1. Tous les algorithmes actuels de véhicule se dégradent dans des conditions de débit élevé. Cela est principalement dû à la circulation dense qui rapproche les véhicules et les oblige à rouler à la même faible vitesse, ce qui fait que les algorithmes ont des difficultés à les différencier. De plus, il n'est pas possible à l'heure actuelle de suivre des véhicules immobiles avec le dispositif d'analyse vidéo.
2. La méthode de conflit n'est pas bien adaptée à une circulation saccadée, pour laquelle des fluctuations de mesures TEC sont fréquentes et pourtant sans gravité. Il en résulte des mesures bruitées sans signifiante. De plus, les collisions survenant dans des conditions de haut débit n'entraînent pas d'accidents graves (voir section 3.1).
3. Le personnel du MTQ s'accorde à dire que dans des conditions de circulation intense, le comportement de file d'attente est prédominant, ce qui conduit à plus d'abus de la ligne LCGV1 alors que les conducteurs « se disputent » les places.
4. La ligne LCGV1 est d'abord conçue pour guider les véhicules qui se déplacent à grande vitesse, avec peu de temps ou de possibilités de s'insérer de façon sécuritaire.

Par ailleurs, pour des sites semblables avec des débits semblables (débit total ainsi que ratio d'entrée et de sortie), le fait que la zone d'analyse comprenne le débit de bretelle, ou pas, va influencer le nombre d'objets analysés.

Tableau 10 – Inventaire des données vidéo pour l’analyse transversale.

Site	LCGV1	Véhicules/ h	Vitesse μ	Vitesse σ	Longueur d’étude	Durée d’étude
A20-E-E56-3	Non	2515	95 km/h	11 km/h	50 m	5 h
A20-W-E62	Non	2946	88 km/h	16 km/h	80 m	3.6 h
A20-E-E58	Non	2497	111 km/h	15 km/h	100 m	5.3 h
A720-E-E3	Oui	2193	60 km/h	10 km/h	75 m	6 h
A13-N-S3-1	Non	2643	110 km/h	14 km/h	60 m	3.6 h
A25-S-S5	Non	3012	88 km/h	10 km/h	50 m	4 h
A20-E-S58	Oui	2146	110 km/h	11 km/h	70 m	4.6h
A25-N-S5	Oui	2388	90 km/h	9 km/h	50 m	3.2h

Les pages suivantes contiennent les rapports de conflit sur chaque site. Les résultats d’analyse sont présentés de la Figure 26 à la Figure33.

Bretelle : A20-E-E56-3
LCGV1 : Non

Zone(s) : ZPreINP
Longueur d'étude : 50 m

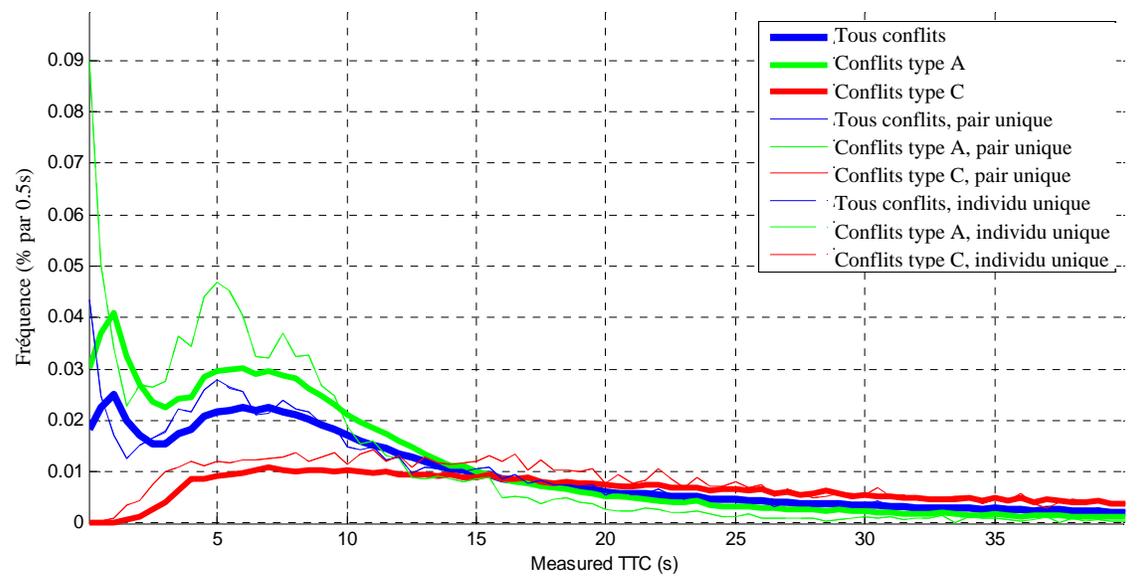
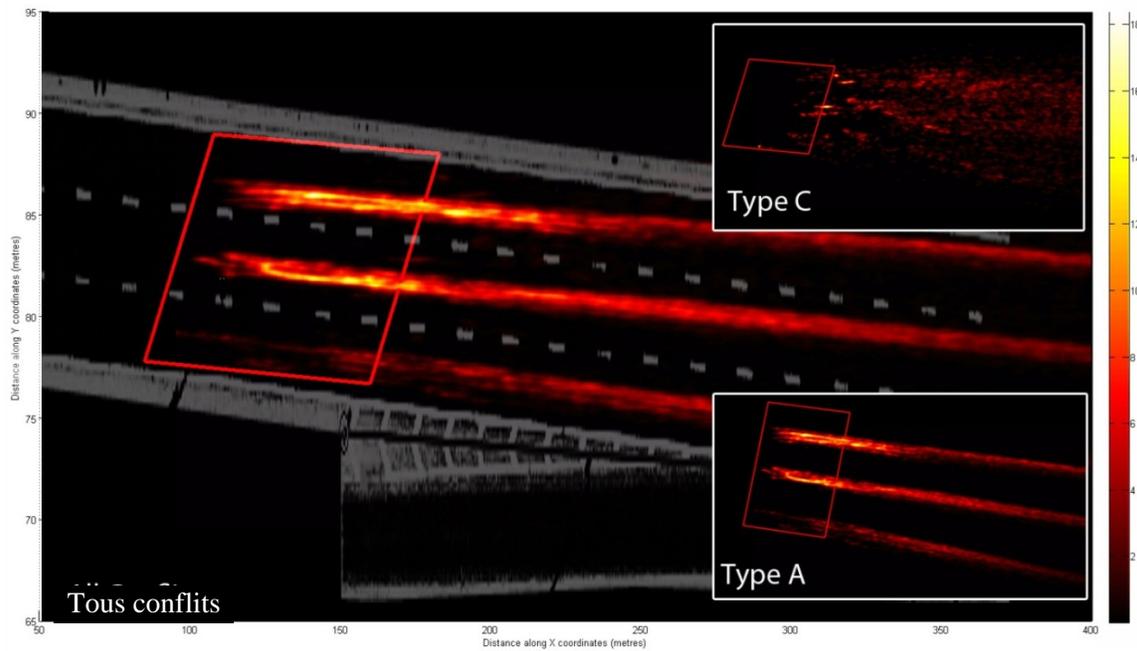


Figure 26 – Analyse des conflits pour Cam20-16-Dorval (sans LCGV1).

Bretelle : A20-W-E62
LCGV1 : Non
Zone(s) : ZPreINP
Longueur d'étude : 80m

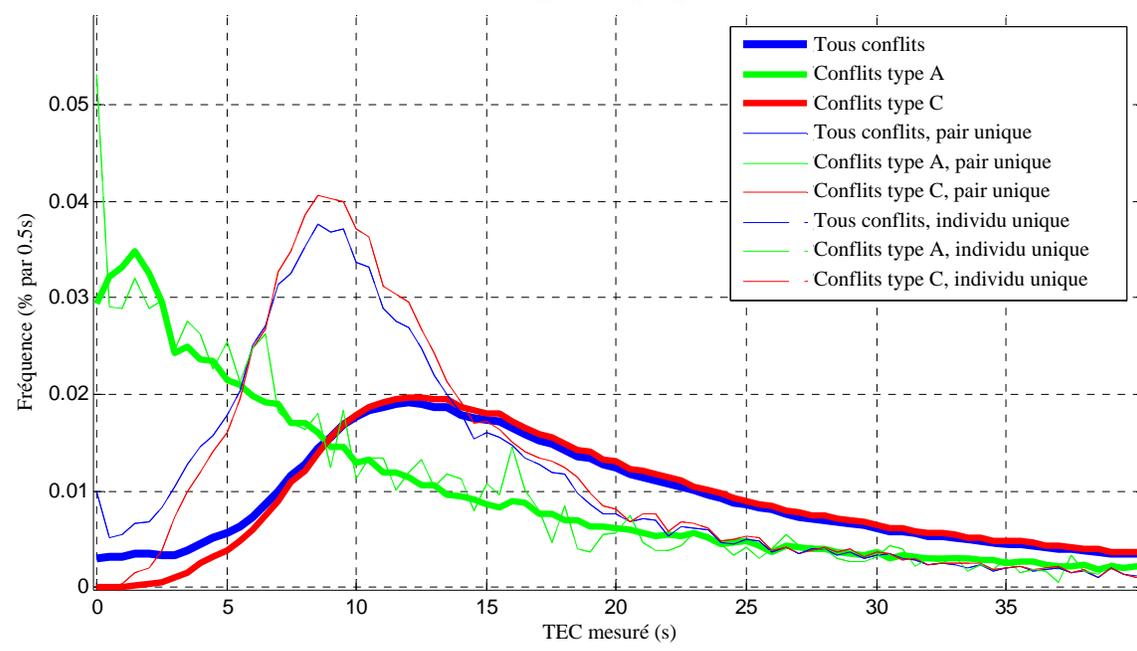
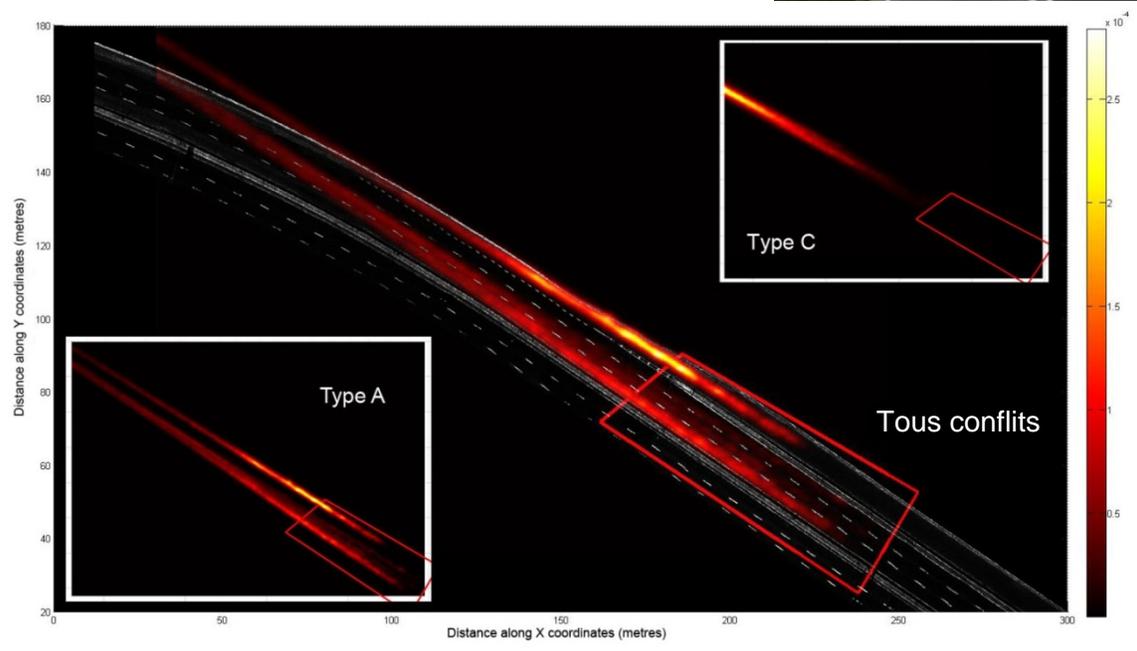


Figure 27 – Analyse des conflits pour MTG-Cam20-1ere (sans LCGV1).

Bretelle : A20-E-E58 Zone(s) : ZPreINP
LCGV1 : Non Longueur d'étude : 100 m

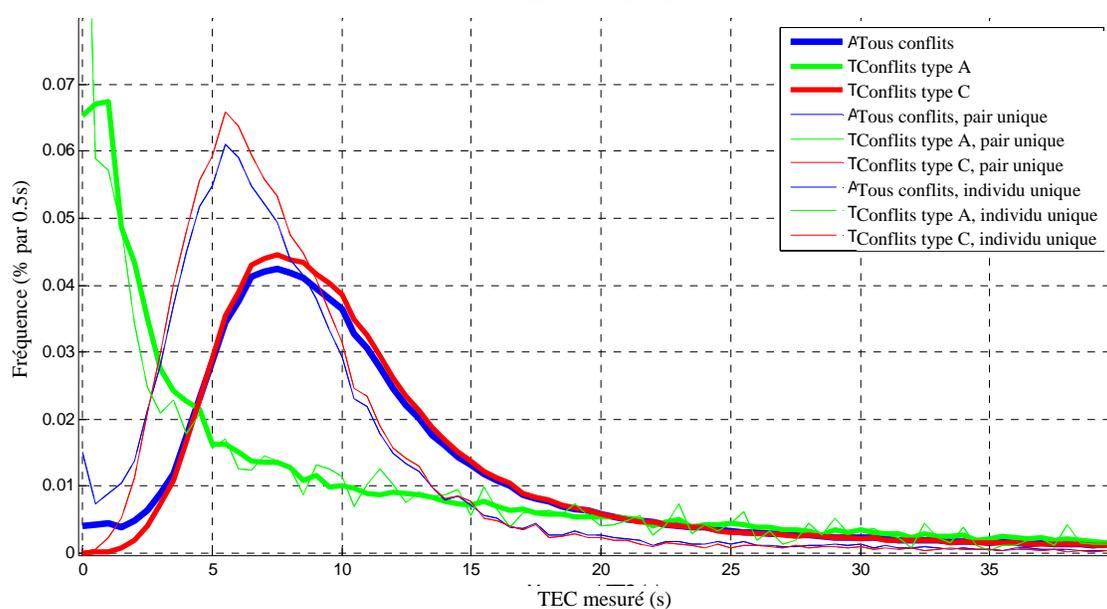
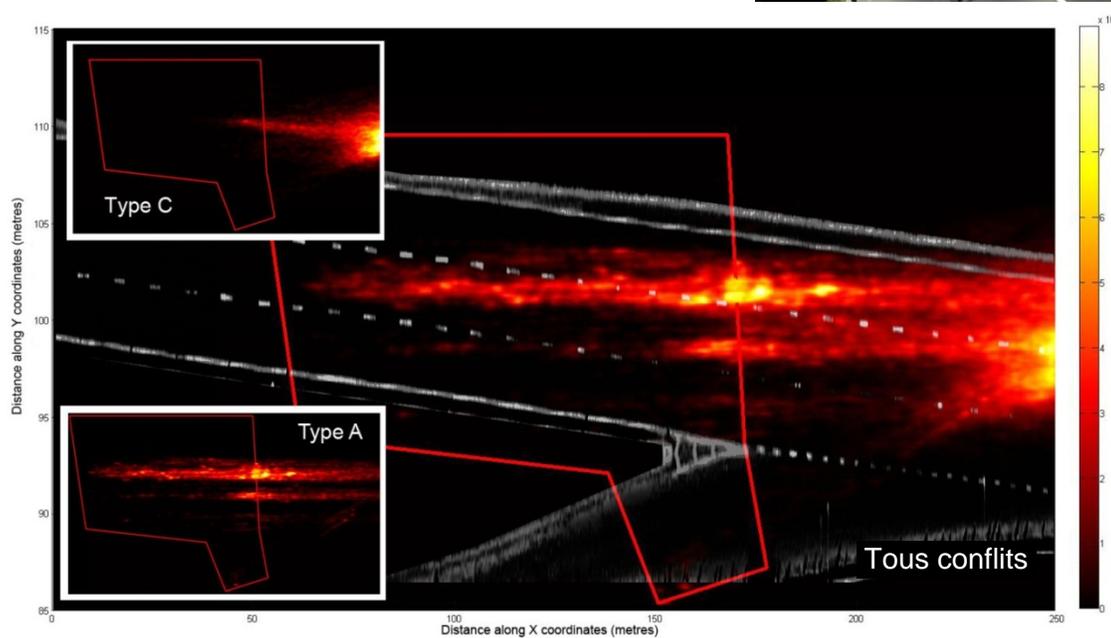


Figure 28 – Analyse des conflits pour MTG-Cam20-E-55e-Entree (sans LCGV1).

Bretelle : A720-E-E3
 LCGV1 : Ouis

Zone(s) : ZPreIP, ZIP
 Longueur d'étude : 75 m

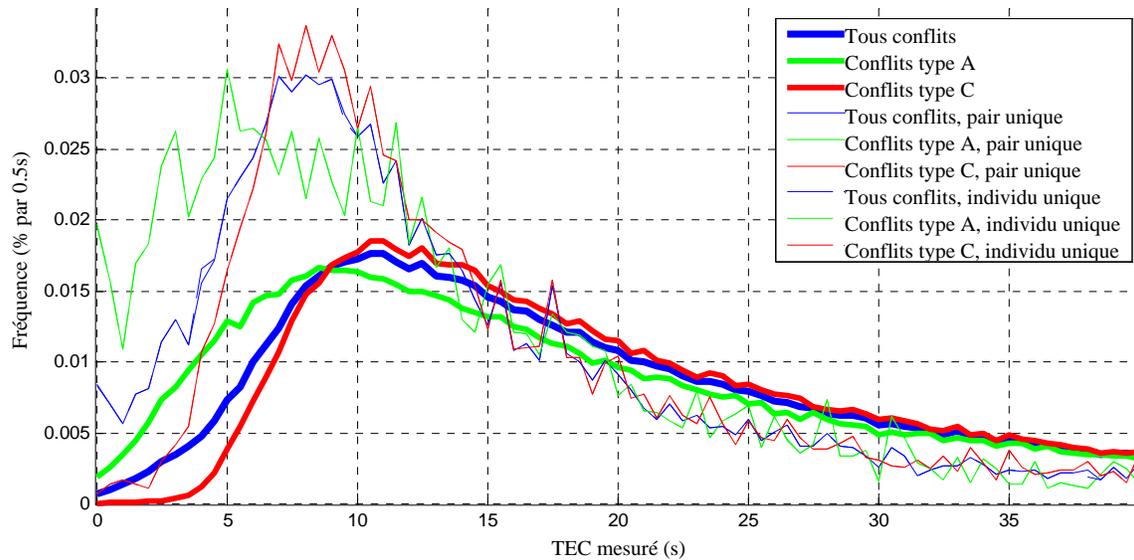
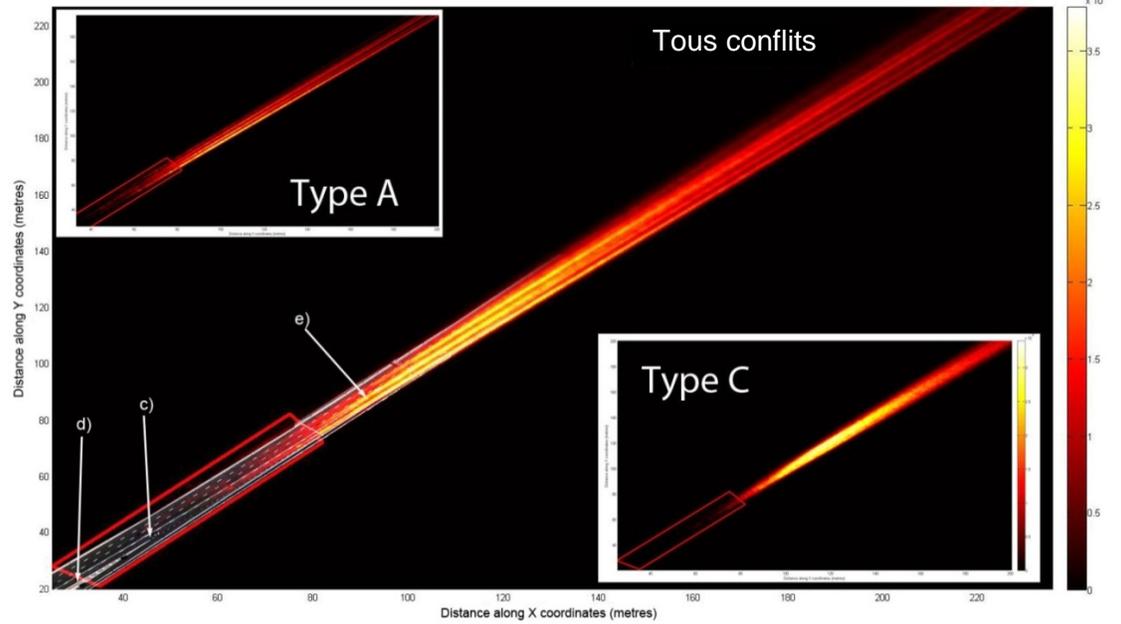


Figure 29 – Analyse des conflits pour Cam720-05-Greene (avec LCGV1).

Bretelle : A13-N-S3-1
 LCGV1 : Non

Zone(s) : ZSNP, ZPostSNP
 Longueur d'étude : 60m

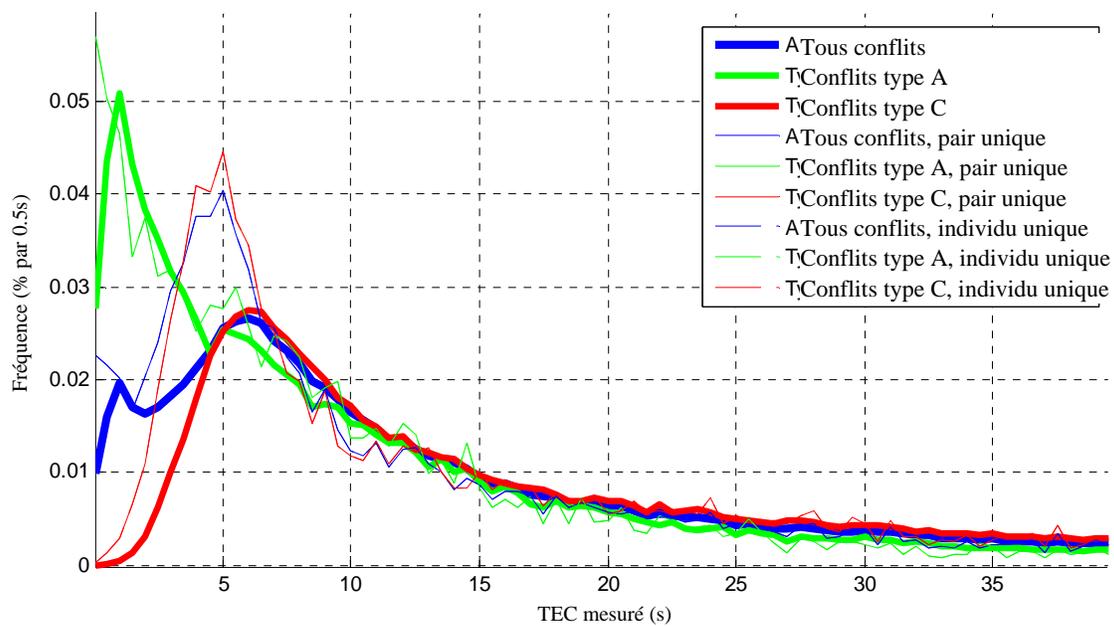
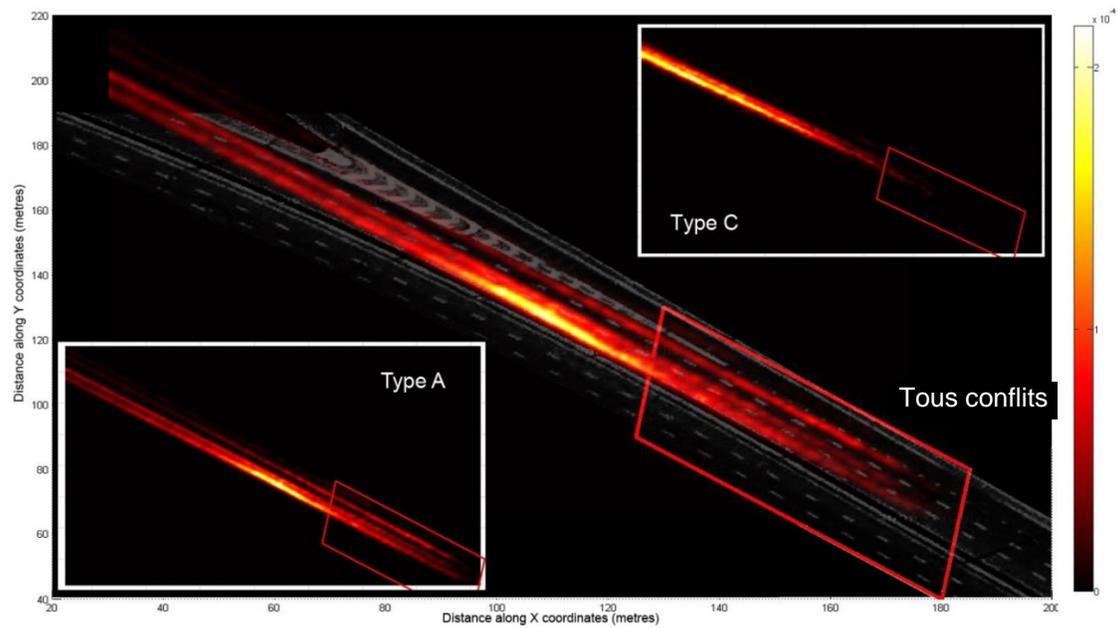


Figure 30 – Analyse des conflits pour MTG-Cam13-520E-Sortie (sans LCGV1).

Bretelle : A25-S-S5
 LCGV1 : Non

Zone(s) : ZSNP, ZPostSNP
 Longueur d'étude : 50m

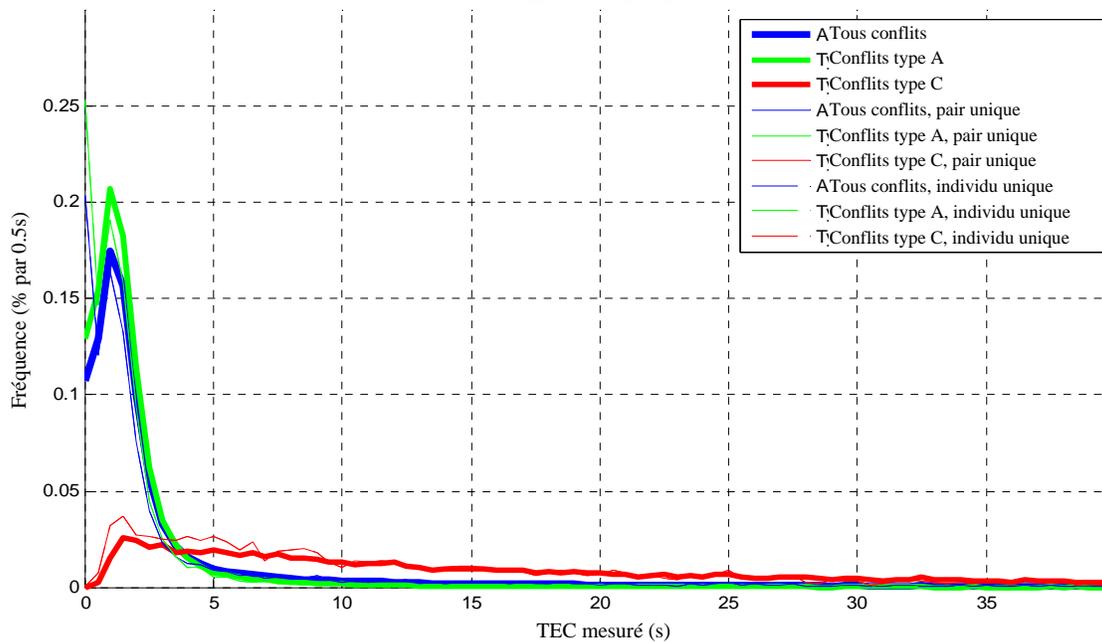
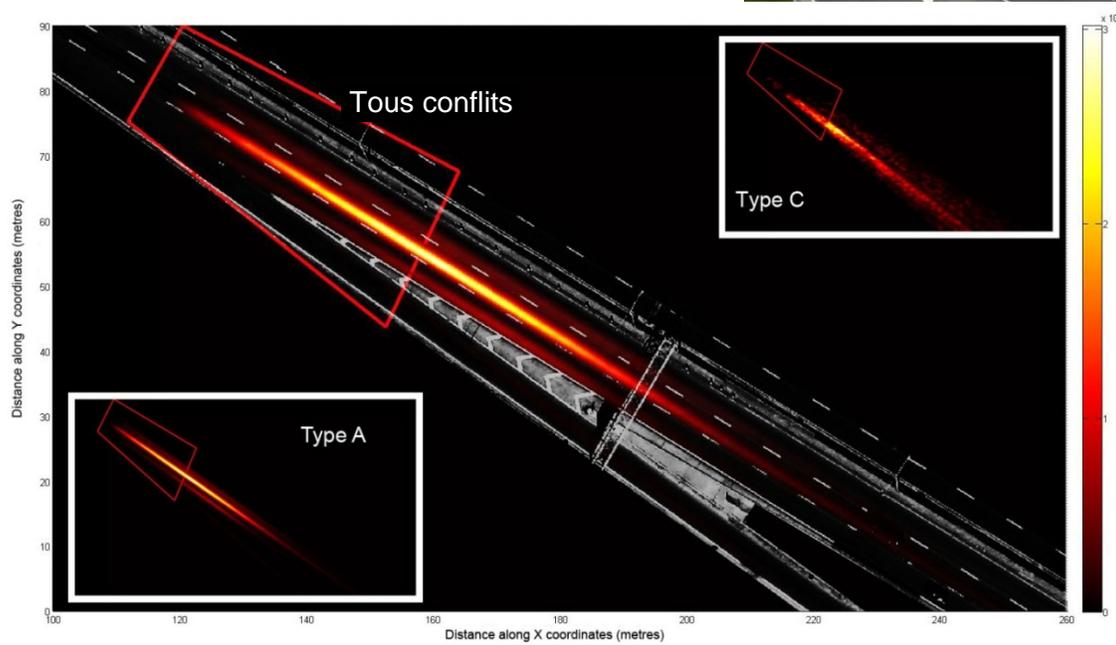


Figure 31 – Analyse des conflits pour MTG-Cam25-S-Sherbrooke-Sortie (sans LCGV1).

Bretelle : A20-E-S58
 LCGV1 : Oui

Zone(s) : ZPreSP
 Longueur d'étude : 70 m

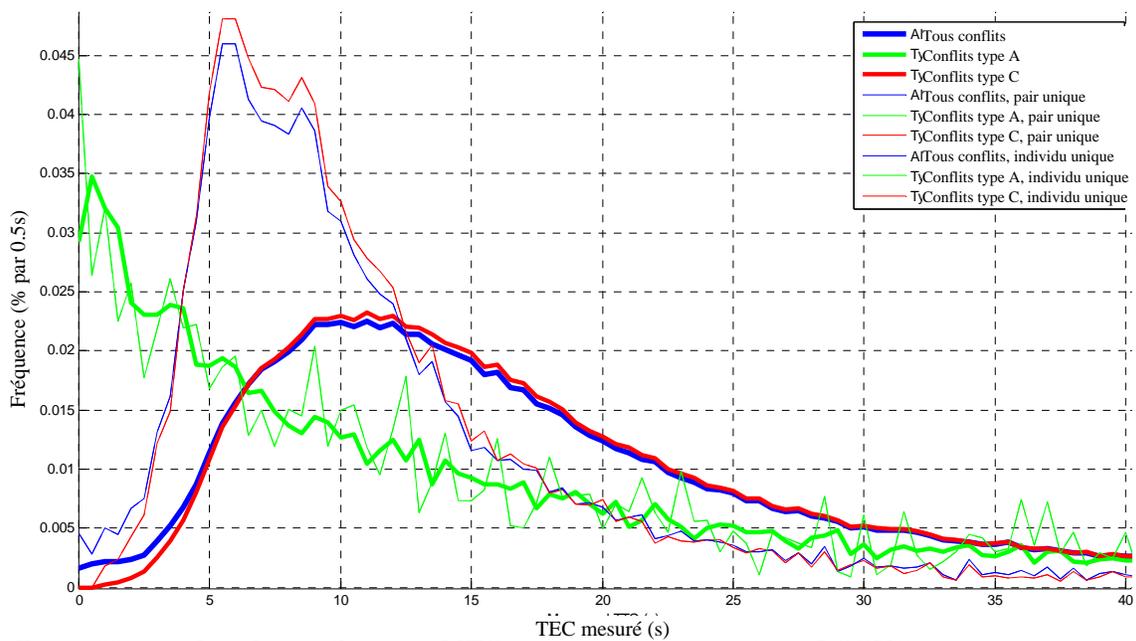
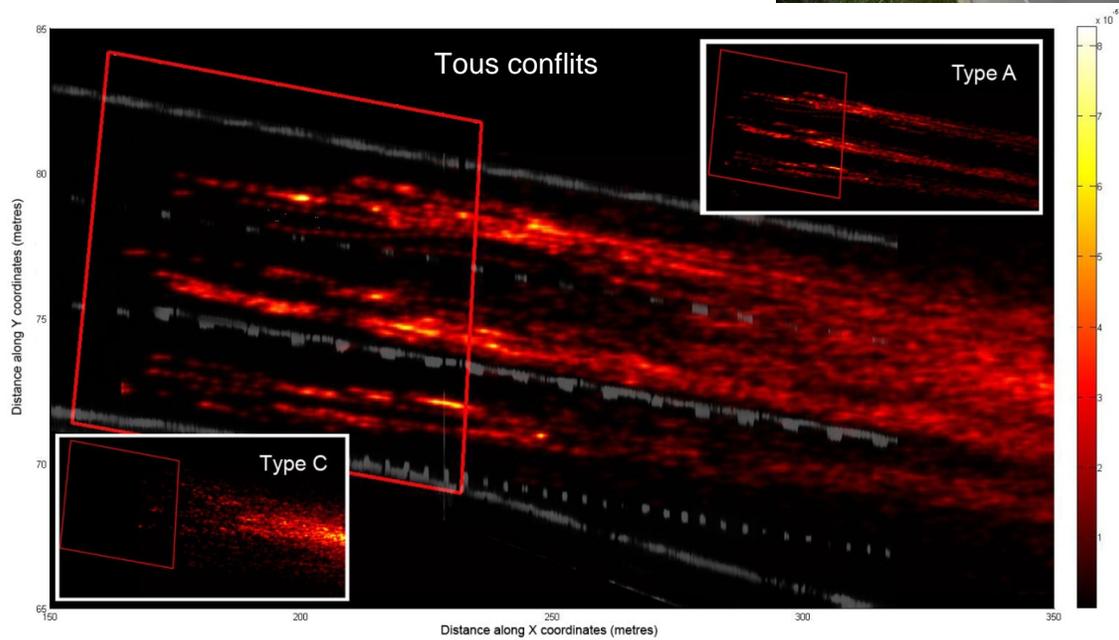


Figure 32 – Analyse des conflits pour MTG-Cam20-E-55e-Sortie (avec LCGV1).

Bretelle : A25-N-S5
 LCGV1 : Oui

Zone(s) : ZSP, ZPostSP
 Longueur d'étude : 50 m

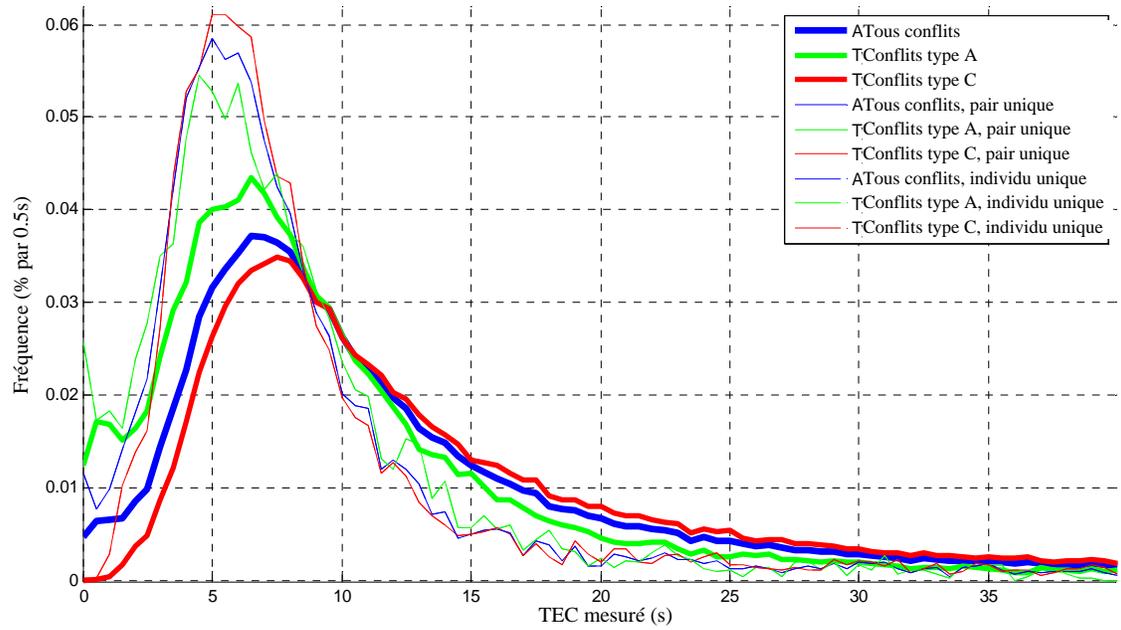
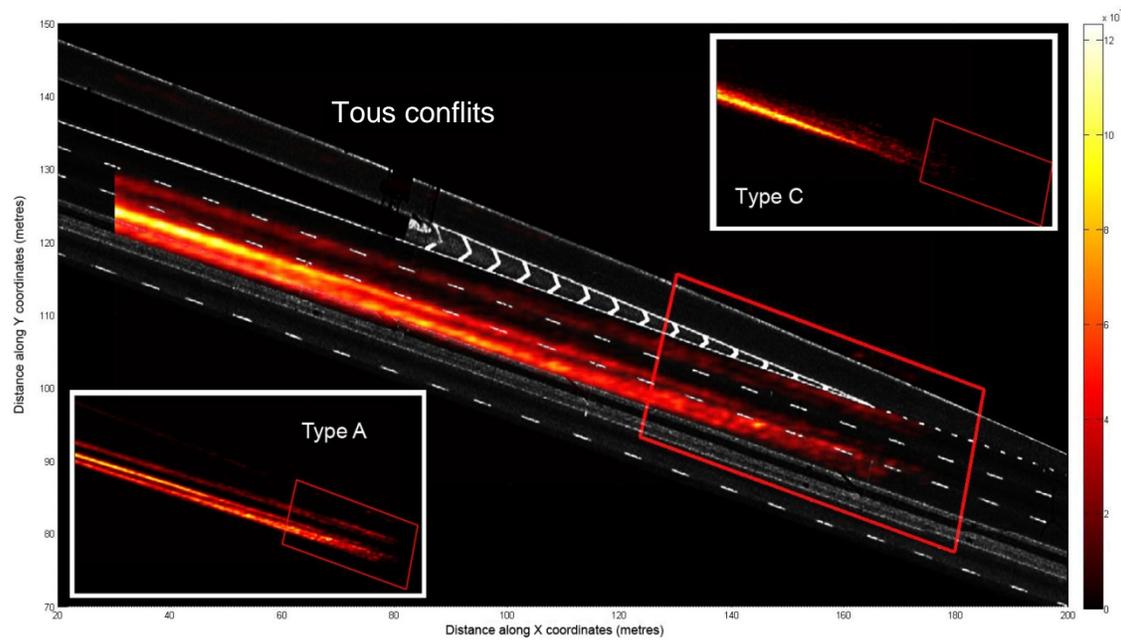


Figure 33 – Analyse des conflits pour MTG-Cam25-N-Sherbrooke-Sortie (avec LCGV1).

La **Figure 26** correspond au rapport d'analyse de conflit du site A20-E-E56-3 (« Dorval ») à l'aide de la Cam20-16-Dorval (sans ligne LCGV1). Il s'agit d'un exemple d'une analyse ZPreINP sur une entrée sans ligne. Il y a présence de concentration de conflits sur les deuxième et troisième voies, à partir de ZPreINP jusqu'à ZPreIP et ZIP, particulièrement sur la troisième voie. Grâce à la carte de densité des conflits pondérés, on peut comparer les conflits par type et leur répartition. On voit alors clairement la dominance des conflits de type A. Les conflits de type C ont une configuration plus uniforme, avec des concentrations aux abords de ZPreINP, particulièrement sur les deuxième et troisième voies. Les répartitions de conflits sont généralement centrées autour de 5 à 8 s, TEC, avec un pic unique à 1 s, TEC, pour les conflits de type A.

La **Figure 27** correspond au rapport d'analyse de conflit du site A20-W-E62 (« lière ») à l'aide de MTG-Cam20-1ière. Il s'agit d'un exemple d'analyse ZPreINP sur une entrée sans ligne LCGV1. Il y a présence de concentration de conflits sur la troisième voie ainsi que sur la bretelle d'insertion, ce sont tous des conflits de type A. Sur le graphe de répartition, on remarque un pic pour les conflits de type A entre 0 et 2 s, tandis que pour les conflits C, le pic se situe autour de 10 s. La pondération exponentiellement décroissante attribuée aux conflits explique le rôle négligeable des conflits de type C pour ce site. On doit aussi mentionner que ce site à une longueur d'insertion ($l_{diffuseur}$) plus courte que la moyenne, ce qui entraîne des conflits de type A importants au niveau de la bretelle d'insertion. Par ailleurs, ce site correspond globalement à une section de transition de vitesse signalée de 70 km/h à une autre vitesse signalée de 100 km/h sur une courbe verticale importante, ce qui peut expliquer l'abondance des conflits de type A sur la troisième voie, généralement associée avec le dépassement des véhicules et des vitesses élevées.

La **Figure 28** correspond au rapport d'analyse du site A20-E-E58 (« 55 e-Entrée ») à l'aide de MTG-Cam20-E-55^e-Entrée. Il s'agit d'un exemple d'analyse ZPreINP sur une entrée sans ligne LCGV1. Ce site présente une importante courbe verticale sur la portion en amont avec des accotements étroits. Des conflits d'insertion abondants associés avec l'étroitesse de la bretelle et une visibilité d'approche courte ($l_{visibilité}$) ont conduits à l'application d'une ligne continue d'environ 50 m de long s'étendant au-delà des chevrons peints situés entre la $l_{visibilité}$ et $l_{diffuseur}$ (elle n'est visible sur aucune imagerie satellitaire). On note que $l_{diffuseur}$ commence immédiatement après les chevrons peints et comprend cette ligne continue, car une grande proportion des usagers utilise de toute façon ce segment pour les insertions. Les conflits associés avec une visibilité d'approche limitée sont clairement observables sur le rapport d'analyse de conflit. Les véhicules ont habituellement tendance à se rapprocher de l'intérieur de la chaussée (sur la troisième voie) aux abords d'une bretelle. Par ailleurs,

les conflits de type C correspondant aux véhicules provenant de la bretelle d'insertion ont une médiane d'environ 7 s, TEC. Malgré l'absence de la LCGV1, les véhicules semblent changer de voie naturellement vers les voies intérieures pour laisser la voie libre aux véhicules entrant (détails en section 5.2.3), et en anticipation d'une jonction majeure sur l'extérieur à 1200 m en aval. Les conflits de type A s'observent principalement sur la troisième voie avec une concentration d'environ 2 s, TEC.

La **Figure 29** correspond au rapport d'analyse du site A720-E-E3 (« Greene ») à l'aide de Cam720-05-Greene. Il s'agit d'un exemple d'une analyse ZPreIP et ZIP sur une entrée avec ligne LCGV1. Ce site est notable car il comprend quatre voies au lieu de trois, avec une limite de vitesse plus basse, et une sortie importante à proximité en aval. En conséquence, les différences de comportement des usagers est claire : les conflits de type A et de type C sont répartis de façon égale (à la fois au niveau de la répartition probable et au niveau de la répartition des densités pondérées). Les concentrations de conflit sont principalement présentes sur la bretelle d'insertion et sur les premières voies. Les conflits de type C sont plus uniformes et denses que sur les sites antérieurs. Les répartitions des conflits des deux types forment un pic à 10 s, TEC, ce qui explique pourquoi les concentrations de conflit sont repoussées en aval de la zone d'analyse (les points de conflit surviennent au-delà de l'interaction d'origine).

La **Figure 30** correspond au rapport d'analyse de conflit du site A13-N-S3-1 (« 13-520 ») à l'aide de MTG-Cam13-520E-Sortie. Il s'agit d'un exemple d'analyse ZSP et ZPostSP sur une sortie sans ligne LCGV1 avec une voie auxiliaire. La voie auxiliaire fait que ce site est caractérisé par une *l_diffuseur* longue. Cet aspect conjugué avec un **type de sortie** bas signifie que l'on s'attend à ce qu'il se produise peu de conflits d'insertion, c'est bien ce que les cartes de concentration de conflits pondérés confirment. Pratiquement aucun conflit important n'est détecté sur la bretelle, la majorité des conflits de types A et C sont concentrés sur la troisième voie autour de 2 s, TEC, les conflits de type C sont concentrés autour de 6 s, TEC.

La **Figure 31** correspond au rapport d'analyse de conflit du site A25-S-S5 (« Sherbrooke-Sortie-S ») à l'aide de MTG-Cam25-S-Sherbrooke-Sortie. Il s'agit d'un exemple d'analyse des ZSNP et ZPostSNP sur une sortie sans LCGV1. Les conflits de type A sont prédominants en nombre et en pondération et ils sont majoritairement localisés sur la deuxième voie. On note une présence plus faible des conflits de type C sur la première voie. Les conflits de type A et de type C forment un pic à 1 s et 2 s, TEC, respectivement.

La **Figure 32** correspond au rapport d'analyse de conflit du site A20-E-S58 (« 55^e-Sortie ») à l'aide de MTG-Cam20-E-55^e-Sortie. Il s'agit d'un exemple d'analyse de la ZPreSP ZPreSP sur une sortie avec ligne LCGV1. On observe, à la fois pour les

conflits de type A et de type C, des configurations bruitées de densité de conflit uniformément réparties sur les trois voies. Les conflits de type A (conflit venant de l'arrière) sont prédominants avec une concentration décroissante de TEC commençant à 1 s, TEC, tandis que les conflits de type C sont concentrés presque normalement autour de 11 s, TEC.

La **Figure 33** correspond à l'analyse de conflit du site A25-N-S5 (« Sherbrooke-Sortie-N ») à l'aide de MTG-Cam25-N-Sherbrooke-Sortie. Il s'agit d'un exemple d'analyse des ZSP et ZPostSP ZSPZPostSP sur une sortie avec ligne LCGV1. Elle permet d'observer un nombre égal de conflits de types A et C, principalement situés sur la troisième voie, et pratiquement aucun conflit sur la bretelle. Les courbes de conflits des deux types culminent autour de 7 s, TEC.

Les résultats d'une analyse comparative des sites sont commentés ci-dessous :

Le **Tableau 11** résume brièvement les observations précédentes pour chaque rapport d'analyse de conflit afin de faciliter les comparaisons. La première observation est que des sites très similaires présentent de grandes différences. Le type principal de conflit aux entrées est de type A (conflit venant de l'arrière), en particulier sur les sites sans ligne LCGV1. Les types de conflit aux sorties sont plus uniformes (conflits venant de l'arrière et venant de l'entrecroisement). Cependant, cette observation n'est pas statistiquement valable (trop peu d'observations). Ce qui semble signifiant est que les conflits de type C ne sont prédominants ni pour les entrées, ni pour les sorties.

Aussi à partir du Tableau 11, on peut observer que pour les entrées sans ligne LCGV1 (A20-E-E56-3, A20-W-E62 et A20-E-E58), les conflits de type A sont toujours prédominants sur la voie la plus à l'extérieur. Cependant, pour la seule entrée avec LCGV1 (A720-E-E3), la concentration des conflits se trouve sur la première voie. Cela confirme les observations précédentes au sujet de l'effet de migration associé au marquage. Pour les sorties cette tendance est moins claire. De plus, en sachant que la vitesse est toujours plus élevée sur les voies intérieures, on peut conclure que les conflits de type A sont fortement liés à la vitesse.

Les **Figures 34 et 35** résument les répartitions cumulatives de TEC (dont une répartition additionnelle observée après application de la ligne LCGV1 pour le site A20-E-E56-3 (« Dorval ») décrite dans la section suivante) à partir des conflits de type A (conflits venant de l'arrière) et de type C (conflits venant de l'entrecroisement) respectivement. On observe peu d'autre faits saillants, si ce n'est que globalement la probabilité que les conflits de type A entraînent un TEC plus faible que ceux de type C (plus les mesures de conflits sont faibles, plus les conflits sont critiques) est plus grande. Mais là encore, il est difficile d'associer des TEC plus petits ou plus grands à des sites avec ou sans ligne LCGV1.

On doit aussi noter que bien que le nombre brut des conflits par heure varie selon les sites d'environ 25 % (et de façon disproportionnée selon le débit), l'écart entre les interactions convergentes et divergentes est toujours resté autour de 50 % avec des variations inférieures à 0,5 %, ce qui suggère que la variation des observations de conflit en nombre brut par heure est simplement attribuée à une quantité de mesures d'interaction plus importante, probablement générée par une variation de débit d'entrée seulement (par exemple, les véhicules qui arrivent de façon uniforme génèrent moins d'interaction globalement que les regroupements de véhicules puisqu'il est plus probable de retrouver les regroupements dans la zone d'analyse). Il est difficile d'attribuer le taux d'arrivée des véhicules avec chaque petite zone d'analyse car le taux d'arrivée des véhicules dépend de beaucoup de facteurs situés en amont.

Tableau 11 – Résumé des rapports de conflits. Le listes des concentrations par voie son en ordre d'importance du plus important au moins important (B = voie bretelle).

Site	LCGV1	Notes	Zone(s)	Type de conflit dominant	Conflits type A			Conflits type C		
					Concentration par voie	Motif	Pic TEC	Concentration par voie	Motif	Pic TEC
A20-E-E56-3	Non	Dernière parmi trois entrées consécutives; site normalement marqué avec LCGV1 (construction); sortie à proximité en aval (<500 m)	ZPreINP	Type A	3, 2, 1	Traits lisses	5-8 s, 1s	1 et 2 et 3	Uniforme, bruité	5-8 s
A20-W-E62	Non	En amont d'une courbe verticale importante; zone d'augmentation de la limite de vitesse	ZPreINP	Type A	B, 3, 2	Traits lisses	0-2 s	3	Trait lisse	10 s
A20-E-E58	Non	Courbe verticale de bretelle importante; voie de bretelle serrée; marquage continu après chevrons; sortie à proximité en amont (<500 m)	ZPreINP	Type A	3, 2	Traits bruités, inclinés	2 s	B, 3	Point chaud, lisse avec traits inclinés	7 s
A720-E-E3	Oui	4 voies, limite de vitesse autorisée : 70km/h	ZPreIP, ZIP	-	B, 1, 2, 3	Traits lisses	10 s	B, 1, 2	Lisse, uniforme	10 s
A13-N-S3-1	Non	Voie auxiliaire d'une longueur de 339 m;  faible	ZSP, ZPostSP	-	3, 2	Traits lisses	2 s	3	Trait lisse	6 s
A25-S-S5	Non	Longueur d'insertion courte	ZSP, ZPostSP	Type A	2	Traits lisses	1 s	1	Traits bruités	2 s
A20-E-S58	Oui	Entrée à proximité en amont (<500 m)	ZPreSP	Type A	1 et 2 et 3	Traits bruités	1 s	1 et 2 et 3	Uniforme, bruité, avec point chaud secondaire	11 s
A25-N-S5	Oui	Vitesse observée réduite	ZSP, ZPostSP	-	3, 2	Traits lisses	7 s	3	Trait bruité	7 s

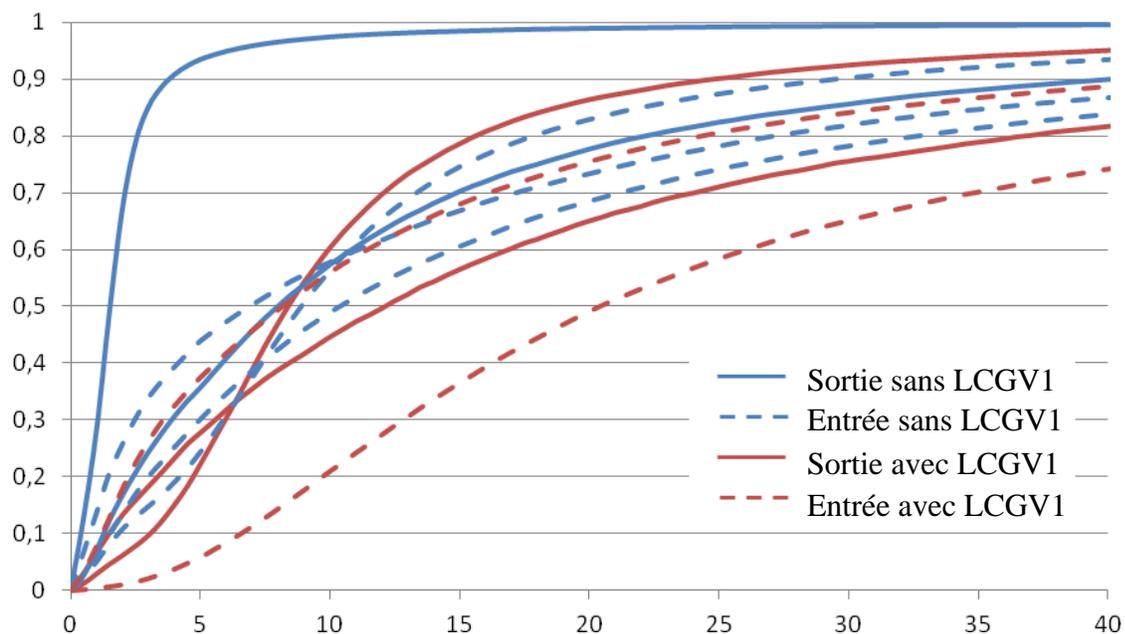


Figure 34 – Répartition cumulative des TEC de type A jusqu'à 200 secondes.

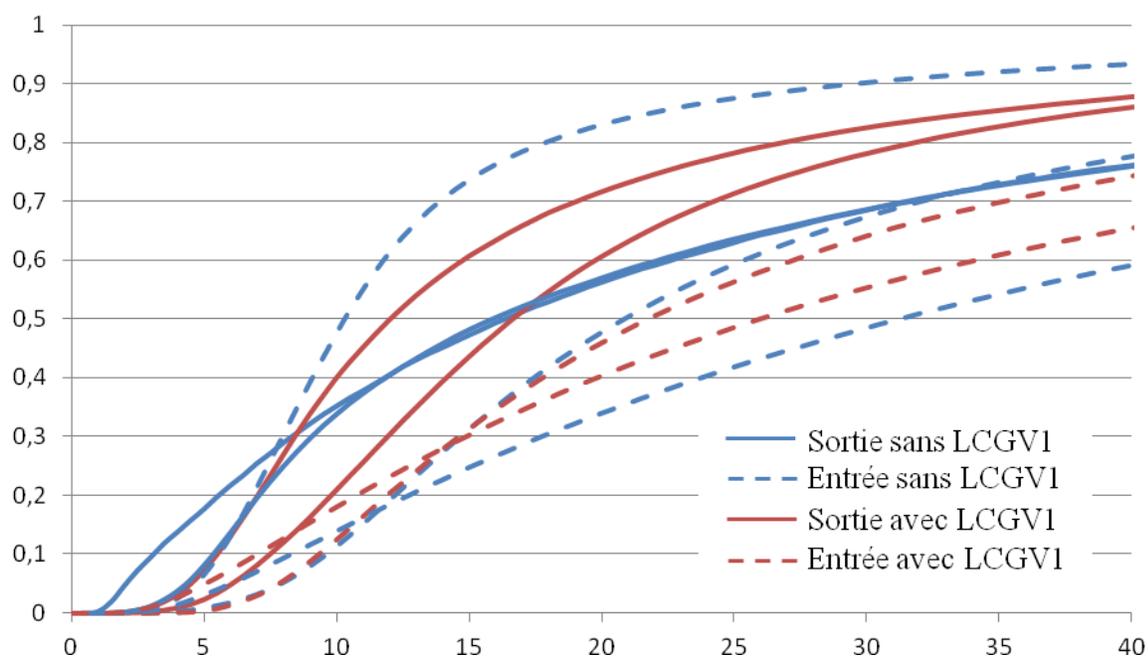


Figure 35 - Répartition cumulative des TEC de type C jusqu'à 200 secondes.

5.2.2 Étude avant-après

Une des difficultés principales de cette étude a été d'évaluer l'effet de l'utilisation de la ligne sans modifier l'infrastructure existante. Cela signifie que le marquage n'a pu être ni appliqué, ni enlevé sur aucune bretelle d'autoroute. Un site a cependant fait l'objet de conditions particulières. En effet sur ce site, la ligne a été supprimée un an avant notre tournage, dans le cadre de travaux de construction sur la prochaine bretelle en amont dans cette direction. Cela nous a permis d'étudier l'effet de la ligne avant-après, mais il est vrai qu'en une année les usagers ont eu le temps de s'adapter à ce changement.

Tableau 12 – Inventaire des données vidéo pour étude avant-après.

Site	LCGV1	Véhicules /h	Vitesse μ	Vitesse σ	Longueur d'étude	Durée d'étude
A20-E-E56-3	Non	2515	95 km/h	11 km/h	50 m	5 h
A20-E-E56-3	Oui	2598	105 km/h	12 km/h	50 m	10 h

La **Figure 36** correspond à un rapport d'analyse de conflit du site A20-E-E56-3 (« Dorval ») à l'aide de Cam20-16-Dorval (avec ligne). Il s'agit d'un exemple d'analyse des ZPreINP et ZPreIP sur une entrée avec ligne LCGV1 (régions d'analyse et vues équivalentes à celles du rapport d'analyse du même site en section 5.2.1). On observe une concentration prédominante de conflits de type A, majoritairement situés sur la deuxième voie, auxquels s'ajoutent d'autres conflits sur la première voie. Les conflits de type A culminent autour de 2 s, TEC. Les conflits de type C sont majoritairement concentrés sur la deuxième voie, tout près du début de la ligne. Les conflits de type C culminent autour de 9 s, TEC.

La comparaison des rapports d'analyse de conflit du site avec et sans ligne A20-E-E56-3 (« Dorval ») (Figures 26 et 36), permet de faire une distinction importante entre les répartitions de conflit par voie. Pour le site sans ligne, on observe les conflits de type A principalement sur les deuxième et troisième voies, tandis que sur le site avec ligne, les conflits de type A se situent principalement sur les deuxième et première voies. Sur le site sans ligne, les conflits de type C sont répartis uniformément (bien qu'avec du bruit), tandis que sur le site avec ligne les conflits de même type sont regroupés autour de la deuxième voie (avec un chevauchement mineur sur la troisième voie). On peut alors conclure que le commencement du marquage constitue un point critique pour les conducteurs (autrement dit, la ligne LCGV1 force les décisions de navigation sur un seul point et non uniformément et naturellement le long d'un segment entier).

En comparant les répartitions des mesures de conflit, on observe après application de la ligne, un léger décalage des conflits de type A vers des mesures plus petites (indiquant hypothétiquement une probabilité de collision plus élevée), mais cela peut être dû à une vitesse

moyenne et à une déviation standard de la vitesse, plus grandes. La répartition des mesures de type C demeure pratiquement inchangée.

Bretelle : A20-E-E56-3
 LCGV1 : Oui

Zone(s) : ZPreINP,ZPreIP
 Longueur d'étude : 50 m

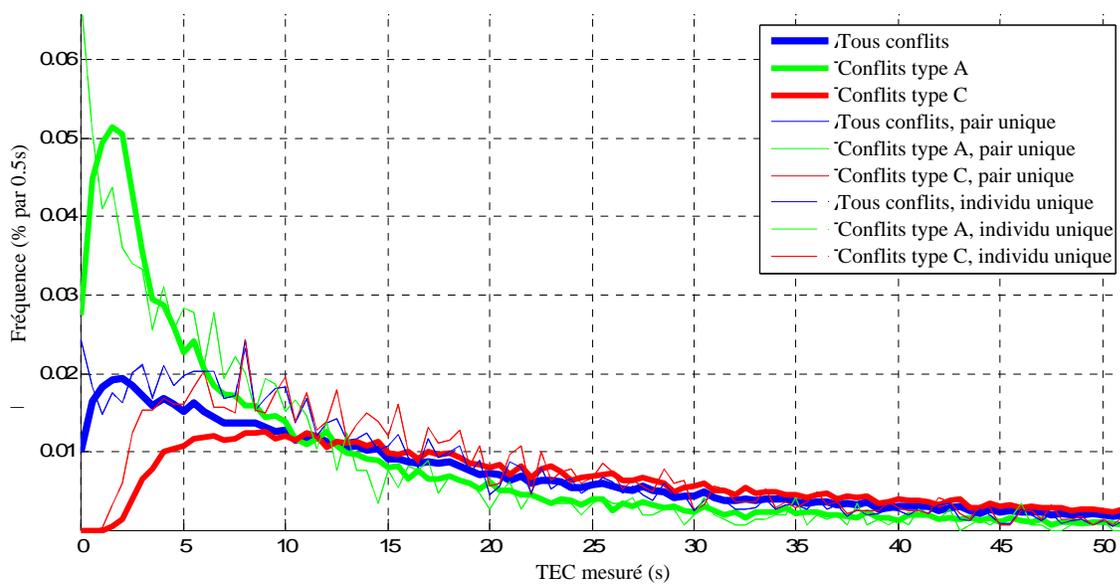
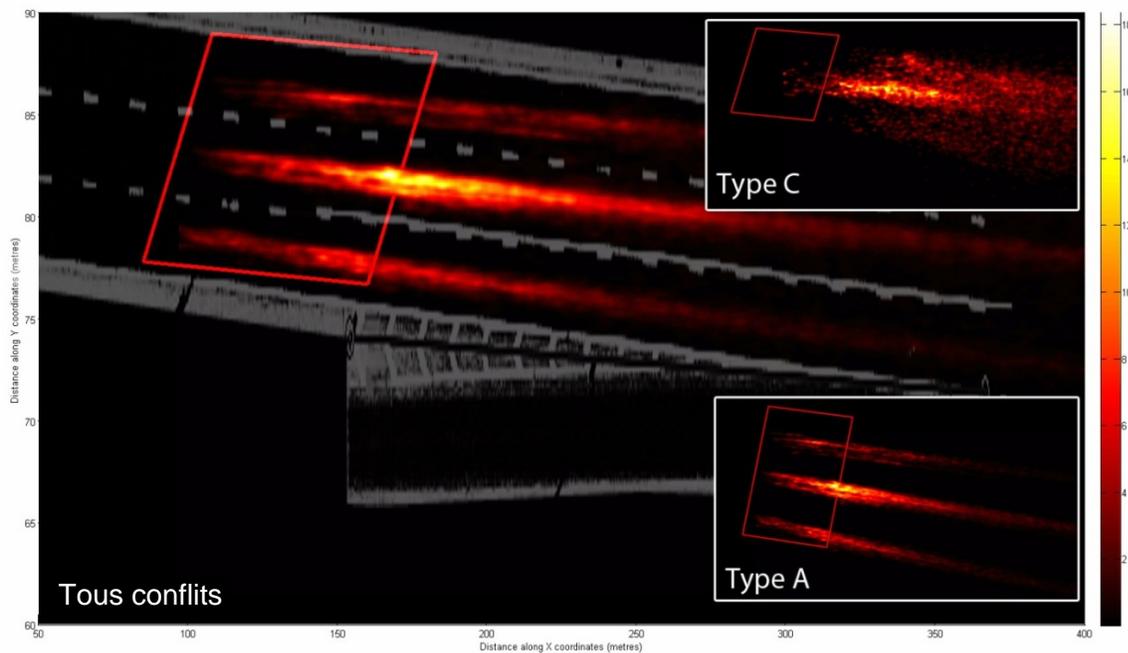


Figure 36 – Analyse des conflits pour Cam20-16-Dorval (avec LCGV1).

5.2.3 Analyse supplémentaire

Les vidéos constituent une source précieuse d'informations sur le comportement dans le cadre de la théorie du débit de circulation.

Sur le **Tableau 13**, on observe les ratios de débit mesurés pour chaque voie ainsi que le **q%** **sortie** **q%** **entrée**. La moyenne des ratios de débit est calculée sur des sections de 50 à 100 m (selon la zone étudiée) avec peu de variabilité observée (+/- 2 % pour la plupart des observations, voir en exemple la Figure 40 de l'appendice). La deuxième voie est la plus fréquentée avec en moyenne 41 % de tous les débits, suivie par la troisième voie avec en moyenne 32 % de tous les débits. Cependant, il existe une variabilité significative des ratios de débit d'un site à l'autre. On remarque avec intérêt que le ratio de débit de la première voie pour les sites avec ligne LCGV1 est plus important. Cette observation est surprenante, étant donné l'objectif du marquage, bien qu'elle ne soit probablement pas significative. On ne peut pas non plus négliger la colinéarité avec d'autres facteurs tels que les zones d'influence se chevauchant.

Tableau 13 – Ratios de débits moyens par voie.

Site	LCGV1	q%	% débits moyens par voie			
			Voie 1	Voie 2	Voie 3	Voie 4
A20-E-E56-3	Non	-	27.5%	43.9%	28.6%	-
A20-W-E62	Non	24.0%	21.3%	42.2%	36.5%	-
A20-E-E58	Non	10.9%	12.3 %	33.5%	54.2%	-
A720-E-E3	Oui	3.0%	31.4%	29.6%	25.8%	13.2%
A20-E-E56-3	Oui	-	32.5%	43.2%	24.3%	-
Moyenne	-	12.6%	25.9%	39.4%	34.7%	-
A13-N-S3-1	Non	5.9%	17.0%	36.9%	46.1%	-
A25-S-S5	Non	18.2%	38.5%	46.5%	15.1%	-
A20-E-S58	Oui	-	27.2%	44.8%	28.0%	-
A25-N-S5	Oui	9.7%	23.4%	44.5%	32.1%	-
Moyenne	-	11.3%	26.5%	43.2%	30.3%	-

Le **Tableau 14** présente les déviations standards des trajectoires moyennes mesurées pour chaque voie. Le décalage d'un véhicule par rapport au centre de la voie est généralement normalement réparti. La déviation standard mesure la limite de chaque côté de la ligne centrale correspondant à la déviation standard (34,1 %) des trajectoires des véhicules par côté. Cela signifie que 68,2 % de toutes les trajectoires sont situées dans la région limitée par une déviation standard de +/- 1 de chaque côté de la ligne centrale. De la même façon, 95,4 % de toutes les trajectoires sont situées dans la région limitée par une déviation standard de +/- 2 de chaque côté de la ligne centrale. Les trajectoires restantes correspondent aux trajectoires de véhicules changeant de voie. On rappelle que les trajectoires sont établies à partir du centre géométrique

du volume (longueur et largeur) du véhicule. On doit mentionner que les voies les plus à l'intérieur (les plus loin de la caméra) ainsi que les données du dispositif de collecte de données vidéo mobile souffrent de l'erreur parallaxe la plus importante. Cela entraîne des déviations standard de trajectoires artificiellement gonflées à ces emplacements et une certaine prudence doit être exercée lors de l'interprétation des résultats.

Tableau 14 – Écart type des trajectoires moyennes par voie. Mesures en mètre.

Site	LCGV1	Écart type des trajectoires moyennes par voie (m)				
		Bretelle	Voie 1	Voie 2	Voie 3	Voie 4
A20-E-E56-3	Non	-	0.411	0.401	0.381	-
A20-W-E62	Non	0.563	0.664	0.511	0.763	-
A20-E-E58	Non	0.262	0.397	0.488	0.537	-
A720-E-E3	Oui	0.366	0.253	0.212	0.197	0.130
A20-E-E56-3	Oui	-	0.468	0.473	0.340	-
Moyenne	-	0.397	0.439	0.417	0.444	0.130
A13-N-S3-1	Non	0.276	0.434	0.501	0.664	-
A25-S-S5	Non	0.183	0.379	0.399	0.623	-
A20-E-S58	Oui	-	0.465	0.455	0.490	-
A25-N-S5	Oui	0.749	0.414	0.440	0.660	-
Moyenne	-	0.403	0.423	0.449	0.609	-

Tableau 15 – Changements de voie par véhicule-kilomètre (lc/veh-km) **Les changements depuis la deuxième voie vers la première voie sont interdits par le marquage LCGV1.

Site	LCGV1	1 → 2	2 → 3	3 → 4	4 → 3	3 → 2	2 → 1**
A20-E-E56-3	Non	0.148	0.192	-	-	0.097	0.136
A20-W-E62	Non	0.126	0.327	-	-	0.120	0.103
A20-E-E58	Non	0.024	0.068	-	-	0.096	0.140
A720-E-E3	Oui	0.151	0.091	0.046	0.025	0.065	0.093
A20-E-E56-3	Oui	0.118	0.068	-	-	0.053	0.139
A13-N-S3-1	Non	0.175	0.345	-	-	0.344	0.126
A25-S-S5	Non	0.184	0.162	-	-	0.042	0.279
A20-E-S58	Oui	0.126	0.097	-	-	0.099	0.176
A25-N-S5	Oui	0.184	0.510	-	-	0.225	0.145

Le Tableau 15 fournit la liste du taux observé de changement de voie par véhicule-kilomètre (lc/veh-km) à partir des sources et des destinations (les changements de voie sur voies multiples sont répartis en changements de voie individuelle avec la voie contiguë). On rappelle que le changement de voie qui est protégé par la ligne LCGV1 est celui de la deuxième voie vers la première voie. Le taux de changement de voie représente le nombre de changement unique de voie qui se produit pour chaque veh-kilomètre conduit. Ainsi qu'avec toute autre mesure basée sur la trajectoire, il s'agit d'une moyenne sur toute la zone d'étude. Elle est généralement uniforme sur toute la longueur de cette zone.

Comme pour beaucoup d'observations déjà formulées, la présence de la ligne LCGV1 n'entraîne pas de configuration type de changement de voie. Ce qui est clair est le fait que beaucoup d'utilisateurs et parfois même une majorité des utilisateurs choisissent de changer de voie malgré la présence de la ligne. Cela peut expliquer pourquoi la LCGV1 ne contribue pas à une réduction significative des accidents sur tous les sites : tout bénéfice théorique de l'interdiction de changement de voie sur les taux d'accidents peut simplement être compensé par un manque d'« obéissance » vis-à-vis du marquage. Il est cependant difficile de confirmer cette théorie à partir de l'ensemble des données actuelles.

Par ailleurs, en observant les résultats de l'étude avant-après sur le site Dorval-Entrée (A20-E-E56-3), on peut voir que les changements de voie, de la deuxième voie vers la première voie (dernière colonne du Tableau 15), sont pratiquement les mêmes (0,136 avant et 0,139 après) avec ou sans ligne LCGV1. Le marquage n'est pas efficace sur ce site particulier.

Chapitre 6 : Conclusions et orientations pour de futurs travaux

6.1 Conclusions de recherche

D'après les analyses historique et transversale d'accidents, on peut conclure que, pour les sites sous analyse, les bénéfices tangibles de la LCGV1 en matière de sécurité sont négligeables ou statistiquement insignifiants.

- D'après l'analyse du modèle statistique, les répercussions du marquage sur la fréquence de collision est positive pour les bretelles d'entrée et négative pour les bretelles de sortie. Cependant, dans la plupart des cas, les répercussions de la LCGV1 ne sont pas statistiquement significatives. En d'autres mots, cela suggère que dans l'ensemble ce marquage joue un rôle marginal en matière de sécurité.
- Ce qu'il est important de souligner est que la sécurité au niveau de la bretelle dépend davantage d'autres facteurs géométriques, après ajustement des conditions de circulation. Les facteurs contributifs qui semblent jouer un rôle essentiel incluent la distance à la bretelle en amont et la longueur de visibilité des chevrons peints. Les données sont cependant insuffisantes (trop peu de sites) pour formuler des conclusions objectives quant aux effets de la ligne par rapport à chacun de ces deux facteurs.
- De plus, pour les bretelles d'entrée, la sécurité est éprouvée lorsque le débit en amont et/ou le ratio de débit sur les bretelles augmente. Cette observation est en accord avec l'opinion générale internationale.
- À partir de l'analyse de la répartition spatiale, on observe certains effets de migration, particulièrement en amont des sorties.
- La présence de la ligne LCGV1 n'a pas de répercussions tangibles sur la gravité des accidents. Que les sites soient avec ou sans ligne, les configurations d'accidents sont similaires en gravité sur tous les sites. Ces conclusions ne sont cependant pas aussi approfondies que celles concernant la probabilité d'accident.

D'après l'analyse vidéo de comportement des conducteurs, on conclut, qu'en général, la majeure partie des observations confirme la conclusion de l'analyse historique transversale d'accidents. Il n'y a pas de corrélation évidente entre la présence de la ligne LCGV1 et les répartitions des mesures de temps estimé avant collision (*time-to-collision*) ou d'autres conflit/exposition microscopique. Les caractéristiques géométriques semblent expliquer plus

précisément la répartition du temps estimé avant collision, comme démontré lors de l'analyse des accidents.

- Lors de l'analyse avant-après sur une seule entrée (A20-E-E56-3, Dorval/Bouchard), on observe la distribution du temps estimé avant collision décroître après application de la ligne, ce qui suggère une détérioration de la sécurité sur ce site.
- La zone d'analyse pour ce cas particulier d'étude avant-après était située au point de transition entre une zone protégée et une zone non protégée (ZPreINP suivie par ZPreIP). Cela confirme la théorie soutenant que la LCGV1 peut engendrer un point critique où les conflits se concentrent. On observe qu'avec la ligne, les concentrations des conflits se décalent de la troisième voie vers la première voie, avec une augmentation relative sur la deuxième voie. Les conflits de type C (venant de l'entrecroisement) sont largement prédominants au début de la LCGV1 et cette migration de conflit peut contribuer à expliquer la migration d'accidents globale, décrite lors de l'analyse historique des accidents. De plus, le taux d'infraction ou de changement de voie lors des périodes avant-après est le même.
- Sur certains sites, les changements de voie se produisent au niveau de la zone d'interdiction de changement de voie. En fait, sur certains des sites avec ligne, on observe le taux le plus important de changement de voie, de la deuxième voie vers la première. Ce taux semble associé aux facteurs géométriques dont le chevauchement de zones d'influence.
- Les conflits venant de l'arrière sont généralement plus importants que les conflits venant de l'entrecroisement, sur tout type de site, à la fois en nombre d'observations et en magnitude de mesures (les conflits venant de l'arrière ont une probabilité plus grande de TEC faible).

Dans l'ensemble, on conclut que peu de types de comportements de conducteur émergent en rapport avec l'utilisation de la ligne LCGV1. Certaines données suggèrent que la présence de la LCGV1 a un effet positif, tandis que d'autres suggèrent le contraire. Les résultats obtenus ne sont pas en faveur d'une application systématique (normalisation) de la LCGV1. Cette étude tend à remettre en question l'efficacité de la LCGV1 en tant que marquage généralisé.

6.2 Recommandations immédiates

Parce que nous n'avons trouvé aucune justification générale à l'application de la ligne LCGV1 sur des sites dits « normaux » et qu'il existe des résultats indiquant que ce marquage peut avoir un effet négatif sur le débit et sur la sécurité dans certaines situations, l'application sans distinction (systématique) de la LCGV1 sur les sites est fortement découragée. Plus spécifiquement :

- De façon générale, la LCGV1 présente l'inconvénient de restreindre la navigation (ce qui peut entraîner une certaine frustration ou distraction du conducteur) et crée des points critiques artificiels à l'intérieur de sections d'autoroutes. En ce qui concerne la sécurité, ces inconvénients appréciables se doivent d'être examinés au regard des bénéfices pertinents associés avec la restriction du comportement du conducteur dans des milieux particuliers.
- Ainsi, l'utilisation de la LCGV1 peut être justifiée au cas par cas, particulièrement dans des milieux ne satisfaisant pas les normes, mais son utilisation automatique est découragée. Bien que pour les bretelles de sortie, la ligne LCGV1 puisse être bénéfique dans des conditions particulières, davantage de données et de recherches sont nécessaires pour définir les conditions géométriques suffisantes pour que la ligne LCGV1 réduise la probabilité de collision et les interactions dangereuses de véhicules.
- On recommande une analyse approfondie des éléments suivants : les distances entre bretelles en amont et en aval, la longueur des chevrons, la longueur d'insertion, les mesures de visibilité entre les voies d'autoroute et les bretelles ainsi que la signalisation verticale.
- Il est entendu que généralement des échangeurs convenablement conçus avec des chevauchements de zones d'influence limités (en milieu rural ou urbain) ne bénéficient pas de la présence du marquage, cependant, ils peuvent courir le risque d'hériter de problèmes associés avec celui-ci. Une étude similaire en milieu rural pourra confirmer cela.
- Pour les sorties sous analyse en milieu urbain, le retrait d'une partie de la ligne LCGV1 (quelque soit la longueur) au-delà (en aval) des chevrons peints est recommandé, car ces segments n'ont d'autre effet que de restreindre la navigation et de frustrer les conducteurs (selon le HCM 2000, la conception originale pour les sorties n'est plus valable. Cependant, l'applicabilité de la zone d'influence pour les entrées, comme définie par le HCM 2000 se doit d'être remise en question).

- La longueur de conception de LCGV1 doit d'être optimisée de telle sorte que *seule* la longueur minimale nécessaire de la ligne soit d'application justifiée. Aussi, l'établissement d'une longueur minimale de chaussée sans ligne en amont des sorties avec LCGV1 est recommandé de façon à ne pas emprisonner les usagers en dehors de la zone de sortie avant qu'un panneau de signalisation verticale ne soit clairement visible, lorsqu'une autre bretelle avec ligne LCGV1 se trouve en amont à proximité.

Il est important de se souvenir des limitations de ce rapport. Cette étude repose sur un petit sous-ensemble de bretelles avec des données d'accidents et de circulation disponibles (comptage de débit et données vidéo). Plusieurs sites font l'objet d'une analyse transversale. Cependant, l'analyse avant-après ne s'est effectuée que sur un site. Une partie des données de débit a été collectée manuellement sur de courtes périodes de temps. La collecte de données vidéo et de circulation sur un échantillon de sites plus large pourrait améliorer la qualité et la précision de ces résultats. L'établissement des conditions géométriques pour lesquelles la ligne LCGV1 serait efficace constitue l'objectif prioritaire de travaux futurs.

Remerciements

Les auteurs s'associent pour remercier le comité du MTQ (particulièrement Danielle Martin) et ses techniciens, les étudiants en stage d'été du GRIMES (Shaun Burns, Stewart Jackson et Jeremy Kaufman de l'Université McGill ainsi que Ali El Hussein de l'École polytechnique de Montréal), Patrick Morency de la Direction de santé publique de Montréal, pour avoir fourni les données des accidents corporels de la circulation routière, et Tarek Sayed de l'Université de la Colombie-Britannique pour nous avoir permis d'utiliser un dispositif d'analyse vidéo, sans lequel le traitement des données aurait été impossible.

Références

1. **Thibeault, Jacques.** *Étude concernant l'utilisation d'une ligne continue de délimitation à gauche de la voie 1 (LCGV1) vis-à-vis les entrées et les sorties d'autoroutes, dans le but d'empêcher les usagers sur la voie 2 de se rabattre sur la voie 1, dans la zone d'influence.* Laval : Ministère des Transports du Québec, 2009.
2. *Estimating the severity of safety related behaviour.* **Svensson, Å. and Hydén, C.** 2006, Accident Analysis and Prevention, Vol. 38, pp. 379-385.

3. *Automated Analysis of Pedestrian-Vehicle Conflicts Using Video Data*. **Ismail, K., et al.** Washington, DC : s.n., 2009, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2140, pp. 44-54.
4. *Measurement of Traffic Conflicts*. **Chin, Hoong-Chor and Quek, Ser-Tong**. 1997, Safety Science, pp. 169-185.
5. **Laureshyn, A.** *Application of automated video analysis to road user*. 2010. PhD thesis, Lund University.
6. *Observing freeway ramp merging phenomena in congested traffic*. **Sarvi, Majid, Kuwahara, Masao and Ceder, Avishai**. 2007, Journal of Advanced Transportation.
7. *From targeted "black spots" to area-wide pedestrian safety*. **Morency, P. and Cloutier, M.-S.** s.l. : Injury Prevention, June 2006.
8. *Large Scale Automated Analysis of Vehicle Interactions and Collisions*. **Saunier, N., Sayed, T. and Ismail, K.** 2010, Transportation Research Record, Vol. 2147, pp. 42-50.
9. *Automated Analysis Of Pedestrian-vehicle Conflicts: Context For Before-and-after Studies*. **Ismail, K., Sayed, T. and Saunier, N.** 2010, Transportation Research Record, Vol. 2198, pp. 52-64.
10. *Traffic Data Collection: Quality Aspects of Video Detection*. **Versavel, Jo**. Washington : s.n., 2007. Transportation Research Board 2007. p. 10.
11. *A feature-based tracking algorithm for vehicles in intersections*. **Saunier, N. and Sayed, T.** s.l. : IEEE, 2006.
12. *Real-Time Detection and Tracking of Vehicle Base Fronts for Measuring Traffic Counts and Speeds on Highways*. **Kanhere, Neeraj K., et al.** 2007, Transportation Research Board.
13. *Traffic Accident Prediction Using Vehicle Tracking and Trajectory Analysis*. **Hu, Weiming, et al.** 2003, IEEE, pp. 220-225.
14. **Mannering, F., Washburn, S. and Kilareski, W.** *Highway Engineering and Traffic Analysis*. s.l. : WILEY, 2009.
15. *Advances in Proactive Road Safety Planning*. **Sayed, Tarek, et al.** Niagara Falls : s.n., 2010. 20th Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference. p. 15.
16. **Gettman, Douglas and Head, Larry.** *Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models: Final Report*. McLean : FHWA, 2003. FHWA-RD-03-050.
17. *Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation*. **Laureshyn, Aliaksei, Svensson, Ase and Hyden, Christer**. 2010, Accident Analysis and Prevention.

18. *Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation*. **Laureshyn, Aliaksei, Svensson, Ase and Hyden, Christer**. 2010, Accident Analysis and Prevention.
19. **Highway Capacity Manual**. *Highway Capacity Manual*. 2000.
20. *Traffic conflicts characteristics: Accident potential at intersections*. **Perkins, S. R. and Harris, J. I.** 1968, Highway Research Record.
21. "*Liikennepsykologia*" (*Traffic Psychology*). **Häkkinen, S and Luoma, J.** 1991, Traffic Psychology, p. 38.
22. *Next Generation Simulation Community*. [Online] <http://ngsim-community.org/>.
23. **Tarko, Andrew, et al.** *Surrogate Measures of Safety White paper*. s.l. : ANB20(3) Subcommittee on Surrogate Measures of Safety, 2009.

Appendice



Figure 37 – Sites d'étude caractérisés par $L_{diffuseur}$.



Figure 38 – Sites d'étude caractérisés par $L_{visibilité}$.



Figure 39 – Sites d'étude caractérisés par *d_bret_amont*.

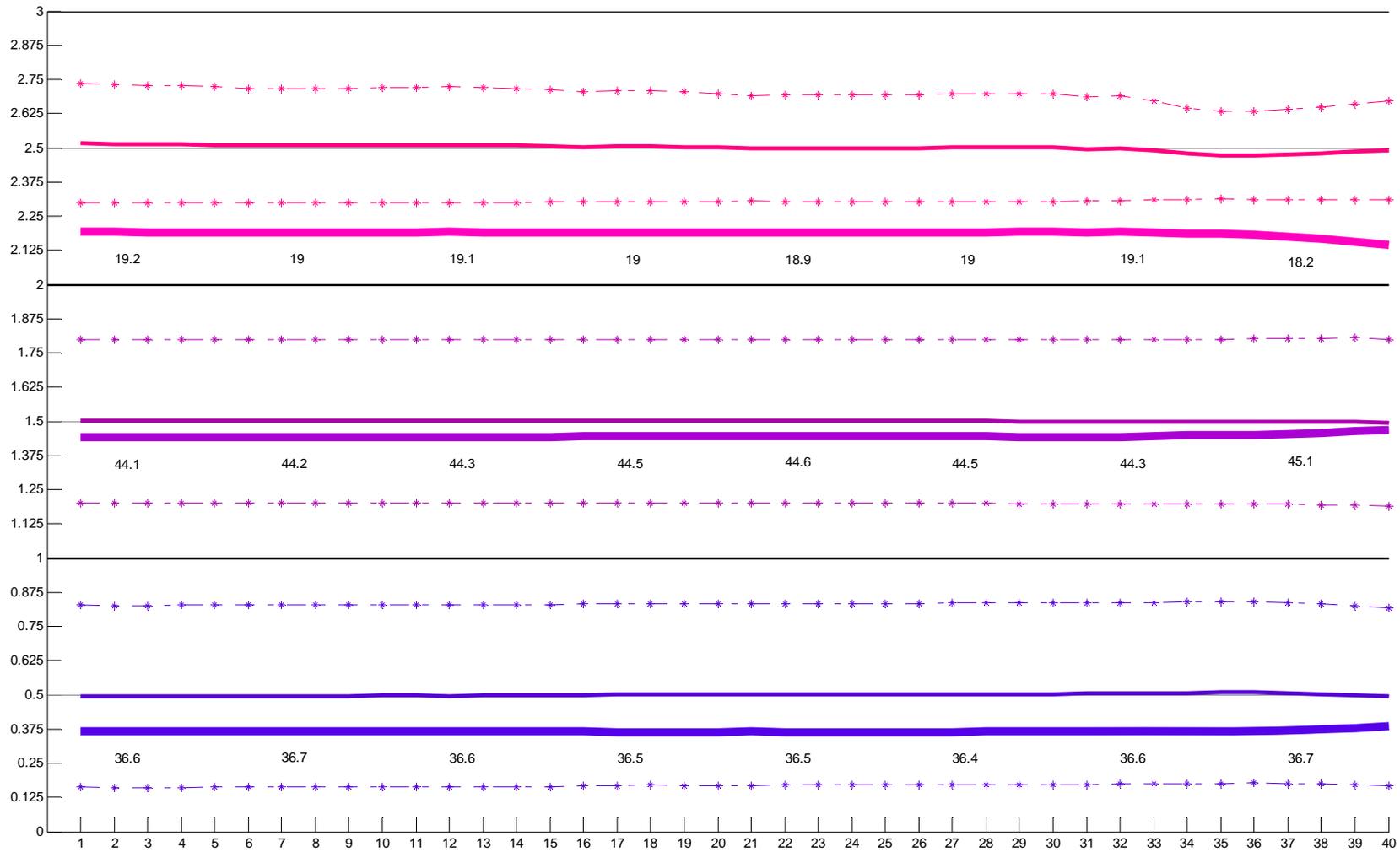


Figure 40 – Exemple des ratios de débits par voie et trajectoires médianes en fonction de la distance le long de la zone d’étude. Site: A20-E-E56-3, Cam20-16-Dorval (avec LCGV1).

