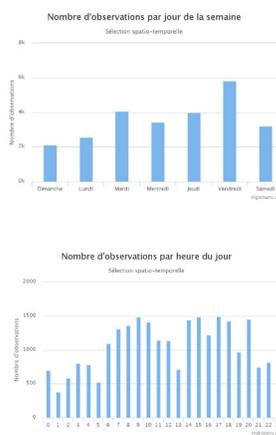
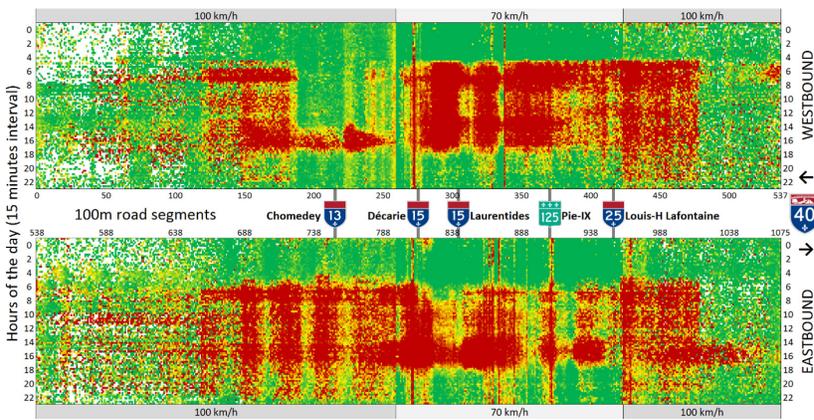
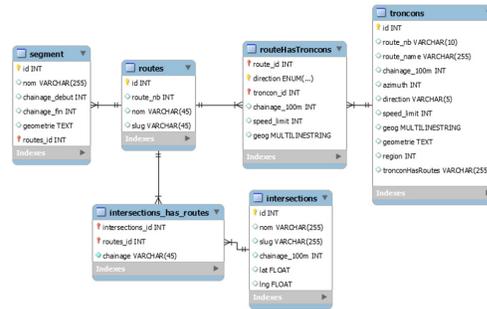
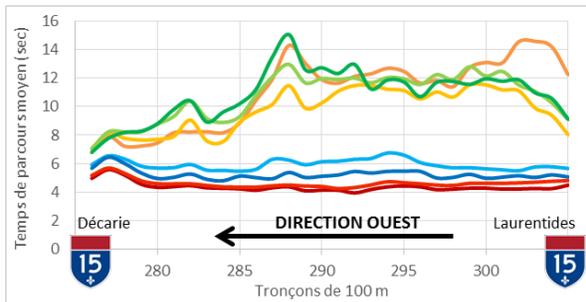


Projet de recherche sur le développement d'un outil de suivi et d'analyse des conditions de circulation sur le réseau routier du MTMDET de la région de Montréal



Rapport final
Étude réalisée pour le compte du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports
Mai 2017



Projet de recherche sur le développement d'un outil de suivi et d'analyse des conditions de circulation sur le réseau routier du MTMDET de la région de Montréal

Projet R.736, parrainé par

Direction générale de l'inventaire et du plan

Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports

Les opinions exprimées dans ce rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec.

Rapport final

Pre Catherine Morency, ing., Ph.D.,

Pr Martin Trépanier, ing., Ph.D.

Pr Nicolas Saunier, ing., Dr.Sc.

Marc-André Tessier, M.Sc.A.

Julien Faucher, M.Sc.A.

Jean-Simon Bourdeau, M.Sc.A.

Antoine Giraud, M.Sc.A.

Polytechnique Montréal

Remerciements :

L'équipe de recherche souhaite remercier les professionnels de la Direction de la modélisation des systèmes de transport, de la Direction de la circulation et de la Direction du plan et de l'aménagement - Région métropolitaine de Montréal du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec pour leur contribution au projet de recherche. L'équipe souhaite notamment souligner l'implication de Guy Canuel qui a assuré la coordination administrative et l'orientation technique du projet.

Table des matières

1	<i>Introduction.....</i>	1
1.1	Contexte.....	1
1.2	Structure du projet	1
1.3	Objectifs	2
1.4	Structure du rapport	3
1.5	Méthodologie générale.....	3
2	<i>Revue de littérature : outils disponibles et indicateurs.....</i>	5
2.1	Synthèse des outils disponibles.....	5
2.2	Indicateurs de mesure des conditions de circulation.....	6
3	<i>Système d'information.....</i>	15
3.1	Données	15
4	<i>Développement des indicateurs de congestion</i>	28
4.1	Indicateurs pour l'aide à la calibration des modèles régionaux	28
4.2	Indicateurs pour les analyses avant-après	29
4.3	Indicateurs pour la modélisation des conditions de circulation	30
4.4	Indicateurs pour l'évaluation stratégique	32
5	<i>Modélisation des conditions de circulation.....</i>	33
5.1	Contexte.....	33
5.2	Description de l'étude de cas	34
5.3	Définition du modèle	35
5.4	Résultats des modèles	43
5.5	Synthèse.....	49
6	<i>Conceptualisation de l'outil.....</i>	51
6.1	Structure générale	51
6.2	Concepts de base	55
6.3	Paramètres de sélection.....	58
6.4	Analyse des échantillons de données après la sélection de la période d'analyse	60
6.5	Analyse descriptive de l'échantillon après la sélection des unités spatiale et temporelle de filtre et d'analyse	60

6.6	Résultats des analyses des conditions de circulation.....	63
7	Conclusion	65
7.1	Synthèse des travaux et retour sur les objectifs.....	65
7.2	Limitations.....	66
7.3	Enjeux pour le déploiement durable de l'outil	66
8	Références.....	70
9	Annexes.....	73

Liste des figures

Figure 1– Cadre général de l’outil d’analyse et de suivi de la congestion	4
Figure 2– Schéma des conditions de circulation et des seuils d’acceptabilité de congestion.....	12
Figure 3 – Schéma relationnel des données de référence	19
Figure 4 – Carte de l’étude de cas (ligne pointillée : tronçon d’intérêt).....	29
Figure 5 – Temps de parcours moyen sur l’autoroute 40 « entre les deux 15 » selon le période de la journée.....	29
Figure 6 – Vitesse moyenne hebdomadaire, plus ou moins un écart-type, sur le pont de l’Île-aux-Tourtes en direction ouest en semaine en période de pointe AM et PM	30
Figure 7 – Grille spatiotemporelle du ratio des vitesses historiques sur l’autoroute 40	31
Figure 8 – Tronçons de 100 m les plus critiques (15e rang centile) et % des tronçons en congestion selon la période de pointe, autoroute 40	32
Figure 9 – Schématisation de la génération automatisée de modèles explicatifs	33
Figure 10 – Distribution fréquentielle du temps de parcours selon le jour de la semaine pour le réseau complet du MTMDET en février 2014.....	34
Figure 11 – Carte de l’étude de cas : autoroutes de la région de Montréal (8 régions) avec leur limite de vitesse et la localisation de la station météorologique Ste-Thérèse du MTMDET	35
Figure 12 – Distribution fréquentielle du ratio de la limite de vitesse (RLV) sur tout le réseau pour février 2014.....	36
Figure 13 – Résultat du test de KS comparant les distributions de 6h et 7h pour mars 2014	37
Figure 14 – Matrice des distances D entre les distributions des RLV de chaque paire d’heures entre 0 h 00 et 12 h 00.....	38
Figure 15 – Création des périodes horaires : Matrice des résultats des tests de KS (a,b) et les distributions fréquentielles du RLV (c,d) pour février et mars.....	39
Figure 16 – Matrice de corrélation des variables utilisées pour février 2014.....	40
Figure 17 – Distributions des données du RLV en fonction de toutes les variables explicatives pour le mois de février 2014 (603 037 observations).....	42
Figure 18 – Probabilité de congestion pour un seuil de 60 % du RLV selon la période horaire et la région pour une chaussée glacée, bonne visibilité et aucune précipitation de neige	47
Figure 19- Probabilité de congestion entre 7h et 9h à Montréal-Est selon la condition météorologique hivernale pour différents seuils de congestion en février (a) et mars (b).....	49
Figure 20 – Schéma communications client-serveur	55
Figure 21 – Illustration de certaines unités d’analyse spatiale	58
Figure 22 – Représentation schématique des étapes d’analyse de l’outil	59
Figure 23 – Points GPS de taxi Hochelaga pour la journée du 19 février 2016	68

Liste des tableaux

Tableau 1 – Répartition des outils analysés en fonction des données utilisées	5
Tableau 2 – Indicateurs de la congestion selon Ladier (2006)	8
Tableau 3 – Indicateurs de la congestion tels que catégorisés par l'OCDE en 2007.....	8
Tableau 4 – Indicateurs identifiés pour chacun des objectifs	13
Tableau 5 – Structure des fichiers CSV de Taxi Diamond.....	16
Tableau 6 – Structure de la table POINTS(TD) des données de Taxi Diamond	16
Tableau 7 – Structure des fichiers de Communauto	17
Tableau 8 – Structure de la table POINTS(CO) des données de Communauto	17
Tableau 9 – Structure de la table POINTS.....	18
Tableau 10 – Structure de la table TRONCONS	20
Tableau 11 – Structure de la table ROUTEHASTRONCONS.....	20
Tableau 12 – Structure de la table ROUTES	20
Tableau 13 – Structure de la table INTERSECTIONS.....	21
Tableau 14 – Structure de la table SEGMENTS	21
Tableau 15 – Structure de la table de données météorologiques	22
Tableau 16 – Structure de la table des jours ouvrables.....	23
Tableau 17 – Structure de la table des points assignés	23
Tableau 18 – Structure de la table de tronçons-heures	24
Tableau 19 – Définition des symboles de statut des données.....	24
Tableau 20 – Statut des données de base et attributs disponibles pour le projet	25
Tableau 21 – Statut des données explicatives et attributs considérés pour le projet	26
Tableau 22 – Statut des données de mesure et attributs disponibles et en développement pour le projet	27
Tableau 23 – Modèle de probabilité de congestion pour un RLV < 0,6 en février 2014	45
Tableau 24 – Modèle de probabilité de congestion pour un RLV < 0,6 en mars 2014	46
Tableau 25 – Limites de stockage du logiciel PostgreSQL	52
Tableau 26 – Liste non-exhaustive des modules du logiciel Ruby qui sont utilisés pour le développement des indicateurs	52
Tableau 27 – Liste des technologies utilisées pour réaliser l'interface de visualisation web.....	53
Tableau 28 – Liste non-exhaustive de bibliothèques utilisées pour réaliser l'interface de visualisation web.....	54
Tableau 29 – Code de couleurs utilisées dans les tableaux suivants	61
Tableau 30 – Combinaisons possibles des unités spatiales	61
Tableau 31 – Combinaisons possibles des unités temporelles.....	62

1 Introduction

1.1 Contexte

Le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (anciennement le Ministère des transports du Québec¹) a mandaté des chercheurs de Polytechnique Montréal pour assurer, dans le cadre d'un projet de R&D, le développement d'un outil de monitoring des conditions de circulation sur le réseau montréalais de juridiction provinciale. Tel que mentionné au devis, « *ce projet de recherche et développement vise à développer un outil d'intégration, de consultation et d'analyse des données de vitesse et temps de parcours pour fins de planification des réseaux de transport et suivi des conditions de circulation.* »

Ce projet s'inscrit en continuité d'un projet de recherche réalisé entre 2007 et 2011 par les professeurs Morency, Trépanier et Saunier visant à évaluer les potentialités de valorisation de données de véhicules flottants. Dans le cadre de ce précédent projet, l'équipe de recherche avait évalué différentes technologies de collecte de données de vitesse / temps de parcours et noté les opportunités offertes par la disponibilité de données GPS² issues des véhicules de la compagnie d'autopartage Communauto. Dans le présent projet, deux ensembles de données GPS alimentent a priori l'estimation des indicateurs de congestion, à savoir les données issues des véhicules de la compagnie *Communauto* (400 véhicules actuellement équipés de GPS dans la région de Montréal) et les véhicules de la compagnie de taxi *Taxi Diamond* (1000 véhicules). Le développement de l'outil devrait permettre d'inclure d'autres flux de données (GPS) si ceux-ci deviennent disponibles.

1.2 Structure du projet

Six grandes étapes avaient été prévues au devis du projet, sur une période de 3 ans. Elles sont décrites ci-dessous. Initialement, une année avait été prévue en vue d'assurer l'accès aux différents ensembles de données requis pour soutenir l'évaluation des indicateurs de congestion (tant GPS que données liées aux variables explicatives), mais cette tâche a pris beaucoup plus de temps que prévu et en fait certaines données n'ont finalement pu être intégrées en raison de l'impossibilité d'y avoir accès en continu et dans un format traitable automatiquement. Les étapes prévues étaient :

- 1) Développement des procédures de traitement et de validation des traces GPS. Cette tâche s'est effectuée en continu, en fonction de la mise à disponibilité des données. À ce jour, l'application relève principalement des données de Taxi Diamond alors que les données de la compagnie d'autopartage Communauto ont été intégrées ponctuellement, n'étant pas accessibles en continu.

¹ Dans ce document, nous référerons à l'acronyme MTMDET » pour désigner le Ministère des Transports du Québec qui est devenu le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, le 28 janvier 2016.

² Dans ce document, il a été choisi d'utiliser le terme courant GPS pour désigner toute donnée de localisation obtenue par un système de positionnement par satellite (Global navigation satellite system, GNSS), dont le système Global Positioning System (GPS) est l'exemple le plus connu.

- 2) Arrimage des données validées aux données de référence (réseau routier) et aux variables explicatives (météo par exemple). Il n'a pas été possible de se brancher directement aux ensembles de données du ministère et des sources alternatives ont été trouvées.
- 3) Développement des indicateurs de congestion et des méthodologies d'estimation. Cette étape s'est déroulée à travers tout le projet et des études de cas ont été choisies pour en expérimenter l'estimation.
- 4) Développement des interfaces de consultation. Un prototype d'interface a d'abord été effectué dans un tableur (développement des visualisations) puis la mise en page sur plateforme web a été réalisée en fin de projet.
- 5) Développement d'un plan d'implantation et d'actualisation de l'interface. Il est apparu clairement que le maintien et l'actualisation de l'interface au sein du ministère exigent un ensemble de mesures et modalités qui sont toujours à discuter. L'accès aux données et les modalités de traitement et analyse sont bien maîtrisés par l'équipe de recherche, mais il faudra assurer une phase 2 du projet afin d'en assurer le déploiement et l'actualisation en continu.

Plusieurs éléments de suivi du projet sont discutés au dernier chapitre de ce rapport. En outre, les sections qui suivent détaillent les volets analytiques et méthodologiques qui ont mené au développement de l'interface.

1.3 Objectifs

Les principaux objectifs du projet sont:

- doter le MTMDET d'un outil de mesure des conditions de circulation sur le réseau routier supérieur dans la grande région de Montréal, pour des fins de planification;
- développer une série d'indicateurs de congestion;
- contribuer à doter le MTMDET d'un registre permanent des conditions de circulation;
- alimenter les exercices de planification du MTMDET.

En outre, suite à l'étude approfondie des nombreux objectifs spécifiques mentionnés dans ce même document, l'équipe de recherche a identifié plus précisément les quatre grands objectifs auxquels devra répondre l'outil. Ces objectifs alimentent le processus de développement des indicateurs et des interfaces. Ces objectifs sont :

- la calibration des modèles régionaux;
- l'évaluation des impacts d'une intervention (analyses avant-après);
- la modélisation des conditions de circulation;
- l'évaluation stratégique de la congestion.

Ces objectifs seront décrits plus en détail dans la section portant sur l'élaboration des indicateurs de mesure puisque ces indicateurs sont justement développés afin de soutenir ces quatre objectifs.

1.4 Structure du rapport

Le rapport est structuré comme suit. D'abord, la méthodologie générale de développement de l'outil est présentée. La revue de littérature sur les indicateurs de congestion, mais aussi sur différents outils disponibles à travers le monde est ensuite proposée.

Ensuite, le montage du système d'information requis pour assurer l'intégration des données est décrit. Cette section du rapport fait aussi état des données qui s'avèrent pertinentes, mais qui n'ont pas nécessairement été obtenues. En outre, des détails sur le réseau de transport choisi, la délimitation du réseau de juridiction provinciale pour Montréal ainsi que l'approche de segmentation par tronçons sont décrits, ainsi que leur traduction sous forme de bases de données.

Par la suite, un chapitre est dédié à la présentation d'indicateurs de congestion et d'objets de visualisation associés qui ont alimenté le développement du prototype. Aux fins de développement sous approche de prototypage, une étude de cas a été identifiée, à savoir les impacts de l'ouverture de l'A30, dans l'ouest, sur les temps de parcours observés sur le corridor de l'A40 (autoroute métropolitaine). Ce cas d'étude permet de mieux évaluer la sensibilité des indicateurs développés et de vérifier s'ils pourront répondre aux besoins de mesure.

Le chapitre qui suit propose une modélisation des conditions de circulation, notamment en vue d'évaluer les impacts des conditions routières sur ces conditions. Bien que la modélisation n'ait pas été introduite directement dans l'outil, le modèle présenté permet d'évaluer l'ampleur des impacts, des conditions météorologiques sur les conditions de circulation.

Un chapitre est ensuite dédié à la conceptualisation de l'outil. Les concepts de base de l'outil sont présentés ainsi que les procédures d'accès aux statistiques et visualisations. Ce chapitre décrit les informations qui peuvent être consultées via la plateforme web ainsi que les différents paramétrages possibles.

Finalement, une conclusion est proposée. On y retrouve notamment une synthèse des travaux réalisés dans le cadre de ce projet de recherche ainsi que les différentes limitations liées aux estimations et développements. En outre, c'est dans ce chapitre que nous trouvons les perspectives associées au déploiement de l'outil et aux modalités d'actualisation et utilisation par les professionnels du ministère.

1.5 Méthodologie générale

Le développement d'un outil de suivi des conditions de circulation sur le réseau implique différentes tâches. D'un côté, le développement de l'outil implique l'acquisition de différents types de données, le développement de procédures de validation et traitement de ces données, l'architecture d'une base de données centralisée permettant l'intégration des données témoignant des conditions de circulation (vitesse et temps de déplacement), du référentiel (réseau de transport et attributs associés, territoire) et des variables explicatives (météo, incidents, travaux). De l'autre côté, cela exige le développement (formulation et méthodologies d'estimation) d'indicateurs de congestion ainsi que d'interfaces et objets de visualisation de ces indicateurs. La Figure 1 présente le cadre général de l'outil d'analyse et de suivi. Sont notamment identifiés les différentes données requises (données de mesure, données explicatives et données de base), le flux des données vers la base de données centralisée, le lien, par le biais de requêtes, entre cette base de données centralisée et l'outil d'analyse et de suivi.

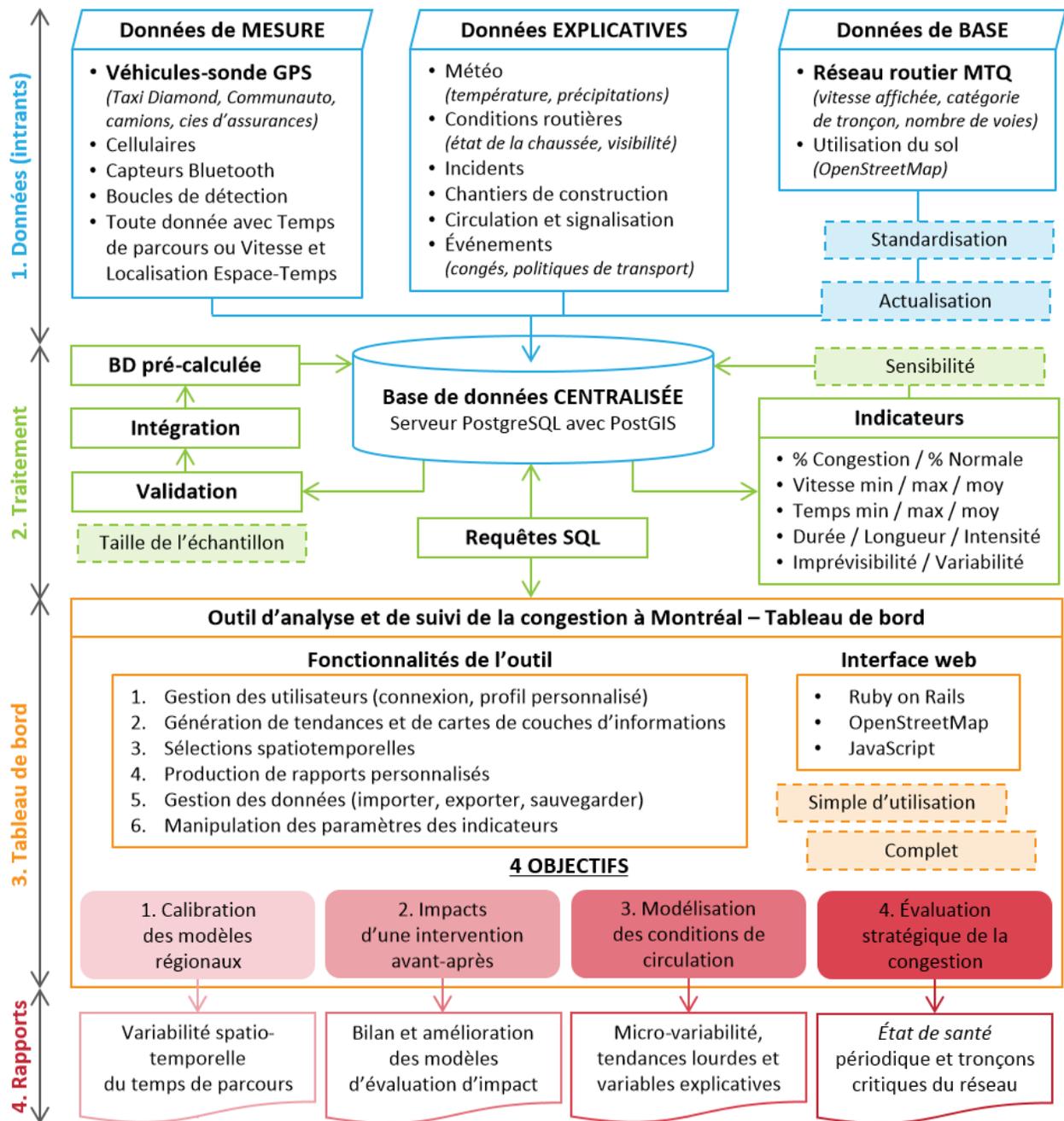


Figure 1– Cadre général de l'outil d'analyse et de suivi de la congestion

2 Revue de littérature : outils disponibles et indicateurs

La mesure de la congestion est un sujet d'actualité, tant au niveau des planificateurs de réseaux de transport que dans le milieu de la recherche. Depuis déjà quelques années, les chercheurs de Polytechnique, notamment dans le cadre des travaux de la Chaire Mobilité sur le développement d'indicateurs de durabilité appliqués au transport, s'intéressent au développement d'indicateurs de congestion. Un inventaire des indicateurs disponibles pour documenter les conditions de circulation a été réalisé, mais une analyse de certains outils de suivi de la congestion a aussi été effectuée en vue d'identifier les principales fonctions que ces outils proposent. Cette section présente les résultats de ces deux démarches.

2.1 Synthèse des outils disponibles

Une revue de différents outils portant sur les conditions de circulation a été effectuée en vue de faire ressortir les principales fonctionnalités, indicateurs, données entrantes et modalités d'utilisation. En tout, ce sont 53 outils qui ont été étudiés, certains ne portant que sur l'analyse de données en temps réel, d'autres sur des données historiques et d'autres sur les deux types de données. Le Tableau 1 présente la distribution des outils étudiés en fonction de ce critère. Il ressort clairement que la majorité des outils portent uniquement sur l'exploitation de données en temps réel.

Ces outils sont développés par des entreprises privées (IBM, INRIX, TomTom, etc.), des gouvernements (FHWA) ou des universités (le CATT LAB de l'Université du Maryland : <http://www.cattlab.umd.edu/>).

Tableau 1 – Répartition des outils analysés en fonction des données utilisées

53 outils d'analyse de la congestion étudiés	
A. Analyse de données en temps réel	39
B. Analyse de données historiques	7
C. Temps réel et historique	7

Cette première étape avait comme objectif d'identifier les principales fonctions d'un outil de suivi des conditions de circulation en vue d'alimenter le développement de l'outil visé par le projet. Dans ce contexte, les 14 outils impliquant l'exploitation de données historiques ont été examinés plus en détail. Ainsi, les fonctions relatives aux tâches suivantes ont été examinées :

1. **Mécanismes de gestion des utilisateurs** : modalités de connexion, création de profils personnalisés, possibilités de personnalisation, etc.
2. **Gestion des données** : fonctions assurant l'importation et l'exportation de données ainsi que la sauvegarde d'ensembles de données dans différents formats, outils de validation et fusion de données diverses;
3. **Génération et visualisation de résultats spatiotemporels** : ensemble des fonctions et méthodes permettant d'obtenir des résultats, notamment :
 - a) fonctions de sélection spatiale : choix de l'objet d'intérêt : secteur, corridor, point, segment routier;

- b) paramétrage des plages d'analyse : choix de la période et de l'unité d'analyse;
 - c) analyse de tendances, indicateurs pertinents;
 - d) objets d'analyse et visualisation (cartes, graphiques, tableaux);
 - e) modification des paramètres, sauvegarde et exportation des résultats.
4. **Génération des rapports** : choix des indicateurs et des modalités spatio-temporelles.

2.2 Indicateurs de mesure des conditions de circulation

Cette section propose une synthèse de différents documents portant sur les indicateurs de congestion. Cette démarche vise à alimenter le développement et la conception de l'outil. À ce stade-ci, les indicateurs qui se retrouveront dans l'outil n'ont pas encore été identifiés.

La congestion routière est un phénomène qui a reçu une grande attention dans la littérature. On retrace même des constats concernant la congestion routière jusqu'en Rome Antique où les étroits portiques d'entrées des villes causaient des retards importants (Van Tilburg, 2007).

De nombreux indicateurs ont été proposés pour mesurer la congestion depuis plusieurs années. Les travaux de Tim Lomax du Texas Transportation Institute (TTI) sont une référence aux États-Unis avec de multiples recherches sur la congestion routière et la publication annuelle d'un *Urban Mobility Report* (UMR) depuis 1982, alors intitulé *Estimates of Relative Mobility in Major Texas Cities* (Lomax & al. 1982). Ce rapport présentait quatre mesures de la congestion : *Traffic per lane*, *Percentage of Congested Freeway*, le *K factor*³ (% de la circulation de l'heure de pointe, souvent de la 30^e heure la plus achalandée de l'année, par rapport au débit journalier moyen annuel (DJMA)) et le *Peak-Hour Travel Distance*. Plusieurs indicateurs ont été développés depuis, dont le *Roadway Congestion Index* (RCI) (Schrank & al. 1993).

Le rapport *Quantifying Congestion* (Lomax & al. 1997) dans le cadre du National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), écrit par le Texas Transportation Institute, a constitué une étape importante dans le domaine. Il est le premier document qui fournit des méthodes pour mesurer la congestion avec des paramètres simples pouvant s'appliquer à une route, un corridor ou une région métropolitaine. Il propose aussi une liste d'indicateurs de la congestion :

- Rythme de déplacement (Travel rate) soit les minutes requises pour parcourir une certaine distance;
- Taux de retard (Delay rate) soit la différence entre le temps réel requis pour parcourir une distance et le temps acceptable⁴ pour parcourir cette même distance;
- Retard total (Total delay) soit le taux de retard multiplié par le débit de véhicules (en véhicules-minutes);
- Index de mobilité d'un corridor soit le ratio entre les passagers * vitesse moyenne et un indicateur de passagers* vitesse en situation normale;

³ Selon Crownover (2006), « A K factor is the ratio between a peak hour and the ADT. This can be many different factors. The most common is typically referred to as the K-30. It is specifically the ratio between the 30th highest hour and the AADT »

⁴ Cette notion de « temps acceptable » doit nécessairement être définie et précisée, selon le contexte, pour permettre l'estimation de l'indicateur

- Taux de retard relatif (Relative delay rate) soit le ratio entre le taux de retard (Delay rate) et le rythme acceptable de déplacement (Acceptable travel rate) (les deux s'exprimant en unité de temps par unité de distance);
- Ratio de retard (Delay ratio) soit le ratio entre le taux de retard (Delay rate) et le rythme réel de déplacement (Actual Travel Rate) (les deux s'exprimant en unité de temps par unité de distance);
- Déplacements en congestion (Congested travel) soit le nombre total de véh-hres sur les tronçons routiers congestionnés (produit des liens congestionnés et du débit y circulant);
- Réseau sous congestion (Congested Roadway) soit la longueur totale des liens congestionnés;
- Accessibilité soit la somme des opportunités accessibles avec un temps de déplacement inférieur au temps de déplacement acceptable.

Ce rapport a été bonifié en 2003 avec le rapport *Performance Measures of Operational Effectiveness for Highway Segments and Systems* (Shaw, 2003) avec une analyse de plus de 70 indicateurs de performance. Le rapport *Traffic Congestion and Reliability* (Cambridge Systematics, 2005) constitue aussi un pilier dans la matière en présentant les tendances de la congestion selon plusieurs indicateurs et les stratégies pour la réduire. Ensuite, le rapport *Measuring Transportation Network Performance* (Cambridge Systematics & al. 2010), constitue un guide pour les agences de transport sur comment implanter un programme de mesure des performances de leur réseau routier, avec une considération du transport multimodal.

L'UMR 2002 fut le premier à introduire les contributions des stratégies de mitigation et du transport collectif sur la réduction de la congestion. Les plus récents UMR (Shrank & al. 2011, 2012) utilisent maintenant les données de INRIX qui est un fournisseur de données de circulation à l'échelle mondiale. Les méthodologies de calcul complètes sont disponibles à l'annexe A du rapport. Le Federal Highway Administration (FHWA) publie périodiquement un « Urban Congestion Report » sur son site web (www.ops.fhwa.dot.gov/perf_measurement/ucr) dont les résultats suivent la méthodologie du TTI.

L'article de Bertini (2006) montre les résultats d'un sondage auprès des experts en transport qui affirment que 50% d'entre eux croient les indicateurs sont assez précis, 80% disent que la congestion est pire qu'il y a 20 ans et qu'il n'y a pas de définition de la congestion acceptée par tous. Lyman & Bertini (2008) présentent ensuite une utilisation des indicateurs de fiabilité du temps de parcours pour témoigner de la santé du système de transport avec une étude de cas de Portland, Oregon.

Au Québec, l'article *Évaluation de la congestion « De la théorie à la pratique »* (Robitaille & Nguyen, 2003) montre plusieurs mesures de la congestion en utilisant des données odométriques et GPS ainsi que les relevés des boucles de détection sur le réseau routier de Montréal. Le rapport *Évaluation de la congestion routière dans la région de Montréal* (Gourvil & Joubert, 2004) chiffre le coût socio-économique de la congestion pour 1998 à 779 M\$ par rapport à 498 M\$ (\$1998) pour 1993. De son côté, le rapport *Le coût de la congestion urbaine au Canada* (Transport Canada, 2006) présente des coûts liés à la congestion de l'ordre de 702 M\$ à 987 M\$ (\$2002) dans la zone urbaine de Montréal.

Le mémoire de maîtrise de Cyril Ladier (2006) fait l'inventaire des indicateurs de la circulation routière selon trois usages et cinq catégories (voir Tableau 2).

Tableau 2 – Indicateurs de la congestion selon Ladier (2006)

Usages	Catégories
1. informer (information temps réel)	1. indicateurs de retard / temps de parcours
2. gérer (gestion temps réel, suivi quotidien des actions de gestion)	2. indicateurs de vitesse
3. décider (comparaison avant après, avec ou sans, suivi long terme)	3. indicateurs de longueur / taux de saturation
	4. indicateurs utilisant les débits
	5. hres-km et dérivés

Un rapport de la Conférence européenne des ministres du transport et de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE, 2007) a recensé et catégorisé les indicateurs disponibles selon 7 catégories:

1. Indicateurs liés à la vitesse
2. Indicateurs liés au temps/retard
3. Indicateurs spatiaux
4. Indicateurs de niveau de service/capacité
5. Indicateurs de fiabilité
6. Indicateurs économiques/coûts
7. Autres indicateurs (alternatives et consommation d'essence)

Ces indicateurs sont présentés au Tableau 3. D'autres indicateurs peuvent être identifiés dans d'autres sources, mais ce tableau présente le contenu proposé par l'OCDE (2007).

Tableau 3 – Indicateurs de la congestion tels que catégorisés par l'OCDE en 2007

Indicateur	Description	Notes
1. Indicateurs liés à la vitesse		
Vitesse moyenne	Vitesse moyenne des véhicules sur le réseau	Ne saisit pas adéquatement les effets de la congestion.
Vitesse en heures de pointe	Vitesse moyenne des véhicules durant les heures de pointe	Peut servir de référence pour des mesures de fiabilité utilisant la vitesse moyenne ou médiane.
2. Indicateurs liés au temps/retard		
Heures de retard par année	Heures de temps de parcours additionnel dû à la congestion	Tous les indicateurs qui utilisent le retard dépendent d'une valeur de base pour le calcul : si la valeur de base est la vitesse à écoulement libre, le terme « retard » peut être trompeur, car les usagers ne s'attendent pas à atteindre une vitesse sans retard en heures de pointe.
Retard annuel par personne	Heures de temps de parcours additionnel divisé par la population	
Retard annuel par usager de la route	Heures de temps de parcours additionnel divisé par le nombre d'usagers de la route en pointe	
Temps de déplacement moyen	Temps moyen de déplacement des usagers	

Indicateur	Description	Notes
Temps de parcours estimé	Temps de parcours estimé sur un tronçon routier	
Temps en congestion	Durée totale de « l'heure de pointe »	
Retard par distance unitaire	Différence entre les temps de parcours de référence et en congestion par distance unitaire	
Index de temps de parcours en congestion	Pourcentage des déplacements en période de pointe sous congestion	L'utilisation du TTI et du TTR dépendent aussi d'une valeur de seuil de la congestion. Les mêmes considérations notées par les indicateurs de retard s'appliquent.
Travel Time Index (TTI)	Ratio du temps de parcours en pointe sur celui en écoulement libre	
Travel Time Rate (TTR) ⁵	Idem au TTI, mais en considérant seulement la congestion récurrente (excluant les retards liés aux incidents)	
3. Indicateurs spatiaux		
Kilomètres de voie en congestion	Nombre de kilomètres de voie en congestion en période de pointe	Les indicateurs spatiaux dépendent aussi des valeurs seuil; celles-ci peuvent être basées sur les vitesses ou densités moyennes, médianes ou en écoulement libre (voir note ci-haut).
Kilomètres de route en congestion	Nombre de kilomètres de route en congestion en période de pointe	
Network Connectivity Index	Index qui prend en compte le nombre de nœuds et d'échangeurs à l'intérieur d'un réseau routier	C'est un indicateur du potentiel de congestion, mais ce potentiel peut dépendre de plusieurs autres facteurs.
4. Indicateurs de niveau de service/capacité		
Niveau de service	Intensité de la congestion sur un tronçon ou à une intersection, classé de A (circulation libre) à F (congestion extrême)	Ces indicateurs ont la faveur des gestionnaires du réseau. Ils sont utilisés puisqu'ils mettent en relation la capacité des infrastructures et leur niveau d'utilisation.
Roadway Saturation Index	Ratio du débit observé sur la capacité d'un tronçon	

⁵ Le TTR (comme tous les autres indicateurs de ce tableau) est extrait du rapport de l'OCDE; cet indicateur a exactement la même définition que le TRI (Travel Rate Index) et correspond au TTI mais estimé en ne considérant que la congestion récurrente.

Indicateur	Description	Notes
5. Indicateurs de fiabilité		
Buffer Time Index (BTI)	Buffer : différence entre les temps de parcours 95 ^e centile et moyen BTI : Ratio Buffer / écoulement libre	Ces indicateurs tentent de tenir compte de la variabilité des conditions de circulation dans le temps et de saisir comment les usagers de la route prennent leurs décisions face à un réseau en congestion. Ils prennent en compte l'importance pour les usagers « d'arriver à l'heure » au lieu de simplement se déplacer à une plus grande vitesse.
Congestion Variability Index	Index de la variabilité des vitesses sur le réseau routier	
Planning Time Index (PTI)	Ratio du temps de parcours 95 ^e centile sur celui en écoulement libre	
Temps de parcours moyen vs variance	Mesure de l'écart-type du temps de parcours dans un espace-temps donné	
Distribution du temps de parcours : centile - moyenne	Mesure de la différence entre des centiles et la moyenne du temps de parcours	
6. Indicateurs économiques/coûts		
Coûts annuels de la congestion	Retard annuel multiplié par une valeur monétaire du temps et de la consommation de carburant (au MTMDET, cela comprend également les coûts environnementaux des GES et des polluants atmosphériques).	Tel que noté plus haut, l'utilisation du seuil de vitesse à écoulement libre peut être problématique pour considérer les coûts.
Externalités marginales dues à la congestion	Coûts externes de chaque véhicule additionnel sur le réseau routier	
Pertes sèches totales	Somme des pertes (coûts-bénéfices) dues à un niveau de circulation	
Perte sèche moyenne par véhicule/km	Pertes sèches totales divisées par le nombre de véhicules/km en cause	
7. Autres indicateurs		
Poids de la congestion	Exposition de la population à la congestion (selon la disponibilité et l'utilisation des alternatives)	
Consommation de carburant additionnelle	Consommation totale de carburant additionnelle due à la congestion	Encore, la détermination du point de référence pour la consommation de carburant « additionnelle » peut être problématique.
Consommation en excès de carburant per capita	Consommation en excès de carburant divisée par la population	

Le *Highway Capacity Manual* (HCM) est apparu en 1950 en tant que premier guide pratique pour la conception des autoroutes selon une capacité calculée. Le HCM a introduit le concept de niveau de service ou *Level of service* (LOS) à sa deuxième édition en 1965, qui est devenu la référence pour mesurer l'évolution des conditions de circulation. À l'époque, l'expansion rapide du réseau routier était l'option préconisée pour améliorer le niveau de service qui n'est fonction que la densité, c'est-à-dire la vitesse moyenne, sur les autoroutes. Les versions subséquentes ont ajouté les piétons, vélos et transports collectifs aux calculs de la capacité afin d'en arriver à une approche multimodale avec le HCM 2010. Les chapitres 36 et 37 ont été ajoutés en 2014 et présentent des méthodes pour calculer la fiabilité du temps de parcours selon plusieurs paramètres. On y retrouve les indicateurs de performance standard ainsi que l'indice de pénibilité (*misery index*) qui caractérise les pires conditions de circulation et l'indice réglementaire (*policy index*) qui considère une vitesse cible pour un tronçon au lieu de la vitesse à écoulement libre.

L'ouvrage *Comprendre le trafic routier : Méthodes et calculs* du centre d'Études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU) est aussi un guide technique de référence en français portant sur les notions de circulation et de congestion routière (Buisson & Lesort, 2010).

L'ouvrage *Stuck in Traffic: Coping with Peak-hour Traffic Congestion* (Downs, 1992) met de l'avant les causes de la congestion et analyse les différentes stratégies proposées pour réduire la congestion en 1992. L'ouvrage a été mis à jour et renommé *Still Stuck in Traffic* (Downs, 2004) qui ajoute l'aspect positif de la congestion (inséparable de la prospérité économique d'une ville) et plusieurs concepts de solution à la congestion.

L'étude de la congestion est toujours au cœur de la recherche. Pack (2012) propose un outil d'analyse web pour étudier la mobilité à grande échelle en utilisant des données d'INRIX en utilisant plusieurs outils de visualisation comme des cartes d'information géographiques, des grilles de couleur et un graphique en spirale représentant les files d'attente. Wolniak & al. (2014) utilise ces analyses pour produire le *Maryland Mobility Report* qui montre le palmarès des pires embouteillages et les tendances de l'état de la circulation sur chaque tronçon majeur de l'état américain. Remias & al. (2014) présente plusieurs nouveaux indicateurs dans le cadre du *2012 Indiana Mobility Report*, dont le Travel Time Deficit, en utilisant aussi les données d'INRIX. Lasley & al. (2014), du Texas Transportation Institute suggère de travailler avec un indicateur de temps de parcours total tous modes confondus pour mesurer les conditions de circulation. L'impact des différentes sources de la congestion est aussi étudié par plusieurs, dont Kwon (2006) qui étudie le retard selon 6 sources principales :

1. Incidents
2. Événements spéciaux
3. Fermetures de voie
4. Conditions météorologiques
5. Contrôle d'accès (*ramp meter*)
6. Demande excédant la capacité

Le programme de recherche Strategic Highway Research Program (SHRP 2) du Transportation Research Board (TRB) a développé le guide *Establishing Monitoring Programs for Travel Time Reliability* qui décrit la fiabilité du temps de parcours et comment la mesurer (SHRP2, 2014). Ce guide complet décrit les étapes de développement d'un système de suivi des conditions de circulation en plus de donner les détails de l'architecture d'un système de suivi et de nombreuses

études de cas aux États-Unis. Une autre publication intéressante de ce programme est le rapport *Integrating Business Processes to Improve Travel Time Reliability* (SHRP2, 2011) qui a étudié les stratégies développées par les agences de transport américaines pour contrer les principales sources de congestion au niveau opérationnel : incidents, zone de travaux, événements spéciaux, météo routière et signalisation.

Malgré toutes les recherches sur le sujet, la notion de « seuil de la congestion » ou de « niveau acceptable de la congestion » est une notion qui ne fait pas consensus dans la littérature. Robitaille et Nguyen, 2003 suggèrent les seuils suivants pour caractériser un véhicule dans une file d'attente sur autoroute avec vitesse affichée de 100 km/h : 25 km/h (vitesse d'entrée dans la file) et 60 km/h (vitesse de sortie de la file). Ces deux seuils pourraient être utilisés pour définir ce qu'est la « congestion acceptable ». Il est important de noter par ailleurs que le MTMDET utilise le seuil de 60% de la vitesse permise pour identifier les conditions de circulation sous congestion. La 2 schématise la relation entre les différentes conditions de circulation et les seuils d'acceptabilité de la congestion. Évidemment, la détermination de ces seuils est un élément important de l'outil d'analyse et de suivi.

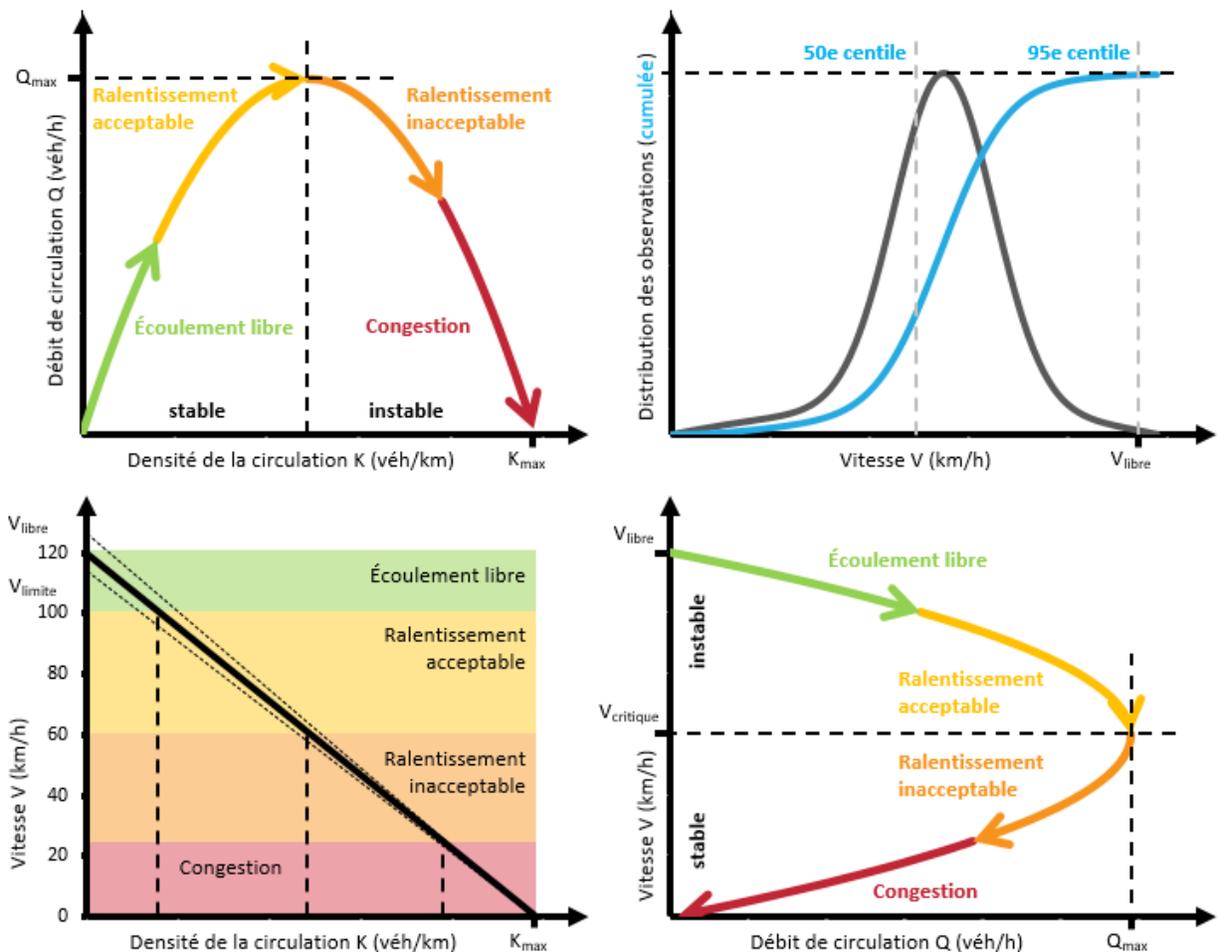


Figure 2– Schéma des conditions de circulation et des seuils d'acceptabilité de congestion

Enfin, dans le cadre de ce projet, l'accent a été mis sur quatre objectifs. Le Tableau 4 présente quelques indicateurs trouvés dans la littérature qui ont inspiré le développement de l'outil. Ainsi,

il ne s'agit pas de la liste des indicateurs qui se retrouvent dans l'outil, mais plutôt d'une classification des indicateurs identifiés selon la logique qui alimente le travail de prototypage.

Tableau 4 – Indicateurs identifiés pour chacun des objectifs

Obj.	Indicateur	Définition	Réf.
1. Calibration des modèles régionaux	Temps de parcours (TP) total	TP porte-à-porte sans considérer le mode	(a)
	Temps de parcours semestriel	Profils du TP journalier moyen pour chaque semestre	(b)
	Planning Time	TP à écoulement libre + Buffer Time = TP 95e centile	(c)
	Retard récurrent	Retard causé par la congestion récurrente	(c)
	Retard non récurrent	Retard causé par la congestion non récurrente (incidente)	(c)
2. Impacts d'une intervention	Profil de vitesse mensuel	Profil des heures sous un seuil de vitesse prédéfini	(b)
	Travel Time Index (TTI)	TPmoy / TP à écoulement libre	(c)
	Planning Time Index (PTI)	TP 95e centile / TP à écoulement libre	(c)
	Buffer Time Index (BTI)	(TP 95e centile – TPmoy) / TP à écoulement libre	(c)
	Travel Time Deficit (TTD)	Somme des TP historiques où Vmoy est sous un seuil de V	(b)
3. Modélisation des conditions de	Grille de congestion	Grille de chaleur spatiotemporelle du rapport de la vitesse moyenne sur la limite de vitesse (noté $RLV_{t,p}$ pour le tronçon t et la période p)	(d)
	Cartes de congestion	Carte avec les TP en congestion et des indicateurs de vitesse	(d)
	Graphique en spirale des périodes de congestion	Visualisation en horloge des périodes de congestion	(d)
	Camembert de congestion	Retard moyen quotidien selon 6 composantes de la congestion	(e)
	Durée d'incidents	Temps entre la déclaration et la fin de l'incident	(c)
4. Évaluation stratégique de la	Top 30 des files d'attente	Classement des embouteillages selon un facteur d'impact	(f)
	Segments les plus congestionnés	Classement des pires segments selon le TTI	(b,f)
	Heures de congestion	Nombre d'heures sous un seuil de vitesse prédéfinie	(b)
	Retard total	Somme de tous les retards sur un tronçon-période	(c)
	Composantes des coûts de la congestion	Coûts totaux du retard des voitures, camions et des GES exprimés en CO ₂ éq. et des polluants émis (PM _{2,5} , PM ₁₀ , NO _x , CO, COV, etc.)	(b)
Abréviations : TP = temps de parcours V = vitesse Moy = moyenne			

Références : (a) Lasley & al. 2014 (b) Remias & al. 2014 (c) Cambridge Systematics & al. 2010
 (d) Pack, 2012 (e) Kwon & al. 2006 (f) Wolniak & al. 2014

Cette section a proposé une synthèse des principaux travaux portant sur les indicateurs et outils de congestion. L'objectif de cette synthèse était d'alimenter le processus de prototypage de l'outil de suivi des conditions de circulation.

Plusieurs choix ont été faits à la lumière des connaissances acquises par le biais de cette revue de littérature, mais aussi en raison des données qui se sont avérées disponibles et la complexité liée à leur exploitation. Le bagage demeure pertinent et pourra permettre d'enrichir l'outil dans les phases ultérieures de développement.

3 Système d'information

Dans ce chapitre, nous détaillons les différentes sources de données considérées dans l'outil ainsi que la structure du système d'information. Bien que pertinentes, certaines n'ont pu être intégrées dans la version actuelle de l'outil, n'étant pas disponibles systématiquement ou sous un format permettant l'exploitation en continu.

3.1 Données

Le montage du système d'information repose sur une analyse fine des données disponibles. Trois grandes familles de données peuvent être identifiées, soit 1) les données de condition de circulation, accumulées sous la forme de données GPS par des véhicules en déplacement sur le réseau, 2) des données de référence contenant notamment la codification du réseau routier et finalement 3) des variables explicatives présentant des données complémentaires sur des conditions générales ayant été observées à des moments précis (météo, incidents).

3.1.1 Conditions de circulation

Dans le cadre du projet, les conditions de circulation sont évaluées grâce aux données obtenues de capteurs GPS utilisés par des véhicules en déplacement sur le réseau. En plus du positionnement et de l'horodatage, le capteur doit aussi permettre d'obtenir une valeur de vitesse instantanée, celle-ci étant nécessaire dans le but de représenter la situation du réseau routier à un point précis dans l'espace et le temps. D'autres informations complémentaires, comme la direction du véhicule, son numéro d'identification, ainsi que qu'une valeur permettant d'identifier son activité au moment de la collecte de la donnée peuvent permettre de raffiner les analyses éventuelles.

À ce jour, deux ensembles de données alimentent l'outil développé dans le cadre du projet, soit les données de quelque 400 véhicules de la compagnie Communauto et les données des taxis de la compagnie Taxi Diamond. Dans la démarche de prototypage, le principal ensemble de données GPS valorisé est celui obtenu de Taxi Diamond. Les données des véhicules de Communauto ont été insérées dans le système d'information, mais comme il n'a pas été possible d'accéder à ces données en continu, elles ne sont disponibles que pour un sous-ensemble de jours. Les données disponibles en date de mars 2016 sont décrites ci-dessous.

Toutes les données ont été importées dans une base de données PostGIS⁶.

3.1.1.1 Données de Taxi Diamond

Les données de Taxi Diamond sont disponibles dans un ensemble de fichiers journaliers qui sont rendus disponibles chaque jour sous la forme de fichiers texte CSV (valeurs séparées par des virgules). La structure de ces fichiers est présentée au Tableau 5. Ceux-ci contiennent en moyenne un peu plus de 300 000 enregistrements par jour.

⁶ PostGIS est une extension du système de gestion de base de données PostgreSQL, qui est d'utilisation libre (*OpenSource*).

Tableau 5 – Structure des fichiers CSV de Taxi Diamond

Champ	Description
ID	Identifiant unique de point (9 chiffres)
Time	Horodatage du point
ObjectID	Identifiant unique de véhicule
Long	Longitude du point
Lat	Latitude du point
Status	État du véhicule (voir dictionnaire)
Speed	Vitesse ponctuelle en km/h
Course	Azimut/Orientation en degré (Nord = 0°)
Empl_ID	Identifiant unique d'employé
RideID	Identifiant unique de « ride »

Les données obtenues contiennent aussi des informations quant à l'activité des véhicules (RideID), ces dernières étant fournies dans un fichier CSV⁷ complémentaire. Bien que ces données ne soient pas utilisées dans les estimations actuelles, il a été jugé utile de les conserver. Elles sont stockées indépendamment des données GPS dans un schéma permettant de retracer les différentes activités des véhicules, avec notamment les informations sur le point de départ, le point d'arrivée, le véhicule en cause ainsi que la durée de l'activité du taxi en question. Les données GPS incluent un lien vers ces entrées, permettant ainsi d'extraire tous les points liés à une course de taxi et ainsi retracer les différents itinéraires d'un véhicule au besoin.

Ces données CSV sont importées dans une table POINTS(TD) qui présente la structure suivante (voir Tableau 6).

Tableau 6 – Structure de la table POINTS(TD) des données de Taxi Diamond

Champ	Description	Type⁸
azimuth	<i>Direction du véhicule (degré)</i>	<i>double</i>
batch_id	<i>Numéro de lot d'importation</i>	<i>integer</i>
created_at	<i>Horodatage de création du point</i>	<i>timestamp</i>
id	<i>Identifiant unique du point</i>	<i>integer</i>
internal_id	<i>Identifiant du point (interne à Taxi Diamond)</i>	<i>integer</i>
lat	<i>Latitude du point</i>	<i>double</i>
lon	<i>Longitude du point</i>	<i>double</i>
position	<i>Position en codification PostGIS</i>	<i>Geography (Point,4326)</i>
speed	<i>Vitesse instantanée du véhicule</i>	<i>double</i>
timestamp	<i>Horodatage du point</i>	<i>timestamp</i>
trip_id	<i>Lien vers la table « voyage » (si applicable)</i>	<i>integer</i>
updated_at	<i>Horodatage de mise à jour du point</i>	<i>timestamp</i>
vehicle_id	<i>Identifiant unique du véhicule</i>	<i>integer</i>

⁷ CSV = Comma Separated Values, fichier dont les champs d'information sont séparés par des virgules.

⁸ Les types de champs sont ceux du système de gestion de base de données PostGIS.

Des scripts ont été développés pour introduire les données brutes dans les différentes tables de données pour chaque source. Les données de Taxi Diamond sont introduites dans l'outil à partir de février 2014.

3.1.1.2 Données de Communauto

Les données de Communauto ont été obtenues périodiquement sur support physique, ce qui n'est pas idéal dans la vision que nous avons de l'outil. Les données disponibles ont été importées dans le système de données, mais ne sont pas disponibles en continu. La structure des fichiers bruts obtenus de Communauto est la suivante :

Tableau 7 – Structure des fichiers de Communauto

Champ	Description
vehicule_id	<i>Identifiant du véhicule</i>
dheure	<i>Horodatage du point (arrondi à la minute)</i>
Latitude	<i>Latitude de la position du véhicule</i>
Longitude	<i>Longitude de la position du véhicule</i>
Angle	<i>Direction, en degrés, du véhicule</i>
vitesse	<i>Vitesse instantanée du véhicule (km/h)</i>

Ces données sont importées dans une base de données POINTS(CO) qui présente la structure suivante (voir Tableau 8).

Tableau 8 – Structure de la table POINTS(CO) des données de Communauto

Champ	Description	Type
azimuth	<i>Direction du véhicule (degré)</i>	<i>double</i>
batches_communauto_id	<i>Numéro de lot d'importation</i>	<i>integer</i>
created_at	<i>Horodatage de création du point</i>	<i>timestamp</i>
id	<i>Identifiant unique du point</i>	<i>integer</i>
internal_id	<i>Identifiant du point (interne à Communauto)</i>	<i>integer</i>
lat	<i>Latitude du point</i>	<i>double</i>
lon	<i>Longitude du point</i>	<i>double</i>
position	<i>Position en codification PostGIS</i>	<i>Geography (Point,4326)</i>
speed	<i>Vitesse instantanée du véhicule</i>	<i>double</i>
timestamp	<i>Horodatage du point</i>	<i>timestamp</i>
trip_id	<i>Lien vers la table « voyage » (si applicable)</i>	<i>integer</i>
updated_at	<i>Horodatage de mise à jour du point</i>	<i>timestamp</i>
vehicle_id	<i>Identifiant unique du véhicule</i>	<i>integer</i>

À ce jour, le système contient des données de Communauto utilisables pour les mois de juin 2007 à juillet 2010.

3.1.1.3 Tables de données des conditions de circulation

Bien que le système s'appuie actuellement principalement sur les données de Taxi Diamond, il est important de mettre en place un schéma généralisé permettant d'incorporer d'autres ensembles de données similaires qui permettent de mesurer les conditions de circulation.

Le nombre élevé d'enregistrements quotidiens peut aussi engendrer des dégradations de performances informatiques, notamment dans le cadre de requêtes effectuées via une interface web, pour lesquelles des réponses sont attendues rapidement. Ceci incite à effectuer une segmentation des données en sous-tables mensuelles. La normalisation des données GPS dans une table « points », ainsi que la segmentation de cette table, font en sorte que les fichiers ne peuvent être insérés tels quels dans la base de données. Pour cette raison, une série de programmes pouvant procéder à l'insertion de façon automatisée quotidiennement sans besoin d'intervention humaine a été développée.

Par ailleurs, la construction d'un système d'information implique aussi l'enrichissement des données disponibles par diverses structures de contrôle permettant de faire une administration efficace du stockage de l'information. Ces structures passent notamment par la création d'une table « batch » afin de pouvoir effectuer un suivi des lots créés par l'insertion des données, ainsi que de réparer, au besoin, des anomalies spécifiques à un ou des fichiers qui pourraient être identifiées a posteriori dans un fichier source. La décomposition des données en objets divers permet aussi de faire des liens vers les différents éléments qui composent un enregistrement GPS, notamment le déplacement effectué (« trip ») ou le véhicule lui-même. Le Tableau 9 fait état des champs contenus dans la table de base de données « points ». Ici, seules des vitesses instantanées sont stockées, car elles sont relatives à une seule observation d'un seul véhicule. Cette structure ne peut pas accueillir de données relatives à des vitesses moyennes spatiales sur des intervalles de temps. Pour traiter d'autres types de données (des données de vitesse moyenne par exemple), il faut créer une autre table et l'insérer dans la structure de la base de données.

Tableau 9 – Structure de la table POINTS

Champ	Description	Type
id	<i>Identifiant unique</i>	<i>integer</i>
internal_id	<i>Identifiant unique fourni</i>	<i>integer</i>
timestamp	<i>Horodatage du point</i>	<i>timestamp</i>
latitude	<i>Latitude du point</i>	<i>double</i>
longitude	<i>Longitude du point</i>	<i>double</i>
position	<i>Position en codification PostGIS</i>	<i>Geography (Point,4326)</i>
speed	<i>Vitesse instantanée du véhicule</i>	<i>double</i>
azimuth	<i>Direction du véhicule (degré)</i>	<i>double</i>
trip_id	<i>Lien vers la table « voyage » (si applicable)</i>	<i>integer</i>
batch_id	<i>Lien vers la table « lot »</i>	<i>integer</i>
vehicle_id	<i>Identifiant unique du véhicule</i>	<i>integer</i>

3.1.2 Données de référence

Les principales données de référence à intégrer au système d'information ont trait à la codification du réseau routier sur lequel se basent les analyses. Les différents liens routiers sont formulés sous

la forme d'objets géographiques dans PostGIS. Cette codification intègre les caractéristiques des différents liens routiers, telles la vitesse permise, la capacité du lien ainsi que sa géométrie simplifiée. Afin de procéder aux différentes modélisations, il importe aussi de procéder à un découpage du réseau en question en différentes sous-sections. La Figure 3 illustre le schéma relationnel des données de référence.

Le projet incluant la production d'analyses sur de longues périodes, il est aussi nécessaire de maintenir la possibilité d'effectuer des modifications au réseau routier stocké. Pour atteindre cet objectif, un système différentiel, incluant des périodes de validité pour chacun des liens ou des modifications qui y sont apportées, doit être développé. La structure de la base de données permettant d'enregistrer les objets du réseau est présentée dans la Figure 3.

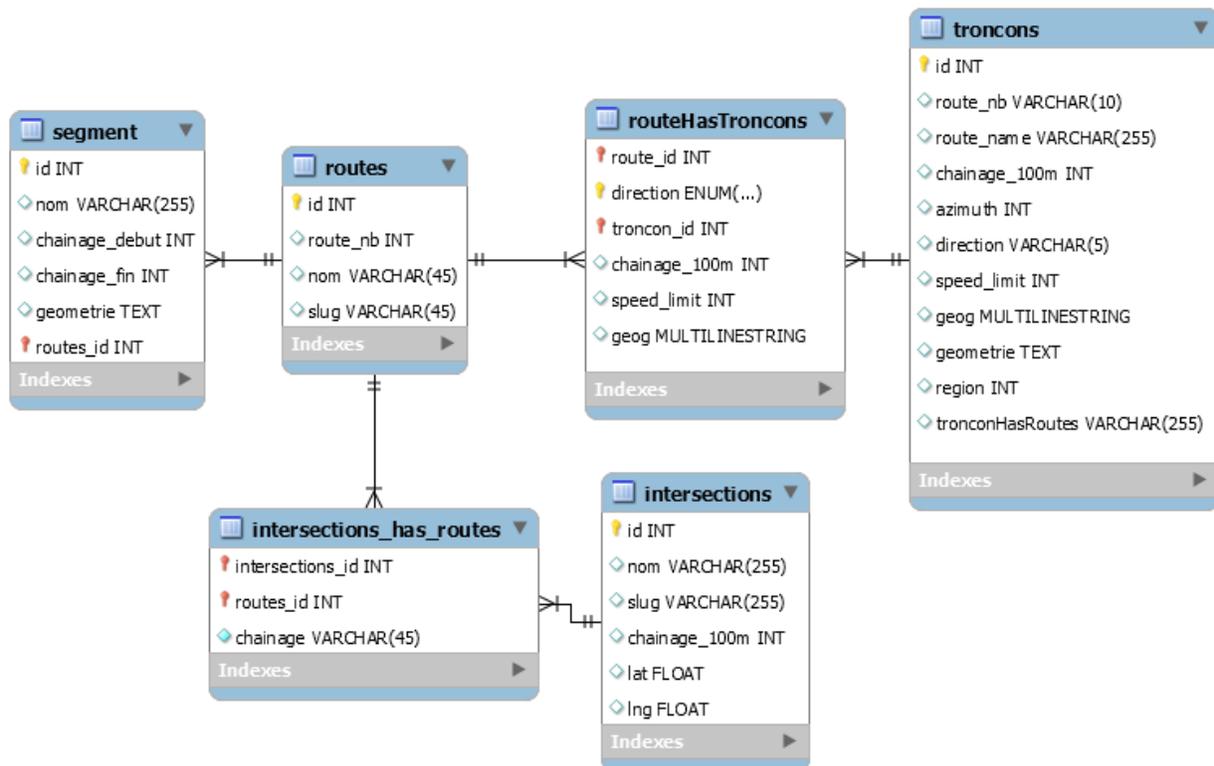


Figure 3 – Schéma relationnel des données de référence⁹

La table des tronçons (Tableau 10) sert à faire l'association spatiale entre les points GPS et le réseau routier. Il s'agit à l'origine de la BGR du territoire de l'enquête O-D 2013 qui a été modifiée et divisée en tronçons de 100 mètres.

⁹ Modèle physique, relations 1 à plusieurs. Les clés sont indiquées.

Tableau 10 – Structure de la table TRONCONS

Champ	Description	Type
id	<i>Identifiant unique du tronçon</i>	<i>integer</i>
route_nb	<i>Numéro de la route</i>	<i>varchar(10)</i>
route_name	<i>Nom textuel de la route</i>	<i>varchar(71)</i>
chainage_100m	<i>Numéro du chaînage, correspond au nombre de mètres arrondi à la centaine près depuis le début de la route</i>	<i>integer</i>
Azimuth	<i>Direction moyenne du tronçon (en degrés)</i>	<i>numeric(10,0)</i>
direction	<i>Direction du tronçon (Est, Ouest, Nord, Sud)</i>	<i>varchar(5)</i>
geog	<i>Géographie du tronçon</i>	<i>geography(MultiLineString,4326)</i>
speed_limit	<i>Limite de vitesse affichée, en km/h</i>	<i>numeric(10,0)</i>
Begin_date	<i>Date de début de validité du tronçon</i>	<i>Date</i>
End_date	<i>Date de fin de validité du tronçon</i>	<i>Date</i>

Par la suite, une table de tronçons de routes, nommée routeHasTroncons a été créé afin de pouvoir sélectionner les routes de manière individuelle dans l'interface. Par exemple, les tronçons de 100 mètres sur le pont Champlain sont seulement présents une fois dans la table du réseau (avec la valeur « 10+15+20 » comme numéro de route), afin que les points soient assignés à seulement un tronçon physique). Dans la table routes, les tronçons du pont Champlain sont présents à 3 reprises (pour les routes 10, 15 et 20).

Tableau 11 – Structure de la table ROUTEHASTRONCONS

Champ	Description	Type
Route_id	<i>Identifiant unique</i>	<i>double</i>
direction	<i>Direction (Nord, Sud, Est ou Ouest)</i>	<i>varchar(10)</i>
troncon_id	<i>Identifiant du tronçon</i>	<i>integer</i>
chainage_100m	<i>Numéro du chaînage, correspond au nombre de mètres arrondi à la centaine près depuis le début de la route</i>	<i>integer</i>
speed_limit	<i>Limite de vitesse, en km/h</i>	<i>integer</i>
geog	<i>Géographie</i>	<i>geography(MultiLineString, 4326)</i>

La table de routes sert à lister l'ensemble des routes qui sont présentes dans l'interface web. Chaque enregistrement correspond à une route distincte.

Tableau 12 – Structure de la table ROUTES

Champ	Description	Type
id	<i>Identifiant unique de la route</i>	<i>integer</i>
route_nb	<i>Numéro de la route</i>	<i>integer</i>
nom	<i>Nom de la route</i>	<i>varchar(45)</i>
slug	<i>Nom raccourci de la route</i>	<i>varchar(45)</i>

Une table d'intersections a été créée afin d'identifier les nœuds importants du réseau. Cette table contient, pour l'instant, les approches des ponts ainsi que les intersections entre les autoroutes et routes principales, c'est-à-dire toutes les routes numérotées du MTMDET dont le numéro n'est pas entre 200 et 399.

Tableau 13 – Structure de la table INTERSECTIONS

Champ	Description	Type
id	<i>Identifiant unique de l'intersection</i>	<i>integer</i>
nom	<i>Nom de l'intersection</i>	<i>varchar(45)</i>
slug	<i>Nom raccourci de l'intersection</i>	<i>varchar(45)</i>
chainage_100m	<i>Numéro du chaînage, correspond au nombre de mètres arrondi à la centaine près depuis le début de la route</i>	<i>integer</i>
lat	<i>Latitude de l'intersection</i>	<i>double</i>
lon	<i>Longitude de l'intersection</i>	<i>double</i>

Finalement, des segments ont été créés afin de pouvoir sélectionner une partie d'une route.

Tableau 14 – Structure de la table SEGMENTS

Champ	Description	Type
id	<i>Identifiant unique du segment</i>	<i>integer</i>
nom	<i>Nom de la route</i>	<i>varchar(45)</i>
chainage_debut	<i>Chaînage du début du segment</i>	<i>integer</i>
chainage_fin	<i>Chaînage de fin du segment</i>	<i>integer</i>
geometrie	<i>Géométrie du segment (sous forme de séquence de points)</i>	<i>text</i>
routes_id	<i>Route à laquelle le segment appartient</i>	<i>integer</i>

3.1.3 Variables explicatives

Les variables explicatives rassemblent différentes informations complémentaires et ponctuelles comme des comptages de véhicules sur les liens routiers, des données météo, le signalement de travaux affectant la capacité routière ou encore celui des incidents sur le réseau. Les informations de comptage ainsi que les données météo présentent une compatibilité assez forte puisqu'elles sont toutes deux généralement accumulées par des stations permanentes facilement localisables et couvrent des périodes de mesure prédéterminées et constantes. À cet effet, elles peuvent être facilement représentées par des éléments simples en vue de leur utilisation (stations, paramètres mesurés, mesures). Il est à noter qu'il peut parfois être nécessaire de procéder à des agrégations temporelles et spatiales dans le cas des comptages, ceux-ci présentant parfois des niveaux de résolution variables, notamment pour la période du comptage ou sur la géométrie (comptage par voie ou par direction).

Les signalements de travaux et incidents présentent quant à eux des variations spatiales importantes, leurs localisations se présentant de façon ponctuelle (bien que leur impact soit plus diffus) et aléatoire. Les intervalles de validité temporelle sont aussi extrêmement variables allant

de quelques heures à plusieurs semaines ou mois dans le cas des travaux. Bien que certains échantillons de données nous aient été transmis, nous ne pouvons pas être certains de la pérennité de leur format et avons décidé de ne pas les inclure dans le prototypage de l'outil.

Néanmoins, à l'image des périodes de validité à introduire afin de reconstituer le réseau, il sera important d'introduire une information quant à la durée ou la période de validité d'un événement ou d'une intervention sur le réseau lors de leur inclusion.

3.1.3.1 *Conditions météorologiques*

Actuellement, ce sont les données météorologiques d'Environnement Canada qui ont été insérées dans le système d'information en raison de leur structure et disponibilité aisées. Le tableau qui suit présente la structure de la table de données associée.

Tableau 15 – Structure de la table de données météorologiques

Champ	Description	Type
id	<i>Identifiant unique</i>	<i>integer</i>
station_id	<i>Identifiant de la station d'environnement Canada</i>	<i>integer</i>
Horodatage_public	<i>Horodatage de publication de la page web sur le site internet d'environnement Canada</i>	<i>timestamp</i>
Horodatage_requete	<i>Horodatage de requête de la page web sur le site internet d'environnement Canada</i>	<i>timestamp</i>
Condition	<i>Conditions qualitatives (nuageux, ensoleillé, etc.)</i>	<i>varchar(255)</i>
Temperature	<i>Température, en degrés Celsius</i>	<i>double</i>
Pression	<i>Pression atmosphérique, en kPa</i>	<i>double</i>
Visibilite	<i>Visibilité, en km</i>	<i>double</i>
Humidite	<i>Taux d'humidité, en pourcentage</i>	<i>double</i>
Vent_vitesse	<i>Vitesse du vent, en km/h</i>	<i>double</i>
Vent_vitesse_rafale	<i>Vitesse des</i>	<i>double</i>
Vent_direction	<i>Direction du vent, en degrés</i>	<i>varchar(255)</i>
created_at	<i>Horodatage de création de l'enregistrement</i>	<i>timestamp</i>
updated_at	<i>Horodatage de mise à jour de l'enregistrement</i>	<i>timestamp</i>

3.1.3.2 *Dictionnaire des jours ouvrables*

Pour plusieurs analyses, il peut être essentiel de tenir compte du fait qu'un jour soit ouvrable ou non. Une table contenant un dictionnaire des jours ouvrables a donc été ajoutée au système de données. Pour chaque date, il est indiqué si celle-ci correspond à un jour ouvrable et si la date correspond à un jour de fin de semaine. Les jours fériés s'appliquant au Québec sont extraits à l'aide du module Holidays (version 0.4.1) de Python. Pour plus d'information sur le module Holidays : <https://pypi.python.org/pypi/holidays>.

Tableau 16 – Structure de la table des jours ouvrables

Champ	Description	Type
id	<i>Identifiant unique</i>	<i>integer</i>
date	<i>Date</i>	<i>date</i>
year	<i>Année correspondant à la date</i>	<i>integer</i>
month	<i>Mois correspondant à la date (1 à 12)</i>	<i>integer</i>
week	<i>Semaine ISO correspondant à la date (1 à 52)</i>	
dow	<i>Jour de la semaine ISO correspondant à la date (0-6, dimanche correspond à 0)</i>	<i>integer</i>
week_end	<i>1 si la date correspond à un jour de fin de semaine, 0 sinon</i>	<i>integer</i>
business_day	<i>1 si la date correspond à un jour ouvrable, 0 sinon</i>	<i>integer</i>

3.1.4 Tables pour fins d'estimation

Ces différents ensembles de données sont combinés à l'aide de procédures automatisées afin de développer les tables qui soutiennent les estimations d'indicateurs. Deux tables sont construites : une table de points assignés et une table de segments-heures. Il est important de mentionner que les concepts à la base de l'outil seront plus strictement définis dans le chapitre de conceptualisation. À ce stade-ci, il est important de mentionner que l'équipe a choisi de segmenter le réseau routier en segments de 100 mètres et que la structure de stockage des données sur les conditions de circulation s'appuie sur ce choix méthodologique.

3.1.4.1 Points assignés

Les points assignés correspondent aux données brutes qui ont été affectées aux tronçons du réseau à l'étude dans le projet.

Tableau 17 – Structure de la table des points assignés

Champ	Description	Type
batch_id	<i>Identifiant unique</i>	<i>integer</i>
created_at	<i>Horodatage de création du point assigné</i>	<i>timestamp</i>
id	<i>Identifiant unique du point assigné</i>	<i>integer</i>
point_id	<i>Identifiant unique du point</i>	<i>integer</i>
region	<i>Région de l'enquête OD 2008 sur laquelle se trouve le tronçon assigné au point</i>	<i>integer</i>
route_id	<i>Identifiant de la route</i>	<i>integer</i>
route_name	<i>Nom de la route</i>	<i>varchar(255)</i>
route_nb	<i>Numéro de la route</i>	<i>varchar(255)</i>
chain_100	<i>Chaînage du tronçon</i>	<i>varchar(255)</i>
direction	<i>Direction de la route (Nord, Sud, Est, Ouest)</i>	<i>varchar(255)</i>
speed	<i>Vitesse instantanée du point assigné</i>	<i>integer</i>
speed_limit	<i>Limite de vitesse du tronçon (km/h)</i>	<i>integer</i>
timestamp	<i>Horodatage correspondant point assigné</i>	<i>timestamp</i>
updated_at	<i>Horodatage de mise à jour du point assigné</i>	<i>timestamp</i>

3.1.4.2 Tronçons-heures

La table des tronçons-heures correspond à la consolidation des données sur les conditions de circulation et l'unité spatiale de base que constitue le tronçon de 100 mètres.

Tableau 18 – Structure de la table de tronçons-heures

Champ	Description	Type
batches_id	<i>Numéro de lot d'importation</i>	text[]
created_at	<i>Horodatage de création du tronçon-heure</i>	timestamp
first_quartile	<i>Premier quartile de la</i>	double
id	<i>Identifiant unique</i>	integer
median	<i>Médiane des vitesses instantanées</i>	double
reading_nb		integer
route_id	<i>Numéro de la route</i>	integer
route_name	<i>Nom de la route</i>	varchar(255)
speed_avg	<i>Moyenne des vitesses instantanées</i>	double
speed_std	<i>Écart-type des vitesses instantanées</i>	double
third_quartile	<i>Troisième quartile des vitesses instantanées</i>	double
timestamp	<i>Horodatage correspondant au tronçon-heure</i>	timestamp
updated_at	<i>Horodatage de mise à jour du tronçon-heure</i>	timestamp

3.1.5 Synthèse des données explorées et retenues

Tout au long du projet, plusieurs discussions se sont tenues autour de l'accès aux données. Cette tâche dont la durée avait initialement été projetée à une année a finalement perduré pendant la totalité du projet. Une synthèse des différentes données discutées a été préparée en cours de projet. Le tableau ci-dessous présente le statut des données et attributs disponibles actuellement.

Tableau 19 – Définition des symboles de statut des données

Code	Définition du statut des données
	Aucun accès, en attente de nouvelles de la requête
	Accès partiel ou incomplet, à compléter
	Accès complet et intégré dans la base de données
	Recherches en cours
	Aucune recherche en ce moment

Tableau 20 – Statut des données de base et attributs disponibles pour le projet

Données de BASE		
Code	Description des données et attributs	Commentaires sur le statut
	« Réseau MTMDET pour la région de Montréal » tiré des sous-routes classifiées de la BGR du MTMDET	Intégré à l'outil au niveau des autoroutes (limites de vitesse codifiées)
	Système GLV (Gestion des limites de vitesse) du MTMDET	Extraction reçue, mais méthodologie de jointure au réseau à définir
	Nombre, type et largeur des voies	« Segment de voie » partiel et non lié au réseau
	Signalisation sur le réseau	Données non disponibles
	Fichier Maître Réseau (FMR) du MTMDET	En attente de la requête
	Utilisation du sol (fond de carte)	Plusieurs options considérées, dont la carte d'utilisation du sol de la CMM (2014)

Tableau 21 – Statut des données explicatives et attributs considérés pour le projet

Données EXPLICATIVES		
Code	Description des données et attributs	Commentaires sur le statut
	Données météo :	
	<ul style="list-style-type: none"> • Système météoroutier (SMR) du Ministère 	Échantillon reçu de février à décembre 2014, en attente d'un processus en continu (le SMR génère des fichiers XML pour l'échange de données)
	<ul style="list-style-type: none"> • Système sur l'état des routes (ERT) 	Échantillon reçu, mais non intégré, en attente d'un processus en continu
	<ul style="list-style-type: none"> • Environnement Canada 	Intégré en continu au système de données
	<ul style="list-style-type: none"> • Produits météo du MDDELCC¹⁰ 	Non considérées pour le moment
	<ul style="list-style-type: none"> • Application « Réseau voyageur » 	Non considérées pour le moment
	Travaux sur le réseau :	
	<ul style="list-style-type: none"> • Système SGE-Intervention 	Échantillon reçu : à valider et méthodologie d'intégration à définir
	<ul style="list-style-type: none"> • Travaux routiers (Système TRR du MTMDET) 	Extraction PDF, aucune requête pour le moment
	<ul style="list-style-type: none"> • Info-Travaux de la Ville de Montréal 	En ligne, aucune requête pour le moment
	Incidents sur le réseau du système SAGE (Système d'aide à la gestion des événements) du MTMDET	Géolocalisation des enregistrements débutée, mais documentation détaillée de la standardisation et de la classification des événements requise
	Base de données d'événements spéciaux	Méthodologie de création à l'étude
	Caméras sur le réseau	En ligne, aucune requête pour le moment
	Panneaux à message variables	Données souvent indisponibles sauf la localisation
	Routes de déneigement sur le réseau	Aucun système trouvé pour le moment
	Données de la Direction des Communications du MTMDET :	
	<ul style="list-style-type: none"> • Québec 511 	En ligne, en attente des requêtes
	<ul style="list-style-type: none"> • Twitter 	En ligne, aucune requête pour le moment
	<ul style="list-style-type: none"> • Radio-Circulation 730 (appels en studio) 	En ondes, aucune requête pour le moment

¹⁰ Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques : site web du Service Info-Climat : <http://www.mddelec.gc.ca/climat/surveillance/produits.htm>

Tableau 22 – Statut des données de mesure et attributs disponibles et en développement pour le projet

Données de MESURE		
Code	Description des données et attributs	Commentaires sur le statut
	Données GPS :	
	<ul style="list-style-type: none"> Flottes de taxis de Taxi Diamond 	Données disponibles, mais plusieurs questions et hypothèses à confirmer
	<ul style="list-style-type: none"> Flottes de taxi d'autres intermédiaires en service 	Collaborations en cours (Fraxion)
	<ul style="list-style-type: none"> Flotte de véhicules Communauto 	Données historiques (2007-2010) intégrées, mais Communauto n'a pas renouvelé d'entente de confidentialité pour les données récentes
	<ul style="list-style-type: none"> Autobus de la STM, STL et RTL 	Non considérées pour le moment
	<ul style="list-style-type: none"> Compagnies d'assurance 	Aucune démarche pour le moment
	<ul style="list-style-type: none"> Camions 	Collaborations en cours
	Capteurs Bluetooth de la Ville de Montréal	Hors du projet
	Données cellulaires	Recherches arrêtées : Option mise de côté
	Débits sur le réseau : Shapefiles « Section de trafic » tirés du système CIR du MTMDET	Données disponibles, mais questions au niveau de la procédure de calcul des DJMA et besoins d'un échantillon plus fin pour les analyses
	Données de fournisseurs tels que Google Trafic, Bing et HERE	Démarches en cours par la DPIM du MTMDET
	Mesures de vitesses à partir des équipements SDV du Ministère	Travaux en cours DIPM pour colliger et intégrer en continu les données brutes dans une base de données unifiées, à partir de trois familles de technologies (double-boucles, radar Wavetronix et magnétomètres Sensys).

4 Développement des indicateurs de congestion

Afin de développer des indicateurs de la congestion routière et de mettre en valeur les données disponibles, des études de cas ont été réalisées, soit l'étude de l'évolution des conditions de circulation sur l'autoroute 40 à Montréal ainsi que la mesure des impacts de l'ouverture de l'autoroute 30 sur ces conditions. L'autoroute 40 est un corridor majeur à Montréal qui subit régulièrement une importante congestion et a déjà été étudié dans le passé (Loustau et al. 2009). L'autoroute 30 sur la Rive-Sud de Montréal a été prolongée vers l'ouest dans le but de « doter la région métropolitaine d'une voie de contournement par le sud » et de « contribuer à décongestionner le réseau autoroutier de la métropole » (Transport Québec, 2013). Ainsi, il est intéressant de vérifier si la congestion a diminué suite au parachèvement qui a été complété le 15 décembre 2012.

Le corridor de l'autoroute 40 en entier est intéressant comme objet d'étude, car il permet d'avoir une vision globale de la variabilité des conditions de circulation. L'outil doit aussi considérer des objets plus précis comme une paire origine-destination (dérivée des courses de taxi) ou une séquence de tronçons. Aux fins de l'étude de cas, la section « entre les deux 15 » en direction ouest, soit de l'autoroute 15 nord (Des Laurentides) à l'autoroute 15 Sud (Décarie), a été sélectionnée (cette séquence de tronçons correspond à un sous-corridor, tel que défini à la section 6 du rapport). Ce sous-corridor de l'autoroute 40 constitue un segment de près de 3 km faisant partie d'un itinéraire régulièrement utilisé par les automobilistes qui traversent l'île vers le sud en utilisant l'autoroute 15. Ce segment correspond également au point de charge maximale de l'A-40.

Cette section décrit les indicateurs utilisés pour l'étude de cas et présente des exemples de résultats pour répondre à chacun des quatre objectifs spécifiques de l'outil. La Figure 2 montre la carte de l'étude de cas. La ligne pointillée identifie le sous-corridor d'intérêt : « entre les deux 15 ». Les visualisations présentées dans cette section ne seront pas nécessairement incluses dans l'outil et si elles le sont, leur formatage pourra changer à la lumière des commentaires reçus.

4.1 Indicateurs pour l'aide à la calibration des modèles régionaux

Le but ici est de produire une distribution des temps de parcours pour une sélection spatio-temporelle déterminée. La Figure 5 montre les temps de parcours moyen sur les tronçons « entre les deux 15 » en direction ouest selon la période de la journée. Le graphique pourrait aussi montrer les vitesses. Les données utilisées pour cette étude de cas vont de janvier 2012 à septembre 2013.

On peut observer que le temps de parcours entre 18h et 6h est assez stable, soit environ 5 secondes par tronçon de 100 m pour un temps de parcours total d'environ 150 s ou 2 min 30 s de l'échangeur des Laurentides à l'échangeur Décarie. Sachant que la distance est de 3 km, on retrouve une vitesse d'environ 70 km/h pour cette période de la journée, soit la limite de vitesse de cette portion de l'autoroute 40. De 6h à 18h, le temps de parcours moyen fluctue sensiblement sur la distance : il atteint un plateau de 12s/100m avant d'atteindre un pic au tronçon 288, puis il diminue à l'approche de Décarie. Cela représente un temps de parcours total d'environ 320 s ou 5 min 20 s entre les deux 15, donc plus du double que pendant la nuit.



Figure 4 – Carte de l'étude de cas (ligne pointillée : tronçon d'intérêt)

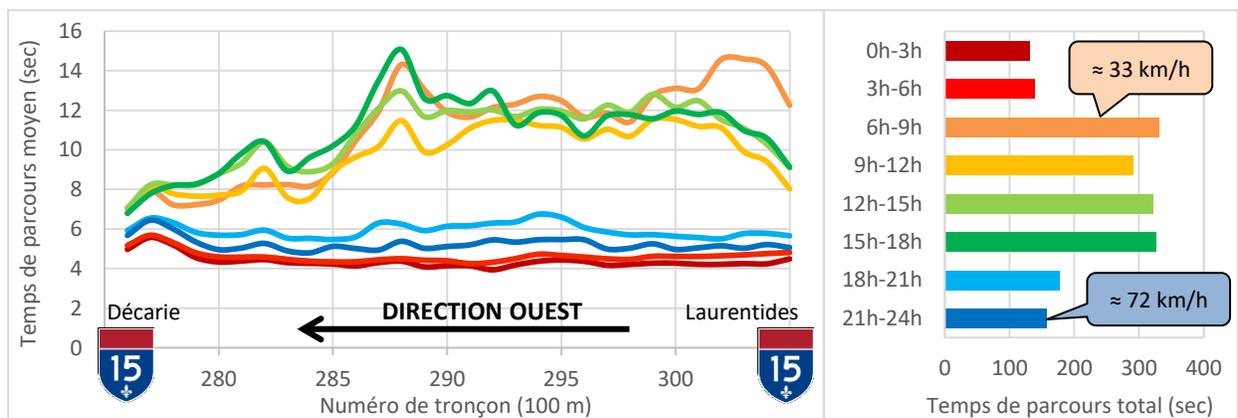


Figure 5 – Temps de parcours moyen sur l'autoroute 40 « entre les deux 15 » selon le période de la journée

4.2 Indicateurs pour les analyses avant-après

Un des objectifs du prolongement de l'autoroute 30 était de réduire la congestion sur le réseau autoroutier de Montréal. L'idée ici est de vérifier si ce but est atteint. La Figure 6 fait le suivi de la vitesse moyenne hebdomadaire à l'approche et sur le pont de l'Île-aux-Tourtes en direction ouest

avant et après l'ouverture de l'autoroute 30 (ligne rouge). Étant situé à l'extrémité ouest de l'île de Montréal, juste avant la jonction entre l'autoroute 40, ce pont¹¹ est un excellent endroit pour mesurer la variation des conditions de circulation avant-après l'intervention sur le réseau. La résolution hebdomadaire a été choisie pour pallier le faible nombre d'observations en semaine en période de pointe AM (6h-9h) et PM (15-18h) à cet endroit.

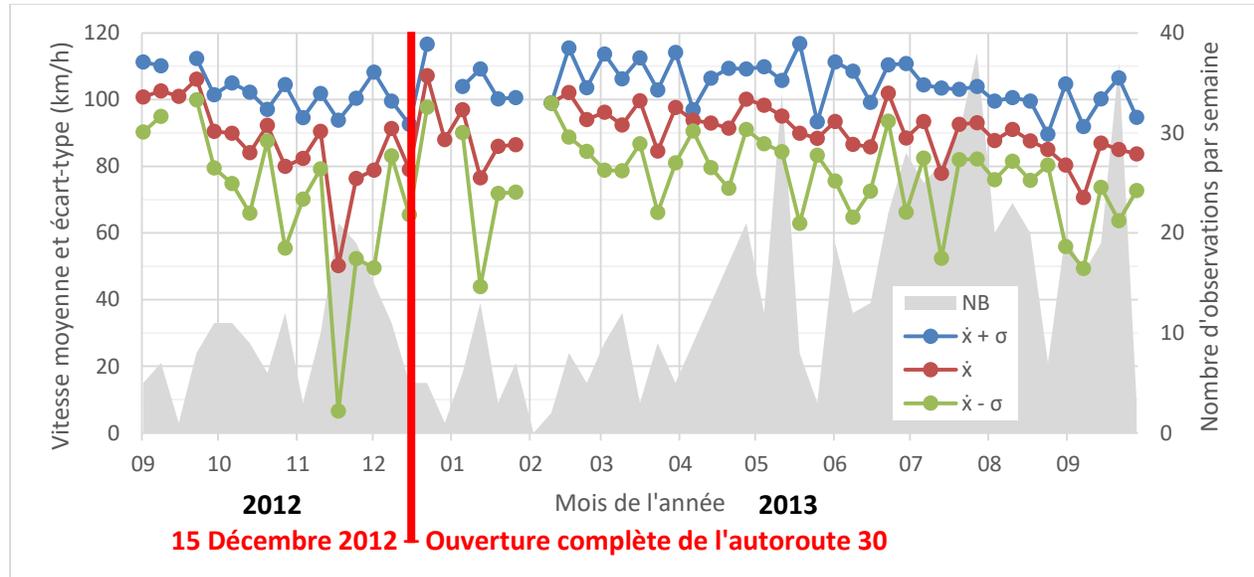


Figure 6 – Vitesse moyenne hebdomadaire, plus ou moins un écart-type, sur le pont de l'Île-aux-Tourtes en direction ouest en semaine en période de pointe AM et PM

Les données sur une année (septembre 2012 à septembre 2013) montrent que les vitesses hebdomadaires varient considérablement. L'écart-type montre bien la grande variation des vitesses moyennes durant la semaine. Il est possible que certaines variations soient dues à des événements ou incidents à cet endroit. Néanmoins, ce graphique ne permet pas de détecter un impact de l'ouverture de l'A-30 sur les conditions de circulation dans le sous-corridor de l'Île-aux-Tourtes. Par contre, avec une seule année de données, il est difficile de se prononcer sur les impacts à long terme de l'ouverture de l'autoroute 30. Il faudrait reculer davantage dans le temps pour observer plusieurs mois similaires (d'années précédentes) et disposer aussi de plus de données sur les mois suivants l'ouverture, notamment les mêmes mois d'observation sachant que la circulation est sujette à différents effets saisonniers et cycliques.

4.3 Indicateurs pour la modélisation des conditions de circulation

Un élément du troisième objectif est le besoin de décrire les conditions de circulation au niveau microscopique. La Figure 7 est une grille spatiotemporelle du Ratio des limites de vitesse (RLV) sur toute la longueur de l'autoroute 40 avec une résolution de 15 minutes \times 100 mètres. Les tronçons routiers de 100 m sont sur l'axe horizontal dans chaque direction avec les points d'intersection des autres autoroutes. L'axe vertical correspond aux heures de la journée qui progressent vers le bas, dans chacune des directions. Il est important de noter que la limite de vitesse change à deux endroits sur le réseau routier : 70 km/h entre l'autoroute 15 Sud (Décarie)

¹¹ L'analyse a été faite sur les trois kilomètres entre le milieu du pont et l'échangeur du boulevard des Anciens Combattants, donc elle inclut aussi les accès.

et l'autoroute 25 (vers le tunnel Louis-H. La Fontaine); 100 km/h pour le reste de l'autoroute. Cela influence évidemment l'indicateur. Voici la légende de couleur pour les trois états de l'indicateur :

- | | |
|--|--|
| 1) $RLV_{t,p} \leq 60\%$ ¹² | En congestion (rouge) |
| 2) $60\% < RLV_{t,p} < 100\%$ | Circulation intermédiaire (gradation de couleurs linéaire) |
| 3) $100\% \leq RLV_{t,p}$ | Fluide (vert) |

La couleur blanche signifie « aucune donnée disponible ».

Ainsi, la Figure 7 nous montre plusieurs phénomènes de la congestion. Tout d'abord, on peut observer que la congestion commence tôt, assez uniformément vers 5h30, particulièrement à l'est de l'échangeur Décarie en direction ouest (ligne pointillée). Une zone triangulaire rouge à l'approche de l'autoroute 13 (Chomedey) en direction ouest montre une zone de congestion récurrente à cet endroit durant la pointe PM (ellipse pointillée). D'ailleurs, les données montrent que la congestion est uniquement présente en après-midi à cet endroit. Enfin, cette visualisation permet de caractériser les patrons de l'heure de pointe sur la longueur de l'A40. On peut observer que son étendue varie dans le temps et l'espace, mais on reconnaît que les périodes de pointe vont grosso modo de 6h30 à 10h00 en AM et de 14h30 à 18h30 en PM en direction est. L'échelle microscopique des segments permet de localiser les entrées et sorties où les embouteillages sont les plus importants.

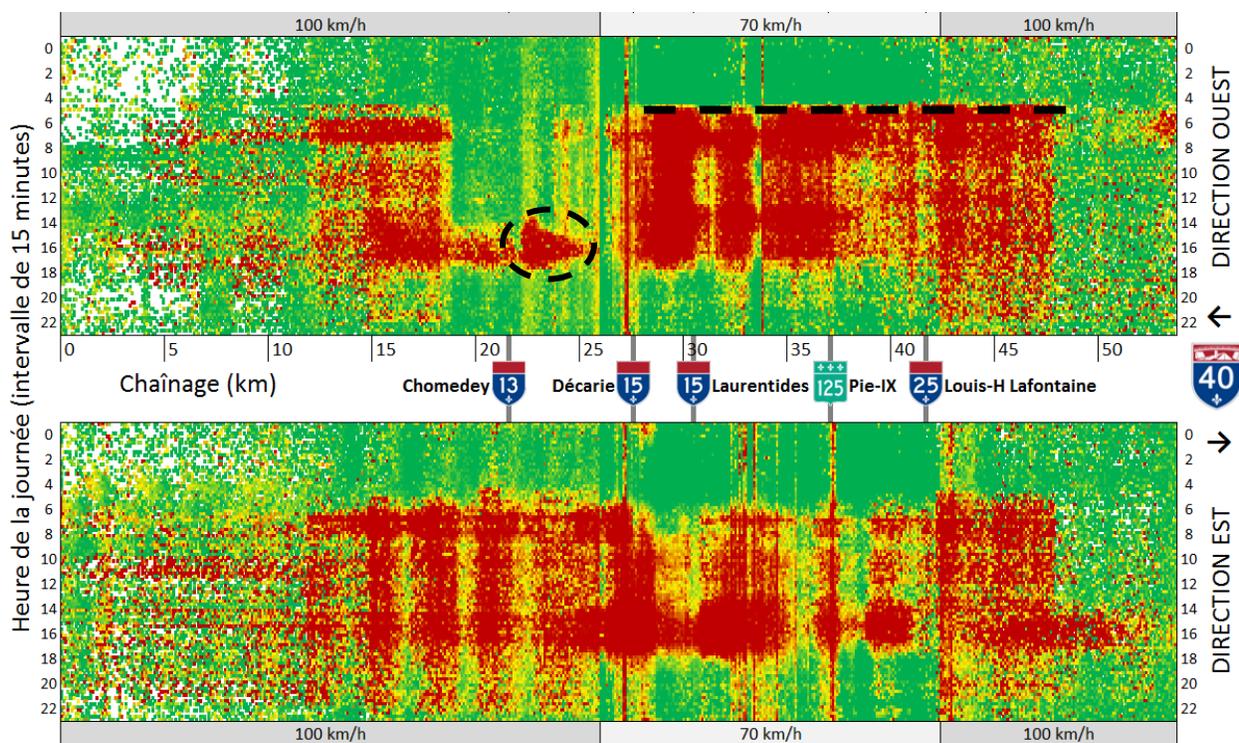


Figure 7 – Grille spatiotemporelle du ratio des vitesses historiques sur l'autoroute 40

Il est ensuite logique de faire une analyse de corrélation entre les indicateurs de congestion et d'autres données explicatives, comme les conditions météorologiques, les incidents ou les travaux sur le réseau. Un exemple d'analyse avec les données météo est présenté dans la section 5. Les

¹² L'utilisation du seuil de 60% de la vitesse affichée est conforme au choix du ministère de fixer le seuil de congestion à 60% de la vitesse à écoulement libre, soit 60 km/h pour une autoroute avec une limite de vitesse de 100 km/h.

enjeux sont aussi l'accessibilité et les besoins de prétraitement des données pour fusionner (dans le temps et l'espace) les ensembles de données et permettre les croisements et les corrélations. Une base de données d'événements spéciaux devrait aussi être développée pour témoigner des congés, spectacles, calendriers scolaires et tout autre événement explicatif et qualitatif de la congestion. Spécialement à Montréal, les parties de hockey ont un effet direct sur la congestion, tel que confirmé par les animateurs de Radio-Circulation 730AM lors d'une visite à leur studio. En effet, il est utile de mentionner que l'équipe du projet de recherche a effectué une visite à Radio-Circulation 730AM afin de comprendre comment l'information sur la congestion circule et comment cette information pourrait devenir utile pour le projet.

4.4 Indicateurs pour l'évaluation stratégique

Le dernier objectif vise à fournir aux décideurs de transport un rapport périodique sur le bilan *de santé* du réseau. L'idée est d'obtenir des indicateurs simples pour avoir un aperçu global du niveau de congestion. Un rapide coup d'œil à la Figure 8 permet de voir le 15^e centile des tronçons les plus critiques (plus faible ratio vitesse moyenne sur limite de vitesse) selon la période de pointe (en rouge) pour le corridor de l'A-40. Comme on pouvait le constater à la Figure 7, la congestion AM est principalement en direction ouest, tandis que la congestion PM est plutôt en direction est. En considérant le seuil de congestion à 60% de la vitesse affichée, il est possible de noter que 65% de la longueur de l'autoroute 40 est en congestion en période de pointe (69% en pointe AM et 61% en pointe PM).

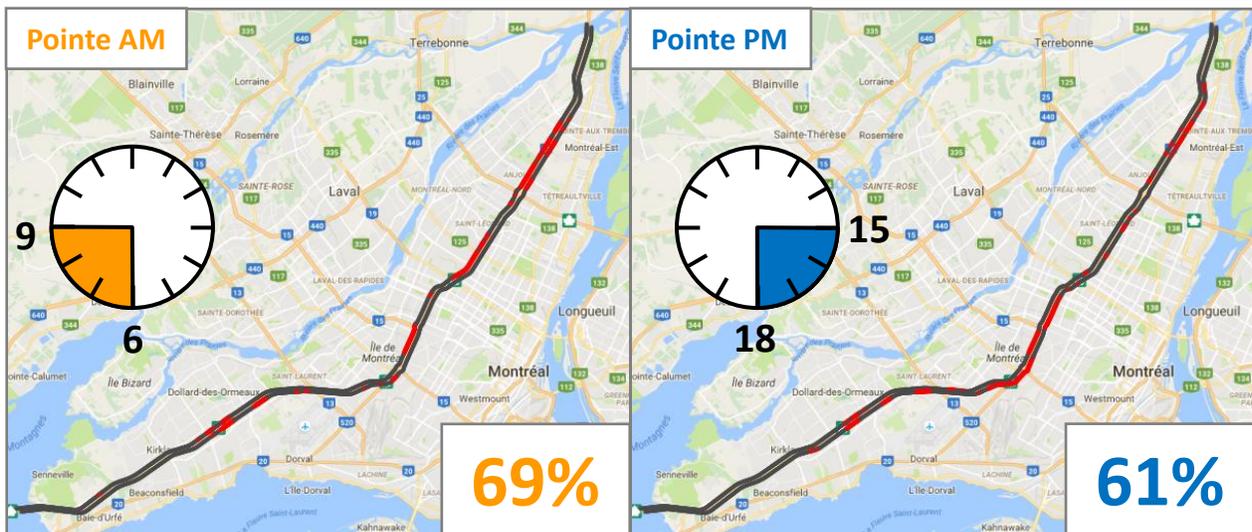


Figure 8 – Tronçons de 100 m les plus critiques (15^e rang centile) et % des tronçons en congestion selon la période de pointe, autoroute 40

Le vrai défi pour cet objectif est de développer un indicateur global pertinent pour le réseau ou certains corridors. Il y a plusieurs possibilités en utilisant une fonction linéaire à plusieurs variables, mais l'indicateur doit être sensible, c'est-à-dire réactif aux variations des conditions de circulation, sans être trop variable. Les choix des seuils deviennent alors très importants.

5 Modélisation des conditions de circulation

Ce chapitre résume les travaux de modélisation qui ont été conduits en vue d'évaluer les impacts des conditions météorologiques sur les conditions de circulation. Ces travaux sont décrits dans le mémoire de Tessier (2015) et les principaux résultats sont repris ici. L'objectif est d'illustrer les potentialités de modélisation des conditions de circulation à l'aide de modèles explicatifs qui pourraient faire appel à d'autres variables pertinentes.

5.1 Contexte

5.1.1 Estimation de modèle dans un outil automatisé

Un objectif connexe à l'analyse de l'impact des conditions météorologiques est de développer une méthodologie d'analyse croisée des données à l'aide de modèles explicatifs. Le schéma de la Figure 9 expose les différentes composantes du module d'analyse. D'un côté, le module d'analyse croisée de l'outil d'analyse de la congestion effectue une sélection des données à modéliser, puis une sélection d'un modèle à évaluer au sein de modèles préformulés. La requête de données est d'abord envoyée au serveur PostgreSQL qui organise une base de données de modélisation, qu'il fournit par la suite au logiciel libre d'analyse statistique R. R va ensuite générer le modèle sélectionné avec la base de données de modélisation reçue et produire les statistiques classiques (coefficients, erreur, z value, $\Pr(>|z|)$, OR) décrivant le modèle. Ces résultats statistiques sont finalement retournés à l'utilisateur qui peut ensuite générer d'autres modèles au besoin.

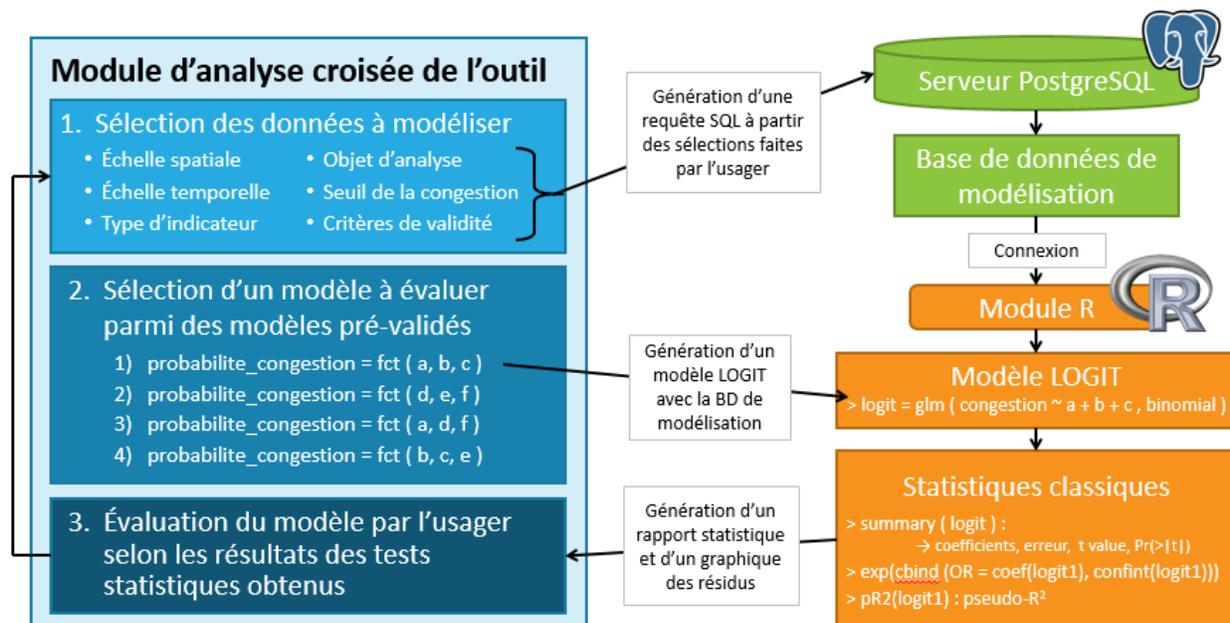


Figure 9 – Schématisation de la génération automatisée de modèles explicatifs

5.1.2 Motivation

La littérature regroupe plusieurs études de cas sur les causes de la congestion. L'effet des conditions météorologiques (température, vitesse du vent, visibilité, état de la chaussée et des taux de précipitation) sur les conditions de circulation (vitesse, volume, capacité, temps de parcours et

fiabilité) a été largement étudié en utilisant des régressions linéaires, des régressions logistiques et d'autres analyses statistiques. Par exemple, le Chapitre 10 du HCM 2010 présente des « résultats complets » concernant la réduction de la capacité d'une autoroute en raison de la pluie, la neige, la température, le vent et la visibilité (TRB, 2010). Ces résultats sont tirés de travaux de recherche menés par Agarwal et al. (2005) sur les autoroutes de Minneapolis utilisant les données d'environ 4000 détecteurs de circulation et de trois stations météorologiques sur quatre ans. L'étude propose des valeurs de réduction de capacité pour différentes intensités de précipitation (par exemple pluie faible, pluie modérée et forte pluie) et montre que le HCM 2000 pourrait sous-estimer ou surestimer certaines valeurs de réduction de la vitesse et de la capacité.

Chaque étude consultée a obtenu des résultats utiles pour un cas d'étude géographique spécifique, et il est évident que ces résultats ne peuvent pas être simplement transposés à d'autres contextes. Ainsi, chaque étude supplémentaire peut aider en confirmant ou infirmant certaines conclusions. L'objectif de l'étude de cas présentée dans cette section est donc de décrire l'effet des conditions météorologiques sur la congestion à Montréal.

5.2 Description de l'étude de cas

Pour cette étude de cas, les données de circulation du 7 février au 31 mars 2014 sont utilisées pour étudier les conditions hivernales entre février et mars. De plus, seulement les données des jours de semaine sont utilisées pour ce premier modèle puisque la distribution des données de fin de semaine représente un phénomène totalement différent (Figure 10).

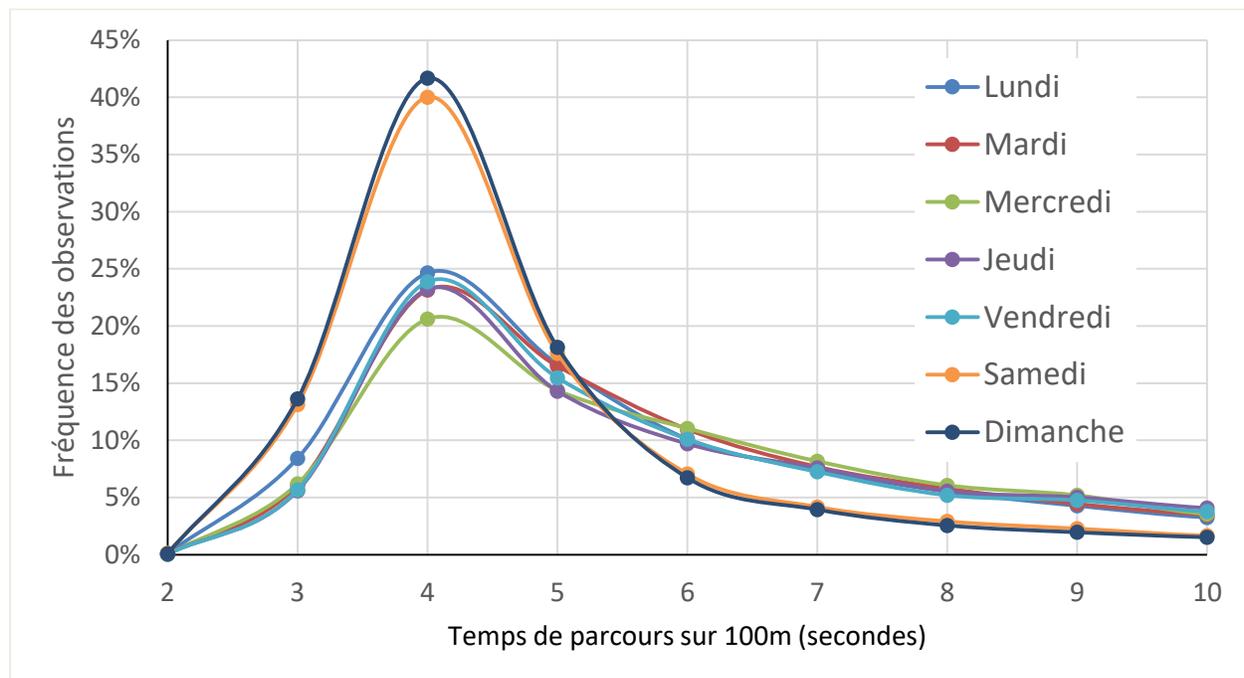


Figure 10 – Distribution fréquentielle du temps de parcours selon le jour de la semaine pour le réseau complet du MTMDET en février 2014

Ensuite, seules les autoroutes de la région métropolitaine de Montréal sont utilisées. Les routes principales ont été ignorées parce qu'elles ont des carrefours contrôlés par des feux de signalisation et le phénomène de congestion y est différent. La Figure 11 montre l'étendue spatiale de l'étude de cas. Peu de recherches ont étudié l'impact de la météo au niveau d'un réseau entier d'une région

métropolitaine. La région est également divisée en utilisant les huit régions habituelles de l'enquête origine-destination.

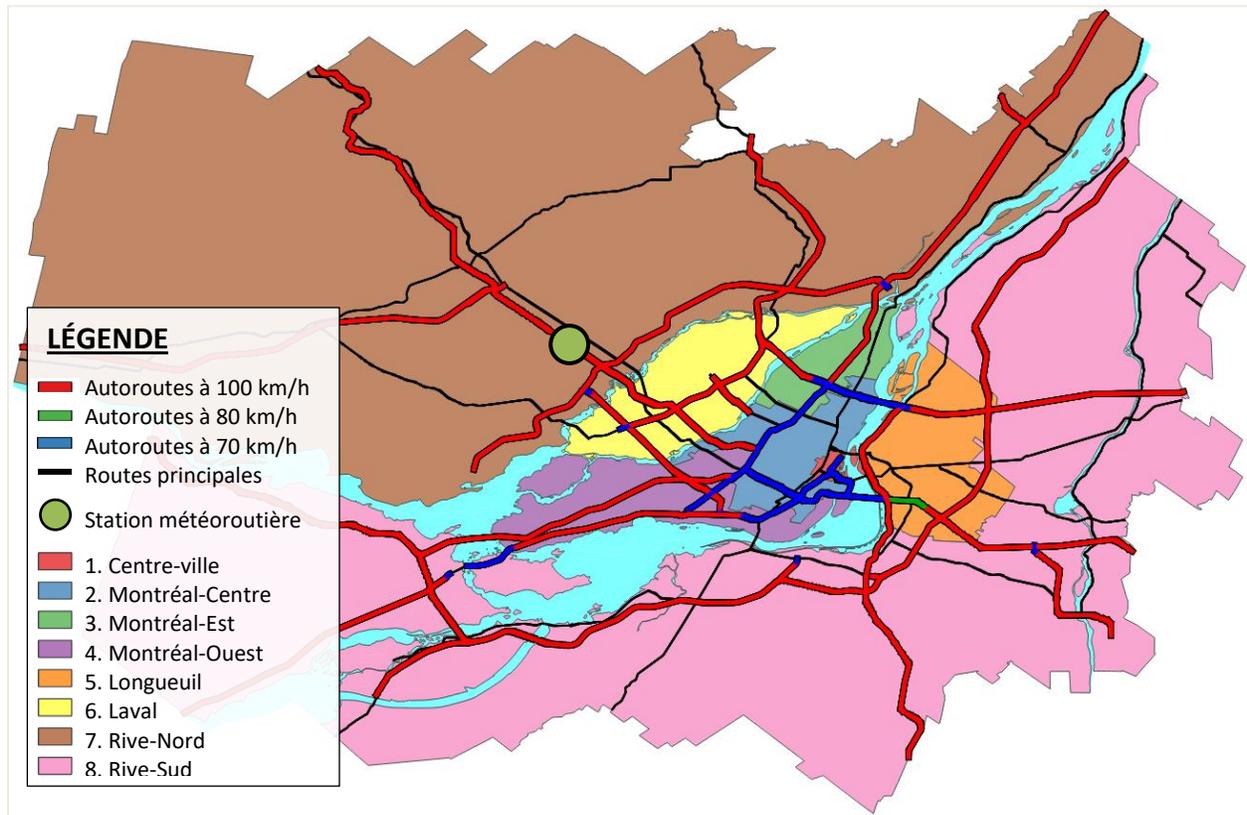


Figure 11 – Carte de l'étude de cas : autoroutes de la région de Montréal (8 régions) avec leur limite de vitesse et la localisation de la station météorologique Ste-Thérèse du MTMDET

Finalement, seulement trois variables de la base de données météorologiques ont été sélectionnées, soit l'état de la chaussée, le type de précipitation et la visibilité. D'abord, l'état de la chaussée est un code dérivé de plusieurs mesures sur la chaussée et est classé en six catégories : sec, humide, mouillé, glacé, sel résiduel et glissant. Ensuite, le type de précipitation provient des codes 4680 normalisés par la World Meteorological Organization (WMO) qui ont été simplifiés en six codes de précipitation : aucune, poussière, brouillard, bruine, pluie et neige. Enfin, la visibilité est mesurée en utilisant un capteur spécial avec une distance de visibilité maximale de 3,1 km, qui est considérée comme une bonne visibilité. Les distances plus faibles signifient une visibilité réduite.

5.3 Définition du modèle

De nombreux types de modèles peuvent être utilisés pour modéliser l'impact des conditions météorologiques sur la circulation, qui est représenté ici par le ratio de la limite de vitesse (RLV). Plusieurs modèles linéaires ont été expérimentés pour tenter de décrire cet impact sans obtenir de bons résultats.

En regardant les distributions fréquentielles du ratio de la limite de vitesse (RLV) à la Figure 12, on constate l'existence de deux conditions de circulation principales représentées par deux pics distincts : le plus grand vers $RLV = 1,0$ et le plus petit près de $RLV = 0,2$. Le premier fait référence

aux conditions de circulation normales et le second représente les conditions congestionnées. L'idée est donc de simplifier le modèle en considérant deux états : congestionné ou non. Les modèles de choix discrets sont typiquement utilisés dans ce type de situation.

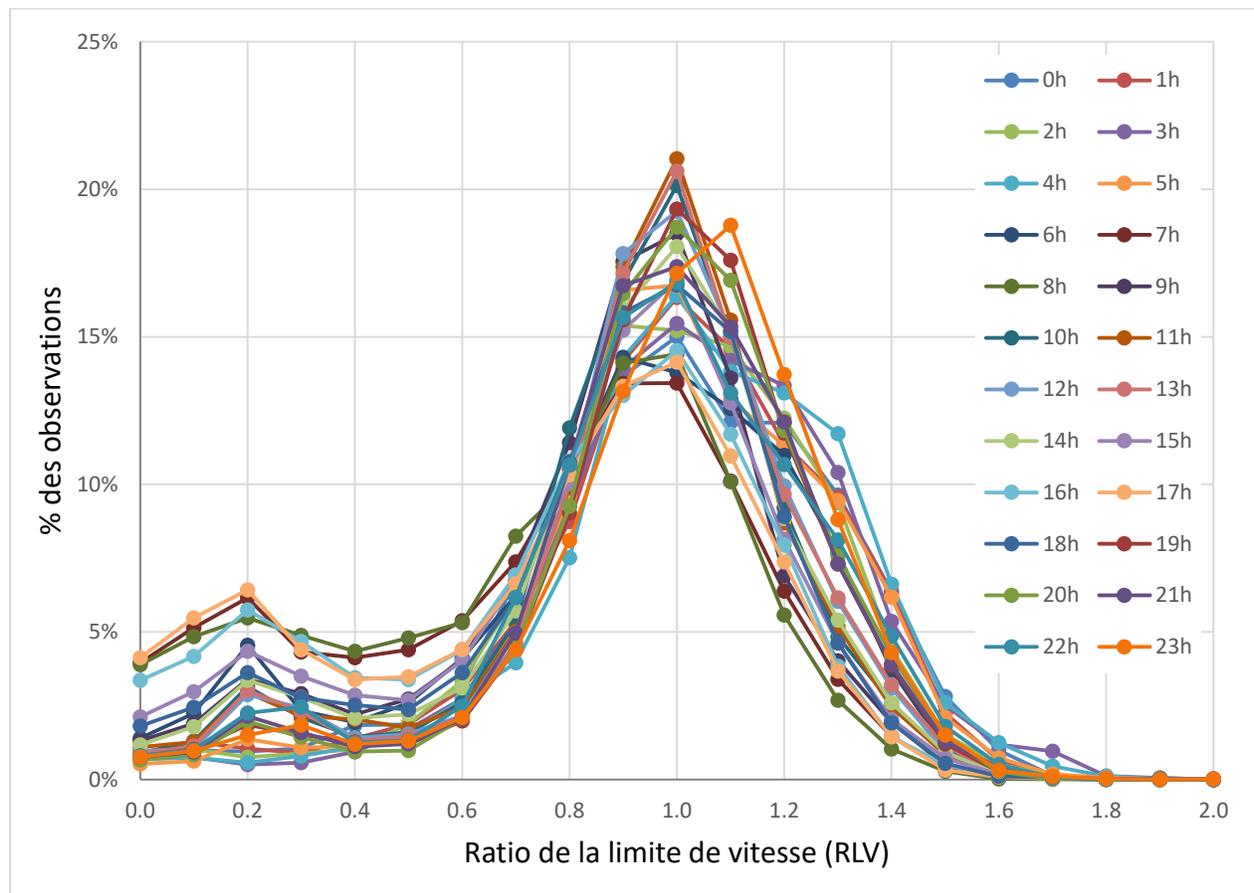


Figure 12 – Distribution fréquentielle du ratio de la limite de vitesse (RLV) sur tout le réseau pour février 2014

Par conséquent, le modèle de régression logistique (LOGIT) a été choisi pour cette étude, car il modélise la probabilité qu'un événement se produise par rapport à son complémentaire, c'est-à-dire, dans le cas présent, que les conditions de circulation soient congestionnées (congestion = 1) ou non (congestion = 0), où la congestion est mesurée par le RLV. Ainsi, les variables spatio-temporelles et météorologiques vont prédire la probabilité que les conditions soient congestionnées, selon le seuil de congestion prédéfini. Le modèle LOGIT peut être écrit de cette façon :

$$\text{LOGIT}(P(\text{RLV} < \text{seuil de congestion})) = \beta_0 + \beta_1 \text{ Période horaire} + \beta_2 \text{ Région} + \beta_3 \text{ Chaussée glacée} + \beta_4 \text{ Chute de neige} + \beta_5 \text{ Bonne visibilité}$$

Un modèle LOGIT utilise la fonction logistique f définie par :

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad \text{ou} \quad f^{-1}(x) = \text{logit}(x) = \ln\left(\frac{x}{1-x}\right)$$

5.3.1 Montage de la base de données de modélisation

Trois types de variables binaires explicatives sont générés à partir de la base de données de modélisation pour estimer les modèles logistiques : la période horaire, la région et les variables météorologiques (état de la chaussée, type de précipitation et visibilité). La figure montre les distributions du ratio de la limite de vitesse (RLV) pour chacune des variables indépendantes explicatives du modèle exposé à la fin de cette section.

5.3.2 Création des périodes horaires

Puisque la congestion a des variations temporelles quotidiennes, il est important de considérer le moment de la journée dans le modèle. Plusieurs heures consécutives peuvent être regroupées lorsque les conditions de circulation sont similaires durant ces heures pour générer des périodes horaires. La statistique du test de Kolmogorov-Smirnov (KS) est utilisée pour déterminer les heures qui peuvent être regroupées en regardant leurs distributions fréquentielles. Le test de KS est un test statistique non-paramétrique qui compare les fonctions de distribution cumulative (FDC) issues de deux distributions ou échantillons : l'hypothèse nulle est que ces distributions sont tirées de la même loi. La statistique du test est la plus grande distance D entre les FDC. La Figure 13 illustre un exemple de statistique D comparant les distributions de 6h et 7h pour tous les tronçons en mars 2014. La plus grande distance D entre les deux courbes est de 15,9%, ce qui est assez élevé et signifie que les deux distributions ne sont probablement pas similaires.

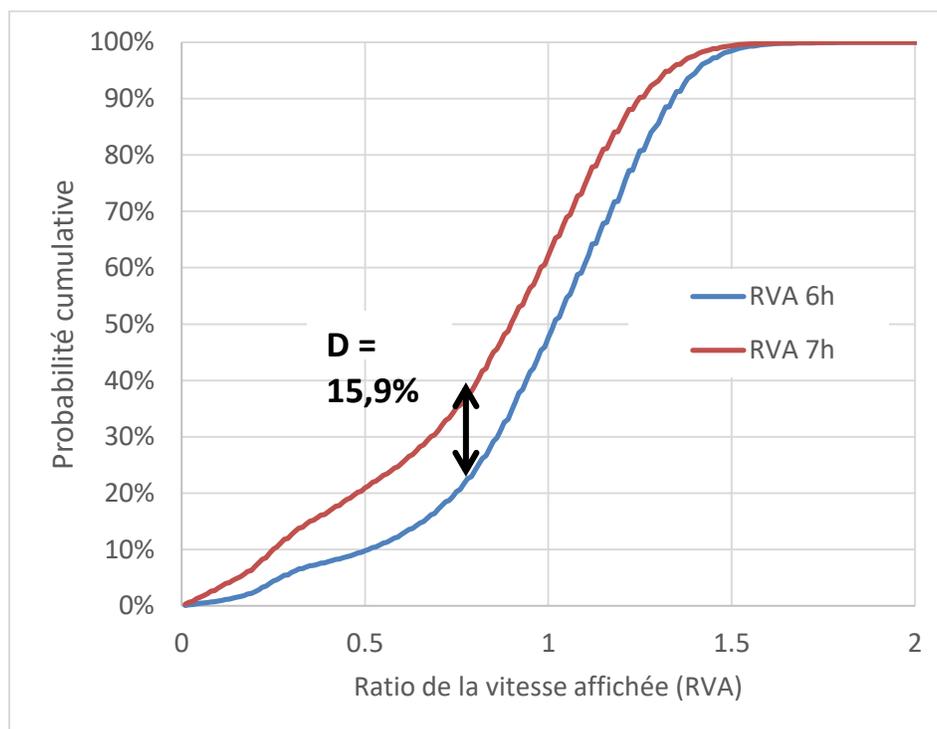


Figure 13 – Résultat du test de KS comparant les distributions de 6h et 7h pour mars 2014

D est calculée pour chaque paire d'heures pour générer une matrice de similarité symétrique 24x24 des plus grandes distances D entre les FDC du RLV pour chaque heure. La Figure 14 est un échantillon de la matrice entre 0h et 11h pour mars 2014. Les petites valeurs (en rouge) de D_{ij} signifient que FDC_i et FDC_j (les FDC respectivement des heures i et j) sont plutôt similaires, tandis

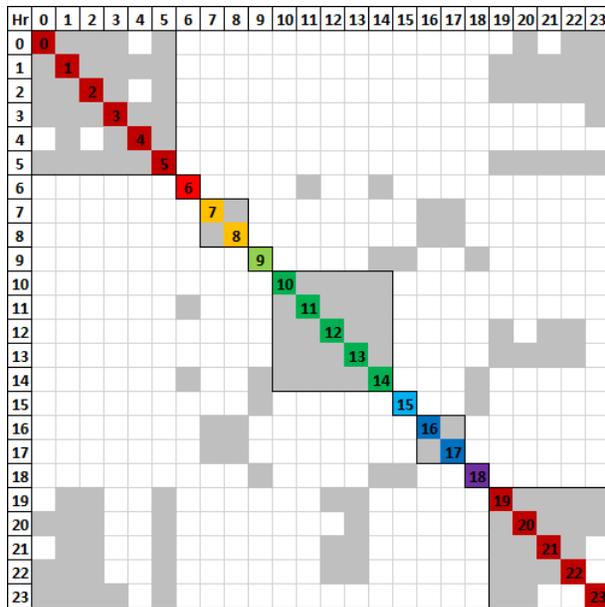
que les valeurs élevées (en vert) de Dij signifient que FDCi et FDCj sont plutôt différentes. On peut observer par exemple que les FDC de 7h et 8h sont similaires (4,9%) et qu'elles sont assez différentes des autres FDC de 0h à 11h. On retrouve également la valeur de 15,9% (en gras) entre 6h et 7h, telle que montrée à la Figure 13.

Heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0		3,3%	1,7%	3,9%	8,4%	5,0%	8,2%	23,9%	25,7%	14,3%	9,2%	7,2%
1	3,3%		1,8%	3,6%	9,1%	5,8%	10,8%	26,6%	28,5%	15,4%	9,2%	7,8%
2	1,7%	1,8%		4,0%	8,9%	4,9%	9,3%	25,0%	26,9%	14,4%	9,3%	7,3%
3	3,9%	3,6%	4,0%		5,5%	2,5%	11,6%	27,1%	29,1%	16,8%	12,0%	9,6%
4	8,4%	9,1%	8,9%	5,5%		5,1%	15,5%	30,8%	32,9%	22,3%	17,4%	15,0%
5	5,0%	5,8%	4,9%	2,5%	5,1%		12,3%	27,6%	29,8%	18,8%	13,4%	11,7%
6	8,2%	10,8%	9,3%	11,6%	15,5%	12,3%		15,9%	18,4%	10,7%	5,8%	3,4%
7	23,9%	26,6%	25,0%	27,1%	30,8%	27,6%	15,9%		4,9%	11,3%	17,5%	18,9%
8	25,7%	28,5%	26,9%	29,1%	32,9%	29,8%	18,4%	4,9%		13,3%	19,6%	20,9%
9	14,3%	15,4%	14,4%	16,8%	22,3%	18,8%	10,7%	11,3%	13,3%		6,5%	7,9%
10	9,2%	9,2%	9,3%	12,0%	17,4%	13,4%	5,8%	17,5%	19,6%	6,5%		2,6%
11	7,2%	7,8%	7,3%	9,6%	15,0%	11,7%	3,4%	18,9%	20,9%	7,9%	2,6%	

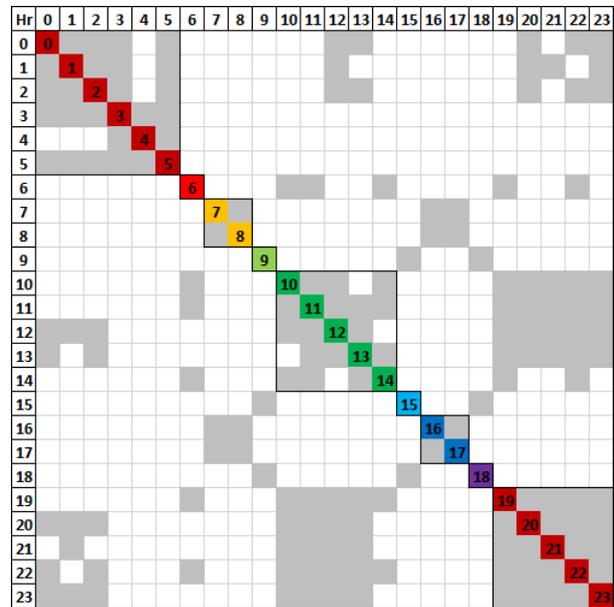
Figure 14 – Matrice des distances D entre les distributions des RLV de chaque paire d'heures entre 0 h 00 et 12 h 00

Le résultat complet pour les 24 heures de la journée est présenté aux Figure 15a et Figure 15b. Dans le cadre de cet exercice, les critères retenus pour décider si deux heures consécutives doivent être regroupées est $D < 7\%$ pour février et $D < 6\%$ pour mars. Cette procédure a généré huit périodes horaires différentes et les résultats entre février et mars sont similaires. Les périodes horaires obtenues sont également regroupées de façon intuitive :

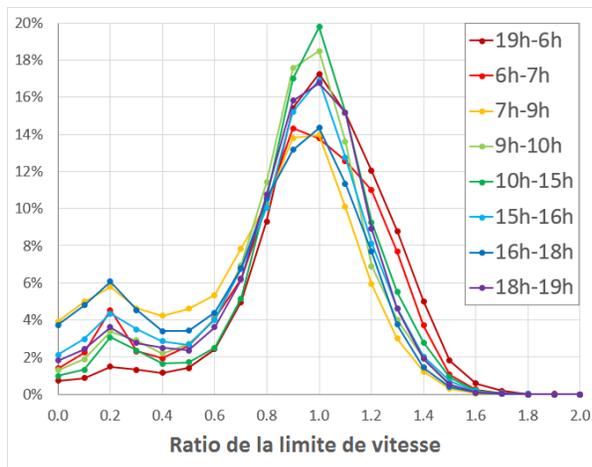
- 6h-7h pré-pointe AM
- 7h-9h pointe AM
- 9h-10h post-pointe AM
- 10h-15h milieu de la journée
- 15h-16h pré-pointe PM
- 16h-18h pointe PM
- 18h-19h post-pointe PM
- 19h-6h nuit



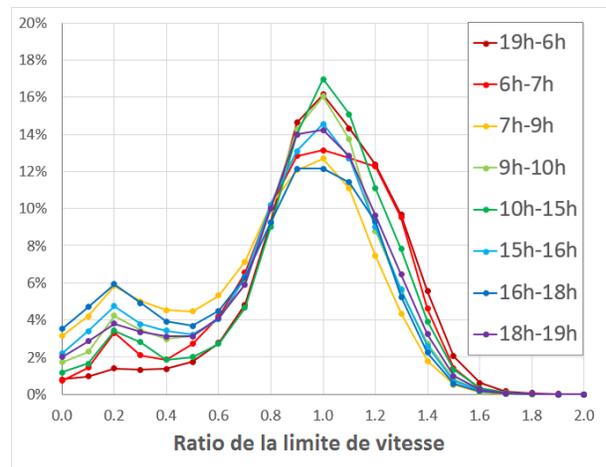
(a) Matrice du test de KS pour février avec les paires qui respectent le critère $D < 7\%$ (en gris)



(b) Matrice du test de KS pour mars avec les paires qui respectent le critère $D < 6\%$ (en gris)



(c) Distribution fréquentielle du RLV en février



(d) Distribution fréquentielle du RLV en mars

Figure 15 – Création des périodes horaires : Matrice des résultats des tests de KS (a,b) et les distributions fréquentielles du RLV (c,d) pour février et mars

Les matrices détaillées du test de KS sont présentées à l'Annexe 5 du mémoire de maîtrise de Tessier (2015) disponible à l'Annexe 8.

5.3.3 Attributs spatiaux

La congestion varie également dans l'espace donc il est important d'ajouter des variables spatiales aux modèles. Les huit régions représentées sur la Figure 11 sont utilisées pour tenir compte des variations spatiales. Au départ, la limite de vitesse pour chaque tronçon de 100 m était également considérée comme attribut spatial pour le modèle. Par contre, une forte corrélation linéaire (0,69) a été observée entre ces deux variables (*region08* et *v_affichee*), telle que montrée à la Figure 16. Sachant qu'il risque d'y avoir des erreurs dans les coefficients estimés, car leur corrélation fait en

sorte qu'une des deux variables peut capter une partie de l'effet de l'autre, il a été décidé d'enlever la variable de limite de vitesse et de conserver uniquement la région.

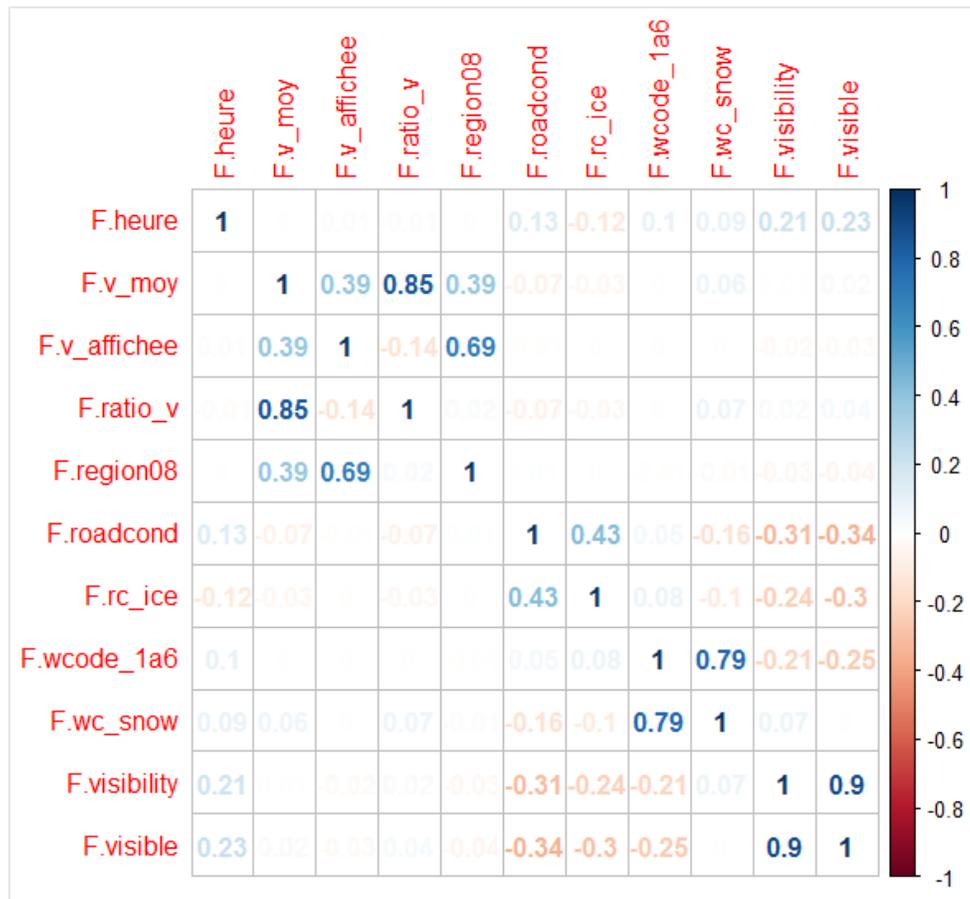


Figure 16 – Matrice de corrélation des variables utilisées pour février 2014

5.3.4 Variables météorologiques

Des tests préliminaires ont montré que l'utilisation de tous les types d'état de la chaussée dans le même modèle n'améliorait pas nécessairement celui-ci. Une analyse de corrélation a également été effectuée pour vérifier que la corrélation entre les variables était toujours acceptable, soit entre -0,4 et 0,4 (voir l'Annexe 5 de l'Annexe 8). Un choix méthodologique était de se concentrer uniquement sur des variables hivernales (chaussée glacée et neige), de sorte que les variables binaires sont créées pour chaque attribut météo, selon la logique suivante :

- Chaussée glacée : 1 = (État de chaussée = Glacée), 0 = (État de chaussée ≠ Glacée)
- Chute de neige : 1 = (Météo = Neige), 0 = (Météo ≠ Neige)
- Bonne visibilité : 1 = (Visibilité = 3,1 km), 0 = (Visibilité < 3,1 km)

5.3.5 Analyse descriptive

Les distributions des données de ratio de la limite de vitesse (RLV) par rapport à toutes les variables sont présentées à la Figure 17. Ces distributions sont celles du mois de février; les

distributions pour mars sont assez semblables (voir l'Annexe 5 de l'Annexe 8). Chaque distribution est représentée par une boîte à moustaches typique montrant les trois principaux quartiles (Q1, Q2 = médiane et Q3) et les extrémités des moustaches sont définies par le quartile $\pm 1,5$ fois l'intervalle interquartile (Q3-Q1). Les valeurs de pourcentage au-dessus des graphiques indiquent le nombre d'observations correspondant à chaque valeur de la variable catégorielle. Par exemple, la base de données pour février contient 603 037 enregistrements, dont 176 863 durant la nuit (19h-6h), qui correspondent à 29 % des données.

La Figure 17a permet de voir la variation du RLV durant et hors des heures de pointe quotidiennes; le RLV est plus faible en période de pointe. La répartition spatiale de la Figure 17b indique essentiellement qu'il y a plus de variabilité sur l'île de Montréal (régions 1 à 4), quel que soit le nombre d'observations. Ensuite, la visibilité semble affecter légèrement le RLV (Figure 17c) puisque la médiane du RLV pour la visibilité maximale (3,1 km) est supérieure à 1 alors que la médiane pour la visibilité réduite est légèrement inférieure à 1. Les Figure 17d et Figure 17e donnent une perspective sur l'effet de la chaussée glacée (21 % des observations) et de la neige (17 % des observations), et on n'observe aucune tendance particulière entre les différentes conditions.

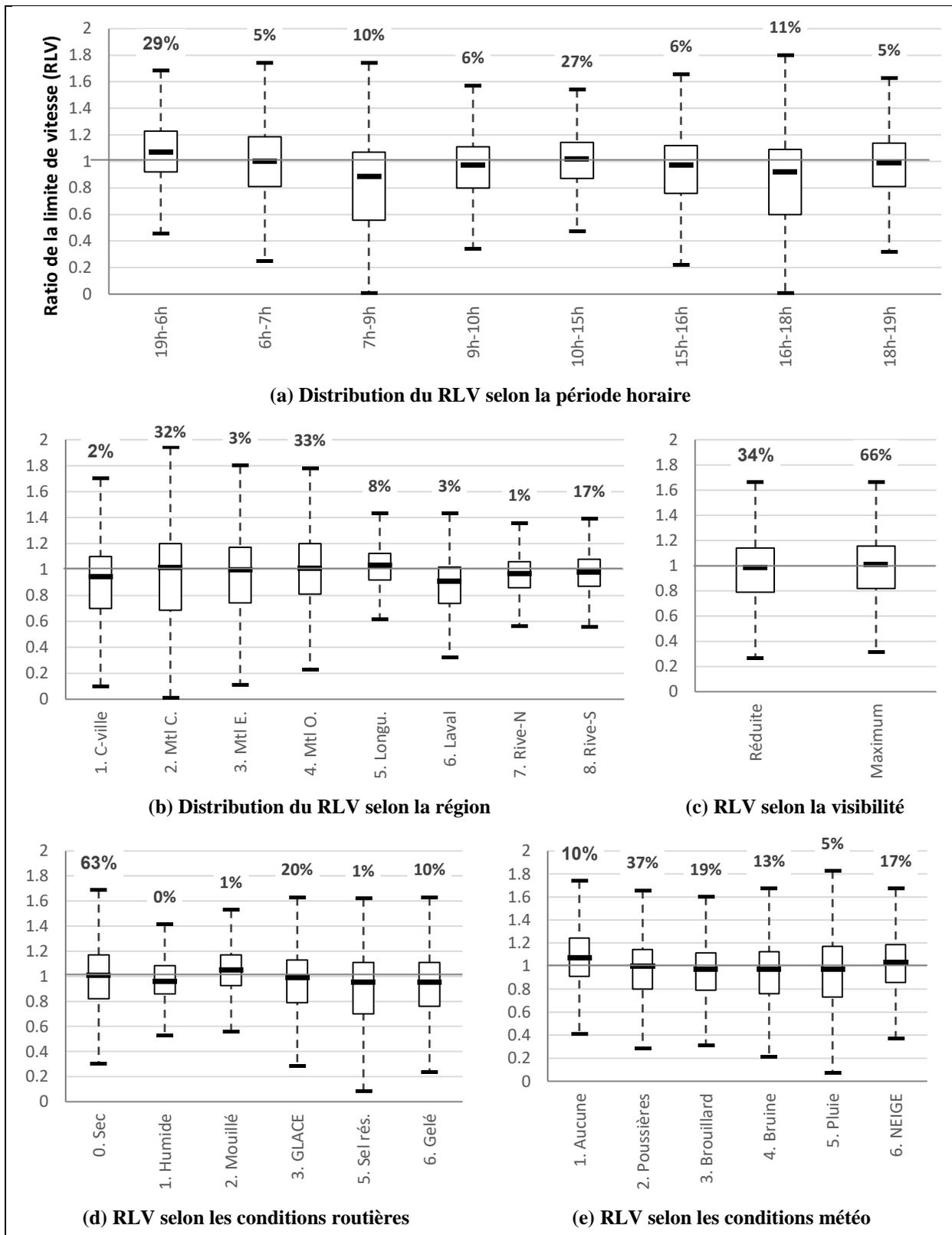


Figure 17 – Distributions des données du RLV en fonction de toutes les variables explicatives pour le mois de février 2014 (603 037 observations)

5.4 Résultats des modèles

Les modèles descriptifs ont été calculés en utilisant R, un des langages statistiques les plus puissants et actuellement un des logiciels les plus utilisés, surtout en raison de sa nature ouverte. Deux types de résultats sont extraits des modèles LOGIT : les rapports de cotes ou « odds ratio » (OR) et la probabilité d'occurrence de la congestion. Les résultats sont analysés en trois parties : les impacts relatifs des conditions météorologiques sur la congestion, l'effet des variables spatiotemporelles sur la probabilité de congestion et l'effet du seuil de congestion.

5.4.1 Impacts relatifs des conditions météorologiques sur la congestion

Le premier modèle LOGIT utilise le seuil de 60 % du ratio de la limite de vitesse (RLV). Les résultats détaillés des modèles sont présentés au Tableau 23 pour février et au Tableau 24 pour mars. La robustesse du modèle est évaluée par le pseudo- R^2 de McFadden, (souvent notée ρ^2) dont on reconnaît qu'il présente des valeurs plus petites que le R^2 traditionnel et pour lequel des valeurs de 0,2 à 0,4 sont considérées comme très satisfaisantes (Domencich et McFadden, 1975). Son équation est la suivante :

$$R^2_{\text{McFadden}} = \rho^2 = 1 - \ln(L_M) / \ln(L_0)$$

Où : L_M : probabilité estimée avec les prédicteurs du modèle

L_0 : probabilité estimée sans les prédicteurs

Les modèles obtenus ont un ρ^2 de 0,130 (février) et 0,096 (mars), qui est plus faible que les valeurs satisfaisantes, mais reste suffisant pour discuter de l'impact relatif des conditions météorologiques sur l'occurrence de la congestion sur les autoroutes de la région de Montréal.

L'*odds ratio* (OR), ou rapport de cotes, est une mesure statistique calculée par cette équation :

$$OR_i = \frac{p_1/(1-p_1)}{p_0/(1-p_0)} \quad \text{où} \quad \begin{cases} p_1 = P(\text{congestion} | X_i = 1) \\ p_0 = P(\text{congestion} | X_i = 0) \end{cases} \quad / \\ X_i : \text{chaque variable explicative binaire}$$

Il est aussi égal à l'exponentielle du coefficient estimé par le modèle logistique pour la variable indépendante correspondante, soit :

$$OR_i = e^{\beta_i} \quad \text{où } \beta_i \text{ est le } i^{\text{e}} \text{ coefficient du modèle}$$

L'OR permet d'estimer l'impact relatif des variables météorologiques sur la probabilité de congestion $P(\text{RLV} < 60 \%)$, puisque la variation du rapport des cotes de la congestion est calculée par : $OR - 1$.

Règle générale, lorsque le rapport des cotes augmente, la probabilité de congestion est influencée dans le même sens.

Ainsi, on peut déduire qu'une chaussée glacée augmente le rapport des cotes de la congestion de 20 % (février) et de 71 % (mars) par rapport à des conditions non glacées, ce qui est une différence considérable entre les deux mois. D'autre part, les chutes de neige augmentent le rapport des cotes de 29 % en mars, mais le diminue de 3% en février, ce dernier n'étant toutefois pas aussi significatif avec une p-value élevée. L'impact négatif des chutes de neige peut être le résultat de la corrélation négative (-0,1) observée entre les chutes de neige et la chaussée glacée.

Les modèles montrent qu'une bonne visibilité diminue le rapport des cotes de la congestion de 14 % en février et de 12 % en mars par rapport à des conditions de visibilité réduite, c'est-à-dire qu'une visibilité réduite augmente le risque de congestion. Cette valeur relativement similaire entre les deux modèles pourrait être considérée comme un effet général de la visibilité réduite pour toute la région métropolitaine ou pour chaque période horaire.

Sans surprise, les rapports de cotes montrent aussi que la période horaire a un impact très important sur la congestion routière, et beaucoup plus important que les autres variables. Par exemple, le rapport des cotes de la congestion est 8,4 fois plus élevé de 7h à 9h un matin de semaine que durant la nuit (19h à 6h) et 7,7 fois plus élevé entre 16h et 18h en fin de journée pour février 2014 (respectivement 7,1 et 7,5 pour mars 2014). Ces valeurs montrent à quel point l'augmentation de la demande en période de pointe influence la congestion. L'impact des différentes régions est également important, mais dans une moindre mesure. Par exemple, le rapport des cotes de la congestion est 89 % moins élevé sur la couronne de la Rive-Sud qu'au centre-ville de Montréal en février 2014 (respectivement 81 % en mars 2014). L'effet des variables spatiotemporelles sur la probabilité de congestion est étudié à la sous-section suivante.

Tableau 23 – Modèle de probabilité de congestion pour un RLV < 0,6 en février 2014

FÉVRIER 2014	Est.	Éc. type	z	Pr(> z)		OR	OR-1
Constante :	-2,515	0,028	-88,95	< 2e-16	***	0,081	-91,9%
Périodes horaires : Réf. 19h-6h							
6h-7h	1,172	0,021	55,58	< 2e-16	***	3,230	223,0%
7h-9h	2,123	0,016	135,11	< 2e-16	***	8,353	735,3%
9h-10h	1,257	0,020	62,65	< 2e-16	***	3,517	251,7%
10h-15h	0,861	0,015	56,08	< 2e-16	***	2,366	136,6%
15h-16h	1,595	0,019	84,07	< 2e-16	***	4,926	392,6%
16h-18h	2,047	0,015	132,51	< 2e-16	***	7,743	674,3%
18h-19h	1,296	0,021	61,14	< 2e-16	***	3,654	265,4%
Régions : Réf. Centre-ville + Mtl-Centre							
Montréal-Est	0,236	0,030	7,75	9,57E-15	***	1,266	26,6%
Montréal-Ouest	-0,750	0,026	-29,09	< 2e-16	***	0,472	-52,8%
Longueuil	-1,421	0,032	-44,86	< 2e-16	***	0,241	-75,9%
Laval	-0,069	0,032	-2,17	0,030	**	0,934	-6,6%
Rive-Nord	-1,026	0,049	-20,75	< 2e-16	***	0,359	-64,1%
Rive-Sud	-2,207	0,031	-70,65	< 2e-16	***	0,110	-89,0%
Variables météorologiques : Réf. Chaussée non glacée, Pas de neige, Visibilité réduite							
Chaussée glacée	0,182	0,011	17,12	< 2e-16	***	1,199	19,9%
Chute de neige	-0,032	0,013	-2,45	0,014	**	0,968	-3,2%
Bonne visibilité	-0,146	0,010	-14,63	< 2e-16	***	0,864	-13,6%
Résidus :	Min	1Q	Médiane	3Q	Max	McFadden pseudo-R ²	
	-1,1884	-0,5518	-0,3666	-0,2215	3,1328	0,130	

*** indique une variable significative avec Pr(>|z|) inférieure à 0,01

** indique une variable significative avec Pr(>|z|) entre 0,01 et 0,05

Tableau 24 – Modèle de probabilité de congestion pour un RLV < 0,6 en mars 2014

MARS 2014	Est.	Éc. type	z	Pr(> z)		OR	OR-1
Constante :	-2,535	0,024	-105,46	< 2e-16	***	0,079	-92,1%
Périodes horaires : Réf. 19h-6h							
6h-7h	0,812	0,020	41,57	< 2e-16	***	2,251	125,1%
7h-9h	1,959	0,013	148,13	< 2e-16	***	7,089	608,9%
9h-10h	1,283	0,017	75,28	< 2e-16	***	3,608	260,8%
10h-15h	0,865	0,013	68,21	< 2e-16	***	2,375	137,5%
15h-16h	1,699	0,016	105,02	< 2e-16	***	5,471	447,1%
16h-18h	2,019	0,013	152,68	< 2e-16	***	7,533	653,3%
18h-19h	1,425	0,017	82,87	< 2e-16	***	4,158	315,8%
Régions : Réf. Centre-ville							
Montréal-Centre	-0,088	0,022	-4,08	0,0000456	***	0,915	-8,5%
Montréal-Est	0,094	0,026	3,67	0,000239	***	1,099	9,9%
Montréal-Ouest	-0,938	0,022	-42,52	< 2e-16	***	0,391	-60,9%
Longueuil	-0,823	0,037	-22,49	< 2e-16	***	0,439	-56,1%
Laval	-0,491	0,027	-18,17	< 2e-16	***	0,612	-38,8%
Rive-Nord	-1,325	0,042	-31,59	< 2e-16	***	0,266	-73,4%
Rive-Sud	-1,633	0,042	-38,68	< 2e-16	***	0,195	-80,5%
Variables météorologiques : Réf. Chaussée non glacée, Pas de neige, Visibilité réduite							
Chaussée glacée	0,534	0,014	39,47	< 2e-16	***	1,705	70,5%
Chute de neige	0,255	0,010	26,58	< 2e-16	***	1,290	29,0%
Bonne visibilité	-0,123	0,009	-13,10	< 2e-16	***	0,885	-11,5%
Résidus :							
	Min	1Q	Médiane	3Q	Max	McFadden pseudo-R ²	
	-1,1994	-0,5964	-0,3853	-0,2638	2,9338	0,096	

*** indique une variable significative avec Pr(>|z|) inférieure à 0,01

5.4.2 Effet des variables spatiotemporelles sur la probabilité de congestion

La probabilité d'occurrence de la congestion peut être calculée en utilisant la constante du modèle (β_0) et les coefficients (β_i) estimés pour chaque condition spatiotemporelle et météorologique ($X_i = 1$ ou 0). Elle est calculée par cette équation :

$$\text{Probabilité}_{\text{congestion}} = P(\text{RLV} < \text{seuil}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \dots + \beta_5 \times X_5)}}$$

Par exemple, on peut calculer la probabilité de congestion pour un seuil de 60 % du RLV selon la période horaire et la région pour les conditions suivantes : chaussée glacée, bonne visibilité et aucune précipitation de neige. L'équation suivante est utilisée pour février 2014 :

$$P(\text{RLV} < 0,6) = \frac{1}{1 + e^{-(-2,515 + \beta_{\text{periode horaire}} + \beta_{\text{region}} + 0,182 - 0,146)}}$$

Les résultats complets sont présentés à la Figure 18. On remarque des pics à près de 50 % de probabilité de congestion aux heures de pointe. Par exemple, la probabilité de congestion entre 7h et 9h à Montréal-Est lorsque la chaussée est glacée et que la visibilité est bonne sans précipitation de neige est de 47 % pour février 2014. Cette probabilité serait de 43 % si la chaussée n'était pas glacée, donc l'effet de la chaussée glacée est de 4 points de % pour ce mois. Les probabilités pour mars 2014 sont respectivement de 48 % avec chaussée glacée et 35 % sans chaussée glacée, donc l'effet de cette variable est beaucoup plus important en mars, tel que discuté à la sous-section précédente.

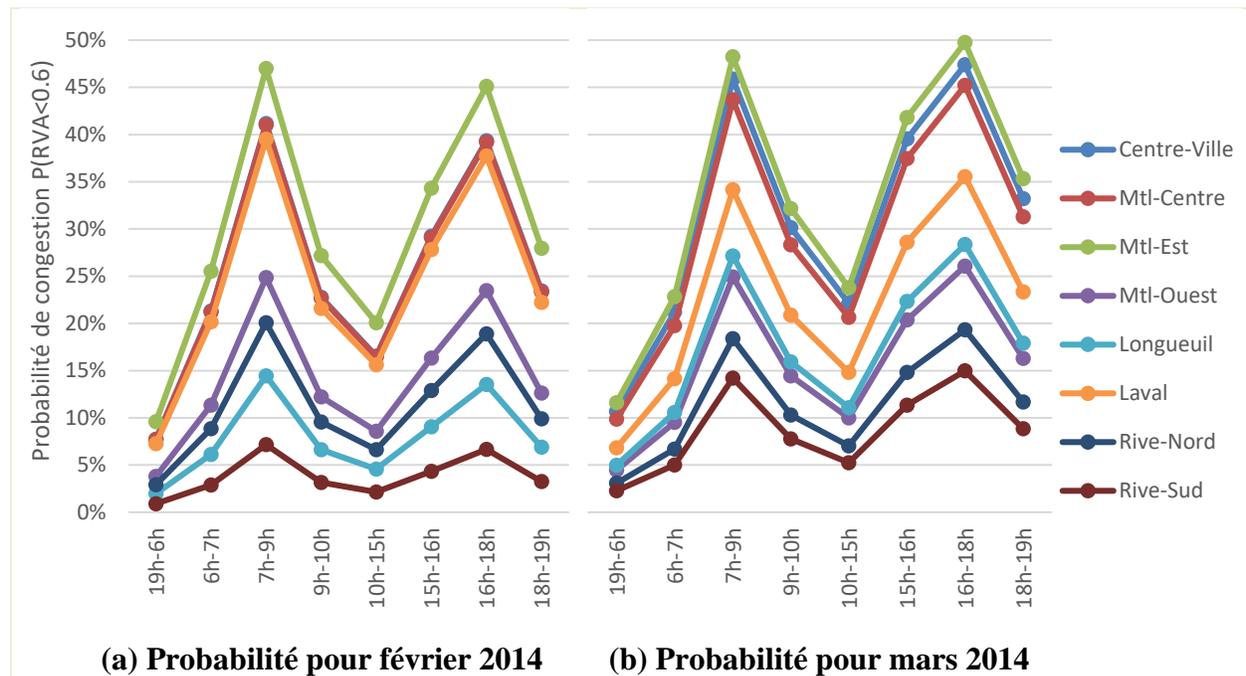


Figure 18 – Probabilité de congestion pour un seuil de 60 % du RLV selon la période horaire et la région pour une chaussée glacée, bonne visibilité et aucune précipitation de neige

La Figure 18 montre également la variation spatiale de la probabilité de congestion. En effet, sur les deux mois elle atteint seulement un maximum de 15 % et 20 % pour la rive-sud et la rive-nord

respectivement. On remarque aussi que la probabilité de congestion pour Longueuil est pratiquement le double en mars par rapport à février. On ne peut que conclure que la probabilité de congestion varie énormément dans le temps et l'espace. Il est important de noter qu'il y a peut-être eu des événements qui ne sont pas contrôlés dans le modèle; la constante est importante et inclut l'effet de toutes les variables non incluses dans le modèle et cela expliquerait le faible R^2 .

5.4.3 Effet du seuil de congestion sur la probabilité

Il n'y a pas de définition unique de la congestion, ni une valeur unique de seuil de congestion. Les modèles présentés dans les sous-sections précédentes dépendent du choix du seuil de congestion qui était de 60 %. Dix-huit nouveaux modèles ont été estimés avec un seuil d'état de la circulation allant de 10 % à 100 % pour voir les variations au niveau des impacts des conditions météorologiques sur la circulation pour différents seuils; évidemment, lorsque le seuil est fixé à 90% ou plus, on ne peut plus parler de congestion et il est plus juste alors de parler de seuil permettant de comparer différents états de la circulation.

La Figure 19 montre la probabilité que la circulation soit au-dessus d'un certain seuil entre 7h et 9h à Montréal-Est selon la condition météorologique hivernale selon le mois. Sans surprise, on remarque d'abord que la probabilité augmente lorsque les conditions sont mauvaises (chaussée glacée, chute de neige et visibilité réduite combinées). On constate également que l'effet des mauvaises conditions sur la probabilité augmente avec le seuil (jusqu'à un seuil de 0,8), mais pas de manière linéaire. D'ailleurs cet effet est beaucoup plus important en mars qu'en février. Par exemple, la probabilité est de 35 % lorsque les conditions météorologiques sont bonnes et 58 % sinon pour un seuil de 0,6 en mars. Ces valeurs deviennent 20 % et 24 % pour un seuil de 0,3. Le choix du seuil d'état de la circulation a donc une influence non négligeable sur l'impact des conditions météorologiques sur la probabilité de l'occurrence de cet état de circulation. Il serait intéressant de construire des modèles discrets de type ordonné ou multinomial et de considérer différentes classes d'états de la circulation définis par des seuils de RLV.

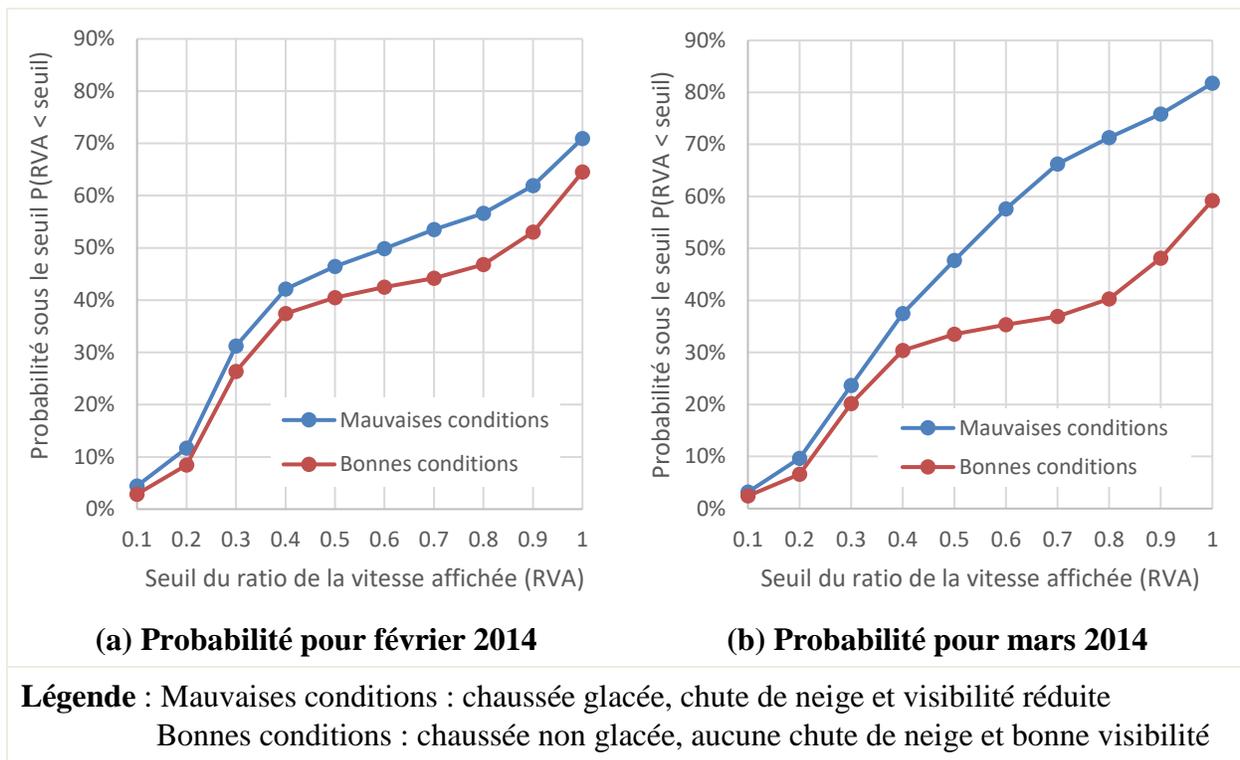


Figure 19- Probabilité de congestion entre 7h et 9h à Montréal-Est selon la condition météorologique hivernale pour différents seuils de congestion en février (a) et mars (b)

5.5 Synthèse

Ce chapitre a présenté une méthodologie pour évaluer l'impact des variables météorologiques sur les conditions de circulation. L'objectif principal était de développer une telle méthodologie pour l'inclure dans un outil d'analyse de la congestion à Montréal. Cette méthodologie utilise notamment la statistique du test de Kolmogorov-Smirnov pour regrouper des périodes horaires consécutives de circulation similaire. Des modèles logistiques de probabilité de l'occurrence de la congestion sont développés en incluant différentes variables : la période horaire, le type de route (région et limite de vitesse), les variables météorologiques (état de la chaussée, type de précipitation et visibilité). L'étude de cas portait sur les autoroutes de la région de Montréal, durant les mois de février et mars, pour se concentrer sur les variables hivernales (chaussée glacée et chute de neige).

Plusieurs modèles descriptifs ont été calculés en utilisant R, desquels ont été extraits les rapports de cotes et la probabilité que l'état de la circulation soit sous un certain seuil. À la lumière des résultats analysés, on peut conclure que les conditions météorologiques ont un impact sur la congestion. De plus, on confirme que la variation spatiotemporelle de la probabilité de congestion doit être considérée dans les modèles. Finalement, on a validé que la méthodologie employée pour générer des modèles explicatifs est adéquate pour être intégrée à un outil de consultation pour la région de Montréal.

L'utilisation de modèles explicatifs permet de confirmer les corrélations entre les conditions de circulation (exprimées ici par un seuil de congestion, mais qui pourraient être exprimées par des classes de seuils ou d'autres variables) et certaines variables explicatives. La démonstration s'est

appuyée sur les données exprimant les conditions météorologiques, mais d'autres variables peuvent agir comme variables explicatives notamment les variables exprimant les événements, entraves ou incidents. Il sera d'intérêt dans les prochaines phases de développement d'introduire d'autres variables explicatives et d'augmenter la complexité du modèle en incluant simultanément plusieurs ensembles de variables explicatives.

6 Conceptualisation de l'outil

Ce chapitre présente les différents éléments touchant la conceptualisation de l'outil. Nous présentons d'abord sa structure générale, les différents concepts de base utilisés, puis les paramètres de sélection des données. Ensuite, nous décrivons les différents graphiques inhérents à la visualisation des indicateurs, pour enfin présenter une analyse descriptive de l'échantillon disponible à ce jour.

6.1 Structure générale

L'outil est structuré autour d'une interface web permettant la visualisation interactive des indicateurs de congestion ainsi que la production de faits saillants.

Afin de traiter les données brutes de la base de données centrale, plusieurs logiciels sont utilisés. Les choix de logiciels ont été faits en considérant les éléments suivants :

- le coût ;
- la flexibilité ;
- la facilité d'apprentissage (documentation, support, forums, etc.) ;
- la performance ;
- la facilité d'installation selon les différents systèmes d'exploitation.

6.1.1 Outil de base de données

La réalisation de l'interface web s'appuie sur la structure de la base de données centralisée. Ainsi, le système de gestion de base de données PostgreSQL a été choisi, pour les raisons suivantes :

- son coût nul et sa licence libre ;
- sa grande interopérabilité. Sur le site internet de PostgreSQL, PostgreSQL a des procédures internes utilisant une douzaine de langages de programmation, notamment Java, Perl, Python, Ruby, Tcl, et C/C++ (<https://www.postgresql.org/about/>). De plus, plusieurs langages de programmation peuvent interagir avec PostgreSQL, notamment Java (JDBC), ODBC, Perl, Python, Ruby, C, C++, PHP, Lisp, Scheme et Qt ;
- ses nombreuses extensions. Par exemple, les extensions postGIS (extension permettant la création et la manipulation d'objets spatiaux) et pgRouting (extension permettant d'ajouter des fonctionnalités de calcul de chemin le plus court) vont permettre d'effectuer les requêtes spatiales nécessaires à la production d'indicateurs ;
- ses performances. Les limites de stockage de données, qui sont montrées au Tableau 25, sont suffisantes pour les besoins du projet et ne risquent pas d'être atteintes à court ou moyen termes.

Tableau 25 – Limites de stockage du logiciel PostgreSQL

<i>Caractéristique</i>	<i>Limite</i>
Taille maximale d'une base de données	illimitée
Taille maximale d'une table	32 TB
Taille maximale d'un enregistrement	1.6 TB
Taille maximale d'un champ	1 GB
Nombre maximal d'enregistrements par table	illimité
Nombre maximal de colonnes par table	250-1600 (selon le type de colonne)

(Tiré de <http://www.postgresql.org/about/>)

6.1.2 Outils de traitement des données

6.1.2.1 *Ruby*

Afin de traiter les données et de les importer dans la base de données, le langage de programmation Ruby a été choisi (pour plus d'informations, voir <https://www.ruby-lang.org/fr/>). Ce langage de programmation a été choisi pour les raisons suivantes :

- Son coût nul et sa licence libre ;
- Sa facilité d'apprentissage et d'opération.
- Ses nombreux modules qui permettent le traitement et la valorisation de données ;
- Ruby est disponible sur toutes les plateformes (Windows et UNIX, incluant Mac OS X).

Plusieurs modules de Ruby sont utilisés afin de traiter et de stocker les données brutes . Le Tableau 26 (liste non-exhaustive), montre des modules qui sont utilisés afin de répondre aux objectifs du projet de recherche.

Tableau 26 – Liste non-exhaustive des modules du logiciel Ruby qui sont utilisés pour le développement des indicateurs

<i>Nom</i>	<i>Fonction</i>	<i>Site web</i>
Ruby on Rails	Application qui permet de gérer les tâches d'importation de données brutes dans la base de données et d'assigner les points au réseau routier	http://rubyonrails.org/
pg	Adaptateur PostgreSQL pour Ruby	https://rubygems.org/gems/pg/versions/0.18.4

6.1.2.2 R

Le logiciel R est utilisé pour des analyses statistiques plus poussées (pour plus d'informations, voir <https://www.r-project.org/>). Ce langage de programmation a été choisi pour les raisons suivantes:

- son coût nul et sa licence libre ;
- sa facilité d'apprentissage et d'opération. La communauté scientifique utilise R de plus en plus fréquemment, il y a donc une documentation importante sur internet, avec des tutoriels, des guides et des forums de discussion ;
- ses nombreux modules qui permettent le traitement et la valorisation de données ;
- R est disponible sur toutes les plateformes (Windows et UNIX, incluant Mac OS X).

Un module prototype d'analyse statistique est intégré à l'interface de visualisation et permet d'estimer un modèle simple. La procédure préconisée consiste à faire appel à un script R rédigé préalablement qui fait une extraction des données requises pour la production d'un modèle directement dans la base de données PostgreSQL et qui permet de générer le modèle. Pour cette phrase de prototypage, seul un modèle simple incluant des variables météorologiques est disponible.

6.1.3 Outils pour la réalisation de l'interface de visualisation web

Afin de réaliser une interface de visualisation web dynamique, plusieurs technologies et bibliothèques gratuites et libres de droits sont disponibles. Les listes suivantes montrent quelques-unes des technologies (Tableau 27) et bibliothèques (Tableau 28) utilisées dans ce projet.

Tableau 27 – Liste des technologies utilisées pour réaliser l'interface de visualisation web

Nom	Fonction	Site web
HTML 5 (Hyper Text Markup Language)	Structurer les éléments d'une page web	http://www.w3schools.com/html/html5_intro.asp
CSS 3 (Cascading Style Sheets)	Gérer la mise en forme d'une page web	http://www.w3schools.com/css/css3_intro.asp
JS (JavaScript)	Animer une page web, côté client	http://www.w3schools.com/js/
HTTP (Hypertext Transfer Protocol)	Protocole de communication client-serveur	https://fr.wikipedia.org/wiki/Hypertext_Transfer_Protocol
Apache HTTP Server	Proposer des contenus web via http	https://httpd.apache.org/
PHP (Hypertext Preprocessor)	Générer une page web dynamique	http://php.net
PostgreSQL	Gérer les bases de données	http://www.postgresql.org
git	Versionner et suivre l'évolution du développement du code d'un projet	https://git-scm.com

Tableau 28 – Liste non-exhaustive de librairies utilisées pour réaliser l'interface de visualisation web

Nom	Fonction	Site web
Bootstrap	Proposer un thème CSS et des plugins JS aidant à structurer et styliser une page web ergonomique	https://getbootstrap.com
AngularJS	Aider à structurer une application JS à l'aide d'une architecture MVC (Modèle, Vue, Contrôleur)	https://angularjs.org
D3 js (Data-Driven Documents)	Manipuler les éléments DOM (Document Object Model) d'une page web	https://d3js.org
Leaflet	Cartographie	http://leafletjs.com
OpenStreetMap	Fournir les tuiles d'un fond de carte	https://www.openstreetmap.org
HighCharts	Générer des graphiques en JS	http://www.highcharts.com
Slim v3	Faciliter la création de routes en PHP en fonction de l'adresse web appelée	http://www.slimframework.com/docs/

6.1.4 Communications client-serveur

Cette section décrit les échanges et communications entre les différents composants décrits précédemment, notamment grâce à la Figure 20.

Tous les échanges entre le client et notre serveur se font à travers un seul point d'entrée : notre application PHP côté serveur. Celle-ci se charge de sécuriser l'accès aux données et fonctionnalités de l'interface web en demandant à l'utilisateur de s'authentifier. Deux rôles sont disponibles : celui d'administrateur qui permet notamment d'accéder aux informations sur le contenu des bases de données et celui d'utilisateur qui donne accès aux pages de consultation de résultats.

Pour se connecter à notre application, l'utilisateur client, depuis son navigateur web, accède à l'adresse web correspondant à notre portail web. Son navigateur va alors interroger notre serveur sur lequel roule le service Apache. Ce dernier va alors interpréter notre application PHP qui va retourner notre application HTML/CSS/JS qui sera lue côté client.

Cette application PHP côté serveur se charge d'exécuter des requêtes SQL auprès de la base de données PostgreSQL. C'est aussi l'application PHP qui peut interroger le logiciel R. Toujours côté serveur, un dépôt Git a été installé afin de pouvoir travailler à plusieurs et pouvoir suivre les modifications apportées sur le code et le développement de l'application.

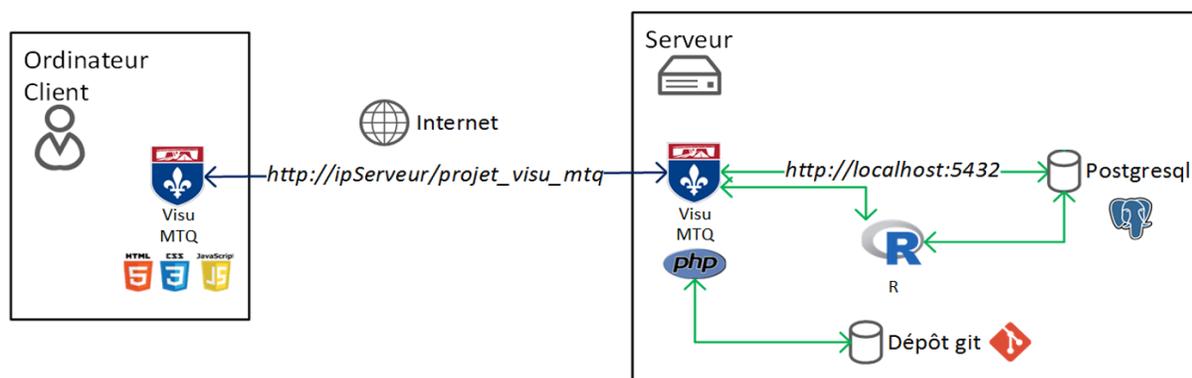


Figure 20 – Schéma communications client-serveur

6.2 Concepts de base

Les sections qui suivent présentent les concepts de base de l’articulation de l’interface. Ils sont décrits de façon générale et leur intégration dans l’outil est ensuite discutée. L’annexe 9 présente une série de captures d’écran de l’outil.

6.2.1 Observations

Les données sur lesquelles s’appuie l’estimation des indicateurs sont des vitesse instantanées géolocalisées et ce choix a été fait en raison des données actuellement disponibles. Il sera possible de s’appuyer sur des vitesses moyennes spatiales ou temps de parcours si les données le justifient dans une prochaine version et d’assurer une intégration de toutes les sources à l’aide des équations appropriées lorsque requis. Chaque point GPS, auquel est associée une vitesse instantanée, correspond à une observation. Ces observations sont ensuite attribuées à des tronçons d’analyse. Ainsi, lors des analyses descriptives visant à documenter la composition des échantillons disponibles, une observation correspond à une vitesse instantanée géolocalisée et attribuée à un tronçon appartenant au réseau routier d’étude.

6.2.2 Période d’analyse

Le premier paramètre de sélection à identifier lors de l’utilisation de l’outil de consultation est la période d’analyse. Cette période permet de procéder à l’extraction du sous-ensemble de données qui sera ensuite davantage filtré et/ou traité en précisant d’autres paramètres de sélection. La période est délimitée par une date de début et de fin, mais limitée pas un bloc de mois (un ou plusieurs mois consécutifs).

6.2.3 Unité de filtre et unité d’analyse

Deux types d’unités doivent être définis, celles-ci s’appliquant aux unités temporelles et spatiales :

- Unité de filtre : l’unité de filtre permet d’extraire un sous-ensemble de données et de n’utiliser que ces données dans l’estimation des indicateurs (les jours ouvrables par exemple).

- Unité d'analyse : l'unité d'analyse est celle pour laquelle pourraient être produites les estimations. Ainsi, un seul indicateur est produit par unité d'analyse (exemples : une vitesse moyenne par jour si le jour est choisi comme unité temporelle d'analyse ou une vitesse moyenne pour l'A40 si le corridor est choisi comme unité spatiale d'analyse). Dans la version actuelle de l'outil, l'unité d'analyse est fixée ; elle pourra éventuellement être paramétrable dans les versions subséquentes. Les concepts qui permettront une telle implantation sont décrits dans les sections qui suivent.

6.2.4 Unités temporelles

L'unité temporelle de base de stockage de l'information est l'heure. Ainsi, toutes les données brutes sont compilées pour chaque heure d'observation. Dans la base de données centrale, un nombre d'observations de vitesses instantanées est enregistré pour chaque heure et chaque unité spatiale de base (qui correspond à un tronçon de 100 mètres, tel que décrit plus bas).

Plusieurs unités temporelles peuvent ensuite être créées à partir de l'unité temporelle de base. Si l'unité d'analyse choisie est l'heure, alors les statistiques seront présentées pour chaque heure de la période d'analyse choisie alors que si une autre unité d'analyse est choisie, les données seront agrégées pour celle-ci (une statistique par période horaire ou journée par exemple). Ces unités peuvent aussi être choisies comme filtre ou analyse (les codes A et F indiquent si l'unité pourrait être utilisée comme critère de filtre et/ou d'analyse). Les unités d'analyse temporelle sont :

- Date-Heure (A) : il est possible de conserver l'heure (pour chaque journée) comme unité d'analyse ; c'est d'ailleurs la plus fine unité d'analyse disponible dans l'outil.
- Heure de la journée (F) : il est possible de produire des statistiques différentes pour chaque heure de la journée pour la plage d'analyse identifiée (estimation d'indicateurs moyens par heure, tous jours confondus).
- Périodes horaires (F) : 4 périodes horaires ont été créées pour faciliter les estimations : pointe AM (6h-9h), hors-pointe jour (9h-15h), pointe PM (15h-19h) et hors-pointe nuit (20h-6h). Ces périodes peuvent être modifiées puisque l'estimation des statistiques par période s'appuie sur l'unité temporelle de base qu'est l'heure.
- Jour de la semaine (F) : les statistiques peuvent être compilées pour chaque jour de la semaine ; ainsi, une statistique serait estimée pour l'ensemble des lundis de la période d'analyse choisie et ainsi de suite. Les sept jours de la semaine sont traités séparément.
- Type de jour (F) : le type de jour correspond à la segmentation entre les jours ouvrables et non ouvrables (qui contiennent les jours de fin de semaine ainsi que les jours fériés, tels que déterminés à la section 3.1.3.2). Les statistiques sont compilées séparément pour les deux types de jour.

Il faut noter que les statistiques ainsi estimées seront aussi représentées en fonction d'autres paramètres de classification. Ainsi, il sera possible de calculer des moyennes par période horaire et par jour. La conception des graphiques d'analyse est faite de façon à optimiser l'exploitation des données à la lumière des unités d'analyse choisies.

6.2.5 Unités spatiales

L'unité spatiale de base est le tronçon de 100 mètres. En effet, le réseau routier à l'étude (réseau supérieur de la région de Montréal, tel qu'identifié en collaboration avec le Ministère) est systématiquement segmenté en tronçons de 100 mètres et les données brutes reçues de Taxi Diamond et Communauto sont affectées sur ces tronçons. Ainsi, les données enregistrées sont toutes les vitesses instantanées géolocalisées sur chaque tronçon.

Plusieurs unités d'analyse spatiales peuvent ensuite être créées à partir de l'unité spatiale de base. Si l'unité d'analyse choisie est le tronçon, alors les statistiques seront présentées pour chaque tronçon de la période d'analyse choisie alors que si une autre unité est choisie, les données seront agrégées pour celle-ci (une statistique par région par exemple). Ces unités peuvent aussi être choisies comme filtre ou analyse (étudier les segments d'une route par exemple) (les codes A et F indiquent si l'unité pourrait être utilisée comme critère de filtre et/ou d'analyse). Les unités d'analyse spatiale sont (voir aussi Figure 21 pour une illustration de certaines des unités):

- Tronçon (A): il est possible de conserver le tronçon comme unité d'analyse ; c'est d'ailleurs la plus fine unité spatiale disponible.
- Segment (F): un segment est une séquence de tronçons consécutifs située entre deux nœuds consécutifs d'un corridor. Des nœuds ont été codés aux principaux échangeurs et points de connexion de routes appartenant au réseau d'analyse. Il est donc possible de produire des statistiques agrégées pour chaque segment (un indicateur par segment) ou d'utiliser le segment comme variable de filtre et de poursuivre les analyses par tronçon.
- Sous-corridor (F): un sous-corridor est une séquence de tronçons consécutifs située entre deux nœuds d'un corridor.
- Corridor (F): un corridor réfère à une entité géographique routière numérotée (l'autoroute 10 par exemple). Ces unités spatiales ne sont pas mutuellement exclusives en ce sens que les corridors ont été codés afin d'assurer une représentation complète des cheminements types.
- Région (F): les huit grandes régions d'analyse utilisées notamment dans les fichiers d'enquête Origine-Destination ont été retenues pour permettre l'obtention de résultats pertinents d'un point de vue géopolitique. Chaque tronçon est associé à la région qui en contient la plus grande part. Les analyses conduites par région permettent d'estimer des statistiques sur les conditions de circulation pour l'ensemble des tronçons du réseau à l'étude et localisés à l'intérieur de la région.
- GRM (F): des statistiques globales peuvent être compilées pour l'ensemble du réseau à l'étude (grande région de Montréal).

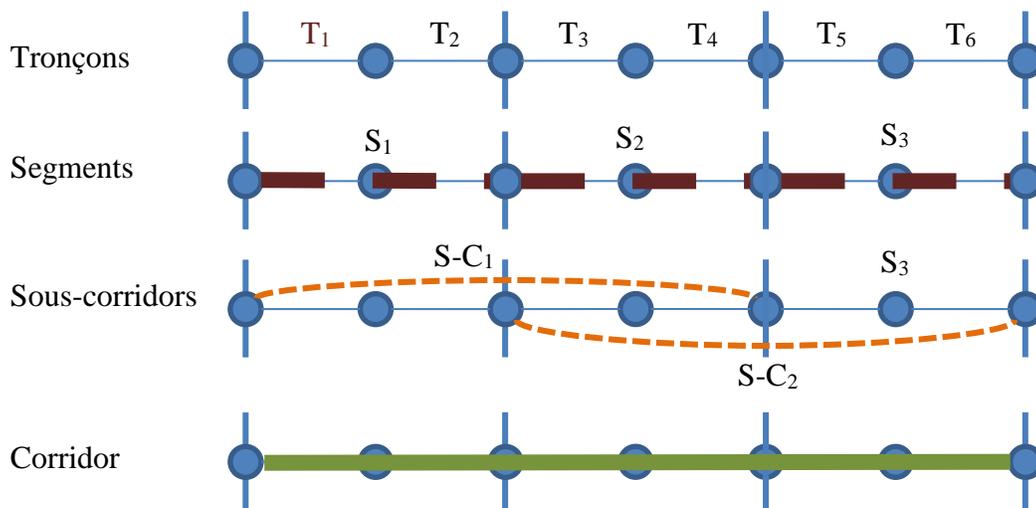


Figure 21 – Illustration de certaines unités d'analyse spatiale

Certains choix ont été faits pour le développement du prototype d'outil, ce qui signifie que toutes les combinaisons possibles n'ont pas été implantées. Toutefois, il est important d'indiquer les possibilités pour les phases ultérieures de développement.

6.3 Paramètres de sélection

Pour faciliter la tâche de production de résultats, trois feuilles de consultation ont été développées : 1) Analyse section, 2) Analyse explicative et 3) Analyse comparative. Ces trois approches partagent grosso modo les mêmes types de représentation, mais ont des paramètres de sélections et filtrage adaptés à leur contexte spécifique d'analyse. Certaines visualisations sont en outre adaptées pour répondre plus spécifiquement aux besoins de chaque analyse.

1. L'analyse section porte spécifiquement sur l'étude approfondie d'une période donnée et vise à produire des résultats synthèses de cette période, pour différentes combinaisons d'unités spatiale et temporelle.
2. L'analyse explicative propose l'estimation d'un modèle simple croisant probabilité de congestion (selon un seuil établi à 0.6 de la vitesse affichée) et quelques variables explicatives notamment les conditions météorologiques. Cette section examine aussi les différences de conditions de circulation pour une typologie de conditions météorologiques.
3. L'analyse comparative facilite les analyses avant/après en permettant de comparer des statistiques pour une même unité spatiale, mais à deux périodes de temps (septembre 2014 vs septembre 2015 par exemple). La sélection des deux périodes à comparer doit se faire par blocs de mois.

La première interaction avec l'outil consiste à sélectionner une période globale d'analyse (date de début et de fin – par blocs mensuels - ou ensemble de mois/années).

La figure qui suit résume la démarche de production d'analyses avec l'outil.

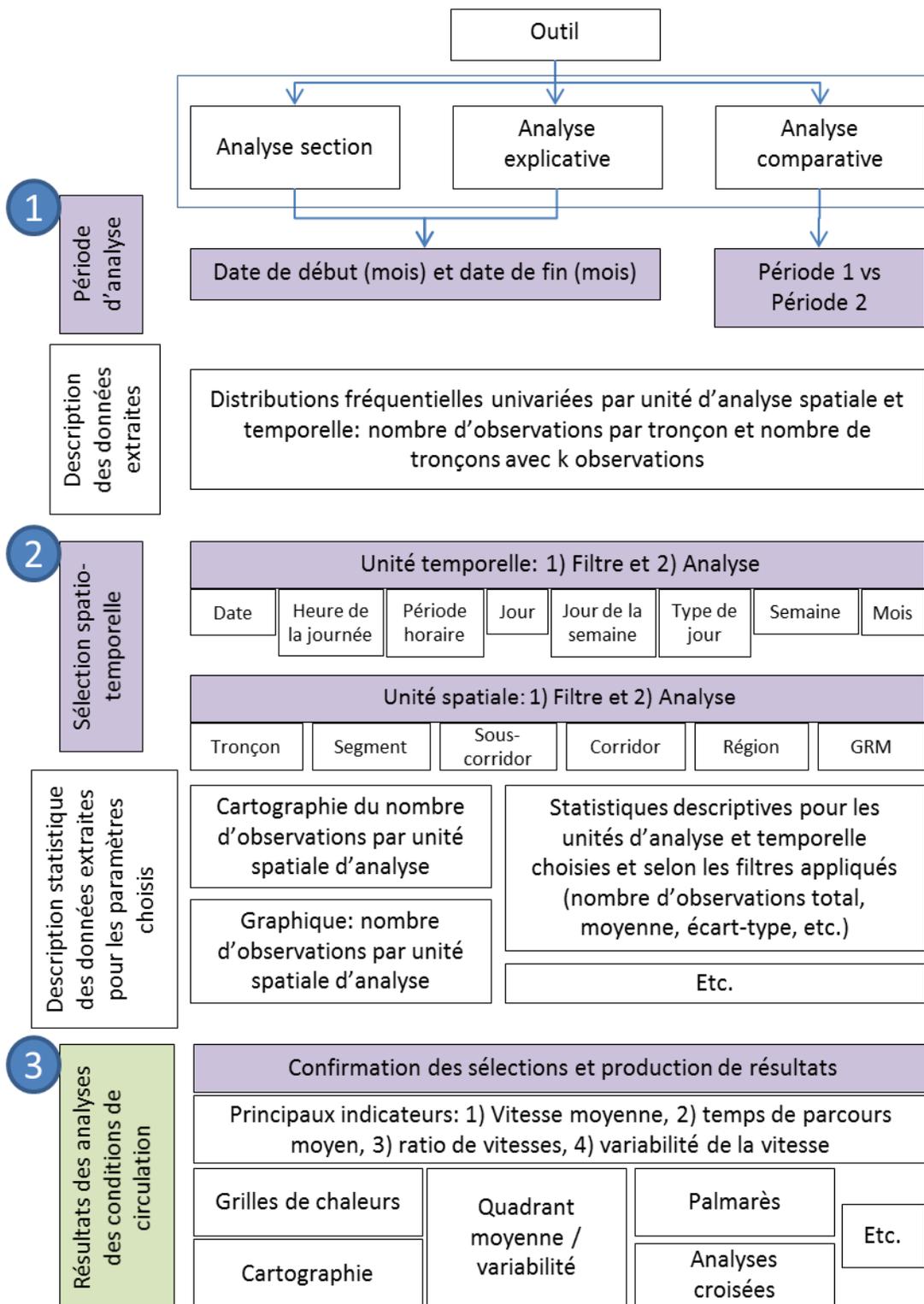


Figure 22 – Représentation schématique des étapes d'analyse de l'outil

6.4 Analyse des échantillons de données après la sélection de la période d'analyse

Suite à la sélection d'une période d'analyse, une première série de graphiques (principalement univariés) documentant le contenu global de l'échantillon de données disponibles est produite. Le contenu global est documenté à l'aide de deux indicateurs : 1) le nombre d'observations (le nombre de vitesses instantanées géolocalisées) et 2) le nombre de tronçons-heures avec k observations (k étant potentiellement utilisé comme critère de filtre). Différents graphiques descriptifs sont produits ; par ailleurs, des statistiques synthèses sont fournies (nombre de jours, nombre de chaque jour de la semaine, etc.):

- Distribution fréquentielle du nombre de tronçons-heure selon le nombre d'observations disponibles (en abscisse : nombre d'observations par tronçon heure, en ordonnée : nombre de tronçons-heure ayant x observations)
- Nombre d'observations par heure et jour de la semaine

Graphiques selon les unités temporelles d'analyse :

- Nombre d'observations par heure de la journée et nombre de tronçons-heures avec k observations par heure de la journée
- Nombre d'observations par jour et nombre de tronçons-heures avec k observations par jour
- Nombre d'observations par jour de la semaine et nombre de tronçons-heures avec k observations pour chaque jour de la semaine
- Nombre d'observations par type de jour (sous forme de tableau) et nombre de tronçons-heures avec k observations par type de jour

Graphiques selon les unités spatiales d'analyse :

- Nombre d'observations par corridor et nombre de tronçons-heures avec k observations par corridor
- Nombre d'observations par région et nombre de tronçons-heures avec k observations par région

Dans le cas d'une analyse comparative, deux plages distinctes de données sont produites et traitées en parallèle. Ainsi deux ensembles de graphiques similaires sont générés, un ensemble par plage d'analyse.

6.5 Analyse descriptive de l'échantillon après la sélection des unités spatiale et temporelle de filtre et d'analyse

La deuxième interaction de l'utilisateur vise à identifier les unités d'analyse et de filtre, spatiales et temporelles. Pour chaque type d'unité (spatiale ou temporelle), l'utilisateur doit déterminer le critère de filtre puis le critère d'analyse (qui sera fonction du filtre choisi). L'unité d'analyse est l'unité selon laquelle les statistiques seront compilées (une seule statistique par unité d'analyse) alors que l'unité de filtre permet de ne conduire les estimations que sur un sous-ensemble prédéterminé de données (les jours ouvrables par exemple).

6.5.1 Principales combinaisons

Les tableaux qui suivent présentent les principales combinaisons possibles. Dans le cas des unités temporelles, plusieurs filtres peuvent s'appliquer simultanément. Pour le moment, seules les combinaisons par défaut sont implantées dans l'outil, mais les autres combinaisons pourront être expérimentées lors de phases ultérieures de développement.

Tableau 29 – Code de couleurs utilisées dans les tableaux suivants

LÉGENDE	
	Combinaison recommandée
	Filtre avec une seule unité d'analyse
	Combinaison non recommandée
	Combinaison non disponible
	Par défaut

Tableau 30 – Combinaisons possibles des unités spatiales

Combinaisons possibles Unités spatiales		ANALYSE					
		Tronçon	Segment	Sous-corridor	Corridor	Région	GRM
FILTRE	Tronçon						
	Segment						
	Sous-corridor						
	Corridor						
	Région						
	GRM						

Tableau 31 – Combinaisons possibles des unités temporelles

Combinaisons possibles Unités temporelles		ANALYSE							
		Date*Heure	Heure de la journée	Période horaire	Date	Jour de la semaine	Type de jour	Semaine	Mois
FILTRE	Date*Heure	Par défaut							
	Heure de la journée								
	Période horaire								
	Date								
	Jour de la semaine								
	Type de jour								
	Semaine								
	Mois								

6.5.2 Analyse de l'échantillon disponible

Lorsque les unités de filtre et d'analyse sont choisies, l'outil fournit une description statistique de l'échantillon de données disponibles. Cette étape vise à informer l'analyste des données disponibles selon les critères choisis puisque cela permettra de mieux évaluer la pertinence des résultats qui seront produits avec ce sous-ensemble. Logiquement, une requête pourra être enregistrée à cette étape puisque si un usager évalue que la combinaison choisie est pertinente, il pourra souhaiter la réutiliser ultérieurement.

Il est important de mentionner que plusieurs combinaisons de filtre*analyse sont possibles (tel que montré aux tableaux précédents) et que les graphiques produits sont adaptés en fonction de ces combinaisons. Pour cette section, nous recourrons aux mêmes indicateurs que précédemment à savoir : 1) le nombre d'observations (le nombre de vitesses instantanées géolocalisées) par unité d'analyse spatiale et temporelle et 2) le nombre d'unités spatiales d'analyse * unité temporelle d'analyse avec k observations (k étant potentiellement utilisé comme critère de filtre). En effet, les unités d'analyse entrent en ligne de compte dans l'identification du nombre d'observations puisque l'usager choisit maintenant d'agréger à un niveau différent de l'unité de base (sauf s'il choisit le tronçon comme unité d'analyse spatiale et la date*heure comme unité d'analyse temporelle).

Puisqu'il n'est pas possible de dresser une liste exhaustive des différentes combinaisons, des exemples sont proposés :

- Tabulation des principales statistiques descriptives soit : nombre total d'observations, nombre moyen d'observations par unité spatiale et temporelle d'analyse, % des unités spatiale et temporelle d'analyse sans observation.

- Distribution fréquentielle du nombre de tronçons-heure selon le nombre d'observations disponibles (en abscisse : nombre d'observations par tronçon heure, en ordonnée : nombre de tronçons-heure ayant x observations)
- Nombre d'observations par heure et jour de la semaine
- Nombre d'observations par heure de la journée et nombre de tronçons-heures avec k observations par heure de la journée (faire une distribution pour les jours ouvrables et une autre pour les jours non ouvrables)
- Nombre d'observations par jour et nombre de tronçons-heures avec k observations par jour
- Nombre d'observations par jour de la semaine et nombre de tronçons-heures avec k observations pour chaque jour de la semaine
- Nombre d'observations par type de jour (sous forme de tableau) et nombre de tronçons-heures avec k observations par type de jour

Lorsque ces différents résultats ont été examinés et que l'analyste est satisfait de l'ensemble de données choisi et des critères de filtre et d'analyse, il peut passer à l'étude des conditions de circulation à proprement parler.

6.6 Résultats des analyses des conditions de circulation

Après validation de la période d'analyse et du choix des unités de filtre et d'analyse spatiale et temporelle, l'outil procède à l'estimation des indicateurs de caractérisation des conditions de circulation. Les indicateurs décrits au chapitre 4 sont à la base de l'articulation des visualisations à cette étape. Ainsi les principaux indicateurs demeurent :

- la vitesse moyenne par unité spatiale d'analyse et sa variabilité ;
- le temps de parcours moyen par unité spatiale d'analyse et sa variabilité ;
- le ratio de la limite de vitesse RLV par unité spatiale d'analyse et sa variabilité.

Le choix d'unités spatiale et temporelle d'analyse (USTA) implique que les mesures de base, disponibles dans le fichier des tronçons-heures sont combinées pour produire de nouvelles valeurs. Ainsi, toute agrégation s'effectue en utilisant le nombre d'observations comme facteur de pondération. Lors de la création de la table des tronçons-heures, trois valeurs sont enregistrées pour chaque tronçon t et heure h : le nombre d'observations $n_{t,h}$, la vitesse moyenne (moyenne arithmétique) $Vmoy_{t,h}$ et son écart-type $s_{t,h}$. Lors d'estimations agrégées, ce sont ces valeurs qui sont utilisées. Ce qui est le plus représentatif est de procéder à l'estimation des vitesses moyennes en pondérant les vitesses moyennes par tronçon selon le nombre d'observations.

Ainsi, la vitesse moyenne par USTA est calculée comme suit :

$$V_{USTA} = \frac{\sum_{t,h \in USTA} n_{t,h} \times Vmoy_{t,h}}{\sum_{t,h \in USTA} n_{t,h}}$$

Le temps de parcours moyen par USTA est simplement obtenu en divisant la longueur totale de l'unité spatiale à l'étude par la vitesse moyenne calculée précédemment.

$$TP_{USTA} = \frac{\sum_{t,h \in USTA} n_{t,h} \times 100m}{V_{USTA}}$$

Le calcul de l'écart-type de la vitesse par USTA s'estime en pondérant par le nombre d'observations de vitesse avec l'équation suivante (similaire à la décomposition de la somme des carrés pour l'analyse de variance) :

$$s_{USTA}^2 = \frac{1}{\sum_{t,h \in USTA} n_{t,h}} \left(\sum_{t,h \in USTA} (V_{moy_{t,h}} - V_{USTA})^2 + \sum_{t,h \in USTA} n_{t,h} \times s_{t,h}^2 \right)$$

Puisque lors de l'agrégation, il est possible que des tronçons ayant des vitesses affichées différentes soient agrégés, il a été décidé d'utiliser la même approche que celle des vitesses pour calculer le ratio des vitesses moyen :

$$RLV_{USTA} = \frac{\sum_{t,h \in USTA} RLV_{t,h} * n_{t,h}}{\sum_{t,h \in USTA} n_{t,h}}$$

Les principales visualisations proposées sont :

- temps de parcours / vitesse / ratio de vitesses selon la période de la journée pour chaque USTA;
- grille spatio-temporelle des vitesses, temps de parcours et ratios de vitesse ;
- indicateur moyenne – variabilité des vitesses par USTA (approche en quatre quadrants) ;
- cartographie des temps de parcours, vitesse et ratios par USTA ;

7 Conclusion

Dans cette conclusion, nous présentons d'abord une brève synthèse des travaux effectués en fonction du retour sur les objectifs du projet. Ensuite, nous présentons les limitations de l'approche et présentons des perspectives en ce qui concerne le déploiement durable de l'outil.

7.1 Synthèse des travaux et retour sur les objectifs

Ce projet de recherche a permis de dresser les bases méthodologiques d'évaluation des conditions de circulation sur un réseau supérieur, de formuler et estimer différents indicateurs, de mettre en place des mécanismes automatisés d'accès et de traitement de données et de prototyper un outil de suivi et d'analyse de la congestion dans la grande région de Montréal. Voici comment nos travaux ont répondu aux objectifs énoncés dans le devis initial.

Objectif : doter le MTMDET d'un outil de mesure des conditions de circulation sur le réseau routier du MTMDET dans la grande région de Montréal, pour des fins de planification. Tel qu'entendu lors des différentes rencontres, nous avons développé un outil web prototype qui permet un accès illimité, par le MTMDET, à des interfaces de visualisation des conditions de circulation (vitesses et temps de parcours) sur le réseau supérieur de la région de Montréal.

Objectif : développer une série d'indicateurs de congestion. À partir d'une revue de littérature exhaustive des différents outils et systèmes équivalents, et à la suite de travaux exploratoires effectués à l'aide des données montréalaises, nous avons proposé quatre séries d'indicateurs, soit une série pour chaque objectif spécifique auquel devait répondre l'outil, nommément :

- la calibration des modèles régionaux (analyse avancée des distributions des temps de parcours sur les liens du réseau);
- l'évaluation des impacts d'une intervention (utilisation des vitesses moyennes hebdomadaires sur des segments routiers);
- la modélisation des conditions de circulation (discrétisation linéaire du réseau routier en tronçons uniformes de 100 m et utilisation de la grille spatiotemporelle du ratio des vitesses historiques);
- l'évaluation stratégique de la congestion (évolution du 15^e centile des tronçons les plus critiques dans des conditions comparables).

Ces indicateurs sont présentés à titre d'exemple dans ce rapport, mais nous sommes d'avis que l'utilisation régulière par le personnel du MTMDET amènera la réflexion encore plus loin à ce titre.

Objectif : contribuer à doter le MTMDET d'un registre permanent des conditions de circulation. La nature même de l'outil développé permet de conserver toutes les données historiques de vitesse et de temps de parcours sur les tronçons, ce qui fait office de registre des conditions.

Objectif : alimenter les exercices de planification du MTMDET. À ce titre, l'outil développé permet d'obtenir les conditions de circulation par segment, sous-corridor et corridor à différentes périodes, ce qui permet d'alimenter les analyses tendanciennes sur les conditions de circulation. Par ailleurs, ce rapport présente une amorce de modélisation des conditions de circulation en fonction de différents éléments tels que les conditions météorologiques et des variables spatiales (lieux) et

temporelles (heure de la journée). Les conséquences potentielles de faire varier le seuil d'identification de la congestion ont été discutées. Dans le contexte de l'outil, un croisement entre les données météorologiques et les conditions de circulation est proposé.

7.2 Limitations

Ce projet et ses expérimentations ont mis en lumière quelques limitations, dont la plupart devraient pouvoir se résorber dans un contexte d'utilisation permanente de l'outil. Certains de ces enjeux sont discutés dans la section suivante.

D'abord, la couverture échantillonnale des données actuellement disponibles se limite aux secteurs du territoire où oeuvrent les voitures-taxis ou les voitures d'autopartage. En effet, l'utilisation en grande majorité des données de la compagnie Taxi Diamond, qui agit principalement au cœur de la grande région de Montréal, fait en sorte que les taux d'échantillonnage de certains segments routiers éloignés sont plus faibles, ce qui empêche d'y calculer des indicateurs probants. Mais puisque l'outil est destiné à recevoir d'autres sources de données similaires (par exemple, nous avons expérimenté l'introduction des données de Communauto), nous croyons que cette problématique d'échantillonnage se résorbera d'elle-même avec l'introduction d'autres sources. Cela permettra de calculer les indicateurs avec une plus grande précision et de façon plus large.

Pour le moment, les indicateurs reposent majoritairement sur des données provenant de voitures-taxis. En milieu urbain, il est possible que le comportement des chauffeurs soit différent de celui de la majorité des conducteurs citoyens ; par contre sur le réseau routier supérieur, nous ne croyons pas qu'il y ait de différence significative à cet égard, sauf dans le cas des voies réservées pouvant être empruntées par les taxis. Dans ce dernier cas, les segments routiers pourraient être pré-identifiés et une mise en garde pourrait être affichée. Ceci dit, l'inclusion de données provenant d'autres sources (non taxi) comme Communauto permettra d'atténuer cette différenciation.

Une autre difficulté de ce projet a été l'inclusion automatisée de données exogènes provenant du MTMDET telles que des données météorologiques, des données d'incidents ou des données de comptage et de vitesse ponctuels. Notre outil possède déjà la structure nécessaire pour les accueillir, mais l'import automatique de données n'a pas pu être mis en place et ne pourra l'être tant que des flux continus ou des mécanismes systématiques de transmission de ces données ne seront pas disponibles.

7.3 Enjeux pour le déploiement durable de l'outil

Les limites énoncées ainsi que l'expérience acquise pendant la durée du projet permettent d'énoncer une série d'enjeux liés au déploiement durable de l'outil. Rappelons que ce projet a été développé en parallèle du système informatique du Ministère afin de permettre toute la flexibilité inhérente au développement de l'outil au sein du milieu universitaire. Dans cette section, nous exposons des éléments qui permettraient au Ministère de continuer de disposer de cet outil.

7.3.1 Données de vitesse et temps de parcours

Le premier enjeu est relatif à la disponibilité pérenne et diversifiée de données témoignant des conditions de circulation. Pour le moment, l'équipe de recherche a acquis un accès automatisé aux données de Taxi Diamond. Il est important d'assurer que cet accès soit maintenu par des ententes entre le MTMDET et les fournisseurs de données et qu'il puisse même être confirmé en ce qui a trait à la possibilité de rendre les données traitées exportables par les usagers de l'outil.

Aussi, une des limitations actuelles de l'outil est la couverture de l'échantillon de points disponibles. Dans ce contexte, un des éléments clés pour améliorer l'outil est d'amplifier et diversifier les sources de données :

- Amplification. Déjà, l'équipe de recherche a identifié de nouveaux partenaires détenant des données pertinentes pour la mesure des conditions de circulation. Notamment, l'équipe a récemment eu accès à des flux de données d'autres compagnies de taxi fonctionnant avec les systèmes embarqués de la compagnie Fraxion. L'équipe a eu l'occasion d'explorer des journées de données de la compagnie Taxi Hochelaga qui permettent d'obtenir des points toutes les 2 secondes. Cette granularité de données permet d'estimer des temps de parcours entre deux points successifs ainsi que d'estimer des vitesses par tronçon. L'exploitation et l'intégration de ce type de données dans l'outil de consultation des conditions de circulation présentent certains défis techniques, mais s'avèrent extrêmement prometteuses pour l'enrichissement du taux d'échantillonnage des segments, d'autant plus que cette compagnie détient des permis dans l'agglomération Est de l'île de Montréal (alors que Taxi Diamond opère la majorité de ses permis dans l'agglomération centrale de l'île). Les autres intermédiaires en taxi avec qui collabore l'équipe de recherche et qui opèrent avec le système de Fraxion sont Coop de l'Ouest et Taxelco (taxis électriques).

La Figure 23 ci-dessous présente les points disponibles pour une journée (le 19 février 2016) d'opération de taxi Hochelaga. Les points sont colorés en fonction de la vitesse instantanée. Pour la journée du 19 février 2016, plus de 5 755 000 points GPS ont été enregistrés à bord de 428 véhicules.

- Diversification. Un second enjeu est celui de la diversification : il ne s'agit pas seulement d'avoir plus d'observations, mais d'assurer que d'autres types de véhicules fournissent des données. Les données des véhicules de Communauto sont une piste intéressante, mais il reste des défis technologiques à régler pour pouvoir en faire une source continue et fiable de données. D'autres flottes de véhicules doivent être considérées, celles des abonnés aux services de suivi par les compagnies d'assurance étant notamment d'intérêt (AJUSTO par exemple). Aussi, il ne faut pas négliger les données sur lesquelles s'appuient déjà différents outils comme les données des téléphones cellulaires ou les données d'instrumentation fixe (capteurs Bluetooth, données de boucles avec vitesses).

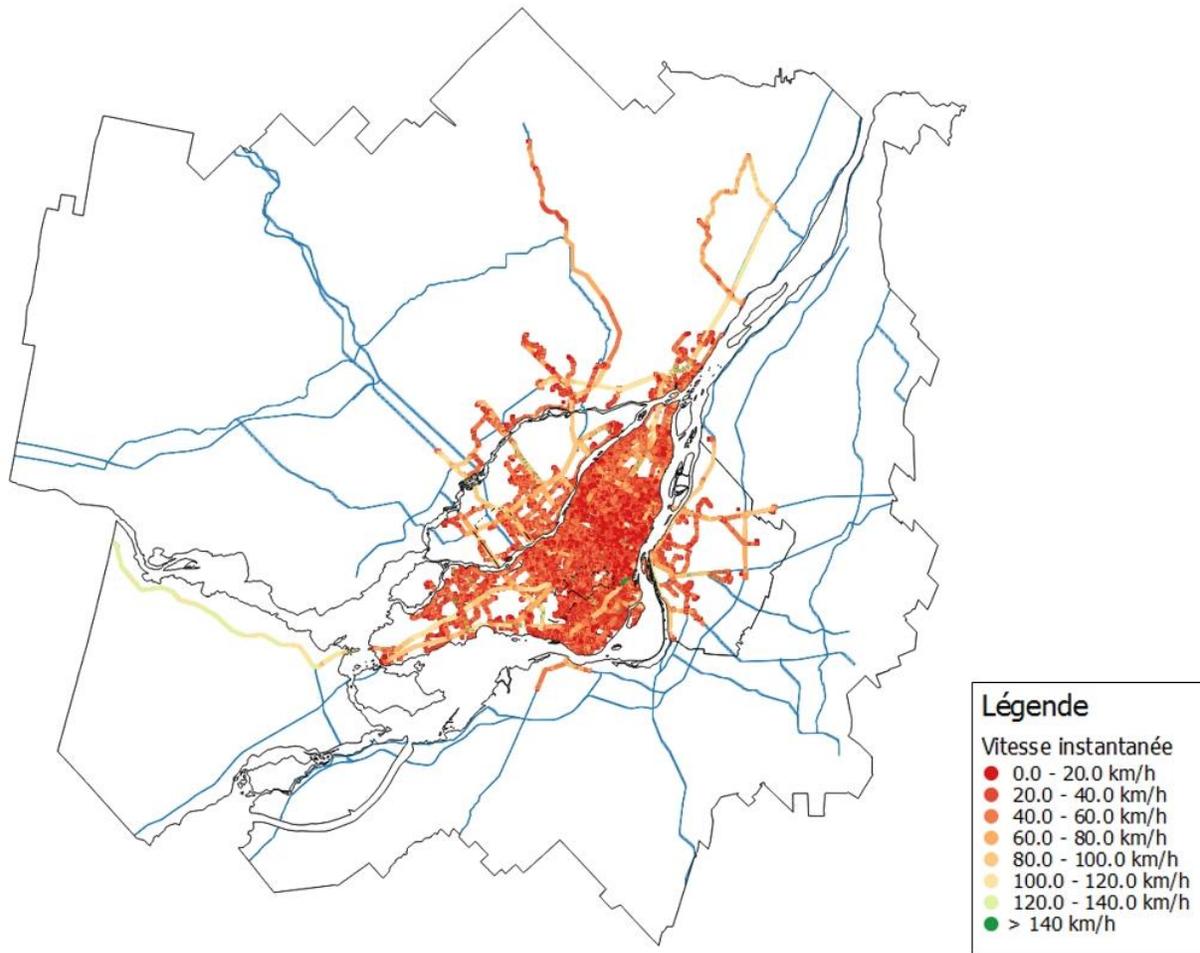


Figure 23 – Points GPS de taxi Hochelaga pour la journée du 19 février 2016

7.3.2 Actualisation de l'outil

Le second enjeu est lié à la nécessité de prévoir une actualisation continue de l'outil, tant d'un point de vue des technologies utilisées que des données de référence :

Interface. Les technologies progressent très vite : cela offre de nouvelles opportunités, mais exige aussi une actualisation quasi continue des supports pour en assurer la compatibilité avec les nouveaux logiciels.

Données de référence. La pertinence de l'outil est aussi liée à sa capacité d'être à jour en ce qui concerne les infrastructures du transport. Le réseau routier étant appelé à changer dans la région, il sera nécessaire de coder les nouveaux tronçons et d'assurer la possibilité de faire des analyses historiques tout en tenant compte de ces nouvelles configurations.

Données de conditions de circulation. Si de nouvelles sources de données témoignant des conditions de circulation sont trouvées, il faudra assurer le développement des procédures permettant de les intégrer dans le système d'information proposé. Il n'est pas possible actuellement d'imaginer les différents formats de données qui pourraient s'avérer disponibles ; un développement méthodologique sera requis pour faire l'intégration de toute nouvelle source,

notamment celles s'intéressant aux temps de parcours observés sur des segments ou des sous-corridors.

7.3.3 Modalités de consultation et actualisation

L'outil est hébergé sur un serveur web de Polytechnique Montréal. Les professionnels du Ministère peuvent y accéder, avec des codes d'accès et mots de passe spécifiques, depuis tout ordinateur connecté à Internet, ce qui facilite grandement sa diffusion. L'accès est protégé par code d'accès et mot de passe.

8 Références

- Aftabuzzaman, M. (2007). *Measuring Traffic Congestion-A Critical Review*. Présenté au 30th Australasian Transport Research Forum, Melbourne, Australie.
- Bertini, R. L. (2006). *You Are the Traffic Jam: An Examination of Congestion Measures*, Transportation Research Board, Washington DC.
- Boarnet, M. G., Kim, E. J., & Parkany, E. (1998). *Measuring Traffic Congestion*. Transportation Research Record, No. 1634, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Buisson C. & Lesort J-B. (2010). *Comprendre le trafic routier : méthodes et calculs*. Éditions du CERTU, Paris.
- Cambridge Systematics. (2005). *Traffic Congestion and Reliability: Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation*.
- Cambridge Systematics, Inc., University of Maryland, Center for Advanced Transportation Technology, and Resource Systems Group. (2010). *Measuring Transportation Network Performance*. NCHRP Report 664, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Crownover (2006). Use of Short-term interval counts to determine K Factors, <http://www.oregon.gov/ODOT/TD/TP/docs/reports/kfactorreport.pdf> (page consultée le 19 mars 2016).
- Downs, A. (1992). *Stuck In Traffic: Coping With Peak-Hour Traffic Congestion*. Brookings Institution Press.
- Downs, A. (2005). *Still Stuck In Traffic: Coping With Peak-Hour Traffic Congestion*. Brookings Institution Press.
- FHWA (2006). *Travel Time Reliability: Making It There On Time, All The Time*. Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Gourvil, L., & F. Joubert. (2004). *Évaluation de la congestion routière dans la région de Montréal*. Ministère des Transports du Québec.
- INRIX (2009). *Benchmarking Traffic Data Quality: Best Practices for Analyzing the Quality of Traffic Information*.
- Kwon J., M. Mauch, and P. Varaiya. (2006). *The Components of Congestion: Delay from Incidents, Special Events, Lane Closures, Weather, Potential Ramp Metering Gain, And Excess Demand*. Transportation Research Record, No. 1959, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 84–91.
- Ladier, C. (2006), *Circulation routière : Usages et qualités des indicateurs*, mémoire de maîtrise, INRETS/ENTPE, 86 pages.
- Lasley, P., T. Lomax, B. Eisele, & D. Schrank (2014). *Developing A Total Peak Period Travel Time Performance Measure: Updated Concept Paper*. Présenté au 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Litman, T. (2013). *Critical Evaluation of the “Urban Mobility Report”*

- Lomax, T. J., & Christiansen, D. L. (1982). *Estimates of Relative Mobility in Major Texas Cities*(Vol. 323). Texas Transportation Institute, Texas A&M University System.
- Lomax, T., et al. (1997). *NCHRP Report 398: Quantifying Congestion, Volume 1: Final Report*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Loustau, P. (2009). *Modélisation des temps de parcours sur un réseau routier à l'aide de données de véhicules flottants*, Mémoire de maîtrise (M.Sc.A.), Département de mathématiques et génie industriel, Polytechnique Montréal, 215 pages.
- Loustau, P., V. Grasset, C. Morency, and M. Trépanier (2010). *Comparing Floating Car Data and Carsharing GPS Data for Travel Time Assessment*. Présenté au 12th World Conference on Transport Research, Lisbon, Portugal.
- Lyman, K., & Bertini, R. L. (2008). *Using travel time reliability measures to improve regional transportation planning and operations*. *Transportation Research Record*, No. 2046, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 1-10.
- Morency, C., M. Trépanier, & N. Saunier (2011). *Évaluation des enjeux analytiques et des potentialités des données de temps de parcours pour mesurer la fiabilité du réseau routier montréalais*, Ministère des Transports du Québec.
- Shaw, T. (2003). *Performance Measures of Operational Effectiveness for Highway Segments and Systems*, NCHRP Synthesis 311, Transportation Research Board, Washington D.C.
- Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE). (2007). *Managing Urban Traffic Congestion*, Paris, France.
- Pack, M. L. (2012). *Wide-Area, web-Based Mobility Analysis Using Probe Data*. Présenté au 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.
- Remias, S. M., T. M. Brennan, C. M. Day, H. T. Summers, D. K. Horton, E. D. Cox, and D. M. Bullock (2014). *Spatially Referenced Probe Data Performance Measures for Infrastructure Investment Decision Makers*. Présenté au 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Robitaille, M., & Nguyen, T. (2003). *Évaluation de la congestion « De la théorie à la pratique » : Réseau routier de l'agglomération de Montréal*, communication présentée au Congrès 2003 de l'Association des Transports du Canada, St John's–Terre-Neuve.
- Saunier, N., & C. Morency. *Comparing Data from Mobile and Static Traffic Sensors for Travel Time Assessment*, 1st Conference on Integrated Transportation & Development for a Better Tomorrow, Chicago, 2011.
- Schrank, D. L., Turner, S. M., & Lomax, T. J. (1993). *Estimates of Urban Roadway Congestion-1990. Interim Report*.
- Schrank, D. L., Eisele B., & Lomax, T. J. (2011). *2011 Urban Mobility Report*. Texas A&M Transportation Institute.
- Schrank, D. L., Eisele B., & Lomax, T. J. (2012). *2012 Urban Mobility Report*. Texas A&M Transportation Institute.
- SHRP2 (2011). *Integrating Business Processes to Improve Travel Time Reliability*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

- SHRP2 (2014). *Establishing Monitoring Programs for Travel Time Reliability*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Tessier, Marc-André (2015). Développement d'indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- Transport Canada (TC). (2006). *Le coût de la congestion urbaine au Canada*, 31 pages.
- Transportation Research Board (2010). *Highway Capacity Manual 2010*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Transports Québec. *Autoroute 30 – Parachèvement*.
http://www.transports.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grands_projets/grands_projets_termine/parachevement_a30. Page consultée le 2013-11-28.
- Van Tilburg, C. (2007). *Traffic and congestion in the Roman Empire*. Routledge, Abingdon
- Wolniak, M. J., and S. Mahapatra (2014). *Data and Performance Based Congestion Management Approach for Maryland Highways*. Présenté au 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

9 Annexes

Les annexes sont disponibles sous forme de fichiers PDF.

Annexe 1 – Présentation AQTr 2014 « Congestion à Montréal : méthode d'analyse et de suivi »

Annexe 2 – Présentation ATC 2014 « Congestion à Montréal : méthode d'analyse et de suivi »

Annexe 3 – Affiche Colloque Chaire Mobilité 2014 « Indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière »

Annexe 4 – Affiche AQTr 2015 « Congestion à Montréal : Vers un outil d'analyse et suivi »

Annexe 5 – Affiche Colloque Chaire Mobilité 2015 « Indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière »

Annexe 6 - Article présenté au TRB 2016 « Impact of weather conditions on traffic : case study of Montreal's winter »

Annexe 7 – Poster présenté au TRB 2016 « Impact of weather conditions on traffic : case study of Montreal's winter »

Annexe 8 – Mémoire de Marc-André Tessier « Développement d'indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière», Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, 164 pages.

Annexe 9 – Captures d'écrans de l'outil de consultation

Annexe 1

Présentation AQTr 2014 « Congestion à Montréal : méthode d'analyse et de suivi »

Congestion à Montréal : méthode d'analyse et de suivi

MARC-ANDRÉ TESSIER

Étudiant à la maîtrise
marc-andre.tessier@polymtl.ca

DAVOOD ZALL

Étudiant au doctorat
davood.zall@polymtl.ca



CATHERINE MORENCY

Professeure agrégée
cmorency@polymtl.ca

MARTIN TRÉPANIER

Professeur titulaire
mtrepanier@polymtl.ca

NICOLAS SAUNIER

Professeur agrégé
nicolas.saunier@polymtl.ca

2014-04-02

49^e Congrès annuel

AQTr
L'expertise en transport

Plan de la présentation

1. Introduction
2. Objectifs du projet de recherche
3. Méthodologie générale du projet
4. Benchmarking des outils de congestion
5. Étude de cas
6. Conclusion

Congestion routière - Constats



- Enjeu numéro 1 des régions métropolitaines
- Nombreux impacts sur le développement durable



- 1.8 milliards \$ de pertes causées par la congestion dans la région de Montréal en 2008 (MTQ, 2013)
- Besoins de déterminer les causes de la congestion



- Aucun outil d'analyse et de suivi de la congestion au Québec
- Recherches antérieures ont démontré qu'un tel outil est possible avec les données actuellement disponibles (Sioui et Morency, 2013)



Réduire la congestion...

But commun :

- « éviter d'accentuer la congestion routière » - PMAD, CMQ
- « réduction des délais et des retards occasionnés par la congestion » - PMAD, CMM
- « décongestionner le réseau autoroutier de la métropole » - Parachèvement Autoroute 30, MTQ

Tout le monde s'entend pour dire que l'objectif est de **réduire la congestion**

Question

Comment mesurer la congestion ?

C'est le **défi** au cœur de ce projet de recherche!

2. Objectifs du projet de recherche



- **Projet de recherche avec le MTQ :**

« Doter le MTQ d'un **outil de mesure des conditions de circulation** sur le réseau routier du MTQ dans la grande région de **Montréal**, pour des fins de planification »

- **Objectifs spécifiques**

1. Calibration des modèles régionaux
2. Évaluation des impacts d'une intervention (avant-après)
3. Modélisation des conditions de circulation
4. Évaluation stratégique de la congestion

3. Méthodologie générale du projet

1. Benchmarking d'outils disponibles

- Revue des outils existants
- Identification des fonctions principales

2. Étude de cas

- Évolution des conditions de circulation sur A40
- Impacts de l'ouverture de A30

3. Prototypage d'un outil

4. Benchmarking des outils de congestion

Revue des outils existants

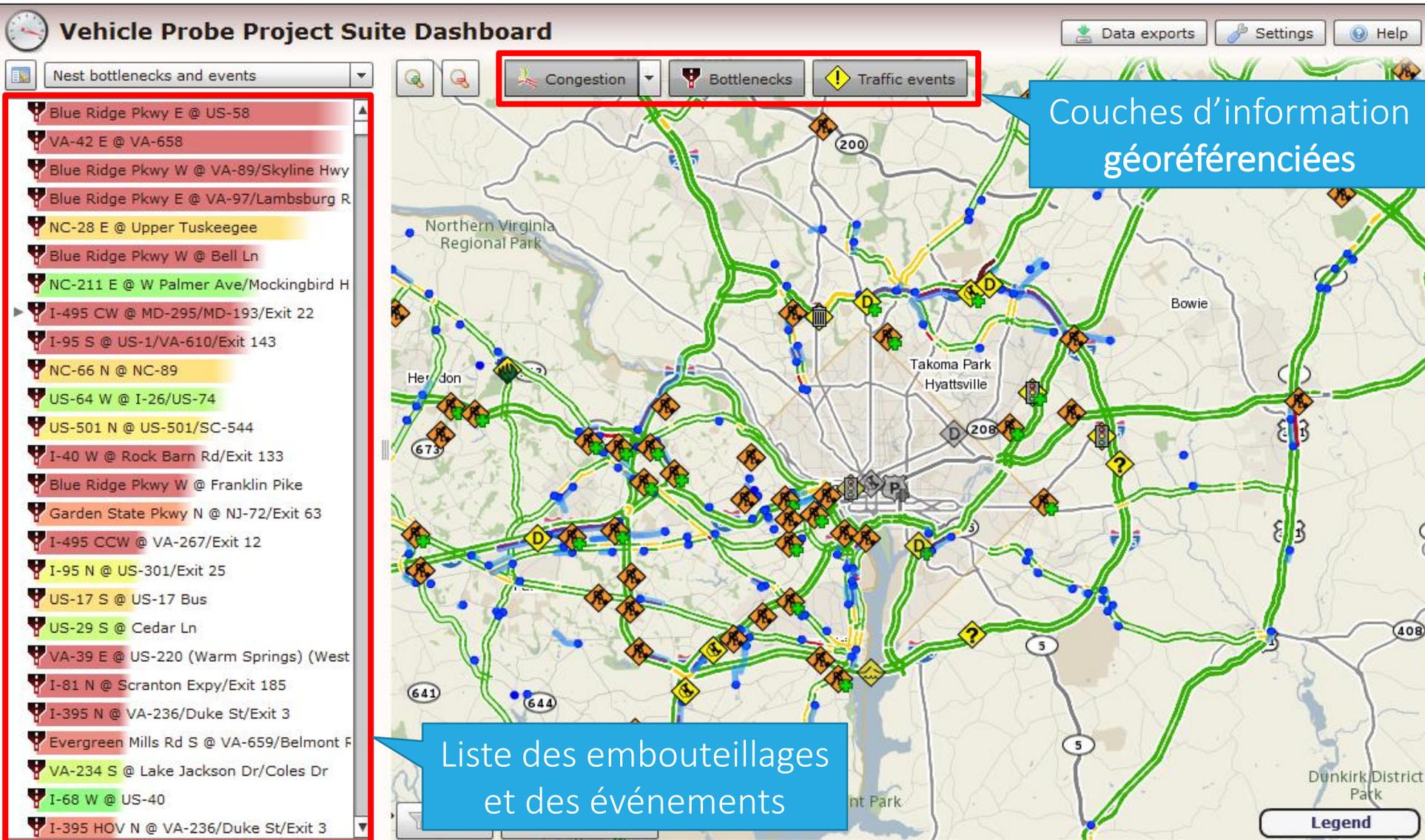
53 outils d'analyse de la congestion étudiés	
A. Analyse de données en temps réel	39
B. Analyse de données historiques	7
C. Temps réel et historique	7

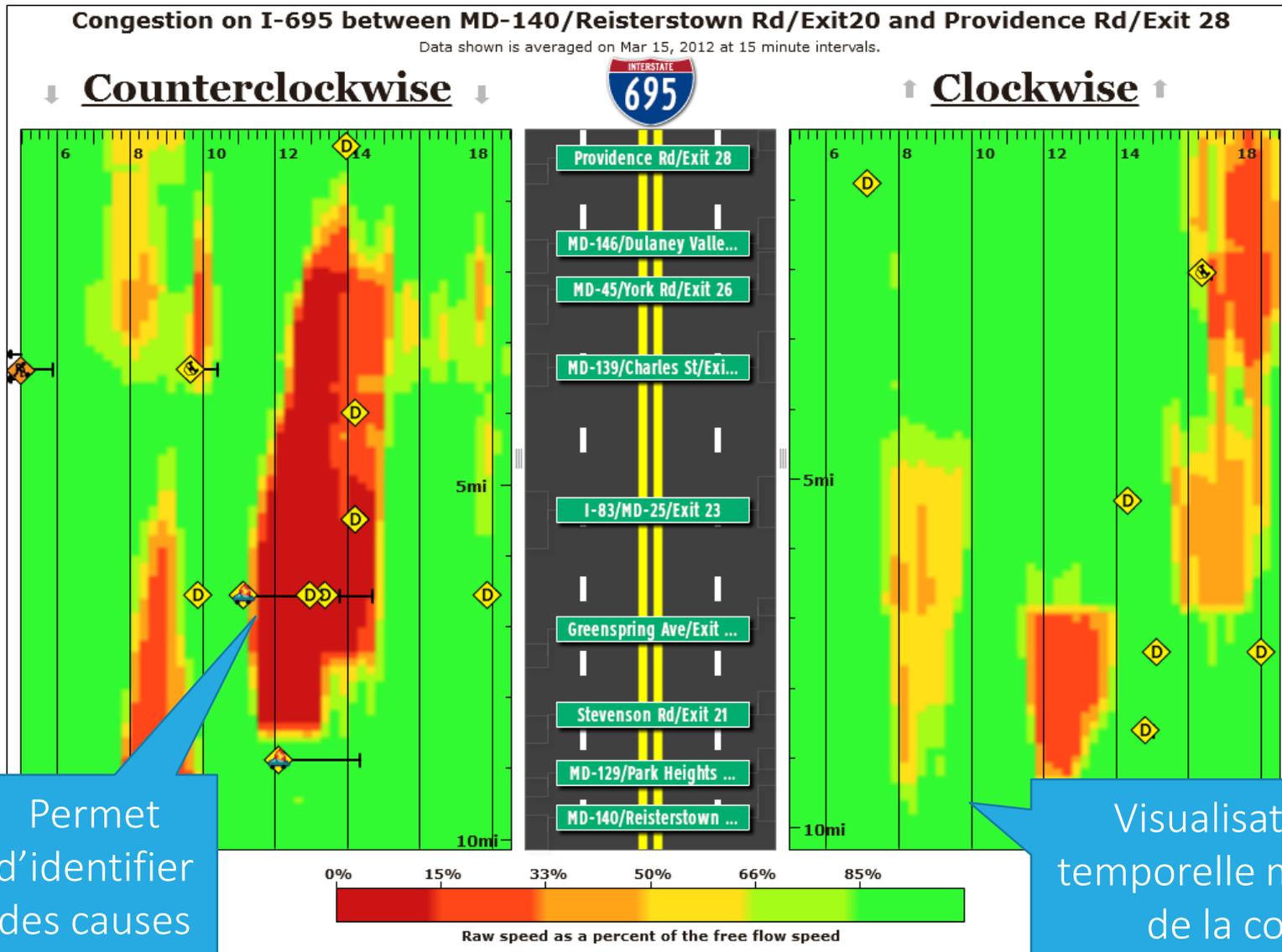
On se concentre sur les outils d'analyse des **données historiques**

Plateformes	
Web	13
Application iPhone	23
Application Android	12
Mac	1
PC	1
Toutes plateformes	3

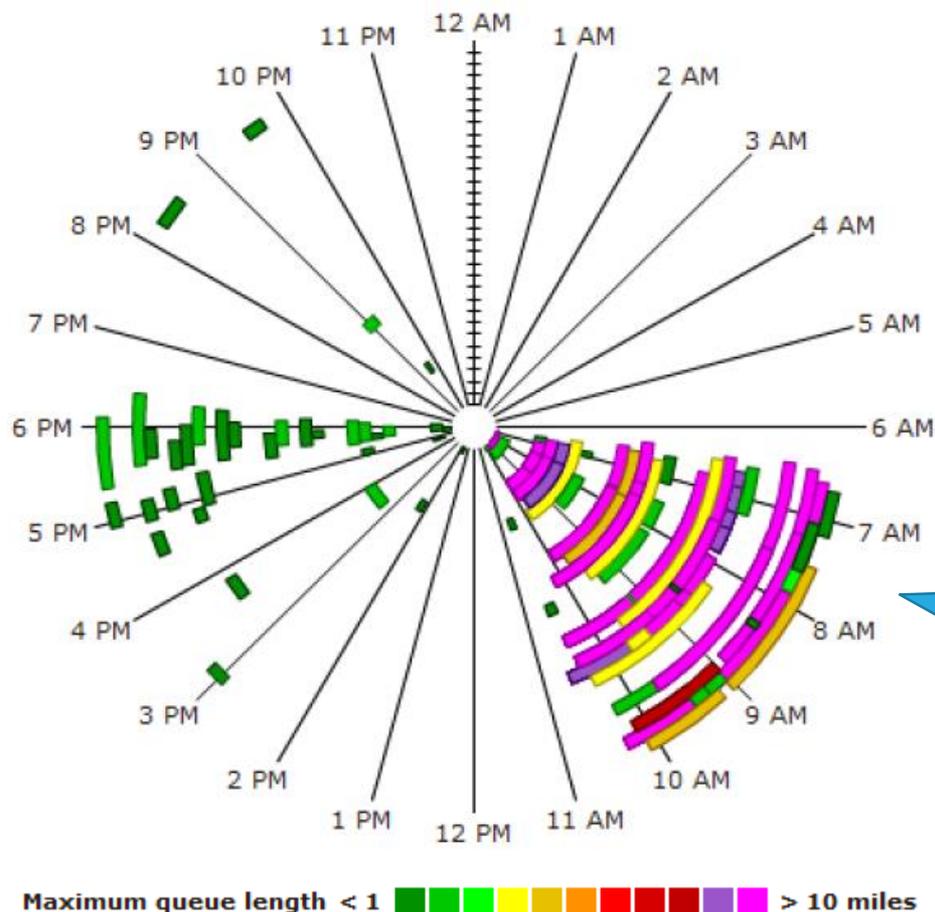
Quelques organisations :

- IBM
- CATT LAB
- FHWA
- TriMet
- INRIX
- TFL
- Midwestern Software Solution
- VehicleCounts
- TomTom
- MS2Soft
- GoAkami





Longueur de la file d'attente chaque jour pour un tronçon sur une période



Centre = 1^{er} avril 2012

Extrémité = 1^{er} mai 2012

Visualisation
temporelle simple
de la congestion
globale

TomTom Congestion Index (2013)

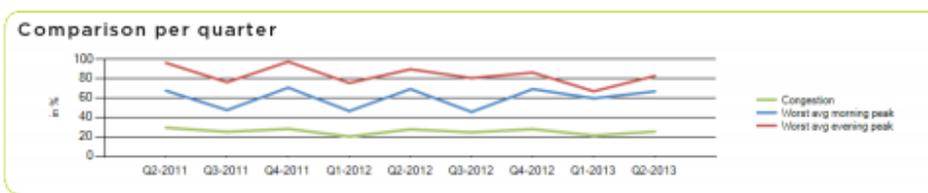
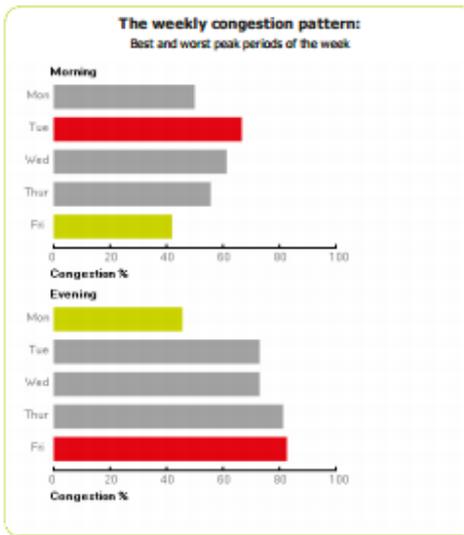
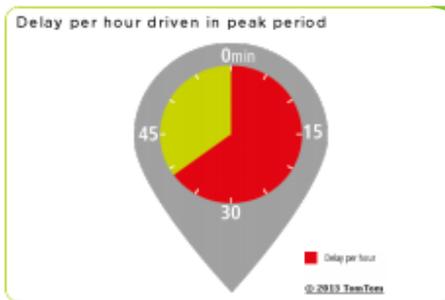
Montreal



Ranking

Ranking of city compared to all cities in the report	12/61
Congestion level on highways	23%
Congestion level on non-highways	29%
Delay per hour driven in peak period	38 min
Delay per year with a 30 min commute	89 h

Most congested specific day	Wed 15 May 2013
Total network length	2 073 km
Total network length highways	805 km
Total network length non-highways	1 268 km
Total vehicle kilometres	4 794 639 km



- Score unique pour toute la région
- Rapport simple et utile pour décideurs

Rapport annuel pour toutes les métropoles du monde, incluant Montréal

Tendances et statistiques globales

analyse et de suivi

Principaux outils actuels

INRIX Scorecard

<http://scorecard.inrix.com/scorecard/>

INRIX Scorecard Global

INRIX Scorecard Country



Canada

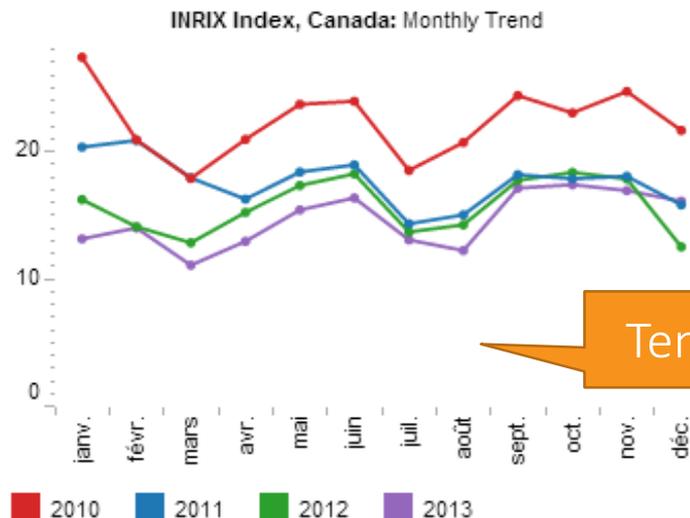
This Month	This Month LY	% Growth
16,0	12,4	28,9%
T12 Months	T12 Prior Year	% Growth
14,6	15,6	-6,7%

Trailing 12 months from

décembre 2013

Show Top

Top 25



INRIX Index

Canada

United States

Sélections pour produire les rapports

Tendances

Metro	Rank	T12 Months	This Month	This Month LY
Montreal	1	21,3	25,4	19,7
Toronto	2	17,8	17,9	12,1
Vancouver	3	16,6	15,1	15,3
Calgary	4	9,9	11,7	7,9
Ottawa	5	7,1	9,9	7,0

Top 25 Metros: Trailing 12 months from décembre 2013



Biggest Movers: YTD vs. Last Year

Toronto	1	9%
Ottawa	2	7%
Calgary	3	1%
Montreal	4	-8%
Vancouver	5	-24%

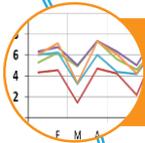
Biggest Movers: Current Month vs. Last Year

Toronto	1	48%
Calgary	2	48%
Ottawa	3	42%
Montreal	4	28%
Vancouver	5	-2%

Principales fonctions identifiées



1. Gestion des Utilisateurs (login, profil personnalisé)



2. Génération de tendances (sélections spatiotemporelles)



3. Cartographie (visualisation de couches géographiques)



4. Production de rapports personnalisés



5. Gestion des données (importer, exporter, sauvegarder)



6. Manipulation des données (modifier les paramètres des indicateurs)

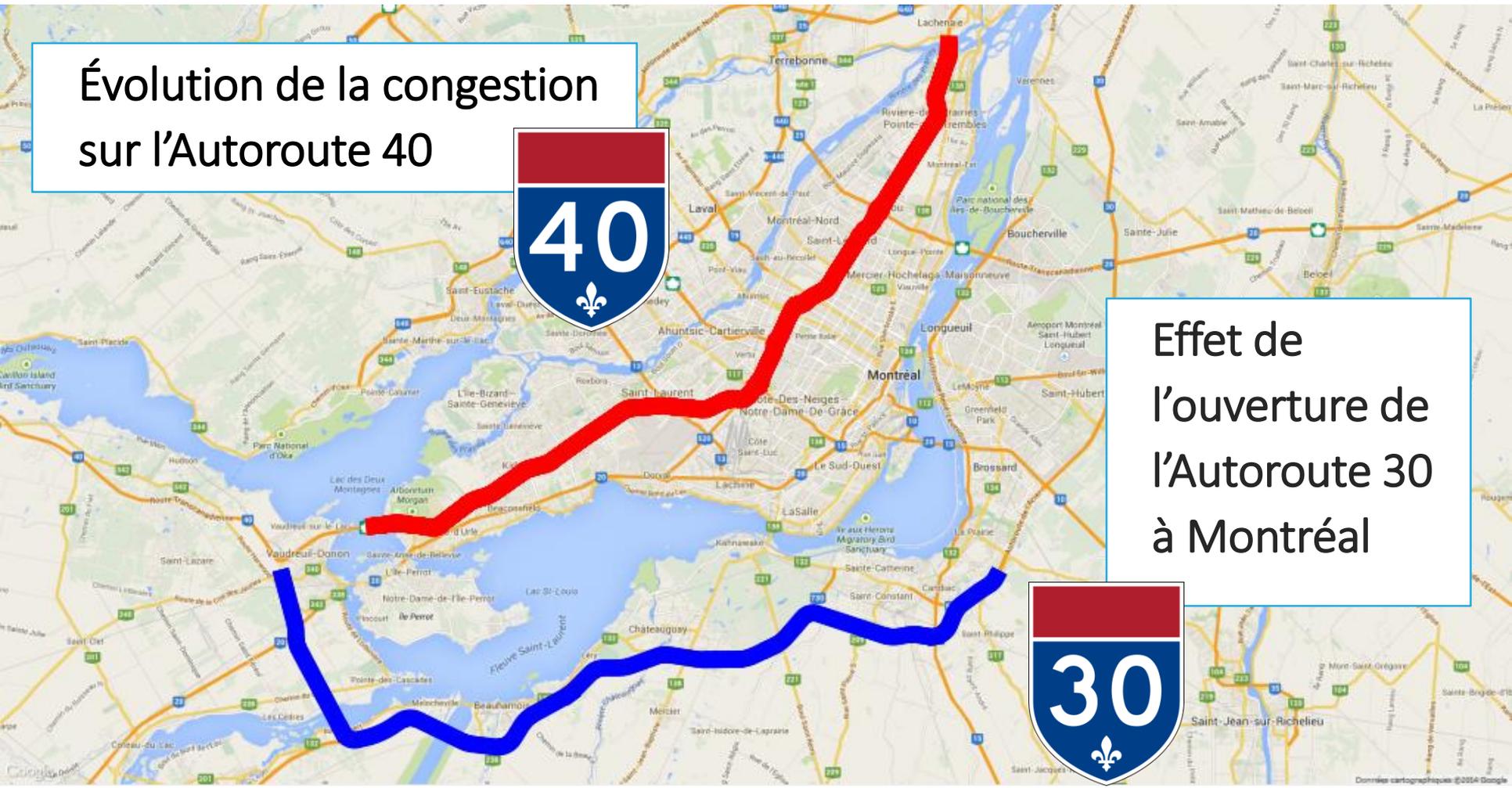
5. Étude de cas

Objectif du parachèvement de l'autoroute 30 du MTQ :
« décongestionner le réseau autoroutier de la métropole »

Évolution de la congestion
sur l'Autoroute 40



Effet de
l'ouverture de
l'Autoroute 30
à Montréal



Méthodologie de développement d'indicateurs

1. Définir les objectifs

- Déterminer comment les indicateurs seront utilisés et par qui
- Cadrer l'étude dans l'espace

2. Intégrer les données

- Fusionner plusieurs sources de données pour créer une base de données intégrée
- Valider la qualité des données

3. Calculer les indicateurs

- Tester différents indicateurs et identifier les plus pertinents et sensibles
- Estimer les indicateurs pour différentes résolutions spatiotemporelles

4. Communiquer les résultats

- Produire des visualisations significatives des indicateurs
- Outil automatisé produisant des rapports personnalisés pour chaque objectif

(FHWA, 2005)

1. Définir les objectifs de l'outil

Variabilité spatiotemporelle
du temps de parcours

1. Calibration des
modèles régionaux

Améliorer les modèles
d'évaluation d'impact

2. Impacts d'une
intervention
(avant-après)

4 Objectifs

3. Modélisation des
conditions de circulation

Décrire micro-variabilité et tendances lourdes
et identifier les variables explicatives

4. Évaluation stratégique
de la congestion

État de santé périodique avec
tronçons critiques du réseau

2. Intégrer les données

Preuve de concept

Données de MESURE



Véhicules-sonde GPS



Cellulaires

Bluetooth



Boucle de détection

Toute donnée avec
Temps de parcours OU Vitesse
+ Localisation Espace-Temps

Données EXPLICATIVES

Météo

Température
Précipitation



Conditions routières

Chaussée
Visibilité

Incidents



Circulation



Événements

Congés

Chantiers



Données de BASE



Réseau routier

Vitesse affichée

Type/Nombre de voies

2. Intégrer les données

Données GPS utilisées pour l'étude de cas



- Données GPS de **Taxi Diamond** (environ **1000** véhicules équipés)
- Une position (X,Y) est prise à tous les **600 m**
- Environ **300 000** points par jour, **9 millions** de points par mois
- Total : **190 millions** de points
- Données historiques du **1^{er} janvier 2012** au **30 septembre 2013**

Temps

Position

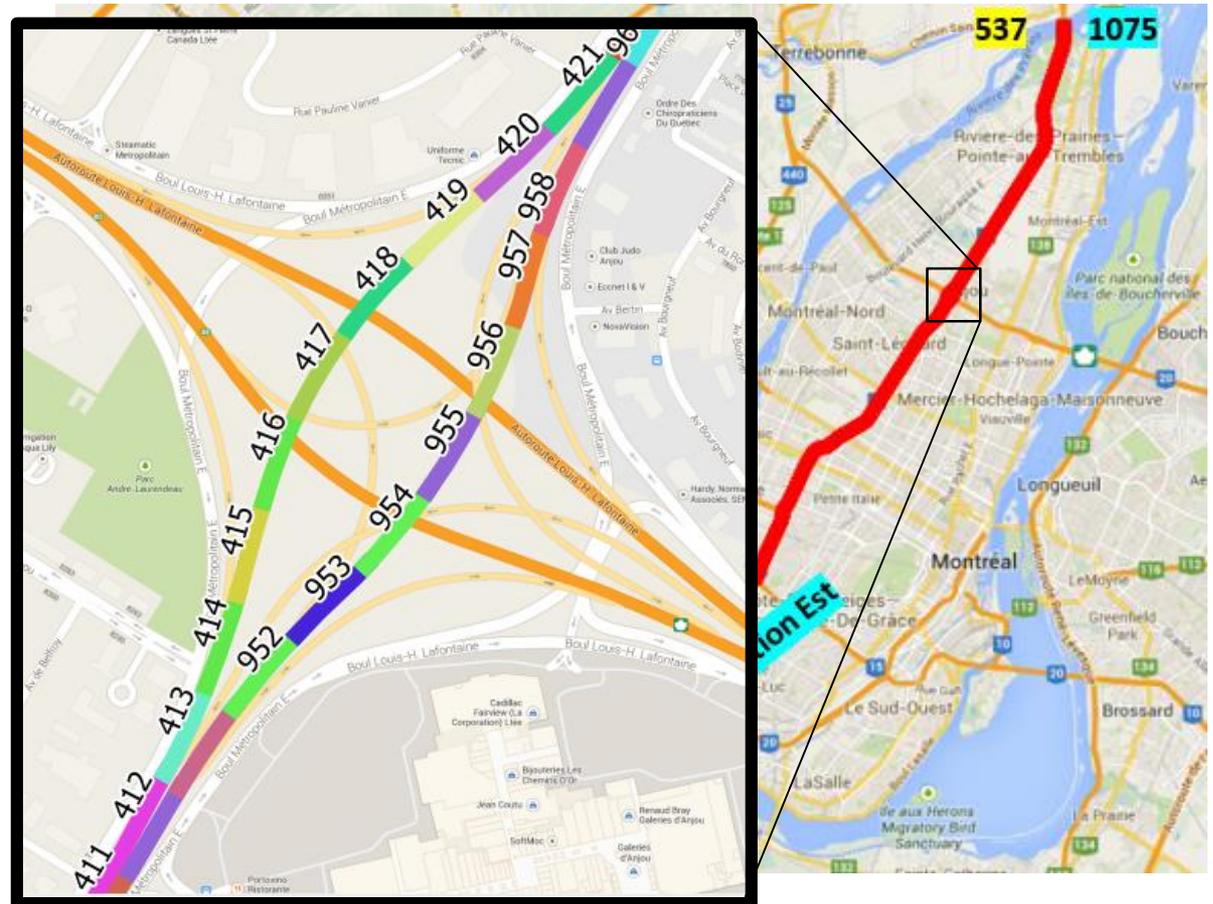
Vitesse Orientation

	ID	Time	ObjectID	Long	Lat	Status	Speed	Course	Empl_ID	RideID
1	398737578	2013-09-01 01:48:35.483	1218	-73.646550	45.500540	1	22.00	210.000000	2424	NULL
2	398737579	2013-09-01 01:48:35.580	443	-73.265740	45.301350	2	47.00	90.000000	3551	17367203
3	398737580	2013-09-01 01:48:35.627	1583	-73.579250	45.509520	2	38.00	205.000000	1838	17366963
4	398737581	2013-09-01 01:48:35.563	898	-73.566197	45.503320	2	7.00	202.000000	1556	17367262
5	398737582	2013-09-01 01:48:35.640	758	-73.559431	45.526010	1	0.00	226.000000	3027	NULL

2. Intégrer les données

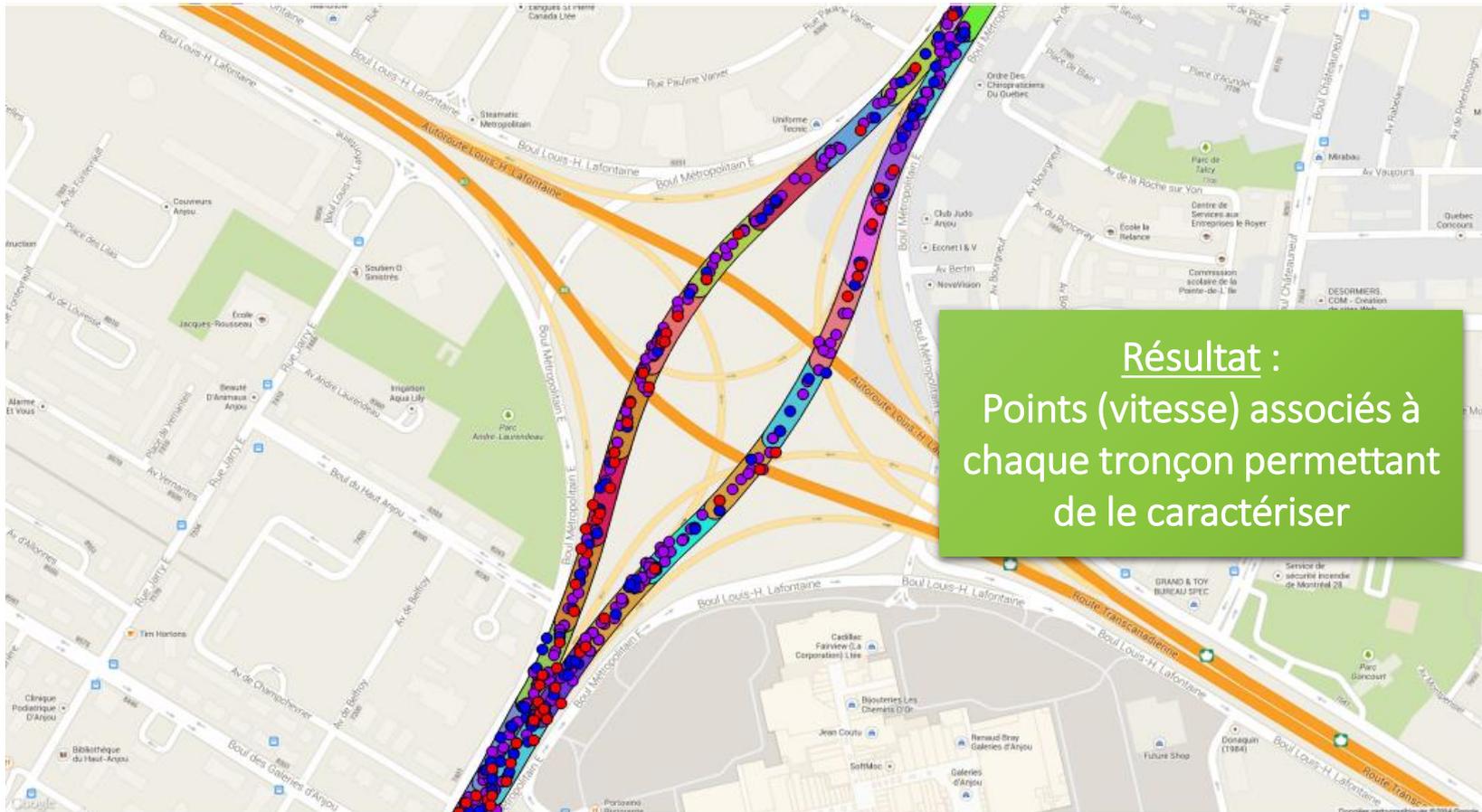
Réseau du MTQ : autoroute 40 à Montréal à tous les 100 m

- Réseau complet du MTQ
- Sélection de l'autoroute 40 à Montréal
- Division en segments égaux de **100 m** (538 tronçons dans chaque direction)
- Calcul de l'orientation (**azimut**) du tronçon



2. Intégrer les données

Croisement des données GPS avec l'autoroute 40



3. Calculer les indicateurs

Liste d'INDICATEURS (littérature)

- Profil de Vitesse / Temps de parcours
- Déficit de Vitesse / Temps de parcours
- Temps de parcours Total en pointe
- % du parcours en congestion
- Imprévisibilité / Variabilité
- Travel Time Index (TTI)*
- Buffer Index
- Planning Time Index
- Heures en congestion
- Congestion Index

$$* TTI = \frac{\text{Temps de parcours en Pointe}}{\text{Temps de parcours libre}} = \frac{\text{Vitesse libre}}{\text{Vitesse en Pointe}}$$

Hypothèses de calcul

- **Vitesse à écoulement libre** : 85^e centile des vitesses (TTI, 2012)
- **Seuil de congestion** : 60% de la vitesse affichée (MTQ, 2004)

4. Communiquer les résultats

Exemples de résultats préliminaires pour chaque objectif

1. Calibration des modèles régionaux

2. Impacts d'une intervention (avant-après)

4 Objectifs

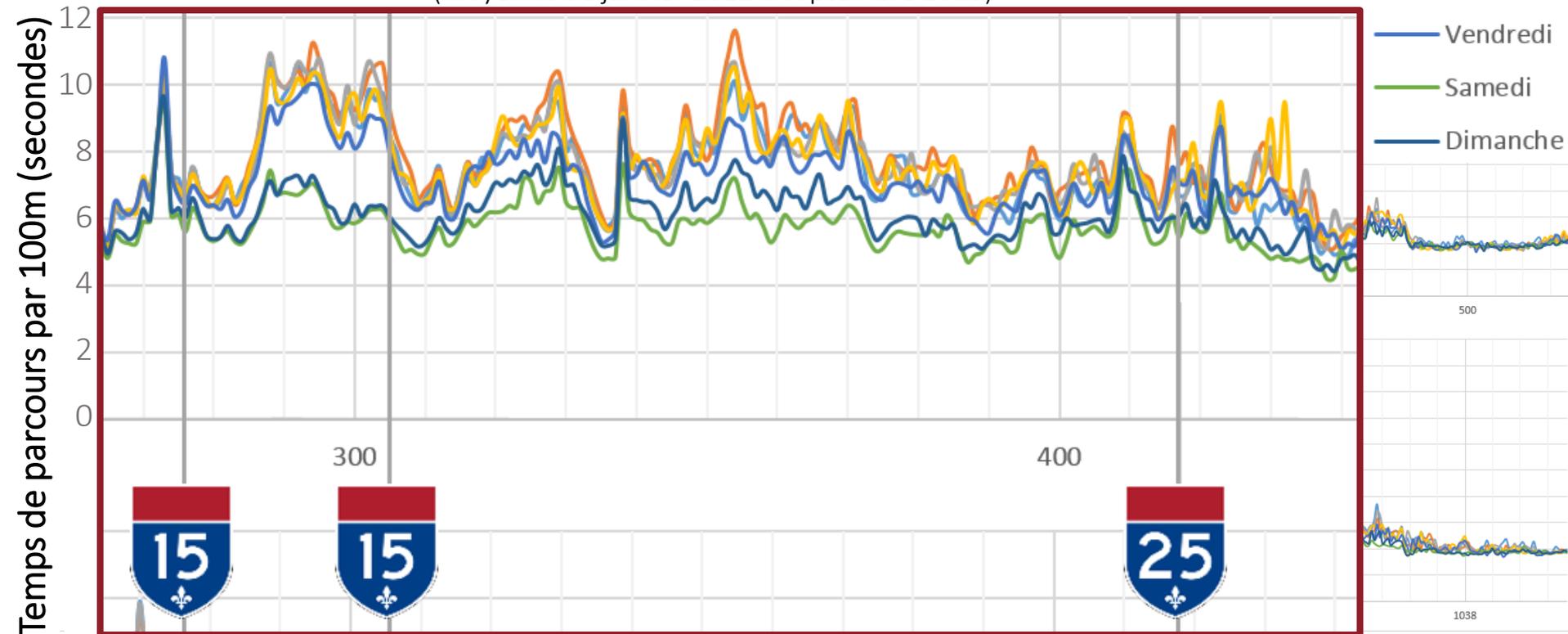
3. Modélisation des conditions de circulation

4. Évaluation stratégique de la congestion

4.1. Calibration des modèles régionaux

Variation du Temps de parcours selon le jour de la semaine

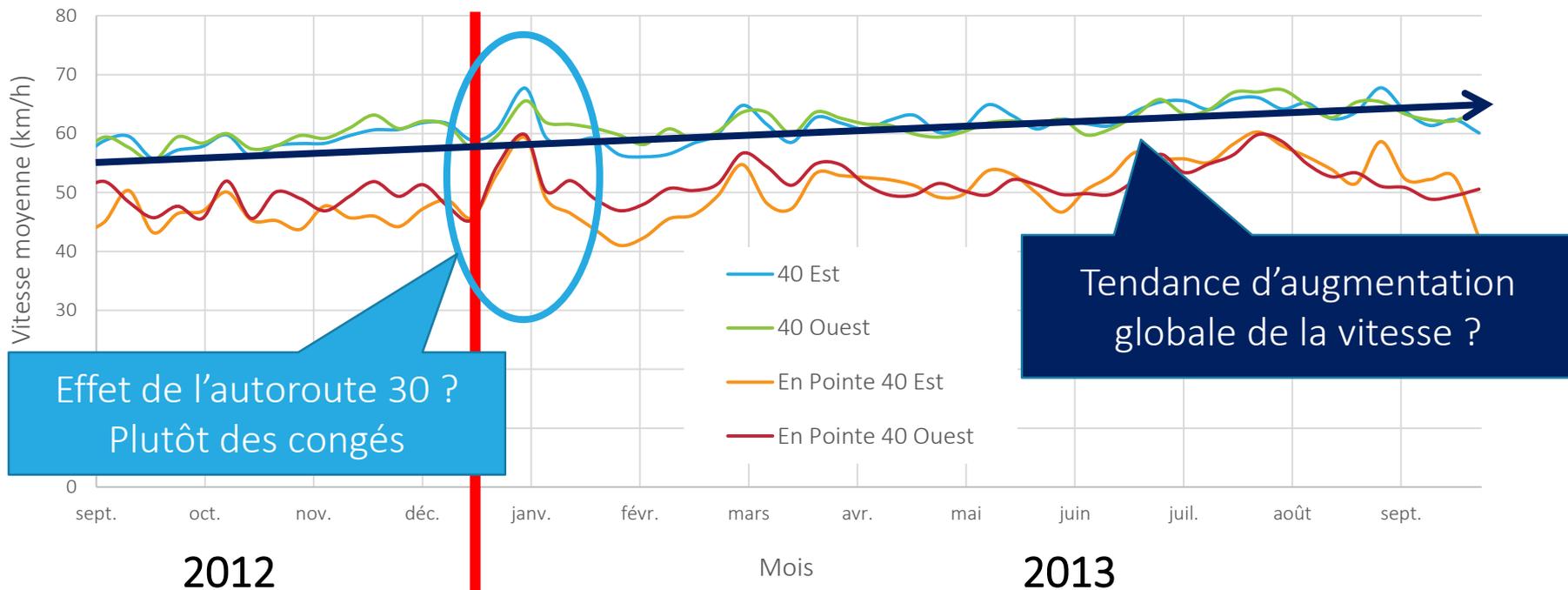
(moyenne de janvier 2012 à septembre 2013)



4.2. Impacts d'une intervention (avant-après)

Tendance de la vitesse à long terme selon la direction

(moyenne par semaine de tous les tronçons)



Effet de l'autoroute 30 ?
Plutôt des congés

Tendance d'augmentation globale de la vitesse ?

15 décembre 2012 – Ouverture complète de l'autoroute 30

4.3. Modélisation des conditions de circulation

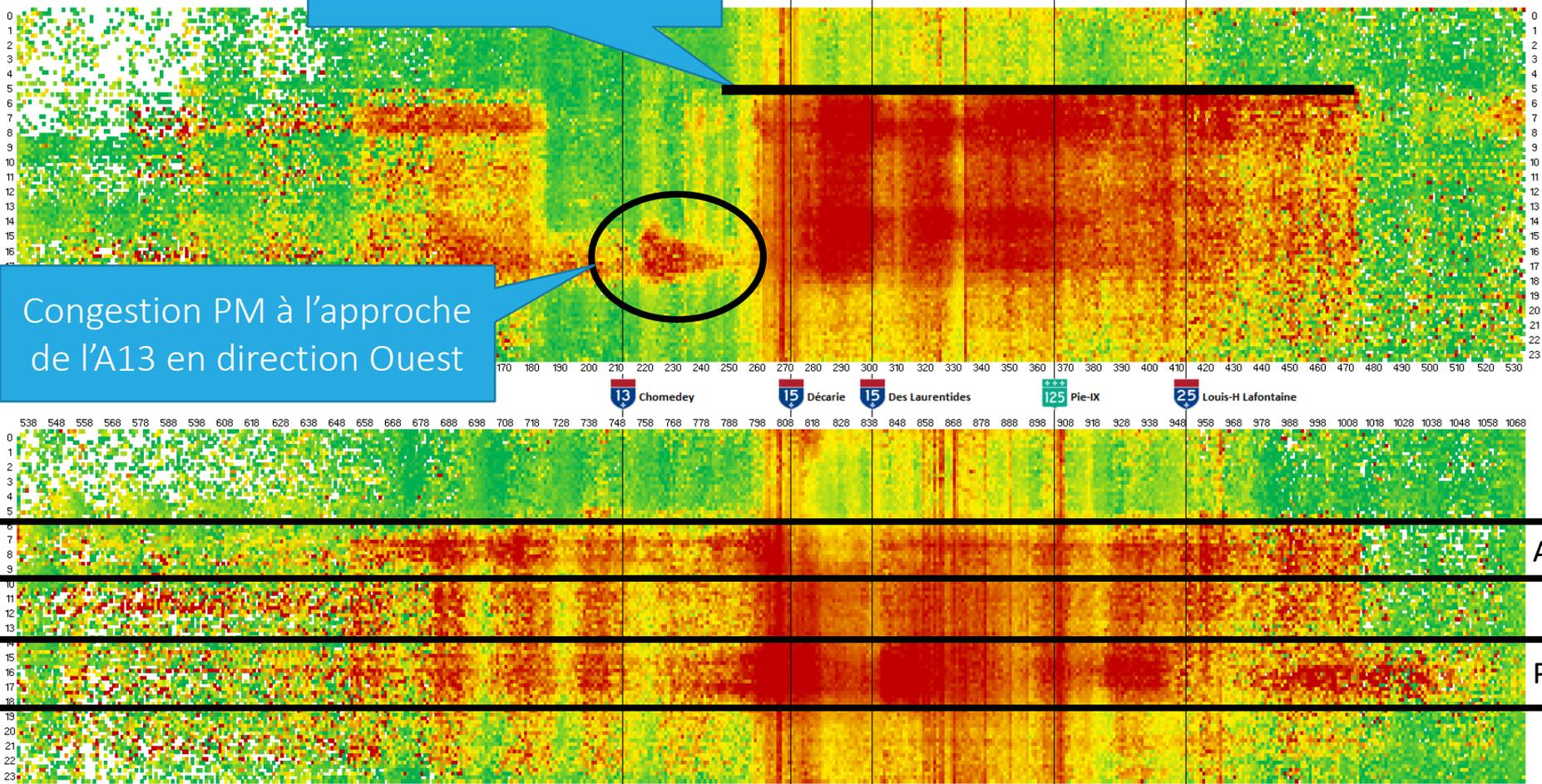
Vitesse moyenne des véhicules par tronçon de 100m et toutes les 15 minutes

Début de la congestion uniformément à 5H30

70 km/h

100 km/h

Congestion PM à l'approche de l'A13 en direction Ouest

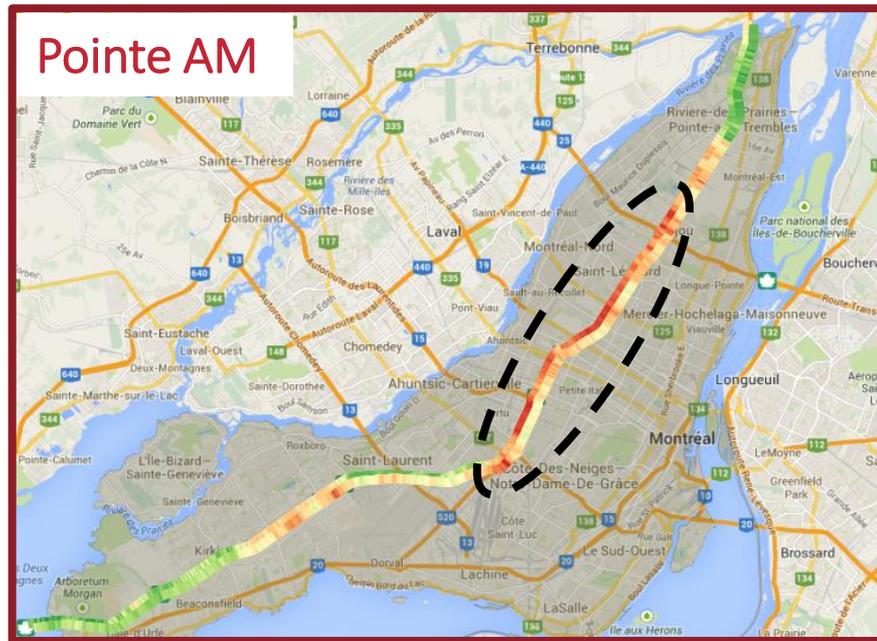


Direction OUEST
←
40
→
Direction EST

Légende : Centile des vitesses 5^e 50^e 95^e

4.3. Modélisation des conditions de circulation

Vitesse en km/h pour chaque tronçon selon l'heure de pointe



6h à 9h : Congestion vers l'Ouest

16h à 19h : Congestion vers l'Est

4.4. Évaluation stratégique de la congestion

- % des tronçons de 100m en congestion (sous le seuil de 60% de la vitesse affichée)

69% des tronçons en pointe AM

71% des tronçons en pointe PM

- Tronçons de 100m les plus critiques (15^e centile de la vitesse moyenne historique)



6. Conclusion

- **Défi :**
Accès aux données (standardisation et actualisation)
- **Futures recherches :**
Croisement de plus de données explicatives
- **Complexité du développement d'indicateurs de congestion :**
 - Subjectivité, imprévisibilité, sensibilité
 - Problématique de la vitesse affichée
- **Objectif à long terme :**
Déterminer les causes de la congestion

Remerciements

- MTQ pour les contributions à ce projet de R&D
- Taxi Diamond et à Communauto pour le partenariat d'accès aux données GPS de flottes de véhicules utilisées dans le cadre de ce projet



Références

- CATT Lab (2014). Vehicle Probe Project Suite. <http://www.cattlab.umd.edu/?portfolio=vehicle-probe-project-suite>
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) (2012). Plan métropolitain d'aménagement et de développement. Un grand Montréal attractif, compétitif et durable.
- Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) (2011). Bâtir 2031 Structurer, Attirer, Durer. Le projet de PMAD du territoire de la CMQ.
- Gourvil, L., & Joubert, F. (2004). Évaluation de la congestion routière dans la région de Montréal. Ministère des Transports du Québec, Gouvernement du Québec.
- INRIX (2014). INRIX Scorecard. <http://scorecard.inrix.com/scorecard/>
- FHWA (2005). Travel Time Reliability: Making It There On Time, All The Time. http://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/TTR_Report.htm
- Schrank, D., Eisele, B., & Lomax, T. (2012). TTI's 2012 urban mobility report : Powered by INRIX traffic data: Texas A&M Transportation Institute.
- Sioui, L., & Morency, C. (2013). Building congestion indexes from GPS data : Demonstration. Communication présentée à 13th WCTR, Rio de Janeiro, Brésil.
- TomTom (2013). TomTom Congestion Index. <http://www.tomtom.com/lib/doc/trafficindex/2013-0322-TomTom-CongestionIndex-2012-Annual-NAM-km.pdf>
- Transports Québec. Autoroute 30 – Parachèvement. http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grands_projets/grands_projets_terminees/parachevement_a30

Merci de votre attention

Des questions ?



Merci de votre attention

Des questions ?



AUT. DÉCARIE
ACCÈS A-40 OUEST
CONGESTION

AVENUE
VAN HORNE

Annexe 2

Présentation ATC 2014 « Congestion à Montréal : méthode d'analyse et de suivi »

Congestion à Montréal : méthode d'analyse et de suivi

MARC-ANDRÉ TESSIER

Étudiant à la maîtrise
marc-andre.tessier@polymtl.ca

Pr CATHERINE MORENCY

Professeure agrégée
cmorency@polymtl.ca

Pr NICOLAS SAUNIER

Professeur agrégé
nicolas.saunier@polymtl.ca

Pr MARTIN TRÉPANIÉ

Professeur titulaire
mtrepanier@polymtl.ca



2014-09-29

Séance : Measuring Congestion

Congrès et exposition 2014



Plan de la présentation

1. Contexte et objectif
2. Cadre méthodologique général
3. Revue de littérature
4. Étude de cas
5. Conclusion et perspectives

1. Contexte et objectif



« No one goes there anymore because it's so crowded! » - Yogi Berra

1. Contexte et objectif

En 2013, le **ministère des Transport du Québec** a mandaté Polytechnique Montréal de développer un **outil de suivi et d'analyse des conditions de circulation** du réseau routier du MTQ de la région de Montréal.

Continuité d'un projet d'étude du potentiel de différentes technologies de collecte de données de circulation aussi réalisé par Polytechnique de 2007 à 2011 :

- Données historiques de véhicules flottants
- Données GPS de véhicules en autopartage Communauto
- Données de capteurs Bluetooth et vidéo
- Échantillons de données de circulation des fournisseurs INRIX et RealTraffic

2. Cadre méthodologique général

- 1) Revue des outils existants :
Identification des fonctions principales
- 2) Formulation de **quatre objectifs spécifiques**
- 3) Étude de cas :
Conditions de circulation sur l'**autoroute 40**
et impacts de l'ouverture de l'**autoroute 30**
- 4) Prototypage d'un outil
(Travaux en cours)



Cadre général de l'outil d'analyse de la congestion

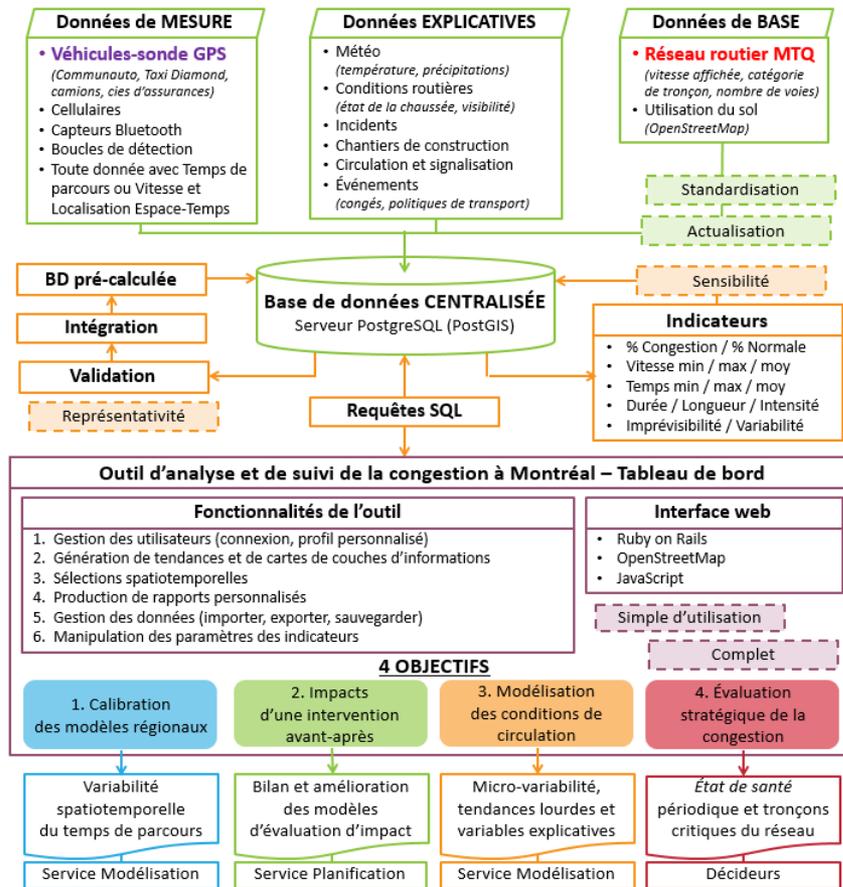
« Big picture »

1. Données (intrants)

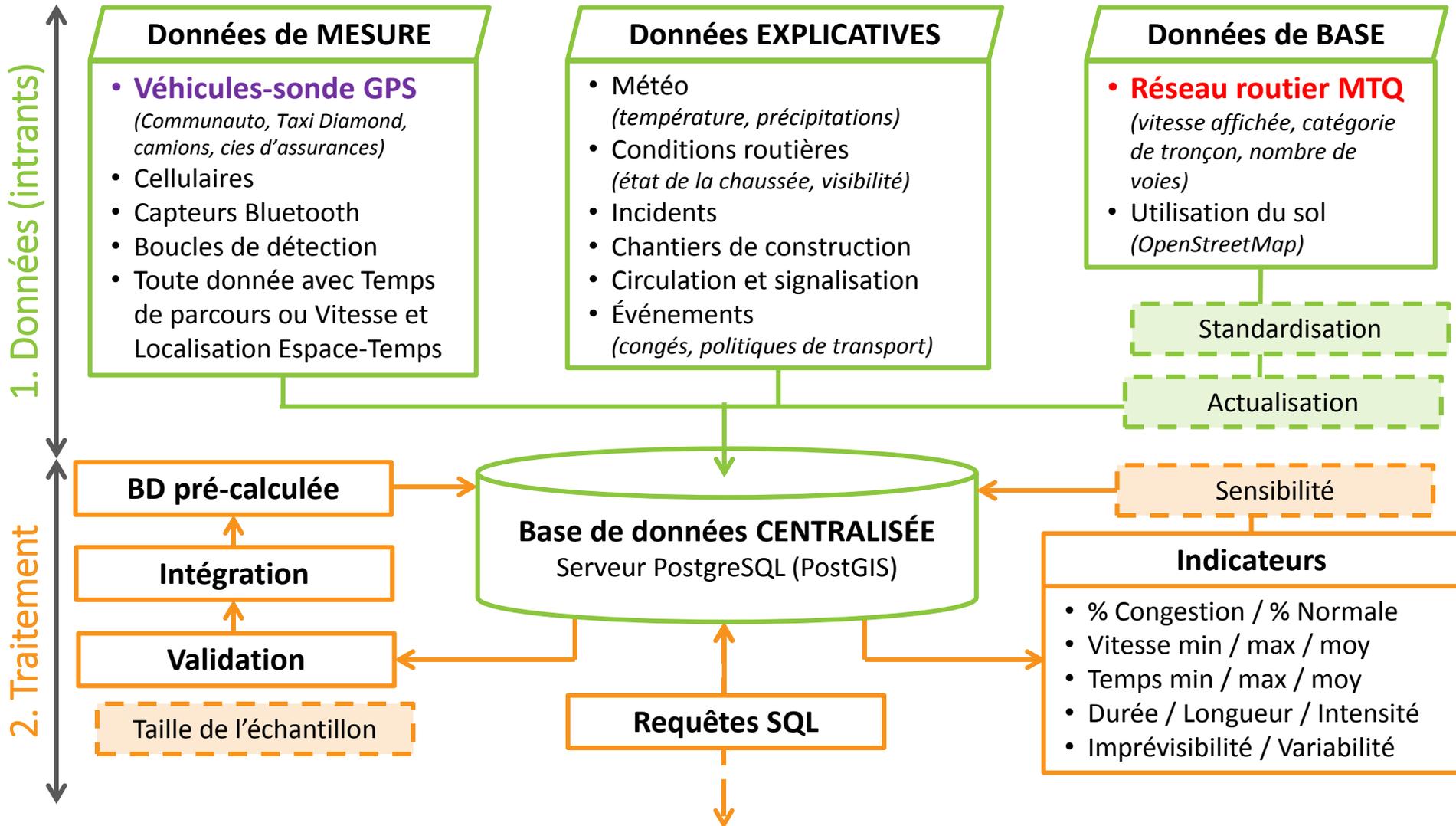
2. Traitement

3. Tableau de bord

4. Rapports



Cadre général de l'outil d'analyse de la congestion (1-2)



Cadre général de l'outil d'analyse de la congestion (3-4)



Outil d'analyse et de suivi de la congestion à Montréal – Tableau de bord

Fonctionnalités de l'outil

1. Gestion des utilisateurs (connexion, profil personnalisé)
2. Génération de tendances et de cartes de couches d'informations
3. Sélections spatiotemporelles
4. Production de rapports personnalisés
5. Gestion des données (importer, exporter, sauvegarder)
6. Manipulation des paramètres des indicateurs

Interface web

- Ruby on Rails
- OpenStreetMap
- JavaScript

Simple d'utilisation

Complet

4 OBJECTIFS

1. Calibration des modèles régionaux

2. Impacts d'une intervention avant-après

3. Modélisation des conditions de circulation

4. Évaluation stratégique de la congestion

Variabilité spatiotemporelle du temps de parcours

Bilan et amélioration des modèles d'évaluation d'impact

Micro-variabilité, tendances lourdes et variables explicatives

État de santé périodique et tronçons critiques du réseau

Service Modélisation

Service Planification

Service Modélisation

Décideurs

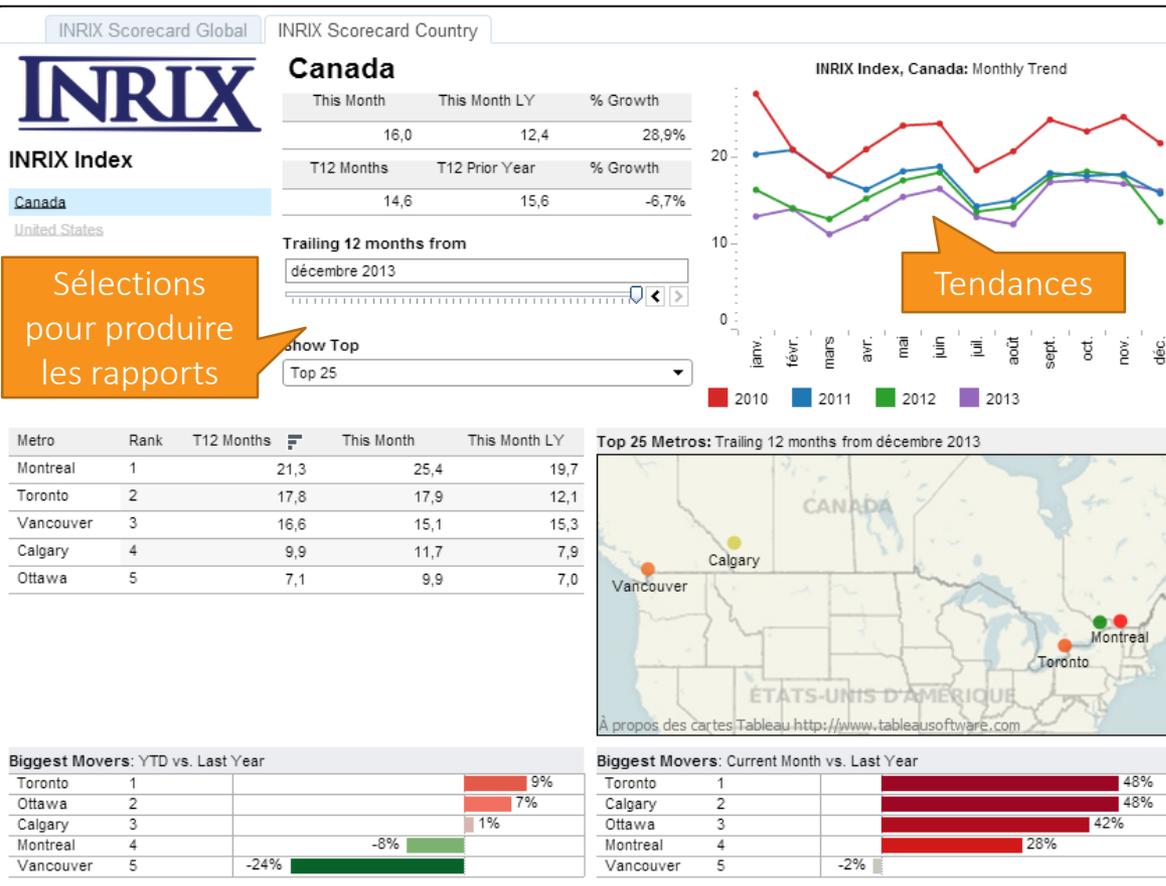
3. Tableau de bord

4. Rapports

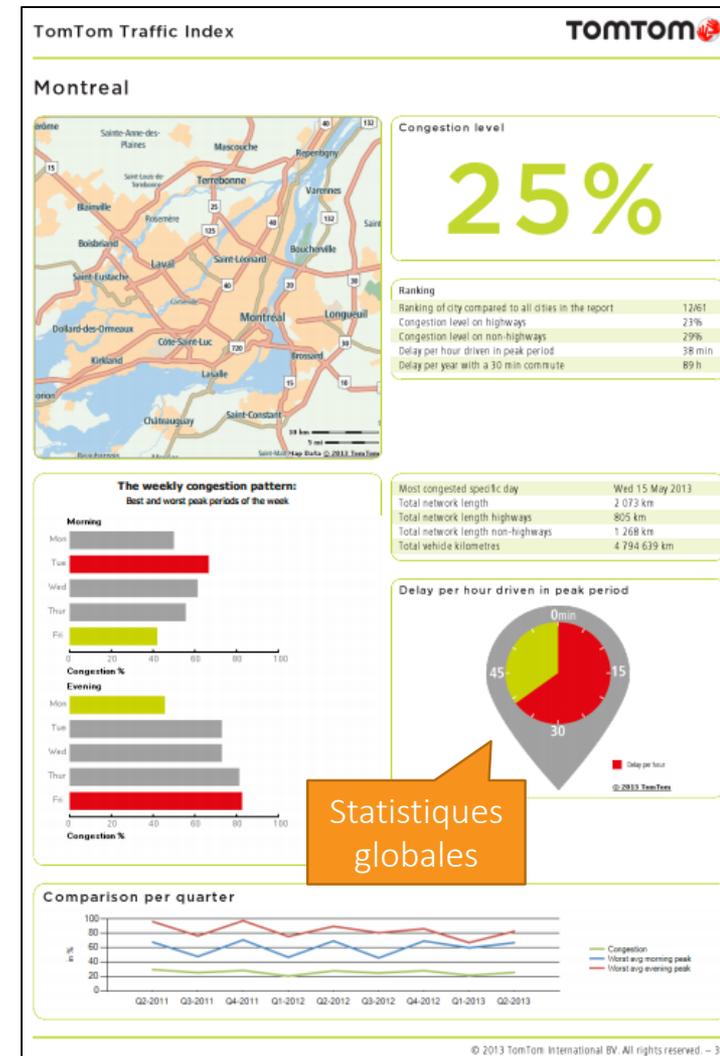
3. Revue de littérature

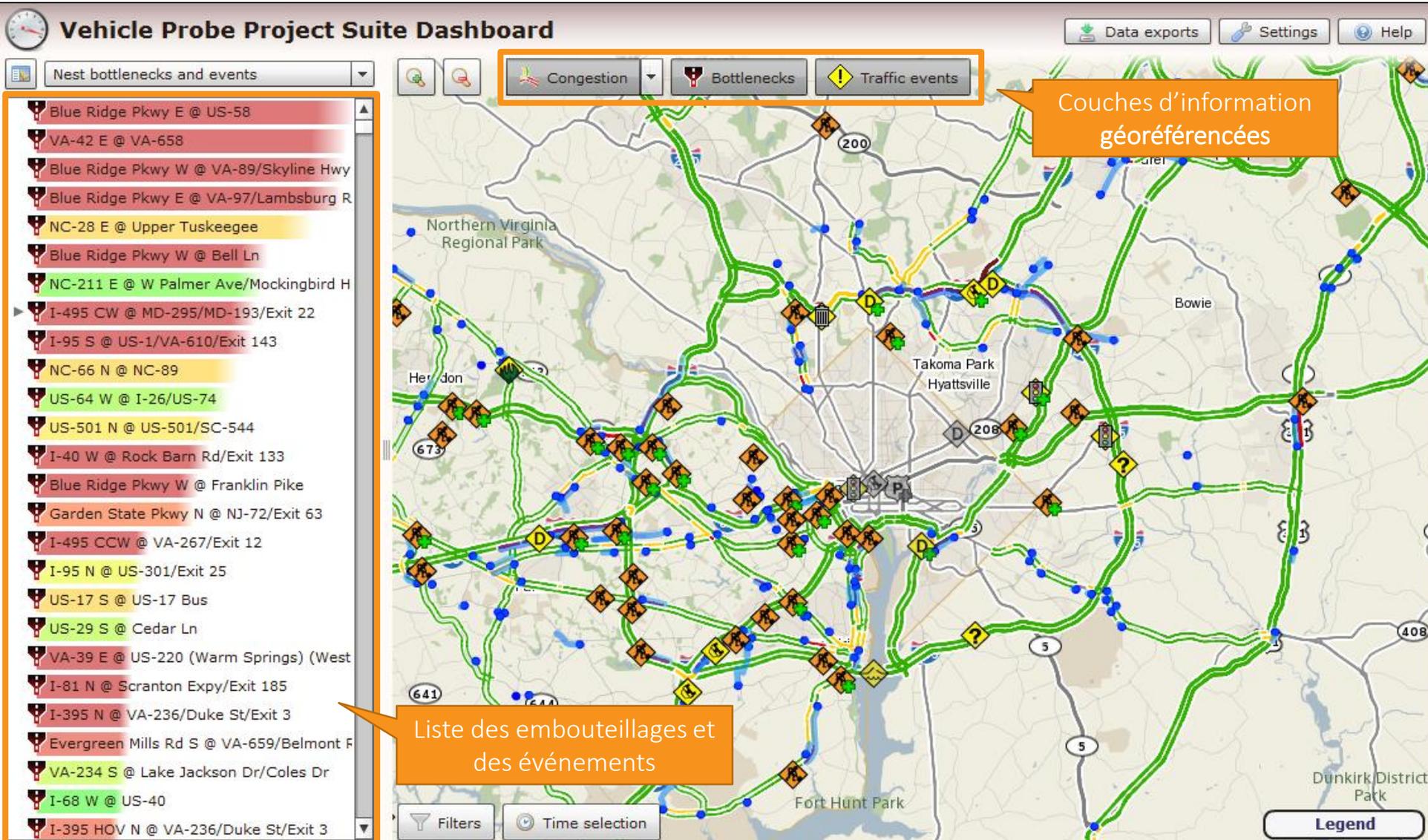
Principaux outils actuels

INRIX Scorecard



TomTom Congestion Index (2013)





Liste d'indicateurs identifiés par objectif

Objectif	Indicateur	Définition
1. Calibration des modèles régionaux	Temps de parcours total	TP porte-à-porte sans considérer le mode
	Temps de parcours semestriel	Profils du TP journalier moyen pour chaque semestre
	Planning Time	TP à écoulement libre + Buffer Time = TP 95 ^e centile
	Délai récurrent	Délai causé par la congestion récurrente
	Délai non-récurrent	Délai causé par la congestion non-récurrente (accidente)
2. Impacts d'une intervention avant-après	Profil de vitesse mensuel	Profil des heures sous un seuil de vitesse prédéfinie
	Travel Time Index	TP moyen / TP à écoulement libre
	Planning Time Index	TP 95 ^e centile / TP à écoulement libre
	Buffer Time Index	(TP 95 ^e centile – TP moyen) / TP à écoulement libre
	Travel Time Deficit	Somme des TP historiques où V moy est sous un seuil de V
3. Modélisation des conditions de circulation	Grille de congestion	Tracé de contours d'une journée avec les incidents superposés
	Cartes de congestion	Carte avec les TP en congestion et des indicateurs de vitesse
	Spirale des embouteillages	Visualisation en horloge de la longueur des embouteillages
	Pointe de tarte de congestion	Délai moyen quotidien selon 6 composantes de la congestion
	Durée d'incidents	Temps entre la déclaration et la fin de l'incident
4. Évaluation stratégique de la congestion	Top 30 des embouteillages	Classement des embouteillages selon un facteur d'impact
	Segments les plus congestionnés	Classement des pires segments selon le TT Deficit et TT Index
	Heures de congestion	Nombre d'heures sous un seuil de vitesse prédéfinie
	Délai total	Somme de tous les délais sur un tronçon-période
	Coûts de la congestion	Coûts totaux du délai des voitures et camions et du CO ₂ émis

Abréviations:

TP = temps de parcours

V = vitesse

moy = moyenne

4. Étude de cas

Objectif du parachèvement de l'autoroute 30 pour le MTQ :
« décongestionner le réseau autoroutier de la métropole »

Évolution de la congestion sur l'Autoroute 40



Pont de l'Île-aux-Tourtes

« Entre les deux 15 »

Effet de l'ouverture de l'Autoroute 30 à Montréal



Données utilisées pour l'étude de cas

Données GPS de Taxi Diamond

- Environ **1000** véhicules équipés
- Position (X,Y) à tous les **600 m**
- Environ 3500 points par jour et 80 000 par mois sur l'A40
- Respectivement 300K et 9M au total
- Données historiques du **1^{er} janv. 2012** au **30 sept. 2013**



Réseau routier du MTQ

- Sélection de l'autoroute **40** à Montréal
- Division en segments égaux de **100 m** (538 tronçons dans chaque direction)
- Calcul de l'**azimut** des tronçons



Temps

Position

Vitesse Azimut

ID	Time	ObjectID	Long	Lat	Status	Speed	Course	Empl_ID	RideID
1	2013-09-01 01:48:35.483	1218	-73.646550	45.500540	1	22.00	210.000000	2424	NULL
2	2013-09-01 01:48:35.580	443	-73.265740	45.301350	2	47.00	90.000000	3551	17367203
3	2013-09-01 01:48:35.627	1583	-73.579250	45.509520	2	38.00	205.000000	1838	17366963
4	2013-09-01 01:48:35.563	898	-73.566197	45.503320	2	7.00	202.000000	1556	17367262
5	2013-09-01 01:48:35.640	758	-73.559431	45.526010	1	0.00	226.000000	3027	NULL

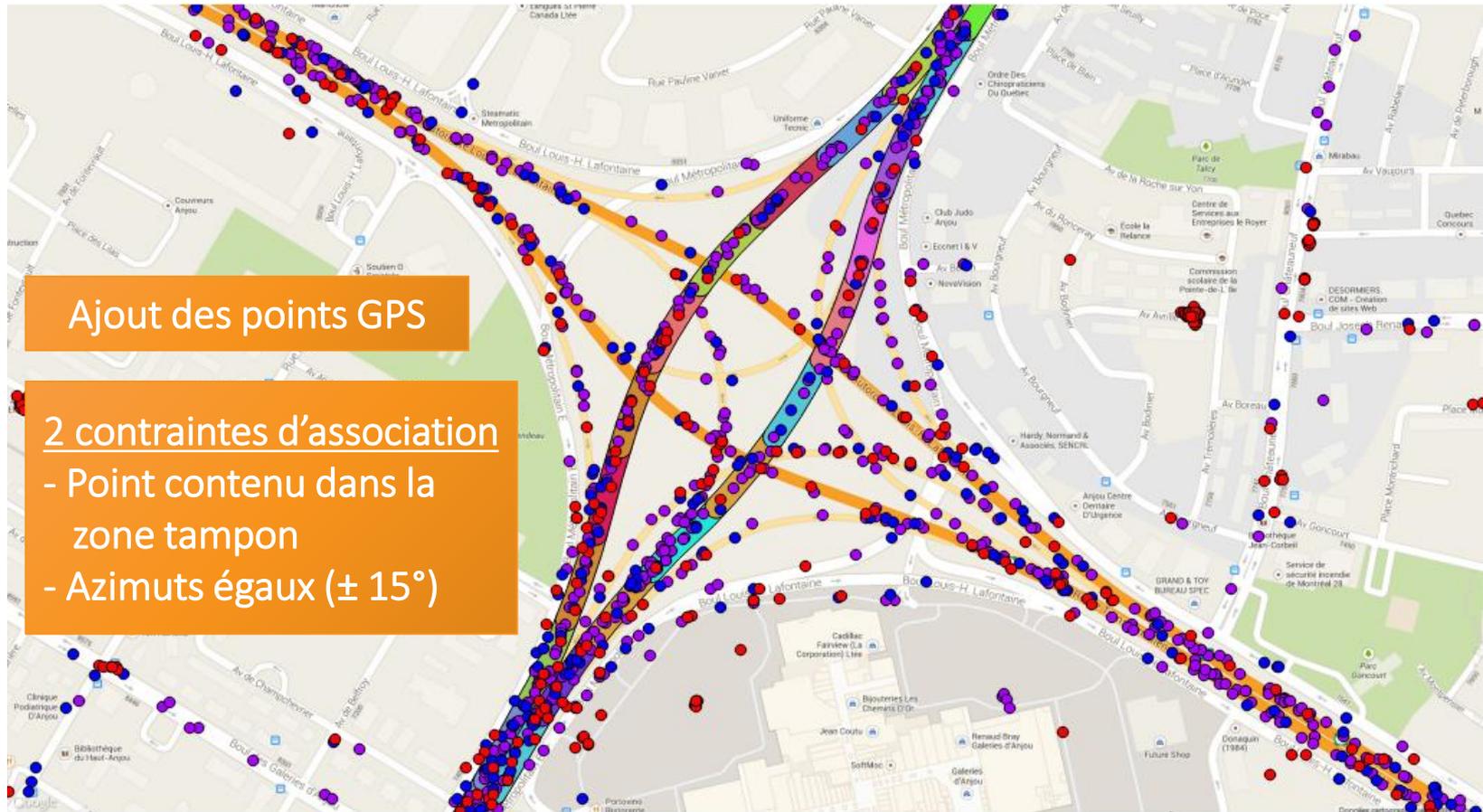
Croisement des données GPS avec l'A40



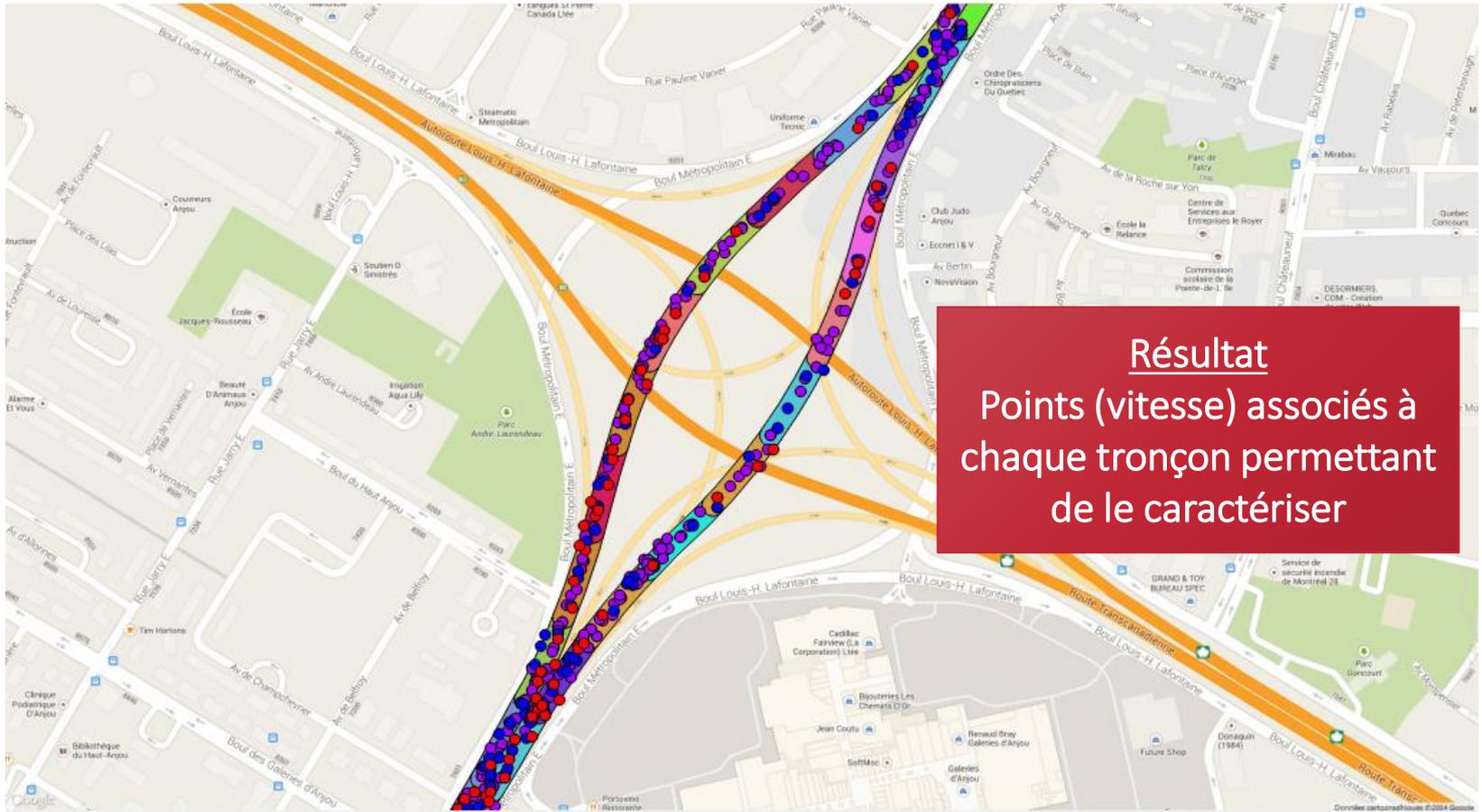
Croisement des données GPS avec l'A40



Croisement des données GPS avec l'A40



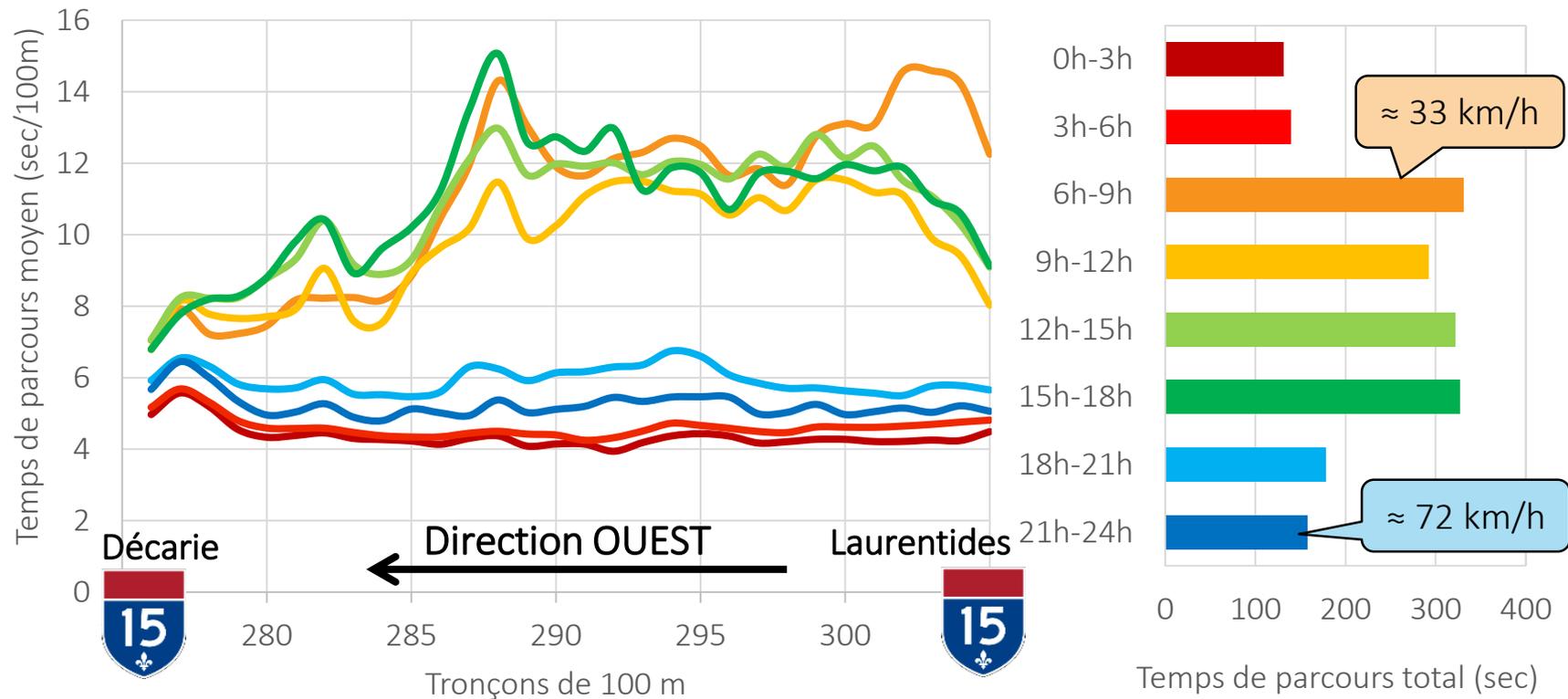
Croisement des données GPS avec l'A40



Exemple de résultat de l'étude de cas par objectif

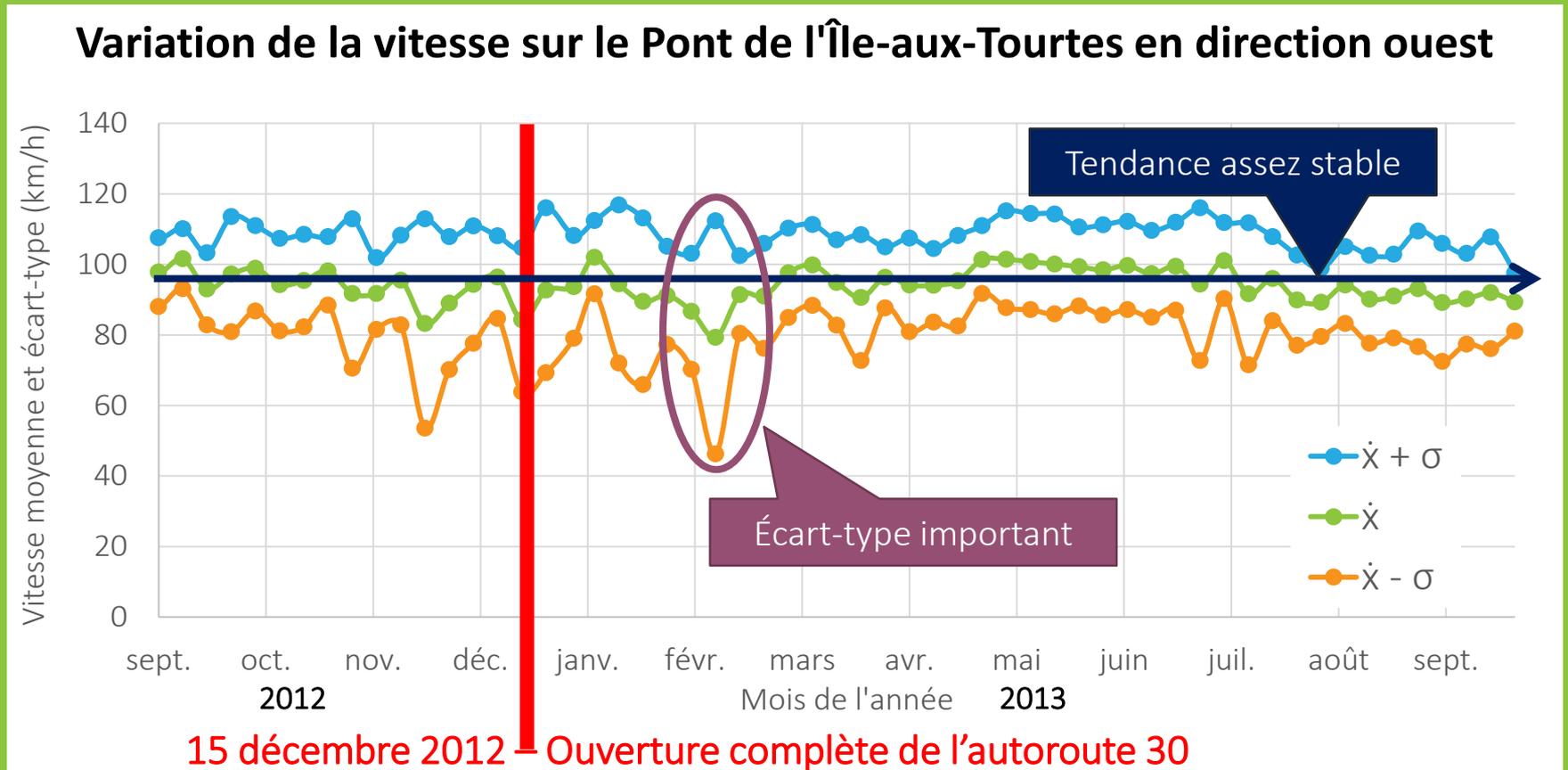
1. Calibration des modèles régionaux

Temps de parcours moyen « entre les deux 15 » selon le temps de la journée



Exemple de résultat de l'étude de cas par objectif

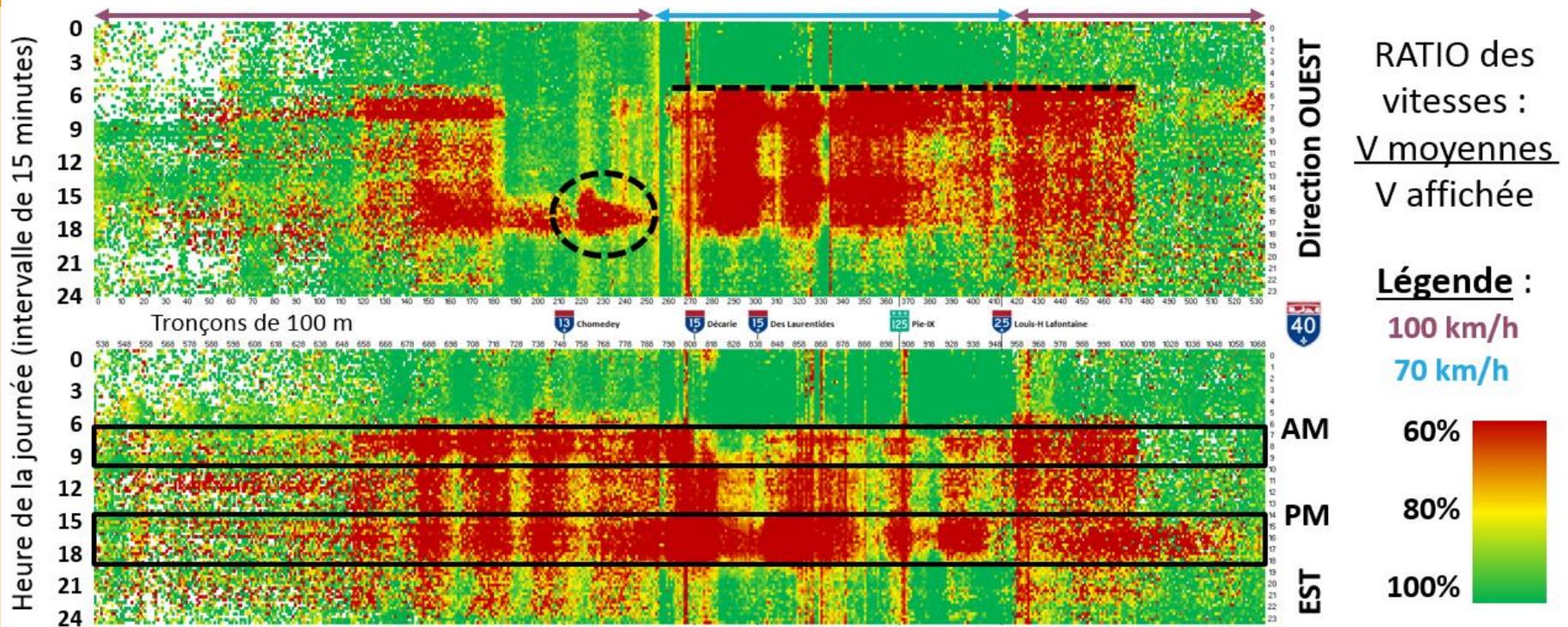
2. Impacts d'une intervention avant-après



Exemple de résultat de l'étude de cas par objectif

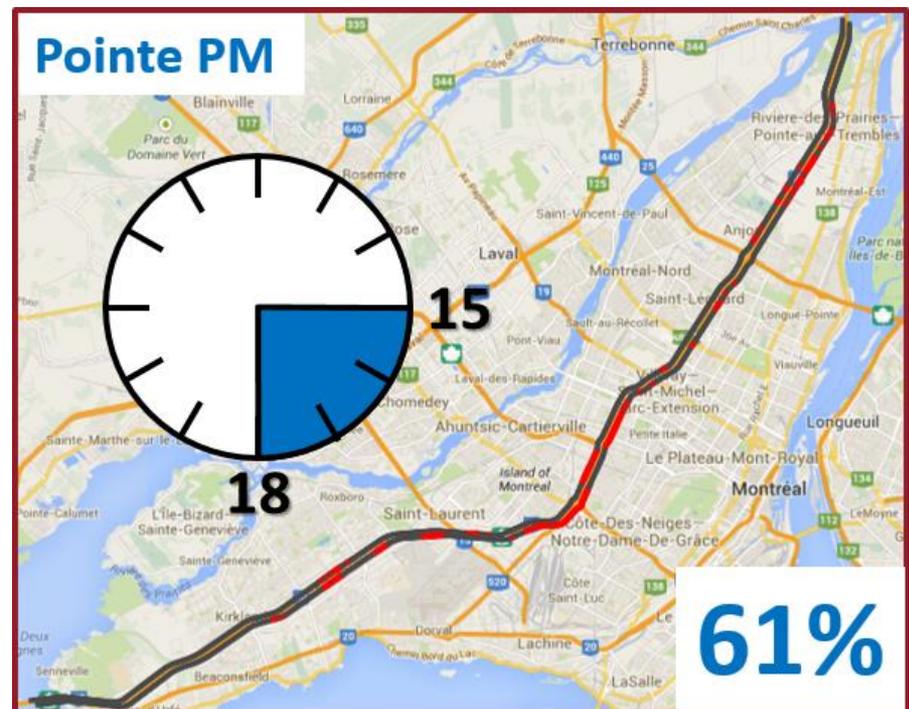
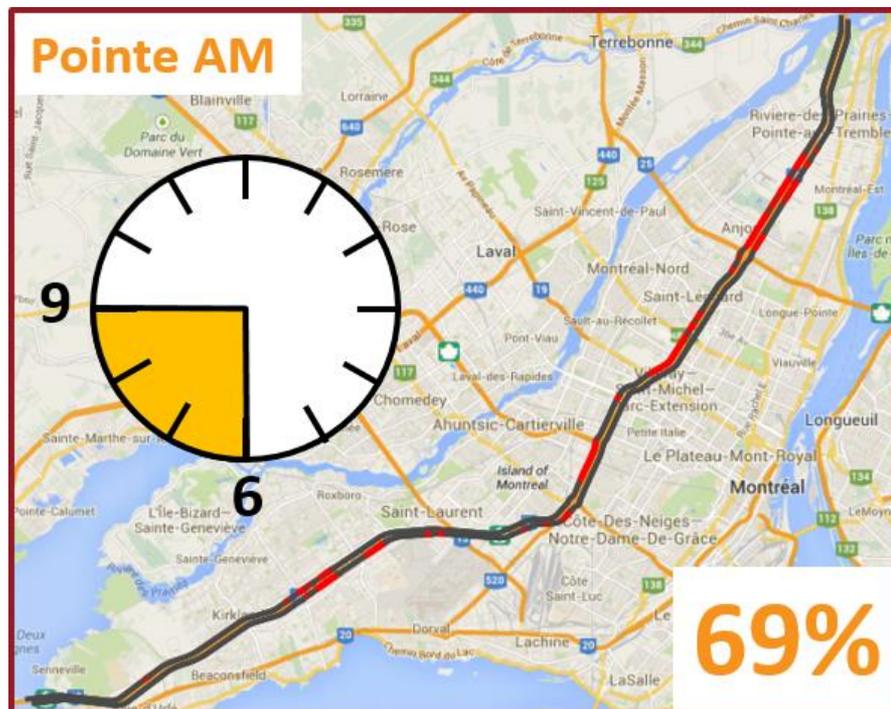
3. Modélisation des conditions de circulation

Ratio des vitesses historiques à tous les 100m et 15 minutes de l'A40 à Montréal



4. Évaluation stratégique de la congestion

Tronçons de 100m les plus critiques et % des tronçons en congestion (< 60% Vaff)



5. Conclusions et perspectives

Conclusion : Potentiel énorme pour un outil de congestion à Montréal

Futurs travaux :

- Croisement avec des **données explicatives** (accidents, travaux, météo, événements...)
- Développement d'une **interface web**

Défis méthodologiques :

- **Accès aux données** (plusieurs parties prenantes)
- **Actualisation et standardisation** des bases de données
- **Taille de l'échantillon** des données GPS selon l'agrégation spatio-temporelle

Défis de développement d'indicateurs :

- Analyse de la **sensibilité des indicateurs** pour déterminer les seuils à utiliser
- **Problème du seuil de vitesse** : affichée -vs- design -vs- écoulement libre -vs- variable
- Indicateurs de **tendances à long termes**
- **Modèles de corrélation** avec des données explicatives (**causes** de la congestion?)

Remerciements

- Ministère des Transports du Québec pour les contributions à ce projet de R&D
- Taxi Diamond et à Communauto pour le partenariat d'accès aux données GPS de flottes de véhicules utilisées dans le cadre de ce projet
- CRSNG, ATC et GRTC et Hydro-Québec pour les bourses de recherche sur ce projet



Références

- Cambridge Systematics, Inc., University of Maryland, Center for Advanced Transportation Technology, and Resource Systems Group. Measuring Transportation Network Performance. NCHRP Report 664, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010.
- CATT Lab (2014). Vehicle Probe Project Suite. <http://www.cattlab.umd.edu/?portfolio=vehicle-probe-project-suite>
- Gourvil, L., & Joubert, F. (2004). Évaluation de la congestion routière dans la région de Montréal. Ministère des Transports du Québec, Gouvernement du Québec.
- INRIX (2014). INRIX Scorecard. <http://scorecard.inrix.com/scorecard/>
- FHWA (2005). Travel Time Reliability: Making It There On Time, All The Time. http://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/TTR_Report.htm
- Morency, C., M. Trépanier, and N. Saunier. Évaluation des enjeux analytiques et des potentialités des données de temps de parcours pour mesurer la fiabilité du réseau routier montréalais, Ministère des Transports du Québec, 2011.
- Sioui, L., & Morency, C. (2013). Building congestion indexes from GPS data : Demonstration. Communication présentée à 13th WCTR, Rio de Janeiro, Brésil.
- TomTom (2013). TomTom Congestion Index. <http://www.tomtom.com/lib/doc/trafficindex/2013-0322-TomTom-CongestionIndex-2012-Annual-NAM-km.pdf>
- Transports Québec. Autoroute 30 – Parachèvement. http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grands_projets/grands_projets_terminees/parachevement_a30

Merci de votre attention

Des questions ?



AUT. DÉCARIE
ACCÈS A-40 OUEST
CONGESTION

AVENUE
VAN HORNE

Annexe 3

Affiche Colloque Chaire Mobilité 2014 « Indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière »

Indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière

Marc-André Tessier, candidat à la maîtrise (M.Sc.A.)

Directrice : Pre Catherine Morency – Codirecteur : Pr Nicolas Saunier

« No one goes there anymore because it's so crowded! » - Yogi Berra

Contexte et objectif

En 2013, le ministère des Transport du Québec a mandaté Polytechnique Montréal de développer un outil de suivi et d'analyse des conditions de circulation du réseau routier du MTQ de la région de Montréal. Ce projet est la continuité d'un projet d'étude du potentiel de différentes technologies de collecte de données de circulation aussi réalisé par Polytechnique de 2007 à 2011.

Méthodologie générale de conception de l'outil

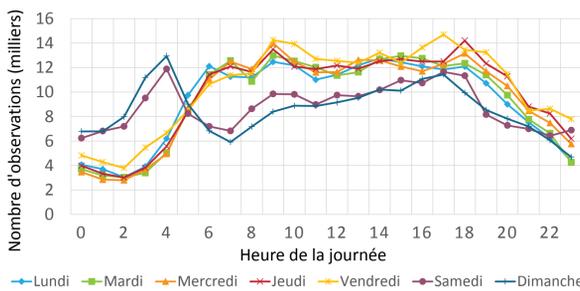
1. Revue des outils existants : Identification des fonctions principales
2. Formulation de quatre objectifs spécifiques pour l'outil
3. Étude de cas : Conditions de circulation sur l'autoroute 40 et impacts de l'ouverture de l'autoroute 30
4. Prototypage d'un outil (Travaux en cours)



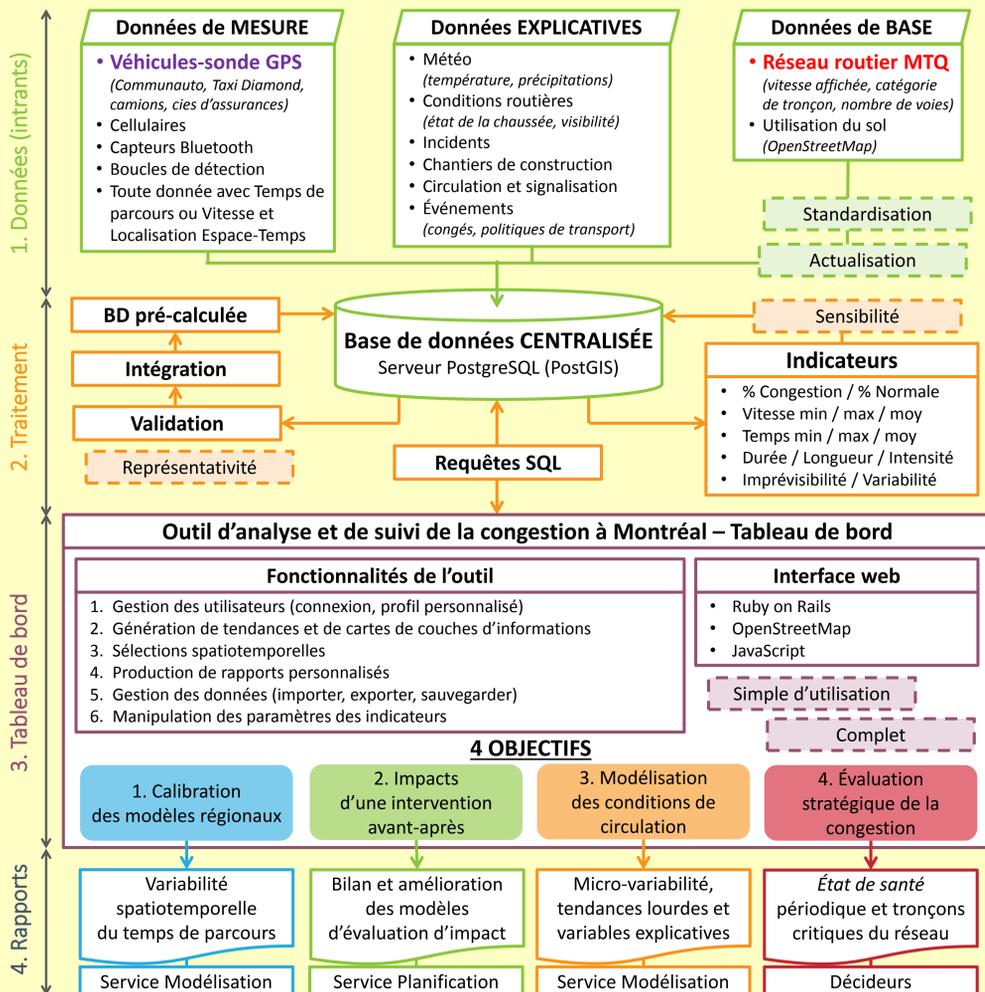
Données utilisées pour l'étude de cas

- Réseau routier du MTQ (A40) divisé en tronçons de 100 m
- Données GPS de Taxi Diamond (environ 1000 véhicules équipés)
 - Position (X,Y) à tous les 600 m avec Vitesse et Orientation
 - Environ 3500 points par jour et 80 000 par mois sur l'A40
 - Données historiques du 1^{er} janv. 2012 au 30 sept. 2013

Distribution des données GPS sur l'autoroute 40

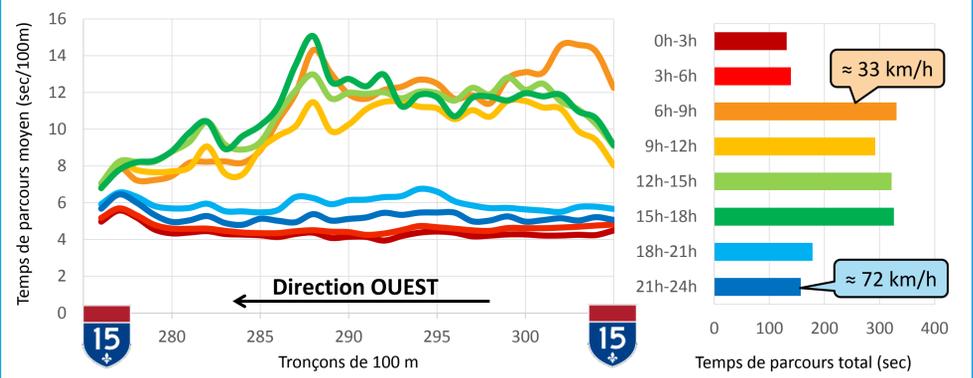


Vision de l'architecture de l'outil



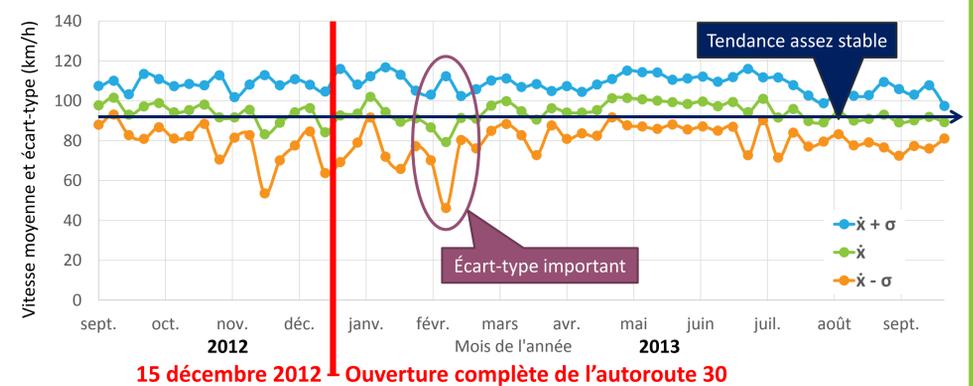
1. Calibration des modèles régionaux

Temps de parcours de paires Origine-Destination : « entre les deux 15 »



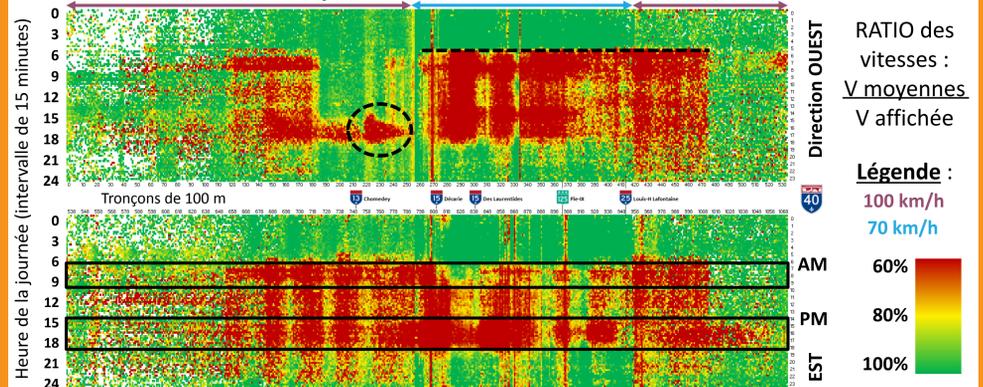
2. Impacts d'une intervention avant-après

Variation de la vitesse sur le Pont de l'Île-aux-Tourtes en direction ouest



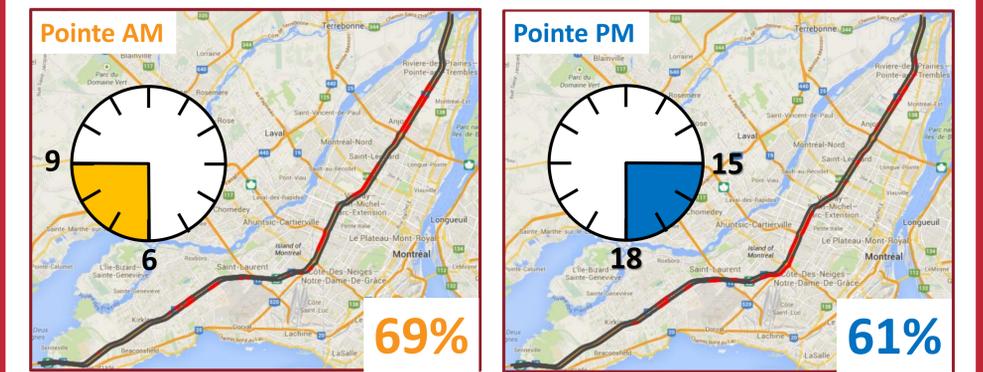
3. Modélisation des conditions de circulation

Ratio des vitesses historiques à tous les 100m et 15 minutes de l'A40 à Montréal



4. Évaluation stratégique de la congestion

Tronçons de 100m les plus critiques et % des tronçons en congestion (< 60% Vaff)



Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le MTQ pour le financement et les contributions à ce projet de recherche, Taxi Diamond et Communauto pour l'accès aux données, ainsi que le CRSNG, Hydro-Québec, la Fondation de l'ATC et le GRTC pour les bourses de recherche de l'étudiant.



Annexe 4

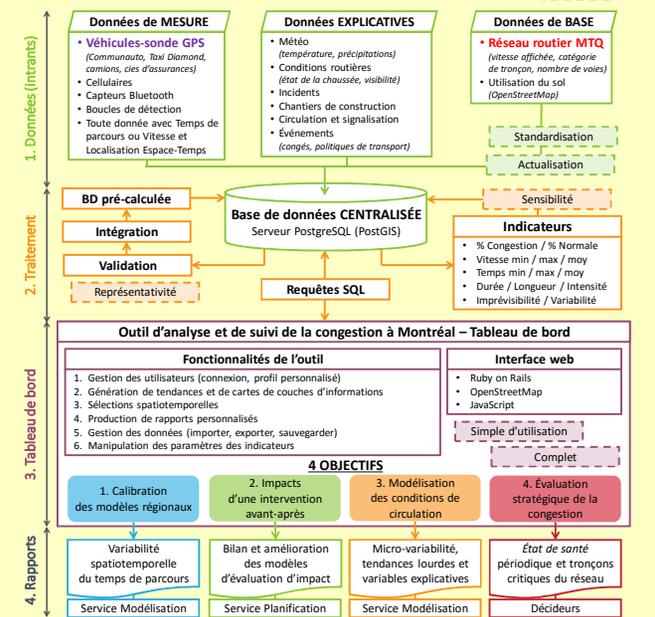
Affiche AQTr 2015 « Congestion à Montréal : Vers un outil d'analyse et suivi »

Congestion à Montréal : Vers un outil d'analyse et suivi

Marc-André Tessier, candidat à la maîtrise (M.Sc.A.) marc-andre.tessier@polymtl.ca
Directrice : Pre Catherine Morency - Codirecteur : Pr Nicolas Saunier

Contexte et objectif "You're not stuck in a traffic jam, you are the jam." - J.H. Kay
En 2013, le **ministère des Transport du Québec** a mandaté Polytechnique Montréal de développer un **outil de suivi et d'analyse des conditions de circulation** du réseau routier du MTQ de la région de Montréal. Ce projet est la continuité d'un projet d'étude du potentiel de différentes technologies de collecte de données de circulation aussi réalisé par Polytechnique de 2007 à 2011.

Vision de l'architecture de l'outil



Conclusions et perspectives

Conclusion : Potentiel énorme pour un outil d'analyse à Montréal

Travaux en cours : - Croisement avec des données explicatives
- Développement d'une interface web

Défis méthodologiques : - Accès aux données (plusieurs parties prenantes)
- Actualisation et standardisation des bases de données
- Taille de l'échantillon des données GPS selon l'agrégation spatio-temporelle

Défis de développement d'indicateurs :

- Analyse de la **sensibilité des indicateurs** pour déterminer les seuils à utiliser
- **Problème du seuil de vitesse :** affichée vs design vs écoulement libre vs variable
- Indicateurs de **tendances à long termes**

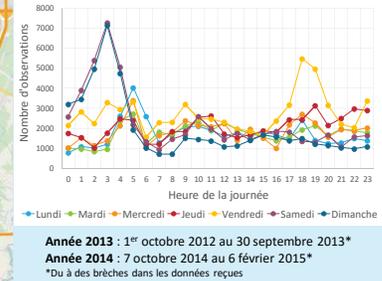
Étude de cas : Pont Champlain vers Montréal

- Contexte :**
- Sur tout des analyses par corridors dans la littérature
 - Ne considère pas l'effet de fusion des multiples voies d'accès (problématique soulevée au CATT Lab)
 - L'influence des ponts sur la congestion est un phénomène presque unique à l'île de Montréal, qui a +/- 20 ponts majeurs
- Motivation :**
- Permettre d'analyser l'impact global des projets en lien avec le Pont Champlain (SLR et construction du nouveau pont)



Description des données

Distribution des données GPS de l'étude de cas

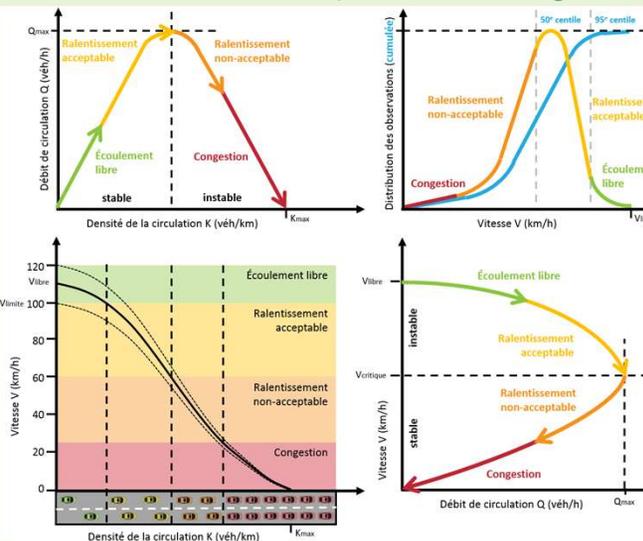


Réseau routier du MTQ divisé en tronçons de 100 m (autoroute et routes principales qui accèdent au Pont Champlain vers Montréal : **45.7 km de route**)

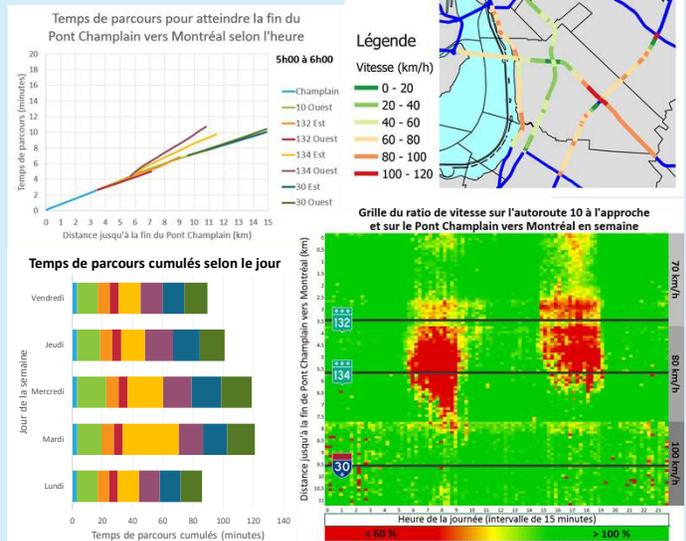
Données GPS de Taxi Diamond (environ 1000 véhicules équipés)

- Position (X,Y) à tous les **600 m** avec **Vitesse et Orientation**
- TOTAL :** +/- 300k points par jour et 9 millions de points par mois
- ÉTUDE DE CAS :** +/- 450 points par jour et 15 000 points par mois
- Fortes variations dans le temps**

Définition des seuils d'acceptabilité de la congestion



Quelques résultats



Remerciements

Les auteurs remercient le **MTQ** pour le financement et les contributions à ce projet de recherche ainsi que **Taxi Diamond** et **Communauto** pour l'accès aux données. Ils remercient également le CRSNG, Hydro-Québec, la Fondation de l'ATC et le GRTC pour le soutien financier de l'étudiant et le FRQNT pour l'opportunité de stage international.

Annexe 5

Affiche Colloque Chaire Mobilité 2015 «Indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière »

Indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière

Marc-André Tessier, candidat à la maîtrise (M.Sc.A.)

Directrice : Pre Catherine Morency – Codirecteur : Pr Nicolas Saunier

Contexte et objectif

En 2013, le ministère des Transport du Québec a mandaté Polytechnique Montréal de développer un outil de suivi et d'analyse des conditions de circulation sur le réseau routier MTQ de la région de Montréal. Quatre objectifs spécifiques ont été formulés :

1. Calibration des modèles régionaux
2. Impacts d'une intervention avant-après
3. Modélisation des conditions de circulation
4. Évaluation stratégique de la congestion

Méthodologie générale de conception de l'outil

1. Revue des outils existants : Identification des fonctions principales (2013)
2. Formulation de quatre objectifs spécifiques pour l'outil (2013)
3. Études de cas : Autoroute 40 sur l'île (2014), Pont Champlain vers Montréal (2015)
4. Prototypage d'un outil automatisé (Travaux en cours)

Création de la table de données maîtresse de l'outil

Unité d'analyse principale : « segment-heure » (segment de 100 m et heure de la journée)

Données de MESURE		Données de BASE		Données EXPLICATIVES			
Vitesse	Débit	Réseau routier	Utilisation sol	Météo	Travaux	Incidents	Événement
(GPS)	(Boucles)	(BGR)	(CMM)	(Env. Canada)	(SGE-Intervention)	(SAGE)	(à créer)
Moyenne	Volume	No route	Région	Température	Présence?	Présence?	Présence?
Écart-type		Direction	Densité	Pluie	Type	Type	Type
Nb observations		Vitesse affichée		Neige	Limite de vitesse		
		Type route		Vitesse vent	Nb voie dispo		
		Nb voie		Direction vent			
		Largeur voie					

Développement d'indicateurs de point d'accès

Contexte :

- Surtout des analyses par corridors dans la littérature
- Ne considère pas l'effet de fusion des multiples voies d'accès (problématique soulevée lors d'un stage au CATT Lab)
- L'influence des ponts sur la congestion est un phénomène presque unique à l'île de Montréal, qui a +/- 20 ponts majeurs

Motivation :

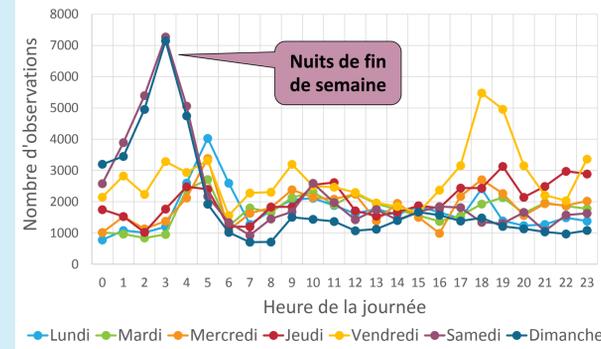
- Permettre d'analyser l'impact global des projets en lien avec le Pont Champlain (SLR et construction du nouveau pont)

Cas du Pont Champlain vers Montréal



Description des données

Distribution des données GPS de l'étude de cas



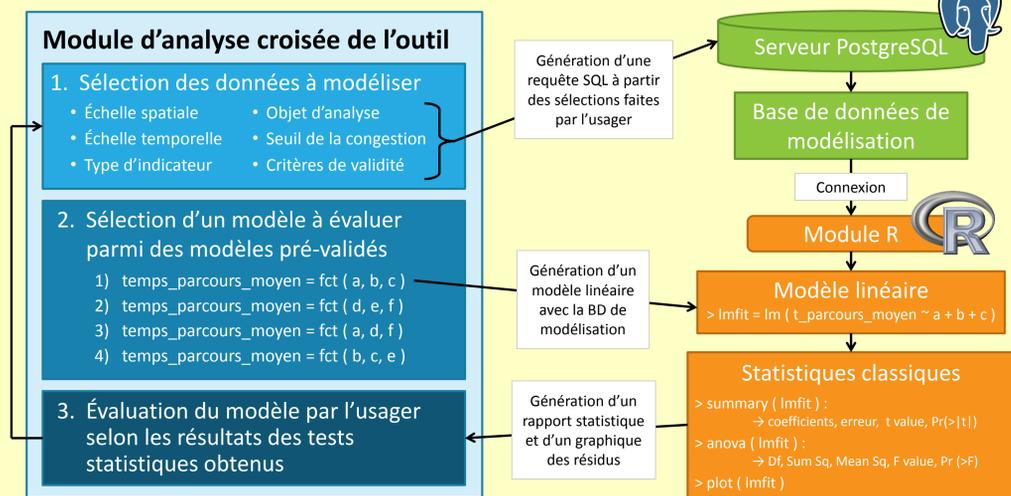
Réseau routier du MTQ

divisé en tronçons de 100 m (autoroute et routes principales qui accèdent au Pont Champlain vers Montréal : 45.7 km de route)

Données GPS de Taxi Diamond

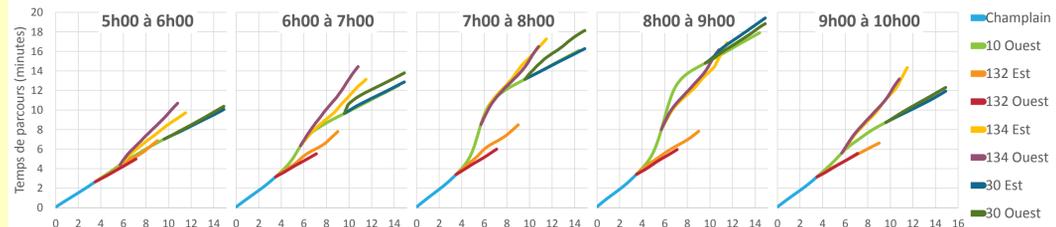
- Position (X,Y) à tous les 600 m avec Vitesse et Orientation
- TOTAL : +/- 300k points par jour et 9 millions de points par mois
- ÉTUDE DE CAS : +/- 450 points par jour et 15 000 points par mois
- Fortes variations dans le temps

Génération automatisée de modèles explicatifs

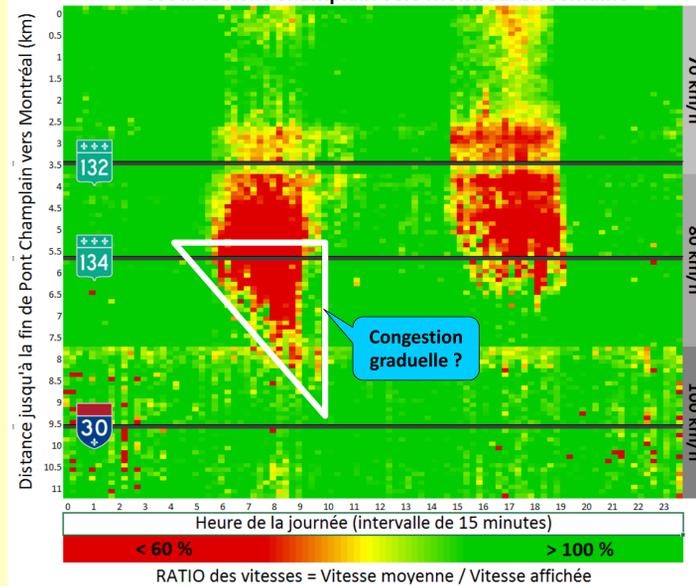


Quelques résultats de l'étude

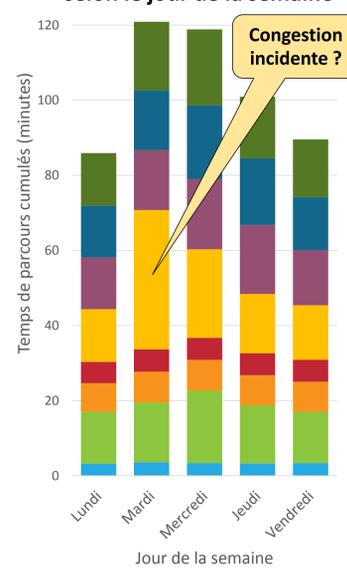
Temps de parcours cumulé pour atteindre la fin du Pont Champlain en semaine (distance en km)



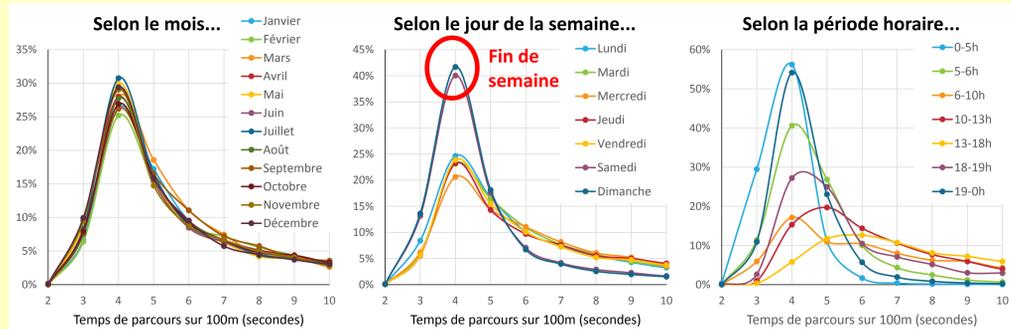
Grille du ratio de vitesse sur l'autoroute 10 à l'approche et sur le Pont Champlain vers Montréal en semaine



Temps de parcours cumulés selon le jour de la semaine



Distribution fréquentielle du temps de parcours moyen



Conclusions et perspectives

Conclusion : Potentiel énorme pour un outil d'analyse à Montréal

- Défis méthodologiques :**
- Accès aux données (plusieurs parties prenantes)
 - Actualisation et standardisation des bases de données
 - Taille de l'échantillon de données GPS selon l'agrégation

Défis de développement d'indicateurs :

- Analyse de sensibilité des indicateurs et de leurs paramètres
- Définition des seuils d'acceptabilité de la congestion
- Formuler des indicateurs qui décrivent les tendances à long terme

Remerciements

Les auteurs remercient le MTQ pour le financement et les contributions à ce projet de recherche ainsi que Taxi Diamond et Communauto pour l'accès aux données. Ils remercient également le CRSNG, Hydro-Québec, la Fondation de l'ATC et le GRTC pour le soutien financier de l'étudiant et le FRQNT pour l'opportunité de stage international.

Transports Québec



Annexe 6

Article présenté au TRB 2016 « Impact of weather conditions on traffic : case study of Montreal's winter »

1 **IMPACT OF WEATHER CONDITIONS ON TRAFFIC: CASE STUDY OF MONTREAL'S**
2 **WINTER**

3
4
5
6 **Marc-André Tessier, Master Candidate (Corresponding Author)**

7 Department of Civil, Geological and Mining Engineering
8 Polytechnique Montréal, C.P. 6079, Station Centre-Ville
9 Montréal (Québec) CANADA H3C 3A7
10 Phone: (514) 340-4711 ext. 4157
11 Email: marc-andre.tessier@polymtl.ca
12

13
14 **Catherine Morency, Ph.D., Associate Professor**

15 Head of the Mobilité Research Chair
16 Department of Civil, Geological and Mining Engineering
17 Polytechnique Montréal, C.P. 6079, Station Centre-Ville
18 Montréal (Québec) CANADA H3C 3A7
19 Phone: (514) 340-4711 ext. 4502
20 Email: cmorency@polymtl.ca
21

22
23 **Nicolas Saunier, Ph.D., Associate Professor**

24 CIRRELT ITS Lab Director
25 Department of Civil, Geological and Mining Engineering
26 Polytechnique Montréal, C.P. 6079, Station Centre-Ville
27 Montréal (Québec) CANADA H3C 3A7
28 Phone: (514) 340-4711 ext. 4962
29 Email: nicolas.saunier@polymtl.ca
30

31
32
33
34 Word count: 5,584 words (text) + 1,750 words (6 figures/1 table) = 7,334 words
35
36
37

38
39 Submission Date: August 1st 2015
40

1 ABSTRACT

2 Congestion is the number one issue in many metropolitan areas. It decreases quality of life and
3 generates negative impacts on the environment and the economy. Apart from recurring congestion
4 causes, many events and circumstances can affect the traffic conditions: weather, roadworks, road
5 incidents and other special events. The former is very important especially in a northern city like
6 Montreal, where winter conditions last four to six months each year.

7 This study relies on GPS data from vehicle fleets combined with weather data from
8 weather stations to assess traffic conditions on the whole highway network of the Greater Montreal
9 Area. The proposed methodology uses logistic regression models to model the probability of
10 congestion to describe the effects of weather conditions (snowfall), road conditions (icy) and
11 visibility on traffic conditions, defined using the Speed Limit Ratio. This research is part of the
12 development of a congestion monitoring and analysis tool for the region of Montreal, which is also
13 presented.

1 INTRODUCTION

2 Congestion is the number one issue in many metropolitan areas. It decreases the quality of life and
3 generates negative impacts on the environment and the economy. An annual congestion cost of
4 \$1.85 billions (1) was estimated for the year 2008 for the Greater Montreal Area (GMA). Apart
5 from recurring congestion causes, many events and circumstances can affect the traffic conditions:
6 weather, roadworks, road incidents and other special events. A 2005 report from FHWA (2) showed
7 that bad weather was responsible for 15 % of all congestion in the United States.

8 Assessing the impact of weather on road traffic is essential for planning purposes as well
9 as for road safety. It becomes also very important especially in a northern region of the globe like
10 the Quebec province, where winter conditions last four to six months each year. Despite the many
11 regional studies on the effects of weather on road traffic, each case is unique with respect to their
12 weather conditions and Montreal is an interesting case study since conditions vary considerably
13 during the year.

14 This study relies on GPS data from vehicle fleets combined with weather data from
15 weather stations to assess traffic conditions on the whole highway network of the Greater Montreal
16 Area. The proposed methodology uses logistic regression models to model the probability of
17 congestion to describe the effects of weather conditions (snowfall), road conditions (icy) and
18 visibility on traffic conditions, defined using the Speed Limit Ratio. This research is part of the
19 development of a congestion monitoring and analysis tool for the region of Montreal, which is also
20 presented.

21 This research is part of a broader research project aiming to develop a congestion
22 monitoring and analysis tool for the region of Montreal, as mandated by the Quebec Ministry of
23 Transportation (MTQ). The objective of this particular research is to add modelling capacities to
24 the tool and to better understand the effects of explanatory variables on congestion.

25 The paper is organized as follows: a literature review on the impact of weather on road
26 traffic is first proposed to set references for the proposed methodology. The next section describes
27 the methodology including the data sources, the data integration and the model estimation choices.
28 Results are then presented with an emphasis on the effects of weather conditions on congestion.
29 The paper concludes by discussing limitations and future works.

30 LITERATURE REVIEW

31 The literature gathers multiple study cases on the causes of congestion. The effect of weather
32 conditions (temperature, wind speed, visibility, road surface condition and precipitation rate) on
33 traffic conditions (speed, volume, capacity, travel time, reliability) was largely studied using linear
34 regressions, logistic regressions and statistical analysis. Each one found useful results for a specific
35 geographical study case, and it is obvious that these results cannot simply be transposed to other
36 contexts. Hence, each additional study can help confirming or reversing some findings. Chapter
37 10 of the Highway Capacity Manual (HCM) 2010 presents “comprehensive results” of reduction
38 in freeway capacity due to rain, snow, temperature, wind and visibility (3) from a research
39 conducted by Agarwal et al. (4) on Minneapolis interstates using around four years of data from
40 about 4,000 traffic detectors and three weather stations. The study proposes capacity reduction
41 values for different intensities (e.g. light rain, moderate rain and heavy rain) and shows that the
42 previous HCM 2000 might underestimate or overestimate some values of reductions in speed and
43 capacity. The HCM 2010 also proposes results from an interesting study (5) of 1996 on German
44 Autobahns showing road capacities under different conditions (number of lanes, weekday or
45 weekend, daylight or dark and dry or wet pavement). But, their proposed values might not be
46

1 appropriate for the North American reality since these autobahns do not have speed limits.

2 Lamm et al. (6) proposed one of the first notable paper on the subject in 1990 when they
3 studied the impacts of rainy weather and road curve on the speed variance of rural highways. They
4 concluded that wet pavement will not affect traffic speed as long as visibility is not significantly
5 decreased by heavy rain.

6 Ibrahim and Hall (7) were also pioneers in 1994 using a multiple regression analysis
7 with dummy variables for rain and snow intensities. They conclude that light rain and light snow
8 had similar reductions in speeds (3% to 5%), while heavy rain (14% to 15%) and heavy snow (30%
9 to 40%) caused greater reductions in speeds. Most researchers agree that these results are limited
10 due to the small data size (six clear, two rainy and two snowy days).

11 Kwon et al. (8) proposed four linear regression models to assess capacity and free-flow
12 speed (FFS) reductions on an urban freeway section in Toronto. Video data combined with road
13 maintenance patrol reports have been used to estimate the amount of snow on the road, creating a
14 scalar variable called Road Surface Index (RSI), ranging from 0 (icy) to 1 (dry). They found that
15 visibility and snow intensity were significant and suggest that their regression models have a better
16 level of granularity than the values from HCM 2010. A previous study from Kwon et al. (9)
17 proposed a method to divide the total congestion delay into six components (causes) of congestion:
18 incidents, special events, lane closures, adverse weather, potential ramp metering gain and excess
19 in demand (remaining delay). The study showed that weather represented about 4% of congestion
20 and that it was only significant during the AM peak using a section of I-880 in the San Francisco
21 Bay Area.

22 Zhao and Chien (10) used speed data collected by INRIX to assess the impact of weather
23 on travel time reliability which was measured by the Buffer Index = $(T_{95} - T_{avg}) / T_{95} \times 100\%$,
24 one of the many congestion indicators developed by the Texas Transportation Institute (11). The
25 study used 74 Traffic Message Channel (TMC) segments across the state of New Jersey that were
26 within a 5-mile radius of a Road Weather Information System (RWIS) station. The TMC segments
27 were classified in four groups of highways, along with four typical time periods (AM and PM peak,
28 and mid-day and mid-night off-peak) to run statistical analysis (ANOVA) using four snowfall rate
29 groups. The study found that snow reduces traffic speed.

30 Datla and Sharma (12) focused on the impact of cold and snow on traffic volumes all over
31 the province of Alberta. Using regression models, the study demonstrated that the impact on traffic
32 volumes varies throughout the days of the week, the time of the day and the type of highway.
33 Surprisingly, the impact of cold weather on off-peak hours (10% to 15% volume reduction) was
34 found higher than for peak hours (6% to 10%) for commuter roads, and a greater effect was found
35 on recreational roads, respectively 18% to 30% off-peak and 30% to 58% during peak.

36 Van Stralen et al. (13) used a stated adaptation experiment to see changes in travel choices
37 influenced by adversed weather conditions on Dutch highways. Respondents were given
38 hypothetical weather situations upon which they had to choose between six travel alternatives from
39 travelling by car on the freeway in AM peak, to avoiding the AM peak, avoiding the freeway, using
40 the bike or public transit and simply not travelling. The study presented a Panel Mixed Logit
41 models; results showed that rainfall tends to increase the probability of congestion at specific
42 bottleneck locations, as high as 86.7% for light rain and 77.4% for heavy rain.

43 The literature also shows a lot of research on the impact of weather on highway safety,
44 mainly around the intensity of road crashes. For example, Maze et Al. (14) found that severe winter
45 storms increases the risk of road crashes by 25 times on a study of I-35.

46 In summary, the impact of weather on road traffic is widely covered in the literature using

1 many different variables, quantification methodologies and case studies. It seems evident that the
2 resulting impact estimates cannot be transposed from a geographical location to another because
3 of the changes in climate conditions. Also, the proposed methodologies mainly depend on the
4 availability of weather data and traffic data (loop detectors, GPS data, etc.). It is therefore useful
5 to generate new results for other locations and to develop new methodologies based on the
6 available data sources. Hence assumptions can be confirmed or infirmed and steps towards more
7 generalizable conclusions can be taken.

8 **METHODOLOGY**

10 The goal of this study is to make a diagnosis of the effect of weather on congestion. This is done
11 by developing a model of the probability that a roadway is congested (using different congestion
12 thresholds). Network parameters (region, speed limit), time periods (grouped using the
13 Kolmogorov-Smirnov (KS) Test) and weather attributes (road surface condition, precipitation and
14 visibility) are used in the model. A case study that focuses on freeways and winter conditions
15 (February and March) is presented. This section describes the data sources, the data integration
16 methodology and the variable definitions to estimate the models.

18 **General Framework**

19 As mentioned earlier, this research is part of a broader project for the development of a multi-
20 objective tool including various indicators and functions. Figure 1 shows the schematic framework
21 of the congestion measurement and analysis tool currently being developed for Montreal. The
22 particular elements related to the current study are highlighted in red. The tool is made of four
23 main sets of functionalities or modules that can be related to the methodology: the inputs (data
24 system), the data processing (integration, indicators, variables and model estimation), the online
25 dashboard and the reports (model outputs). This research focuses on the third main objective,
26 Traffic Condition Modelling, particularly on the explanatory variables section.

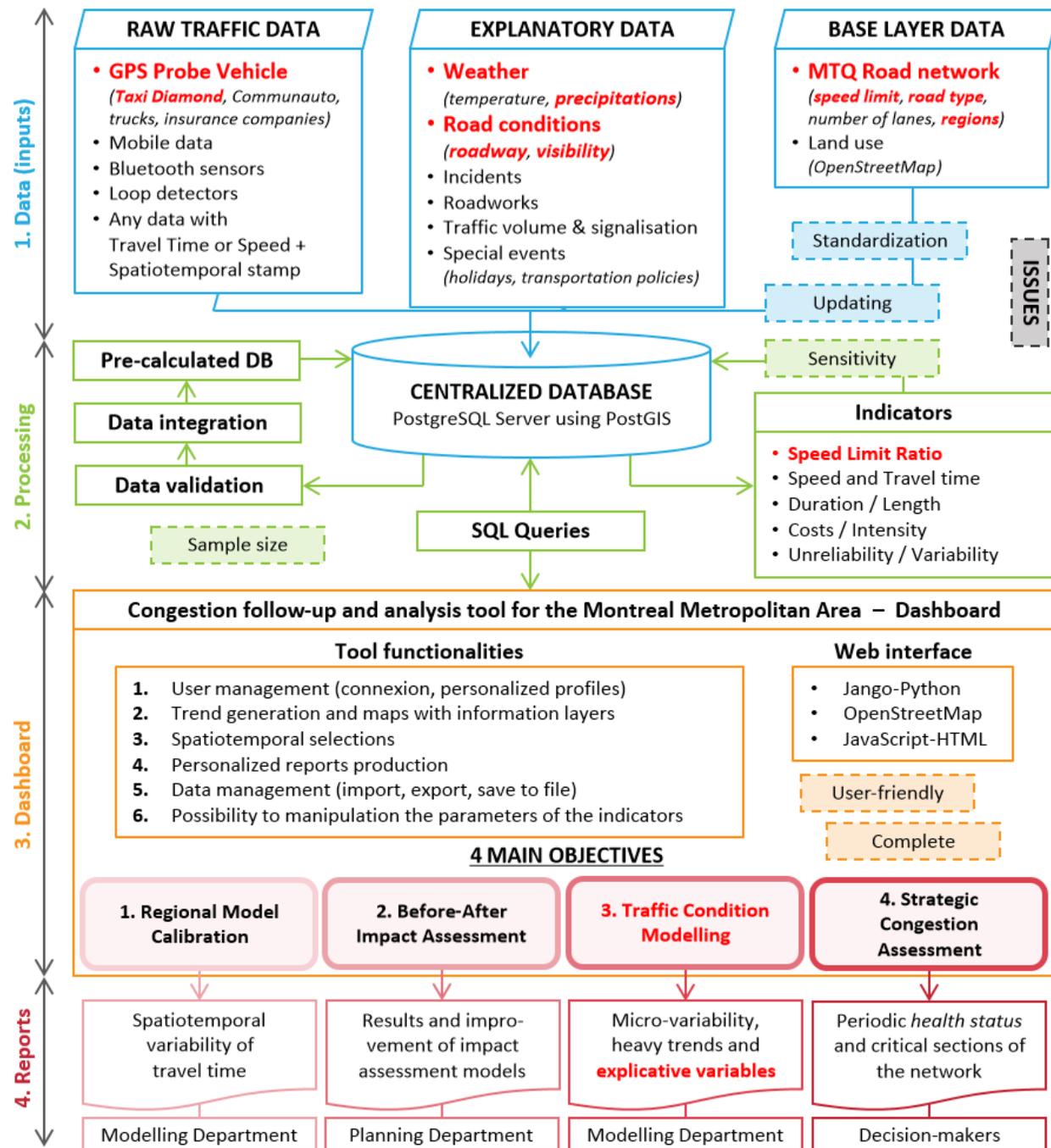


FIGURE 1 General Framework of the Congestion Measurement and Analysis Tool

Data System

For this study, three types of data are used:

- traffic measurement data: GPS points from a taxi fleet
- base layer data: governmental road network
- explanatory data: weather data from weather stations

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

1 *GPS Data Points from a Taxi Fleet*

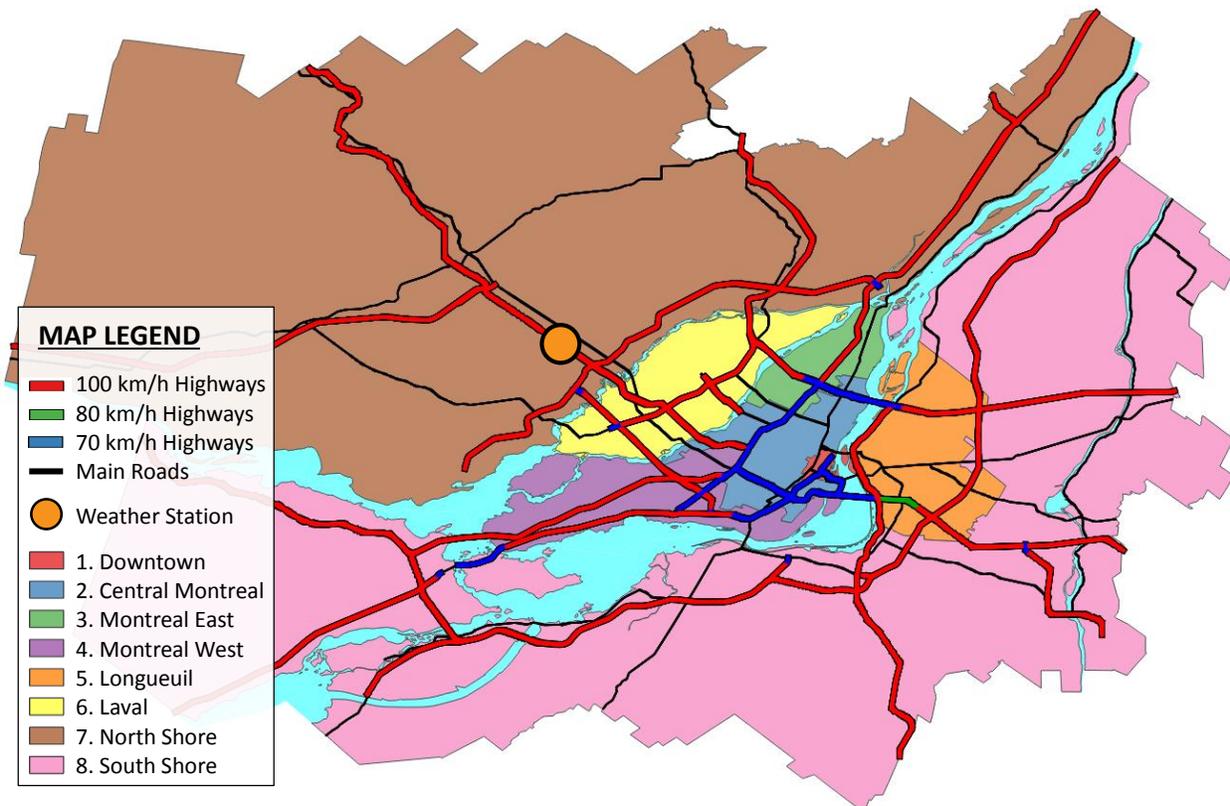
2 This study uses data from a taxi company in Montreal that has a fleet of more than 1,000 vehicles,
 3 almost all equipped with a GPS system to locate the vehicles in real time. The GPS system records
 4 the (longitude, latitude) position every 600 m (0.4 mi), as well as the timestamp (date and time),
 5 the spot speed and the azimuth (orientation). The raw database contains about 300,000 points per
 6 day and 9 millions points per month. Historical data from February 7th to March 31st 2014 are used
 7 for the purpose of this case study on winter weather. Also, only weekday data are used for this first
 8 modelling attempt.

9 *Road Network Preparation*

10 The MTQ has a shapefile database of their road network that includes highways and main roads
 11 (numbered roads) across the Quebec province. These two types of roads are divided into equal
 12 segments of 100 meters (approximately 1/16 of a mile), using the GRASS GIS software to provide
 13 a common spatial unit of analysis. The methodological choice to split the highway network in
 14 sections of regular length enhances the modelling possibilities since all spatial units can be
 15 compared, which is not the case when using TMC as in the work of (9).

16 The posted speed limit value is assigned to each 100 m segment. For this case study, only
 17 segments on the highways (freeways) of the Montreal Metropolitan Area are selected. Figure 2
 18 shows the spatial scope of this study. Few studies have looked at the impact of weather at a level
 19 of the whole network of a major metropolitan area.

20
21



22

23 **FIGURE 2 Case Study Map: Highways and main roads of the GMA (8 regions) and location**
 24 **of the Ste-Therese weather station**

25

1 *Weather Data*

2 Throughout the years, the MTQ has developed a large network of road weather stations in
3 collaboration with Environment Canada (EC). According to a road weather specialist working for
4 EC, the weather can be considered as uniform on the whole GMA. Using one single central weather
5 station (Ste-Therese, see Figure 2) is then enough for this case study. Every weather station is
6 equipped with several detectors (*used for this case study*):

- 7 • Air sensor: humidity, air temperature, air pressure;
- 8 • Pavement sensor: *road surface condition*, surface and underground temperatures;
- 9 • Wind sensor: wind speed and direction;
- 10 • Precipitation sensor: precipitation rate, total precipitation, *visibility* and *WMO Code 4680*.

11 The *road conditions* are obtained using a combinaison of multiple roadway measures and
12 are classified in six categories: Dry, Damp, Wet, Ice, Residual Salt and Freezing Wet.

13 The World Meteorological Organization (WMO) has standardized weather codes for
14 weather sensors. The WMO Code 4680 has close to a hundred codes that were simplified to 6
15 *weather conditions*: None, Dust, Fog, Drizzle, Rain and Snow.

16 *Visibility* is measured using a special sensor with a maximum visibility distance of 3.1 km
17 (about 2 mi), which is considered as perfect visibility. Smaller distances represent reduced
18 visibility.

19

20 **Data Integration and Calculation**

21 There are two steps of data integration: matching GPS and road network data, then adding the
22 weather data. For this case study, we want to model congestion. The Speed Limit Ratio is chosen
23 as the indicator of traffic conditions.

24

25 *Matching GPS Data on the Road Network*

26 These two geographic datasets are processed using PostgreSQL's PostGIS spatial functions:

- 27 1) Calculate a global azimuth for each 100 m road segment, using their extremity points;
- 28 2) Match the GPS points to the road segments using two constraints:
 - 29 a. the GPS point must be within a distance of 12 m (39 ft), representing a 24 m wide
 - 30 road, considered as an appropriate width to account for GPS location errors;
 - 31 b. the point azimuth must be the same as the segment azimuth, accepting $\pm 15^\circ$.

32

33 Considering the azimuth is important to avoid the matching of vehicles traveling in the
34 opposite direction or vehicles that are moving orthogonally to the road segment. Near interchanges,
35 vehicles are often within the specified distance of several road segments, so the azimuth is needed
36 to find out which roadway should be matched.

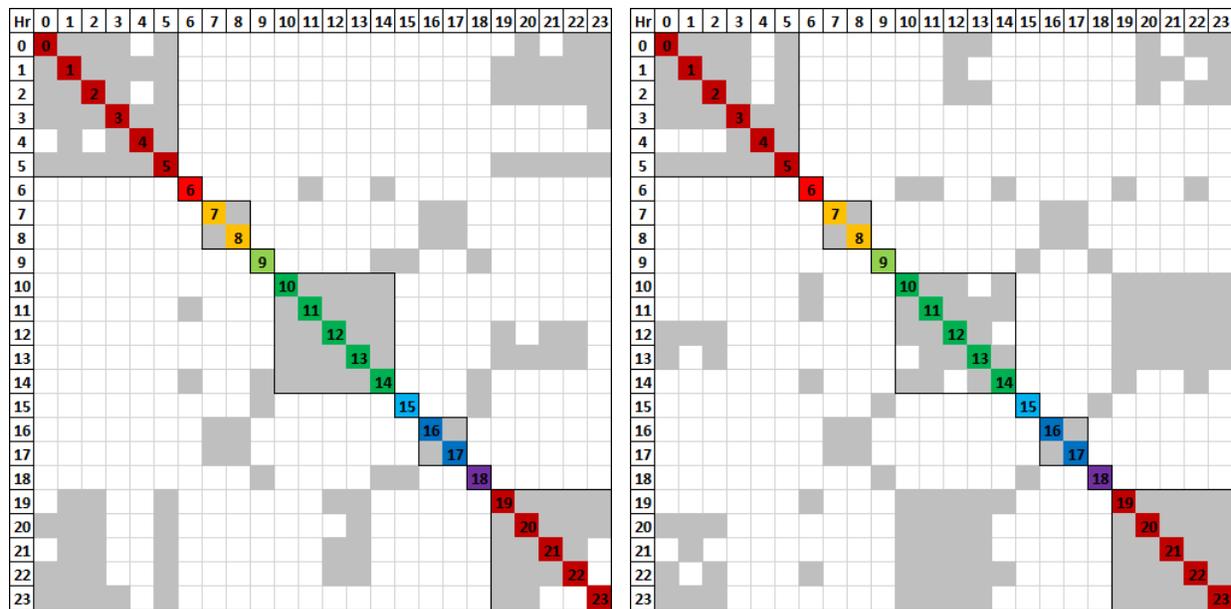
37

38 *Congestion indicators*

39 The Speed Limit Ratio (SLR) is calculated for a road segment (r) and a time period (p) as:

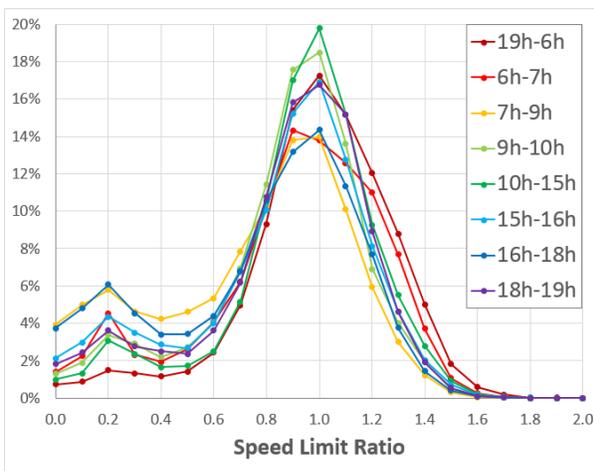
$$40 \text{ Speed Limit Ratio: } SLR_{(r,p)} = \frac{s_{avg}(r,p)}{s_{limit}(r)} \quad (1)$$

41 The SLR is a congestion indicator similar to the well-known Travel Time Index (*II*),
42 except that it uses the speed limit rather than the "free-flow speed". This methodological choice is
43 made in accordance with previous studies (*15*) and because the reference to the speed limit made
44 more sense to us. The definition and the calculation assumptions concerning the free-flow speed

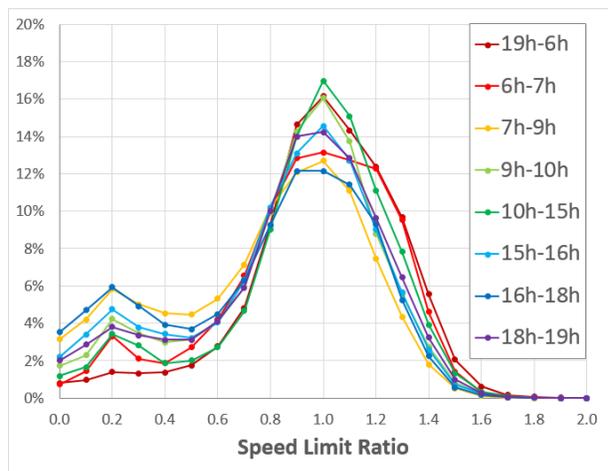


(a) February Data KS-Test (criteria: $D < 7\%$)

(b) March Data KS-Test (criteria: $D < 6\%$)



(c) February SLR Frequency Distributions



(d) March SLR Frequency Distributions

1
2 **FIGURE 3 Time Period Creation: KS-Test Results Matrix (a,b) and SLR Frequency**
3 **Distribution (c,d) for February and March**

4
5 *Spatial Attributes*

6 Congestion also varies in space so it is important to add spatial variables to the models. The eight
7 regions shown on Figure 2 are used to account for spatial variations. The posted speed limit value
8 for each 100m segment is also used to describe spatial variations. Strong correlation (0.63) was
9 found between these two variables, but both variables were kept to control the spatial effect.

10
11 *Weather Attributes*

12 Preliminary tests show that using all the possible road condition types and weather condition types
13 does not necessarily improve the model. A correlation analysis is also performed to verify that
14 correlation between variables is always acceptable (between -0.4 and 0.4). The choice is made to

1 focus on winter condition variables (Ice and Snow), so binary variables are created for each
2 weather attribute using the following logic:

- 3 • Icy road: 1 = (Road condition = Ice), 0 = (Road condition = Others)
- 4 • Snowfall: 1 = (Weather condition = Snow), 0 = (Road condition = Others)
- 5 • Visibility: 1 = (Visibility = 3.1 km), 0 = (Road condition < 3.1 km)

6

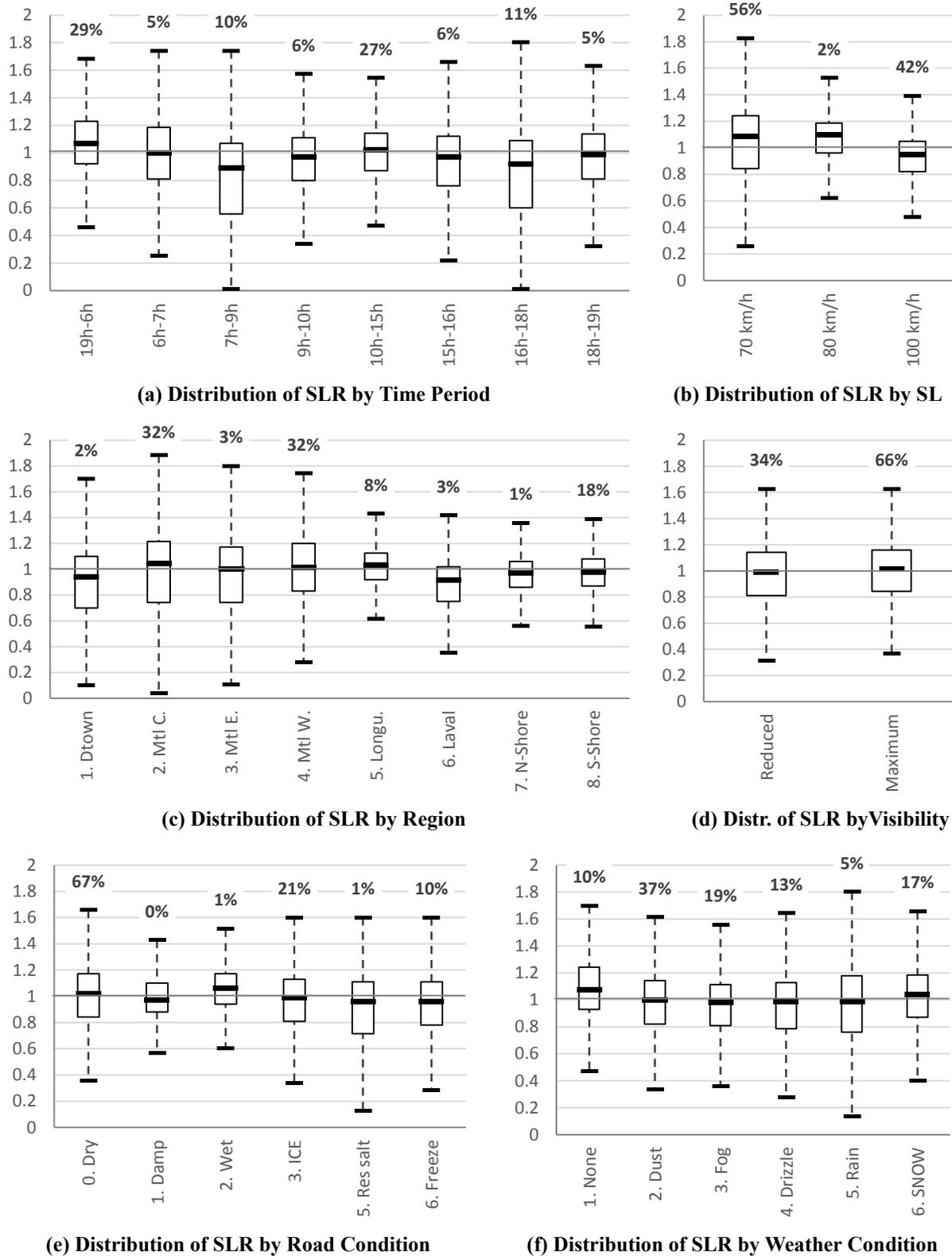
7 *Congestion Thresholds*

8 Looking at the Speed Limit Ratio frequency distributions from Figures 3c and 3d, we can observe
9 two distinct peaks: the largest around SLR=1.0 and the lowest close to SLR=0.2. The former refers
10 to normal traffic conditions and the later represents congested conditions. The literature shows
11 multiple definitions of congestion and no congestion threshold is widely accepted. Previous
12 research in Montreal (15) has used a congestion threshold of SLR=0.6, which means congestion
13 is observed when the average traffic speed is under 60 % of the the speed limit. For this case study,
14 several congestion thresholds (from SLR=0.1 to SLR=1.0) are also used to estimate different
15 congestion models.

16

17 *Data Distributions*

18 Data distributions for SLR according to all the other variables are shown on Figure 4. The
19 distributions are from the month of February only, but the distributions for March are quite similar.
20 Each distribution is a standard box plot showing quantiles as well as minimum and maximum
21 values. The percentage values on top of the graphs represent the number of observations for this
22 variable. For example, the February database contains 603 037 records and 176 863 records are
23 during night-time (19h-6h), which is 29% of the records. Figure 4a allows seeing the variation of
24 the Speed Limit Ratio (SLR) during and off the daily peak hours: the SLR is lower during peaks.
25 Figure 4b shows that 100 km/h highways have “more congestion” with a median SLR<1.0. The
26 spatial distribution of Figure 4c mostly indicates that there is more variability on the Island of
27 Montreal (Regions 1 to 4), regardless of the number of observations. The visibility seems to affect
28 slightly the SLR (Figure 4d) since the median of maximum visibility (3.1 km) is > 1.0 while the
29 median of reduced visibility is slightly < 1.0. Figure 4e and 4f give a perspective on the effect of
30 icy road (21% of obs.) and snow (17% of obs.) and there is no particular trend between the different
31 conditions.



1
 2 **FIGURE 4 Data distribution of SLR as a function of the other variables for February**
 3 **(603 037 observations)**

1 **Model Estimation**

2 Many types of models can be used to model the impact of weather on traffic conditions, which is
 3 represented here by the Speed Limit Ratio. We can simplify the question by summarizing traffic
 4 conditions in two states: congested or not. The SLR distributions also support the existence of two
 5 main traffic conditions. The logistic regression (LOGIT) model is chosen for this study as it models
 6 the probability of one event occurring over another one, in our case that traffic conditions are
 7 congested (congestion=1) or not (congestion=0). Spatio-temporal variables and weather condition
 8 variables then describe the probability that conditions are congested, according to the predefined
 9 congestion thresholds.

10

11 **RESULTS**

12 Regression models were calculated using R, one of the most powerful statistical languages, and
 13 actually one of the most used pieces of software thanks to its open source nature.

14

15 **Logistic Models**

16 The first model models the probability of congestion (threshold of SLR<0.6):

17 **Logit1(SLR<0.6) = β_0 + β_1 Time period + β_2 Regions + β_3 Speed Limit+ β_4 Ice + β_5 Snow + β_6 Visibility**

18 The results are presented in Table 1. The strength of the model is evaluated by the McFadden
 19 pseudo- R^2 , (often denoted ρ^2) which is said to have smaller values than R-square and for which
 20 values of 0.2 to 0.4 are considered highly satisfactory (16). Its formula is:

$$21 \quad R^2_{McFadden} = 1 - \ln(L_M) / \ln(L_0) \quad (2)$$

22 L_M : likelihood estimated with the predictors of the model

23 L_0 : likelihood estimated without

24

25 The presented models have a ρ^2 of 0.162 (February) and 0.097 (March) which is lower but is still
 26 sufficient to discuss the relative impact of weather conditions on congestion occurrence on the
 27 Montreal's highways.

28 The Odds Ratio (OR) is the exponential of an estimated coefficient ($OR = \exp^{\beta x}$) and
 29 allows estimating the impact of weather variables on the probability of congestion $P(SLR < 60\%)$,
 30 as OR-1 is the variation in the probability of congestion $P(SLR < 60\%)$ if a binary variable is 1.
 31 Then, icy road conditions increase the probability of congestion by 20% (February) and by 71%
 32 (March) compared to non-icy conditions, which is a considerable difference between the two
 33 months. On the other hand, snowfall increases $P(SLR < 60\%)$ by 29% in March but decreases
 34 $P(SLR < 60\%)$ by 3% in February, which is however not as significant with a larger p-value. The
 35 negative impact of snowfall may be a result of the negative correlation found between snowfall
 36 and icy roadway.

37 The models show that reduced visibility increases the odds of congestion by 14% in
 38 February and by 12% in March compared to maximum visibility conditions. This constant value
 39 in both models could be considered as a general effect of reduced visibility for the whole
 40 metropolitan area or for every time period. To verify this assumption, two more models are
 41 developed in the next section to see the interactions between visibility and regions, and the
 42 interactions between visibility and time periods. Models also show that time period coefficients
 43 are consistent with the distributions presented in Figure 4, which confirms that the hours were well
 44 grouped.

45

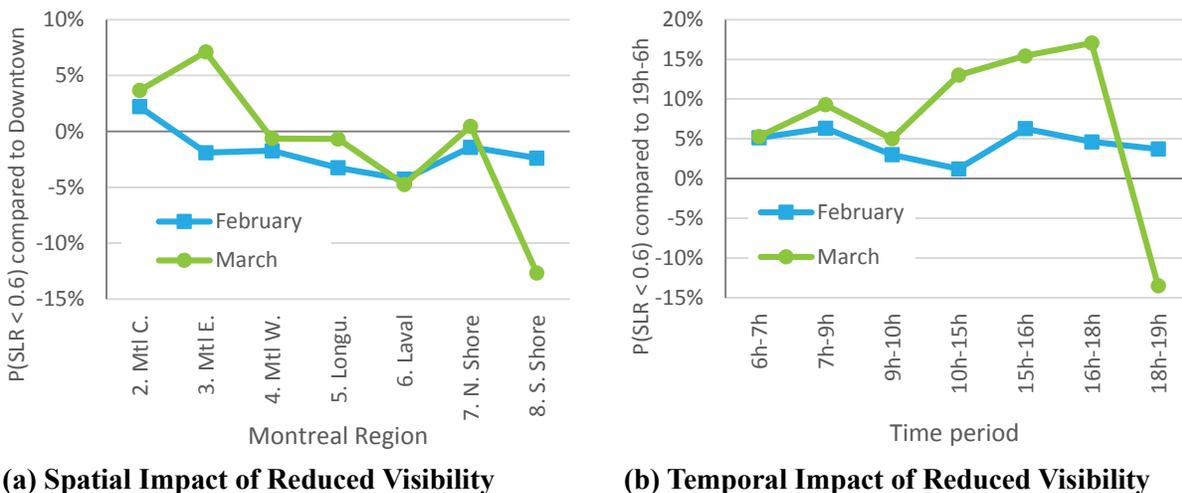
1 **TABLE 1 Logistic Models of Congestion Using a SLR<0.6 for February and March 2014**

2

FEBRUARY 2014	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)		OR	2.5%	97.5%
Constant:	-2.371	0.031	-77.37	< 2e-16	***	0.093	0.088	0.099
Time Periods: Ref. 19h-6h								
6h-7h	1.178	0.021	55.83	< 2e-16	***	3.249	3.117	3.386
7h-9h	2.127	0.016	135.28	< 2e-16	***	8.390	8.135	8.653
9h-10h	1.259	0.020	62.69	< 2e-16	***	3.521	3.385	3.662
10h-15h	0.865	0.015	56.28	< 2e-16	***	2.374	2.304	2.447
15h-16h	1.597	0.019	84.16	< 2e-16	***	4.938	4.758	5.125
16h-18h	2.056	0.015	132.91	< 2e-16	***	7.813	7.580	8.054
18h-19h	1.300	0.021	61.29	< 2e-16	***	3.668	3.518	3.823
Regions: Ref. Downtown								
<i>Montreal Centre</i>	<i>(not significant)</i>							
Montreal East	0.190	0.031	6.18	6.4e-10	***	1.209	1.139	1.284
Montreal West	-0.810	0.026	-30.83	< 2e-16	***	0.445	0.423	0.468
Longueuil	-1.841	0.037	-49.96	< 2e-16	***	0.159	0.148	0.171
Laval	-0.215	0.034	-6.36	2.0e-10	***	0.807	0.755	0.862
North Shore	-1.171	0.051	-23.03	< 2e-16	***	0.310	0.280	0.342
South Shore	-2.349	0.033	-70.43	< 2e-16	***	0.095	0.089	0.102
Speed Limits: Ref. 100km/h								
70km/h	-0.147	0.012	-12.21	< 2e-16	***	0.863	0.843	0.884
80km/h	0.980	0.041	23.80	< 2e-16	***	2.663	2.457	2.887
Weather variables:								
Icy road	0.183	0.011	17.21	< 2e-16	***	1.201	1.176	1.226
Snowfall	-0.031	0.013	-2.38	0.0172	*	0.969	0.944	0.994
Visibility	-0.146	0.010	-14.61	< 2e-16	***	0.864	0.847	0.881
Deviance Residuals:								
	Min	1Q	Median	3Q	Max	McFadden pseudo-R ²		
	-1.2323	-0.5712	-0.3669	-0.224	3.1787	0.132		
MARCH 2014								
Constant:	-2.32	0.03	-89.14	< 2e-16	***	0.098	0.093	0.103
Time Periods: Ref. 19h-6h								
6h-7h	0.82	0.02	42.09	< 2e-16	***	2.276	2.190	2.364
7h-9h	1.96	0.01	147.94	< 2e-16	***	7.077	6.896	7.263
9h-10h	1.28	0.02	75.31	< 2e-16	***	3.611	3.492	3.734
10h-15h	0.87	0.01	68.42	< 2e-16	***	2.382	2.323	2.442
15h-16h	1.70	0.02	105.25	< 2e-16	***	5.493	5.321	5.670
16h-18h	2.03	0.01	153.39	< 2e-16	***	7.632	7.436	7.833
18h-19h	1.43	0.02	83.13	< 2e-16	***	4.179	4.040	4.322
Regions: Ref. Downtown								
Montreal Centre	-0.10	0.02	-4.72	2.3e-06	***	0.903	0.865	0.942
<i>Montreal East</i>	<i>(not significant)</i>							
Montreal West	-1.03	0.02	-45.76	< 2e-16	***	0.357	0.341	0.373
Longueuil	-1.01	0.04	-25.46	< 2e-16	***	0.363	0.336	0.393
Laval	-0.71	0.03	-24.48	< 2e-16	***	0.493	0.466	0.522

North Shore	-1.54	0.04	-35.70	< 2e-16	***	0.214	0.197	0.233
South Shore	-1.83	0.04	-42.26	< 2e-16	***	0.161	0.148	0.175
Speed Limits: Ref. 100km/h								
70km/h	-0.22	0.01	-21.33	< 2e-16	***	0.805	0.789	0.821
80km/h	0.25	0.08	3.25	0.0011	**	1.288	1.104	1.498
Weather variables:								
Icy road	0.53	0.01	39.48	< 2e-16	***	1.706	1.661	1.752
Snowfall	0.26	0.01	26.69	< 2e-16	***	1.292	1.268	1.316
Visibility	-0.12	0.01	-13.21	< 2e-16	***	0.884	0.868	0.900
Deviance Residuals:								
	Min	1Q	Median	3Q	Max	McFadden pseudo-R ²		
	-1.2618	-0.5899	-0.395	-0.2624	2.9993	0.097		

1
 2 **Space-Time Variation Impact**
 3 These two new models are exactly the same as the first one but an interaction (7th) term is added:
 4 **Logit2(SLR<0.6) = β₀ + β₁ Time period + β₂ Regions + ... + β₆ Visibility + β₇ Visibility x Regions**
 5 **Logit3(SLR<0.6) = β₀ + β₁ Time period + β₂ Regions + ... + β₆ Visibility + β₇ Visibility x Time period**
 6 The probability of congestion due to the combined effect of reduced visibility and space-time
 7 variables (regions, time period) is obtained by multiplying OR₆ and OR₇. Figure 5 shows the spatial
 8 and temporal impact of reduced visibility.



9
 10 **FIGURE 5 Spatial (a) and Temporal (b) Variations of the Impact of Reduced Visibility on**
 11 **the Probability of Congestion Using a SLR < 0.6 Congestion Threshold**

12
 13 Figure 5a shows that the probability of congestion when reduced visibility is the highest in
 14 Montreal East and the lowest on the South Shore in March. The graph mostly shows that there are
 15 interactions between reduced visibility and regions but does not suggest a particular global trend
 16 because of the large variations in the values and across the two months. Figure 5b presents the
 17 variation of the impact of visibility in time. The values suggest that the probability of congestion
 18 when reduced visibility is higher during peak hours. The result for March also suggests that the
 19 impact is more important during the PM peak.

1 **Congestion Threshold Variation Impact**

2 There is no unique definition of congestion, neither a unique congestion threshold value. The
 3 models presented in Table 1 depend on the choice of $SLR < 0.6$ as congestion threshold. Eighteen
 4 new models were estimated to see the variations in the weather conditions impact on congestion
 5 for different congestion thresholds:

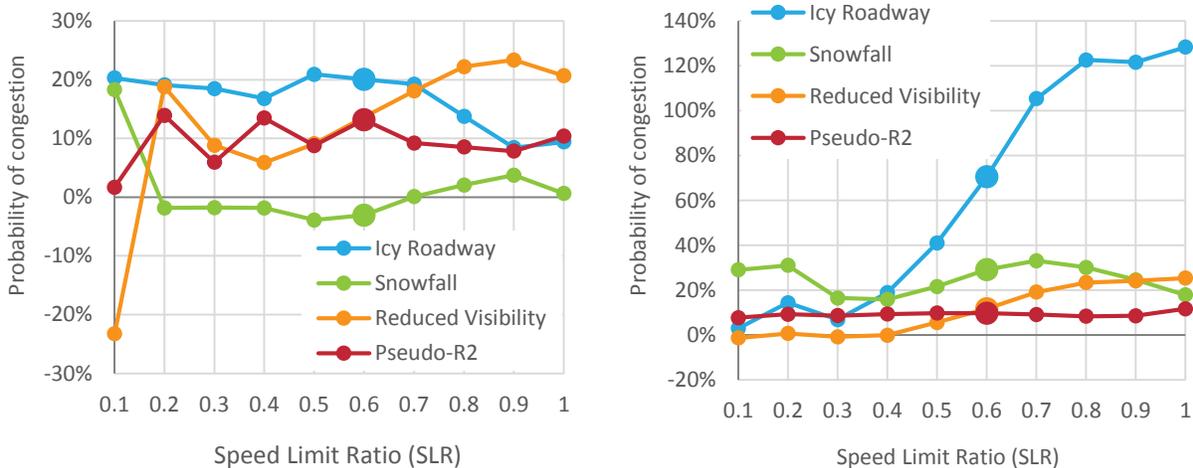
6 $Logit10(SLR < 0.1) = \beta_0 + \beta_1 \text{ Time period} + \beta_2 \text{ Regions} + \beta_3 \text{ Speed Limit} + \beta_4 \text{ Ice} + \beta_5 \text{ Snow} + \beta_6 \text{ Visibility}$

7 $Logit20(SLR < 0.2) = \beta_0 + \beta_1 \text{ Time period} + \beta_2 \text{ Regions} + \beta_3 \text{ Speed Limit} + \beta_4 \text{ Ice} + \beta_5 \text{ Snow} + \beta_6 \text{ Visibility}$

8 ...

9 $Logit100(SLR < 1.0) = \beta_0 + \beta_1 \text{ Time period} + \beta_2 \text{ Regions} + \beta_3 \text{ Speed Limit} + \beta_4 \text{ Ice} + \beta_5 \text{ Snow} + \beta_6 \text{ Visibility}$

10 The probabilities of congestion associated with each weather variable have been computed for
 11 each SLR, as well as the associated p^2 . Results are shown on Figure 6. Note that the values
 12 presented for $SLR < 0.6$ in Table 1 have an enlarged dot on the graph for reference.



(a) Congestion Threshold Impact for February (b) Congestion Threshold Impact for March

13
 14 **FIGURE 6 Impact of Icy Roadway, Snowfall and Reduced Visibility on the Probability of**
 15 **Congestion Using Different Speed Limit Ratio Threshold for February (a) and March (b)**

17 One thing is clear, the choice of congestion threshold has a major impact on the results. The trend
 18 of the probability of congestion seems to follow the SLR frequency distributions shown in Figures
 19 3c and 3d for the impact of reduced visibility, which is coherent with the expected results. The
 20 impact of icy condition also seems to follow the same trend, at least in March. The impact of snow
 21 is not really consistent.

23 **CONCLUSION AND FUTURE WORK**

24 This paper has presented a methodology to assess the impact of weather variables on traffic
 25 conditions. The main objective was to develop such a methodology to be included in a congestion
 26 monitoring tool for the GMA. The numerous regional past studies in the literature suggested that
 27 the impacts need to be reevaluated for each region because of the changes in climate and other
 28 region-specific transportation behavior. The proposed methodology differs from the literature by
 29 using 100 m road segments, the Speed Limit Ratio as the congestion indicator estimated using taxi

1 probes and by applying spatio-temporal variables on a large highway network.

2 The key findings of this research are:

- 3 • The spatio-temporal impact of weather needs to be considered: Figure 5 speaks for itself
4 as we can see significant variations due to space and time. Network-wide models should
5 always consider these variables. Also, building time periods adapted to the dataset helped
6 to have a better model.
- 7 • The impact on congestion depends on the definition of congestion thresholds: Figure 6
8 showed that the results of a congestion model is directly related to the definition of
9 congestion.
- 10 • It is difficult to consider a “one-size fits all” value for the evaluation of each impact:
11 weather is really variable, and so is its impact on traffic. Published values like the ones in
12 the HCM (3) should be used as a base to adapt to local conditions.
- 13 • The impact of weather depends a lot on available data and/or case study: almost every
14 study in the literature used a different methodology to assess the impacts of weather on
15 traffic. Most of the times, it was due to the source of traffic data itself.

17 **Limitations and future work**

- 18 • Availability of data: the current study used continuous weather data but traffic data was
19 not always available as it depends on the taxi trips in Montreal.
- 20 • Spatial variables: eight typical geographical Montreal regions were used to represent
21 spatial variability. There is a need to develop a statistical method to generate typical
22 congestion zones. The distance to downtown could be used to categorize spatial elements.
- 23 • No typical value was obtained: the first explanatory models did not converge on some
24 generalized values for the region of Montreal. Using the methodology proposed, more
25 models and data mining technique should be used to define better weather impact values.
- 26 • Cause of congestion: a long-term objective is to determine the causes of road congestion.
27 The analysis needs to take into account data describing the other types of incident that
28 can cause congestion (roadwork, accident, special events).

31 **ACKNOWLEDGMENTS**

32 The authors would like to thank the Ministère des Transports du Québec (MTQ) for funding,
33 providing access to data and for contributions on this research project. They also wish to
34 acknowledge Taxi Diamond for providing access to their fleet’s GPS data for this project. Financial
35 support on this project comes from the Natural Sciences and Engineering Research Council of
36 Canada (NSERC), Hydro-Québec, and the Transportation Association of Canada (TAC), Canadian
37 Transportation Research Forum (CTRF) research funds and the Fonds de recherche du Québec -
38 Nature et technologies (FRQNT).

41 **REFERENCES**

- 42 1. Les Conseillers ADEC inc. *Évaluation des coûts de la congestion routière dans la région*
43 *de Montréal pour les conditions de référence de 2008*. Ministère des Transports du
44 Québec, 2014.
- 45 2. FHWA. *Traffic Congestion and Reliability. Trends and Advanced Strategies for*
46 *Congestion Mitigation*, Final report prepared for FHWA by Cambridge Systematics, Inc.

- 1 and Texas Transportation Institute, 2005.
- 2 3. *Highway Capacity Manual 2010*. Transportation Research Board of the National
3 Academies, Washington, D.C., 2010.
- 4 4. Agarwal, M., T. Maze, and R. Souleyrette. *Impact of Weather on Urban Freeway Traffic*
5 *Flow Characteristics and Facility Capacity*. Center for Transportation Research and
6 Education, Iowa State University, Ames, 2005.
- 7 5. Brilon, W., and M. Ponzlet. *Variability of Speed–Flow Relationships on German*
8 *Autobahns*. In *Transportation Research Record 1555*, Transportation Research Board of
9 the National Academies, Washington, D.C., 1996, pp. 91–98.
- 10 6. Lamm, R., E. M. Choueiri, and T. Mailaender. *Comparison of Operating Speeds on Dry*
11 *and Wet Pavements of Two-Lane Rural Highways*. In *Transportation Research Record*
12 *1280*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.,
13 1990, pp. 199–207.
- 14 7. Ibrahim, A. T., and F. L. Hall. *Effect of Adverse Weather Conditions on Speed-Flow-*
15 *Occupancy Relationships*. In *Transportation Research Record 1457*, Transportation
16 Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1994, pp. 184-191.
- 17 8. Kwon, T. J., L. Fu, and C. Jiang. Effect of Winter Weather and Road Surface Conditions
18 on Macroscopic Traffic Parameters. In *Transportation Research Record 2329*,
19 Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2013, pp.
20 54-62.
- 21 9. Kwon J., M. Mauch, and P. Varaiya. *The Components of Congestion: Delay from*
22 *Incidents, Special Events, Lane Closures, Weather, Potential Ramp Metering Gain, And*
23 *Excess Demand*. In *Transportation Research Record 1959*, Transportation Research
24 Board of the National Academies, Washington, D.C., 2006, pp. 84–91.
- 25 10. Zhao, L., and S. Chien. *Analysis of Weather Impact on Travel Speed and Travel Time*
26 *Reliability*. In CICTP 2012 Multimodal Transportation Systems – Convenient, Safe,
27 Cost-Effective, Efficient. ASCE, 2012. p. 1145-1155.
- 28 11. Schrank, D., B. Eisele, and T. Lomax. *2012 Urban Mobility Report, Appendix A:*
29 *Methodology for the 2012 Urban Mobility Report*. Texas A&M Transportation Institute,
30 College Station, TX, 2012.
- 31 12. Datla S., and S. Sharma. *Impact of Cold and Snow on Temporal and Spatial Variations of*
32 *Highway Traffic Volumes*. *Journal of Transport Geography* 16, 2008, pp. 358–372.
- 33 13. Van Stralen, W. J. H., S. C. Calvert, and E. J. E. Molin. *The Influence of Adverse*
34 *Weather Conditions on the Probability of Congestion on Dutch Motorways*. Delft
35 University of Technology Institutional Repository, 2014.
- 36 14. Maze, T. H., M. R. Crum, and G. Burchett. An Investigation of User Costs and Benefits
37 of Winter Road Closures. Midwest Transportation Consortium, Iowa State University,
38 2005.
- 39 15. Gourvil, L., and F. Joubert. *Évaluation de la congestion routière dans la région de*
40 *Montréal*. Ministère des Transports du Québec, 2004.
- 41 16. Domencich, T., and D. L. McFadden. *Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis*.
42 North-Holland Publishing Co., 1975.

Annexe 7

Poster présenté au TRB 2016 « Impact of weather conditions on traffic : case study of Montreal's winter »

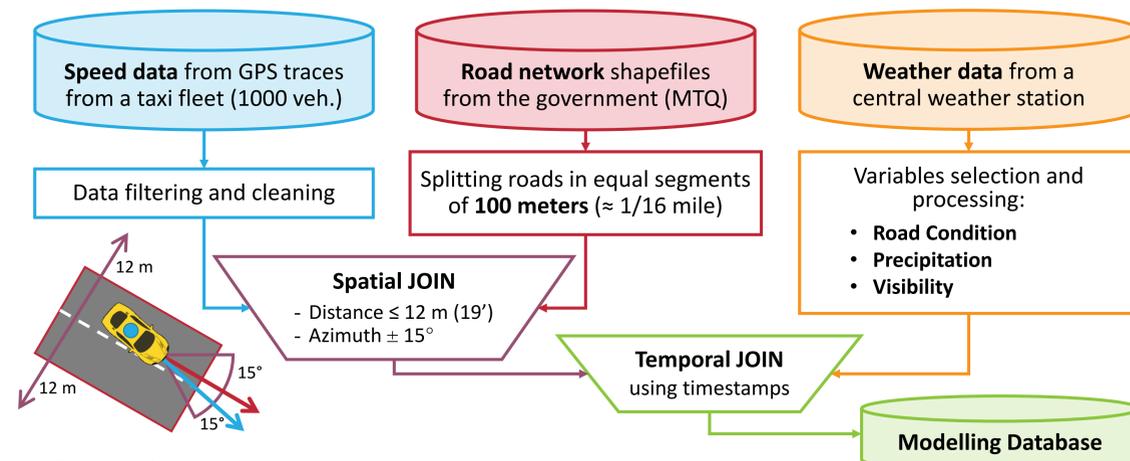
Background and Motivation

- Congestion is the **number one transportation issue** in many metropolitan areas
- Weather condition is an important **cause of incident congestion**, especially in Montreal
- There have been multiple studies of the impact of weather on traffic, **but results are specific to a geographical study case** and cannot simply be transferred to other contexts
- Therefore, each specific location needs to be studied separately
- This research is part of the development of an analysis and monitoring tool for the metropolitan region of Montreal

Research Objective

Develop a **probabilistic model of the occurrence of congestion events** and the **impact of weather conditions** on the level of traffic congestion.

Data System and Calculations

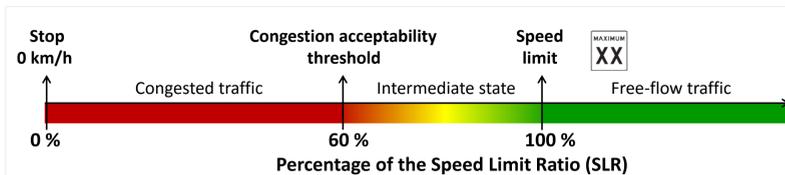


Congestion Indicator:

$$\text{Speed Limit Ratio: } SLR_{(r,p)} = \frac{\text{Average Speed (r,p)}}{\text{Speed Limit (r)}} \text{ where r: road segment p: time period}$$

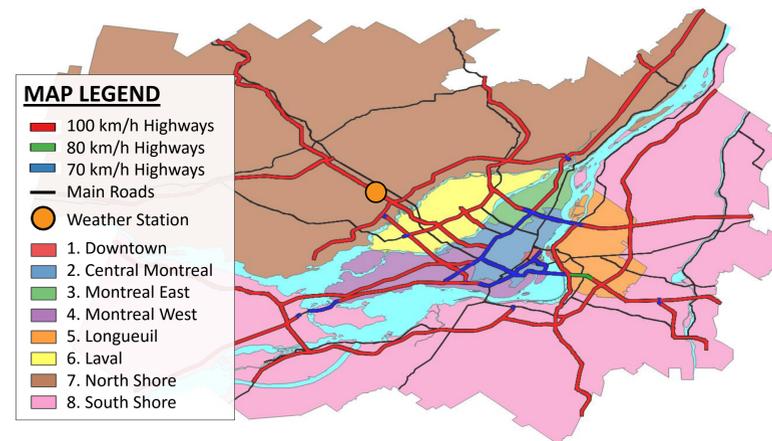
Congestion Thresholds:

SLR < 0.6 = congestion



Case Study

- Winter months: **February and March 2014**
- Road condition: **Icy road**
- Precipitation: **Snowfall**
- Visibility: **Good Visibility**
- Highway network
- 8 Montreal regions
- Weekdays (Mon-Fri)



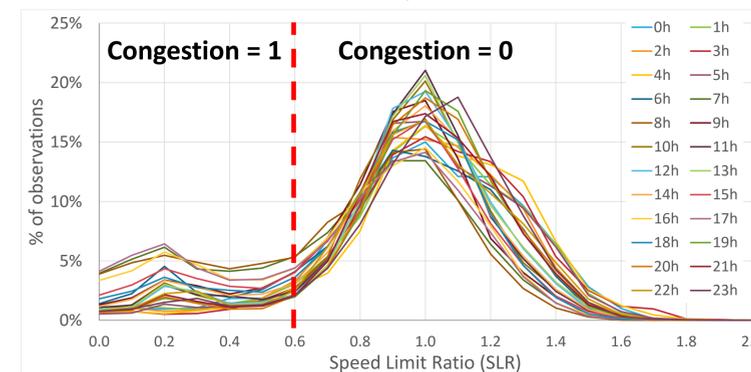
Binomial LOGIT Model Definition: Congested vs Non-Congested

- The data distribution shows two different traffic conditions peaks:

Binary Variables:

- **Icy Road** =
1 if Condition = Icy
0 if Condition ≠ Icy
- **Snowfall** =
1 if Precipitation = Snow
0 if Precipitation ≠ Snow
- **Good visibility** =
1 if Visibility = 3.1 km (≈2 mi)
0 if Visibility < 3.1 km (≈2 mi)

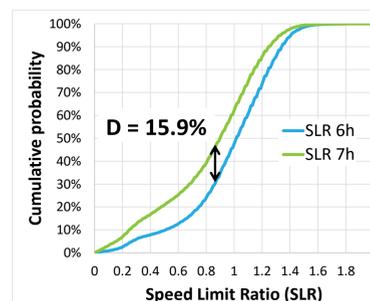
Model Equation:



$$\text{LOGIT (SLR < Congestion Threshold) =}$$

$$\beta_0 + \beta_1 \text{ Hourly Period} + \beta_2 \text{ Region} + \beta_3 \text{ Icy Road} + \beta_4 \text{ Snowfall} + \beta_5 \text{ Good Visibility}$$

Hourly Period Segmentation: Kolmogorov-Smirnov (KS) Test

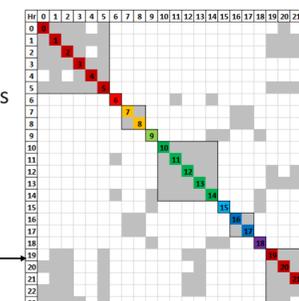


KS-Test:

- Compares two cumulative distributions
- D = greatest distance between the curves

Idea: Pairing similar consecutive hours

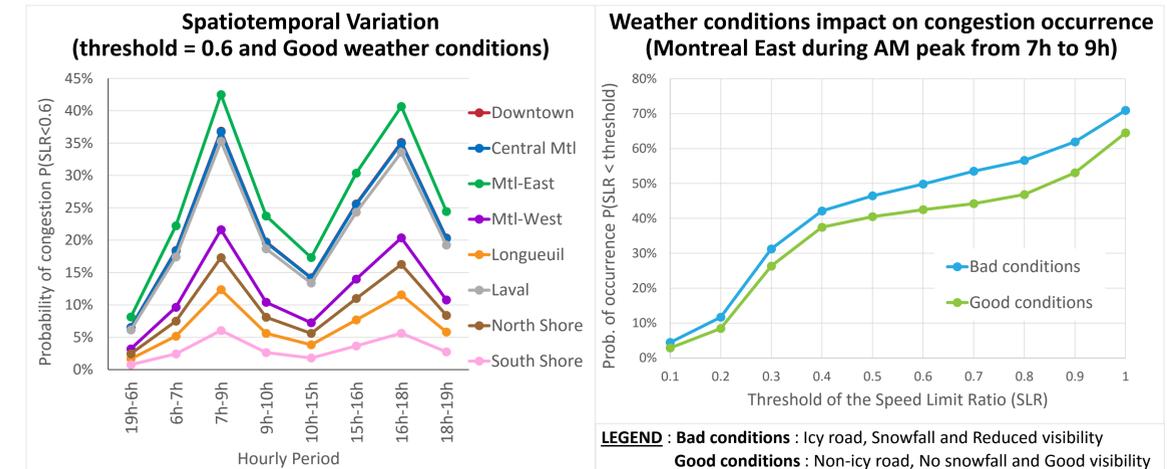
- KS-Test results matrix for February 2014



Results from the Models (for February 2014) see Paper for other results

$$\text{Probability}_{\text{traffic condition}} = P(\text{SLR} < \text{threshold}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \dots + \beta_5 \times X_5)}}$$

- **Highest probability** of congestion occurrence is **42%** during AM peak (7h-9h) in Montreal East
- **Bad weather conditions** raises this probability from **42% to 50%** for a SLR threshold = 0.6
- **Odds ratio** for congestion is **20% higher with icy roads** than without icy roads (Feb. 2014)



Conclusion and Future Work

Key findings:

- **Weather conditions have an impact** on the probability of traffic congestion.
- The **spatiotemporal variation** of congestion needs to be considered in explicative models.
- The impact of weather conditions depends on the **congestion threshold**.

Limitations and Future Work:

- **Availability of data:** Weather data is continuous but traffic data depends on taxi trips on highways.
- **Spatial variables:** A statistical method to generate **areas with similar traffic conditions** is needed.
- **Causes of congestion:** A long-term objective is to determine the causes of road congestion. More incident data sources (*roadwork, accident, special events*) need to be added to the models.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Ministère des Transports du Québec (MTQ) for funding, providing access to data and for contributions on this research project. They also wish to acknowledge Taxi Diamond for providing access to their fleet's GPS data for this project. Financial support on this project also comes from the NSERC, Hydro-Québec, TAC, CTRF and FRQNT.

Marc-André Tessier¹, Catherine Morency¹, Nicolas Saunier¹
¹Polytechnique Montréal, Department of Civil, Geological and Mining Engineering, C.P. 6079, Station Centre-Ville, Montréal (Québec) CANADA H3C 3A7

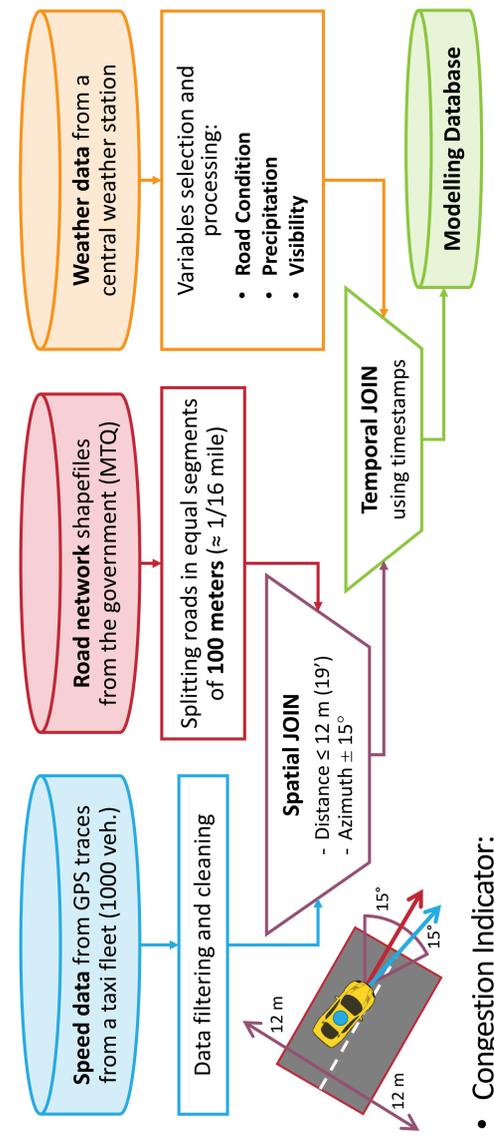
Background and Motivation

- Congestion is the **number one transportation issue** in many metropolitan areas
- Weather condition is an important **cause of incident congestion**, especially in Montreal
- There have been multiple studies of the impact of weather on traffic, **but results are specific to a geographical study case** and cannot simply be transferred to other contexts
- Therefore, each specific location needs to be studied separately
- This research is part of the development of an analysis and monitoring tool for the metropolitan region of Montreal

Research Objective

Develop a **probabilistic model of the occurrence of congestion events** and the **impact of weather conditions** on the level of traffic congestion.

Data System and Calculations



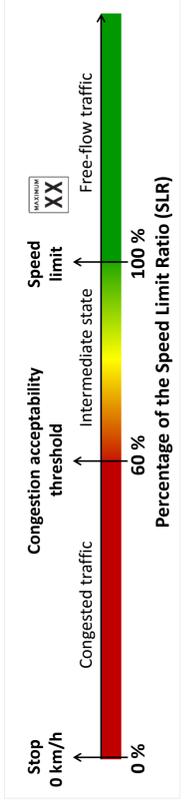
- Congestion Indicator:

$$\text{Speed Limit Ratio: } SLR(r,p) = \frac{\text{Average Speed } (r,p)}{\text{Speed Limit } (r)}$$

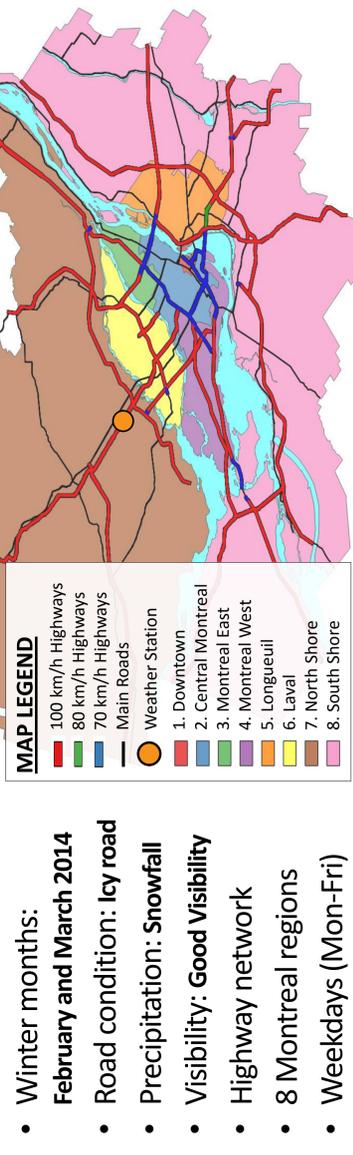
where r: road segment
p: time period

- Congestion Thresholds:

SLR < 0.6 = congestion



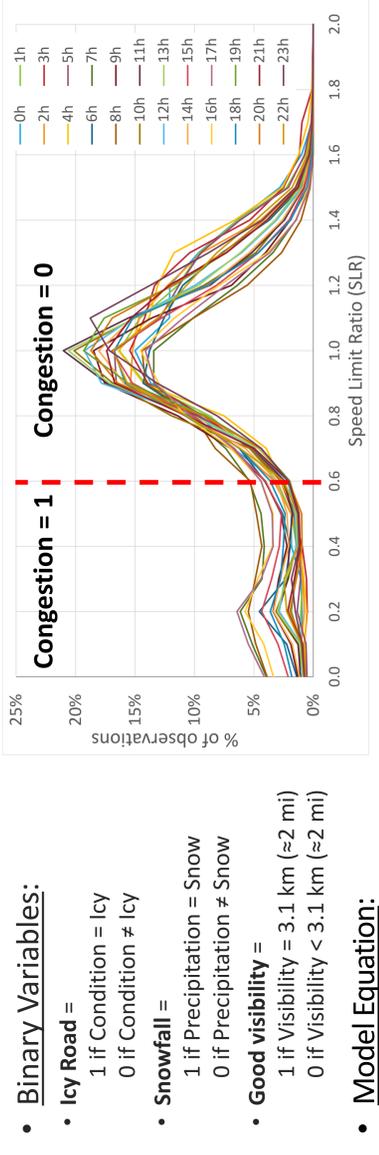
Case Study



- Winter months: **February and March 2014**
- Road condition: **Icy road**
- Precipitation: **Snowfall**
- Visibility: **Good Visibility**
- Highway network
- 8 Montreal regions
- Weekdays (Mon-Fri)

Binomial LOGIT Model Definition: Congested vs Non-Congested

- The data distribution shows two different traffic conditions peaks:



- Binary Variables:
- Icy Road = 1 if Condition = Icy, 0 if Condition ≠ Icy
- Snowfall = 1 if Precipitation = Snow, 0 if Precipitation ≠ Snow
- Good visibility = 1 if Visibility = 3.1 km (≈2 mi), 0 if Visibility < 3.1 km (≈2 mi)
- Model Equation:

$$\text{LOGIT } (SLR < \text{Congestion Threshold}) = \beta_0 + \beta_1 \text{ Hourly Period} + \beta_2 \text{ Region} + \beta_3 \text{ Icy Road} + \beta_4 \text{ Snowfall} + \beta_5 \text{ Good Visibility}$$

Hourly Period Segmentation: Kolmogorov-Smirnov (KS) Test

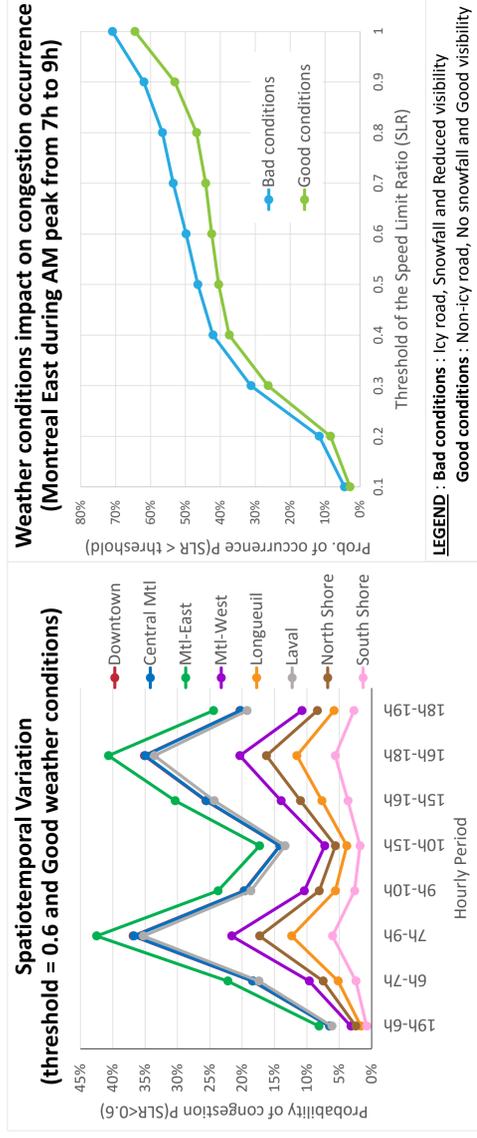


- KS-Test:
- Compares two cumulative distributions
- D = greatest distance between the curves
- **Idea:** Pairing similar consecutive hours
- KS-Test results matrix for February 2014
- : Similar hourly pair where D < 7%

Results from the Models (for February 2014) see Paper for other results

$$\text{Probability traffic condition} = P(SLR < \text{threshold}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \dots + \beta_5 \times X_5)}}$$

- **Highest probability** of congestion occurrence is **42%** during AM peak (7h-9h) in Montreal East
- **Bad weather conditions** raises this probability from **42% to 50%** for a SLR threshold = 0.6
- **Odds ratio** for congestion is **20% higher with icy roads** than without icy roads (Feb. 2014)



Conclusion and Future Work

- Key findings:
- **Weather conditions have an impact** on the probability of traffic congestion.
- The **spatiotemporal variation** of congestion needs to be considered in explicative models.
- The impact of weather conditions depends on the **congestion threshold**.
- Limitations and Future Work:
- **Availability of data:** Weather data is continuous but traffic data depends on taxi trips on highways.
- **Spatial variables:** A statistical method to generate **areas with similar traffic conditions** is needed.
- **Causes of congestion:** A long-term objective is to determine the causes of road congestion. More incident data sources (*roadwork, accident, special events*) need to be added to the models.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Ministère des Transports du Québec (MTQ) for funding, providing access to data and for contributions on this research project. They also wish to acknowledge Taxi Diamond for providing access to their fleet's GPS data for this project. Financial support on this project also comes from the NSERC, Hydro-Québec, TAC, CTRF and FRQNT.

Annexe 8

Mémoire de Marc-André Tessier « Développement d'indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière », Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, 164 pages.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS D'ANALYSE ET DE SUIVI
DE LA CONGESTION ROUTIÈRE

MARC-ANDRÉ TESSIER

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

NOVEMBRE 2015

RÉSUMÉ

La congestion routière est devenue l'enjeu numéro un dans les régions métropolitaines en raison de ses multiples incidences sur la population, l'environnement et l'économie. Il est évident qu'il faut poursuivre les recherches afin de réduire la congestion. La première étape est de se doter d'outils pour la mesurer. Ce projet de recherche vise à développer des indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière. Quatre objectifs spécifiques sont également poursuivis :

1. Mieux comprendre la congestion pour en dégager une définition et les variables pertinentes;
2. Identifier des indicateurs de la congestion adéquats pour différents objets et conditions du réseau routier à des fins de planification et suivi;
3. Développer une méthodologie d'estimation des indicateurs identifiés à partir de données de vitesse de traces GPS;
4. Contribuer au développement d'un outil de consultation permettant d'extraire des statistiques utiles aux analyses de suivi et d'estimer des modèles explicatifs de la congestion.

Premièrement, une revue de littérature étudie les différents paramètres (définitions, seuils d'acceptabilité, causes, impacts, solutions, « bénéfiques » et mesures) liés à la congestion routière et propose une définition qui tient compte de tous les paramètres pertinents : *La congestion routière est un phénomène physique et relatif qui survient lorsque les paramètres de la circulation (volume, vitesse et dérivés) deviennent moins désirables que les valeurs de référence fixées et qui varie selon le temps, l'espace, la cause (récurrente et incidente) et le seuil d'acceptabilité.* La revue de littérature permet également d'identifier une liste de 24 indicateurs adéquats pour l'évaluation de la congestion selon six catégories : vitesse, débit et capacité, temps et retard, spatiaux, fiabilité et coûts. De ces indicateurs, les plus simples sont choisis dans un intérêt de développement méthodologique.

Deuxièmement, une méthodologie d'estimation d'indicateurs de la congestion à partir de données de traces GPS est développée. Cette méthodologie comprend le traitement des données de mesure (données de vitesses provenant de traces GPS de la flotte de Taxi Diamond), de réseau (réseau sous la juridiction du MTQ segmenté au 100 m) et explicatives (données météorologiques) et la fusion de ces données pour former une base de données permettant de calculer des indicateurs selon plusieurs objets de visualisation et sélections spatiotemporelles. Les équations des indicateurs choisis, les

hypothèses d'un seuil d'acceptabilité de la congestion et la méthodologie de création des objets de visualisation sont décrites.

Troisièmement, la méthodologie développée est appliquée pour évaluer des indicateurs de la congestion routière selon différents objets d'étude et de visualisation pertinents pour le développement d'un outil d'analyse et de suivi de la circulation. Trois objets d'étude sont utilisés, soit le corridor de l'autoroute 40 sur l'île de Montréal, l'accès au Pont Champlain en direction de Montréal et le réseau routier de la région de Montréal en entier. L'évaluation des indicateurs est réalisée en utilisant quatre objets de visualisation (distribution, courbe cumulée, grille de congestion et carte de congestion) et sept indicateurs (vitesse moyenne, ratio de la limite de vitesse, temps de parcours moyen et cumulé, retard moyen et cumulé et pourcentage en congestion). Cela a permis d'analyser adéquatement la variation des conditions de circulation pour les trois objets identifiés et de valider la méthodologie de développement d'indicateurs proposée.

Finalement, une méthodologie d'évaluation des impacts des conditions météorologiques sur les conditions de circulation est présentée. L'étude de cas porte sur les autoroutes de la région de Montréal, durant les mois de février et mars, pour se concentrer sur les variables hivernales (chaussée glacée et chute de neige). Plusieurs modèles LOGIT de la probabilité de l'occurrence de la congestion sont estimés avec le logiciel R en incluant différentes variables : les périodes horaires (regroupées en utilisant le test de Kolmogorov-Smirnov), la région et les attributs météorologiques (état de la chaussée, type de précipitation et visibilité). Cela a permis de conclure que les conditions météorologiques ont un impact sur la probabilité de congestion et que la méthodologie employée est adéquate pour être intégrée à un outil de consultation à Montréal.

En conclusion, ce projet de recherche a permis de développer une méthodologie d'estimation d'indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière identifiés dans la littérature pour différents objets et conditions du réseau routier à partir de données de vitesse de traces GPS dans l'optique de contribuer au développement d'un outil de consultation pour la région de Montréal.

Vous pouvez télécharger à partir de la page web de Polytechnique Montréal le mémoire de maîtrise complet : « Développement d'indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière » à l'adresse suivante : <https://publications.polymtl.ca/1957/>

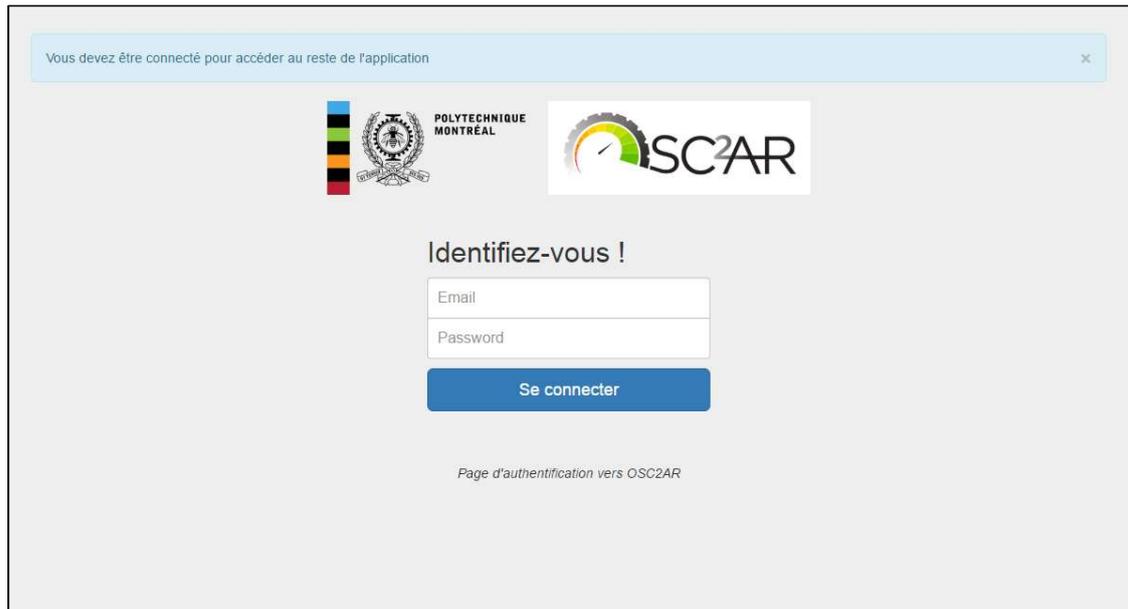
Annexe 9

Captures d'écrans de l'outil de consultation

Annexe 9 – Écrans de l'interface de consultation

L'Outil de Suivi des Conditions de Circulation et d'Analyse Réseau nommé OSC²AR est composé de différents écrans de consultation qui permettent à l'utilisateur d'obtenir des informations sur les données et de consulter les résultats.

Page de connexion



Vous devez être connecté pour accéder au reste de l'application

Identifiez-vous !

Email

Password

Se connecter

Page d'authentification vers OSC2AR

Figure 1. Page de connexion de l'interface de consultation OSC²AR

Page d'accueil

La page d'accueil contient les 3 analyses possibles (section, explicative et comparative). La barre de navigation (en haut de l'écran) permet d'accéder à l'accueil, aux 3 analyses, à une page à propos, ou de se déconnecter. Cette barre de navigation est présente sur toutes les pages de l'application et est identique sur chaque page.

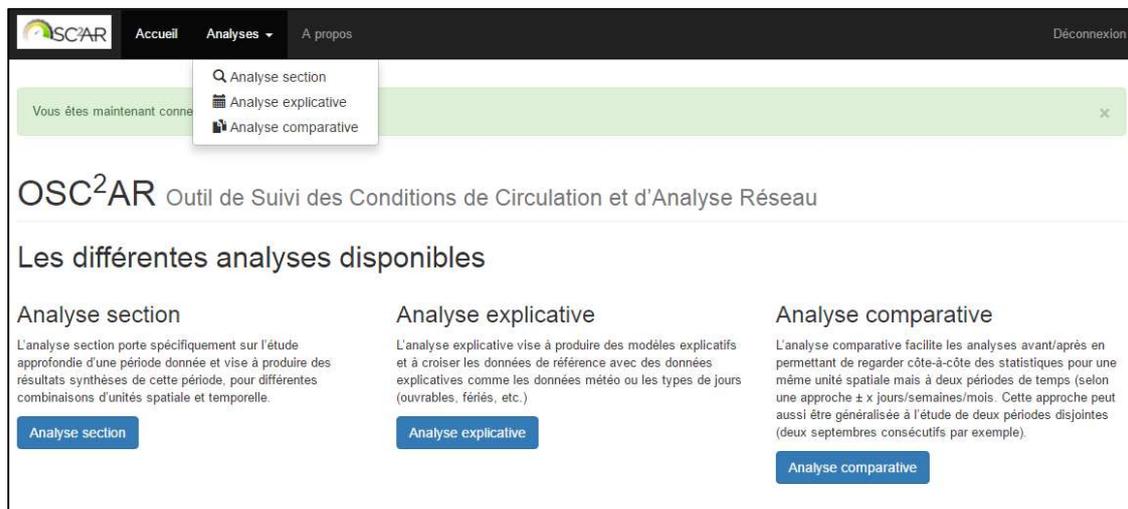


Figure 2. Page d'accueil de l'interface OSC²AR

Analyse section

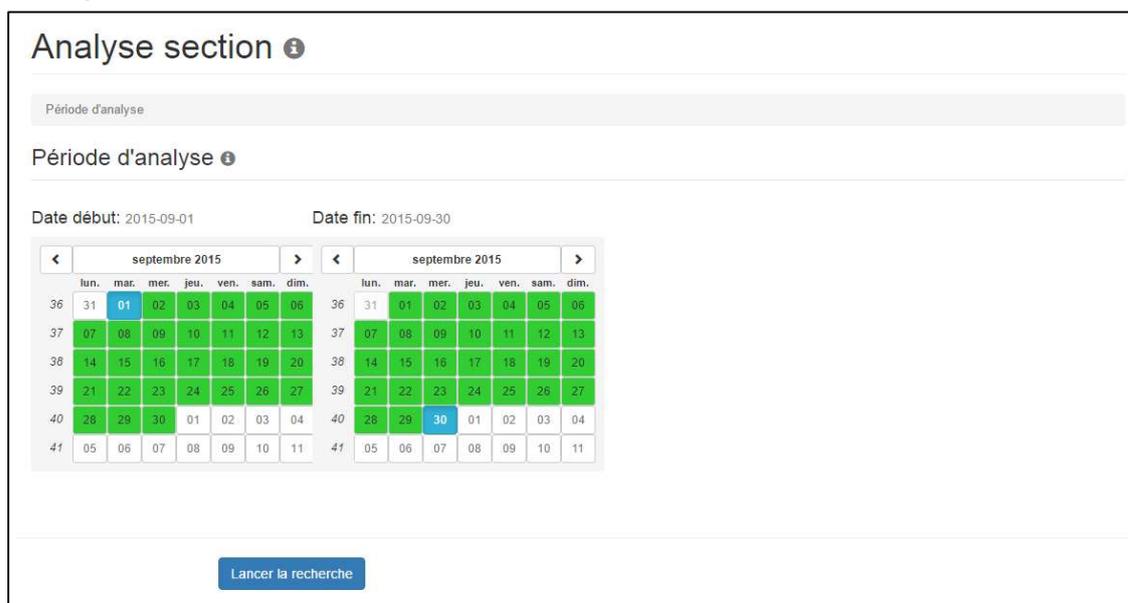


Figure 3. Page de sélection de la période d'analyse de l'analyse section

Analyse section i

Période d'analyse / Distributions

Distributions période d'analyse du 2015-09-01 au 2015-09-30

Distributions chargées en 7.8s

Distributions globales

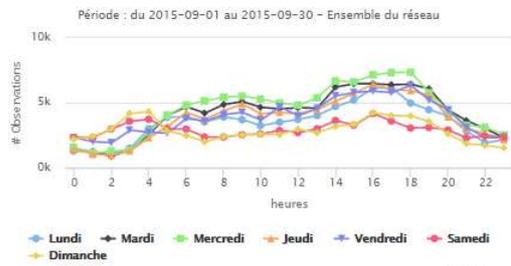
tronçons
14 737 (1 473,7 km)
tronçons-date-heure
10 610 640 (14 737 tronçons x 24 heures x 30 jours)

observations
2 120 289
nb observations moyen par tronçon heure
tronçon heure ayant au moins 1 observation
2,34

Répartition tronçons-date-heure avec/sans observations

305 177 / 3 705 463
9% / 91%

Répartition du nombre moyen d'observations par heure et jour de la semaine



Répartition du nombre de tronçons-heure par unité d'observation

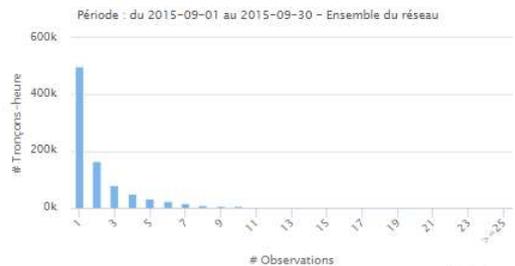


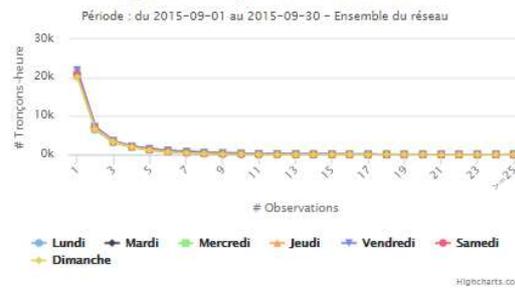
Figure 4. Page de distributions de la période d'analyse de l'analyse section – distributions globales

Distributions temporelles

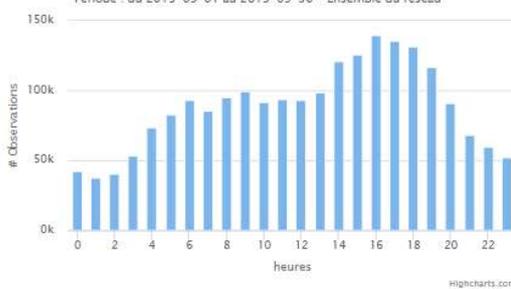
Distribution journalière du nombre moyen d'observations



Répartition journalière du nombre moyen de tronçons-heure par unité d'observation



Distribution horaire du nombre moyen d'observations



Répartition horaire du nombre moyen de tronçons-heure par unité d'observation

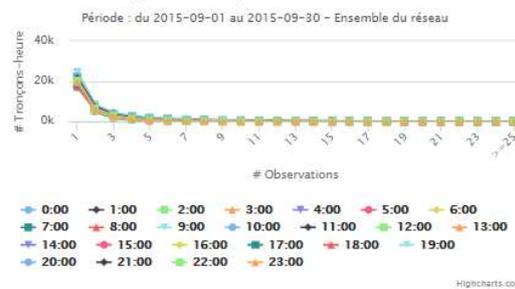


Figure 5. Page de distributions de la période d'analyse de l'analyse section – distributions temporelles 1

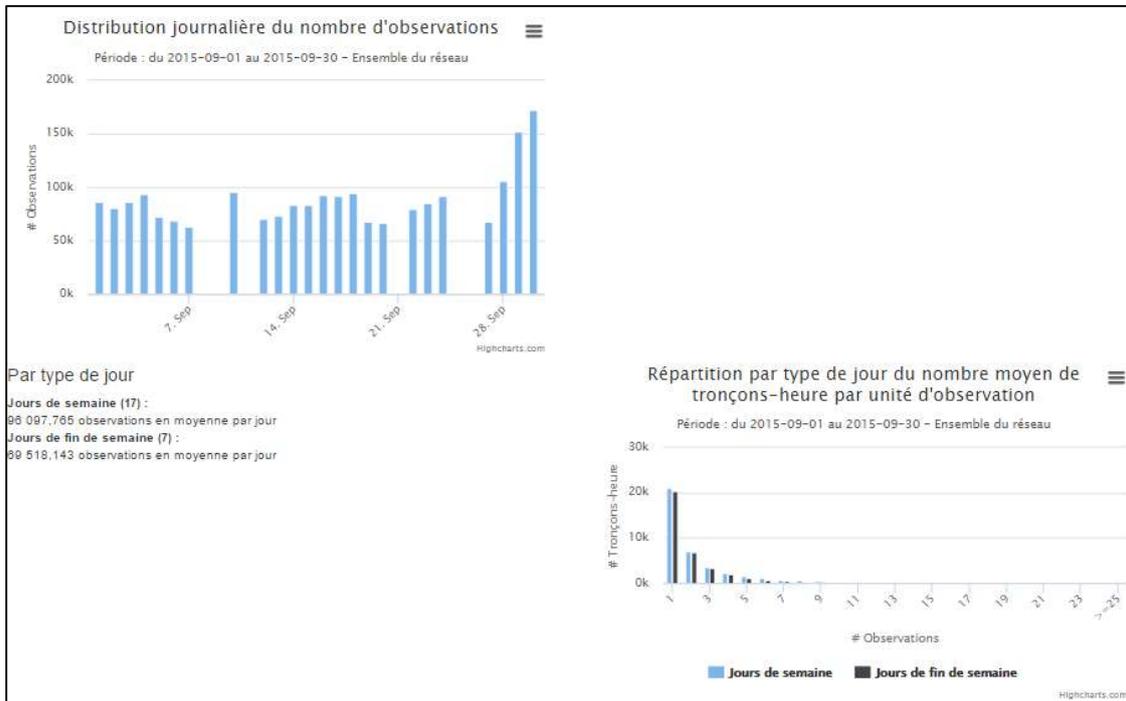


Figure 6. Page de distributions de la période d'analyse de l'analyse section – distributions temporelles 2

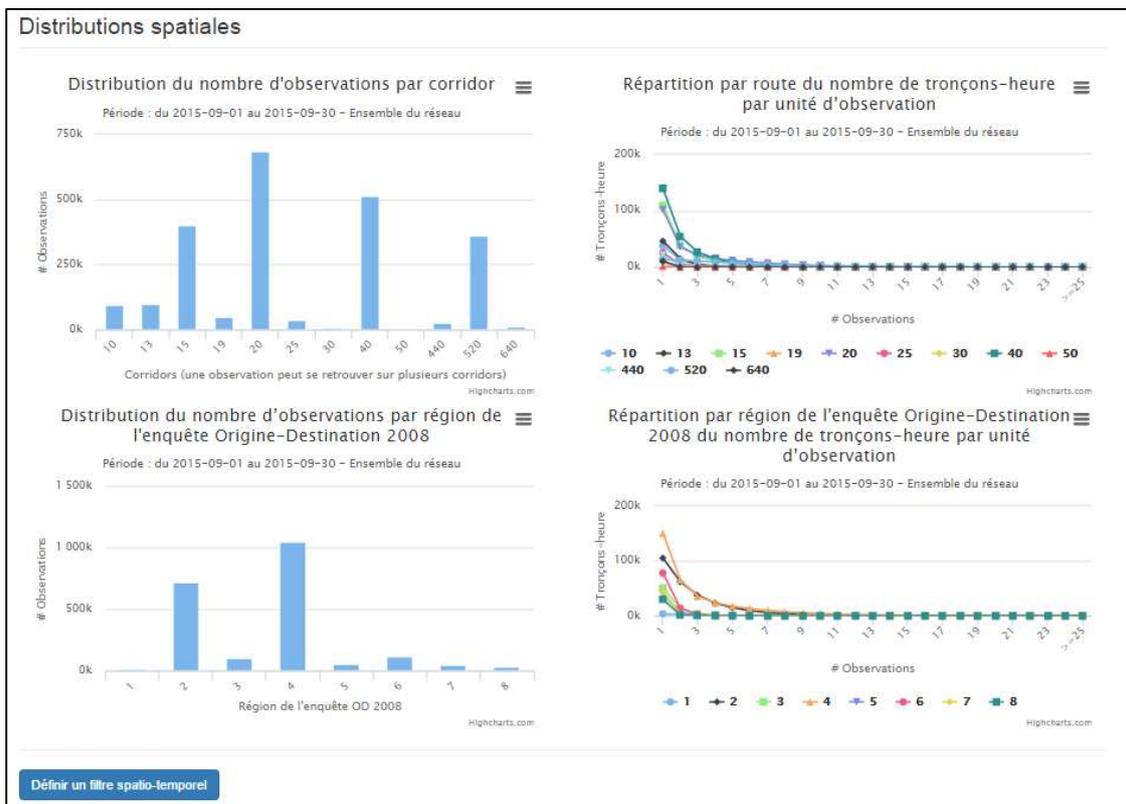


Figure 7. Page de distributions de la période d'analyse de l'analyse section – distributions spatiales

Période d'analyse / Distributions / Spatio-temporelle

Période d'analyse ✎ Editer

Date début: 2015-09-01 Date fin: 2015-09-30

Unité Spatiale Choix de la route ✎

Unité de filtre ✎

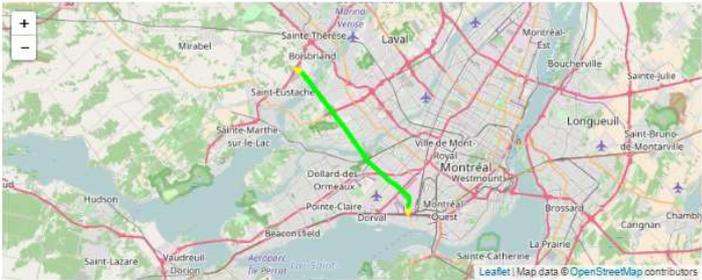
Objet:

Corridor:

Région:

Direction: Nord
 Sud

Segment / Sous corridor:



Unité d'analyse ✎

Unité d'analyse:

Unité temporelle ✎

Unité de filtre ✎

Filtre journée

- Dimanche
- Lundi
- Mardi
- Mercredi
- Jeudi
- Vendredi
- Samedi

Tous

Jours de semaine

Jours ouvrables uniquement

Jours de fin de semaine

Personnalisable

Filtre heure

- 0:00
- 1:00
- 2:00
- 3:00
- 4:00
- 5:00
- 6:00
- ...

Toutes

Pointe Matin

Pointe soirée

Hors Pointe Jour

Hors Pointe Nuit

Personnalisable

Unité d'analyse ✎

Résolution temporelle:

Figure 8. Page de sélection spatio-temporelle de l'analyse section

Analyse section 📍 Axe routier #13

Période d'analyse / Distributions / Spatio-temporelle / Distributions

Récapitulatif sélection spatio-temporelle Editer

Route
13
Directions
Nord, Sud
Sous-corridor
Du km 0
au km 21.7

Objet d'analyse
corridor
Unité spatiale d'analyse
Tronçon
Filtre régions
Toutes

Dates
Du 2015-09-01
au 2015-09-30
Journées
0, 1, 2, 3, 4, 5, 6
Jours ouvrables ?
indifférent

Heures
0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,
10, 11, 12, 13, 14, 15, 16,
17, 18, 19, 20, 21, 22, 23
Observations
Pas de contrainte



Distributions Axe routier #13

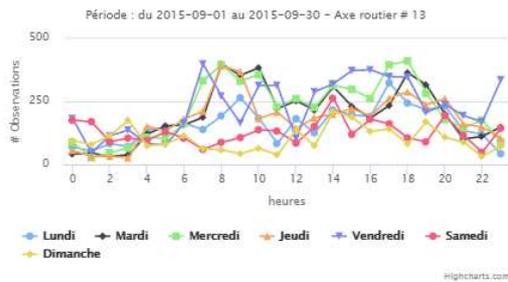
Distributions chargées en 4.4s

tronçons
436 (43,6 km)
tronçons-date-heure
313 920 (436 tronçons x 24 heures x 30 jours)

observations
99 665
nb observations moyen par tronçon heure
tronçon heure ayant au moins 1 observation
1,47

Répartition tronçons-date-heure avec/sans observations
67 981 246 939
22% 78%

Répartition du nombre moyen d'observations par heure et jour de la semaine



Répartition du nombre de tronçons-heure par unité d'observation

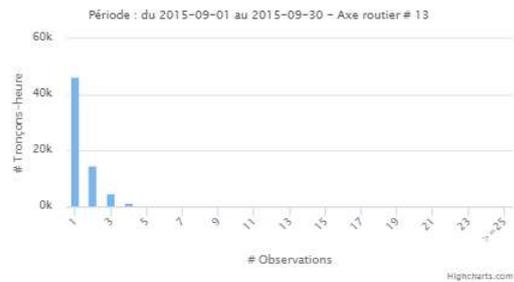


Figure 9. Page de distributions de la sélection spatio-temporelle de l'analyse section

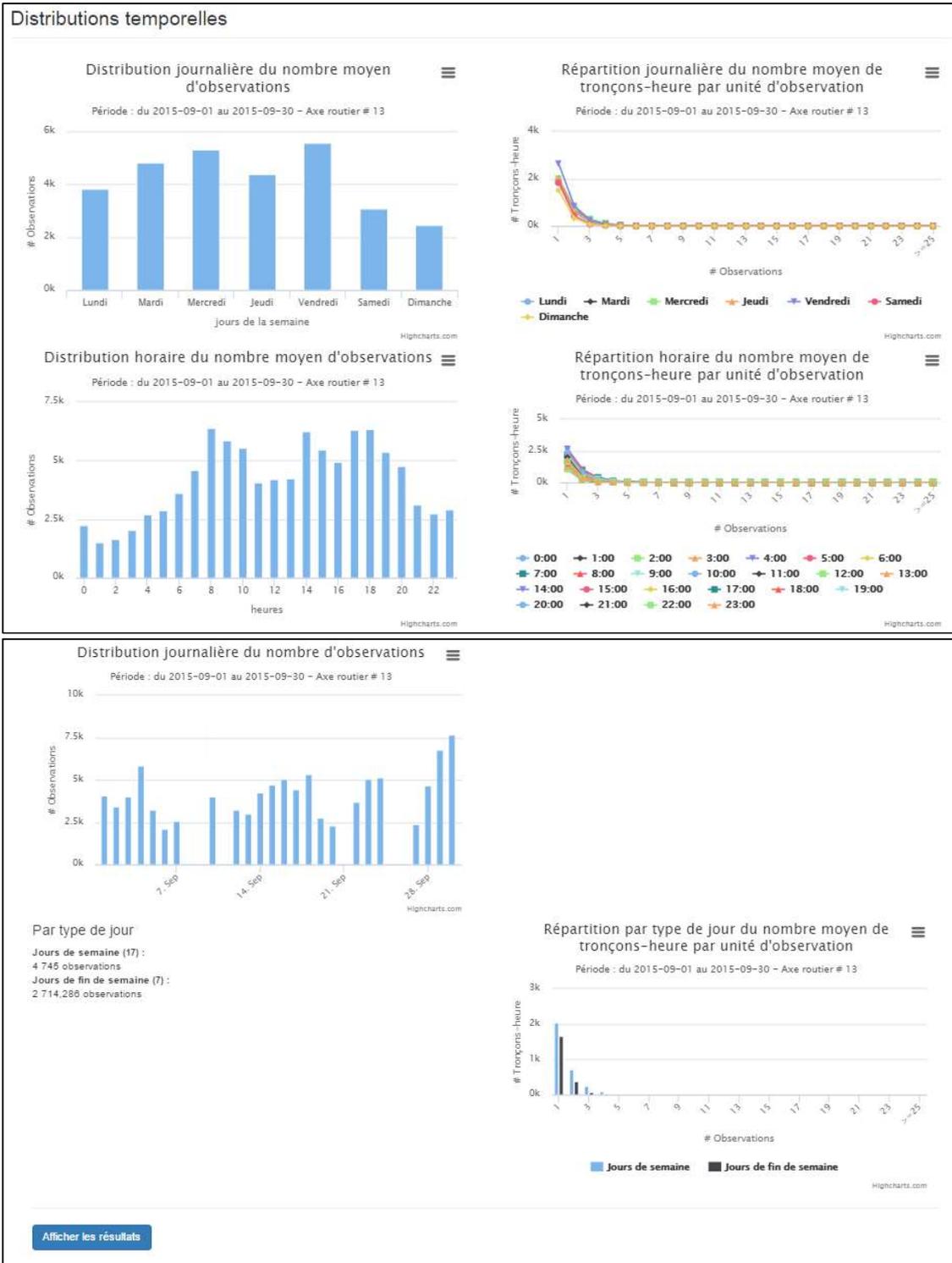


Figure 10. Page de distributions de la sélection spatio-temporelle de l'analyse section – distributions temporelles

Analyse section + Axe routier #13

Période d'analyse / Distributions / Spatio-temporelle / Distributions / Résultats

Récapitulatif sélection spatio-temporelle Editer

Route 13 Directions Nord, Sud Sous-corridor Du km 0 au km 23.7	Objet d'analyse corridor Unité spatiale d'analyse Tronçon Filtre régions Toutes	Dates Du 2015-09-01 au 2015-09-30 Journées 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 Jours ouvrables ? indifférent	Heures 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 Observations Pas de contrainte	
---	---	---	---	--

Résultats Axe routier #13

Résultats chargés en 6.5s

tronçons 436 (43.6 km) tronçons-date-heure 313 920 (436 tronçons x 24 heures x 30 jours)	observations 99 065 nb observations moyen par tronçon heure tronçon heure ayant au moins 1 observation 1.47	Répartition tronçons-date-heure avec/sans observations 67 391 346 529 22% 78%
---	---	--

Direction Sud



Direction Nord



Figure 11. Page de résultats de l'analyse section –distributions de vitesses moyennes et de temps de parcours

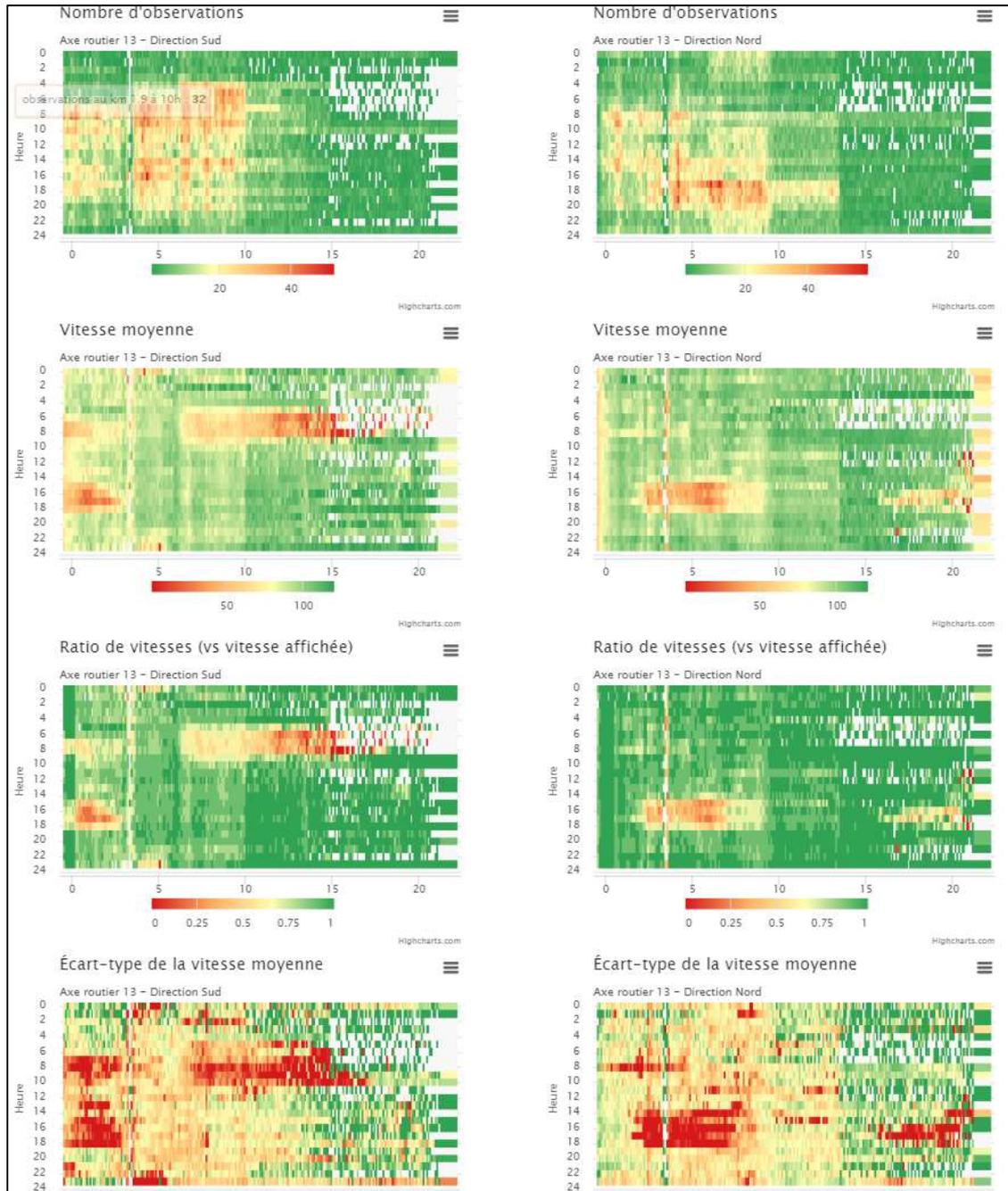


Figure 12 Page de résultat de l'analyse section – cartes de chaleur

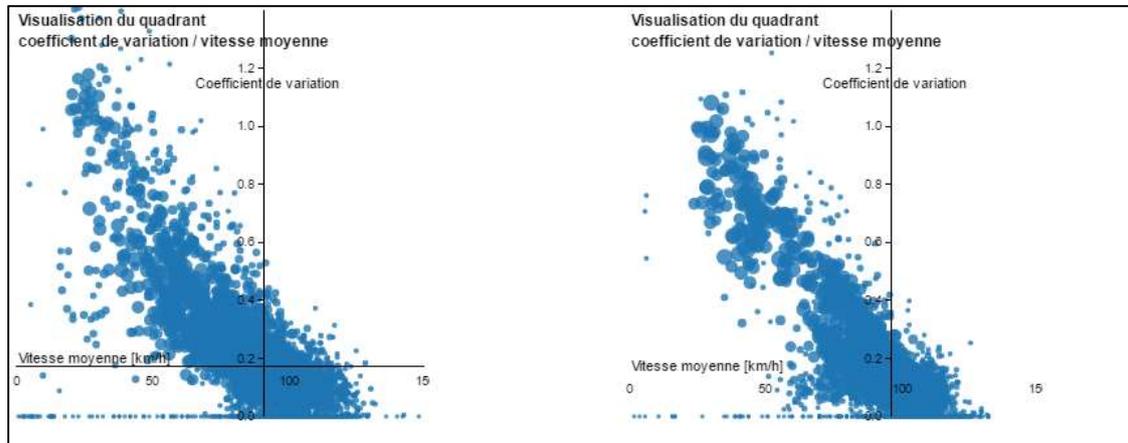


Figure 13. Page de résultats de l'analyse section – quadrants coefficient de variation / vitesse moyenne

Analyse explicative

Analyse explicative ⓘ

Analyse croisée / modélisation

Analyse croisée : Étude des indicateurs de congestion pour différents types de conditions météo (typologie en développement)

[Analyse croisée](#)

Modélisation : Estimation d'un modèle explicatif de la congestion pour différents seuils (fixés par l'utilisateur) et étude des coefficients du modèle

[Modélisation](#)

Analyse des tendances

Analyse des tendances : Étude, sur une longue période, de l'évolution des indicateurs et de leur variabilité - pour une unité spatiale donnée.

[Analyse des tendances](#)

Figure 14. Page montrant les analyses possibles dans le volet d'analyse explicative

[Retour analyse explicative](#)

Analyse croisée ?

Filtres

Unité de filtre ?

Région: 1 - Centre-Ville de Montréal ▼

Température minimale: -30 °C ▼

Température maximale: 30 °C ▼

Condition météorologique: Dégagé ▼

Filter journée

Dimanche
Lundi
Mardi
Mercredi
Jeudi
Vendredi
Samedi

Filter heure

0:00
1:00
2:00
3:00
4:00
5:00
6:00

Tous

Jours de semaine

Jours ouvrables uniquement

Jours de fin de semaine

Personnalisés

Toutes

Pointe Matin

Pointe soirée

Hors Pointe Jour

Hors Pointe Nuit

Personnalisés

[Lancer la recherche](#)

Figure 15. Page de sélection des filtres de l'analyse croisée

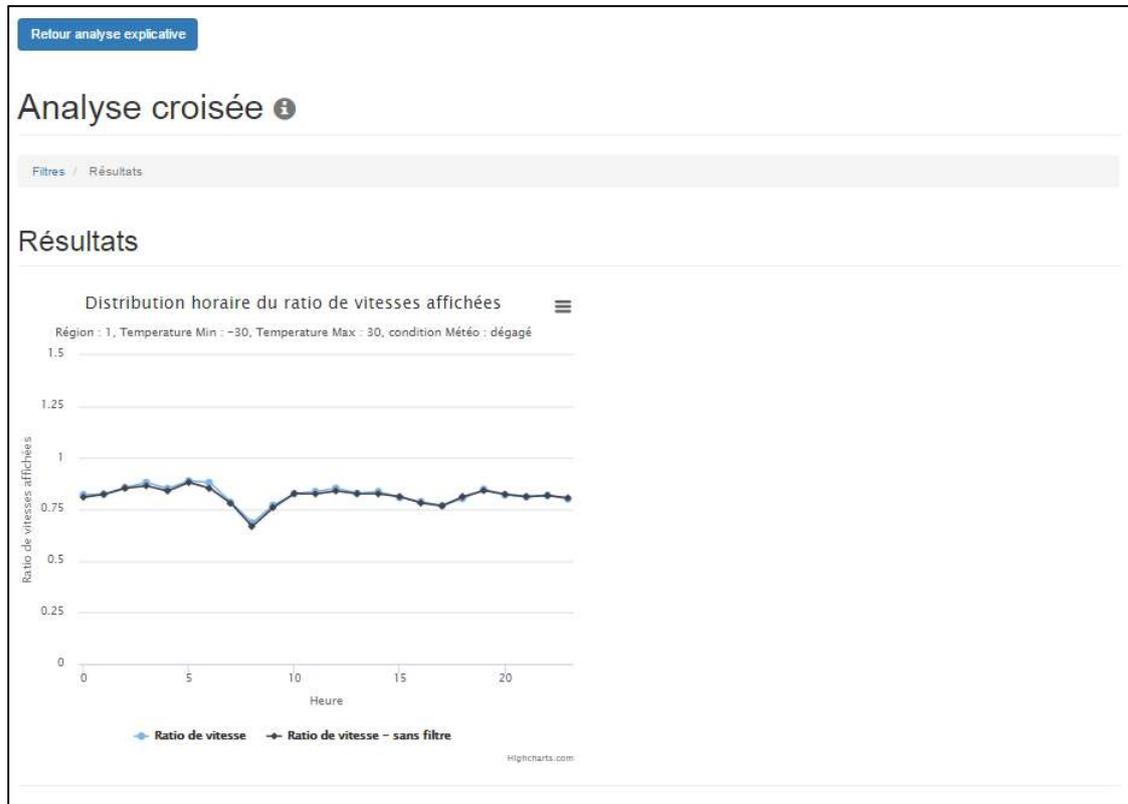


Figure 16. Page de résultats de l'analyse croisée

[Retour analyse explicative](#)

Modélisation ?

Filtres

Unité Spatiale Choix de la région ?

Région:

Seuil de congestion ?

Seuil de congestion:

[Lancer la recherche](#)

Figure 17. Page de sélection des filtres de la section modélisation de l'analyse explicative

[Retour analyse explicative](#)

Modélisation +

Filtres / Résultats

Résultats +

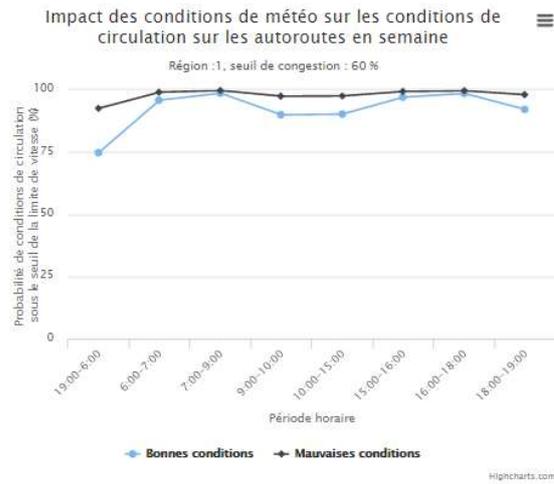


Figure 18. Page de résultats de la section modélisation de l'analyse explicative

[Retour analyse explicative](#)

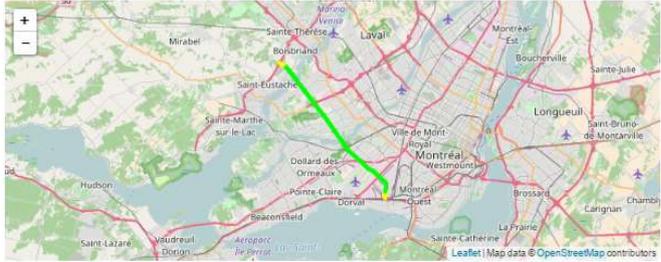
Analyse des tendances ?

Sélection spatio-temporelle

Unité Spatiale Choix de la route

Unité de filtre

Corridor: 13



Unité temporelle

Unité de filtre

Filtre journée

- Dimanche
- Lundi
- Mardi
- Mercredi
- Jeudi
- Vendredi
- Samedi

Tous

Jours de semaine

Jours ouvrables uniquement

Jours de fin de semaine

Filtre heure

- 0:00
- 1:00
- 2:00
- 3:00
- 4:00
- 5:00
- 6:00

Toutes

Pointe Matin

Pointe soirée

Hors Pointe Jour

Hors Pointe Nuit

Figure 19. Page de sélection spatio-temporelle de l'analyse explicative

[Retour analyse explicative](#)

Analyse des tendances ⓘ

Sélection spatio-temporelle / Résultats

Résultats Axe routier #13 ⓘ

Direction Sud



Direction Nord



Figure 20. Page d'analyse des tendances

Analyse comparative

Analyse comparative ⓘ

Période d'analyse

Périodes d'analyse ⓘ

Période 1:
du 2015-09 au 2015-09

Période 2:
du 2015-10 au 2015-10

Nombre de mois

type résolution :

jour

semaine

mois

septembre 2015							octobre 2015								
	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.		lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
36	31	01	02	03	04	05	06	40				01	02	03	04
37	07	08	09	10	11	12	13	41	05	06	07	08	09	10	11
38	14	15	16	17	18	19	20	42	12	13	14	15	16	17	18
39	21	22	23	24	25	26	27	43	19	20	21	22	23	24	25
40	28	29	30	01	02	03	04	44	26	27	28	29	30	31	01
41	05	06	07	08	09	10	11	45	02	03	04	05	06	07	08

Figure 21. Page de sélection des périodes d'analyse de l'analyse comparative

Analyse comparative i

Période d'analyse / Distributions

Distributions périodes d'analyse

Période 1: du 2015-09-01 au 2015-09-30

Période 2: du 2015-10-01 au 2015-10-31

Distributions chargées en 20,3s

Distributions globales

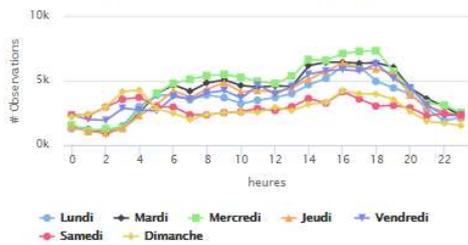
métrique	période 1	période 2
tronçons	14 737 (1 473,7 km)	14 737 (1 473,7 km)
jours	30	31
tronçons-heure (14 737 tronçons x 24 heures x n jours)	10 610 640	10 994 328
observations	2 120 289	2 637 034
nb observations moyen par tronçon heure tronçon heure ayant au moins 1 observation	2,34	2,95

Répartition tronçons-heure avec/sans observations



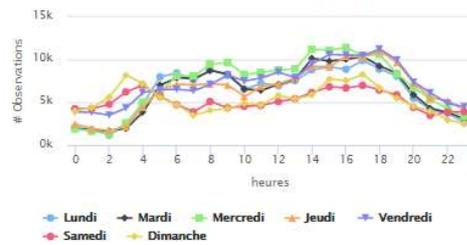
Répartition du nombre moyen d'observations par heure et jour de la semaine

Période : du 2015-09-01 au 2015-09-30 - Ensemble du réseau



Répartition du nombre moyen d'observations par heure et jour de la semaine

Période : du 2015-10-01 au 2015-10-31 - Ensemble du réseau



Répartition du nombre de tronçons-heure par unité d'observation

Ensemble du réseau

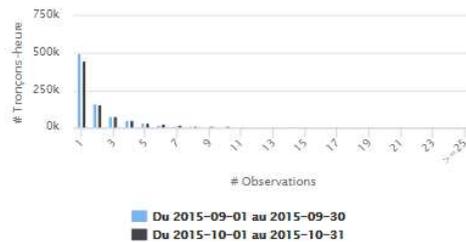


Figure 22. Page de distributions de la période d'analyse de l'analyse comparative – distributions globales

Distributions temporelles

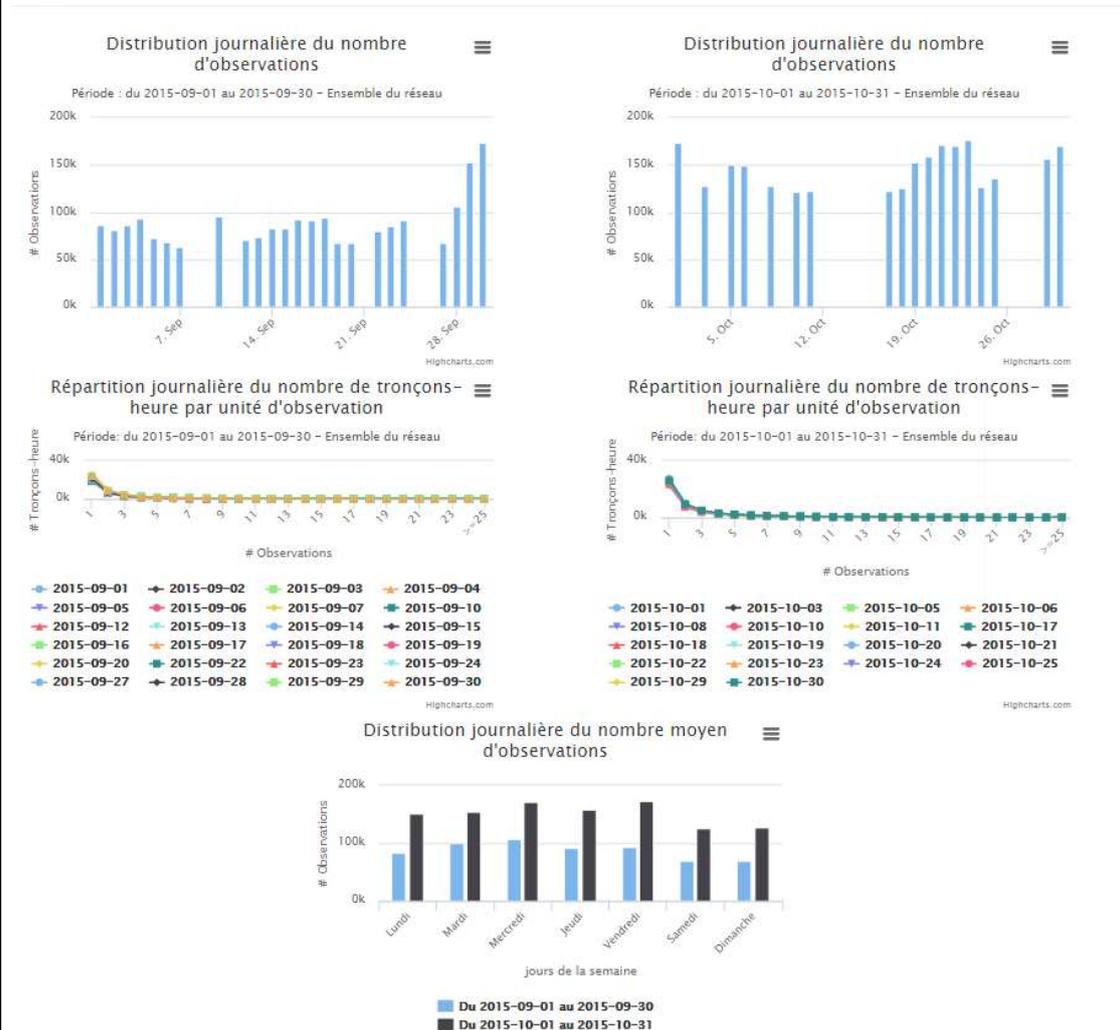


Figure 23. Page de distributions de la période d'analyse de l'analyse comparative– distributions temporelles

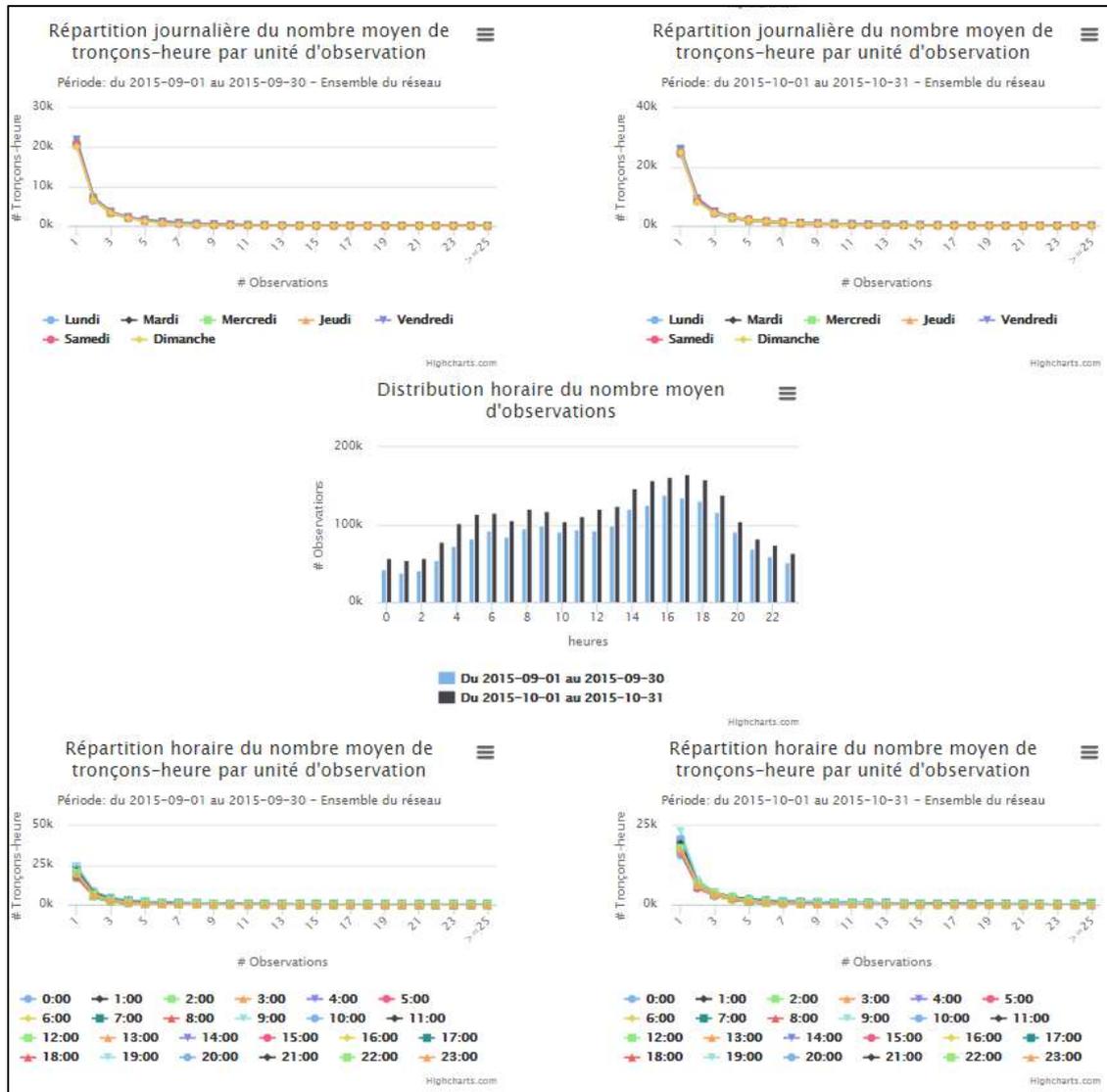


Figure 24. Page de distributions de la période d'analyse de l'analyse comparative– distributions temporelles (suite)

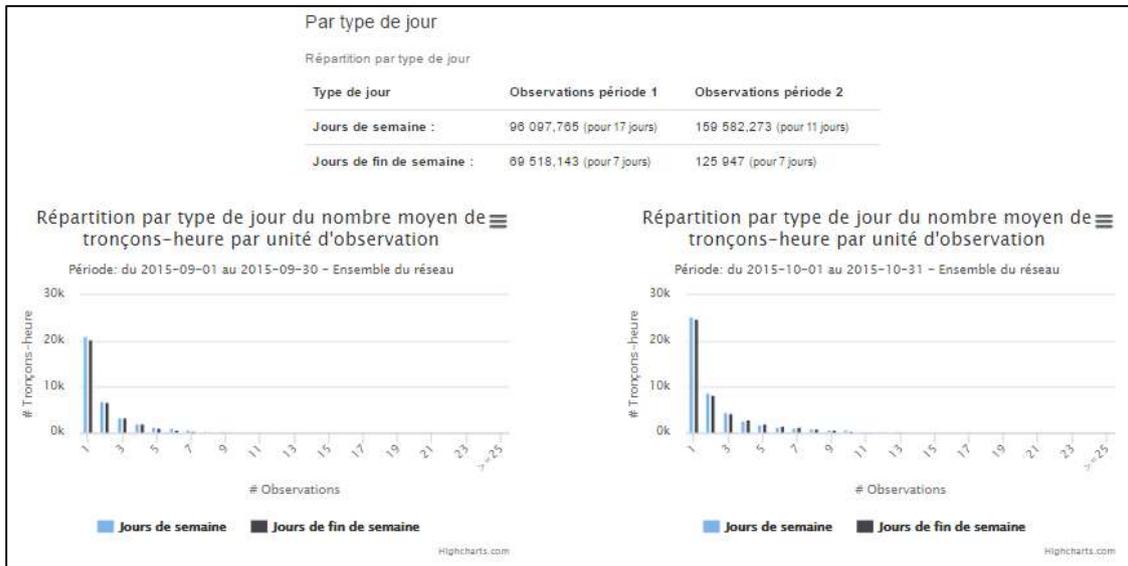


Figure 25. Page de distributions de la période d'analyse de l'analyse comparative – distributions temporelles (suite)

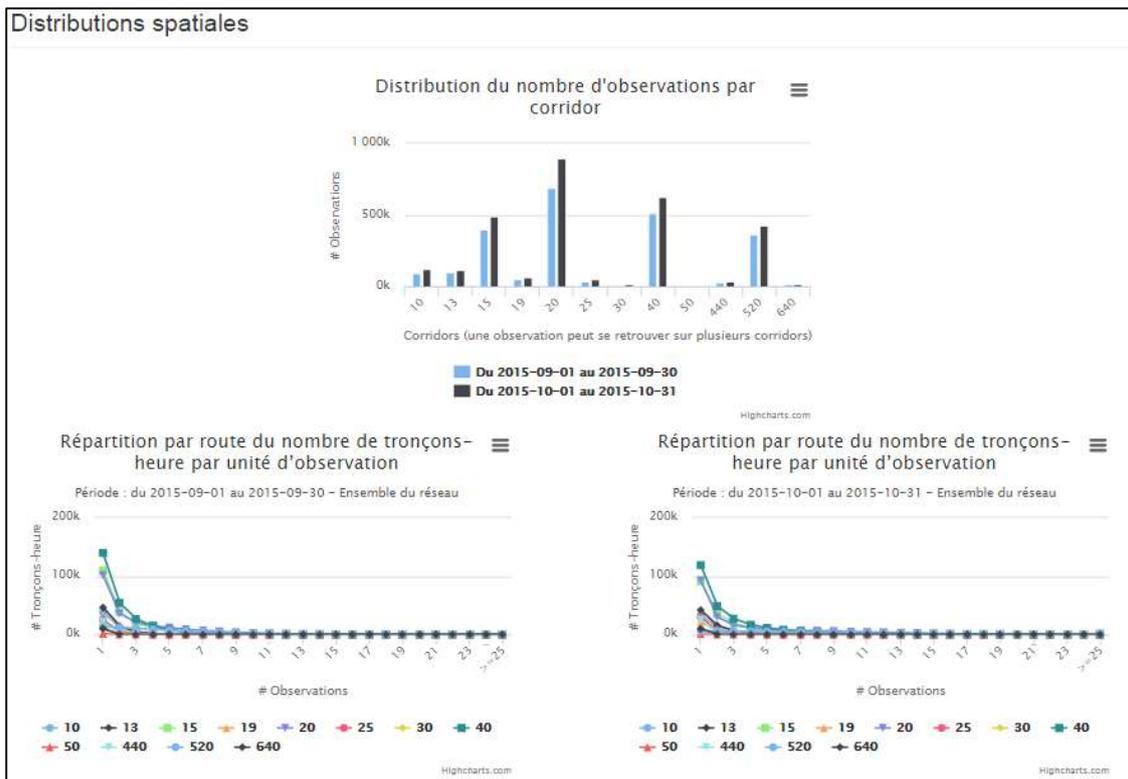


Figure 26. Page de distributions de la période d'analyse de l'analyse comparative – distributions spatiales

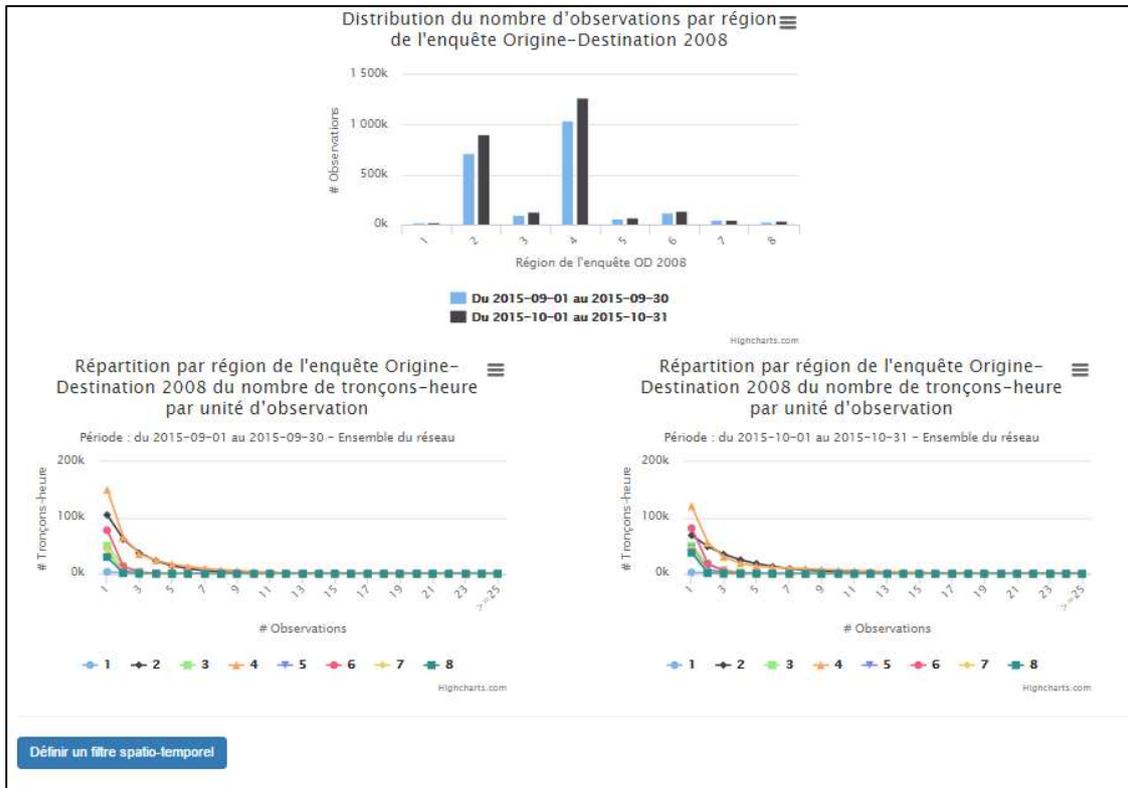


Figure 27. Page de distributions de la période d'analyse de l'analyse comparative – distributions spatiales (suite)

Période d'analyse / Distributions / Spatio-temporelle

Période d'analyse Edit

Période 1: du 2015-09-01 au 2015-09-30 Période 2: du 2015-10-01 au 2015-10-31

Unité Spatiale Choix de la route +

Unité de filtre +

Objet d'analyse: Corridor

Corridor: 13

Région: Toutes

Direction:
 Nord
 Sud

Segment / Sous corridor:
 0km - Extrémité Sud A13
 21.7km - Extrémité Nord A13



Unité d'analyse +

Unité d'analyse: Tronçon

Unité temporelle +

Unité de filtre + Unité d'analyse +

Résolution temporelle: 1 heure

Filtre journée

- Dimanche
- Lundi
- Mardi
- Mercredi
- Jeudi
- Vendredi
- Samedi

Tous

Jours de semaine

Jours ouvrables uniquement

Jours de fin de semaine

Personnalisés

Filtre heure

- 0:00
- 1:00
- 2:00
- 3:00
- 4:00
- 5:00
- 6:00

Toutes

Pointe Matin

Pointe soirée

Hors Pointe Jour

Hors Pointe Nuit

Personnalisés

Nombre minimal d'observations

5

Lancer la recherche

Figure 28. Page de sélection spatio-temporelle de l'analyse comparative

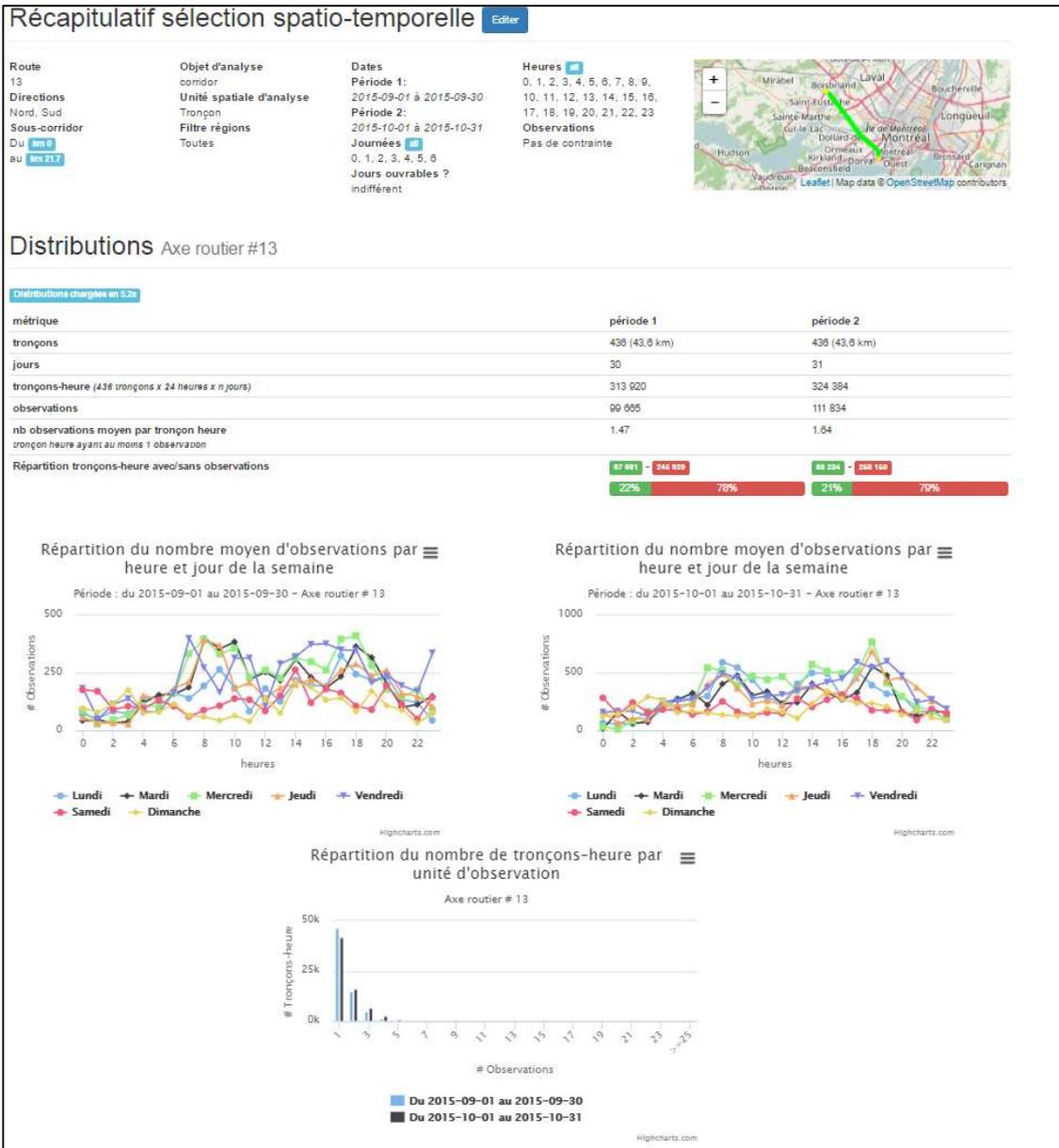


Figure 29. Page de distributions de la sélection spatio-temporelle de l'analyse comparative

Distributions temporelles

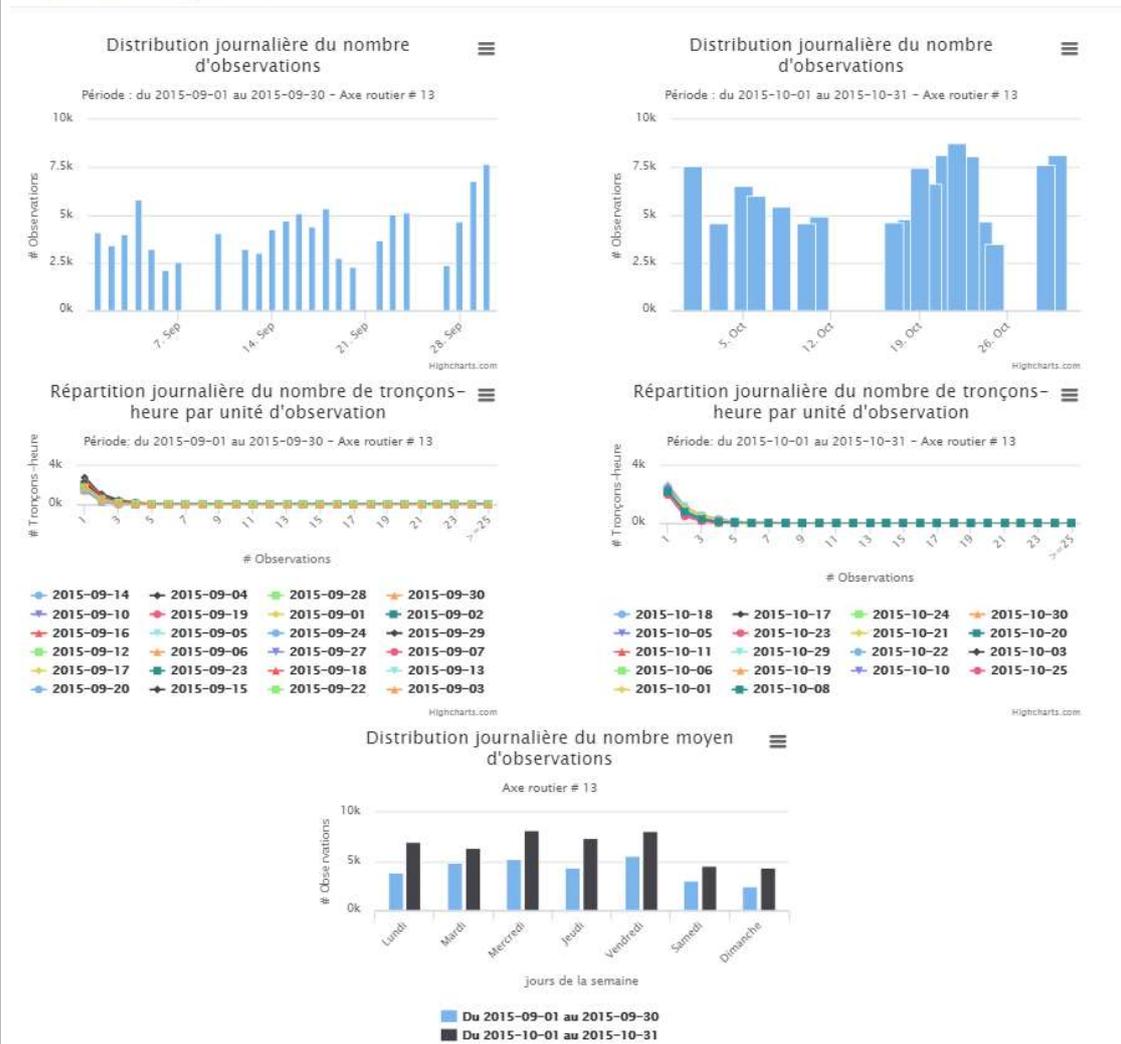


Figure 30. Page de distributions de la sélection spatio-temporelle de l'analyse comparative - distributions temporelles

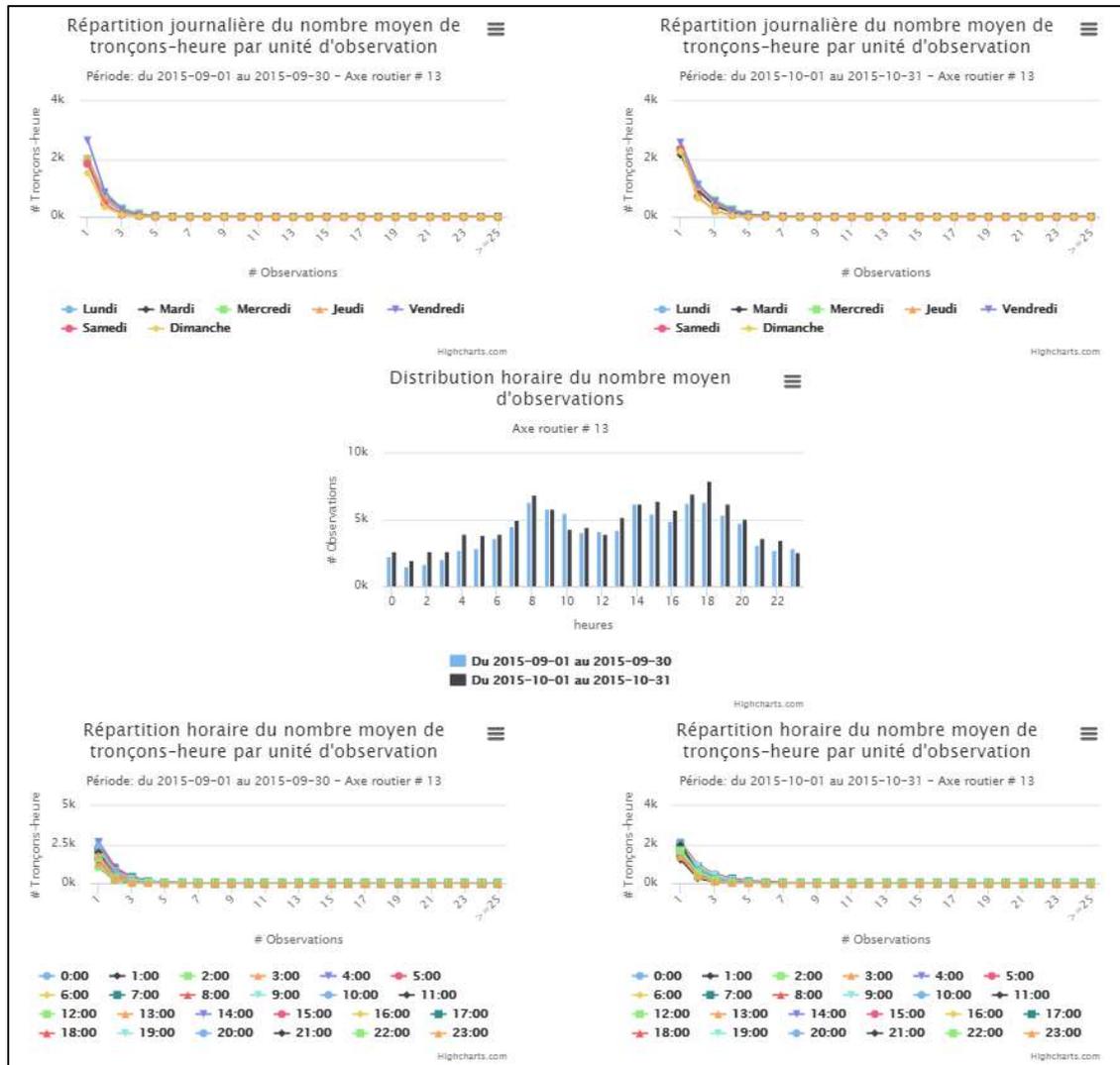


Figure 31. Page de distributions de la sélection spatio-temporelle de l'analyse comparative - distributions temporelles (suite)

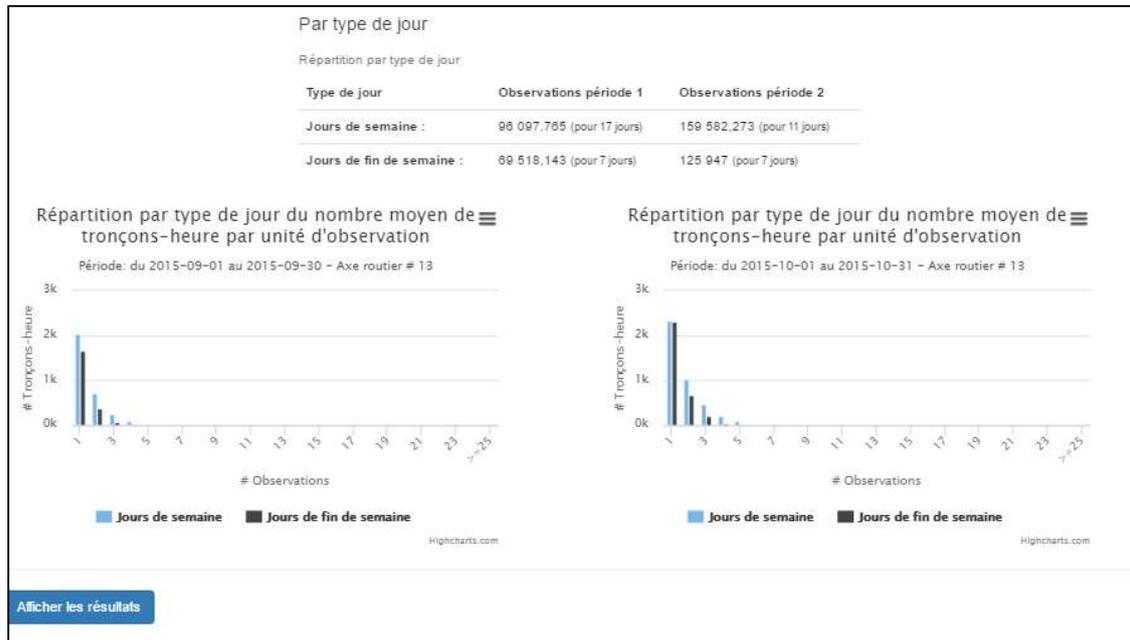


Figure 32. Page de distributions de la sélection spatio-temporelle de l'analyse comparative - distributions temporelles (suite)

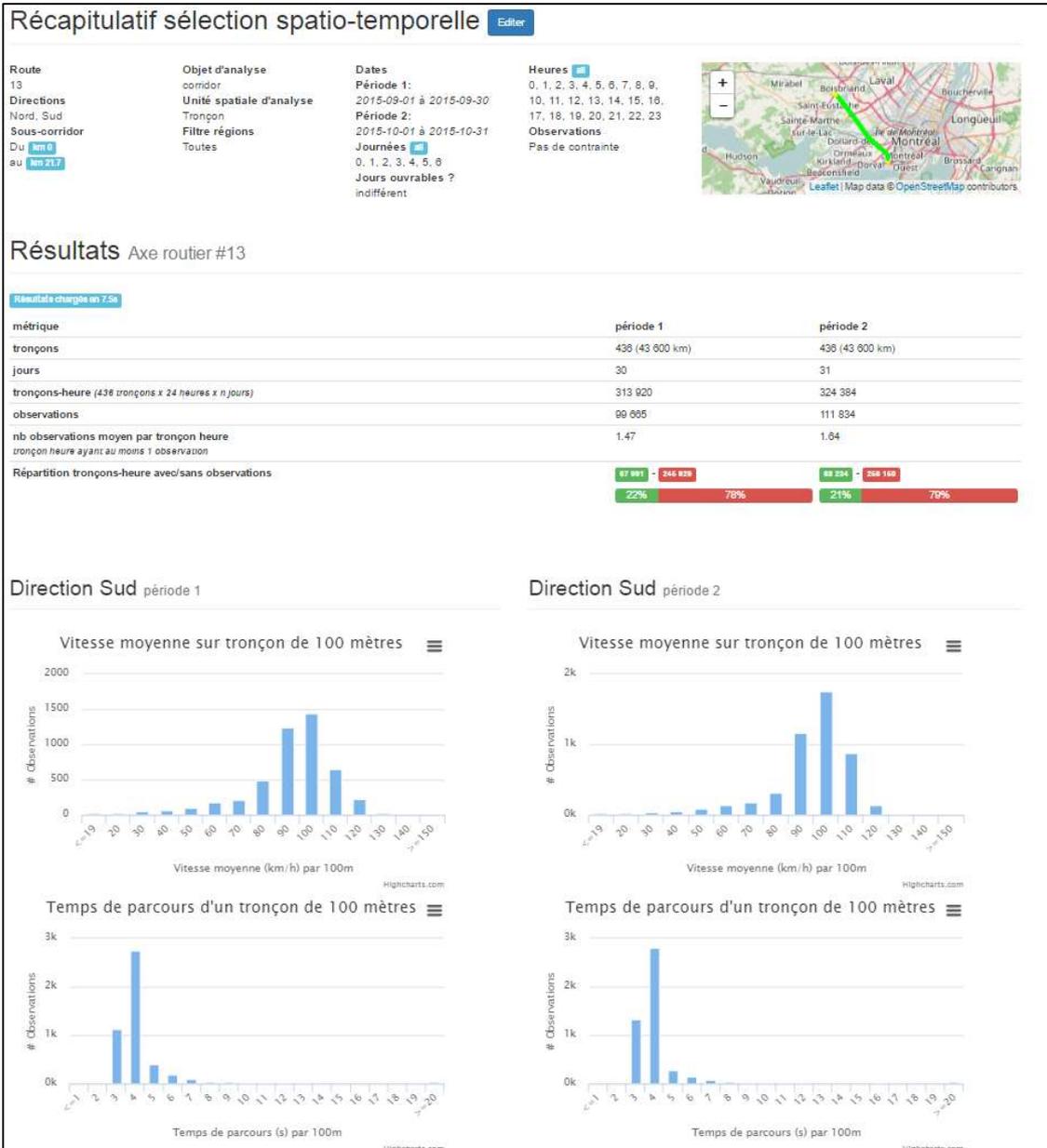


Figure 33. Page de résultats de l'analyse comparative—distributions de vitesses moyennes et de temps de parcours (première direction)

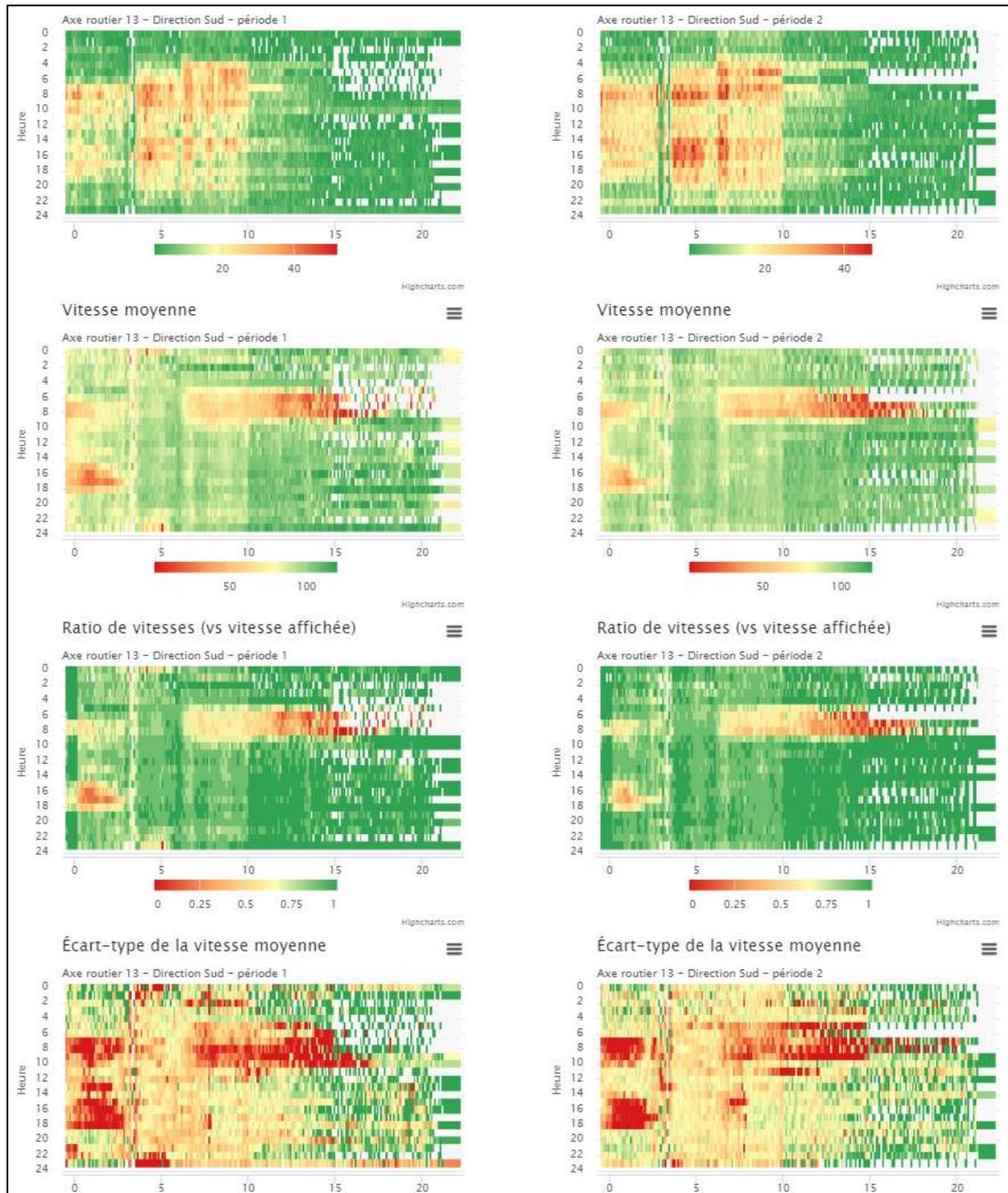


Figure 34. Page de résultats de l'analyse comparative – cartes de chaleur (première direction)

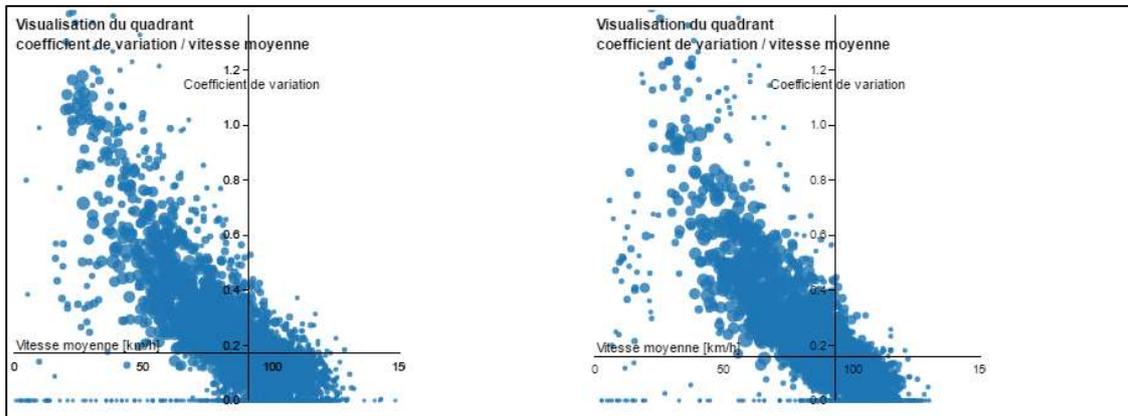


Figure 35. Page de résultats de l'analyse comparative – quadrants coefficient de variation / vitesse moyenne (première direction)

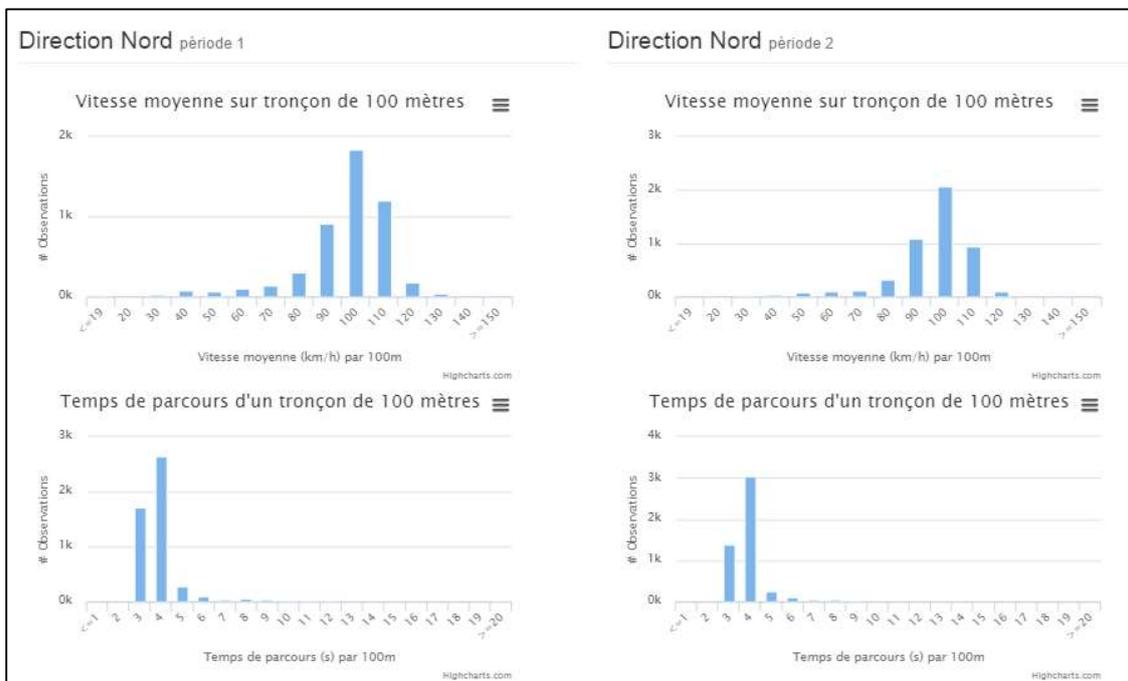


Figure 36. Page de résultats de l'analyse comparative – distributions de vitesses moyennes et de temps de parcours (deuxième direction)

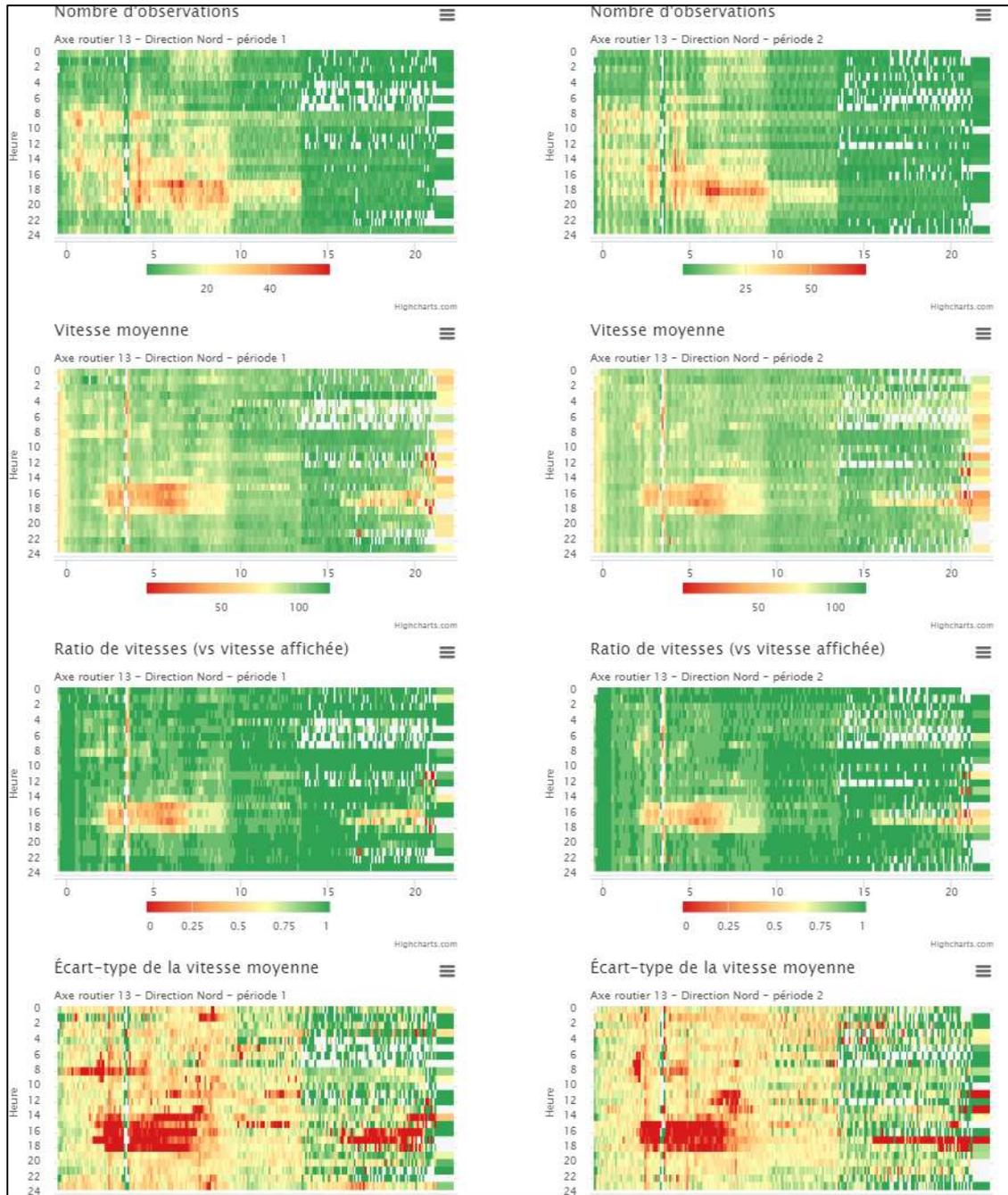


Figure 37. Page de résultats de l'analyse comparative—cartes de chaleur (deuxième direction)

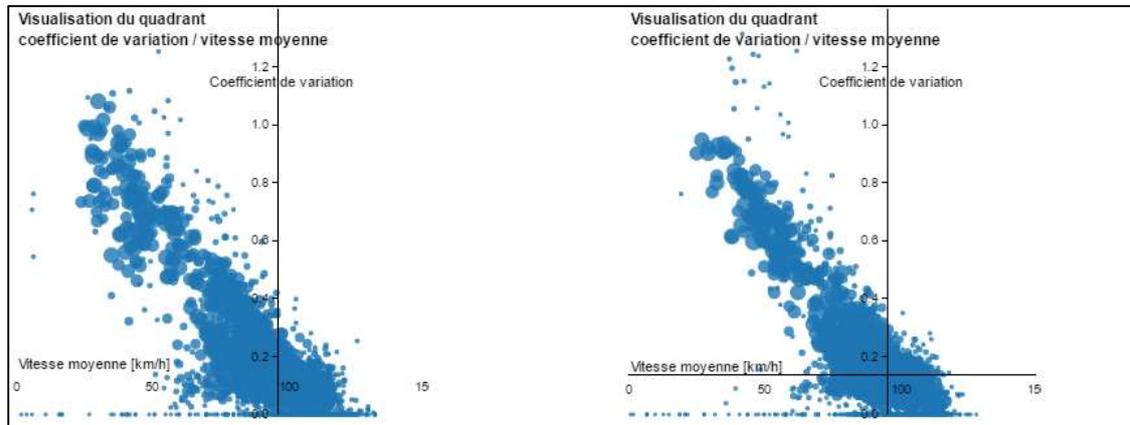


Figure 38. Page de résultats de l'analyse comparative – quadrants coefficient de variation / vitesse moyenne (deuxième direction)

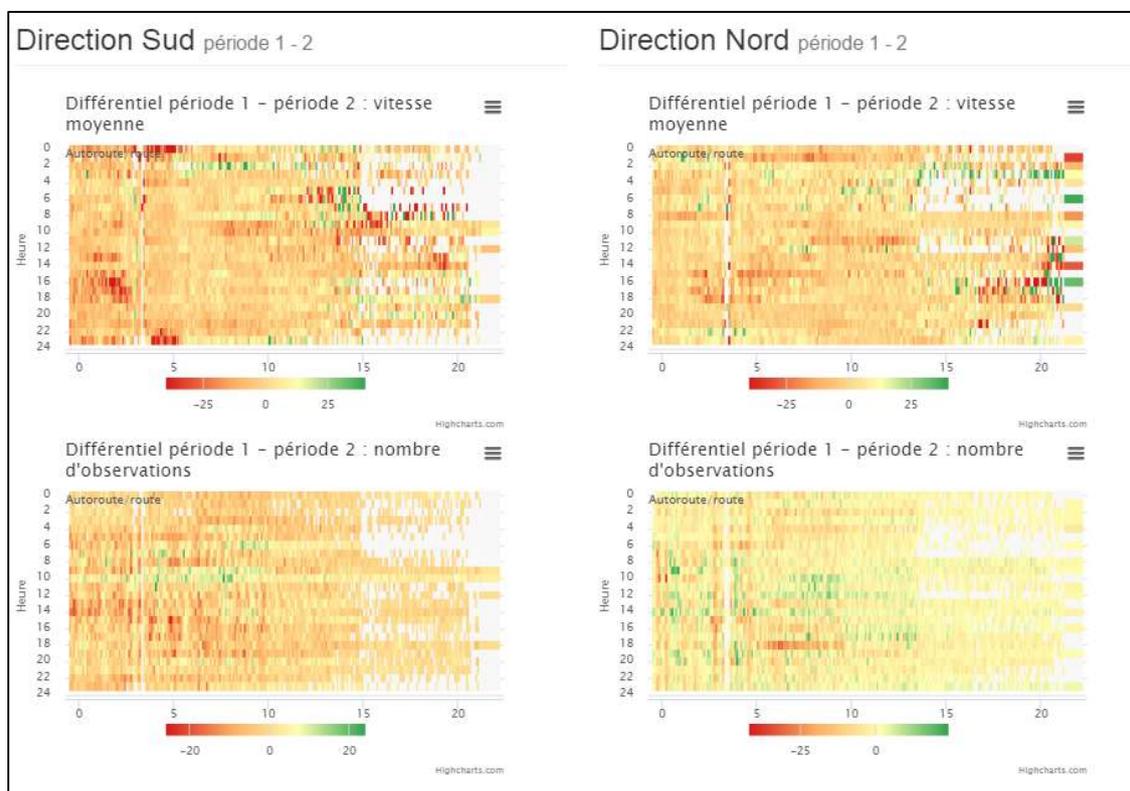


Figure 39. Page de résultats de l'analyse comparative – cartes de chaleur différentielles pour les deux directions

