

**Titre:** Pour une approche pragmatique et opérationnelle de la mobilité durable: Concept, méthodes et outils  
Title:

**Auteur:** Louiselle Sioui  
Author:

**Date:** 2014

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Sioui, L. (2014). Pour une approche pragmatique et opérationnelle de la mobilité durable: Concept, méthodes et outils [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1530/>  
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/1530/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Catherine Morency  
Advisors:

**Programme:** Génie civil  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

POUR UNE APPROCHE PRAGMATIQUE ET OPÉRATIONNELLE DE LA  
MOBILITÉ DURABLE : CONCEPT, MÉTHODES ET OUTILS

LOUISELLE SIOUI

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR

(GÉNIE CIVIL)

AOÛT 2014

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

POUR UNE APPROCHE PRAGMATIQUE ET OPÉRATIONNELLE DE LA MOBILITÉ  
DURABLE : CONCEPT, MÉTHODES ET OUTILS

présentée par : SIOUI Louise

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiæ Doctor

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

Mme MILLETTE Louise, Ph.D., présidente

Mme MORENCY Catherine, Ph.D., membre et directrice de recherche

M. TRÉPANIÉ Martin, Ph.D., membre

M. LACHAPELLE Ugo, Ph.D., membre

## DÉDICACE

*Un jour, dit la légende, il y eut un immense incendie de forêt. Tous les animaux terrifiés et atterrés observaient, impuissants, le désastre.*

*Seul le petit colibri s'active,  
allant chercher quelques gouttes d'eau dans son bec pour les jeter sur le feu.  
Au bout d'un moment, le tatou, agacé par ses agissements dérisoires, lui dit :  
« Colibri? Tu n'es pas fou? Tu crois que c'est avec ces quelques gouttes d'eau  
que tu vas éteindre le feu? »*

*« Je le sais, répond le colibri, mais je fais ma part. »*

Légende amérindienne, rédigée dans Rahbi, 2009

À vous, colibris qui m'entourez au quotidien.

## REMERCIEMENTS

Un immense merci à Catherine Morency, source inépuisable de motivation. Merci d'avoir su me guider, m'aider, me critiquer, me pousser à travers mon cheminement, parfois rayonnant, d'autres fois plus nébuleux. Ce n'eût été aussi enrichissant sans l'apport des professeurs Martin Trépanier, Nicolas Saunier, Bruno Agard, Antonio Paëz, Matthew Roorda, Partick Bonnel et Jean-Pierre Nicolas.

Un gros merci à Seb, mes parents, mon frère et mes beaux-parents, qui me soutiennent sans relâche. Ils ont appris à ne plus me poser la question fatidique « Pi, ça avance? ». Par ailleurs, je remercie spécialement ma sœur Marjolaine d'avoir troqué durant plusieurs semaines le monde d'Inti pour celui de la mobilité durable. Aussi, une pensée particulière à Delphine qui a pris de son précieux temps de rédaction pour agrémenter mon temps dans ma chambre d'hôpital. Une pensée également à Marie-Ève, Marie et à tous mes amis qui sont auprès de moi.

D'Hubert, je retiens que la confiance en soi et la patience sont des atouts considérables (et que se battre contre le plagiat, ça prend du temps). De Pierre-Léo, je retiens que la curiosité et l'apprentissage continu sont la clef d'une motivation sans fin (et que les autobus devraient passer partout aux 10 minutes).

Je remercie tous les étudiants que j'ai croisés, de la Chaire Mobilité ou d'ailleurs! Que de souvenirs du club de course avec, d'abord, François, Nicolas et Pierre, puis Audrey. Tant de questionnements (et d'angoisse) partagés avec les autres doctorants Mohsen, Pegah, Marie-Christine, Farhana et Kinan. Je me souviens de toutes ces discussions hilarantes avec François, François, Antoine, Nicolas, Jason et Félix, ainsi que du potinage avec Catherine et Christine. Je garde également en mémoire Éric qui m'a accompagnée en cette fin de doctorat, avec nos amies les petites bibittes à plantes vertes.

Finalement, je remercie les organismes qui m'ont financée de façon à ce que je me concentre sur ma thèse durant plusieurs années : le Centre de développement de la formation et de la main d'œuvre (CDFM) huron-wendat, le Centre de recherche en science naturel et génie (CRSNG), le Fonds québécois de recherche naturelle et technologie (FQRNT), la Fondation de Polytechnique, l'Association des transports du Canada (ATC), l'Association de la prévention de la contamination de l'air et des sols (APCAS) et la Chaire Mobilité.

## RÉSUMÉ

L'intégration et l'opérationnalisation de la durabilité en transport sont des préoccupations grandissantes pour les autorités publiques. Les instances décisionnelles désirent justifier leurs actions au regard de la mobilité durable. Cette mise en œuvre fait naître le besoin d'évaluation de la mobilité durable pour, par exemple, comparer différents projets envisagés ou suivre l'évolution sur un territoire. Désirs réels mais récents, aucun outil n'est actuellement au point pour évaluer la mobilité durable.

Cette étude met en lumière les problématiques liées à la mesure de la mobilité durable, telles que les besoins d'évaluation diversifiés, l'ambiguïté de la définition du développement durable, la multitude et la diversité des impacts de la mobilité sur l'environnement, la société et l'économie, les relations de causalité non intégrées aux systèmes d'indicateurs existant dans la littérature, la redondance des enjeux, la variabilité spatiale et temporelle des phénomènes à mesurer. Dans l'optique d'évaluer la mobilité durable, cette recherche offre une réflexion approfondie sur ce qui la définit, ainsi que sur la sélection d'indicateurs et leur méthodologie d'estimation. L'objectif ultime est de constituer un cadre d'évaluation de la mobilité durable guidant les planificateurs dans la sélection des indicateurs et leur estimation, ainsi que dans le choix des actions qu'ils posent.

D'abord, cette thèse propose un outil d'aide à l'évaluation de la mobilité durable développé sur une plate-forme Internet interactive. Basé sur une vaste revue de littérature des impacts de la mobilité sur les trois dimensions du développement durable, le premier volet de cet outil est constitué d'un schéma, nommé la *Pieuvre*. Il catégorise les effets de la mobilité sur l'environnement, la société et l'économie. Ce schéma contribue à clarifier et à structurer le concept de mobilité durable.

Le second volet de l'outil est composé d'un second schéma, relié au premier de façon interactive. Nommé le *Cercle de causalité*, il dispose le long de sa circonférence une série de thèmes qui sont : (1) les facteurs d'influence des comportements de mobilité et (2) les impacts de la mobilité, identifiés dans la *Pieuvre* et regroupés de façon à réduire la taille du cercle. Les fonctionnalités interactives du schéma lui permettent de s'adapter aux besoins du planificateur en transport, qui peut sélectionner un thème, un mode de transport et une cible à atteindre. À l'aide d'un processus systématique intégrant les relations de causalité, l'outil affiche les causes ou les effets du thème

sélectionné. Pour un planificateur en transport, ce schéma contribue à faire le lien entre les actions qu'il peut poser et une cible qu'il souhaite atteindre. Il facilite également l'identification des effets imprévus d'une action, qu'ils soient souhaitables ou non.

Le troisième volet de l'outil se base sur ces deux schémas pour proposer une série de dix-sept indicateurs. Leur sélection se fait de façon à limiter leur nombre, à rendre transparent la redondance des enjeux évalués et à s'assurer de la prise en compte du large éventail d'impacts de la mobilité.

Chaque méthodologie d'estimation est choisie et détaillée de façon à valoriser les données disponibles dans la région de Montréal et à s'appliquer à plusieurs approches (différents modes de transport, échelles, objets d'analyse). À partir de ces indicateurs, il est possible de faire des recommandations quant aux perspectives de recherche, qui permettront d'améliorer les méthodes d'estimation et les méthodes de collecte de données.

Également, les formulations proposées s'appuient sur les défis méthodologiques soulevés lors de quatre démonstrations pratiques. Deux brèves expérimentations portent sur la consommation de carburant et la capacité d'une voie de circulation. Entre autres, elles illustrent la nécessité de réaliser les estimations à l'échelle de la personne plutôt que du véhicule. Deux autres démonstrations, plus approfondies, contribuent à l'estimation de la congestion routière et de l'équité d'accès. Pour chacune de ces expérimentations, plusieurs formulations d'indicateurs sont testées afin d'analyser leur sensibilité et leur applicabilité.

L'indicateur d'intensité de la congestion des autoroutes montréalaises est élaboré à partir de données de vitesse issues de véhicules de Communauto, compagnie d'autopartage. Le réseau autoroutier est découpé en tronçons ou corridors. Plusieurs méthodes d'agrégation de ces entités spatiales sont testées et évaluées afin de répondre aux divers besoins des planificateurs.

Dans le cas de l'équité d'accès, l'une des mesures estimée est l'indice de Gini. Il est estimé pour l'accès à différents réseaux de transport, et ce, pour plusieurs segments de population vulnérables. Aux traditionnels réseaux de routes et de transport en commun sont ajoutés ceux de pistes cyclables, d'autopartage et de vélopartage.

## ABSTRACT

The integration and the operational implementation of sustainability in transportation are growing concerns among public authorities. In fact, policymakers want to justify their actions with regard to sustainable mobility. However, its implementation starts by a proper evaluation. For instance, it is required to compare various transportation projects or to monitor sustainable mobility over a territory. Besides these recent desires, no operational tool is currently available to assess sustainable mobility.

This study highlights many issues related to the measurement of sustainable mobility, namely the various needs for assessment, the ambiguity of the definition of sustainable development, the multitude and diversity of impacts of mobility on the environment, society and economy, the lack of integration of causal relationships in existing systems of indicators, the redundancy of issues, the spatial and the temporal variability of phenomena to be measured. In order to evaluate sustainable mobility, this research provides a detailed thought on its definition, and also on the selection of indicators and their estimation methods. The ultimate goal of this work is to develop a framework for the evaluation of sustainable mobility. It will guide planners in selecting and estimating indicators, and also help them choose relevant actions or policies.

To evaluate sustainable mobility, this thesis proposes a tool developed on an interactive Internet platform. Based on an extensive literature review of the impacts of mobility on the three pillars of sustainable development, the first part of this tool consists of a schema, called the *Octopus*. It categorizes the effects of mobility on the environment, society, and economy. This diagram helps to clarify and to structure the concept of sustainable mobility.

The second part of this tool consists of another diagram, interactively connected to the first one. Named the *Circle of causality*, it has along its circumference a number of themes which are: (1) the factors that influence mobility behavior and (2) the impacts of mobility. The latest were identified in the *Octopus* and were grouped in order to reduce the size of the circle. Interactive features allow the tool to adapt to the needs of transportation planners, who can select a theme, a mode of transport, and a target. Using a systematic process incorporating causality chains, the tool displays the causes or the effects of the selected theme. For a transportation planner, this diagram helps make the link between actions he can take and an objective he wants to achieve. It also assists to identify the unexpected effects of an action, whether they are desirable or not.

Based on these two diagrams, the third part of the tool proposes a series of seventeen indicators. They are selected in order to limit their number, to make transparent the assessed issues that are redundant, and to ensure the consideration of the wide range of mobility impacts.

Each estimation methodology is selected and detailed in order to enhance the available data in the Montreal area, and to meet several approaches (different transportation modes, scales, entities). From these indicators, it is possible to make recommendations about the prospects for research, in a way that will improve the estimation methods and the data collection.

Also, the proposed formulations are based on the methodological challenges previously raised in four practical demonstrations. Two brief experiments relate to fuel consumption and to the capacity of a traffic lane. Among other things, they illustrate the need for estimates that are based on the individual rather than the vehicle. Two other in-depth demonstrations contribute to the estimation of traffic congestion and equity of access to transportation networks. For each of these experiments, several formulations of indicators are tested. Their sensitivity and applicability are then analyzed.

The traffic congestion indicator for Montreal highways is based on speed data, which is gathered from carsharing vehicles of the Communauto company. The highway network is divided into spatial entities of equal length. Several methods of spatial and temporal aggregation are tested. They are also evaluated in regard to the needs of transportation planners.

In the case of equity of access, one of the measures is the Gini coefficient. Its estimation evaluates access to different transportation networks and for several vulnerable population segments. The analysis is conducted for traditional networks, namely roads and public transportation, and also cycle paths, carsharing, and bikesharing.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VII
TABLE DES MATIÈRES .....	III
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XVII
LISTE DES ANNEXES.....	XX
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1    CONTEXTE ET ÉTAT DES CONNAISSANCES .....	5
1.1    Contexte et définitions .....	7
1.1.1    Mobilité.....	7
1.1.2    Développement durable.....	9
1.1.3    Mobilité durable .....	12
1.1.4    Synthèse et implications pour la thèse .....	20
1.2    Les enjeux liés à la mobilité.....	21
1.2.1    Énoncé des enjeux.....	21
1.2.2    Synthèse et implications pour la thèse .....	36
1.3    Les indicateurs de mobilité durable .....	39
1.3.1    Le rôle des indicateurs.....	39
1.3.2    La classification des indicateurs de mobilité durable.....	43
1.3.3    D'autres notions.....	45

1.3.4	La sélection des indicateurs.....	47
1.3.5	Les systèmes d'indicateurs existants.....	49
1.3.6	Synthèse et implications pour la thèse .....	53
1.4	Les relations de causalité.....	61
1.4.1	Concept de base et objectifs généraux .....	61
1.4.2	Utilité pour les planificateurs .....	63
1.4.3	Différentes approches et exemples.....	64
1.4.4	Défis et problématiques.....	68
1.4.5	Synthèse et implications pour la thèse .....	69
CHAPITRE 2 CONTRIBUTIONS VISÉES ET MÉTHODOLOGIE.....		73
2.1	Contributions visées du projet de recherche .....	73
2.1.1	Contributions générales.....	74
2.1.2	Contributions spécifiques .....	74
2.2	Méthodologie générale.....	75
2.2.1	Processus méthodologique .....	75
2.2.2	Informations, données et outils .....	78
CHAPITRE 3 CADRE D'ÉVALUATION DE LA MOBILITÉ DURABLE.....		79
3.1	Objectifs et méthodologie spécifique .....	80
3.1.1	Problématique spécifique .....	80
3.1.2	Objectifs du chapitre .....	81
3.1.3	Méthodologie spécifique.....	82
3.2	La <i>Pieuvre</i> , schéma statique.....	84
3.2.1	Besoin de catégorisation.....	84
3.2.2	Présentation de la <i>Pieuvre</i> .....	85

3.2.3	Contributions et limites de la <i>Pieuvre</i> .....	90
3.3	Le <i>Cercle de causalité</i> , schéma interactif .....	92
3.3.1	Besoin d'intégrer les paramètres de mobilité et les relations de causalité.....	93
3.3.2	Présentation du <i>Cercle de causalité</i> .....	93
3.3.3	Exemple simple d'utilisation du <i>Cercle de causalité</i> .....	115
3.3.4	Contributions et limites du <i>Cercle de causalité</i> .....	119
3.4	Interventions possibles .....	122
3.4.1	Présentation des catégories d'intervention .....	122
3.4.2	Limites et perspectives de l'intégration des interventions .....	126
3.5	Contributions et perspectives du cadre d'évaluation .....	128
3.5.1	Brève synthèse des contributions .....	128
3.5.2	Perspectives.....	128
CHAPITRE 4	BOÎTE À OUTILS - PROPOSITION D'INDICATEURS.....	136
4.1	Objectifs et méthodologie du chapitre .....	136
4.1.1	Objectifs et contributions attendues .....	137
4.1.2	Méthodologie .....	137
4.2	Indicateurs sélectionnés.....	138
4.3	Synthèse des contributions, perspectives et recommandations .....	143
4.3.1	Synthèse sur l'applicabilité des indicateurs proposés .....	143
4.3.2	Indicateurs d'offre et de demande sous-jacents aux indicateurs proposés .....	146
4.3.3	Perspectives.....	150
CHAPITRE 5	TAUX DE CONSOMMATION D'ESSENCE ET CAPACITÉ D'UNE VOIE DE CIRCULATION .....	151
5.1	Objectif et méthodologie du chapitre .....	151
5.1.1	Problématique et principaux constats.....	151

5.1.2	Objectifs et contributions du chapitre .....	153
5.1.3	Méthodologie du chapitre.....	153
5.2	Taux de consommation des véhicules.....	154
5.2.1	Objectifs et méthodologie spécifique.....	154
5.2.2	Résultats et analyse .....	156
5.2.3	Synthèse des contributions, perspectives et recommandations.....	159
5.3	Capacité d'une voie de circulation .....	160
5.3.1	Objectifs et méthodologie spécifique.....	161
5.3.2	Résultats et analyse .....	164
5.3.3	Synthèse des contributions, perspectives et recommandations.....	168
5.4	Contributions et perspectives .....	170
CHAPITRE 6 CONGESTION.....		171
6.1	Objectifs et méthodologie .....	171
6.1.1	Problématique spécifique .....	171
6.1.2	Revue de littérature .....	173
6.1.3	Constats issus de la revue de littérature .....	179
6.1.4	Objectifs et contributions attendues .....	180
6.1.5	Méthodologie générale du chapitre.....	180
6.2	Analyse systématique.....	187
6.2.1	Type de jour : semaine et fin de semaine.....	188
6.2.2	Période de la journée (en semaine) .....	192
6.2.3	Période mensuelle (pointe PM de semaine).....	198
6.3	Autres indicateurs testés.....	205
6.3.1	Seuils variables.....	205

6.3.2	Corridors et ponts .....	208
6.4	Synthèse des contributions, perspectives et recommandations .....	212
6.4.1	Synthèse des indicateurs de congestion testés.....	212
6.4.2	Tirage aléatoires d'après des catégories physiques du réseau .....	214
6.4.3	Intégrer intensité et fiabilité .....	218
6.4.4	Échantillon et bases de données .....	220
6.4.5	Mesures directes et facteurs d'influence.....	221
CHAPITRE 7	ÉQUITÉ D'ACCÈS.....	222
7.1	Objectifs et méthodologie du chapitre .....	222
7.1.1	Problématique spécifique .....	222
7.1.2	Revue de littérature sur l'équité.....	226
7.1.3	Constats issus de la revue de littérature .....	234
7.1.4	Objectifs et contributions attendues .....	235
7.1.5	Méthodologie générale du chapitre.....	236
7.2	Calculs préalables : Mesures d'accessibilité .....	240
7.2.1	Indicateur de présence des réseaux de transport (#1).....	241
7.2.2	Indice du nombre d'options de transport (#3).....	245
7.2.3	Indicateur d'intensité de service (#2) .....	246
7.2.4	Indice d'intensité des options de transport (#4) .....	248
7.3	Exemple de calculs spécifiques à chaque segmentation de population .....	250
7.3.1	Résultats préalables : distribution spatiale de la population .....	250
7.3.2	Résultats préalables : test Kolmogorov-Smirnov.....	251
7.3.3	Résultats : mesures d'équité d'accès.....	253
7.4	Synthèse des résultats et analyse.....	261

7.4.1	Par réseau - Indices d'équité et distribution spatiale de la population .....	261
7.4.2	Indices d'équité et test statistique.....	264
7.4.3	Indice d'options de transport et réseaux de transport séparés .....	264
7.5	Synthèse des contributions, perspectives et recommandations .....	265
7.5.1	Synthèse des contributions .....	266
7.5.2	Limites et perspectives .....	268
CHAPITRE 8 CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....		275
8.1	Synthèse de l'étude.....	275
8.1.1	Constats sur l'évaluation de la mobilité durable .....	275
8.1.2	Résumé du projet de recherche .....	277
8.2	Synthèse des contributions .....	278
8.2.1	Contributions analytiques.....	278
8.2.2	Contributions méthodologiques .....	279
8.3	Limites et perspectives .....	281
8.3.1	Développement méthodologique des indicateurs.....	281
8.3.2	Développement du cadre d'évaluation .....	285
RÉFÉRENCES.....		288
ANNEXES .....		315

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Approches contrastantes en planification des transports (Traduit et adapté de Marshall, 2001 (Table 9.2) dans Banister, 2008 (Table 1)) .....	14
Tableau 1-2 : Diminution des émissions annuelles pour divers polluants atmosphériques et part des transports dans ces émissions. Compilation à partir de l'Inventaire national des rejets de polluants du Canada (Environnement Canada, 2010).....	26
Tableau 1-3 : Définitions d'un indicateur (à partir de Gudmundsson, 2003; Mardsen, Kelly, & Snell, 2006; Sustainable Transportation Indicators Subcommittee, 2009) .....	39
Tableau 1-4 : Enjeux des transports durable (traduit de Litman & Burwell, 2006).....	44
Tableau 1-5 : Particularités de différents systèmes d'indicateurs de transport durable.....	51
Tableau 3-1 : Tableau des thèmes regroupant les enjeux de la mobilité durable (A - Automobile, TC - Transport en commun, M - Marche, V – Vélo, Tous - Les quatre modes) .....	110
Tableau 3-2 : Tableau des thèmes regroupant les paramètres de mobilité liés aux enjeux environnementaux, sociaux et économiques de la mobilité.....	113
Tableau 3-3 : Exemple textuel sur la diminution de la consommation d'énergie des véhicules (Mode Auto).....	115
Tableau 3-4 : Catégorisation des interventions possibles, avec quelques exemples pour différents modes de transport .....	123
Tableau 4-1 : Indicateurs proposés (D pour lien direct, 0 à 2 pour le niveau du lien indirect d'après le <i>Cercle de causalité</i> ).....	140
Tableau 4-2 (suite): Indicateurs proposés (D pour lien direct, 0 à 2 pour le niveau du lien indirect d'après le <i>Cercle de causalité</i> ).....	141
Tableau 4-3 : Synthèse de l'applicabilité des indicateurs proposés (modes, approches et désagrégation nécessaire).....	145
Tableau 4-4 : Indicateurs traditionnels de mobilité impliqués dans l'estimation des indicateurs proposés.....	148

Tableau 4-5 (suite) : Indicateurs traditionnels de mobilité impliqués dans l'estimation des indicateurs proposés .....	149
Tableau 5-1 : Consommation d'essence pour différents véhicules .....	156
Tableau 5-2 : Capacité et longueur d'automobiles .....	163
Tableau 5-3 : Capacité et longueur des véhicules de transport en commun .....	163
Tableau 5-4 : Vitesse et longueur occupées par les piétons et cyclistes .....	164
Tableau 6-1 : Mesures de base des indicateurs de congestion .....	176
Tableau 6-2 : Indicateurs d'intensité de la congestion basés sur les vitesses ou les temps de parcours (T : temps, réf : référence qui correspond à l'écoulement libre ou à ce qui est jugé acceptable).....	178
Tableau 6-3 : Résultats du test de Shapiro-Wilk, par type de jour.....	188
Tableau 6-4 : Résultats des tests de différence, par type de jour .....	190
Tableau 6-5 : Résultats du test de Shapiro-Wilk, par période horaire .....	194
Tableau 6-6 : Résultats des tests de différence, par période horaire .....	195
Tableau 6-7 : Résultats du test de Shapiro-Wilk, par mois (période de pointe PM).....	200
Tableau 6-8 : Résultats des tests de différence par rapport au mois de janvier, par mois (période de pointe PM).....	201
Tableau 6-9 : Résultats des tests de différences par rapport à la moyenne annuelle, par mois (période de pointe PM).....	202
Tableau 6-10 : Cas testés.....	209
Tableau 7-1 : Segments de population étudiés et postulats d'équité correspondants ( $\sqrt{\quad}$ : Population vulnérable à favoriser; = : Respecter l'égalité entre les deux populations).....	239
Tableau 7-2 : Données source utilisées pour estimer les mesures d'accès .....	240
Tableau 7-3 : Mesures d'accès estimées .....	241
Tableau 7-4 : Accès aux réseaux de transport aux domiciles des résidents de Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008).....	242

Tableau 7-5 : Exemple de résultats du test Kolmogorov-Smirnov pour chaque réseau de transport et chaque mesure d'accès (#2 à #4) (possession d'un permis de conduire).....	252
Tableau 7-6 : Indice de Gini pour les intensités de service, par groupe de population vulnérable (Gris : Vulnérables moins également distribués que les autres; Gras : Inverse).....	260
Tableau 7-7 : Synthèse des résultats des mesures d'équité d'accès ( <i>Groupe vulnérable en italique</i> ) .....	263

## LISTE DES FIGURES

Figure 0-1 : Structure du document.....	4
Figure 1-1 : Structure du chapitre « Contexte et état des connaissances » (Chapitre 1).....	6
Figure 1-2 : Rôle des indicateurs dans le processus de planification des transports (traduit de Zegras, 2006, adapté de Meyer & Miller, 2001).....	43
Figure 1-3 : Indicateurs de développement durable et leur relation avec le processus décisionnel dans le cadre pression-état-réponse (traduit de Lee et al., 2008).....	45
Figure 1-4 : Typologie d'indicateurs reliés à la mobilité dans un cadre d'évaluation de la mobilité durable.....	57
Figure 1-5 : Les types d'usage des indicateurs .....	60
Figure 1-6 : Schéma explicatif d'une chaîne de causalité (traduit et adapté de C. Morency & Demers, 2012).....	62
Figure 1-7 : Schéma explicatif d'une chaîne de causalité (traduit de Joumard et al., 2011).....	62
Figure 1-8 : Exemple d'arbre à problèmes, appliqué au choléra (traduit de Overseas Development Institute, 2009) .....	64
Figure 1-9 : Liens entre la forme urbaine et les transports durables (traduit de J. A. Black et al., 2002).....	65
Figure 1-10 : Cycle rétroactif de l'aménagement et des transports (Wegener, 2004) .....	66
Figure 1-11 : Cadre d'analyse des transports durables appliqué aux personnes (traduit de Richardson, 2005) .....	67
Figure 1-12 : Schéma explicatif des types de chaînes de causalité.....	70
Figure 1-13 : Causalités multisectorielles, utilisation de proxy et hypothèses simplificatrices.....	72
Figure 2-1 : Structure du chapitre « Contributions visées et méthodologie » (Chapitre 2) .....	73
Figure 2-2 : Méthodologie générale : étapes de réalisation du projet de recherche.....	77
Figure 3-1 : Structure du chapitre 3 « Cadre d'évaluation de la mobilité durable ».....	80
Figure 3-2 : Cadre d'évaluation de la mobilité durable, vue d'ensemble .....	84

Figure 3-3 : La Pieuvre, schéma statique des enjeux de la mobilité durable .....	85
Figure 3-4 : Dimension environnement de la <i>Pieuvre</i> .....	87
Figure 3-5 : Dimension société de la <i>Pieuvre</i> .....	88
Figure 3-6 : Dimension économie de la <i>Pieuvre</i> .....	89
Figure 3-7 : Le <i>Cercle de causalité</i> initial, partie supérieure.....	94
Figure 3-8 : Le <i>Cercle de causalité</i> , explication des flèches .....	96
Figure 3-9 : Le <i>Cercle de causalité</i> , affichage de toutes les relations de causalité.....	97
Figure 3-10 : Chaîne de causalité sur la réalisation d'activités et le temps disponible (D1).....	98
Figure 3-11 : Chaînes de causalité sur la consommation d'énergie et les émissions de polluants et de gaz à effet de serre (D2) .....	100
Figure 3-12 : Chaînes de causalité sur l'activité physique et le développement de la communauté (D3) .....	101
Figure 3-13 : Chaînes de causalité sur les îlots de chaleur et l'espace au sol (D4) .....	102
Figure 3-14 : Chaînes de causalité sur les frais variables et fixes d'utilisation d'un mode de transport (D5) .....	103
Figure 3-15 : Chaîne de causalité sur les coûts collectifs (D6).....	103
Figure 3-16 : Chaîne de causalité sur l'accessibilité et l'attractivité (D7) .....	105
Figure 3-17 : Chaîne de causalité sur la sécurité (D8) .....	106
Figure 3-18 : Chaînes de causalité sur la vitesse (D9) .....	107
Figure 3-19 : Niveau hiérarchique 0 : Exemple textuel sur la diminution de la consommation d'énergie des véhicules (Mode Auto) .....	117
Figure 3-20 : Niveau hiérarchique 1 : Exemple textuel sur la diminution de la consommation d'énergie des véhicules (Mode Auto) .....	118
Figure 3-21 : Niveau hiérarchique 2 : Exemple textuel sur la diminution de la consommation d'énergie des véhicules (Mode Auto) .....	119
Figure 3-22 : Exemple de boucle infinie avec des effets contradictoires.....	121

Figure 3-23 : Représentation de la vue d'ensemble des cercles de causalité intégrant le transfert modal.....	131
Figure 3-24: Schéma relationnel simplifié de la version à terme du cadre d'évaluation de la mobilité durable.....	134
Figure 4-1 : Structure du chapitre « Boîte à outils – Proposition d'indicateurs » (Ch. 4) .....	136
Figure 5-1 : Structure du chapitre « Taux de consommation d'essence et capacité d'une voie de circulation » (Chapitre 4) .....	151
Figure 5-2 : Équivalence en matière de consommation d'essence par passager-kilomètre, entre différents autobus et véhicules privés .....	158
Figure 5-3 : Passagers requis dans un autobus standard pour égaler la consommation des passagers d'une automobile .....	159
Figure 5-4 : Débit et capacité d'une voie de circulation automobile .....	165
Figure 5-5 : Débit de personnes pour les véhicules de transport en commun selon l'intervalle de passage .....	166
Figure 5-6 : Débit de personnes pour les piétons et les cyclistes selon la longueur allouée.....	167
Figure 5-7 : Capacité d'une voie de 2,5 m de largeur par type de véhicule.....	169
Figure 6-1 : Structure du chapitre 5 « Congestion » .....	172
Figure 6-2 : Méthodologie générale du chapitre 5 .....	181
Figure 6-3 : Densité de points GPS issus des véhicules de Communauto sur le réseau supérieur dans la région de Montréal (janvier à novembre 2010) .....	183
Figure 6-4 : Distributions des ratios des vitesses par type de jour .....	189
Figure 6-5 : Indicateurs d'intensité de la congestion par type de jour.....	191
Figure 6-6 : Distributions des ratios des vitesses par période horaire.....	193
Figure 6-7 : Indicateurs de congestion, par période horaire d'une journée de semaine .....	197
Figure 6-8 : Distribution des ratios des vitesses, par mois en pointe PM de semaine .....	199
Figure 6-9 : Indicateurs de congestion, par mois (pointe PM de semaine).....	204

Figure 6-10 : Indicateur de part des tronçons par rapport à deux seuils fixés selon la moyenne annuelle, par type de jour et par période horaire. ....	206
Figure 6-11 : Indicateur de part des tronçons par rapport à deux seuils fixés selon la moyenne annuelle, par mois et par période horaire. ....	207
Figure 6-12 : Cartographie des quatre sélections spatiales testées.....	209
Figure 6-13 : Résultats des quatre cas testés .....	211
Figure 6-14 : Moyenne des ratios des vitesses selon les catégories physiques (tous les tronçons avec au moins dix observations sur l'année pour la période horaire étudiée) .....	216
Figure 6-15 : Moyenne des ratios des vitesses par catégorie physique (tronçons aléatoires parmi ceux avec au moins dix observations sur l'année pour la période de pointe PM).....	217
Figure 6-16 : Neuf catégories (cadrans) déterminées en fonction du niveau des conditions de circulation et de la variabilité de ces dernières. ....	219
Figure 6-17 : Carte des tronçons autoroutiers par cadran d'intensité et de fiabilité de la congestion.....	220
Figure 7-1 : Structure du chapitre « Équité d'accès » (Chapitre 6) .....	223
Figure 7-2 : Méthodologie générale sur l'équité d'accès .....	237
Figure 7-3 : Cartographies de la présence de chacun des réseaux de transport aux domiciles des résidents de l'Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008).....	243
Figure 7-4 : Arborescence de la présence des réseaux de transport à proximité des domiciles des résidents de l'Île de Montréal (pourcentage du total, domiciles tirés de l'EOD 2008).....	244
Figure 7-5 : Cartographie du nombre d'options de transport aux domiciles des résidents de l'Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008) .....	245
Figure 7-6 : Cartographie de l'intensité de service des réseaux de transport aux domiciles des résidents de l'Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008).....	247
Figure 7-7 : Schéma explicatif des catégories d'intensité de service basées sur les quartiles.....	249
Figure 7-8 : Cartographie de l'indice d'intensité des options de transport aux domiciles des résidents de l'Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008).....	250

Figure 7-9 : Exemple de parts de population ayant accès aux réseaux de transport (possession d'un permis de conduire).....	254
Figure 7-10 : Exemple de distribution cumulée de la population en fonction de l'intensité de service du transport en commun (possession d'un permis de conduire) .....	255
Figure 7-11 : Exemple de distribution de la population selon l'indice du nombre d'options de transport (possession d'un permis de conduire) .....	256
Figure 7-12 : Ratio des parts de population vulnérable sur les parts de population autre, selon l'indice du nombre d'options de transport .....	257
Figure 7-13 : Ratio des parts de population vulnérable sur les parts de population autre, selon l'indice d'intensité des options de transport.....	258
Figure 7-14 : Exemple sur la courbe de Lorenz et du calcul de l'indice de Gini (intensité de service du transport en commun, personnes avec ou sans permis de conduire) .....	259
Figure 7-15 : Passages-arrêts du bus et du métro à 16h, 19h et 22h sur semaine (Mai 2012) dans un rayon de 500 m autour des domiciles des ménages (domiciles tirés de l'EOD 2008).....	269
Figure 7-16 : Surface accessible en 30 min de transport en commun à partir de l'hôpital Notre-Dame (Calculateur de trajet basé sur l'algorithme de Dibbelt et al., 2013).....	271
Figure 7-17 : Répartition des heures de départ des déplacements selon le segment de population .....	272
Figure 7-18 : Cadrans permettant de localiser les endroits qui pourraient améliorer l'équité de distribution des adolescents par rapport au transport en commun .....	274
Figure 8-1 : Structure du chapitre 8 « Conclusion et perspectives ».....	275

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACTU	Association canadienne des transports urbains
AEE	Agence européenne de l'environnement
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie
AMT	Agence métropolitaine de transport
ASDCM	Association des sociétés de développement commercial de Montréal
ATUQ	Association du transport urbain du Québec
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
CAA	Association canadienne des automobilistes
CCMM	Chambre de commerce du Montréal métropolitain
CERTU	Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques
CMED	Commission mondiale sur l'environnement et le développement
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
CTD	Centre pour un transport durable
COV	Composé organique volatil
ELASTIC	Evaluative and Logical Approach to Sustainable Transport Indicator Compilation
EPA	Environmental Protection Agency
EOD	Enquête Origine-Destination
FHWA	Federation Highway administration
GES	Gaz à effet de serre
GPS	Global Positioning System
GTFS	General Transit Feed Specification
HAM	Hydrocarbure aromatique monocyclique

HAP	Hydrocarbure aromatique polycyclique
INRETS	Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité
IQA	Indice de la qualité de l'air
ISQ	Institut de la statistique du Québec
I_SUM	Index of Sustainable Urban Mobility
LET	Laboratoire d'économie des transports
LSS	Localized Sustainability Score
MNRFP	Ministère des ressources naturelles et de la faune
MDDEP	Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs
MRC	Municipalité régionale de comté
MTI	Mineta transportation institute
MTQ	Ministère des transports du Québec
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
ONU	Organisation des Nations Unies
PIB	Produit intérieur brut
PM	Particules
PROPOLIS	Planning and Research Of Policies Land use and transport for Increasing urban Sustainability
SAAQ	Société de l'assurance automobile du Québec
SEM	Structural equation modeling
SILENT	Sustainable Infrastructure, Land-use, Environment and Transport Model
SIMBAD	Simuler les Mobilités pour une Agglomération Durable
STL	Société de transport de Laval
STM	Société de transport de Montréal
STPI	Sustainable Transportation Performance Indicators

STPP	Surface Transportation Policy Project
SUSTRANS	Sustainable transport index
SUTRA	Sustainable Urban Transportation
TERM	Transport and Environment Reporting Mechanism
TOD	Transit-oriented development ou aires de développement orientées vers le transport en commun
TTI	Texas Transportation Institute
UMQ	Union des municipalités du Québec
VTPI	Victoria Transport Policy Institute

**LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A	LIENS DE CAUSALITÉ .....	316
ANNEXE B	RÉFÉRENCES DES CHÂÎNES DE CAUSALITÉ.....	327
ANNEXE C	FICHES MÉTHODOLOGIQUES DES INDICATEURS PROPOSÉS.....	331
ANNEXE D	INDICATEURS DE CONGESTION.....	378
ANNEXE E	DISTRIBUTION SPATIALE DE LA POPULATION.....	382
ANNEXE F	RÉSULTATS DU TEST KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	391
ANNEXE G	MESURES D'ÉQUITÉ D'ACCÈS .....	400

## INTRODUCTION

Dans l'histoire de l'humanité, nombre de sociétés sont devenues prospères en adaptant leurs techniques à leur milieu de vie et aux changements qui y surviennent, ainsi qu'en jumelant leurs forces de ressources et de techniques à celles de leurs voisins. Mais nombre de sociétés ont aussi été déçues suite à d'inefficaces solutions apportées à la dégradation de leur environnement. Cette dégradation peut être causée par un changement climatique, qui se caractérise notamment par une modification du climat ou par une surexploitation du milieu de vie (Diamond, 2009).

À notre époque où le développement technologique s'accélère, où la mondialisation favorise les échanges commerciaux mais aussi les dépendances à d'autres sociétés, où la démographie sans cesse croissante accentue les effets néfastes sur l'environnement, l'humanité fait face à un enjeu majeur : celui de perdurer avec un niveau de vie supérieur, tout en étant limité par l'écosystème qu'est la Terre. La prise de conscience de cette problématique passe inévitablement par la responsabilisation sociale, économique et environnementale qui, depuis quelques décennies, est portée par le concept de développement durable.

En vue de responsabiliser les décisions, la volonté politique actuelle consiste à soumettre les multiples domaines de l'activité humaine à une évaluation sous l'angle du développement durable. Les transports ne font pas exception et s'inscrivent dans cette mouvance. En effet, la mobilité est une composante indissociable de l'activité et de l'existence humaine. Essentielle, elle doit être planifiée afin de répondre de façon appropriée aux besoins, essentiels ou non, de chacun. Toutefois, elle engendre de nombreux impacts négatifs sur l'environnement, la société et l'économie.

Cette aspiration de responsabilisation du secteur des transports est couramment appelée « mobilité durable ». L'intégration de ce concept génère des changements dans les processus traditionnels d'évaluation des projets de transport. Au-delà de la mesure de la mobilité, la mobilité durable implique de mesurer également ses effets bénéfiques et indésirables. Or, cette évaluation soulève plusieurs enjeux cruciaux ayant trait aux outils et aux indicateurs. À la fois le choix des indicateurs et de leur méthodologie d'estimation fait face à de nombreux défis. Par exemple, les phénomènes à mesurer sont multiples, multidisciplinaires, variables dans l'espace et dans le temps, et souvent basés sur des notions subjectives ou qualitatives.

Cette étude vise à contribuer à mieux outiller les planificateurs en transport afin qu'ils puissent mieux répondre aux nouvelles exigences d'évaluation et tendre vers une certaine standardisation de cette évaluation. Ultiment, cette recherche a pour but de contribuer à développer un outil d'aide à la décision pour la mesure de la mobilité durable, en identifiant systématiquement les indicateurs et en proposant des méthodologies d'estimation appropriées. Le caractère adaptatif de cet outil serait fonction du projet envisagé et des besoins du planificateur. Les objectifs de cette recherche sont donc liés au développement de cet outil, et s'articulent autour de défis à la fois conceptuels et méthodologiques. Les défis conceptuels se regroupent en deux catégories.

1. Clarifier le concept de mobilité durable :

- conduire une réflexion sur le rôle de la durabilité en transport et sur les outils voulant intégrer ce concept, ainsi que sur leur incidence au sein du processus de planification en transport;
- analyser comment le développement durable s'applique à la mobilité et identifier ce qui définit la mobilité durable.

2. Évaluer la mobilité durable :

- examiner les possibilités de formaliser et d'organiser les indicateurs;
- mettre en lumière les défis méthodologiques reliés à l'estimation d'indicateurs de mobilité durable, notamment leur capacité à représenter un phénomène complexe.

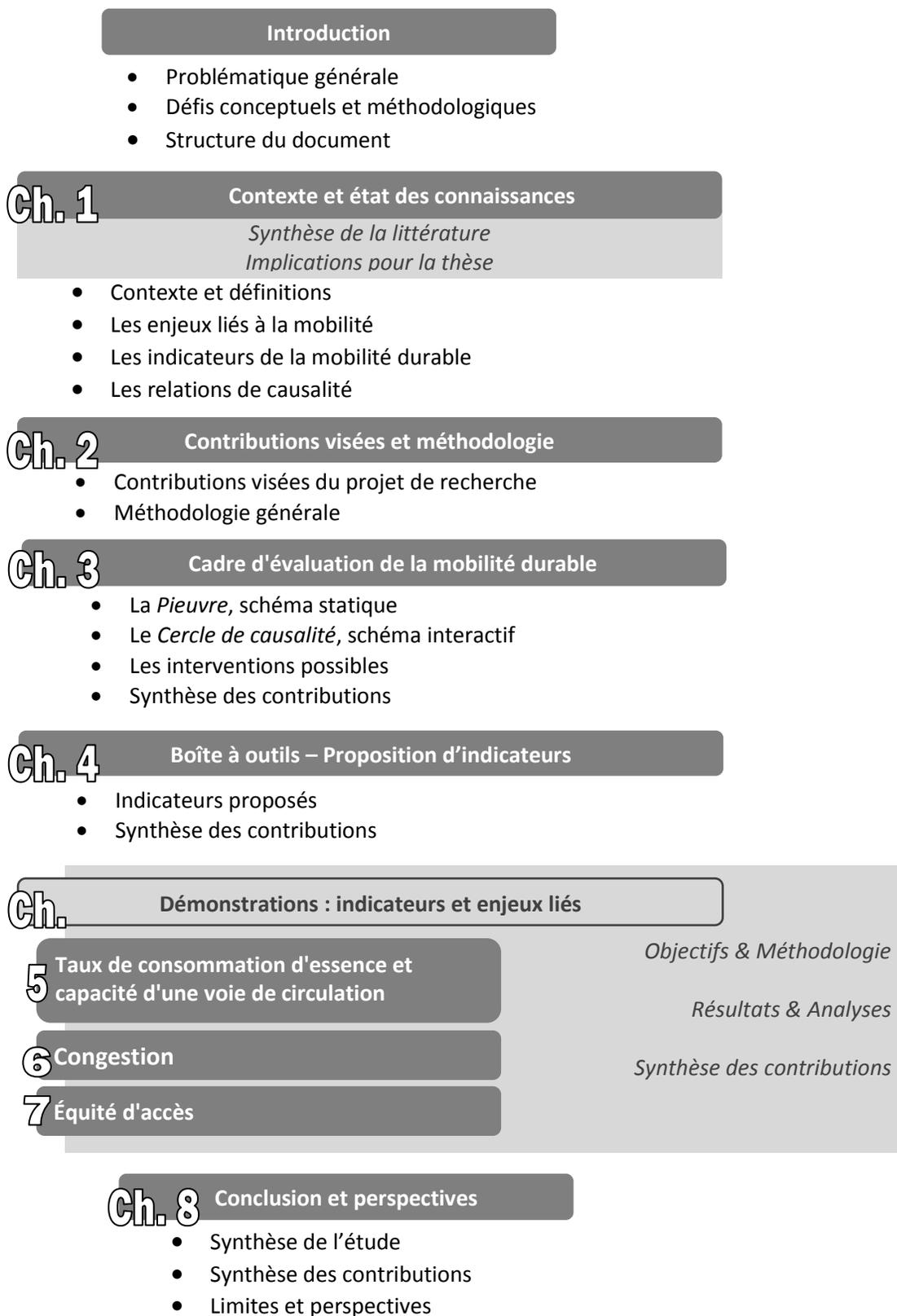
Quant aux défis méthodologiques, ils consistent à relever les difficultés techniques de l'application des défis de substance précédemment identifiés.

3. Organiser de manière synthétisée et utile pour les planificateurs en transport le concept de mobilité durable, en incluant les interventions possibles, les caractéristiques de la demande et de l'offre de transport, les impacts et les indicateurs.
4. Valoriser et utiliser conjointement les données issues de bases de données variées, pour la région de Montréal, et ce, pour le développement méthodologique d'indicateurs en particulier.
5. Développer et tester certaines méthodologies d'estimation d'indicateurs, inspirées au besoin d'indices d'autres disciplines.

La Figure 0-1 illustre les différents chapitres du document de thèse, divisé en huit chapitres. Le premier chapitre contient **le contexte, l'état des connaissances et les principaux constats** en ce qui a trait :

- 1) aux **définitions** et aux visions concernant le **développement durable** et la **mobilité durable**;
- 2) aux **impacts** de la mobilité sur l'environnement, la société et l'économie;
- 3) à la sélection, à la typologie et au rôle des **indicateurs** en général et plus spécifiquement en développement durable, ainsi qu'aux systèmes d'indicateurs et aux indices existants pour évaluer la mobilité durable; et
- 4) à l'utilité et aux représentations des **relations de causalité** entre les impacts, mais aussi entre les actions et leurs impacts.

Le second chapitre présente les contributions visées par ce projet de recherche et la méthodologie générale. Les chapitres 3 à 7 regroupent les résultats et les analyses de la recherche. D'abord, les chapitres 3 et 4 proposent un **cadre d'évaluation de la mobilité durable** sous forme d'outil interactif relié à un **système d'indicateurs**. Les chapitres 5 à 7 contribuent au développement méthodologique d'indicateurs, et ce, concernant différentes thématiques reliées à la mobilité durable et au système d'indicateurs proposé. Enfin, le rapport est clos par une conclusion résumant les contributions, les limites et les perspectives générales du projet de recherche.



**Figure 0-1 : Structure du document**

## CHAPITRE 1 CONTEXTE ET ÉTAT DES CONNAISSANCES

Ce chapitre présente une mise en contexte suivie d'une synthèse de l'état des connaissances concernant diverses notions en lien avec l'opérationnalisation de la mobilité durable. Ce chapitre sur l'état des connaissances met en place les objectifs et la méthodologie générale du projet de recherche présentés au chapitre 2.

Les différents éléments de revue de littérature abordée, montrés à la Figure 1-1, constituent les sections principales de ce chapitre. Tout d'abord, la synthèse des **définitions et des visions du développement durable et de la mobilité durable** sert d'assise au présent travail et permet d'identifier plusieurs défis généraux liés au concept de mobilité durable. Ensuite, les **enjeux influencés par la mobilité** sont recensés de façon à refléter la vaste étendue des disciplines touchées.

Puis, en vue de développer des indicateurs, les principes de sélection, la typologie et le **rôle des indicateurs** sont passés en revue. Il est aussi question des **systèmes d'indicateurs existants** pour évaluer la mobilité durable. Finalement, la multiplicité des enjeux abordés et la complexité de ces derniers rend nécessaire la prise en compte **des relations de causalité**. Cette notion est donc définie.

Chacune de ces quatre notions est suivie d'un ou plusieurs constats qui orientent le projet de recherche. Ces réflexions présentent les limites et les lacunes des connaissances, et discutent de leurs répercussions sur le projet de recherche.

- 
- 1.1** Contexte et définitions
    - Mobilité
    - Développement durable
    - Mobilité durable
    - Synthèse et implications pour la thèse
  
  - 1.2** Les enjeux liés à la mobilité
    - Énoncé des enjeux
      - La réalisation d'activités et l'accessibilité
      - Le développement régional
      - La pollution
      - L'occupation du sol
      - L'utilisation d'énergie et de ressources
      - La sécurité
      - La sédentarité
      - Les coûts et retombées financières
      - Le développement de soi et de la communauté
      - La justice sociale
      - La gouvernance
    - Synthèse et implications pour la thèse
  
  - 1.3** Les indicateurs de mobilité durable
    - Rôle des indicateurs
    - Classification des indicateurs de mobilité durable
    - Autres notions
    - Sélection des indicateurs
    - Systèmes d'indicateurs existants
    - Synthèse et implications pour la thèse
  
  - 1.4** Les relations de causalité
    - Concept de base et objectifs généraux
    - Utilité pour les planificateurs
    - Différentes approches et exemples
    - Défis et problématiques
    - Synthèse et implications pour la thèse

**Figure 1-1 : Structure du chapitre « Contexte et état des connaissances » (Chapitre 1)**

## 1.1 Contexte et définitions

*Concernant le projet d'inversion de l'oléoduc 9B d'Enbridge*

*Propos d'Amir Khadir, député de Québec Solidaire :*

*« il est absolument renversant » d'entendre les péquistes « prétendre qu'on peut éventuellement contribuer et faciliter l'exploitation des sables bitumineux et que ce soit compatible avec une vision de développement durable »*

*Réponse de Scott McKay, député péquiste :*

*Amir Khadir n'a pas « compris c'est quoi, le développement durable ».*

*Le Devoir, 27 novembre 2013*

Pour cadrer ce projet de recherche, il convient de présenter le contexte dans lequel a émergé le concept de mobilité durable, les définitions sur lesquelles il se base et les enjeux d'évaluation qu'il soulève. La mobilité durable est fondée sur deux concepts-clefs : la mobilité et le développement durable. Ces derniers sont donc présentés et sont suivis par celui de mobilité durable.

### 1.1.1 Mobilité

Cette section rappelle l'importance de la mobilité dans notre société, la définit et présente ses implications dans le projet de recherche.

Selon les Éditions Larousse (s. d.), la mobilité est la « propriété [...] de ce qui peut se mouvoir ou être mû [...] ». Le transport est l'« action [...] de transporter [...] d'un lieu dans un autre ». Ainsi, **la mobilité représente la fonction et la capacité pour une personne (ou un objet) de se déplacer (ou d'être mû)**; le transport représente plutôt l'action de se déplacer. La mobilité est légèrement moins restrictive (Union des municipalités du Québec [UMQ], 2008), car elle n'implique pas nécessairement la réalisation d'un déplacement et ne fait qu'en représenter la possibilité. Puisque les deux termes sont grandement liés, viser la durabilité de l'un implique la durabilité de l'autre. Ainsi, **les termes « mobilité durable » et « transport durable » seront considérés équivalents dans le présent texte.**

**La mobilité est une activité essentielle aidant à combler les besoins humains.** Ces derniers sont variés : besoins primaires ou vitaux (manger, dormir, etc.), secondaires ou sociaux (se laver, se vêtir, lire, etc.) et tertiaires ou personnels (communiquer, se divertir, etc.) (Puel, 1989). La mobilité, en permettant de se rendre en un lieu approprié, contribue à répondre à ces besoins. Par

exemple, les services auxquels les individus ont recours sont localisés en des lieux auxquels il faut accéder physiquement et qui impliquent des déplacements de personnes et de marchandises. On pourrait donc s'avancer sur le fait que **la mobilité devient elle-même un besoin**, à partir du moment où elle est nécessaire à l'atteinte d'un besoin (Martens, Golub, & Robinson, 2012). Paradoxalement, certains effets néfastes des transports peuvent également nuire à certains besoins, comme le bruit peut nuire au sommeil (Michaud, Fidell, Pearsons, Campbell, & Keith, 2007).

**La mobilité est un enjeu commun à toutes les époques de l'humanité.** Ce sont plutôt **les connaissances et les technologies qui changent, influençant par le fait même les moyens de transport, les besoins eux-mêmes, les façons de les combler et les lieux à atteindre.** L'avancement des connaissances a effectivement révolutionné les moyens de transport. Par exemple, leur vitesse croissante permet d'atteindre plus rapidement des lieux plus éloignés. L'individu se crée donc de nouvelles attentes, désirs ou besoins en fonction des nouveaux moyens de transport et des nouvelles destinations qui lui sont offerts. Un autre exemple est l'utilisation d'Internet pour réaliser des achats, qui substitue des déplacements individuels par le transport de marchandises. Ajoutons que, puisque les comportements de mobilité changent, les impacts de ces comportements varient également.

Également, l'attention que l'on porte à la mobilité est renforcée par une présence élevée dans les médias et par l'utilisation de ce domaine comme un enjeu électoral. Une **part importante du budget national est investie dans les réseaux de transport** (Gagné & Haarman, 2011). Tous les individus se déplacent pour leurs propres besoins : ils se sentent concernés par les choix de développement des systèmes de transport.

Toutes ces raisons expliquent l'importance de la mobilité dans la société. La mobilité doit constamment s'adapter et s'intégrer aux nouvelles visions de l'avenir. Cela justifie donc la nécessité de soumettre la mobilité aux conceptions sociales, en vigueur ou en devenir. Et, actuellement, ces conceptions sociales s'articulent autour du développement durable.

### 1.1.2 Développement durable

Cette section rappelle le contexte et la raison pour laquelle le développement durable a émergé à la fin du XXe siècle. Ces explications mènent aux définitions de la durabilité et à leurs incidences sur le projet de recherche.

Une majorité d'auteurs s'accordent sur le fait que le développement durable correspond à la recherche d'un nouveau modèle de développement (Lauriol, 2004). Trois constats principaux et interdépendants ont participé à la **réflexion sur l'ancien modèle de développement**.

**(1) La montée de l'intérêt pour les générations futures.** Les préoccupations envers ce qui sera légué aux générations futures, soit le patrimoine naturel et culturel, s'accroissent dans la seconde moitié du XXe siècle (Gautier & Valluy, 1998). Le désir d'inclusion des générations futures peut être observé dans différents domaines, par exemple la gestion de la dette publique en passant par les systèmes de protection sociale ou la protection de l'environnement (Gautier & Valluy, 1998).

**(2) La mondialisation des enjeux.** Les choix politiques des États et leurs impacts sur l'environnement et les sociétés ont des répercussions plus larges et débordent des frontières de ces États, ayant même des effets jusque sur l'écosystème planétaire entier (Gautier & Valluy, 1998). Il en résulte donc une prise de conscience de la relation entre développement et environnement, ainsi que des limites de la croissance : l'accumulation de richesses économiques semble en contradiction avec les ressources naturelles. Plusieurs cherchent une partie de la solution à cette contradiction en distinguant la croissance, quantitative, et le développement, qualitatif. Le Club de Rome, dont le premier rapport sort en 1972 (Meadows, Meadows, Randers, & Behrens, 1972), met d'ailleurs de l'avant la problématique entre croissance démographique, croissance économique et pression sur l'environnement.

**(3) La prise de conscience de la relation entre développement et environnement.** La dégradation de l'environnement et le maintien des inégalités sociales « constituent les anomalies qui condamnent les anciennes approches et justifient l'appel à un nouveau paradigme » (Gendron & Revéret, 2000). Désormais, l'enjeu s'articule autour de la recherche « des modalités et des usages de la croissance qui rendent compatibles le progrès social et la gestion saine des ressources et du milieu » (Sachs, 1980).

C'est dans cette optique que les nations s'organisent. L'Organisation des Nations Unies (ONU) tente de rapprocher les sphères écologiques et économiques et lance la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (CMED). Le rapport Brundtland (CMED, 1987) en est issu; il énonce le concept de développement durable. C'est seulement en 1992, à Rio de Janeiro lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, alors que le rapport sert de base, que le concept se fait connaître. En découlent notamment la Déclaration de Rio ainsi que deux conventions : une sur le changement climatique et l'autre sur la diversité biologique, qui sont tous deux des enjeux mondiaux. La volonté d'atteindre les objectifs établis dans ces documents se concrétise par l'Agenda 21, un programme d'actions à long terme. Une vingtaine d'années plus tard, le développement durable est sur toutes les lèvres et au centre de multiples discussions.

La définition la plus couramment citée provient du rapport Brundtland (CMED, 1987), selon laquelle le développement durable permet de « **répondre aux besoins du présent sans compromettre les générations futures de répondre aux leurs.** » Très large, cette définition laisse place à différentes interprétations :

**(A) Fondé sur trois domaines, ou piliers : environnement, société et économie.** Il s'agit d'une vision sectorielle de la durabilité, avec la notion de développement très peu présente. Ainsi, certains parlent d'interactions, ou d'équilibre, entre les trois pôles : « comment les systèmes environnementaux, économiques et sociaux interagissent à leur avantage ou désavantage mutuel, et ce, pour différentes échelles spatiales d'intervention (Transportation Research Board, 1997). »

**(B) Fondé sur le capital** (capitaux financier, manufacturier, naturel et humain). L'accent y est mis sur l'utilisation viable des ressources ou la transmission d'un stock agrégé de capital productif suffisant pour permettre aux générations futures d'avoir accès aux biens et services nécessaires à leur bien-être (Boulangier, 2004). En d'autres mots, la consommation ne devrait pas réduire le capital naturel à une vitesse plus rapide qu'il peut être remplacé par du capital humain durable et viable (Litman, 2007a). La notion d'espace environnemental est non loin de cette approche : elle part du fait qu'il existe une quantité limitée de ressources que l'on peut exploiter sans porter atteinte à la capacité de charge des écosystèmes (Hille, 1997). L'écoefficient, quant à elle, mesure l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles pour satisfaire les besoins

humains (Organisation de Coopération et de Développement Économiques [OCDE], 1997), notamment par l'analyse du cycle de vie de produits et services.

**(C) Fondé sur le bien-être.** Cette interprétation vise l'accroissement du bien-être pour le plus grand nombre possible d'êtres humains. L'approche est donc plus sociale, se basant sur la satisfaction ressentie et la capacité d'agir de la population. Notons comme exemple l'indice de développement humain. Dans cette optique, l'aspect de durabilité est plutôt laissé de côté (Boulanger, 2004).

Ces interprétations diverses témoignent de l'absence d'une vision commune causée par le **caractère flou et indéfini du concept développement durable** (Gendron & Revéret, 2000). Cette absence de balise a des **effets positifs** :

- **alimenter la discussion.** Marsden, Kimble, Nellthorp, & Kelly (2010) n'hésitent pas à qualifier de « débat vivant » la définition de développement durable et l'évaluation du progrès envers ce nouvel objectif;
- **favoriser l'innovation**, en développant des démarches différentes (Bouni, 1998);
- **favoriser l'appropriation locale.** Bien que le développement durable soit une initiative internationale, il requiert la participation des échelons inférieurs (Zuindeau, 2006). Les enjeux planétaires doivent être ramenés au niveau local, et ce, afin de susciter des actions concrètes de la part des acteurs décisionnels régionaux et locaux. Le contenu et les priorités du développement durable varient selon les différents contextes territoriaux (Zuindeau, 2006). L'intérêt accordé par un acteur à une préoccupation spécifique dépend entre autres de l'horizon et de l'incertitude du phénomène mesuré (Zegras, 2006);

et des **effets négatifs** :

- **engendrer des faiblesses et des insuffisances théoriques** (Lauriol, 2004). Elles se répercutent dans les développements méthodologiques d'indicateurs;
- **apporter de l'incertitude**, via la notion de générations futures (Vivien, 2003). En effet, on ne connaît ni leurs besoins ni leurs connaissances ni leurs intérêts. Leurs préoccupations étant inconnues, il est très difficile, voir impossible, de fixer des objectifs les reflétant. Il peut ainsi résulter des contradictions entre la volonté actuelle de hausser le niveau de vie et les contraintes de ressources naturelles limitées par les besoins incertains des générations futures. C'est pour réduire ces contradictions que l'on parle souvent

d'atteinte d'un équilibre entre les trois dimensions du développement durable. Puisque cet équilibre doit être atteint dans un futur qu'on ne peut définir, il est impossible de se le représenter avec précision.

Les discussions sur le développement durable ne sont plus centrées sur la précision de la définition, et qu'elles migrent plutôt vers la recherche d'une organisation de la décision propice à la construction de ce projet de société (Bouni, 1998). En somme, les principes émanant du développement durable, à retenir, sont :

- adopter une **vision à long terme**. Le développement durable prône l'autosuffisance et la maximisation de l'efficacité des ressources (Litman, 2007a);
- considérer à la fois les **volets humains, économiques et écologiques**. Prendre les bonnes décisions de gestion du territoire, de développement de la recherche (technologique), la compréhension du milieu de vie, et ce, tout en réussissant dans le cadre économique actuel;
- plutôt qu'atteindre un niveau ultime de durabilité, **progresser vers la durabilité et la responsabilisation sociale**;
- tenir compte à la fois des **problématiques locales et globales** lors de la prise de décision.

En voulant opérationnaliser le développement durable, on s'engage à prendre en compte, selon les connaissances actuelles, les impacts des activités humaines sur les dimensions environnementales, sociales et économiques, et ce, de manière à prendre des décisions éclairées, en quête d'un perpétuel meilleur niveau de vie.

### 1.1.3 Mobilité durable

Cette section présente le contexte dans lequel s'inscrit le concept de mobilité durable, ses définitions et les nouvelles exigences qu'il fait naître pour les planificateurs.

La logique traditionnelle de planification des transports s'appelle « **Prévoir et fournir** » (« Predict and provide » en anglais) et a eu cours au courant du XXe siècle, avant les années 1990. Cette logique de planification des transports se base sur la prémisse que les demandes de mobilité et de circulation automobile sont croissantes; il faut donc en faire la prévision et y répondre en réalisant de nouvelles constructions routières (Vigar, 2000). Ni l'espace ni le budget ne sont des contraintes à ces augmentations de capacités routières (Evans, Guy, & Marvin, 2001),

d'autant plus qu'elles sont synonymes de compétitivité économique (Vigar, 2000) et de création de richesse (Guy & Marvin, 1999). L'objectif principal est de minimiser les temps de trajet (Banister, 2008) et d'enrayer la congestion, étant donné que le temps perdu en congestion est perçu comme une perte d'argent (Banister, 2008). Les indicateurs d'intérêts pour mesurer l'efficacité d'un système de transport sont les variables familières à l'ingénieur de circulation : la congestion (W. R. Black, 2010), le temps par déplacement, la vitesse moyenne, le temps total en transport pour une population, etc. (Koenig, 1974 dans Bonnafous & Masson, 2003).

Dans le milieu des années 1990, cette logique traditionnelle a été remise en question en raison de **deux constats principaux, renforcés par les prévisions de croissance de la circulation automobile suite à l'émancipation des femmes** (Goodwin, Hallett, Kenny, & Stokes, 1991 dans Vigar, 2000). Le premier constat est que **l'augmentation de capacité routière augmente la congestion**. Le second est que le budget autrefois alloué aux nouvelles constructions routières était de plus en plus grugé par **les coûts d'entretien des infrastructures routières** (Vigar, 2000). Nommée « **nouveau réalisme** », une nouvelle logique de planification des transports s'est installée autour du **concept de gestion de la demande** (Owens, 1995 dans Vigar, 2000). Elle met l'accent sur la fiabilité du système et la stabilisation des temps de parcours (Vigar, 2000).

Cette logique s'est vue appuyée par la montée, **simultanément, d'une prise de conscience des enjeux environnementaux** comme le bruit, la pollution de l'air et la consommation de pétrole engendrés par une surutilisation de l'automobile (Button, 1995 dans Vigar, 2000). Ce mouvement a pris d'autant plus d'ampleur du fait qu'il s'est appuyé sur les principes du développement durable (Barcelo, 1999). Alors que les recherches en durabilité se sont généralement concentrées sur la protection de l'environnement (Boschmann & Kwan, 2008), la dimension sociale du développement durable n'est entrée dans les débats que plus tard, au début du XXI<sup>e</sup> siècle. C'est ainsi que le nouveau paradigme guidant les planificateurs en transport est devenu celui de la « mobilité durable », issu à la fois de la logique de gestion de la demande et d'une prise en compte des impacts environnementaux et sociaux de la mobilité. Le Tableau 1-1 montre les contrastes entre l'approche traditionnelle en transport et l'approche de la mobilité durable (Marshall, 2001 dans Banister, 2008).

**Tableau 1-1 : Approches contrastantes en planification des transports (Traduit et adapté de Marshall, 2001 (Table 9.2) dans Banister, 2008 (Table 1))**

<b>Approche traditionnelle Ingénierie et planification des transports</b>	<b>Approche alternative Mobilité durable</b>
Mobilité	Accessibilité
Dimensions physiques	Dimensions sociales
Objectif principal centré sur la circulation, en particulier sur l'automobile	Objectif principal centré sur les personnes, à bord ou non d'un véhicule
Échelle régionale	Échelle locale
La rue est une route	La rue est un espace
Transport motorisé	Tous les modes de transport, selon une hiérarchie plaçant en haut les piétons et cyclistes et en bas les automobilistes
Prévision de circulation	Vision des villes
Approches modélisées	Développement et modélisation de scénarios
Évaluation économique	Analyse multicritère prenant en compte les préoccupations environnementales et sociales
Déplacement comme une demande dérivée	Déplacement comme une activité valorisée et comme une demande dérivée
Basé sur la demande	Basé sur la gestion
Hausser la vitesse de circulation	Ralentir la vitesse de circulation
Minimiser les temps de parcours	Temps de parcours raisonnables et fiables
Séparation des personnes et de la circulation	Intégration des personnes et de la circulation

Comblant les besoins et les désirs humains, la mobilité est le reflet d'un mode de vie. Ainsi, la mobilité durable s'inscrit comme un sous-ensemble essentiel à un mode de vie durable. D'ailleurs, Hardy (2011) affirme que les programmes politiques sur la durabilité doivent considérer un large éventail d'éléments sur la qualité de vie lorsqu'ils examinent la durabilité, et le transport n'est qu'une composante parmi les autres. Les définitions et visions de la mobilité durable sont généralement issues d'une tentative d'application du concept de développement durable à la mobilité ou aux transports. Les types de définitions sont mentionnées ci-après.

**(A) Définitions vagues.** On retrouve généralement les notions d'équité inter et intra générationnelles, ainsi que les trois dimensions : économie, environnement et société. W. R. Black (1996) calque ainsi la définition du rapport Brundtland (CMED, 1987) : la capacité de répondre aux besoins présents en transport sans compromettre la capacité des générations futures de répondre à leurs propres besoins. Certaines définitions demeurent ainsi particulièrement vagues, fidèles au caractère ambigu du développement durable. Giorgi (2003) fait ainsi un raccourci : « tout ce qui est en jeu dans les tentatives que l'on fait de nos jours pour rééquilibrer

les coûts et les avantages dans le secteur des transports ». Un autre exemple est celui du gouvernement suédois (Gudmundsson & Sorensen, 2011), qui affirme que l'objectif est d'assurer une offre de transport durable sur le long terme, socialement et économiquement efficiente, et ce, tant pour le public que pour l'industrie.

**(B) Définitions avec emphase** sur une dimension du développement durable en particulier. Par exemple, Boschmann & Kwan (2008) parlent d'un « transport urbain socialement durable » qui se définit comme un transport qui fournit un accès équitable aux opportunités urbaines, minimise l'exclusion sociale et améliore (ou à tout le moins ne diminue pas trop) la qualité de vie des individus.

**(C) Définitions précises.** Par exemple, Deakin (2001) définit le transport durable tel un transport qui répond aux besoins de mobilité et qui, en même temps, préserve et rehausse la santé humaine et celle de l'écosystème, le progrès économique et la justice sociale, et ce, pour le présent et le futur. Parfois même, la mobilité durable est réduite à quelques enjeux seulement. W.R. Black (2010) cantonne les transports durables à seulement cinq dimensions: le carburant comme ressource finie, les émissions néfastes pour l'environnement global, les émissions néfastes pour l'environnement local, les décès et la congestion. Verry & Nicolas (2005) généralisent en identifiant plutôt les éléments-clefs suivants : le besoin social de mobilité, la capacité d'accéder aux biens et aux services, le fonctionnement économique et finalement la préservation de l'environnement. Quant à Banister (2008), il relie directement l'approche de mobilité durable à des objectifs précis : réduire le besoin de déplacement (notamment par la substitution grâce aux technologies), encourager le changement vers des modes non motorisés, réduire la distance de trajet (par une augmentation de la densité des activités et de la mixité des usages) et encourager l'efficacité énergétique par l'innovation technologique.

**(D) Définition politiquement acceptée.** La définition proposée par le Centre pour un transport durable (CTD, 2005), basé à Toronto, est dans plusieurs cas celle qui sert de référence, notamment au Québec pour l'UMQ (2008) et pour le Ministère des transports du Québec (MTQ, 2013). Elle a également été reprise - et très légèrement modifiée - par les ministres responsables des transports de quinze états de l'Union européenne, ce qui confère à la définition une acceptation politique. Selon la définition originale du CTD, un système de transport durable est un système de transport qui :

1. permet aux individus et aux sociétés de satisfaire leurs principaux besoins d'accès et de développement d'une manière sécuritaire et compatible avec la santé des humains et des écosystèmes, de façon équitable entre les individus d'une génération et entre les générations;
2. est abordable, fonctionne efficacement, offre un choix de moyens de transport et soutient une économie dynamique; et
3. limite les émissions et les déchets à la capacité de la planète de les absorber, minimise la consommation de ressources non renouvelables, limite la consommation de ressources renouvelables dans le respect des principes de développement durable, réutilise et recycle ses composantes et minimise l'utilisation des terres et les émissions sonores.

Le CTD (2005) a également produit un rapport exhaustif résumant les définitions existantes sur la mobilité durable.

Cette nouvelle logique de mobilité durable est renforcée par l'arrivée de législation sur le développement durable. Au Québec, la **Loi sur le développement durable** a été adoptée en 2006. Son objectif est d'intégrer une culture de développement durable au sein de l'administration québécoise. Deux principaux documents découlent de cette loi :

- une Stratégie (Gouvernement du Québec, 2007), qui vise à améliorer la coordination des actions gouvernementales en matière de développement durable. Elle énonce des orientations dont certaines sont liées au développement d'indicateurs : (3) exposer les enjeux, orientations et axes d'intervention prioritaires et les objectifs mesurables; et (4) **prévoir les mécanismes et les moyens pour assurer le suivi des progrès** (Gouvernement du Québec, 2004). Ainsi, l'opérationnalisation du développement durable confronte les autorités, dont celles de transport, à de nouvelles exigences et justifie la nécessité de développer de nouveaux outils d'évaluation des politiques, plans, stratégies et projets. D'autres orientations de la Stratégie touchent les transports implicitement, par des enjeux de société comme les changements démographiques, l'aménagement et les inégalités sociales (Gouvernement du Québec, 2007).
- un Plan d'action (Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs [MDDEP], 2009), qui propose des objectifs gouvernementaux, ainsi que des objectifs organisationnels, d'actions et parfois de cibles, et ce, pour chaque orientation de la

Stratégie. Dans un document publié en 2012, certains indicateurs ont été définis et attribués à ces objectifs (Gouvernement du Québec, Institut de la Statistique du Québec [ISQ], & MDDEP, 2012).

La Loi sur le développement durable prévoit que **chaque ministère publie sa propre stratégie et son plan d'action** contenant ce qu'il entreprendra pour contribuer aux objectifs de la stratégie gouvernementale (Gouvernement du Québec, 2004). Les mécanismes prévus d'évaluation des ministères incluent la publication d'un **rapport annuel** faisant état des objectifs qu'il s'était fixés et des actions entreprises pour atteindre ces objectifs, à l'aide notamment d'indicateurs de suivi de mise en œuvre. Ainsi, différents organismes publics en transport doivent produire ces documents, tout en appuyant leur planification sur des indicateurs de mesure et des cibles quantifiées.

Face à ces exigences, le MTQ a donc élaboré ses propres Stratégie (2009c) et Plan d'action (2009a). Pour les aspects de planification, de gestion des réseaux et de gouvernance touchant les transports, ces documents proposent des orientations, objectifs et actions reliés à ceux du gouvernement, ainsi que des indicateurs de suivi et des cibles qui restent encore dans certains cas à déterminer ou à raffiner. Au MTQ, ce besoin d'indicateurs est d'autant plus important que le Vérificateur général du Québec (2009), se penchant sur les problématiques en transport à Montréal, fait des recommandations qui appellent au développement d'indicateurs, notamment :

- de terminer le processus menant au développement des indicateurs (3.118) et de mettre en place un mécanisme formel de suivi des résultats et des interventions (3.122); ainsi que
- d'évaluer systématiquement et de façon globale les effets des différents scénarios envisagés au moment de l'élaboration d'un plan de transport (3.106).

Le MTQ a récemment élaboré une Stratégie nationale de mobilité durable (MTQ, 2014). L'emphase est mise sur la mobilité des personnes en milieu rural et urbain, ainsi que les personnes à mobilité réduite. Elle intègre des notions d'aménagement du territoire, de gouvernance et de financement. Elle expose plusieurs volontés d'investissements en transport collectif.

En dehors de la Loi sur le développement durable, le Gouvernement du Québec publie d'autres documents sur des problématiques précises liées au développement durable et qui touchent plusieurs secteurs d'activités, dont celui des transports. Dans le Plan d'action 2006-2012 sur le Québec et les changements climatiques (Gouvernement du Québec, 2008), le gouvernement

identifie huit mesures sur vingt qui concernent les transports, dont quatre portent sur les marchandises. Concernant les systèmes de transport routier de marchandises, le MTQ a émis une politique spécifique, horizon 2009-2014, dont une des quatre orientations vise à favoriser l'efficacité de ce système dans une perspective de transport durable (MTQ, 2009b).

Également, la Stratégie énergétique du Québec 2006-2015 (Ministère des ressources naturelles et de la faune [MNRNF], 2006) priorise la réduction de la consommation de produits pétroliers comme action pour améliorer l'efficacité énergétique, et propose, pour ce faire, des mesures liées aux parcs de véhicules, à la conduite, à l'utilisation du transport en commun et du covoiturage. Dans cette optique, le Gouvernement du Québec (2011) a lancé son Plan d'action 2011-2020 sur les véhicules électriques qui, essentiellement, contient un résumé des mesures déjà en place et des projets prévus par l'État.

Dossier poussé par le Gouvernement du Québec et entré en vigueur en 2013, le marché du carbone est une mesure qui incite à des actions de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (MDDEP, 2002). Les entreprises assujetties au règlement, les municipalités, ou tout autre participant volontaire comme les sociétés de transport en commun, pourront intégrer ce nouveau marché.

De surcroît, les municipalités sont touchées par cet engagement envers la mobilité durable. Plusieurs d'entre elles intègrent également l'aménagement du territoire et la mobilité au sein du même plan. La Communauté métropolitaine de Montréal (CMM, 2011) a émis un Plan métropolitain d'aménagement et de développement. Ce dernier s'intéresse entre autres aux aires de développement orientées vers le transport en commun (TOD). Il touche également ce mode de transport lorsqu'il identifie les réseaux de transport comme des équipements structurant le milieu urbain (orientation 2). Quelques objectifs et critères sont identifiés. Aussi, la Ville de Laval, conjointement avec la Société de Transport de Laval (STL), a un Plan de mobilité durable (2011) qui intègre des objectifs d'aménagement du territoire. Sans indicateurs précis, il énonce toutefois des résultats attendus pour les interventions proposées. Souhaitant également intégrer les deux disciplines, la Ville de Longueuil (2013) élabore actuellement un plan de mobilité durable. Le diagnostic préliminaire de la vision stratégique du plan d'urbanisme (Ville de Longueuil, 2012b), qui est relié à cette démarche, identifie les objectifs principaux liés à la mobilité durable et les actions prioritaires. Pour l'instant, il ne propose ni cibles ni indicateurs. Dans la continuité de ces

travaux, la Ville de Longueuil (2012a) et la Ville de Laval (Ville de Laval, 2013) ont chacune lancé un projet de plan de mobilité active qui identifie certains principes et constats sur la marche et le vélo, ainsi que des objectifs associés à des pistes d'actions. Quant à la Ville de Montréal (2008), son Plan de transport datant de 2008 comporte des orientations et des projets, sans indicateur. Elle émet des rapports d'avancement annuels basés sur des indicateurs de moyen, ou de mise en œuvre. Elle prévoit faire le suivi des résultats à l'aide d'indicateurs de comportements de mobilité, estimés à partir des enquêtes Origine-Destination (EOD), qui sont quinquennales.

Plus généralement au Québec, l'UMQ aborde la question de mobilité durable dans plusieurs documents. D'abord, le Plan de mobilité et transport durables (UMQ, 2008) renferme un diagnostic de la situation, un rappel des principaux enjeux liés à la mobilité et les grandes orientations de l'UMQ associées à des actions. De surcroît, dans son plan d'action stratégique, l'UMQ (2010) plaide pour l'élaboration de plans territoriaux de mobilité durable. Finalement, le Livre blanc des municipalités aborde le besoin d'un rééquilibrage fiscal favorisant la mobilité durable (UMQ, 2012). Dans le cadre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques (Gouvernement du Québec, 2008), le MDDEP a également mis sur pied le programme Climat municipalités. Il a pour objectif de doter les territoires d'un inventaire des sources d'émissions de gaz à effet de serre (GES), afin qu'ils élaborent un plan d'action de réduction de ces émissions et un plan d'adaptation aux changements climatiques.

D'autres documents concernant la mobilité durable traitent plus spécifiquement de transport en commun. La Politique québécoise du transport collectif (MTQ, 2006) renferme les moyens retenus par le Ministère pour améliorer l'utilisation de ce mode. L'Agence métropolitaine de transport (AMT, 2011) a publié son plan stratégique de développement du transport collectif, vision an 2020. Elle y fixe des cibles ayant trait à la qualité de service, à la mobilité et au déploiement du réseau. La Société de transport de Montréal (STM, 2012a) a également émis un plan stratégique 2020, identifiant six axes prioritaires accompagnés de stratégies, de projets et d'indicateurs. Ces indicateurs ont généralement trait à la performance du réseau ou au financement, sauf dans le cas de l'axe visant à « faire du développement durable l'élément central de toutes les décisions » (STM, 2012a).

En somme, au Québec et particulièrement à Montréal, la recherche de systèmes de transport plus durables, la nécessité de suivi des nouvelles politiques et le besoin d'évaluation de différentes

interventions placent les indicateurs de développement durable au centre des préoccupations des planificateurs.

### 1.1.4 Synthèse et implications pour la thèse

**Les définitions** de mobilité, de durabilité et de mobilité durable **influencent deux principaux aspects** d'un système d'indicateurs, décrits ci-dessous.

**(1) Le choix des phénomènes mesurés** et auxquels seront attribués un ou plusieurs indicateurs.

- La séparation en trois domaines distincts facilite l'identification et l'énumération de ce qui est compris dans chaque domaine. Geurs, Boon, & Van Wee (2009) relèvent cependant un manque de distinction entre les impacts sociaux, économiques et environnementaux. De plus, cette approche du développement durable est peu favorable à l'intégration des différents champs disciplinaires.
- Plus la définition de durabilité est précise en mentionnant les enjeux à considérer, plus le choix des phénomènes à mesurer est facile.
- Puisque les définitions de mobilité et de durabilité varient selon le contexte, la sélection des phénomènes à mesurer devrait également pouvoir évoluer dans le temps, selon les nouvelles technologies et les nouvelles préoccupations.

**(2) Les choix méthodologiques** pour estimer les indicateurs. Puisque la définition de la durabilité varie selon le contexte, les cibles visées risquent d'évoluer et d'être plus ambitieuses pour des phénomènes politiquement plus prioritaires.

Les trois dimensions du développement durable servent principalement de guide lors de la recherche des enjeux liés à la mobilité durable, à court, moyen et long termes. Le cadre d'évaluation de la mobilité durable proposé est bâti à partir de ces enjeux, tout en recherchant un processus qui permette de pallier le manque de distinction entre les trois dimensions.

Il est important que ce cadre soit structuré de façon à s'adapter facilement à la vision de l'utilisateur, ainsi qu'avec l'évolution des préoccupations sociales et des technologies. Ainsi, bien que l'approche proposée soit imprégnée de la compréhension de l'auteur du développement durable, elle vise avant tout à respecter le caractère d'adaptabilité au contexte inhérent au concept. C'est pourquoi, dans cette thèse, aucune définition précise de la mobilité durable n'est proposée sous forme de phrases.

## **1.2 Les enjeux liés à la mobilité**

Aborder la mobilité durable au regard de ses impacts sur les différentes dimensions du développement durable permet d'en clarifier les enjeux. Cette section énonce, sans catégorisation, une multitude d'effets de la mobilité et des systèmes de transport sur l'environnement, la société et l'économie, sans toutefois entrer dans les détails de chacun de ces effets. En regard des connaissances actuelles, ce portrait des enjeux liés à la mobilité durable se veut le plus exhaustif possible en regard des connaissances actuelles. Il ne s'arrête pas aux seules préoccupations de l'époque actuelle et englobe des impacts dont la littérature parle très peu.

À cette revue de littérature suivent quelques réflexions sur les défis liés à cette multitude d'enjeux d'importance variée.

### **1.2.1 Énoncé des enjeux**

Les enjeux de la mobilité durable englobent toutes les problématiques liées au développement durable que la mobilité influence. Tout d'abord, deux enjeux à la base de la mobilité sont soulevés : la réalisation d'activités et le développement régional. Ensuite, les impacts négatifs de la mobilité sur l'environnement - et leurs impacts subséquents sur la société et l'économie - sont décrits brièvement : la pollution, l'occupation du sol, et l'utilisation d'énergie et de ressources. Puis, trois problématiques sociales liées à la mobilité sont présentées: la sécurité, la sédentarité et les dépenses et retombées financières. Bien que moins couramment citées de par leur complexité ou leur marginalité, trois problématiques liées au développement durable et sur lesquelles la mobilité a un rôle à jouer seront finalement abordées: le développement de soi et de la communauté, la justice sociale et la gouvernance.

#### **1.2.1.1 La réalisation d'activités et l'accessibilité**

La mobilité résulte du besoin de réaliser des activités hors du domicile (Orfeuill, 2003). Il a été vu précédemment que ces activités répondent à divers besoins (section 1.1.1), et de ce fait, ils haussent la qualité de vie. Cette dernière réfère à la capacité des individus de répondre aux besoins primaires, de maintenir la santé et le bien-être, de mener une vie sociale en remplissant des rôles de valeur sociale élevée, mais aussi à la satisfaction personnelle envers la vie, à l'atteinte d'objectifs personnels et au sentiment de bonheur (Moons, Budts, & De Geest, 2006).

En transport, ces bienfaits résultant de la mobilité sont abordés dans la littérature par la notion d'accessibilité, soit de facilité à atteindre les biens ou les services. Le niveau d'accessibilité varie selon plusieurs facteurs, dont l'utilisation du sol (densité, mixité), la forme urbaine (réseau de rue, connexité, etc.), les options de transport, l'efficacité du déplacement (durée, fiabilité et variabilité du temps de parcours) (S. L. Handy, 2002), mais aussi l'information à l'usager (Ferris, Watkins, & Borning, 2010) et les tarifs (Jemelin, Pflieger, Barbey, & Kaufmann, 2007). De cette façon, l'accessibilité contribue à la réalisation d'activités diverses, comme les loisirs, le travail, etc. Ces activités peuvent engendrer des dépenses, comme dans le cas des loisirs, ou des revenus, comme dans le cas du travail. Ces deux aspects que sont les dépenses et les revenus peuvent s'appliquer aussi bien pour la personne que pour l'État. Quant aux bénéficiaires, la rémunération liée à une activité de travail constitue une entrée d'argent dans le budget du ménage, est une dépense pour la collectivité ou l'entreprise, tout en contribuant au développement économique.

Cependant, la mobilité n'est pas seulement libératrice du fait qu'elle soit rattachée à la réalisation d'une activité valorisée : elle est aussi perçue comme aliénante, comme une solution à l'éloignement des destinations (Wiel, 1999). C'est la faible valorisation du temps en déplacement, perçu littéralement comme une perte de temps, qui lui vaut cette qualification d'« aliénante ». Deux approches sont envisageables pour réduire le temps perdu en déplacement : (1) améliorer l'efficacité du déplacement (le temps de parcours), et ce, afin de substituer ce gain de temps par des activités plus valorisées, ou (2) effectuer une activité valorisée tout en se déplaçant.

Concernant le premier cas et le mode automobile, c'est la problématique de congestion qui retient l'attention. D'ailleurs, certaines études tentent d'en estimer les coûts, soient ceux inhérents au passager (temps perdu à cause de la congestion et exposition au risque d'accident, dépréciation du véhicule, essence consommée supplémentaire, etc.) et ceux reliés aux externalités touchant les citoyens (pollution atmosphérique et sonore, effets négatifs sur la productivité des travailleurs, etc.) (Bilbao-Ubillos, 2008; Gourvil & Joubert, 2004). Les externalités peuvent même aller jusqu'à toucher la santé psychologique : les déplacements motorisés peuvent hausser le niveau d'agressivité lors de la conduite automobile (Nesbit, Conger, & Conger, 2007; Underwood, Chapman, Wright, & Crundall, 1999). Le transport de marchandises par camion contribue également à l'encombrement du réseau routier urbain (Conseil de la science et de la technologie, 2010). Le coût des retards supportés par les camionneurs dans la région de Montréal a été estimé

à environ 53 millions \$ pour l'année 1998 selon Gourvil & Joubert (2004). Ainsi, une réduction du temps de déplacement peut être substitué par des activités plus valorisées tels que le travail et les loisirs, qui contribuent au développement économique et/ou personnelle.

Dans le second cas, la valorisation du temps en véhicule, on fait référence par exemple aux activités de lecture, de détente ou de travail dans le transport en commun (Ettema & Verschuren, 2007; Neufeld & Mokhtarian, 2012) ou même dans l'automobile à l'aide d'un téléphone portable (Haddington & Rauniomaa, 2011). Le temps en déplacement n'est ainsi plus perçu comme une perte, car il est valorisé par la réalisation d'activités.

### **1.2.1.2 Le développement régional**

Un autre enjeu important lié à la mobilité est celui du développement régional, particulièrement économique, qui est d'ailleurs souvent utilisé par les politiciens pour justifier la construction de voies rapides comme les autoroutes ou les rails. Les transports de marchandises et de personnes favorisent le développement économique (les échanges et les transactions commerciales, le tourisme, etc.), et ce, à l'échelle locale et régionale (Apparicio, Dussault, Polese, & Shearmur, 2007; Vickerman, Spiekermann, & Wegener, 1999). D'abord, les transports exercent un effet de compétitivité: un transport plus efficace entraîne plus d'activités économiques dans une région et génère des revenus. Le développement économique qui en résulte opère à son tour un effet sur la demande, augmentant ainsi les besoins de transport et les dépenses qui y sont liées (Chambre de commerce du Montréal métropolitain [CCMM], 2004).

Un autre impact des transports qui a trait au développement économique est son apport à l'accroissement de la mobilité de la main d'œuvre (Association canadienne du transport urbain [ACTU], 2003). En effet, la mobilité des personnes permet aux travailleurs de se retrouver aux endroits où des emplois sont disponibles (CCMM, 2004). De surcroît, la construction et l'entretien des infrastructures de transport, ainsi que l'opération des services de transport, soutiennent de nombreux emplois directs et indirects. À titre d'exemple, la Société de transport de Montréal a soutenu directement l'emploi de 8 603 personnes-année en 2009 (Association du transport urbain du Québec [ATUQ], 2009).

### 1.2.1.3 La pollution

La pollution émise par les transports est probablement l'effet négatif environnemental qui vient le plus rapidement à l'esprit. On distingue six éléments qui peuvent être touchés par les polluants issus de la mobilité : l'eau, le sol, l'air, le son, la luminosité et le paysage. L'eau et les sols aux abords des routes, ainsi que par propagation celle des rivières et des lacs avoisinants, est contaminée par les hydrocarbures, les métaux lourds - Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn - (Pagotto, 1999) et le sel issu des opérations de déglçage (Godwin, Hafner, & Buff, 2003; Ramakrishna & Viraraghavan, 2005). La pollution sonore se définit par le bruit engendré par les déplacements, soit essentiellement le bruit des moteurs des véhicules motorisés et celui du frottement des pneus sur la chaussée. Elle a des répercussions sur la santé humaine (Clark & Stansfeld, 2007) et animale. La pollution lumineuse, nuisance nocturne, provient des sources ponctuelles permanentes, comme les lampadaires, et des sources mouvantes comme les phares des véhicules en circulation. De récentes études s'intéressent au lien entre l'exposition lumineuse lors du sommeil et les cancers colorectal et du sein (Chepesiuk, 2009; Pauley, 2004). Aussi, la présence et la taille imposante des infrastructures de transport constituent à la fois une pression pour les paysages et une opportunité de requalification des aménagements urbains (Teller & Cremasco, 2009).

Les principaux polluants atmosphériques urbains sont : le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote NO<sub>x</sub> (NO et N<sub>2</sub>O), les composés organiques volatils (COV), l'ozone (O<sub>3</sub>), les oxydes de carbone (CO et CO<sub>2</sub>), le plomb (Pb), les hydrocarbures aromatiques (hydrocarbures aromatiques monocycliques [HAM] et polycycliques [HAP]) et les particules fines en suspension (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>) (Cohen et al., 2004).

Les NO<sub>x</sub>, les COV, et en une moindre mesure le SO<sub>2</sub> et l'ammoniac, sont émis par les transports motorisés. Sous l'effet du soleil, ils produisent une pollution photochimique mesurée par l'ozone (O<sub>3</sub>), composant majeur du smog. Avec l'ozone, les particules (matières solides et liquides) en suspension sont les autres composants du smog (Pollution Probe, 2002). De surcroît, le SO<sub>2</sub> et des NO<sub>x</sub> se transforment en polluants secondaires secs ou humides qui retombent sous forme de précipitations acides. Les pluies acides posent problèmes principalement pour les systèmes aquatiques et terrestres qui ne parviennent pas à neutraliser naturellement de telles précipitations (Environnement Canada, 2013).

L'exposition au  $\text{SO}_2$  est relié à des problèmes pulmonaires (Sunyer, Atkinson, et al., 2003) et cardiovasculaires (Schwartz & Morris, 1995; Sunyer, Ballester, et al., 2003). L'ozone provoque un rétrécissement des voies respiratoires et affecte les fonctions pulmonaires et asthmatiques (Lippmann, 1989). Les effets sur la santé de l'exposition au monoxyde de carbone (CO) se manifestent via le transport de l'oxygène. Ce polluant est donc corrélé à des maladies et des mortalités cardiovasculaires (Samet, Zeger, et al., 2000; Schwartz, 1999).

Les hydrocarbures aromatiques, formés de cycles de benzène, et les métaux lourds, tel le plomb, résultent d'une combustion incomplète. Les hydrocarbures en tant que polluants atmosphériques sont susceptibles d'être cancérogènes. En fait, dans le cas des HAM, le benzène participe à des désordres hématologiques (relié au sang) et, à de fortes concentrations, peut provoquer, par exemple, la leucémie (Degobert, 1992). Certains HAP et leurs dérivés issus des gaz d'échappement des voitures ont des activités mutagènes et cancérogènes (Degobert, 1992). Quant au plomb, il était en fait un additif ajouté au carburant pour lubrifier les composantes des moteurs de véhicules. Le plomb, une fois inhalé, est en partie retenu et passe dans le sang, agissant notamment sur le système nerveux (Degobert, 1992). Quant aux particules fines, elles diminuent l'espérance de vie notamment en servant de vecteur aux métaux lourds en arrivant jusqu'au niveau des alvéoles pulmonaires (Samet, Dominici, Curriero, Coursac, & Zeger, 2000).

De façon générale, des normes plus sévères instaurées depuis la fin du XXe siècle ont permis de diminuer la quantité de polluants atmosphériques émis par la combustion des véhicules automobiles (Tableau 1-2). Auparavant, le secteur des transports était la source la plus importante de  $\text{NO}_x$  et de COV au Canada en 2000 (respectivement plus de 50% et plus de 33%) (Environnement Canada, 2007). Les lois et règlements antérieurs sur les transports ont entraîné des réductions appréciables des émissions de  $\text{NO}_x$  et de COV, entraînant des diminutions des concentrations ambiantes de ces polluants dans les zones urbaines entre 1990 et 2000. Il en est de même pour les émissions de  $\text{SO}_2$  : le secteur des transports occupe une part évaluée à 12,2 % en 2010 au Québec, ce qui le place dorénavant largement derrière le secteur industriel (Environnement Canada, 2010).

**Tableau 1-2 : Diminution des émissions annuelles pour divers polluants atmosphériques et part des transports dans ces émissions. Compilation à partir de l'Inventaire national des rejets de polluants du Canada (Environnement Canada, 2010)**

	Canada		Québec
	Diminution des émissions annuelles en 2010 p/r à 1990	Part des transports dans les émissions de polluants (2010)	Part des transports dans les émissions de polluants (2010)
SO <sub>2</sub>	57 %	6,9 %	12,2 %
NO <sub>x</sub>	18 %	33,0 %	51,5 %
COV	26 %	12,5 %	14,3 %
CO	40 %	42,8 %	36,3 %
PM2.5 (fines)	35 %	8,6 %	5,8 %
PM10 (inhalables)	38 %	7,8 %	6,1 %

<sup>1</sup> Le total des émissions de polluants exclut les sources à ciel ouvert (par exemple la poussière des routes) et les sources naturelles (par exemple les feux de forêt).

<sup>2</sup> Le transport inclut routier, aérien, maritime, ferroviaire et exclut la consommation de diésel hors-route et la consommation d'essence/GPL/GNC/LPG/CNG.

Quant au plomb dans l'air, sa concentration dans la fabrication de l'essence est très fortement limitée depuis le Règlement sur l'essence adopté en 1990 au Canada. Le plomb est donc quasi inexistant dans l'essence aujourd'hui.

Alors que les concentrations dans l'air sont habituellement mesurées séparément pour les différents polluants, il n'en demeure pas moins qu'en réalité les individus sont exposés à un mélange de ces polluants qui peuvent se combiner ou être en synergie. Étudier les effets d'un mélange de polluants sur la santé humaine est extrêmement complexe (Katsouyanni, 2003). Pourtant, cette exposition semble bel et bien avoir des impacts négatifs; par exemple, certaines études montrent que l'exposition aux NO<sub>2</sub>, aux CO et aux particules fines, souvent conjointe et prolongée, réduit le poids des bébés à la naissance (Bell, Ebisu, & Belanger, 2007). Tous ces effets sur la santé humaine occasionnent des coûts en soins de santé, payés individuellement sous forme de médicaments et d'assurances ou collectivement via le réseau de la santé. Ces coûts non comptabilisés dans les analyses bénéfices-coûts conventionnelles en transport sont dites des externalités. Remarais (2004) estime qu'en 1999, la valeur des externalités négatives produites (bruit, CO<sub>2</sub>, COV, NO<sub>x</sub>) par la circulation des camions, des autobus et des automobiles était de 426 millions de dollars pour l'Île de Montréal.

La pollution issue de la circulation des véhicules a également des effets sur la mortalité et la croissance des espèces vivantes et donc la biodiversité du milieu. Dans une synthèse, Spellerberg (1998) répertorie l'éventail des effets de la circulation de véhicules (accidents, nuisances et pollution) sur la faune et la flore. Cela altère la photosynthèse, la respiration et la transpiration des plantes, et augmente la mortalité d'animaux. Les métaux lourds, les polluants, la luminosité et les poussières affectent également la croissance des plantes. Les polluants et la présence des infrastructures affectent de plus la diversité et la composition des espèces (Angold, 1997). De surcroît, les sels issus du déglacage augmentent la concentration des sels et de ses composants (le sodium et le chlore) dans les eaux de surface (lacs, ruisseaux, rivières, etc.). Une concentration trop élevée touche certaines espèces comme les amphipodes (Williams, Williams, & Cao, 2000) et les amphibiens (Karraker, Gibbs, & Vonesh, 2007). Les espèces végétales à proximité d'une route sont aussi affectées par de fortes concentrations de sel (Munck, Bennett, Camilli, & Nowak, 2010). Il va sans dire que depuis plusieurs années déjà, des mesures de mitigation sont appliquées afin de réduire les impacts de nouveaux projets de transport sur la faune et la flore. Ces pertes de biodiversité, de même que les mesures de mitigation, peuvent également être monétarisées, bien que ce soient des externalités non incluses dans les analyses bénéfico-coûts traditionnelles.

À l'échelle planétaire, des changements climatiques sont liés aux comportements de mobilité. Issue de la combustion des véhicules motorisés, l'émission de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) contribue au phénomène d'effet de serre qui, à son tour, réchauffe globalement la planète. Chaque GES a une durée de vie atmosphérique unique et un potentiel propre de rétention de la chaleur, ce qui lui confère une contribution unique à l'effet de serre. Cette contribution est appelée un « potentiel de réchauffement planétaire », valeur octroyée à chaque gaz avec pour référentiel le  $\text{CO}_2$  auquel on attribue la valeur de 1. Le  $\text{CH}_4$  et le  $\text{NO}_2$  ont ainsi des potentiels beaucoup plus élevés que le  $\text{CO}_2$  lui-même (respectivement 23 et 296). Le réchauffement planétaire modifie les écosystèmes et les milieux de vie des individus (W. R. Black & Sato, 2007) par :

- l'expansion thermique des océans, résultant en une hausse du niveau des océans;
- la fonte des calottes glaciaires résultant en une hausse du niveau des océans;
- la perte de territoire habitable due à l'inondation par la hausse du niveau des océans;
- l'intensification des climats régionaux – régions humides devenant plus humides et régions sèches plus sèches (Dore, 2005);

- l'augmentation du nombre et de l'intensité des tempêtes, ainsi que des inondations suite à la hausse du niveau des océans (Emanuel, 2005).

Ces changements ont des répercussions à la fois sur la biodiversité (Thomas et al., 2004) et sur les mortalités et la santé humaine (McMichael, Woodruff, & Hales, 2006). Par exemple, les hausses de température, les tempêtes et les inondations modifient la prolifération microbiologique, les vecteurs de maladies infectieuses et les récoltes alimentaires, occasionnant ainsi pauvreté, malnutrition, maladies et décès.

De 1990 à 2009 au Québec, les émissions de GES ont diminué de 2,5 %, de façon non continue. Cependant, cette diminution n'est pas attribuable aux transports : au contraire, les émissions des transports ont augmenté de 29,6 % (pour les transports routiers uniquement, cette augmentation est de 33,4 %). De ce fait, la part des transports routier dans l'émission de GES au Québec est très importante : en 2009, c'était le secteur des transports qui émettaient le plus de GES, avec 43,5 % des émissions dont 76,1 % provenant du secteur routier (MDDEP, 2011). Les interventions pour s'adapter à ces changements climatiques, notamment la réfection des infrastructures routières en milieu nordique ou les réparations suite aux inondations plus fréquentes en milieu urbain, sont des externalités environnementales non prises en compte dans les traditionnelles analyses bénéfices-coûts lors de l'évaluation de projets.

#### **1.2.1.4 L'occupation du sol**

Un autre effet négatif est produit par les infrastructures de transport elles-mêmes. Elles occupent un espace au sol important, engendrant de nombreux effets négatifs sur l'environnement et la société. L'emprise au sol de ces infrastructures entraîne une perte d'habitat naturel et les barrières physiques qu'elles créées fragmentent le territoire (Andrews, 1990; Benitez-Lopez, Alkemade, & Verweij, 2010; Spellerberg, 1998). Ces modifications de l'habitat naturel perturbent le milieu de vie des espèces vivant sur le territoire touché (Cushman, 2006). Ces impacts ne sont pas uniquement créés par les infrastructures routières, mais également par celles d'autres moyens de transport, tel le train. Les barrières physiques ont également des impacts sur les individus, en ce sens qu'elles restreignent davantage la mobilité des personnes déjà non motorisées, notamment les jeunes et les personnes âgées (Litman, 2007b).

Un autre problème lié aux infrastructures, particulièrement celles routières, sont leur contribution à l'imperméabilité de la surface au sol : ainsi, lors de pluies, l'eau s'écoule plus rapidement sur les surfaces asphaltées ou bétonnées, ce qui augmente le débit maximal dans le réseau d'égout (Fléchais, 2011). Cela provoque des dangers de débordement et de refoulement du système d'égout. Parfois même, les usines de traitement sont forcées de faire une surverse d'eau usée dans la rivière. Les inondations de bâtiments sont très coûteuses, de même que les infrastructures pour prévenir ces événements, par exemple les bassins de rétention d'eau de pluie (Garant, 2009). De plus, le ruissellement rapide de l'eau cause de l'érosion et emporte les polluants et les sédiments, ce qui affecte la qualité de l'eau.

De surcroît, le type de revêtement des infrastructures de transport et la circulation de véhicules à essence participent à la création d'îlots de chaleur dans les quartiers. Les îlots de chaleur urbain sont d'abord initiés par le climat (température élevée, ciel clair, absence de vent), mais ils sont aussi amplifiés par les activités urbaines, notamment les émissions de GES, un faible couvert végétal, des sols imperméables, des surfaces qui absorbent la chaleur (Lachance, Beaudoin, & Guay, 2006). Les routes et les stationnements sont plus contributeurs à la formation d'îlots de chaleur (Asaeda, 1994), du fait de leur occupation du sol limitant le couvert végétal et leur matériau imperméable et foncé. Ces derniers contribuent à la formation de smog et augmentent la chaleur à l'intérieur des bâtiments, ce qui favorise le recours à la climatisation, qui à son tour engendre plus de chaleur et d'émissions de GES (Anquez & Herlem, 2011). Dans la région métropolitaine de Montréal, les îlots de chaleur sont de plus en plus présents en raison de l'augmentation de la surface minéralisée (Cavayas & Beaudoin, 2008). La chaleur accablante crée un stress thermique (accumulation de chaleur par le corps humain), provoque des malaises ou inconforts qui aggravent les maladies chroniques dont souffrent certaines personnes, pouvant aller jusqu'à causer la mort (Giguère, 2009). Ces effets occasionnent des coûts supplémentaires en soins de santé. Pour lutter contre les îlots de chaleur, le Bureau de normalisation du Québec (BNQ, 2013) a publié un guide dont les principales mesures de mitigation proposées portent sur la conception des stationnements.

Finalement, l'occupation du sol est un enjeu important : on cherche à limiter et à valoriser son usage. En milieu urbain, cela équivaut à favoriser la densité de résidences, de commerces et de parcs, alors qu'en milieu rural il s'agit plutôt d'avantager l'agriculture et les milieux naturels. La superficie qu'occupent les infrastructures de transport, particulièrement les stationnements et les

routes, est non négligeable et pourrait être réservée à un usage plus valorisé et diversifié. Les zones en périphérie de la ville converties au développement urbanisé (étalement urbain) consomment de l'espace, diminuent la valeur des zones rurales et les milieux de vie forestiers et humides, tout en augmentant les surfaces imperméables (Hasse & Lathrop, 2003). Un espace végétalisé plutôt que minéralisé améliore la qualité de l'air, réduit le bruit, réduit le ruissellement, offre un habitat pour les espèces animales, en plus de favoriser l'activité physique et de diminuer le stress des individus (Dwyer, McPherson, Schroeder, & Rowntree, 1992). Afin de limiter la surface occupée par les réseaux de transport, il importe de maximiser son utilisation et de partager l'espace entre les différents modes de transport (Nicolas, Pochet, & Poimboeuf, 2003).

#### **1.2.1.5 L'utilisation d'énergie et de ressources**

Un autre impact majeur de la mobilité concerne la consommation d'énergie : l'énergie propulsant les véhicules motorisés est principalement produite par la combustion de combustible fossile. Or, la consommation de pétrole est une ressource naturelle ayant des quantités limitées sur la planète, ressource que l'on ne souhaite pas épuiser pour que les générations futures puissent en bénéficier. Bien sûr, les préoccupations et les efforts consacrés à la réduction de la consommation d'une ressource limitée sont liés à la quantité restante de cette ressource sur la planète. Pour le pétrole, les réserves planétaires restantes estimées sont controversées. Certains auteurs affirment qu'elles sont basées sur des données peu fiables fournies par des compagnies dont l'objectif est le profit, qui ne sont pas obligées de publier leurs données, et qui divulguent en particulier l'information améliorant leur image (Laherrere, 2001). D'autres formes d'énergie existent, mais demeurent peu utilisées pour l'instant. Néanmoins, même les véhicules électriques consomment de l'énergie : de l'électricité, qui provient de centrales utilisant des ressources naturelles (eau, charbon, nucléaire, etc.) (Saxifrage, 2013). L'Office de l'efficacité énergétique (2009a) estime que le transport des voyageurs a consommé 1 334,3 pétajoules en 2004, et que le transport des marchandises est en forte croissance depuis 1990, avec une consommation de 1 035,2 pétajoules d'énergie pour 2004.

Finalement, un autre enjeu à soulever lié à la consommation de ressources est l'utilisation de matières premières pour la production de véhicules et d'infrastructures de transport. En fin de vie utile, les épaves de véhicules s'entassent dans des décharges et toutes les questions du recyclage des métaux et matériaux se posent (Daniels et al., 2007). Dans les décharges, les dispositifs pour empêcher la propagation des polluants issus des déchets dans l'eau, l'air et le sol, coûtent très

cher. De plus, elles occupent de l'espace au sol qui pourrait être voué à un usage davantage valorisé. Dans le futur, avec la probable popularité des véhicules électriques, il se peut que ces enjeux sur la consommation se recentrent sur d'autres ressources naturelles que les combustibles fossiles, comme le montrent de nouvelles études sur l'impact environnemental des batteries des véhicules électriques (Notter et al., 2010).

#### **1.2.1.6 La sécurité**

La mobilité pose également des problèmes de sécurité. La circulation occasionne des accidents entre les usagers de la route. La gravité de ces accidents varient en fonction du type de véhicules impliqués et de leurs vitesses. Ce ne sont pas toujours des véhicules motorisés, mais également des piétons et des cyclistes. Ces accidents font évidemment des victimes, blessées à des degrés divers allant jusqu'au décès. De 2000 à 2004 inclusivement, les décès dus aux accidents de véhicule à moteur représentaient 1,3 % du nombre total de décès survenus au Canada. Cependant, chez les personnes de moins de 30 ans, près de un décès sur cinq (17,3 %) était attribuable à un accident de ce genre (Ramage-Morin, 2008).

Avec l'amélioration des caractéristiques de sécurité des véhicules, les campagnes de sensibilisation et les lois, la gravité des blessures et le nombre d'accidents a diminué de beaucoup durant les dernières décennies. Par exemple, au Québec, les restrictions quant au taux d'alcoolémie acceptable pour le conducteur sont de plus en plus sévères, et les pneus d'hiver sont obligatoires durant la saison hivernale depuis 2008. Bien qu'entre 1978 et 2011 au Québec, le nombre de décès sur les routes ait diminué de 72,9% malgré une augmentation de 102,8% du nombre de véhicules en circulation, il n'en demeure pas moins qu'en 2011, les accidents entre usagers de la route ont occasionné 41 903 victimes, dont 479 décès, 2 036 blessés graves et 39 388 blessés légers (Société de l'assurance automobile du Québec [SAAQ], 2012a).

D'ailleurs, les accidents ne sont pas uniquement une affaire de blessures physiques : les accidents, avec ou sans blessés, occasionnent des dommages psychologiques et des coûts pour les dommages matériels. Dans le premier cas, les victimes peuvent souffrir de symptômes de stress et de détresse psychologique (Di Gallo, Barton, & Parry-Jones, 1997). Dans le second cas, les coûts matériels sont absorbés par les particuliers, la société et leurs assurances. En 2011, il y a eu 82 066 accidents avec des dommages matériels seulement (SAAQ, 2012b). La mortalité et la perte de qualité de vie en raison d'une blessure peuvent également être monétarisés. Pour environ

11,3 millions de véhicules-kilomètres parcourus en 1999 sur l'Île de Montréal, Remarais (2004) estime à environ 433 millions de dollars la valeur des accidents incluant les victimes blessées ou décédées et les dommages matériels.

Également, les réseaux de transport façonnent l'espace public, ce qui implique la considération des questions de sécurité des usagers vis-à-vis des crimes et agressions. Plusieurs études se penchent particulièrement sur les crimes aux environs des stations de transport en commun (Loukaitou-Sideris, Liggett, & Iseki, 2002).

Enfin, les risques d'accident et d'agression, ainsi que les aménagements du réseau, influencent la perception de sécurité qu'ont les usagers. Le sentiment d'insécurité diffère selon l'individu, notamment le sexe (Loukaitou-Sideris, 2005), et pour chaque mode de transport (Alm & Lindberg, 2000). Cela influence négativement l'attractivité d'un mode de transport.

#### **1.2.1.7 La sédentarité**

De surcroît, la mobilité, sous toutes ses formes, est reliée à la problématique de sédentarité du mode de vie actuel. À l'aube d'une épidémie d'obésité (Lobstein, Baur, & Uauy, 2004) causée par un mode de vie sédentaire, l'activité physique s'avère primordiale, car elle est associée aux facteurs de risque cardiovasculaire, à l'amélioration de la santé des os et au bien-être psychosocial (Biddle, Gorely, & Stensel, 2004; Boreham & Riddoch, 2001; Cavill, Biddle, & Sallis, 2001). La mobilité, plus spécifiquement les déplacements actifs (marche, vélo, etc.), peut augmenter la pratique d'activité physique au quotidien (Badland & Schofield, 2008; Sahlqvist, Song, & Ogilvie, 2012). À l'inverse, le temps passé en automobile aux dépens de modes de transport plus actifs favorise la sédentarité, la réduction d'activité physique et le surpoids (Davis, Valsecchi, & Fergusson, 2007).

Les maladies associées à l'obésité occasionnent des coûts additionnels en soins de santé. De plus, la réduction de la qualité de vie et même le raccourcissement de la durée de vie peuvent être monétarisés. Par exemple, Edward (2008) évalue que 8,3 minutes de marche quotidienne supplémentaire grâce à l'utilisation du transport en commun pourraient faire économiser entre 4 800\$ et 6 600\$ par personne de fonds publics et privés en soins de santé.

### 1.2.1.8 Les coûts et retombées financières

Les infrastructures de transport et leur utilisation engendrent des coûts personnels et collectifs. Pour exister, les systèmes de transport doivent être financés à la fois par la collectivité et par les individus. Les systèmes de transport qui supportent la mobilité nécessitent d'importants investissements collectifs, et ce, autant pour la construction et l'entretien des infrastructures de transport que pour l'opération des différents réseaux de transport. Ces investissements collectifs sont financés par le gouvernement en partenariat possible avec des entreprises privées, les revenus tarifaires et des revenus publicitaires.

Individuellement, plusieurs dépenses du ménage sont reliées à la mobilité : les coûts peuvent être liés à la possession (l'abonnement à un service, l'achat ou la location d'un véhicule, le coût des assurances, etc.), ainsi qu'à l'utilisation (l'immatriculation, l'achat de carburant, l'entretien du véhicule, etc.). Selon l'ISQ, en 2005, les dépenses en transport représentaient en moyenne 13% des dépenses de consommation courante d'un ménage (ISQ, 2009). Il s'agit de la deuxième dépense la plus importante du ménage, immédiatement après le logement (ISQ, 2009). La possession automobile coûte particulièrement cher. L'Association canadienne des automobilistes (CAA, 2012) estime les coûts de propriété moyens (assurances, permis, immatriculation, dépréciation, financement) à 17,64 \$/jour et les coûts de fonctionnement moyens (carburant, entretien, pneus) à 12,90 ¢/km (pour une Civic LX parcourant 18 000 km annuellement). Également, il est possible d'ajouter les coûts de stationnement, défrayés soit par l'automobiliste, soit par l'entreprise qui fournit à ses clients ou ses employés un espace de stationnement. À l'opposé, la marche et le vélo sont très peu coûteux pour les individus. En effet, aucun véhicule n'est requis pour la marche, et l'achat d'un vélo est marginal dans un budget annuel. Cela réduit donc les dépenses en transport d'un ménage (Litman, 2011). De façon générale, les tarifs ont un impact sur l'attractivité d'un mode de transport et le choix modal (Viegas & Macario, 2001).

Enfin, la valeur des propriétés est parfois influencée par les infrastructures de transport. C'est le cas notamment des investissements dans le transport collectif par train qui ont un effet positif sur les valeurs de propriétés, en raison d'un accroissement de l'accès aux autres quartiers et de l'attractivité de la propriété (Diaz, 1999). Cependant, ces infrastructures, de par leurs externalités comme la pollution atmosphérique, le bruit ou les vibrations, engendrent aussi des effets négatifs sur les valeurs de propriétés (Kilpatrick, Throupe, Carruthers, & Krause, 2007).

### **1.2.1.9 Le développement de soi et de la communauté**

La mobilité joue un rôle non négligeable dans le développement personnel et de celui du quartier. Tel que vu précédemment (Section 1.1.1), la mobilité répond à des besoins et à des désirs, et tout déplacement utilitaire a pour fin une activité. Or, entretenir des relations sociales, se procurer des biens essentiels ou de luxe, recevoir des services, réaliser des loisirs et travailler peuvent contribuer à l'estime de soi et au bien-être (Reitzes, Mutran, & Verrill, 1995; Sonnentag, 2001). De plus, le déplacement lui-même peut aider au développement de soi. Par exemple, la marche favorise les interactions sociales (Glanz, 2011) en raison des rencontres faites sur le trajet emprunté. De plus, l'utilisation d'espaces publics de qualité aident à la création de liens avec d'autres personnes, via les rencontres, et permettent à l'individu de créer des liens avec le quartier (Oldenburg, 1999). Plus précisément, chez les enfants, la marche dans leur quartier participe à leur développement personnel : les enfants qui marchent beaucoup ont tendance à mieux percevoir la circulation et les rues non sécuritaires (Alton, Adab, Roberts, & Barrett, 2007).

Non seulement les comportements de mobilité, mais aussi l'aménagement du quartier et l'offre de transport, sont liés à la qualité des espaces publics d'une communauté, qui se caractérise notamment par un environnement sécuritaire et agréable. Jacobs (1961) mentionne que des rues courtes et sinueuses favorisent la rencontre entre les résidents. Gehl & Gemzøe (2004) affirment que la réduction de la circulation routière et un aménagement adéquat pour la marche et l'attente avantagent l'utilisation des espaces publics. D'ailleurs, les organismes québécois œuvrant à la mise en place de quartiers verts axent leurs actions sur les transports actifs et collectifs. Cela aide notamment à la consolidation des liens sociaux ainsi qu'au renforcement du sentiment d'appartenance au quartier (Wood, Frank, & Giles-Corti, 2010).

Impliquant également la mixité des usages, l'aménagement du quartier influence la mobilité. La mixité des usages se caractérise notamment par la présence de commerces de proximité, soit des « magasins de petite ou moyenne dimension proposant essentiellement des produits de consommation courante et d'achat fréquent, principalement alimentaires, et dont la clientèle habite pour une très large majorité dans les environs proches » (Van de Walle, 2005). Ils diminuent la distance à parcourir, un facteur d'influence du choix modal lors d'un déplacement. En effet, les modes actifs utilisés pour des petites distances (C. Morency, Demers, & Poliquin, 2014). Selon une étude de l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité

(INRETS) et de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), le commerce de proximité susciterait ainsi près de trois fois moins d'émissions de CO<sub>2</sub> par kilogramme d'achats qu'un hypermarché de périphérie (Beauvais, 1996). Quant à lui, l'étalement urbain des villes allonge les distances de parcours, favorise les déplacements motorisés et fait désertifier les commerces de proximité. En France, Mangin (2004) note en effet une faible part du chiffre d'affaires qui est réalisé dans les centres-villes et les quartiers (30%), et une forte part en périphérie (70%). Les services de proximité encouragent également les investissements et favorisent la création d'emplois locaux (Association des sociétés de développement commercial de Montréal [ASDCM], 2009). De surcroît, outre un rôle d'approvisionnement, les commerces de proximité remplissent d'autres fonctions sociales comme l'animation de la ville, la sécurité et le lien social (Héran, 2003), qui favorisent la qualité de l'espace public.

#### **1.2.1.10 La justice sociale**

La justice sociale, aussi appelée équité sociale, est également un des enjeux soulevés par la mobilité durable. Il s'agit en fait d'une question d'éthique qui peut s'appliquer à différents enjeux sur lesquels la mobilité a une influence. Reprenant la théorie de Rawls (1971), la justice sociale devrait respecter trois principes qui sont interconnectés : la même base pour tous, l'égalité des chances pour des personnes similaires et l'aide aux plus défavorisés. À chacun de ces principes sont associés le droit de bénéficier des retombées positives et de limiter les retombées négatives liées à la mobilité. Les retombées positives comprennent l'accès physique et financier aux lieux (services de santé, institutions scolaires, etc.) et aux modes de transport. Les retombées négatives sont principalement liées aux expositions aux polluants (sonores, atmosphériques, etc.).

La justice sociale, abordée ou non sous l'angle de la théorie de Rawls, peut s'appliquer à une grande diversité d'enjeux, dont plusieurs sont présentés dans cette section. Ainsi, certains chercheurs s'intéressent à la distribution équitable des bénéfices du transport (Martens et al., 2012), des accidents (P. Morency & Cloutier, 2005), de l'accessibilité (Golub & Martens, 2013), des tarifs en transport (Raux & Souche, 2001), des îlots de chaleur (Jenerette et al., 2007), de l'exposition aux polluants (Feitelson, 2002), etc. De plus, l'équité peut être analysée selon une approche spatiale par la comparaison entre différentes zones territoriales ou selon une approche socio-démographique, en regardant les groupes défavorisés ou vulnérables. La réduction des

disparités socio-économiques favorise la cohésion sociale, ce à quoi contribue le transport collectif (Vandersmissen, 2003).

#### **1.2.1.11 La gouvernance**

Une nouvelle composante du développement durable émerge et est largement discutée : celle de la bonne gouvernance (Joumard, 2009). Parfois la gouvernance est considérée comme une quatrième dimension au développement durable, parfois plutôt comme composante à l'intersection des trois autres dimensions (au centre). Or, le processus décisionnel en transport exerce une influence sur la gouvernance.

La bonne gouvernance renvoie à la démocratisation des processus de choix (Développement durable et territoires, 2002) et à la saine gestion. La bonne gouvernance comporte essentiellement les défis de participation des citoyens et des parties prenantes (engagement, éducation, sensibilisation, consultation, concertation, etc.), de transparence et de responsabilité (Programme des nations unies pour le développement, 1997). La transparence comprend par exemple la définition d'une vision et d'objectifs clairs pour les plans et politiques, ainsi que la diffusion d'information sur les finances et l'octroi de contrats. L'enjeu de la responsabilité englobe le contrôle et l'application des lois existantes, et la gestion saine des finances. Par exemple, les politiques de tarification doivent prendre en compte les dépenses en transport, tout en reflétant la volonté de mise en œuvre d'actions permettant de concrétiser les objectifs établis. Aussi, la distribution des investissements doit se faire de façon équilibrée, transparente et en relation avec les objectifs visés, par exemple entre les modes de transports et entre les secteurs privés et publics. À ces défis peut être ajouté celui de l'intégration : les plans et politiques sur la mobilité doivent s'intégrer aux plans d'autres disciplines, comme l'urbanisme et l'environnement, et aux plans d'autres secteurs administratifs (entités territoriales, pallier gouvernemental, etc.).

### **1.2.2 Synthèse et implications pour la thèse**

La revue de littérature a permis de relever les impacts majeurs de la mobilité sur chacune des trois sphères du développement durable. Ils sont liés aux enjeux de société suivants :

- l'accessibilité aux opportunités, rendant possible la réalisation d'activités et réduisant le temps non-disponible lors du déplacement;
- le développement régional engendré par un meilleur accès;

- la pollution de l'air, des sols et de l'eau, ainsi que le bruit et la lumière émis majoritairement par la circulation des véhicules motorisés;
- l'occupation du sol et la fragmentation de l'espace par les infrastructures des systèmes de transport;
- l'utilisation d'énergie et de ressources par les véhicules motorisés;
- la sécurité et les risques d'accidents des systèmes de transport;
- la sédentarité des modes de vie des individus influencée par le mode de transport utilisé pour se déplacer;
- les coûts et les retombées financières engendrés par la construction, l'utilisation, l'opération et l'entretien des systèmes de transport;
- le développement de soi et de la communauté influencés par les modes de transport utilisés individuellement et dans les quartiers;
- la justice sociale renforcée par une offre de transport équitable;
- la bonne gouvernance des projets de transport.

Ces enjeux s'influencent entre eux. Ils ont également des effets sur la santé humaine et des espèces animales et végétales, de même que les infrastructures publiques. Ces répercussions entraînent des coûts supplémentaires à la société. Cette revue induit quelques constats, qui sont expliqués ci-après.

Tout d'abord, les projets de transport ont assurément une part à jouer sur ces aspects de la gouvernance : les notions de transparence, de responsabilité et de participation sont tout à fait applicables aux projets de transport. Cependant, ces enjeux de bonne gouvernance sont indépendants du volet mobilité du projet, du scénario, du plan ou de la politique proposés. En effet, la nuance réside plutôt dans le fait que ces enjeux relèvent de la gestion du projet et non des comportements de mobilité ou des systèmes de transport existants. Ainsi, on pourrait dire que les composantes de la bonne gouvernance sont des enjeux de la gestion durable de projets de tout secteur ou discipline, dont fait partie la mobilité. Il s'agit d'un processus à part de mise en œuvre de la bonne gouvernance lors du développement de projets. C'est pourquoi, malgré la pertinence et la reconnaissance de l'existence de **la bonne gouvernance** comme élément-clef du développement durable, cette dimension est **omise du cadre d'évaluation de la mobilité durable développé dans le présent travail**.

Ensuite, l'énoncé précédent ne demeure qu'un aperçu de tous les enjeux liés à la mobilité durable. Cet aperçu est vaste en ce sens qu'il tente de recenser tous les enjeux, issus de disciplines variées, tout en étant à la fois très bref, car chaque enjeu est nommé sans détail. La multiplicité des enjeux, ainsi que leur diversité et les relations qui existent entre eux, rendent le concept de mobilité durable rapidement désorganisé, sans structure. **Ainsi, avant même de penser à développer des indicateurs, il faudra d'abord organiser tous ces enjeux de façon à obtenir un cadre cohérent structurant le concept de mobilité durable.** C'est seulement à l'aide de ce cadre que pourront être identifiés les enjeux retenus auxquels seront associés des indicateurs. Plus qu'une simple classification selon les trois dimensions du développement durable, l'organisation proposée doit intégrer les relations de causes à effet qui existent entre les enjeux, notion présentée à la section 1.4. Elle doit également relier les impacts de la mobilité aux leviers d'actions ainsi qu'aux objectifs des planificateurs.

Également, les impacts de la mobilité précédemment énoncés ne s'appliquent ni à tous les contextes, ni à tous les objectifs d'évaluation, ni à toutes les visions de la mobilité durable. Par exemple, la pollution atmosphérique est un impact des déplacements motorisés, mais pas de ceux non motorisés. **De façon systématique, le cadre d'évaluation doit permettre de sélectionner les enjeux appropriés à mesurer parmi tous ceux énoncés,** en fonction de :

- (1) **la vision de la mobilité durable** du planificateur qui, on l'a vu à la section 1.1 (p.7), varie selon le contexte;
- (2) **l'objectif poursuivi** par le planificateur : les besoins de planification, le mode de transport, l'approche, etc. Ces éléments influencent également la méthodologie d'estimation des indicateurs, notamment le choix des limites et de l'échelle.

Ce projet de recherche propose de bâtir un outil interactif pour relever ce défi d'adaptabilité. Cela signifie que les indicateurs retenus pour évaluer la mobilité durable seront fonction de choix déterminés par l'utilisateur du cadre d'évaluation.

## 1.3 Les indicateurs de mobilité durable

*« Derrière la rationalité froide et « objective » des chiffres se dissimule un projet « quantophrénique » (l'obsession du chiffre) qui fait perdre aux hommes le sens de la mesure. »*

*Vincent de Gaujelac, 2005*

Cette troisième section de l'état des connaissances résume la théorie qui englobe le développement d'indicateurs, en identifiant d'abord les différents rôles que peuvent remplir les indicateurs, puis les types d'indicateurs et leur processus de sélection. Également, cette section présente plusieurs systèmes d'indicateurs de mobilité durable existants, ainsi que deux considérations méthodologiques dont il faut tenir compte dans l'estimation des indicateurs. Enfin, quelques réflexions et une synthèse terminent la section.

### 1.3.1 Le rôle des indicateurs

Cette sous-section concerne le rôle des indicateurs en général, mais aussi plus spécifiquement en relation avec le développement durable et la mobilité durable. Elle se divise en trois volets : les définitions, où on les retrouve et à quoi ils servent.

#### 1.3.1.1 Définitions

Les définitions d'un indicateur se rapportent à sa fonction, à son rôle. Elles utilisent toutes un vocabulaire et une structure semblables. Tel que montré au Tableau 1-3, les définitions sont dotées d'un verbe en lien avec la quantification (indiquer, mesurer, synthétiser, évaluer, informer), d'un élément temporel qui traduit souvent une volonté d'amélioration (actuel, évolution, progrès, réussite, développement), d'un référentiel (objectif, but, situation antérieure) et, parfois, de l'objet à quantifier (initiative, phénomène, situation).

**Tableau 1-3 : Définitions d'un indicateur (à partir de Gudmundsson, 2003; Mardsen, Kelly, & Snell, 2006; Sustainable Transportation Indicators Subcommittee, 2009)**

Sujet	Verbe	Élément à quantifier	Élément temporel	Élément de référence
Variable	Synthétisant	une situation	actuel(le)	... par rapport à...
Moyen	Indiquant	une initiative	son progrès	une cible.
Paramètre	Mesurant	un phénomène	sa réussite (ou non)	avant.
	Évaluant		son évolution	un objectif.
	Informant		son développement	un but.

Les indicateurs sont des variables observables souhaitant rendre compte d'une réalité non observable (Boulanger, 2004); ils n'apportent ainsi qu'une vision partielle du réel. Liés à l'information et à la synthèse, les indicateurs sont marqués d'un fort pragmatisme, sans toutefois être complètement neutres ou objectifs (Bouni, 1998). De plus, ils sont un compromis entre la pertinence scientifique et les besoins des décideurs (Hardi & Barg, 1997).

### 1.3.1.2 Où les retrouve-t-on?

De façon générale, les indicateurs sont à la base de systèmes d'informations ou d'outils aidant à la décision (Bouni, 1998). Selon le CERTU (2001), les politiques sont munies d'objectifs stratégiques déclinés en objectifs opérationnels. Ces objectifs plus spécifiques et réalistes, dits cibles, doivent pouvoir être mesurés et accompagnés d'une date butoir (Sustainable Transportation Indicators Subcommittee, 2009). Chaque objectif spécifique, ou cible, repose sur un ou plusieurs indicateurs. Cette série d'indicateurs peut être présentée :

- 1) en fonction des objectifs tel que décrit précédemment;
- 2) dans un cadre liant les indicateurs à un concept théorique ;
- 3) dans un système d'indicateurs présentant leurs définitions, leurs méthodologies, leur pondération, etc (Litman, 2007a).

Quant aux indicateurs de transports durables, ils se retrouvent dans une grande variété de cadres qui ne sont pas nécessairement centrés sur la mobilité : plans de développement durable, plans de performance gouvernementaux ou régionaux, évaluations environnementales, etc (Gudmundsson, 2002).

### 1.3.1.3 À quoi servent-ils?

Les systèmes d'indicateurs ne sont pas une fin en soi : ils doivent guider l'action publique (Babey & Clivaz, s. d.). Les indicateurs doivent satisfaire les quatre principales fonctions ci-dessous.

(1) **Quantification** (Bouni, 1998; Collin, Séguin, & Pelletier, 1999; Gudmundsson, 2003; Zittoun, 2009) : les indicateurs permettent d'estimer de façon chiffrée les différents phénomènes étudiés.

(2) **Simplification** (Barcelo, 1999; Bouni, 1998; Gudmundsson, 2003; Zittoun, 2009) : les indicateurs représentent des phénomènes complexes de façon concise et synthétisée (Collin et al., 1999).

(3) **Communication** (Barcelo, 1999; Bouni, 1998; Collin et al., 1999; Gudmundsson, 2003) : les indicateurs sont destinés à une grande variété d'acteurs, et servent à informer, à faire connaître les phénomènes étudiés (Babey & Clivaz, s. d.), à éclairer les décisions et à rationaliser en tentant de dépolitiser le débat (Pileri & Pucci, 2009).

(4) **Gestion dans le temps** (Bouni, 1998; Zittoun, 2009) **et dans l'espace** : les indicateurs sont destinés à être estimés de façon régulière et méthodique, afin de tracer l'évolution dans le temps des phénomènes étudiés. Il serait pertinent d'ajouter la notion d'espace à cette gestion du temps. En effet, les valeurs des phénomènes étudiés varient non seulement au fil des ans, mais aussi à l'intérieur d'un même territoire. Ainsi, la gestion dans le temps et l'espace permet non seulement d'observer l'évolution globale du phénomène dans le temps, mais aussi plus spécifiquement de capter l'évolution temporelle des variations spatiales sur le territoire étudié.

On peut également décrire le rôle des indicateurs d'après leur utilisation par les décideurs ou d'après la raison pour laquelle ils ont été créés. Généralement, les décideurs s'en servent comme des éléments de réflexion stratégique et pour les aider à prendre des décisions (Nicolas, Pochet, & Poimboeuf, 2002). Voici les usages possibles des indicateurs, classés en trois catégories.

- **Cerner l'évolution des phénomènes**, qui sont plus spécifiquement les comportements de mobilité et les aspects physiques (environnement, société, économie) en mobilité durable :
  - dresser un portrait de la situation (Mardsen et al., 2006) et
  - identifier les tendances (Rodrigues da Silva, Costa, & Ramos, 2010).
- **Mesurer la réalisation** et l'action politique :
  - définir et faire le suivi des politiques (Bouni, 1998);
  - fixer des cibles (Rodrigues da Silva et al., 2010);
  - établir le degré d'atteinte des objectifs (Bouni, 1998; Bourgeois, 1999; CERTU, 2001; Mardsen et al., 2006); et
  - évaluer les résultats des actions entreprises (Bouni, 1998; CERTU, 2001).

- **Aider à la prise de décision :**

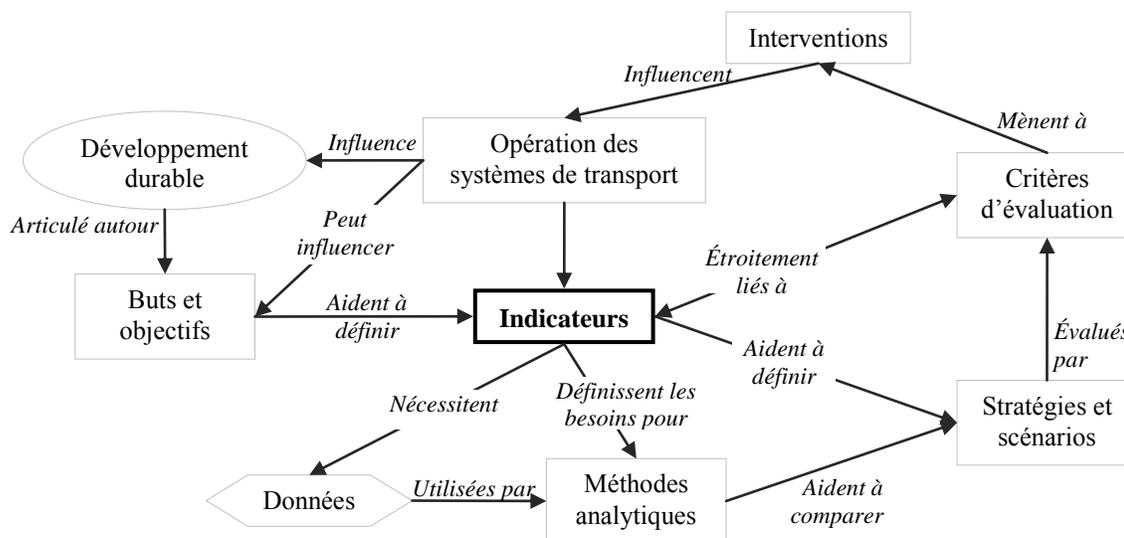
- évaluer les options entre différentes actions possibles et construire des scénarios (Agence européenne de l'environnement [AEE], 2002; Barcelo, 1999; Lautso, 2004; Nicolas et al., 2009; Zittoun, 2009) et
- prévoir les problèmes à venir (Nicolas et al., 2009; OCDE, 2006; Rodrigues da Silva et al., 2010).

Il est à noter que ces utilités respectent un certain ordre chronologique : les applications prospectives venant assurément après celles visant à dresser un portrait actuel ou évolutif de la situation. Par exemple, on ne peut connaître le degré d'atteinte d'objectifs sans avoir préalablement fixé de cible, de même qu'on ne peut fixer de cible sans avoir dressé un portrait de l'état actuel. En outre, c'est grâce à l'évaluation des résultats des actions entreprises et à l'identification des tendances que les cibles peuvent être posées de façon plus réaliste et que des modèles prospectifs peuvent être développés pour évaluer différentes options envisageables.

Les indicateurs sont donc utiles pour couvrir différents niveaux d'analyse, notamment (Litman, 2010) :

- les tendances en amont de la mobilité (comme la population et le revenu);
- les processus de décision (comme la volonté politique et l'application de politiques);
- les mesures incitatives (comme les services, les tarifs et l'information);
- les changements physiques (réponses à des interventions comme les accidents et les comportements de mobilité);
- les impacts cumulatifs avec d'autres secteurs d'activité humaine (comme la pollution ambiante);
- les effets sur l'humain et l'environnement (comme les maladies, les blessures et la biodiversité);
- les impacts économiques (comme les coûts de mitigation et les soins de santé), et la performance et l'atteinte de cibles spécifiques.

À l'aide d'un schéma (Figure 1-2), Zegras (2006) tente de montrer l'univers qui gravite autour des indicateurs de transport durable, en particulier ceux impliqués dans un processus de planification des transports :



**Figure 1-2 : Rôle des indicateurs dans le processus de planification des transports (traduit de Zegras, 2006, adapté de Meyer & Miller, 2001)**

### 1.3.2 La classification des indicateurs de mobilité durable

Relativement aux fonctions, aux usages et aux objectifs reliés aux indicateurs développés, il est possible de proposer maintes classifications d'indicateurs. Cette dernière fait l'objet de multiples appropriations (Boulanger, 2004) et est à la base d'un cadre conceptuel d'indicateurs.

Deux classifications sont particulièrement courantes : l'approche intrants-extrants-résultats (input-output-outcome) et l'approche pression-état-réponse.

#### 1.3.2.1 Approche intrants-extrants-résultats (input-output-outcome)

Cette typologie, à la base, suit les étapes d'un projet (Joumard & Gudmundsson, 2010) :

- indicateur d'intrants : les ressources financières, matérielles ou de main d'œuvre requises pour fournir un service;
- indicateurs d'extrants : les services produits (l'offre de transport);
- indicateurs de résultats : les impacts ou les résultats finaux (court, moyen et long termes).

Plusieurs font des distinctions particulières ou rajoutent des types d'indicateurs. Marsden, Kelly, & Snell (2006) séparent :

- les intrants en deux, considérant d'une part l'argent dépensé et d'autre part la main d'œuvre utilisée;

- les résultats en impacts intermédiaires et finaux. Les premiers ont trait aux changements de la demande, et les seconds font référence à l'impact actuel et la valeur du service offert, ainsi que les atteintes des objectifs. Ces derniers impacts sont parfois à leur tour catégorisés. Du fait qu'ils sont en lien avec le développement durable, ces catégories se retrouvent être souvent les trois dimensions : environnement, société, économie. Chacune des dimensions est chargée de plusieurs thèmes. Le Tableau 1-4 est un exemple tiré de Litman & Burwell (2006). Il liste les différents impacts qui devraient être reflétés, dans la mesure du possible, par un système d'indicateurs de transport durable.

**Tableau 1-4 : Enjeux des transports durable (traduit de Litman & Burwell, 2006)**

Économique	Social	Environnemental
Qualité d'accès	Équité et justice	Pollution de l'air
Congestion routière	Impacts sur les personnes à mobilité réduite	Changement climatique
Coûts des infrastructures	Accessibilité financière	Pollution sonore
Coûts pour l'utilisateur	Impacts sur la santé humaine	Pollution de l'eau
Barrières physiques à la mobilité	Cohésion sociale	Impacts sur l'hydrologie
Domages dus aux accidents	Agréabilité de la communauté	Dégradation de l'écosystème et de l'habitat naturel
Dépréciation des ressources non-renouvelables	Esthétique	Dépréciation des ressources non-renouvelables

### 1.3.2.2 Approche pression-état-réponse (Pressure-State-Response)

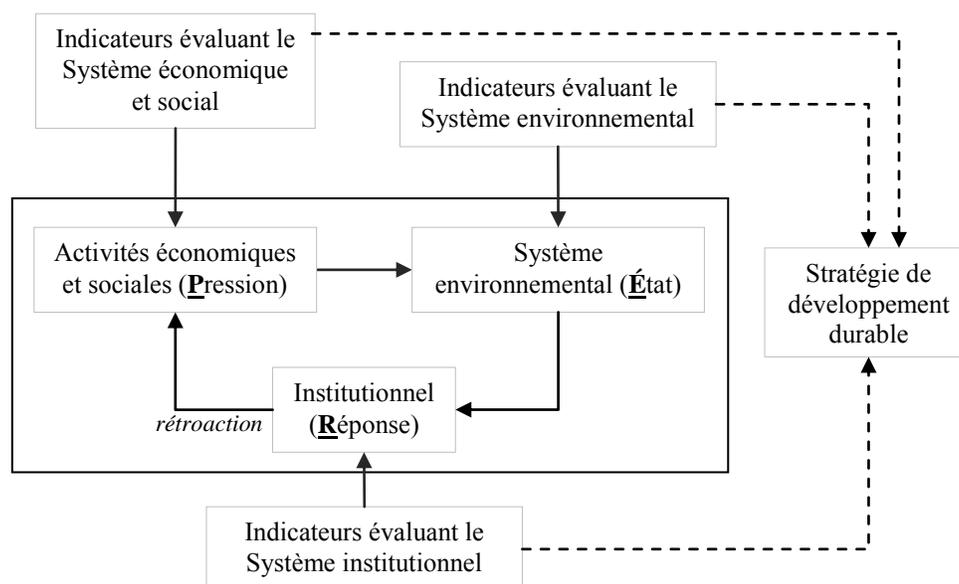
Cette typologie suit les classes nécessaires à la compréhension d'un phénomène (Barcelo, 1999; Jeon & Amekudzi, 2005) :

- indicateurs de pression : les impacts des activités humaines sur l'environnement (consommation de ressources, rejets de polluants, contamination des sols), ainsi que les changements dans l'efficacité d'utilisation des ressources ou du rapport pollution-production;
- indicateurs d'état : qualité de l'environnement, quantités et qualités des ressources naturelles, état de l'économie, de la richesse et du bien-être (concentrations, nuisances, disponibilités de ressources ou de l'état des infrastructures);
- indicateurs de réponse au problème (intervention) : les politiques et les actions entreprises pour réduire les impacts négatifs.

Certains ajoutent d'autres catégories :

- des indicateurs de contexte (Fedra, 2004);
- des indicateurs de performance qui reflètent l'expérience des usagers du service plutôt que seulement les ressources offertes (Nisbet, 2000);
- des indicateurs de surveillance de l'exécution des tâches (OCDE, 1999).

Dans un schéma traduit à la Figure 1-3, Lee, Kin, & Kuo (2008) illustrent remarquablement la place des indicateurs pression-état-réponse parmi les autres systèmes d'évaluation.



**Figure 1-3 : Indicateurs de développement durable et leur relation avec le processus décisionnel dans le cadre pression-état-réponse (traduit de Lee et al., 2008)**

### 1.3.3 D'autres notions

L'indice, le proxy et l'utilisation d'un référentiel sont trois notions incontournables à aborder.

#### 1.3.3.1 L'indice

Le terme « indice » peut être utilisé :

1. pour désigner un signe qui fait référence à l'objet à mesurer. Il dénote cet objet car il est affecté, causé par lui (Peirce, 1998);
2. pour désigner une agrégation de plusieurs indicateurs. L'Indice de la qualité de l'air (IQA) et le Produit intérieur brut (PIB) en sont. Il désigne un indicateur synthétique construit en

agrégeant d'autres indicateurs dits de base (Boulanger, 2004). L'agrégation se fait souvent à l'aide d'une pondération des autres indicateurs (J. A. Black, Paëz, & Suthanaya, 2002).

Lorsqu'utilisé d'après la seconde définition, l'indice reflète des objectifs ou des impacts variés (Litman, 2010). Il a l'avantage de faciliter la comparaison entre différents scénarios. Dans un contexte de mobilité durable, un indice global doit refléter le scénario en transport préféré par comparaison des développements sociaux, économiques et environnementaux (Rassafi & Vaziri, 2007). Pourtant, l'agrégation n'est pas forcément souhaitable (Nicolas et al., 2002). Bossel (1999) met en garde contre l'agrégation qui peut cacher de sérieux déficits sectoriels qui ne paraissent pas dans la valeur de l'indice. Également, il peut y avoir des problèmes de compensation : l'indice peut cacher des indicateurs qui varient négativement et positivement simultanément (Rousval & Maurin, 2008). De plus, mettre ensemble des éléments qui n'ont pas la même unité est questionnable. Selon Litman (2007a), dans la plupart des situations, un seul indicateur est inadéquat : une série d'indicateurs devrait être choisi. Un système intégré d'indicateurs permet de broser le tableau d'ensemble d'un problème donné (Gudmundsson, 2003).

### **1.3.3.2 Le proxy**

Alors que cela prend souvent du temps avant que les résultats attendus deviennent apparents, il est possible d'identifier des étapes intermédiaires sur le chemin vers la rencontre des objectifs. Le suivi de ces étapes intermédiaires peuvent être évaluées à l'aide d'indicateurs que l'on nomme « proxy » de l'objectif principal (Nisbet, 2000). Parfois, certains impacts de la mobilité à mesurer sont influencés par plusieurs autres activités humaines. Ces circonstances mènent à l'utilisation d'un proxy qui représente l'aspect transport à mesurer (Marsden et al., 2006). Par exemple, puisqu'il est difficile de quantifier la perte de biodiversité entraînée par la présence d'infrastructures de transport, on peut choisir un indicateur proxy qui estime plutôt la fragmentation du territoire.

### **1.3.3.3 Le référentiel**

La mise en relation entre un indicateur et une valeur de référence est souvent utilisée pour comparer l'état actuel à une cible qui représente un seuil minimal ou maximal désirable. Marsden et al. (2010) affirment qu'afin de refléter le progrès, tout indicateur de durabilité doit être

accompagné d'une indication de la direction du changement à partir de la position actuelle. Dans certains cas, un but final peut être quantifié. Dans d'autres, le but est moins clair et seule la direction du changement relativement à l'état initial peut être relatée.

Cependant, pour certains indicateurs, même la direction n'est pas sans équivoque en raison d'intérêts divergents. Par exemple, une vitesse de circulation automobile élevée est souhaitée pour réduire les temps de trajet, une vitesse moyenne est désirée pour diminuer la consommation de carburant, et une vitesse faible rend les blessures des victimes d'accidents moins graves. Rousval & Maurin (2008) penchent plutôt pour l'identification d'une fourchette de référence (seuils minimal et maximal).

### **1.3.4 La sélection des indicateurs**

Parmi les études en lien avec la mobilité durable, certaines se penchent de façon plus générale sur le développement durable, alors que d'autres se concentrent sur l'une de ses trois dimensions. Lorsque les indicateurs sont proposés sans toutefois être estimés, le choix des indicateurs provient d'une revue de littérature ou de panels de discussions entre chercheurs, experts et praticiens (Rodrigues da Silva et al., 2010). Lorsque les indicateurs sont calculés, leur choix semble reposer davantage sur les données disponibles et les façons de faire localement.

Les indicateurs sélectionnés forment un système d'indicateurs à l'intérieur d'un cadre d'évaluation de la mobilité durable. Certains cadres visent à couvrir tous les impacts environnementaux pertinents, mais sont contraints par un besoin massif de données (Gudmundsson, 2002). Le contenu du cadre varie selon le lieu géographique, le palier de gouvernement, les personnes et les organismes qui donnent leur vision, leur bagage culturel et leurs attentes, les besoins d'analyse, la densité résidentielle et d'entreprises, le temps (Richardson, 2005).

Le projet Distillate (Marsden, 2007b) identifie quatre étapes de sélection des indicateurs :

1. définir les objectifs et leur direction et les lier avec des indicateurs de résultat final;
2. lier ces indicateurs de résultat final avec des indicateurs de résultat intermédiaire;
3. connecter les éléments de la stratégie d'intervention (indicateurs extrants) avec les indicateurs de résultat intermédiaire;

4. sélectionner parmi tous les indicateurs ceux qu'on est dans l'obligation de mesurer (lois), ce qu'on mesure déjà habituellement, ceux qui remplissent les vides (éléments non mesurés), ceux qui répondent à plusieurs fonctions et ceux qui coûtent moins cher.

Il faut faire attention, car ce qui n'est pas quantifiable a tendance à être mis de côté (de Gaujelac, 2005; Zegras, 2006). Les chercheurs mentionnent plusieurs critères qui devraient guider la sélection des indicateurs. Joumard, Gudmundsson, & Folkesson (2011) résumant ces critères (ou attributs) en trois catégories.

- Critères de représentativité :
  - validité : il mesure effectivement l'enjeu qu'il est sensé mesurer;
  - fiabilité : il donne la même valeur si on l'estime plusieurs fois dans les mêmes conditions;
  - sensibilité : il varie lorsque l'enjeu mesuré varie.
- Critères d'opérabilité :
  - mesurabilité : son estimation est directe et peu coûteuse à réaliser;
  - disponibilité des données : il est basé sur des données déjà existantes, ou dont la collecte est de coût et de durée raisonnables;
  - préoccupations éthiques : les données doivent respecter les droits humains.
- Critères d'application dans les politiques :
  - transparence : il est compréhensible et réutilisable par ceux qui s'en serviront. La méthodologie doit être énoncée en toute humilité (Zittoun, 2009). De cette façon, les acteurs impliqués peuvent comprendre les perspectives, les hypothèses et les limitations liées à l'indicateur (Litman, 2007a);
  - interprétation : il est intuitif, simple à comprendre et n'engendre pas d'ambiguïté;
  - pertinence : il est axé sur les objectifs visés; et
  - possibilité d'être relié aux actions : il est relié à des facteurs modifiables par les interventions et les actions.

Un chapitre complet du livre de Joumard & Gudmundsson (2010) fait une revue de littérature sur les critères de sélection des indicateurs au regard des objectifs de mesure. Finalement, Joumard et al. (2011) recommandent de sélectionner les indicateurs de façon à minimiser la redondance et les chevauchements.

Trop souvent, les indicateurs et le suivi sont critiqués, sous prétexte qu'ils déforment le processus décisionnel (Hood, 2006). Ceci tient du fait que l'action décisionnelle est trop centrée sur l'indicateur lui-même, plutôt que sur la problématique plus large pour laquelle l'indicateur a été choisi. Pour éviter cette critique, une stratégie de suivi claire et transparente s'avère fort utile. Dans cette optique, Ramani, Zietsman, Potter, & Smith Reeder (2012) proposent une liste de critères à cocher qui aide à décider si un indicateur est bel et bien à sélectionner. May (2003) a développé pour les décideurs un guide comportant tous les défis et toutes les étapes liées à l'élaboration d'une stratégie de développement durable sur l'aménagement urbain et les transports. Bastien (2012) a produit un document semblable sur le développement durable, non spécifique au transport et adapté aux municipalités du Québec.

### 1.3.5 Les systèmes d'indicateurs existants

Il existe de multiples systèmes d'indicateurs liés aux transports durables. Both (2003) constate divers systèmes d'indicateurs qui échouent à « opérationnaliser » le concept de développement durable. Gudmundsson (2002) affirme que plus d'efforts de recherche sont nécessaires pour améliorer les systèmes d'indicateurs.

Jeon & Amekudzi (2005) résument plusieurs de ces systèmes. Nichols, Garrick, & Atkinson-Palombo (2009) font la synthèse sur les thèmes qui devraient être mesurés par un tel système. Le Tableau 1-5 montre quatorze systèmes d'indicateurs cherchant à évaluer la mobilité durable, avec leurs particularités respectives.

1. Système d'indicateurs du Victoria Transport Policy Institute [**VTPI**], Canada (Litman, 2010).
2. Index of Sustainable Urban Mobility [**I\_SUM**], Brésil (Rodrigues da Silva et al., 2010).
3. Sustainable Transportation Performance Indicators [**STPI**] du Centre pour un transport durable, Canada (Gilbert, Irwin, Hollingworth, & Blais, 2002).
4. Planning and Research Of POLicies Land use and transport for Increasing urban Sustainability [**PROPOLIS**], financé par la Commission européenne (Lautso, 2004).
5. Un module d'indicateurs de développement durable [**SUSTAIN**] pour le modèle IMULATE intégrant les transports et l'aménagement, Canada (Maoh & Kanaroglou, 2009).

6. Simuler les MoBilités pour une Agglomération Durable [**SIMBAD**], France (Verry & Nicolas, 2005).
7. Evaluative and Logical Approach to Sustainable Transport Indicator Compilation [**ELASTIC**], Angleterre (Castillo & Pitfield, 2010).
8. Système d'indicateurs du Transport and Environment Reporting Mechanism [**TERM**], impliquant diverses organisations européennes (TERM, 2000).
9. Indice basé sur le concept d'élasticité [ici surnommé **Rassafi**], Iran (Rassafi & Vaziri, 2007).
10. Cadre d'évaluation de la durabilité proposé par un chercheur de la Parsons Corporation et des collaborateurs d'universités [ici surnommé **Parsons**], États-Unis (Jeon, Amekudzi, & Guensler, 2013).
11. Système d'indicateurs du Centre d'Études Économiques et Sociales de l'Environnement [**CEESE**], Belgique (De Villers & Reniers, 2000).
12. Système d'indicateurs de Sustainable Urban TRANsportation [**SUTRA**], projet réalisé dans le cadre d'un programme européen (Caratti, Pinelli, & Tarzia, 2001).
13. Système d'indicateurs du Mineta transportation institute [**MTI**], États-Unis (R. A. Johnston & Gao, 2009).
14. Cadre d'évaluation de projets basé sur un indice : le Localized Sustainability Score [**LSS**], États-Unis (Jones, Tefe, & Appiah-Opoku, 2013).

**Tableau 1-5 : Particularités de différents systèmes d'indicateurs de transport durable**

<b>Systèmes d'indicateurs</b>	<b>VTPI</b>	<b>I_SUM</b>	<b>STPI</b>	<b>PROPOLIS</b>	<b>SUSTAIN</b>	<b>SIMBAD</b>	<b>ELASTIC</b>	<b>TERM</b>	<b>Rassafi</b>	<b>Parsons</b>	<b>CEESE</b>	<b>SUTRA</b>	<b>MTI</b>	<b>LSS</b>
<b>ÉCHELLE D'ANALYSE</b>														
Nationale	✓		✓					✓	✓		✓		✓	
Région urbaine	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓		✓		✓
<b>OBJECTIFS DU SYSTÈME</b>														
Suivi, comparaison	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓				
Aide à la décision (choix de scénarios et politiques)				✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓
<b>AGRÉGATION EN UN INDICE GLOBAL</b>														
		✓		✓	✓		✓		✓	✓				✓
<b>AUTRES PARTICULARITÉS, thématiques explicites du système</b>														
Gouvernance	✓	✓						✓						
Comportement de mobilité			✓		✓			✓	✓		✓	✓		
Aménagement			✓	✓	✓							✓	✓	
Technologies			✓		✓							✓		

***L'échelle***

L'échelle pour laquelle est développé le système est généralement :

- nationale (CEESE, MTI, Rassafi, STPI, TERM, VTPI) ou
- urbaine et régionale (ELASTIC, I\_SUM, Parsons, LSS, PROPOLIS, SIMBAD, SUSTAIN, SUTRA).

D'autres systèmes non répertoriés au Tableau 1-5 concernent spécifiquement les opérateurs de transport (Zietsman, Ramani, Potter, Smith Reeder, & DeFlorio, 2011). Pour certains, il pourrait être possible d'appliquer le système d'indicateurs à un individu, à un corridor de transport ou à un quartier.

***Les objectifs***

La raison du développement du système d'indicateurs est généralement de :

- réaliser un suivi ou une comparaison ou
- aider à la décision en permettant de comparer plusieurs scénarios, ces derniers allant de mesures locales à globales. Beaucoup de ceux qui s'appliquent à une région urbaine et qui visent à comparer des scénarios s'appuient sur des modèles prévisionnels de transport.

Parmi ces modèles, plusieurs sont basés à la fois sur le transport et l'aménagement, notamment PROPOLIS, SUSTAIN et SIMBAD.

Certains systèmes d'indicateurs non répertoriés au Tableau 1-5 sont développés dans une logique de certification durable. Ils s'intéressent au respect de la durabilité lors la construction d'une infrastructure de transport (Fernandez-Sanchez & Rodriguez-Lopez, 2010; Tsai & Chang, 2012).

### *L'agrégation en un indice global*

Quelques systèmes d'indicateurs proposent une méthode pour agréger les indicateurs en un seul indice (I\_SUM, PROPOLIS, SUSTAIN, ELASTIC, LSS, Rassafi). Une pondération est proposée pour l'agrégation des indicateurs en un seul indice. Cela facilite la comparaison entre les scénarios ou entre les territoires étudiés. Le Sustainable transport index SUSTRANS reprend les indicateurs de divers systèmes, comme TERM, et les agrège pour chaque pays d'Europe (Dobranskyte-Niskota, Perujo, Jesinghaus, & Jensen, 2009). À l'aide d'une méthode multicritères et sans calculer d'indicateur global, Fedra (2004) utilise les indicateurs proposés par SUTRA pour comparer différents scénarios de développement urbain.

### *Les autres particularités*

Les indicateurs proposés sont catégorisés dans des thématiques générales. Parfois, ces thématiques générales sont à leur tour classées parmi les trois dimensions du développement durable. Ces thématiques sont généralement des impacts des transports sur l'environnement, la société ou l'économie. Certains systèmes d'indicateurs intègrent également d'autres thèmes particuliers, de façon implicite ou explicite. Ils touchent notamment la gouvernance (VTPI, I\_SUM, TERM), les comportements de mobilité (Parsons), l'aménagement et les technologies. STPI a également un volet de suivi de la mise en œuvre des projets, et ELASTIC en a un concernant la satisfaction des usagers. Certains chercheurs ont une approche tout à fait singulière, mentionnée ci-après.

- SIMBAD propose une approche très différente des autres, en séparant les indicateurs en trois volets : le contexte (socio-démographie), les coûts induits (environnement et économie) et les services produits (accessibilités économique et sociale).

- Rassafi a également une approche unique en organisant les indicateurs en deux volets : (1) l'utilisation par réseau (air, eau, rail, route) et (2) le développement durable en général (espérance de vie, accès à l'eau potable, PIB, surface de terre arable, etc.).
- Pour le MTI, Johnston & Gao (2009) approfondissent les problématiques de redondance des indicateurs dans un système. Ils en viennent à proposer deux indices mesurant : (1) la création de richesse en monétarisant les externalités et (2) l'équité.

Aux États-Unis, l'Environmental Protection Agency (EPA, 2011) a développé un guide avec des exemples de mesures de performance. Chaque mesure est dotée d'une brève fiche descriptive et de conseils pour les intégrer aux plans de transport. CEESE énonce également la méthodologie des indicateurs qu'il propose. Un rapport (Ramani et al., 2012) propose des fiches descriptives beaucoup plus détaillées pour des mesures d'impact des projets de transport, mais seulement pour les dimensions sociales et économiques. S'appuyant au départ sur le TERM, Zheng, Atkinson-Palombo, McCahill, O'Hara, & Garrick (2011) s'attaquent exclusivement au développement de méthodologies des indicateurs économiques.

Le Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU, 2001) offre un guide pour aider dans la sélection d'indicateurs pour les plans urbains, s'appuyant sur une recension exhaustive des indicateurs utilisés dans les plans existants en France et des objectifs rattachés.

Finalement, il existe plusieurs systèmes d'indicateurs sur l'évaluation de la durabilité pour les municipalités. Tanguay, Rajaonson, Lefebvre, & Lanoie (2010) en font une synthèse. Parmi ceux-ci, certains ont une forte composante transport, dont: le modèle Sustainable Infrastructure, Land-use, Environment and Transport Model (SILENT) (Yigitcanlar & Dur, 2010) et un atelier sur les indicateurs tenu à Montréal (Jozsa & Brown, 2005).

### **1.3.6 Synthèse et implications pour la thèse**

Cette section est la dernière de la revue sur les indicateurs de mobilité durable et leur rôle. Elle se divise en quatre parties : les lacunes des systèmes d'indicateurs existants, la catégorisation, la mesure et les besoins des décideurs.

### **1.3.6.1 Limites et lacunes des systèmes d'indicateurs existants**

Les systèmes d'indicateurs existants souffrent de plusieurs lacunes qui justifient le besoin d'étudier et de proposer des améliorations et des nouveautés en ce qui a trait à l'évaluation de la mobilité durable. D'abord, ces systèmes sont développés pour l'une ou l'autre des échelles d'analyse (nationale ou métropolitaine). Ils ne sont pas élaborés dans le souci de s'appliquer à plusieurs échelles ou approches différentes : l'État, la région métropolitaine, certes, mais aussi le quartier, le corridor de transport, l'individu, le générateur de déplacements, etc. Ce constat vaut également pour les besoins d'évaluation qui peuvent varier en fonction du champ d'action de l'institution décisionnelle, du mode de transport qui est impliqué, etc. Cette lacune explique en partie l'existence de multiples systèmes d'indicateurs, qui interfèrent avec les besoins de clarification du concept de mobilité durable, de standardisation du choix des enjeux mesurés et des méthodologies d'estimation choisies.

De plus, la sélection des indicateurs est basée sur un critère de disponibilité des données. Cela est nécessaire pour assurer la mesurabilité de l'indicateur. Cependant, pour les enjeux dont les données se font rares, il arrive bien souvent qu'aucun indicateur ne soit proposé. À tort, ces enjeux non mesurables dans l'immédiat sont souvent laissés de côté par un système d'indicateurs. Cela réduit la portée du concept de mobilité durable, qui vise la responsabilité sociale.

En général, la série d'indicateurs est présentée sous forme de liste, parfois catégorisée. Cela peut s'avérer lourd et peu structuré pour représenter la mobilité durable, qui implique une multitude et une grande diversité d'enjeux. Ainsi, il manque un cadre structurant et appuyé par une représentation visuelle appropriée. Au-delà d'un rappel d'une définition générale de la mobilité durable, le cadre comprenant le système d'indicateurs doit permettre de se représenter rapidement les thématiques impliquées dans ce concept. Il doit également lier les impacts de la mobilité aux objectifs des décideurs, aux réseaux de transport offerts et aux comportements de mobilité.

Ensuite, les systèmes actuels sont faits pour estimer les indicateurs un par un lors de l'évaluation. Ils n'offrent pas de vue d'ensemble qui permette d'anticiper les répercussions probables d'une intervention sur les comportements de mobilité et sur les enjeux environnementaux, sociaux et économiques. Avant même de se lancer dans l'estimation d'indicateurs, le cadre d'évaluation devrait offrir la possibilité de prévoir les effets non désirés ou inattendus d'une action.

Enfin, une dernière lacune sera approfondie à la prochaine section de la revue de littérature (section 1.4). Lors de l'agrégation en un indice, une pondération est associée à chaque indicateur. Toutefois, cette agrégation fait ressortir les problématiques de double-comptage de certains impacts. Lorsque plusieurs indicateurs du même système sont liés de cause à effet, ensemble, ils risquent d'influencer beaucoup la valeur de l'indice. Ainsi, la pondération choisie influence grandement l'interprétation qui résulte de la valeur de l'indice. I\_SUM propose dix indicateurs (quatre environnementaux, quatre sociaux et deux économiques) qui ont trait à la consommation de pétrole et aux émissions atmosphériques (polluants et GES) qui en découlent, sur un total de 35 indicateurs. Si chaque indicateur du système avait le même poids pour former un indice guidant les décisions en transport, ces dernières seraient très fortement influencées par la consommation de pétrole, et ce, au détriment d'un autre impact représenté par un seul indicateur même s'il est important pour la société. La problématique de double-comptage est donc primordiale lorsque les indicateurs sont agrégés en un seul indice, mais aussi importante lorsqu'ils forment un système d'indicateurs. Elle devrait être considérée par les systèmes d'indicateurs, notamment en mettant de l'avant les relations entre les indicateurs estimés.

### **1.3.6.2 La catégorisation des indicateurs de mobilité durable**

En théorie, l'évaluation de la contribution de la mobilité au développement durable utiliserait strictement des indicateurs d'impacts sur l'environnement, l'économie et la société. Or, en raison des multiples facteurs énoncés précédemment, un tel système d'indicateurs ne serait pas nécessairement utile pour les décideurs ou possible à mesurer. Il importe donc d'accompagner ces indicateurs d'impacts d'autres mesures plus traditionnelles sur la mobilité ou la socio-démographie afin de contextualiser et d'aider à l'interprétation des premiers. Ainsi, plusieurs systèmes d'indicateurs issus de politiques ou de plans de mobilité durable mélangent les types d'indicateurs à l'intérieur d'un même système : offre, comportements de mobilité, impacts, mise en œuvre des actions, etc.

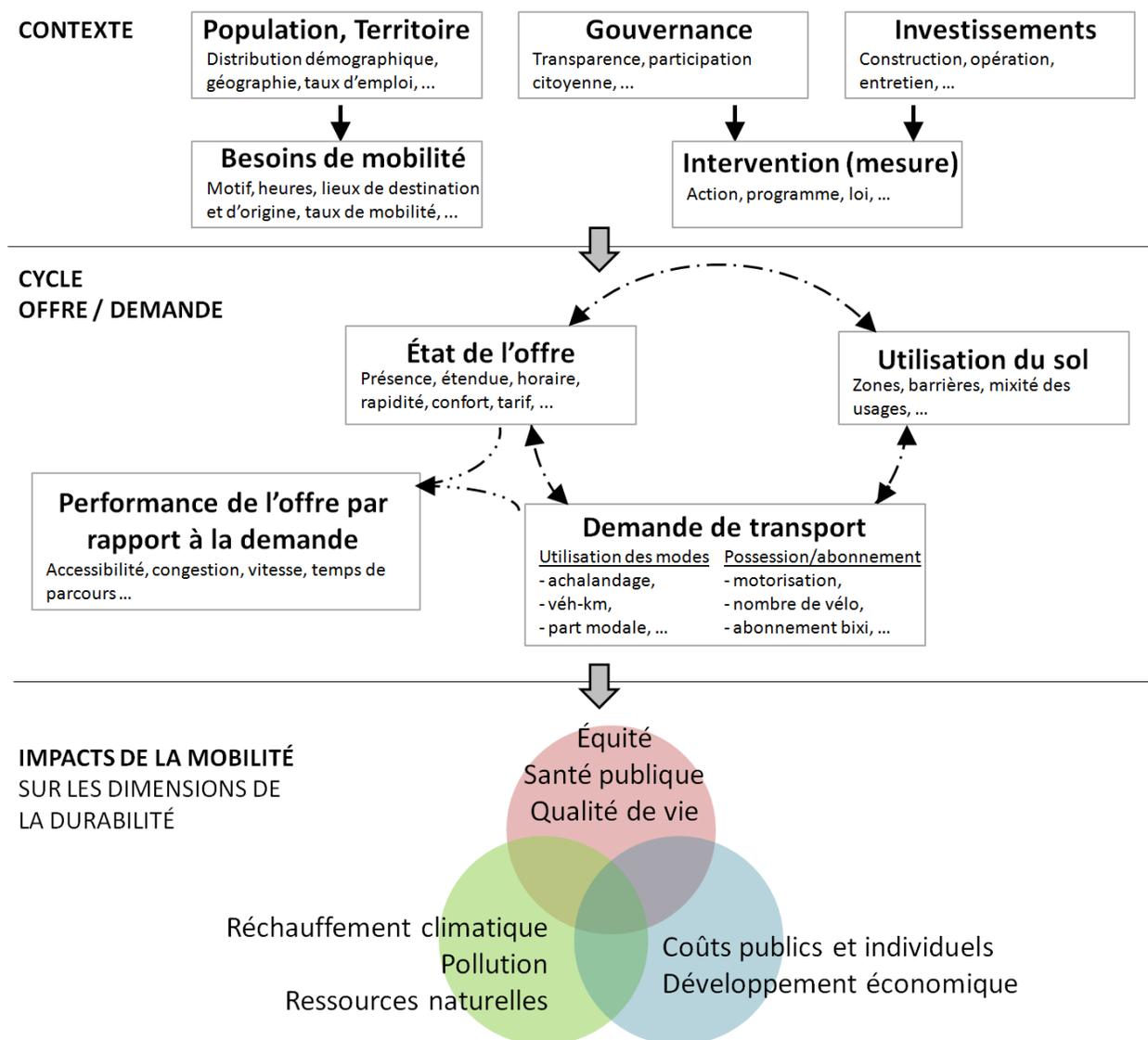
Bien que tous ces types d'indicateurs puissent faire éventuellement partie d'un système, il est **nécessaire d'exposer de façon transparente leur rôle dans ce système**. Il s'agit notamment de différencier clairement chacun des indicateurs en fonction de ce qu'il tente de mesurer, en **séparant ceux cherchant à évaluer l'impact de la mobilité des autres**. Par exemple, ce n'est pas parce qu'une municipalité finance des investissements pour le vélo et construit des

infrastructures cyclables que ses résidents effectuent nécessairement une plus grande part de leurs déplacements à vélo et que, par conséquent, les impacts négatifs de la mobilité motorisée en sont réduits. Dans ce cas, un indicateur mesurant l'évolution des investissements demeure un témoin d'un effort collectif pour faciliter l'usage d'un mode et, bien qu'il y soit lié, il ne permet pas de mesurer l'évolution des impacts de la mobilité sur les trois dimensions du développement durable.

La Figure 1-4 présente un résumé des différents types d'indicateurs. D'abord, certains indicateurs dits **de contexte** servent à relater les préférences et les orientations de la société, allant d'éléments politiques à d'autres plus culturels. Parmi ceux-ci, on compte les indicateurs généraux sur la **population et le territoire** (distribution démographique, emploi, revenu...), qui définissent en partie ceux qui ont trait aux besoins de mobilité (distribution des heures de départ, motifs de déplacement, ...). Ils sont un atout précieux pour l'interprétation des autres indicateurs. Par exemple, une population vieillissante signifie des besoins de mobilité spécifiques, notamment une augmentation des déplacements hors-pointe et pour des motifs loisirs et liés à la santé, ainsi qu'une réduction des capacités motrices individuelles. L'usage global des modes actifs pourrait ainsi être affecté négativement. Dans cette catégorie, on retrouve aussi les indicateurs ayant trait à la politique : la **gouvernance** ou le processus de **prise de décision** qui lui aussi peut avoir un caractère durable (participation citoyenne, information et sensibilisation, transparence, ...), les **investissements** en transport (construction, opération, entretien) et les **interventions** qui en découlent (lois, programmes, mesures de mitigation, actions concrètes). Les indicateurs évaluant les interventions sont aussi dits de mise en œuvre, car ils sont rattachés à des objectifs très concrets de mise en place de solutions sur le terrain. Par exemple, il peut s'agir d'un pourcentage d'implantation d'une mesure (par exemple, part d'avancement dans l'implantation d'appareils Global Positioning System (GPS) à bord des autobus) ou d'un nombre d'actions posées (par exemple, nombre d'entreprises invitées à s'inscrire à un programme de covoiturage).

Ces indicateurs de mise en contexte influencent **l'offre et la demande** de transport, soit les indicateurs dits d'offre et de demande représentés dans un cycle inspiré du cycle de Wegener (2004) présenté à la section 1.4.3. L'offre de transport (présence, étendue et rapidité du service, confort, tarif, ...), **l'utilisation du sol** (aménagement, mixité des usages, densité d'occupation...) et la demande de transport s'influencent mutuellement. La demande de transport se caractérise à la fois par des indicateurs d'utilisation des modes (achalandage, véhicules-kilomètres parcourus, durée de déplacement, ...) et des indicateurs relatant la possibilité d'utilisation des modes

(abonnement à un service, taux de motorisation, ...). L'offre et la demande peuvent également être évalués de façon commune, grâce à des indicateurs de performance mesurant par exemple l'accessibilité et la congestion. Des indicateurs de satisfaction de la clientèle peuvent également y être liés.



**Figure 1-4 : Typologie d'indicateurs liés à la mobilité dans un cadre d'évaluation de la mobilité durable**

Enfin, le dernier type d'indicateurs englobe ceux mesurant les **impacts de la mobilité sur la société, l'environnement et l'économie**. Par exemple, mentionnons la santé publique, l'équité sociale, la consommation de ressources naturelles, la pollution, les coûts, la contribution au

développement économique, etc. **Ce sont ces derniers qui lient le système d'indicateurs au développement durable.**

Dans certains cas, les **indicateurs peuvent se retrouver dans plus d'un type**. La ligne est parfois mince entre les indicateurs de besoins de mobilité, qui relèvent plus des habitudes sociétales, et ceux d'état de la demande, qui relatent l'utilisation des modes de transport. Dans le même ordre d'idée, un indicateur d'accessibilité peut témoigner de la performance de l'offre de transport en fonction de la distribution des domiciles et des générateurs sur le territoire, tout en étant simultanément un indicateur de qualité de vie, de type impact dans la sphère sociale.

Tel que vu précédemment, **à défaut de pouvoir mesurer un impact, un indicateur intermédiaire, ou proxy, est parfois utilisé**. Toutefois, **ce genre de substitution par un proxy se doit d'être mentionné** de façon transparente. Cela permet de faire preuve de prudence dans les interprétations et les analyses qui en résulteront.

### **1.3.6.3 Entre mesure et modélisation**

Pour un enjeu, il arrive parfois que la mesure directe, sur le terrain, soit déjà accessible. Les données sont déjà disponibles et compilées périodiquement. Ces mesures directes sont utiles pour suivre la situation. Cependant, prises seules, elles ne permettent pas de les lier aux facteurs qui l'influencent, et il devient ainsi impossible de l'utiliser pour des prévisions. C'est le cas notamment des accidents de la route. Ces données ne sont reliées directement à aucun modèle de transport. Il devient donc impossible de relier une modification de l'offre ou de la demande de transport à des cibles ou des prévisions de nombre d'accidents.

À l'inverse, certains enjeux peuvent être relativement bien modélisés à partir de variables d'offre ou de demande. C'est le cas par exemple pour le bruit émis par les transports. Pourtant, il peut être très difficile ou coûteux d'obtenir des mesures directes d'impacts, prises sur le terrain. Cela pour plusieurs raisons, notamment : l'impossibilité d'isoler la contribution des transports à l'enjeu global, le caractère qualitatif de cet enjeu et la perception variable de cet enjeu selon chaque individu. Dans le cas du bruit, il est complexe d'identifier la provenance des sons lors de la mesure et donc, d'isoler la part des transports. De plus, la tolérance au bruit varie selon les individus, mais aussi selon le type d'émissions sonore et le moment de la journée.

Le risque est que, face à ces problématiques, aucun indicateur ne soit proposé, et que l'impact soit mis de côté. En choisissant la méthodologie de l'indicateur, idéalement, **il faudrait donc s'assurer (1) que la contribution des transports au phénomène soit isolable et (2) qu'il est possible de le modéliser à partir des modèles de transport actuellement utilisés.** Si ce n'est pas possible, alors il vaut mieux utiliser un ou plusieurs proxys qui répondent à ces deux critères. Par corrélation plutôt que par mesure directe, ils permettront de suivre l'évolution de l'impact étudié. Tel que mentionné à la section précédente, ces choix doivent être clairement expliqués.

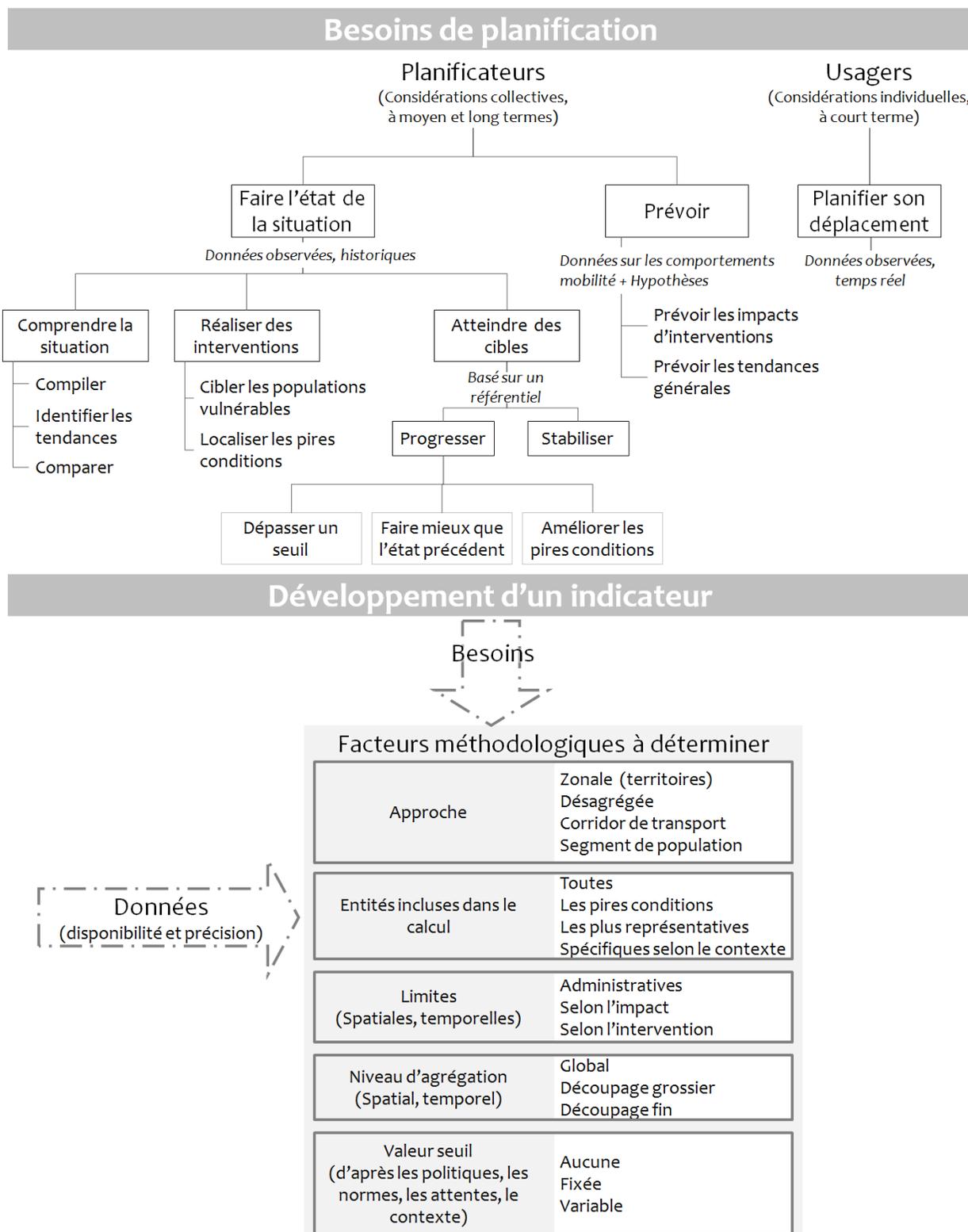
#### **1.3.6.4 Les besoins des planificateurs**

Les méthodes d'estimation possibles sont multiples pour un même indicateur. Ces méthodologies sont, bien sûr, contraintes par les données disponibles et la nécessité d'être sensibles aux changements et aux interventions apportées, mais elles dépendent avant tout de l'usage que l'utilisateur souhaite faire de cet indicateur.

Dans ce projet de recherche, les principaux utilisateurs visés par un outil encadrant le processus de sélection et de développement d'indicateurs de mobilité durable sont les décideurs et les planificateurs en transport. Ce sont eux qui développent les plans de mobilité durable et fixent des cibles à atteindre. La Figure 1-5 résume les principaux besoins des décideurs en transport lors de l'usage d'indicateurs de mobilité durable, ainsi que les éléments méthodologiques à déterminer qui sont influencés par ces besoins.

Partant de l'idée que l'indicateur estimé mesure un phénomène situé temporellement et géographiquement, un décideur peut vouloir soit faire un état de la situation, soit anticiper les effets d'une intervention spécifique (prévoir). Ces deux cas sont séparés, car le premier implique la possibilité de recueillir un échantillon de données directement sur le terrain, alors que le second repose sur des modèles de projection à partir des comportements des individus.

Lorsque l'utilisateur souhaite faire l'état de la situation, il peut avoir en tête divers degrés de précisions spatiales et temporelles : par exemple, vouloir évaluer une tendance générale, ou bien, à l'opposé, vouloir cibler des interventions avec des limites spatiales et temporelles définies. Dans le second cas, les niveaux de résolution devront être précis afin d'identifier soit les lieux, soit les moments les plus critiques, ce qui permettra d'identifier plus facilement des interventions spécifiques dotées d'un meilleur potentiel pour améliorer la situation.



**Figure 1-5 : Les types d'usage des indicateurs**

Dans le premier cas qui concerne l'évaluation d'une tendance plus générale, l'utilisateur peut simplement vouloir compiler globalement dans un but, par exemple, de balisage sans analyse, ou vouloir connaître s'il y a progrès ou détérioration. Ces types d'usage auront un impact sur les entités qui seront incluses dans la méthode d'estimation. Par exemple, le reflet d'une tendance générale peut être estimé par une simple moyenne générale, alors que la mesure du progrès implique la nécessité pour l'indicateur de réagir aux interventions réalisées et aux changements de comportement des individus. Parfois, cela implique la prise en considération de seulement une fraction des entités mesurées au départ (par exemple des pires conditions).

Quel que soit le type d'usage que souhaite faire l'utilisateur d'un indicateur, les éléments méthodologiques à déterminer sont : les entités mesurées à inclure dans la méthode d'estimation, l'approche, les limites et les niveaux d'agrégation spatiale et temporelle.

Les besoins des planificateurs sont étroitement liés aux besoins des politiciens, qui décident des investissements et des projets mis de l'avant. Alors que les analyses des planificateurs reposent en grande partie sur l'utilisation d'indicateurs, les décisions des politiciens sont principalement dépendantes des lignes directrices des partis politiques ou des opportunités qui se présentent. Bien entendu, certains indicateurs sont repris par les politiciens pour appuyer leur décision et les justifier à l'égard du public. Les indicateurs peuvent également alimenter les débats sur un projet envisagé. Cependant, les choix politiques ne sont pas directement pris en fonction des indicateurs. Bien qu'elle y soit liée, cette étude ne vise pas à répondre aux besoins des politiciens.

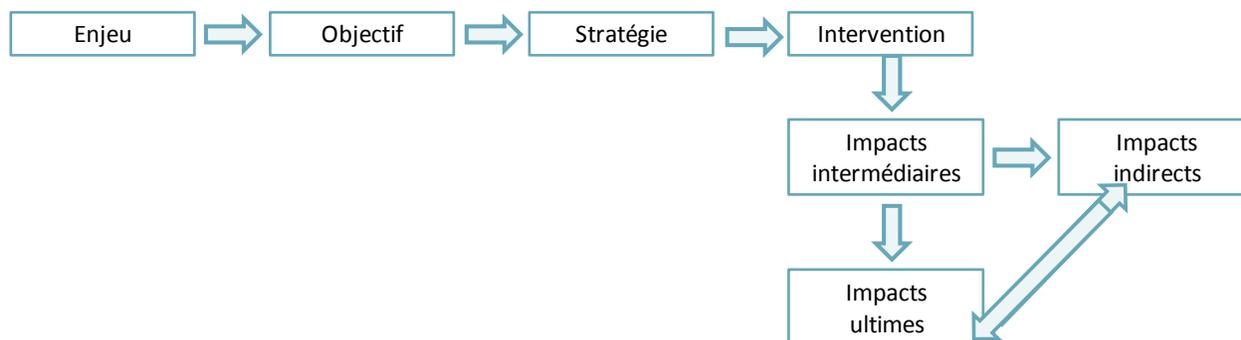
## **1.4 Les relations de causalité**

Les modifications de l'offre de transport, de la demande de transport et des impacts qui en résultent sont connectées par des relations de cause à effet. Giorgi (2003) affirme d'ailleurs que ce qui manque le plus aux indicateurs de la mobilité durable est l'axe des interrelations. Cette dernière section du chapitre présente l'état des connaissances concernant ces relations de causalité, les principaux constats et enfin une brève synthèse de cette revue de littérature.

### **1.4.1 Concept de base et objectifs généraux**

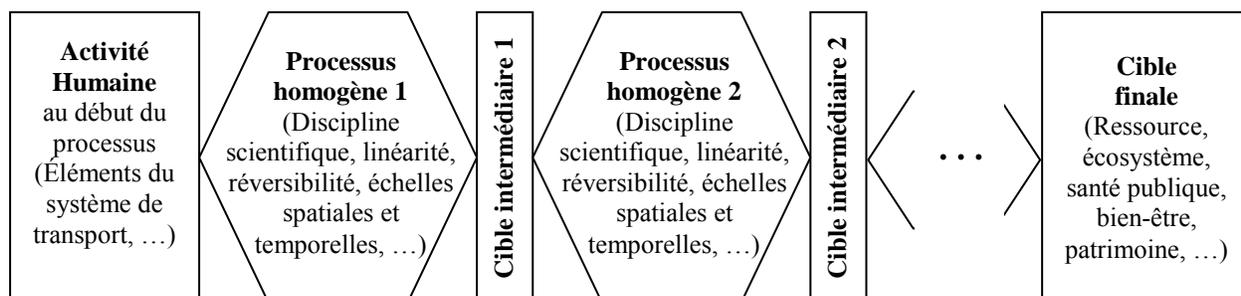
L'étude des relations de causalité consiste à tracer l'anatomie des causes et des effets autour d'un enjeu (Overseas Development Institute, 2009). Lorsqu'on parle plus spécifiquement de chaînes

de causalité, il s'agit d'une représentation des liens qui existent entre une intervention et les aspects qu'elle influence (Briones et al., 2004; Marsden, 2007a). La Figure 1-6 illustre ce concept.



**Figure 1-6 : Schéma explicatif d'une chaîne de causalité  
(traduit et adapté de C. Morency & Demers, 2012)**

Joumard et al. (2011) affirment qu'une chaîne de causalité est composée de trois sections principales qui sont, dans l'ordre, (1) les activités humaines, (2) les éléments décrivant le processus de cause à effet et (3) les objectifs visés.



**Figure 1-7 : Schéma explicatif d'une chaîne de causalité (traduit de Joumard et al., 2011)**

De manière générale, le concept de chaînes de causalité s'inscrit dans une volonté de :

- fournir un portrait systématique du système de transport complet (Richardson, 2005) en incluant tous les types de processus causaux (culturel, psychologique, psychophysique, biologique, physique, etc.) (Joumard et al., 2011);
- modifier la tendance dans l'évaluation d'impacts habituellement réalisée rétrospectivement, pour passer à une évaluation prospective (Briones et al., 2004) dotée de bases solides (Douthwaite et al., 2007);

- offrir une structure conceptuelle expliquant la logique d'influence des options stratégiques (activités, projets) sur les changements dans les comportements (outputs), ainsi que sur leurs impacts (outcomes) (Douthwaite et al., 2007; Joffe & Mindell, 2002);
- améliorer la compréhension d'un problème, ainsi que des causes interconnectées et contradictoires (Overseas Development Institute, 2009);
- identifier les facteurs qui influencent les enjeux reliés à la mobilité durable et illustrer les interactions entre ces facteurs d'influence (Richardson, 2005) de façon à ce que cela intègre les boucles rétroactives (Briones et al., 2004) et les interactions entre le contexte, l'offre de transport, les comportements de mobilité et les impacts sociaux, économiques et environnementaux.
- arrimer les aspirations locales avec les stratégies nationales (Nisbet, 2000);
- contribuer à la connaissance en testant les théories implicites et potentielles afin d'établir de nouvelles théories scientifiques (Douthwaite et al., 2007), ainsi qu'en validant les théories scientifiques dans différentes conditions (Douthwaite et al., 2007).

#### **1.4.2 Utilité pour les planificateurs**

Les planificateurs réalisent des analyses basées sur les chaînes de causalité pour :

- illustrer et décomposer la série d'impacts qu'engendrent différentes interventions ou la contribution de différentes composantes du service, et les lier aux changements observés, aux résultats désirés et aux objectifs (Briones et al., 2004; Joffe & Mindell, 2002; Nisbet, 2000; Richardson, 2005; Springer-Heinze, Hartwich, Henderson, Horton, & Minde, 2003);
- articuler les théories implicites et potentielles et, lorsqu'approprié, suggérer la théorie scientifique sous-jacente (Douthwaite et al., 2007);
- identifier les informations et preuves manquantes, ainsi que les données à se procurer (Joffe & Mindell, 2002; Overseas Development Institute, 2009);
- examiner les impacts futurs, tant ceux envisagés que ceux non désirés ou non attendus (Briones et al., 2004; Douthwaite et al., 2007; Joffe & Mindell, 2002);
- identifier les indicateurs permettant de mesurer à la fois les impacts ultimes et intermédiaires (Briones et al., 2004; Springer-Heinze et al., 2003), au besoin à l'aide de proxys (Nisbet, 2000);

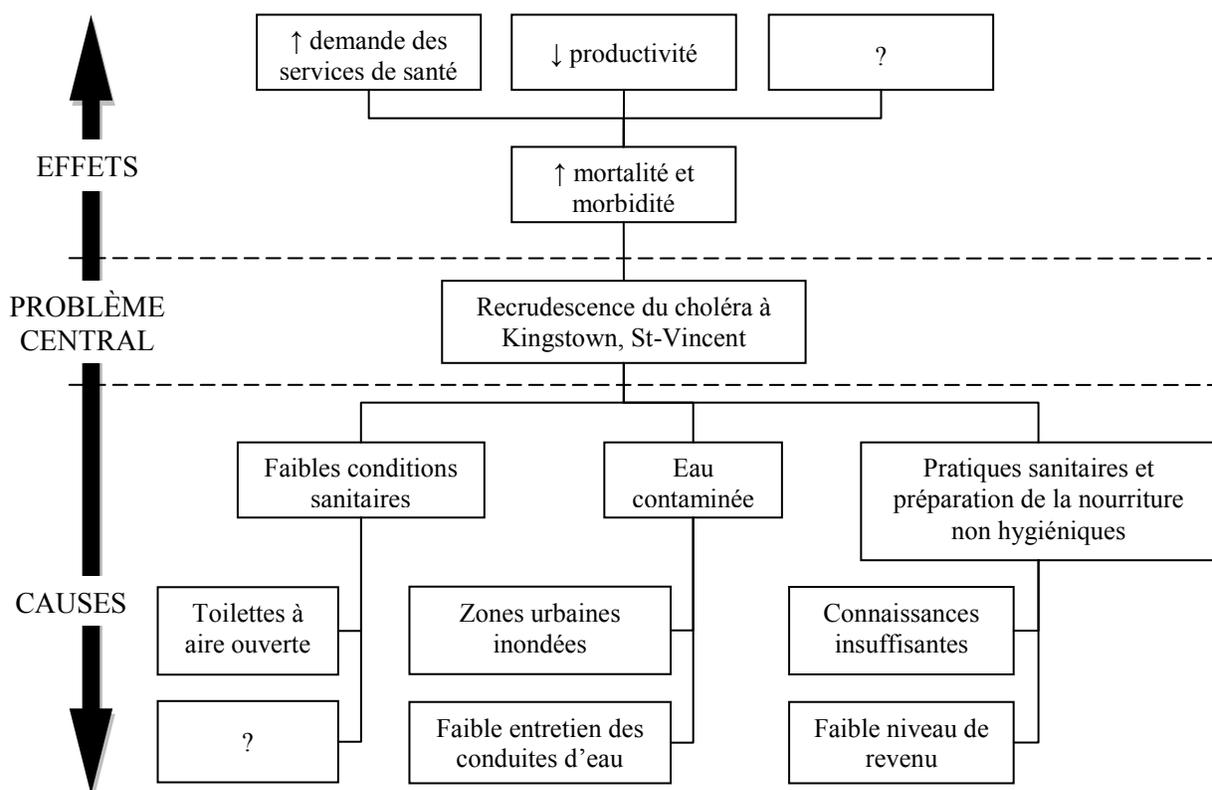
- identifier les possibilités d'intervention (Richardson, 2005) et les prioriser (Overseas Development Institute, 2009).

### 1.4.3 Différentes approches et exemples

Cette section montre quelques exemples intéressants de représentations intégrant le concept de relation de causalité.

#### *Analyse de l'arbre des problèmes (« Problem tree analysis »)*

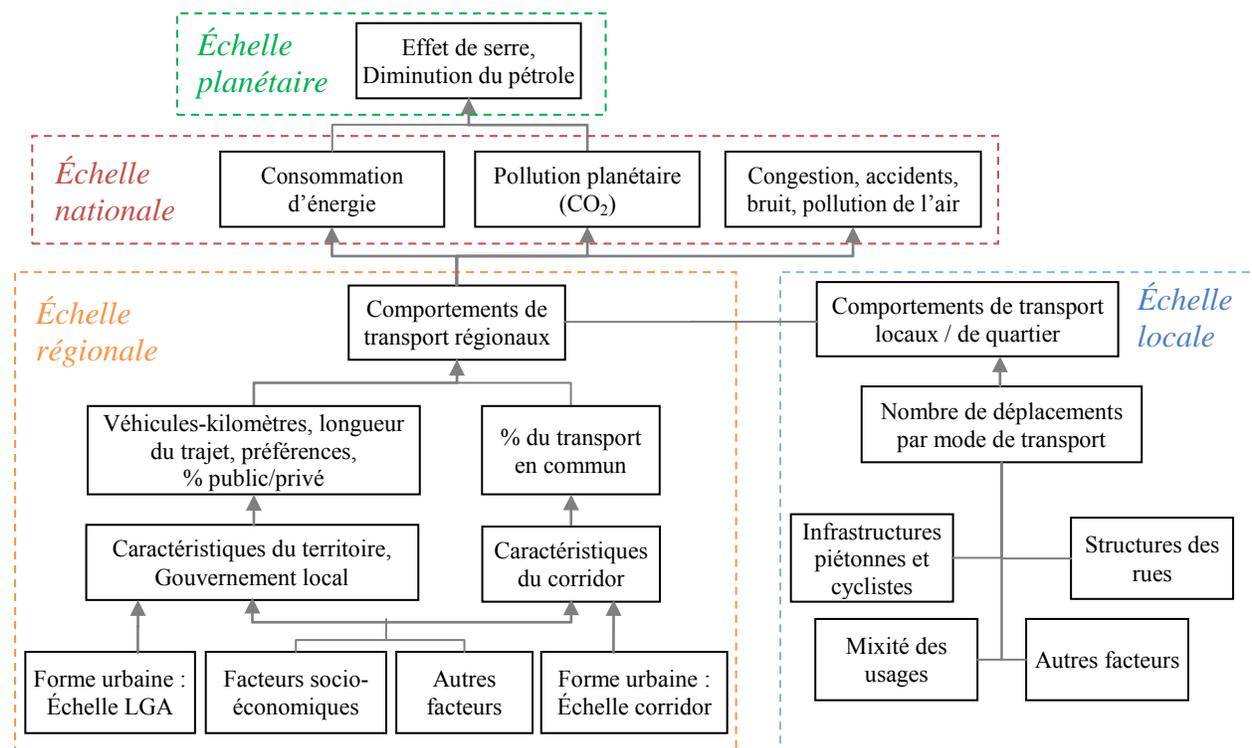
Cette méthode consiste à placer l'enjeu au centre du schéma, et à noter les effets au-dessus (tels des branches) et les causes en-dessous (telles des racines) (Overseas Development Institute, 2009). Un exemple sur le choléra est illustré à la Figure 1-8. Ce type d'analyse est orienté sur les relations de causalité sans toutefois construire des chaînes.



**Figure 1-8 : Exemple d'arbre à problèmes, appliqué au choléra (traduit de Overseas Development Institute, 2009)**

### Diagrammes hiérarchiques

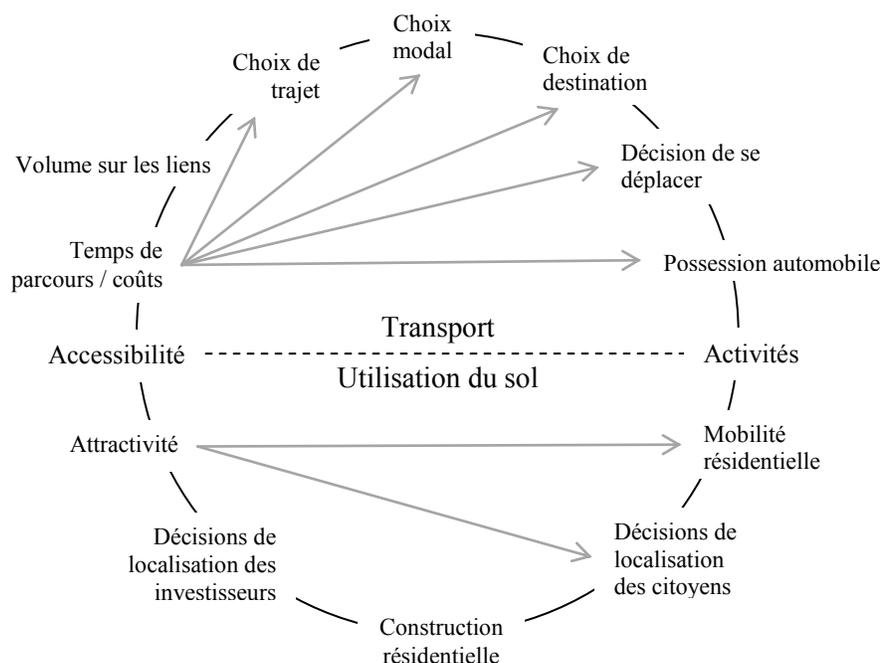
Black, Paéz, & Suthanaya (2002) construisent des diagrammes hiérarchiques liés à la mobilité durable. Celui montré à la Figure 1-9 regroupe les effets de la forme urbaine sur différents enjeux de la mobilité durable.



**Figure 1-9 : Liens entre la forme urbaine et les transports durables (traduit de J. A. Black et al., 2002)**

### *Cycle rétroactif de l'aménagement et des transports*

En représentant son cycle rétroactif de l'aménagement et des transports (Figure 1-10), Wegener (2004) exploite à sa manière le concept de relations de causalité. Ce cycle considère à la fois aménagement et transport, et mélange les changements à courts, moyens et longs termes.



**Figure 1-10 : Cycle rétroactif de l'aménagement et des transports (Wegener, 2004)**

### *Cadre d'analyse de la mobilité durable*

Richardson (2005) a développé un cadre d'analyse spécifiquement pour la mobilité durable. Deux diagrammes en résultent : un pour les marchandises et un pour les personnes (Figure 1-11). Pour ce dernier, cinq impacts ultimes ont été retenus pour définir la mobilité durable : la sécurité, la consommation d'essence, la congestion, l'environnement et l'accès.

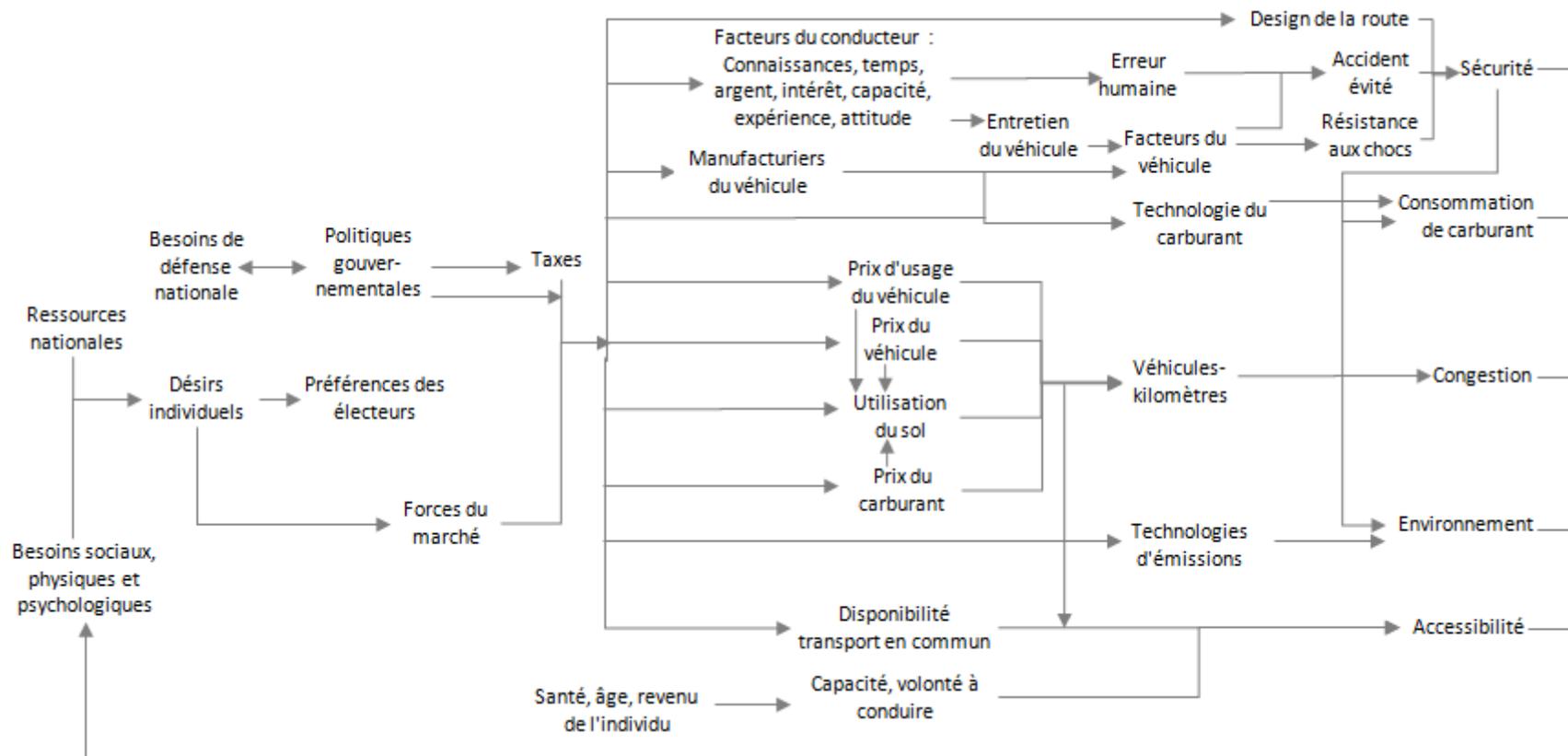


Figure 1-11 : Cadre d'analyse des transports durables appliqué aux personnes (traduit de Richardson, 2005)

### *Processus de sélection des indicateurs basé sur les chaînes de causalité*

Dans le cadre du projet Distillate (Marsden, 2007b), l'auteur utilise le concept de chaînes de causalité pour établir un processus d'identification d'indicateurs dans une stratégie de suivi. Ce processus comprend quatre étapes :

1. identifier des indicateurs-clés pour chaque impact résultant (outcome), par exemple la sécurité routière, et les lier aux objectifs préalablement fixés (cibles);
2. lier les impacts résultants aux impacts intermédiaires, par exemple les émissions de polluants et la consommation d'énergie. Ces connexions ne sont pas nécessairement directes ou claires, et les indicateurs de type proxy sont donc possibles. Il est de plus important de considérer le degré requis de désagrégation. Cela influence la complexité et les coûts d'estimation des indicateurs;
3. connecter les éléments de la stratégie (extrants ou outputs), par exemple les véhicules-kilomètres, aux impacts intermédiaires. Cela implique de lier des actions qui seront entreprises aux impacts intermédiaires et aux impacts résultants;
4. prioriser les indicateurs en :
  - a. identifiant ce qu'on est obligé de mesurer pour d'autres instances;
  - b. identifiant ce qu'on mesure déjà;
  - c. identifiant les écarts, les manques relativement aux objectifs (s'assurer que tous les objectifs sont couverts par des éléments qui leur sont liés);
  - d. priorisant les indicateurs qui servent à plusieurs fonctions.

#### **1.4.4 Défis et problématiques**

Le développement des chaînes de causalité fait face à plusieurs défis :

- une insuffisance d'information, qui engendre des relations de causalité vagues ou mal établies (Briones et al., 2004);
- une fausse impression de linéarité dans le cas des chaînes simplifiées (Douthwaite et al., 2007). Richardson (2005) affirme que les approches cause-à-effet unidimensionnelles pour résoudre les problèmes ne sont pas appropriées pour avancer vers la mobilité durable. Les notions à connaître sur les relations de causalité sont : les disciplines

impliquées, la linéarité du processus, la réversibilité du processus, les échelles spatiales (local/global) et temporelles (terme) (Joumard et al., 2011);

- une difficulté à identifier des indicateurs appropriés le long de la chaîne d'impacts (Briones et al., 2004);
- une chaîne doit décrire tous les impacts tout en évitant la redondance (Joumard et al., 2011).

### 1.4.5 Synthèse et implications pour la thèse

Les relations de causalité, tracées à partir d'une activité jusqu'à un objectif, forment une chaîne de causalité. Bien qu'il existe différentes approches pour représenter ces chaînes, elles offrent toute une structure conceptuelle logique et confèrent une base solide à l'évaluation d'impacts. Un tel type de structure conceptuelle aide les décideurs à : dresser un portrait global, anticiper les effets d'une intervention, identifier les possibilités d'intervention, sélectionner les indicateurs à mesurer, identifier les données à se procurer, etc.

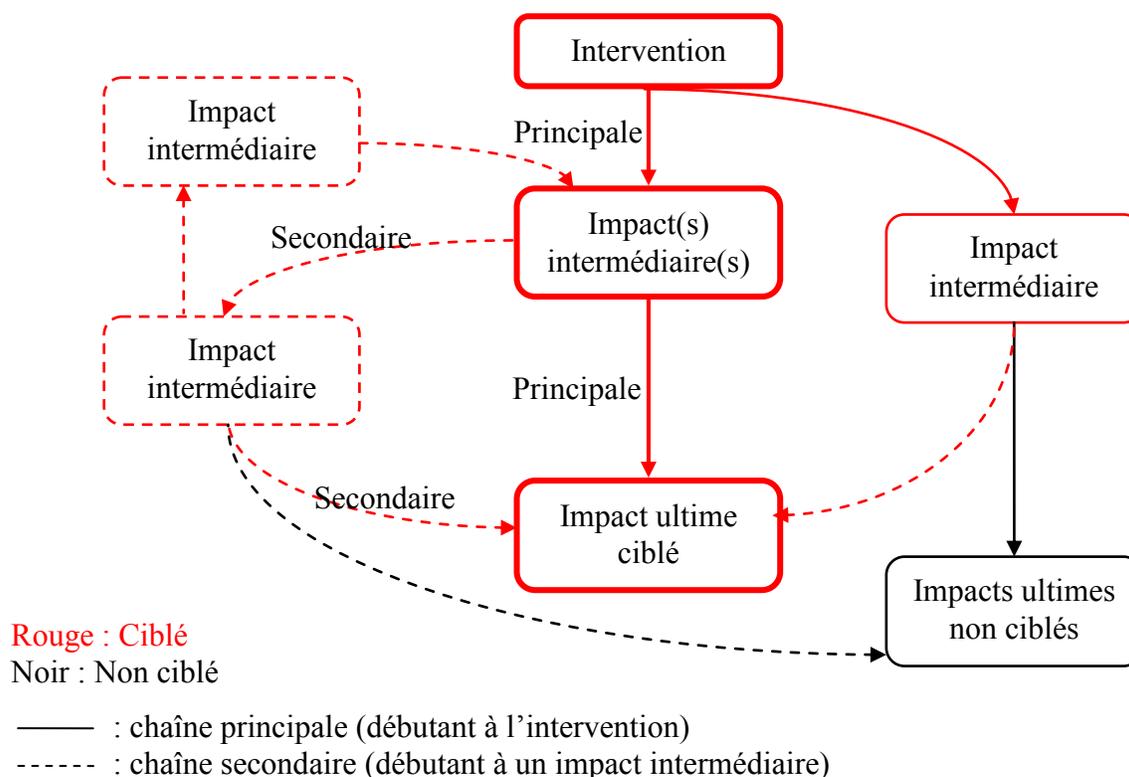
Deux constats sont présentés afin d'énoncer les défis reliés aux chaînes de causalité qui devront être relevés dans ce projet de recherche : (1) la multitude de chaînes de causalité et (2) les causalités multisectorielles.

#### *Multitude de chaînes de causalité*

Les chaînes de causalité découlant d'une seule intervention peuvent être très complexes et impliquer de nombreux impacts peu prévisibles : effets contradictoires, non désirés ou non attendus. La Figure 1-12 illustre quelques possibilités de base pouvant survenir. Imaginons un décideur qui choisit une intervention afin d'améliorer un enjeu de la mobilité durable (nommé impact ultime) qu'il a ciblé. La *chaîne principale ciblée* relie cette intervention à l'impact ultime ciblé, en passant par une série d'impacts intermédiaires [traits pleins rouges dans la Figure 1-12]. Or, de cette chaîne principale ciblée peuvent découler de nombreuses autres chaînes, notamment :

- des *chaînes secondaires* [traits tiretés dans la Figure 1-12], c'est-à-dire qu'elles débutent à un impact intermédiaire et influencent à leur tour l'impact ultime ciblé ou d'autres impacts ultimes. L'influence peut renforcer ou être contradictoire à la chaîne principale.
- des *chaînes non-ciblées* [traits noirs dans la Figure 1-12], c'est-à-dire qu'elles débutent à un impact intermédiaire et influencent un ou plusieurs autres impacts ultimes. L'influence

sur ces autres impacts ultimes peut renforcer ou être contradictoire à d'autres objectifs du décideur.



**Figure 1-12 : Schéma explicatif des types de chaînes de causalité**

Cet exercice a pour objectif de montrer que les relations de causalité sont multiples et que leur mise en commun crée des situations inattendues. Cela renforce le besoin pour le décideur de les regrouper et de les tracer. Toutefois, le diagramme des chaînes de causalité devient rapidement trop chargé et incompréhensible. Cette observation est d'autant plus vraie si plusieurs impacts ultimes sont ciblés simultanément par un décideur, de même que si plusieurs interventions sont envisagées. Parfois même, certaines chaînes de causalité peuvent créer des cycles sans fin.

Ce projet de recherche doit donc regrouper les différentes chaînes de causalité de manière compréhensible, transparente et systématique. Il doit également proposer une représentation schématique intégrant toutes ces relations de causalité, tout en gardant la possibilité de les décomposer.

### *Causalités multisectorielles*

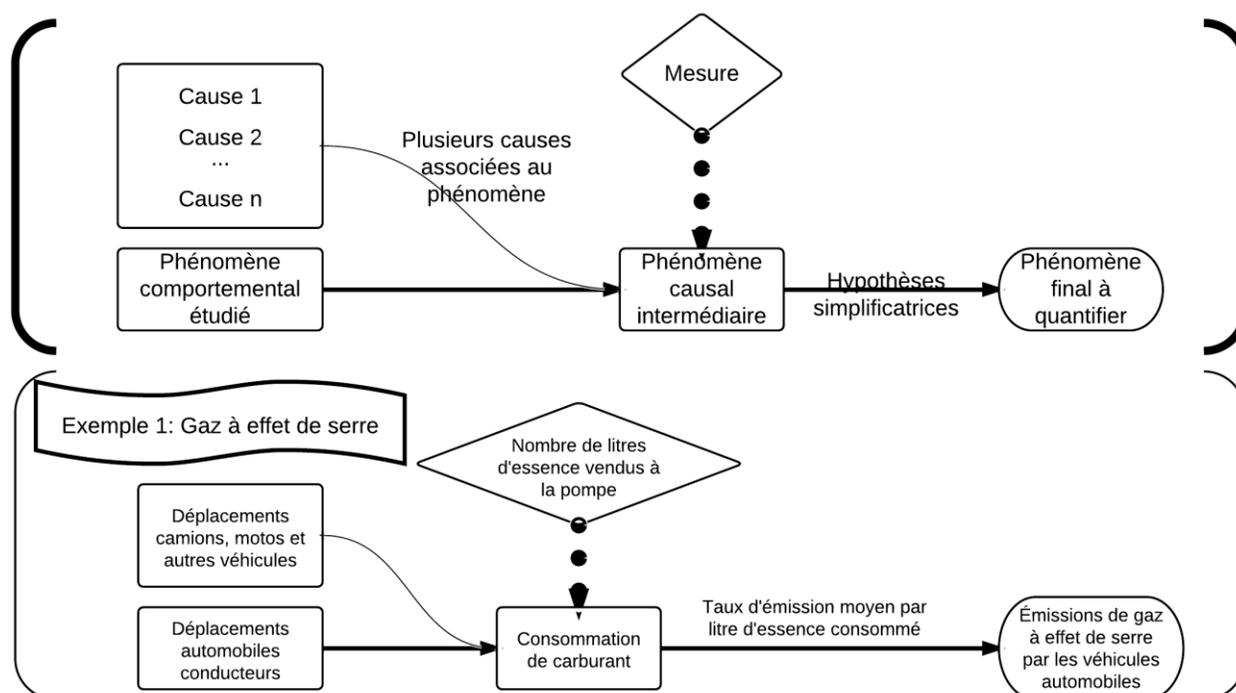
Les enjeux de la mobilité liés aux trois dimensions du développement durable ne sont pas influencés uniquement par la mobilité, mais également par d'autres secteurs d'activités humaines. Parfois, l'enjeu étudié est directement mesurable sur le terrain. C'est le cas notamment des GES qui peuvent être relevés à même des capteurs distribués sur le territoire.

Cependant, les planificateurs souhaitent habituellement quantifier la contribution d'un seul secteur en particulier (ici la mobilité) à un enjeu. Cette volonté découle du champ d'action auquel appartient le planificateur. Dans plusieurs cas, bien que le phénomène étudié soit directement mesurable globalement sur le terrain, la multisectorialité des causes empêche cette mesure de refléter la contribution d'un secteur d'activité en particulier. Dans ce cas où la mesure sur le terrain ne permet pas d'isoler la contribution de la mobilité à l'enjeu étudié, il est préférable de mesurer un impact intermédiaire situé en amont. En prenant ce dernier comme base, des hypothèses peuvent permettre d'estimer l'enjeu étudié.

Par exemple, si l'on souhaite mesurer l'apport des déplacements automobiles aux émissions de GES, il ne peut être question de faire des relevés atmosphériques dans une région car ceux-ci incluraient la contribution des secteurs d'activité industrielle. Le phénomène étudié, les émissions de GES, ne concerne que les déplacements automobiles conducteurs d'un territoire. On peut donc avoir l'idée d'utiliser la mesure d'un phénomène intermédiaire disponible, soit la quantité de litres d'essence vendus à la pompe. Cet indicateur proxy, jumelé à une hypothèse sur le taux d'émission moyen de GES par litre d'essence consommé, peut permettre d'estimer la quantité de GES émis. À l'aide du proxy, la méthode d'estimation des GES émis par les déplacements automobiles repose donc sur une hypothèse simplificatrice (le taux d'émission) qui peut diminuer la fiabilité de l'indicateur de GES, mais qui permet d'exclure les autres secteurs d'activité. Notons cependant que même cette mesure intermédiaire que sont les litres d'essence vendus est multisectorielle, car les camions achètent aussi de l'essence à la pompe. Également, l'essence peut être brûlée sur un autre territoire que celui étudié. La Figure 1-13 illustre cet exemple et sa généralisation.

Cette question est d'un intérêt particulier dans cette recherche, car elle influence la méthodologie d'estimation qui sera privilégiée pour un indicateur voué à une utilisation donnée. L'indicateur et sa méthodologie d'estimation seront choisis selon (1) le nombre et l'importance des autres

secteurs d'activités humaines impliqués pour le phénomène étudié et (2) le niveau de simplification engendré par les hypothèses.



**Figure 1-13 : Causalités multisectorielles, utilisation de proxy et hypothèses simplificatrices**

À la lumière de ces deux constats, le cadre d'évaluation de la mobilité durable développé dans ce projet de recherche devra :

- intégrer de manière systématique et transparente les chaînes de causalité tout en proposant une représentation synthétique et compréhensible de ces dernières;
- proposer des indicateurs (et leur méthodologie d'estimation) en se basant sur les relations de causalité pour éviter la redondance, le double-comptage des effets, et l'interférence d'autres secteurs d'activités que les transports.

## CHAPITRE 2 CONTRIBUTIONS VISÉES ET MÉTHODOLOGIE

Suivant l'état des connaissances et les principaux constats qui en découlent, le chapitre 2 explique les objectifs et la méthodologie générale du projet de recherche. D'abord, les contributions principales et spécifiques visées par le projet sont énoncées. Ensuite, il sera question des différentes expérimentations et analyses réalisées au cours de ce projet.

Le chapitre 2 se décompose en deux principaux volets : l'identification des contributions visées du projet de recherche et la présentation de la méthodologie générale (Figure 2-1).

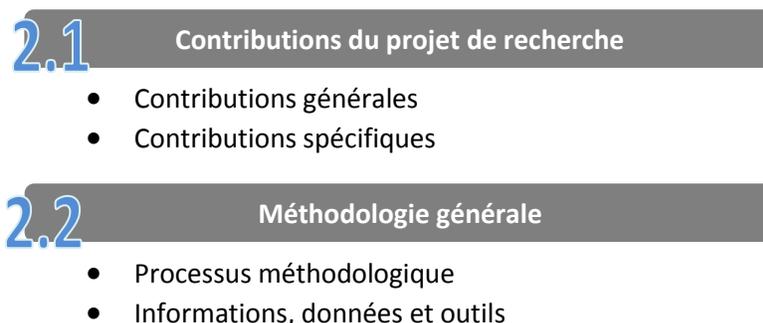


Figure 2-1 : Structure du chapitre « Contributions visées et méthodologie » (Chapitre 2)

### 2.1 Contributions visées du projet de recherche

Tel qu'expliqué dans l'introduction, ce projet de recherche a pour objectif principal de clarifier le concept de mobilité durable en vue de l'opérationnaliser. Ce projet s'inscrit dans l'objectif global de création d'un processus d'aide à la décision identifiant de façon systématique des indicateurs et leur méthodologie, afin de mesurer la mobilité durable. Tel que montré à la Figure 2-1, cette sous-section explique les contributions principales et détaillées qui sont visées par le projet de recherche, et qui jetteront les bases à l'atteinte de cet objectif global.

Il convient de rappeler d'abord brièvement les défis conceptuels et méthodologiques du projet. Les défis de substance concernent la clarification du concept de mobilité durable, la sélection et l'organisation des indicateurs liés à la mobilité durable et la mise en lumière des problématiques reliées à leur estimation. Les défis méthodologiques ont trait à la réalisation du cadre d'évaluation de la mobilité durable, à la valorisation de bases de données variées et à la proposition de méthodologies d'estimation pour les indicateurs.

### 2.1.1 Contributions générales

Deux contributions principales sont issues de ce projet de recherche.

1. L'élaboration d'un cadre d'évaluation de la mobilité durable qui :
  - clarifie et organise le concept de la mobilité durable;
  - s'adapte aux différents besoins des décideurs en transport; et
  - identifie des indicateurs pertinents à estimer.
2. L'identification de défis méthodologiques reliés à l'estimation d'indicateurs de mobilité durable à l'aide d'expérimentations qui impliquent de :
  - tester et développer différentes méthodes d'estimations;
  - valoriser des bases de données diverses et existantes; et
  - tester des indicateurs utilisés dans d'autres disciplines.

### 2.1.2 Contributions spécifiques

Chacune des contributions principales énoncées ci-haut implique les contributions sous-jacentes. Ces dernières se divisent en trois volets principaux : (1) un cadre d'évaluation, (2) une série d'indicateurs proposés liés à ce cadre et (3) des expérimentations de développements méthodologiques.

#### *1. Proposition d'un cadre d'évaluation de la mobilité durable*

- La clarification du concept de mobilité durable, par :
  - la catégorisation des enjeux de la mobilité durable;
  - l'identification des paramètres de la mobilité influençant ces enjeux;
  - l'identification d'une série de leviers d'action possibles pour les décideurs;
  - l'identification des relations de causalité entre ces enjeux et ces paramètres.
- L'élaboration d'un cadre d'évaluation adaptatif aux différents usages des décideurs, notamment :
  - l'application à un mode de transport spécifié;
  - l'identification systématique des effets d'une intervention ciblée;
  - l'identification des actions dont les effets vont dans le sens de l'objectif ciblé.

## ***2. Proposition d'indicateurs liés au cadre d'évaluation***

- La proposition d'un système d'indicateurs basé sur les réflexions issues du premier volet, ainsi que sur la volonté d'inclusion des modes émergents, sur la prise en compte des données existantes et sur la possibilité de désagrégation spatiale et temporelle. Les détails sur chaque indicateur comprennent :
  - les raisons de sa sélection et leur lien avec le cadre d'évaluation (volet 1);
  - les hypothèses et les formulations possibles;
  - les limites et les développements futurs.

## ***3. Identification de défis méthodologiques via des expérimentations***

- L'importance de la sensibilité de l'indicateur, et ce, au regard des choix méthodologiques :
  - relation entre la longueur du véhicule et la capacité d'un corridor;
  - relation entre le taux d'occupation d'un véhicule et les émissions de GES;
- Le développement d'un indicateur proxy à l'aide de mesures directes, pour l'évaluation de la congestion sur l'autoroute;
- Le développement d'un indicateur intégrant plusieurs modes de transport et bases de données, pour l'évaluation de l'équité d'accès.

## **2.2 Méthodologie générale**

La méthodologie générale suivie pour parvenir à ces contributions est présentée dans cette section. Deux éléments sont abordés successivement : le processus méthodologique général, ainsi que les informations, les données et les logiciels utilisés.

### **2.2.1 Processus méthodologique**

La Figure 2-2 résume les neuf étapes principales de réalisation du projet de recherche, divisées selon les mêmes trois volets identifiés pour les contributions spécifiques. Les paragraphes qui suivent décrivent l'approche préconisée pour chacun des trois volets.

#### ***Volet 1 - Cadre d'évaluation de la mobilité durable***

1. La constitution de l'état des connaissances, à partir de :
  - une recension des impacts de la mobilité ayant fait l'objet d'études scientifiques;

- une synthèse des enjeux de la mobilité durable abordés dans les systèmes d'indicateurs existants.
2. L'organisation des connaissances, grâce à :
    - l'identification et la catégorisation des enjeux liés à l'offre de transport, aux comportements de mobilité et aux préoccupations inhérentes au développement durable;
    - l'identification des relations de causalité et la constitution des chaînes de causalité;
    - Aux choix de représentation schématique.
  3. Le développement des fonctionnalités du cadre d'évaluation de la mobilité durable, notamment :
    - les caractéristiques interactives de l'outil;
    - les liens entre l'outil et les leviers d'action possibles pour les décideurs.

### ***Volet 2 - Boîte à outils – Proposition d'indicateurs***

À l'aide du cadre d'évaluation, une boîte à outils est proposée suivant ces deux étapes :

4. La constitution de l'état des connaissances, à partir d'une revue des indicateurs utilisés dans les systèmes d'indicateurs existants;
5. La proposition d'un système d'indicateurs avec, pour chacun, une fiche résumant les hypothèses, les formulations possibles, les limites et les perspectives.

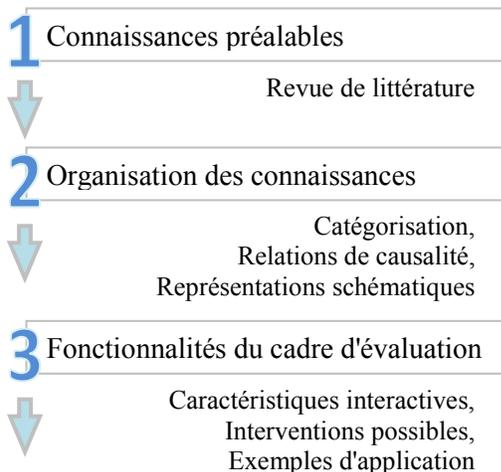
### ***Volet 3 - Expérimentations et développements méthodologiques***

Pour chacune des expérimentations, les étapes subséquentes sont franchies :

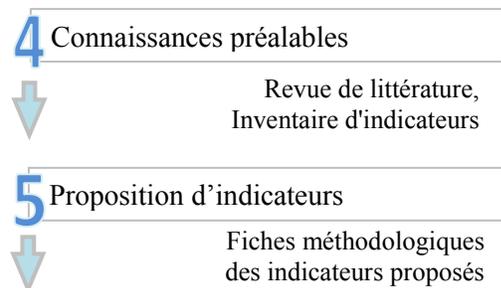
6. S'il y a lieu, la constitution de l'état des connaissances, à partir de :
  - a. une revue de littérature générale sur les défis liés aux indicateurs de mobilité durable;
  - b. une brève revue de littérature sur le sujet spécifique à l'expérimentation, soit les indicateurs traditionnels et les concepts théoriques qui y sont reliés.
7. L'énoncé des hypothèses, la réalisation des calculs préalables et les choix de différentes variantes méthodologiques à tester;
8. La présentation des résultats et des analyses de sensibilité de l'indicateur pour les différentes variantes méthodologiques;

9. L'énoncé des défis méthodologiques soulevés par l'expérimentation, ainsi que les recommandations et les perspectives relativement aux méthodes d'estimation.

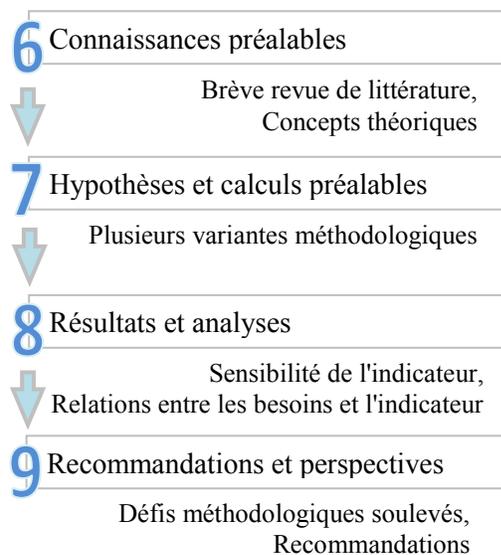
***Volet 1 - Cadre d'évaluation de la mobilité durable***



***Volet 2 – Boîte à outils***



***Volet 3 - Expérimentations et développements méthodologiques***



*Pour chacune des trois expérimentations*

**Figure 2-2 : Méthodologie générale : étapes de réalisation du projet de recherche**

## 2.2.2 Informations, données et outils

Les principaux logiciels utilisés dans ce projet de recherche sont :

- Calculs de chemins entre les origines et les destinations de déplacements : Google Maps API (Google, s. d.);
- Gestion de bases de données : Excel (Microsoft, 2014a), Visual FoxPro (Microsoft, 2014b);
- Systèmes d'information géographique : ArcGIS (Environmental Systems Research Institute [Esri], 2014), Quantum GIS (Quantum GIS Development Team, 2014);
- Statistiques : Stata (StataCorp, 2014);
- Programmation interactive : Processing (Processing Development Team, 2014);

La réalisation du projet de recherche repose sur l'information recueillie lors de la revue de littérature et sur des bases de données. Les principales informations utilisées, dont les sources de données sont décrites ultérieurement dans le document, sont les suivantes :

### *Volets 1 et 2 - Cadre d'évaluation de la mobilité durable et boîte à outils*

- Littérature sur le concept de développement durable et les impacts de la mobilité durable;
- Information sur les paramètres de mobilité influençant les enjeux;
- Inventaire des indicateurs de mobilité durable du rapport annuel de la Chaire mobilité - Polytechnique Montréal (2011);

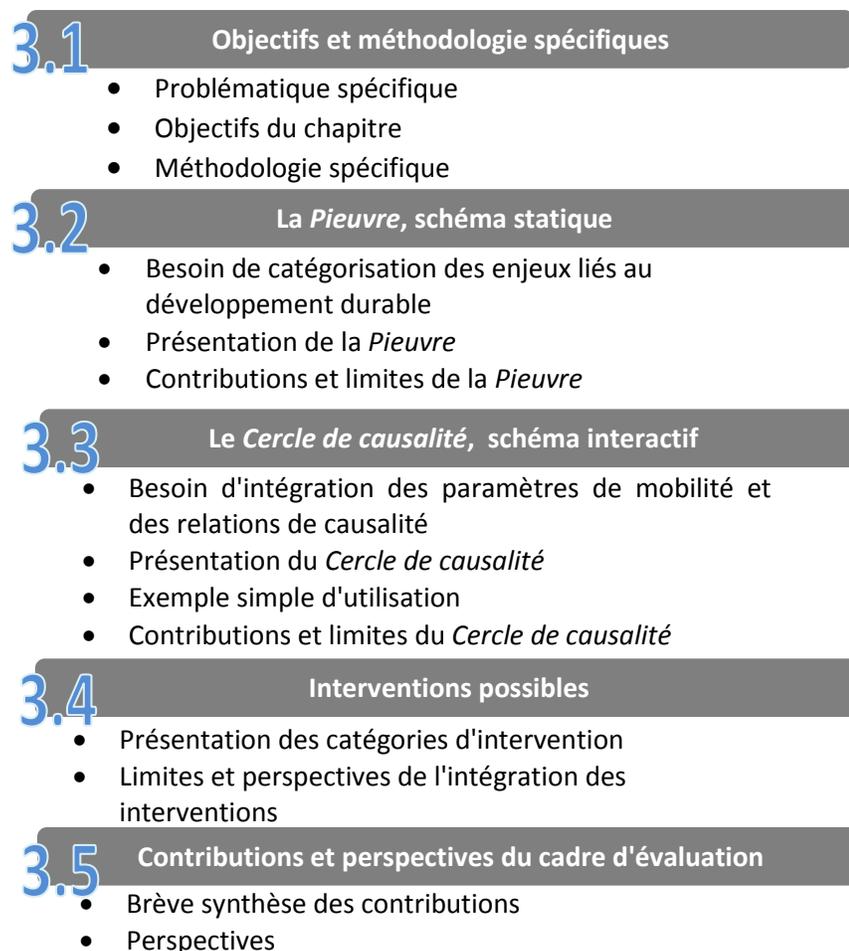
### *Volet 3 - Expérimentations et développements méthodologiques*

- Information sur les ménages, les personnes et les déplacements tirée de l'EOD 2008;
- Information sur les réseaux de routes, de transport en commun, de pistes cyclables, de vélopartage et d'autopartage;
- Information sur les véhicules, notamment la taille des véhicules, les ventes de véhicules, les taux de consommation et d'émissions des véhicules particuliers et des autobus, et la vitesse des véhicules sur le réseau autoroutier.

### **CHAPITRE 3 CADRE D'ÉVALUATION DE LA MOBILITÉ DURABLE**

Ce chapitre propose un cadre d'évaluation de la mobilité durable. Il s'agit en fait d'une représentation de la mobilité durable qui permet d'identifier de façon systématique les enjeux à considérer, tout en respectant le caractère ambigu et adaptatif du concept de développement durable.

Ce chapitre servira à identifier les indicateurs formant la boîte à outils (chapitre 4). Il est divisé en cinq sections, montrées à la Figure 3-1. La première section présente les objectifs et la méthodologie spécifiques au développement du cadre d'évaluation de la mobilité durable. La seconde section expose la tentative statique de représentation des enjeux liés à la mobilité durable, nommée « Pieuvre ». Ce premier schéma statique est suivi d'un second, celui-ci interactif et en forme de cercle. Nommé « Cercle de causalité », ce schéma permet d'intégrer à la fois les paramètres plus traditionnels de mobilité et les chaînes de causalité entre les différents enjeux. La quatrième section vise à identifier les leviers d'actions possibles pour les décideurs et à les intégrer au schéma interactif. Enfin, la section cinq fait une synthèse du cadre d'évaluation de la mobilité durable et énonce ses perspectives de développement futur.



**Figure 3-1 : Structure du chapitre 3 « Cadre d'évaluation de la mobilité durable »**

## **3.1 Objectifs et méthodologie spécifique**

Cette première section du chapitre 3 présente brièvement la problématique spécifique, qui mène aux besoins de développement d'un cadre d'évaluation de la mobilité durable. Ensuite, les objectifs sont énoncés et suivis de la méthodologie de développement de ce cadre.

### **3.1.1 Problématique spécifique**

La clarification du concept de mobilité durable implique :

- la recension des impacts bénéfiques et néfastes de la mobilité sur chacune des trois dimensions;
- la mise en évidence des relations de causalité qui existent entre ces impacts;
- la mise en évidence des relations entre ces impacts et

- les mesures et projets à mettre en œuvre en transport;
- les cibles environnementales, économiques et sociales visées par les acteurs;
- les notions de mobilité utilisées traditionnellement par les planificateurs en transport;
- La sélection d'indicateurs appropriés à mesurer.

Principalement, un outil intégrant ces objectifs pourrait servir aux planificateurs pour les fins suivantes :

- intégrer systématiquement les trois dimensions du développement durable dans un plan de transport;
- valoriser des solutions novatrices, grâce à l'identification de l'éventail des impacts d'une mesure à mettre en place, en vue d'atteindre une cible;
- faire le lien avec des organismes impliqués dans d'autres disciplines (santé publique, gestion des eaux usées, gestion des matières résiduelles, climat, biodiversité, etc.). Il s'agit notamment d'évaluer la contribution des interventions en transport à l'allègement des enjeux problématiques dans ces autres disciplines;
- mettre en évidence les paramètres de mobilité traditionnels pour lesquels la méthodologie d'estimation, le niveau d'agrégation, la collecte de données sont à développer ou à améliorer;
- mettre en évidence les indicateurs pour lesquels une méthodologie est à développer ou à améliorer.

### **3.1.2 Objectifs du chapitre**

L'objectif général de ce chapitre est de clarifier le concept de développement durable appliqué à la mobilité, et ce, pour les planificateurs et décideurs en transport. Cette clarification passe par le développement d'un processus systématique (1) d'identification des impacts causés par des mesures à mettre en œuvre par les décideurs, et (2) d'identification d'indicateurs appropriés à estimer. Le second volet est reporté au chapitre 4.

L'outil proposé doit être adaptatif selon le contexte et les objectifs de l'utilisateur, par exemple le mode de transport, les échelles et les limites spatiales et temporelles.

Plus précisément, ce chapitre vise à développer un outil d'aide à la décision qui :

- **Clarifie** la durabilité appliquée à la mobilité (mobilité durable);
- Pour une intervention ciblée, **identifie l'éventail de ses impacts** sur les trois dimensions de la durabilité.

### 3.1.3 Méthodologie spécifique

Le processus méthodologique se définit en huit étapes principales listées ci-dessous, pour lesquelles les sources de données sont mentionnées entre crochets :

1. **revue de littérature** sur les impacts de la mobilité durable sur les trois dimensions du développement durable [Section 1.2];
2. **catégorisation des enjeux de la mobilité durable** (environnement, société, économie)  
→ Représentation schématique statique : la *Pieuvre* [Processing];
3. **identification des paramètres de la mobilité** liés aux enjeux de la mobilité durable;
4. identification des **chaînes de causalité** entre tous les enjeux;  
→ Représentation schématique interactive : le *Cercle de causalité* [Processing];
5. identification et intégration des **interventions possibles** à mettre en œuvre par les décideurs [Processing, HTML];
6. identification d'**indicateurs** attribués aux enjeux [Chapitre 7] [Inventaire tiré du rapport annuel de la Chaire Mobilité – Polytechnique Montréal (2011)] [Processing, HTML];
7. énoncé des **limites**, des **potentiels** et des **perspectives** du cadre d'évaluation de la mobilité durable.

La revue de littérature réalisée à la section 1.2 du chapitre 1 est utilisée pour catégoriser les enjeux de la mobilité durable et créer la représentation schématique statique nommée la *Pieuvre* (Étapes 1 et 2). Les enjeux de la mobilité durable sont essentiellement des impacts sur l'économie, la société et l'environnement. Puis, les enjeux de la mobilité sont identifiés; ils sont liés au réseau de transport, à l'individu, au véhicule et au déplacement (Étape 3). Ensuite, les chaînes de causalité entre les enjeux de la mobilité durable et les paramètres de la mobilité sont développées et représentées de façon dynamique dans le schéma *Cercle de causalité* (Étape 4). Une liste d'interventions possibles à mettre en œuvre par les décideurs est également développée et intégrée au schéma (Étape 5). Les étapes 6 et 7, relatives aux indicateurs, sont présentées au chapitre 7. Pour les différentes représentations, leurs limites, leurs potentiels et les perspectives de développements futurs sont exposées (Étape 8).

Tel que montré à la Figure 3-2, le cadre d'évaluation final intègre donc les deux schémas (*Pieuvre* et *Cercle de causalité*), les interventions et les indicateurs. Le logiciel utilisé pour développer les schémas est Processing (Processing Development Team, 2014). Le code de programmation de Processing offre de nombreuses fonctions pré-programmées de visualisation facilitant le tracé de divers objets et textes. Aussi, Processing rend possible le caractère dynamique et interactif du schéma. En effet, le repérage de la position du curseur dans l'espace se fait aisément. De plus, Processing roule en boucle une fonction globale qui contient le code de programmation des schémas. Ceci permet la mise à jour en continu du schéma en fonction des actions de l'utilisateur et de la position du curseur. De surcroît, les schémas sont intégrés à une page Internet : ils peuvent donc être visualisés sans l'installation du logiciel Processing sur le poste de travail. Certaines actions peuvent également être faites directement sur la page Internet à l'aide, par exemple, de menus déroulants qui communiquent avec le code de Processing.

Le cadre est disponible sur Internet<sup>1</sup>. En version démo, il ne fonctionne actuellement qu'avec le navigateur Chrome (Google, 2014).

---

<sup>1</sup> [chaire-mobilite.civil.polymtl.ca/imd/imd.html](http://chaire-mobilite.civil.polymtl.ca/imd/imd.html)

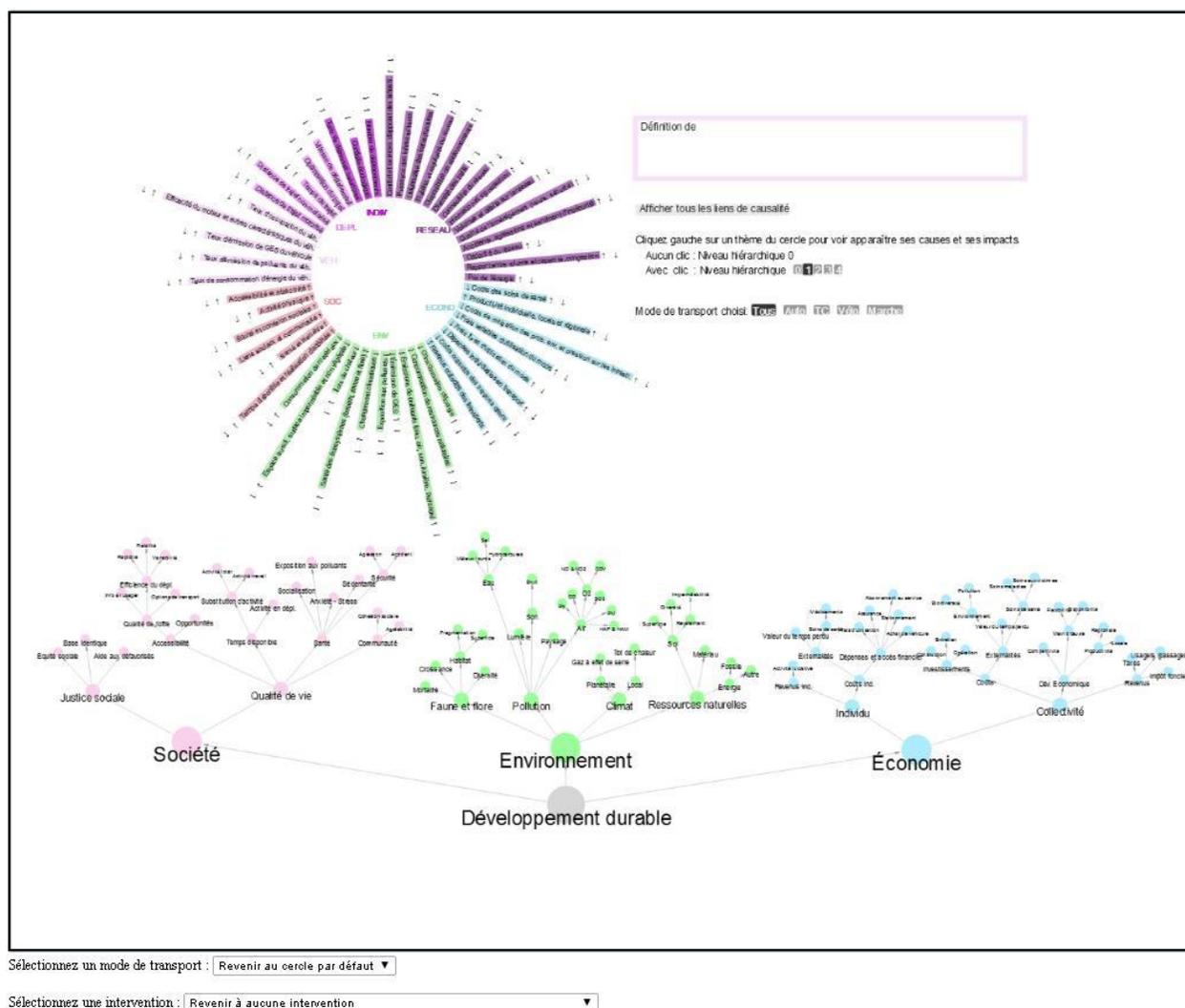


Figure 3-2 : Cadre d'évaluation de la mobilité durable, vue d'ensemble

## 3.2 La *Pieuvre*, schéma statique

Cette section expose une représentation statique des enjeux de la mobilité durable, qui ont fait l'objet d'une revue de littérature à la section 1.2. D'abord, les besoins qui justifient le développement d'une telle représentation sont expliqués. Ensuite, le schéma de la *Pieuvre* est présenté. Enfin, les limites et les potentiels de cette représentation sont énoncés.

### 3.2.1 Besoin de catégorisation

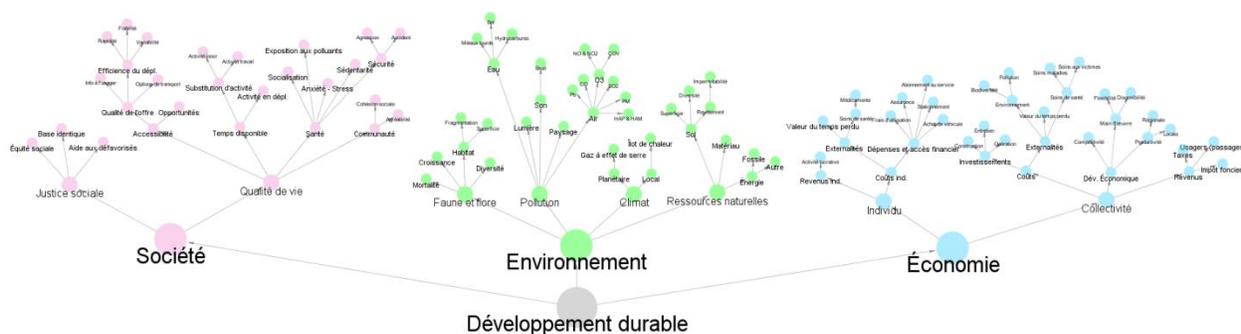
La littérature scientifique, les rapports et les politiques regorgent d'enjeux liés à la mobilité durable. Dans les politiques, les thématiques sont choisies par des décideurs publics. Elles ont

tendance à représenter les idéologies et préoccupations dominantes de la société. Elles recourent les priorités plutôt que l'ensemble des impacts bénéfiques et néfastes de la mobilité. **Sans égard à ces priorités, il a été démontré à la section 1.2 que les enjeux de la mobilité durable sont très nombreux et diversifiés, créant un fouillis qui fait ressortir la nécessité de les organiser.**

Il est donc proposé d'organiser ces enjeux à l'aide de catégories illustrées dans un arbre facilitant leur visualisation. Les catégories représentent en fait des ensembles et des sous-ensembles. **Fait important, ce schéma ne vise pas à présenter des relations de causalité : les liens tracés ne montrent que l'appartenance d'un impact de la mobilité à un thème abordé par le développement durable.** Ce point sera discuté dans une section subséquente (section 3.2.3). Ainsi, un même impact de la mobilité abordé dans la littérature sous des angles totalement différents peut se retrouver à plusieurs endroits différents dans la *Pieuvre*. Par exemple, les polluants atmosphériques dans l'air – dimension environnement – qui engendrent des problèmes de santé humaine – dimension société –, qui à leur tour engendrent des coûts collectifs en soins de santé – dimension économie.

### 3.2.2 Présentation de la *Pieuvre*

À partir de la revue de littérature (section 1.2), un très grand nombre de thématiques a été relevé et des catégories ont été dégagées afin de les hiérarchiser en un seul arbre (Figure 3-3). Chaque enjeu et chaque catégorie est illustré sous forme de bulle colorée, une couleur par dimension du développement durable. Les bulles sont reliées par des liens. Ces liens ne montrent que l'appartenance d'un enjeu à une catégorie et, ultimement, à un pilier du développement durable. Illustrée à la Figure 3-3, cette arborescence est nommée « *Pieuvre* » en raison des nombreuses branches qui font penser à des tentacules s'immisçant dans toutes les domaines de la société.



**Figure 3-3 : La Pieuvre, schéma statique des enjeux de la mobilité durable**

La bulle de départ est le développement durable. Puisque le développement durable repose sur trois dimensions (société, économie, environnement), ces dernières occupent le premier palier du schéma. Le second palier comprend les enjeux globaux auxquels la société et les individus font face relativement aux trois dimensions :

- [Vert] Environnement : la pollution, les changements climatiques, la consommation de ressources naturelles renouvelables et non renouvelables, la préservation de la faune et de la flore;
- [Rouge] Société : la justice sociale et la qualité de vie;
- [Bleu] Économie : à la fois pour l'individu et la collectivité, (1) les coûts et dépenses directes et les externalités, ainsi que (2) les revenus directs et les retombées économiques.

### 3.2.2.1 Dimension environnement

La Figure 3-4 illustre la dimension environnement. Les enjeux environnementaux répertoriés sont les suivants :

- **La pollution :**
  - La pollution de l'air par les principaux polluants atmosphériques urbains, notamment le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote (NO et N<sub>2</sub>O), les composés organiques volatils (COV), l'ozone (O<sub>3</sub>), les oxydes de carbone (CO et CO<sub>2</sub>), le plomb (Pb), les hydrocarbures aromatiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques - HAP - et hydrocarbures aromatiques monocycliques - HAM) et les particules fines en suspension (PM10 et PM2.5);
  - La pollution de l'eau par les métaux lourds et les hydrocarbures issus de la consommation d'essence, ainsi que par les sels de déglacage;
  - La pollution des sols, de la même façon que pour l'eau;
  - La pollution lumineuse par les phares des véhicules et l'éclairage des voies;
  - Le bruit issu de la circulation des véhicules à moteur;
  - La pollution du paysage par la présence des infrastructures de transport;
- Les changements **climatiques** :
  - Le réchauffement planétaire, amplifié par les émissions de GES issues des véhicules à moteur;
  - Les îlots de chaleur, à l'échelle locale, auxquels contribuent la présence des infrastructures de transport et les émissions issues des véhicules à moteur;
- La consommation de **ressources naturelles** renouvelables et non renouvelables :
  - L'utilisation d'espace au sol qui se caractérise à la fois par la superficie d'utilisation par les infrastructures, le type de revêtement des infrastructures qui influence l'imperméabilité des sols, ainsi que la diversité des usages au sol;

- La consommation d'énergie, issue de combustibles fossiles ou d'autres sources d'énergie comme l'hydroélectricité;
- La consommation de matériaux utilisés pour la construction de véhicules et d'infrastructures de transport;
- La préservation de la **faune et de la flore** :
  - La croissance des plantes affectée par les différents polluants émis;
  - La diversité des espèces fauniques et florales;
  - La mortalité des individus d'une espèce animale, suite par exemple à des collisions avec des véhicules;
  - L'habitat naturel dont la superficie et la fragmentation sont influencées par la présence des infrastructures de transport.

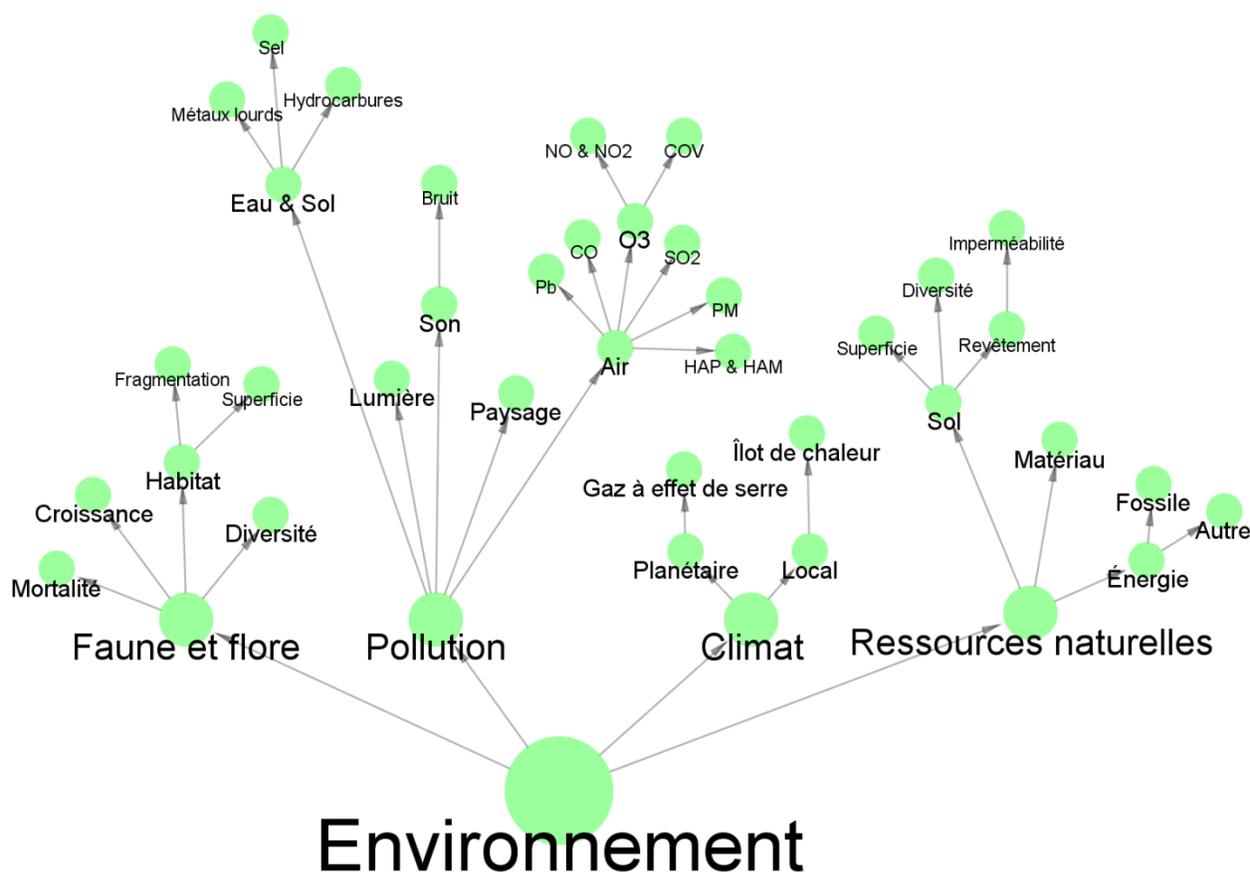


Figure 3-4 : Dimension environnement de la *Pieuvre*

### 3.2.2.2 Dimension société

La Figure 3-5 illustre la dimension société du schéma statique des impacts de la mobilité durable. Les impacts sociaux répertoriés sont les suivants :

- La **qualité de vie** :
  - L'accessibilité aux opportunités (services, emploi, ...) et aux modes de transport. L'accessibilité aux modes de transport a trait à l'accès physique et à la qualité de l'offre, qui varie selon la qualité de l'information à l'utilisateur, les options de transport disponibles (qui permet la multimodalité) et l'efficacité du déplacement (rapidité, fiabilité et variabilité du déplacement);
  - Le temps disponible incluant la réalisation d'activités autres que la conduite durant le déplacement, et la substitution du temps en déplacement par d'autres activités comme les loisirs, la famille ou le travail;
  - La santé humaine, comprenant la possibilité de socialisation, le stress engendré par le déplacement, l'activité physique réalisée lors des déplacements et qui contribue à la lutte contre le mode de vie sédentaire, l'exposition aux polluants, ainsi que les questions de sécurité (accidents) et d'agressions;
  - La communauté locale, dont l'agréabilité et la cohésion sociale sont influencées par l'aménagement des infrastructures de transport et l'utilisation de modes actifs;
- La **justice sociale** :
  - Le principe de base identique pour tous, soit l'égalité d'accès aux services;
  - Le principe d'équité sociale, soit la réduction des exclusions socio-démographiques;
  - L'aide aux défavorisés, soit l'existence d'inégalités favorisant les plus démunis.

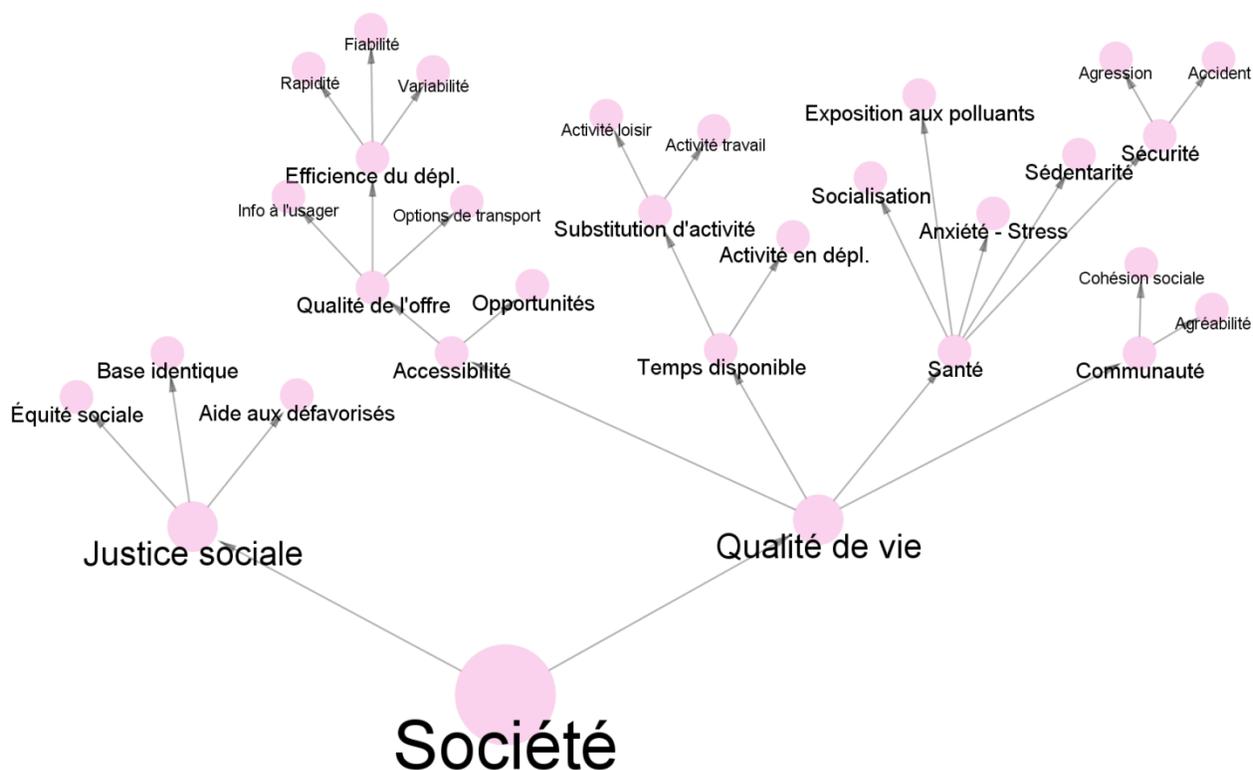


Figure 3-5 : Dimension société de la *Pieuvre*

### 3.2.2.3 Dimension économie

La Figure 3-6 illustre la dimension économie du schéma statique des impacts de la mobilité durable. Les impacts économiques répertoriés sont séparés en deux niveaux : individuel et collectif. Les impacts économiques **individuels** sont :

- Les revenus issus d'une activité travail nécessitant un déplacement;
- Les coûts :
  - Les dépenses pour avoir accès à un mode de transport, qui comprennent s'il y a lieu les frais d'utilisation, les assurances, l'abonnement à un service, le stationnement, l'achat d'un véhicule, etc.;
  - Les externalités liées aux coûts individuels en soins de santé et à la valeur du temps perdu en déplacement.

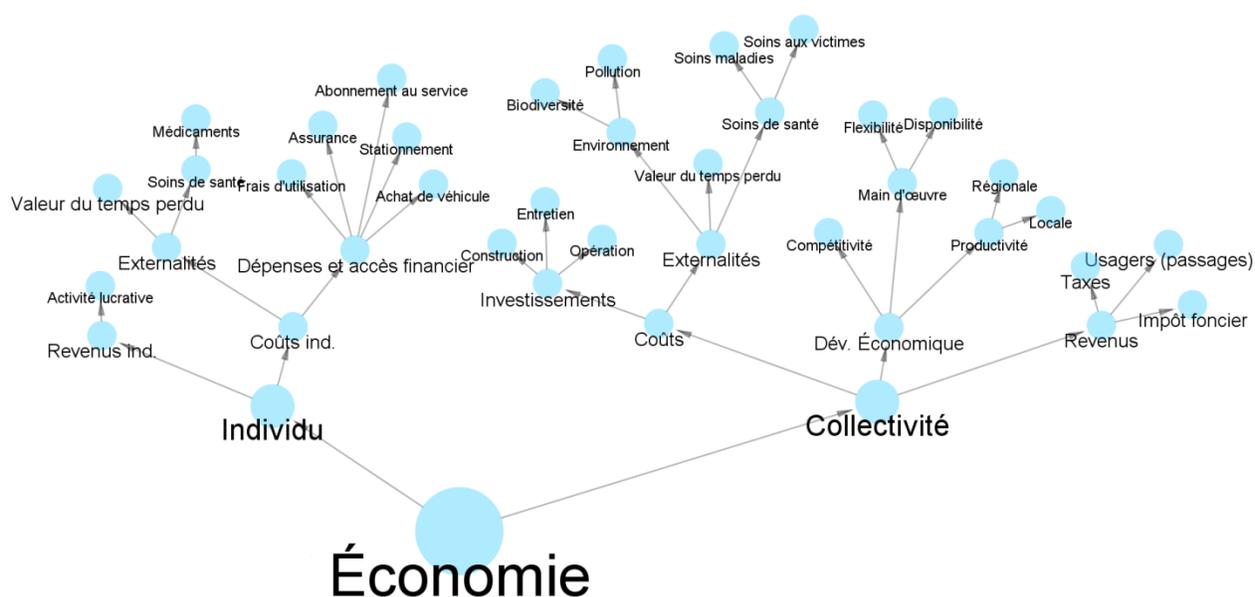


Figure 3-6 : Dimension économie de la *Pieuvre*

Les impacts économiques de la mobilité sur la **collectivité** sont :

- Les revenus issus par exemple des taxes, de l'utilisation des réseaux de transport par les usagers et de l'impôt foncier.
- Le développement économique :
  - La compétitivité du territoire à des échelles locales et régionales, accrue par des systèmes de transport efficaces;
  - La productivité de la société à des échelles locales et régionales;
  - La disponibilité et la flexibilité de la main d'œuvre, qui est influencée par la qualité de l'offre de transport.

- Les investissements pour la construction, l'opération et l'entretien des réseaux de transport;
- Les externalités liées aux coûts des systèmes de soins de santé et de soins aux victimes d'accidents, à la valeur du temps perdu en déplacement principalement en lien avec la productivité, ainsi qu'aux mesures de mitigation visant à limiter ou à contrer les impacts environnementaux comme la pollution et la perte de biodiversité.

### 3.2.3 Contributions et limites de la *Pieuvre*

#### 3.2.3.1 Contributions

La *Pieuvre* offre plusieurs avantages et potentiels. Tout d'abord, cette représentation est **vaste**, et elle clarifie **l'éventail des enjeux de la mobilité durable**. Bien que catégorisés, tous les enjeux sont représentés par une sphère, et toutes les sphères ont une importance égale. Le fait de mettre sur le même pied d'égalité tous les enjeux permet **d'apprécier leur multiplicité**. Cela **met également en valeur des enjeux qui n'occupent pas l'avant-scène dans le contexte politique actuel, ainsi que des enjeux qui sont traditionnellement associés à d'autres disciplines** que les transports.

La classification choisie est également bénéfique en plusieurs points. D'abord, la classification principale selon les trois dimensions du développement durable respecte la base d'une des deux définitions courantes du développement durable (section 1.1.2). De plus, les sous-catégories et leur disposition **offrent une structure claire**. En effet, un initié à la mobilité durable **s'y retrouvera rapidement, car la classification est logique, et ce, sans que le concept n'ait été simplifié**. Quant aux non-initiés, **cette visualisation offre un survol rapide mais vaste** de ce qui est ou peut être compris dans le concept de mobilité durable.

#### 3.2.3.2 Remarques générales

Ce schéma de la mobilité durable pour les sociétés occidentales actuelles n'a pas la prétention d'être complet : **la classification de ces thématiques est subjective et pourrait être sujette à discussion**. Certains impacts pourraient, par exemple, être placés dans une autre dimension, dépendamment du sens qu'on leur donne. Cependant, l'arborescence proposée regroupe la grande majorité des impacts de la mobilité sur le développement durable en un unique schéma, sans égard à leur acceptabilité sociale ou politique et leur possibilité de mesure. Et surtout, ce vaste énoncé des impacts, et leur représentation en un seul schéma, mettent de l'avant plusieurs

problématiques auxquelles est confronté quiconque souhaite mesurer la mobilité durable. Ces dernières sont présentées ci-après.

Tel que mentionné précédemment, on remarque la **multiplicité des enjeux** de la mobilité durable. Le schéma n'est pas lisible lorsque présenté sur du papier de format standard. C'est pourquoi la version interactive développée permet, à l'aide du curseur, de se déplacer dans le schéma, de zoomer et d'agrandir la taille des mots. Si à chacun des enjeux correspondait un indicateur, comparer deux situations différentes deviendrait rapidement un casse-tête. **Les besoins d'une représentation schématique plus concise se font sentir.**

En outre, la *Pieuvre* montre bien la **diversité d'impacts** de la mobilité sur le développement durable. Les impacts sont individuels ou collectifs, locaux ou globaux, sur un être vivant (humain, animal ou végétal) ou une composante de l'écosystème (sol, air, eau), etc. Une telle diversité d'impacts augmente la difficulté de comparaison en raison d'unités et d'ordres de grandeur complètement différents. Ces mêmes raisons font que l'agrégation en un indice global de mobilité durable est difficile. De plus, cela soulève le besoin d'une grande quantité de données diverses à recueillir et à mettre ensemble.

Non seulement les impacts ont-ils des unités différentes, mais certains sont **difficilement quantifiables de par leur aspect subjectif issu de perceptions individuelles**. Par exemple, le niveau d'agréabilité de la communauté locale est très variable selon le caractère d'un individu, ses habitudes de vie, ses capacités physiques et mentales, etc. D'autres exemples sont le sentiment d'insécurité et le confort ressentis lors d'un déplacement. Ce sont des éléments qualitatifs pour lesquels la perception de l'individu est un incontournable. Cela pose un réel défi quant à la collecte ou à la disponibilité de ces données qualitatives.

Enfin, il résulte de cette démarche une **redondance des enjeux**. Cette redondance s'explique par des interprétations différentes d'un même impact, par la volonté de regrouper plusieurs impacts ou par une interdépendance entre les impacts. Dans le premier cas, l'enjeu individuel de contribution aux taxes et aux impôts est un exemple qui recoupe l'enjeu collectif des investissements en transport. Le second cas (la volonté de regrouper plusieurs impacts) peut être illustré par l'activité physique dans la dimension société, qu'il est également possible d'aborder sous la notion monétarisée d'externalités en soins de santé. Troisièmement, les enjeux sont parfois interdépendants (Section 1.4). Ces cas sont nombreux et, parmi eux, on compte

évidemment la consommation de carburant fossile qui, lorsque brûlé, émet des polluants atmosphériques. Cette redondance d'enjeux vient du fait qu'ils sont liés par des relations de causalité. Il sera donc nécessaire de les considérer lors de la sélection des indicateurs de mobilité durable. De surcroît, cela complexifie l'éventuelle agrégation en un seul indice global : il faudra éviter le double-comptage provoqué par la redondance des enjeux. Le double-comptage aurait une incidence sur la prise de décision en donnant plus de poids aux enjeux redondants.

### 3.2.3.3 Lacunes de la *Pieuvre*

Ainsi, la visualisation et la synthèse deviennent difficiles en raison de la grande taille du schéma et de la grande quantité de bulles. Les relations de cause à effet peuvent engendrer la redondance de certains impacts de la mobilité. Or, ces relations de causalité ne peuvent être représentées clairement dans ce type de schéma statique. En effet, relier les impacts entre eux ajouterait des lignes transversales et créerait un barbouillage duquel on finirait par ne rien distinguer. Donc, **ajouter des traits pour toutes les relations de causalité alourdirait le schéma et le rendrait incompréhensible.**

De surcroît, dans ce schéma statique, **il manque une mise en relation avec les notions de transport couramment utilisées par les planificateurs en transport** : les interventions possibles à mettre en place, les cibles potentielles à atteindre, ainsi que les paramètres d'offre et de demande traditionnellement estimés.

Afin d'alléger le schéma, d'en faciliter la compréhension et de maximiser son utilité auprès des planificateurs en transport, il sera nécessaire (1) de prioriser ou de regrouper certains enjeux, (2) de représenter les relations de causalité et (3) d'intégrer les notions de transport couramment utilisées par les planificateurs en transport.

## 3.3 Le Cercle de causalité, schéma interactif

*« Tout ce que fait un indien, il le fait dans un cercle. Il en est ainsi parce que le pouvoir de l'univers opère toujours en cercles et que toute chose tend à être ronde. »*

*Haka Sapa (1863-1950)*

Cette section explique les besoins qui ont mené au développement d'un schéma interactif pour évaluer la mobilité durable. Elle présente également ce schéma, ainsi que ses limites et potentiels.

### 3.3.1 Besoin d'intégrer les paramètres de mobilité et les relations de causalité

Nommé « Cercle de causalité », ce nouveau schéma adopte une forme circulaire afin de pouvoir représenter les relations de causalité sans nuire à la clarté du schéma. Aux enjeux de la mobilité durable sont ajoutés différents paramètres de la mobilité qui les influencent. Ces paramètres sont parfois traditionnels au domaine des transports, parfois moins usuels. Ils figurent également à l'intérieur du cercle. Le nombre d'enjeux et de paramètres influencent le diamètre du cercle, ce qui justifie certains regroupements.

### 3.3.2 Présentation du *Cercle de causalité*

Le *Cercle de causalité* est présenté globalement, puis plus spécifiquement avec tous les enjeux et liens de causalité qui les unissent. À la fin, les limites et les potentiels du schéma sont énoncés.

#### 3.3.2.1 Vue d'ensemble

Le *Cercle de causalité* est un schéma interactif dans lequel les enjeux de la mobilité durable sont disposés en forme de cercle et reliés entre eux lorsqu'il existe des relations de causalité. Le schéma a été développé avec le logiciel libre Processing et est intégré à une page Internet. La Figure 3-7 est une image réduite du cercle interactif initial.

Une partie du schéma est fixe. Le cercle est divisé en quatre sections principales auxquelles sont attribuées des **couleurs** (Figure 3-8) :

- [Rouge] Enjeux sociaux de la mobilité (« SOC »);
- [Vert] Enjeux environnementaux de la mobilité (« ENV »);
- [Bleu] Enjeux économiques de la mobilité (« ECONO »);
- [Violet] Paramètres caractérisant l'offre ou la demande de transport (28 au total) : Véhicule (5, « VEH »), Déplacement (5, « DEPL »), Individu (4, « IND »), Réseau (14, « RESEAU »).

Chaque enjeu environnemental, social ou économique est accompagné d'une flèche verticale (↓ ou ↑) indiquant le sens ultime désiré du changement (partie inférieure de la Figure 3-7). Chaque enjeu est défini dans un encadré rose en haut à droite du cercle (Figure 3-2). La liste complète se trouve à la Section 3.3.2.3. Chaque enjeu ou paramètre sera nommé un « thème » du *Cercle de causalité*.

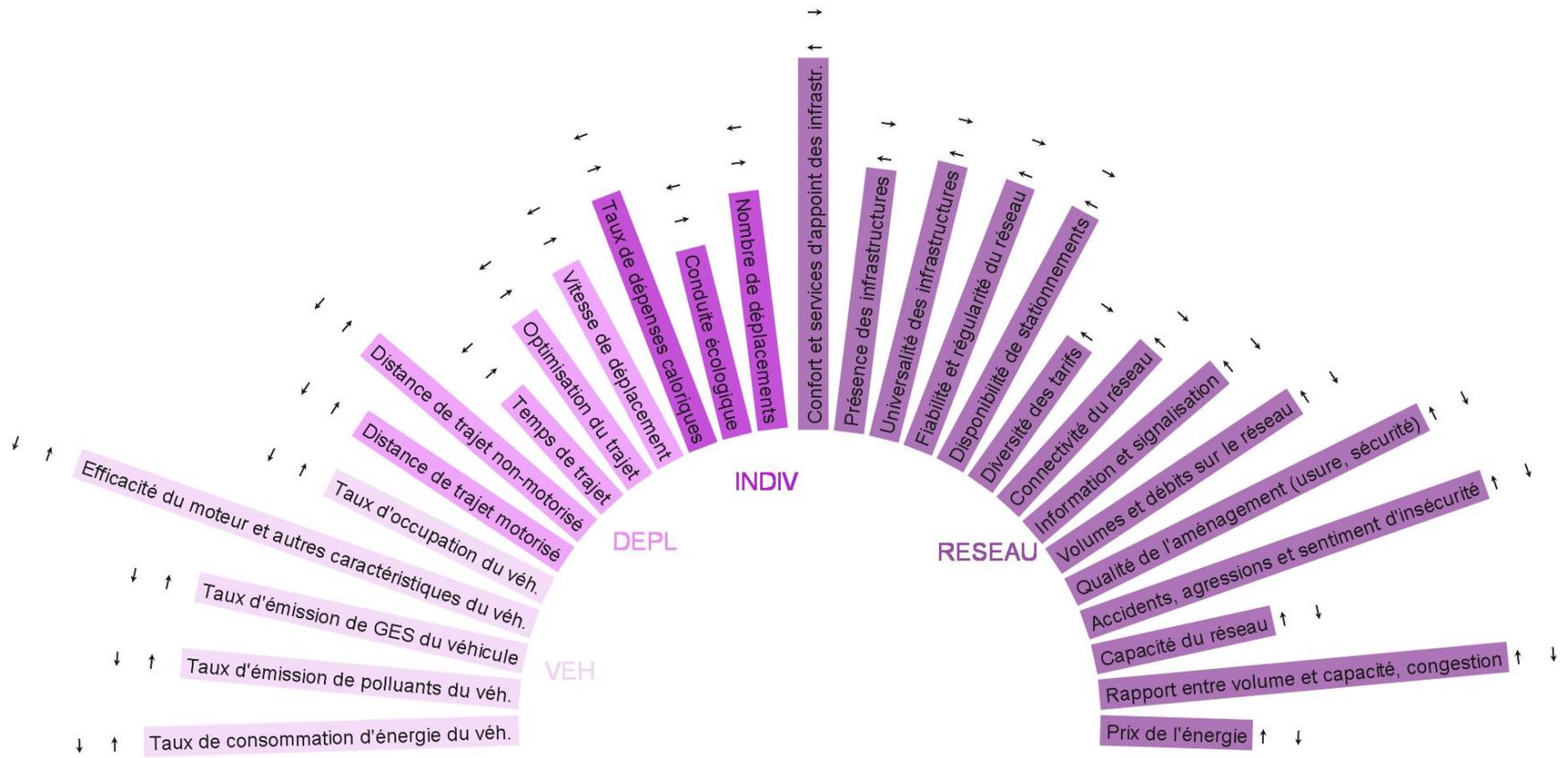


Figure 3-7 : Le Cercle de causalité initial, partie supérieure

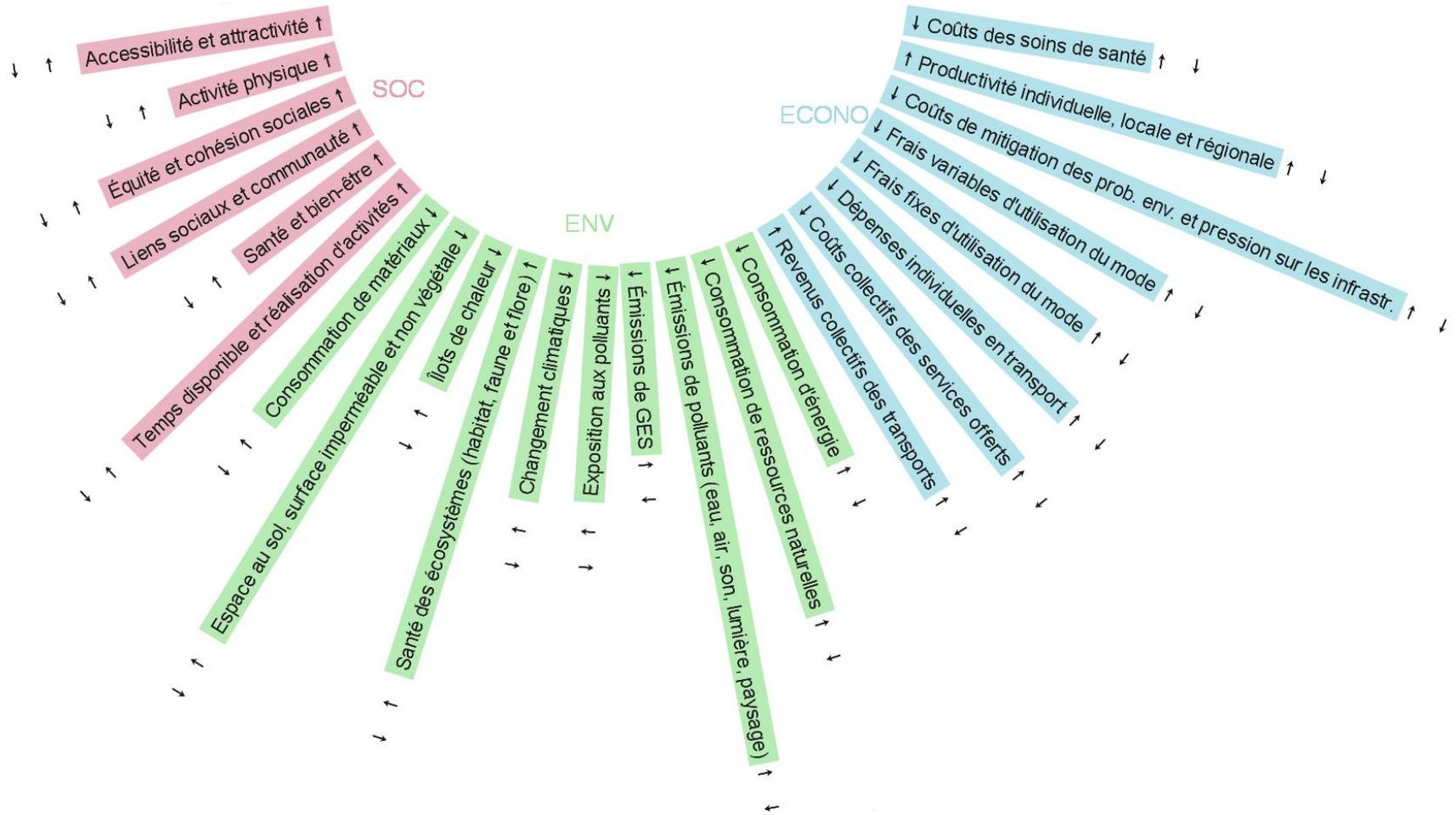
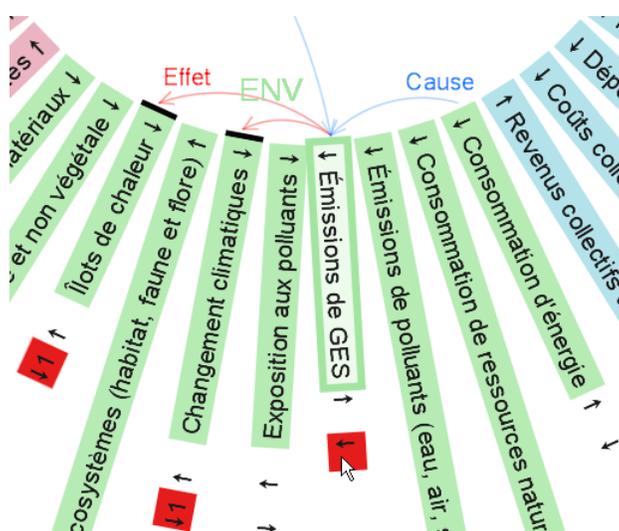


Figure 3-7 (suite) : Le Cercle de causalité initial, partie inférieure

Les descriptions qui suivent concernent la partie interactive du schéma. Les thèmes sont reliés entre eux par des flèches qui illustrent les relations de causalité. Lorsque le curseur pointe sur un enjeu A, des flèches apparaissent :

- [Rouge] la **flèche sort** de A et entre dans B : l'enjeu B est un **effet** de l'enjeu A;
- [Bleu] la **flèche entre** dans A et sort de C : l'enjeu C est une **cause** de l'enjeu A.

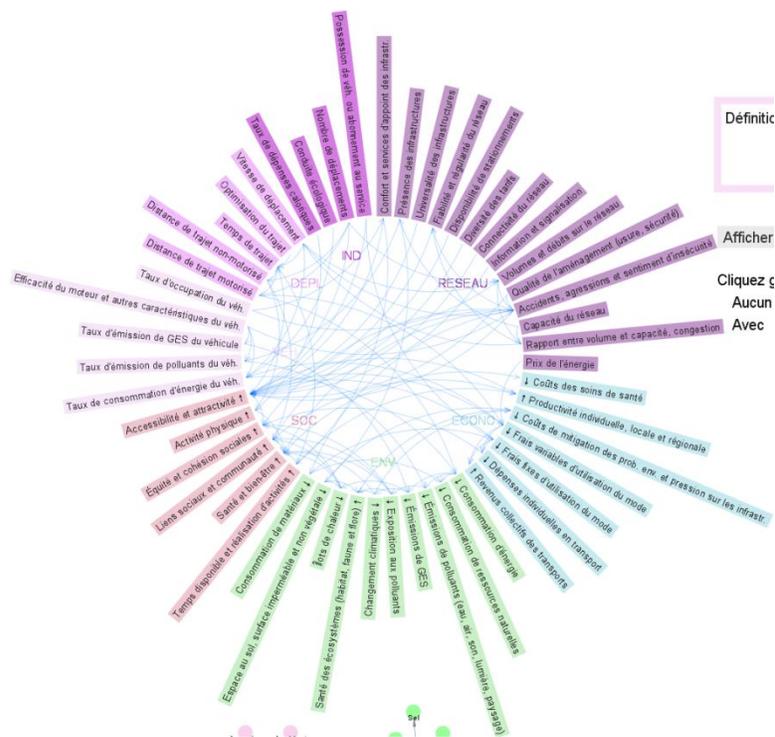
La Figure 3-8 illustre le cas simple où le curseur pointe l'enjeu « Émissions de GES ». Entre autres, il a comme effet les îlots de chaleur [flèche rouge sortante] et comme cause la consommation d'énergie [flèche bleue entrante].



**Figure 3-8 : Le Cercle de causalité, explication des flèches**

Il est évidemment possible qu'un même enjeu ait plusieurs causes ou plusieurs effets. Si le schéma n'était pas interactif et que toutes les relations de causalité apparaissaient simultanément, il en résulterait une toile confuse et peu utile, tel que montré à la Figure 3-9.

Afin d'illustrer une chaîne de causalité plutôt qu'un seul lien, il est possible de choisir un niveau hiérarchique plus élevé (1 à 4). Le niveau hiérarchique 0 (par défaut, sans clic de la souris) ne montre que les effets directs d'un enjeu, alors que les niveaux hiérarchiques plus élevés (avec clic gauche) montrent également les effets des effets de cet enjeu. Cette fonctionnalité de l'outil est décrite plus en détail à la section 0.



**Figure 3-9 : Le Cercle de causalité, affichage de toutes les relations de causalité**

Également, le schéma permet de compter le nombre de fois où un effet est touché par une relation de cause à effet. Il indique également le sens des changements provoqués par les relations de causalité (↑ pour augmentation et ↓ pour diminution). En reprenant l'exemple de la Figure 3-8, on aperçoit une case rouge « ↓ 1 » à côté de l'enjeu « Îlot de chaleur ». Cela signifie qu'une diminution des émissions de GES par les véhicules est associée à une réduction des îlots de chaleur. Un tel changement va donc dans le sens désiré (↓) de cet enjeu « Îlot de chaleur ».

### 3.3.2.2 Chaînes de causalité

Cette section présente les chaînes de causalité qui sont intégrées au *Cercle de causalité* à l'aide de neuf diagrammes. Premièrement, le sens de chaque relation de causalité est décrit par le symbole «  $x$  » ou «  $-x$  » dans les diagrammes, et de façon détaillée à l'Annexe A. Le symbole «  $x$  » signifie une relation de pente positive, soit qu'une augmentation de la cause occasionne une augmentation de l'effet. Le symbole «  $-x$  » signifie une relation de pente négative, soit qu'une augmentation de la cause occasionne une diminution de l'effet.

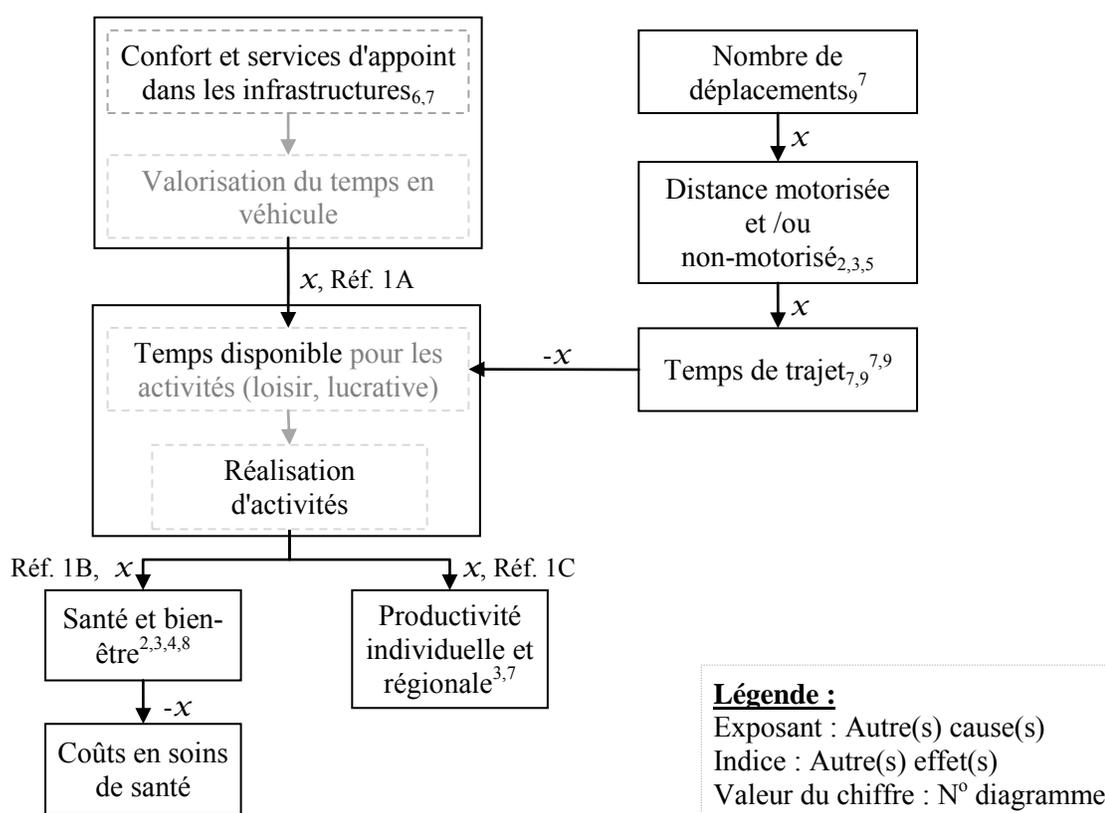
Deuxièmement, les références bibliographiques concernant les relations de causalité sont inscrites sous l'appellation « Réf. » suivie d'un code alphanumérique. Ces codes correspondent à une ou

plusieurs références détaillées à l'Annexe B. Les flèches pointillées représentent des relations pour lesquelles la littérature est trop limitée ou trop peu précise.

Troisièmement, il y a trop de relations de causalité pour les représenter dans un seul diagramme. Au total, un minimum de neuf diagrammes sont nécessaires (D1 à D9). Les valeurs en indice (effets) et en exposant (causes) dans une boîte indiquent qu'une autre chaîne dans une autre figure est reliée à cette boîte.

### **Réalisation d'activités et temps disponible** (Figure 3-10)

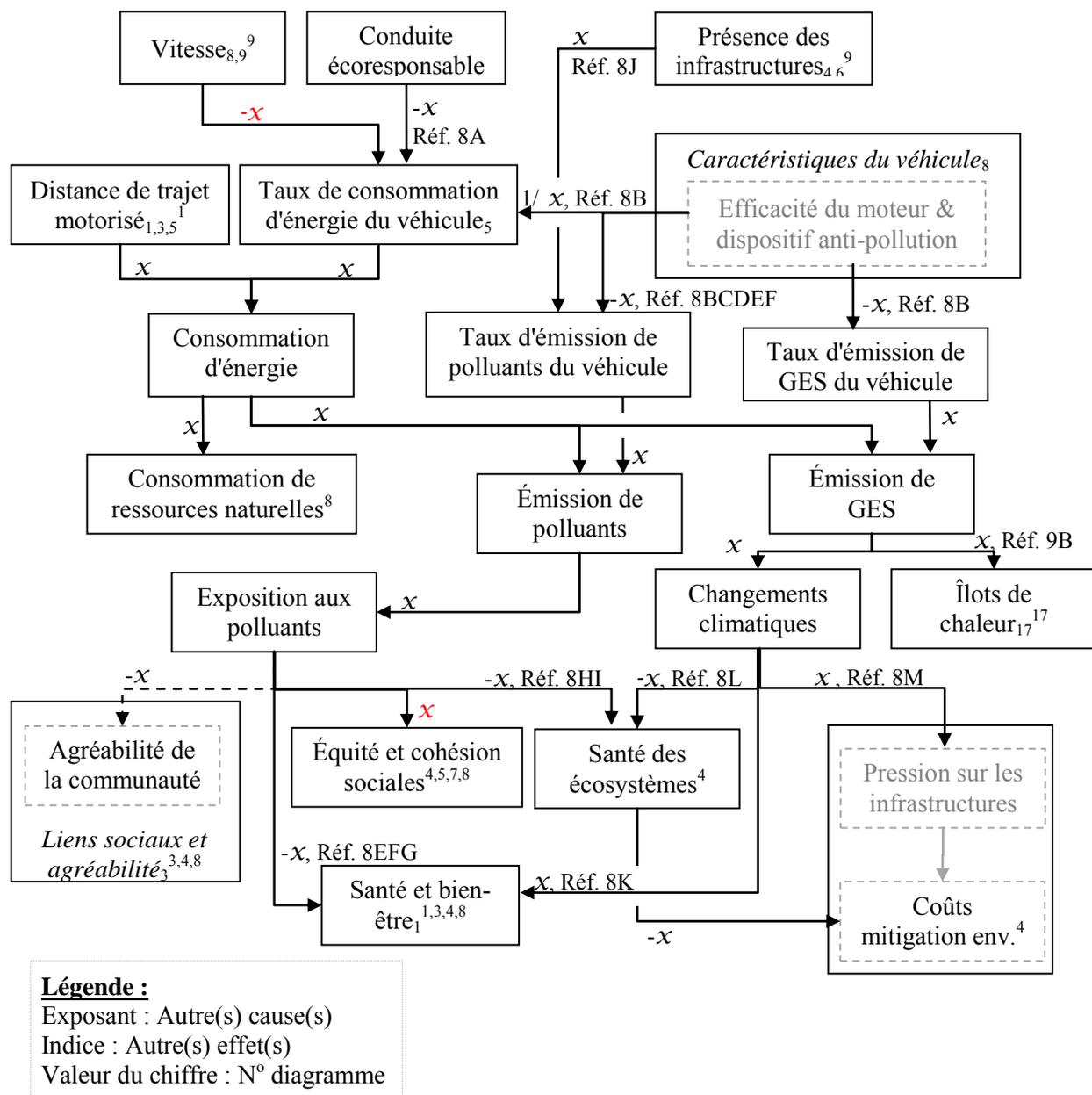
- À la fois le temps de trajet, le confort et les services d'appoint dans les infrastructures de transport influencent le temps quotidien disponible pour réaliser des activités.
- La réalisation d'activités améliore le bien-être des individus (réduisant les coûts en soins de santé) et, s'il s'agit d'activités lucratives, augmente la productivité individuelle et régionale.



**Figure 3-10 : Chaîne de causalité sur la réalisation d'activités et le temps disponible (D1)**

***Consommation d'énergie et émissions de polluants et de GES*** (Figure 3-11)

- Les caractéristiques du véhicule influencent à la fois le taux de consommation d'énergie et les taux d'émissions de polluants et de GES du véhicule.
- La distance de trajet motorisé et le taux de consommation d'énergie influencent la consommation d'énergie, et donc : la consommation de ressources naturelles, les émissions de polluants et de GES.
- L'exposition aux polluants modifie l'agrément de la communauté, l'équité sociale, la santé des individus et des écosystèmes.
- Les émissions de GES amplifient les îlots de chaleur et les changements climatiques. Ces derniers provoquent des pressions sur les infrastructures de transport ou d'autres secteurs, influencent la santé des individus et des écosystèmes.
- Les impacts sur la santé des écosystèmes et les infrastructures engendrent des coûts de mitigation à la collectivité.

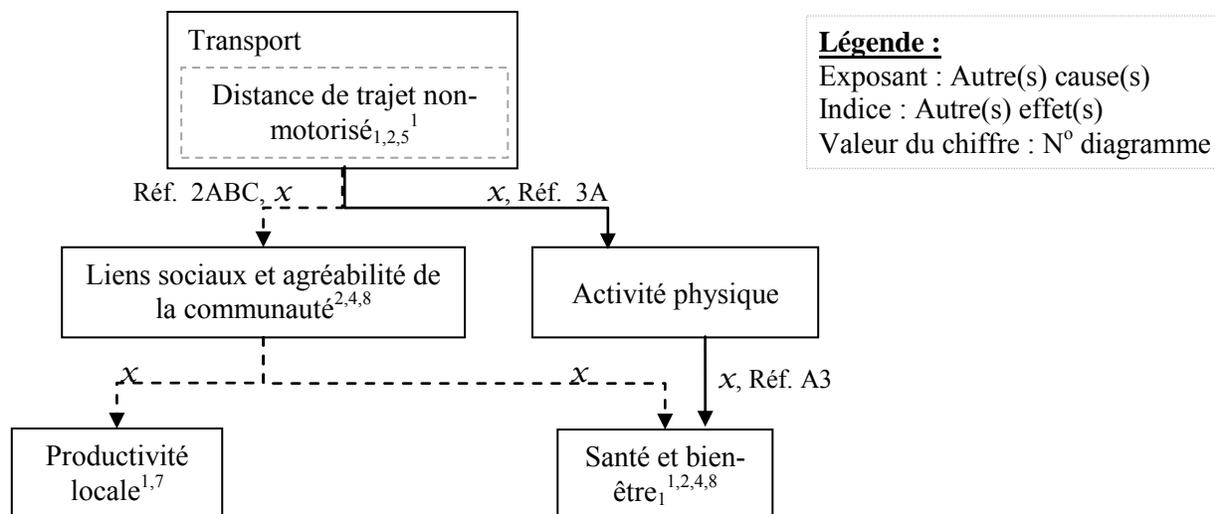


**Figure 3-11 : Chaînes de causalité sur la consommation d'énergie et les émissions de polluants et de gaz à effet de serre (D2)**

**Activité physique et développement de la communauté** (Figure 3-12)

- La distance de trajet non-motorisé et le taux de dépenses caloriques ont des effets sur la quantité d'activité physique réalisée grâce aux déplacements. La réalisation d'activité physique a des bienfaits sur la santé (réduisant ainsi les coûts en soins de santé).

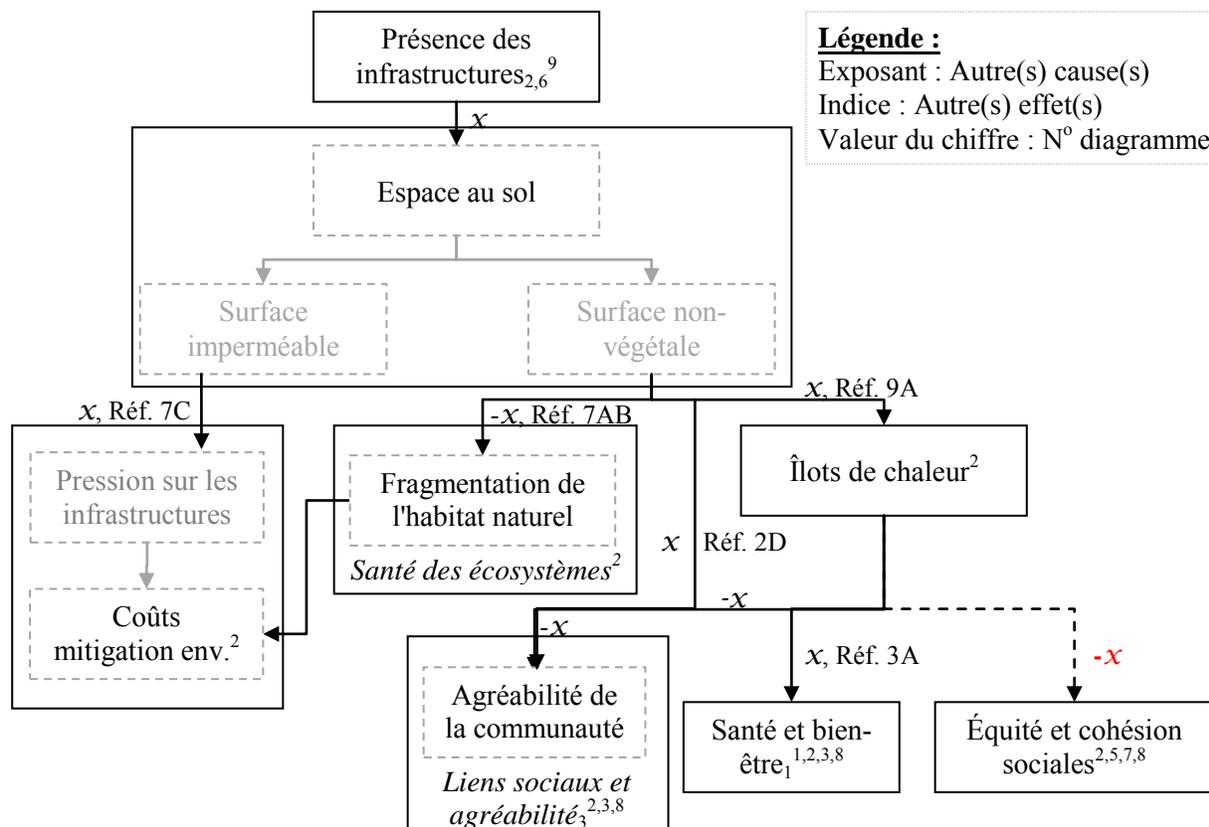
- Les distances de trajet non-motorisé réalisées à l'intérieur d'un quartier par les déplacements internes ou de transit améliorent l'agrément d'une communauté, ainsi que la probabilité d'avoir des interactions sociales.



**Figure 3-12 : Chaînes de causalité sur l'activité physique et le développement de la communauté (D3)**

### *Îlots de chaleur et espace au sol* (Figure 3-13)

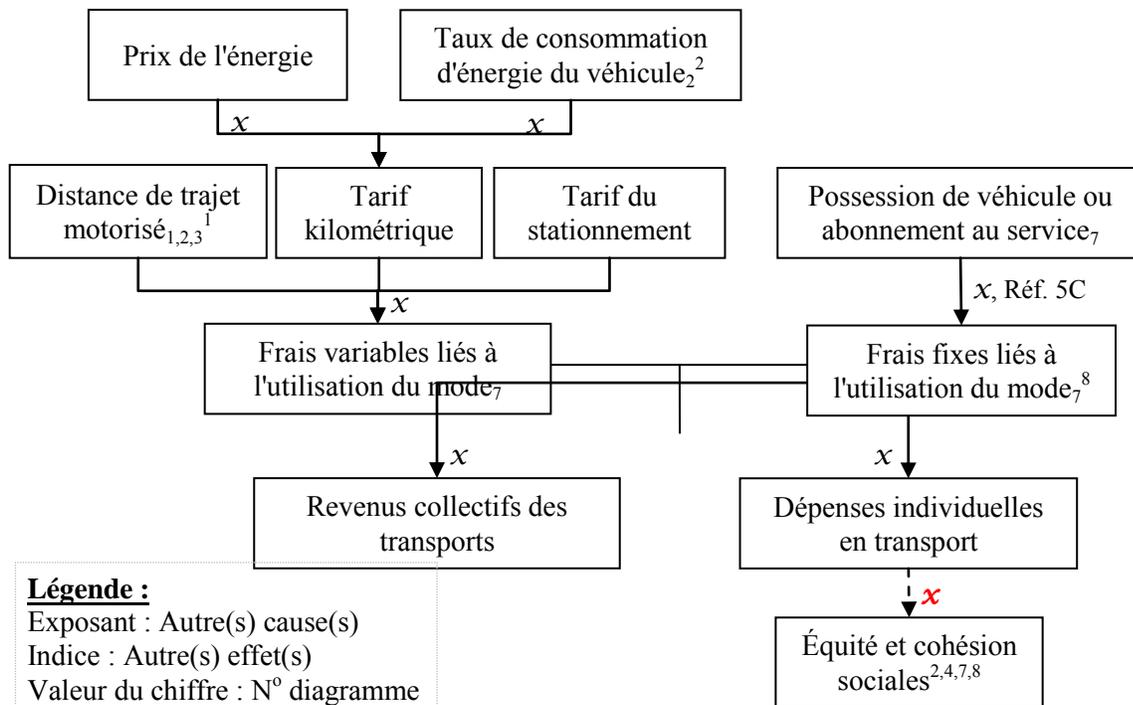
- La présence d'infrastructures représente un espace occupé au sol par une surface imperméable et non végétale :
- La surface imperméable fait pression sur les infrastructures autres que celles de transport, en particulier celles de traitement des eaux usées (et engendre des coûts de mitigation),
- La surface non végétale fragmente l'habitat naturel des espèces vivantes (et engendre des coûts de mitigation).
- La surface non végétale, avec les émissions de GES, amplifie les îlots de chaleur, ce qui réduit l'agrément de la communauté et la santé des individus, et qui modifie l'équité sociale.



**Figure 3-13 : Chaînes de causalité sur les îlots de chaleur et l'espace au sol (D4)**

**Frais variables et fixes d'utilisation d'un mode de transport (Figure 3-14)**

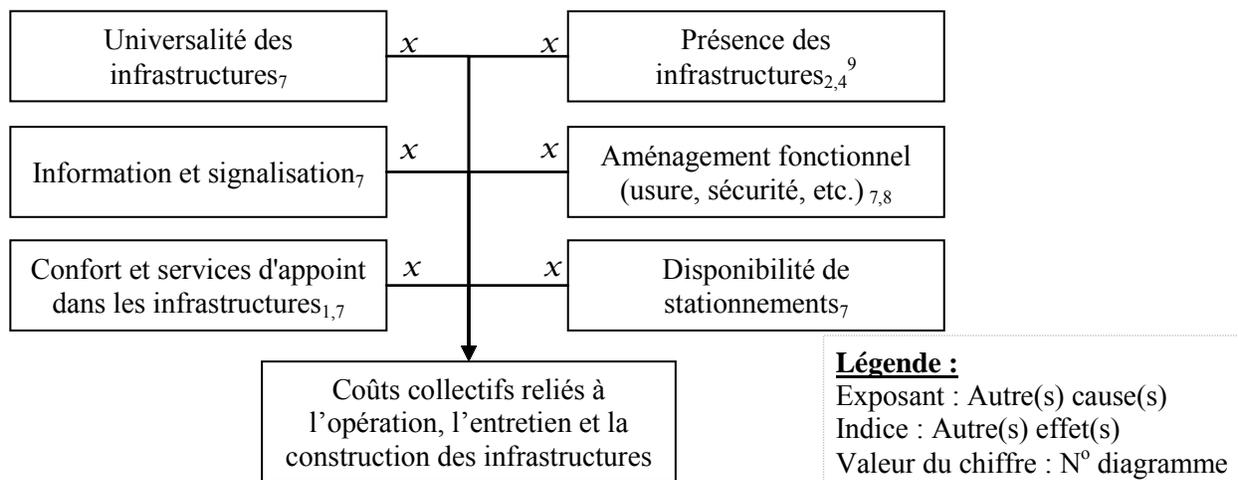
- Le prix de l'énergie et le taux de consommation d'énergie du véhicule influencent le tarif kilométrique d'utilisation du véhicule. Ce dernier, avec la distance de trajet motorisé et le tarif du stationnement s'il y a lieu, modifient les frais variables d'utilisation d'un mode de transport.
- La possession du véhicule ou l'abonnement à un service engendrent des frais fixes d'utilisation d'un mode de transport.
- Les frais fixes et variables représentent à la fois des dépenses individuelles et des revenus collectifs. Le premier peut causer des problèmes d'équité sociale.



**Figure 3-14 : Chaînes de causalité sur les frais variables et fixes d'utilisation d'un mode de transport (D5)**

### Coûts collectifs (Figure 3-15)

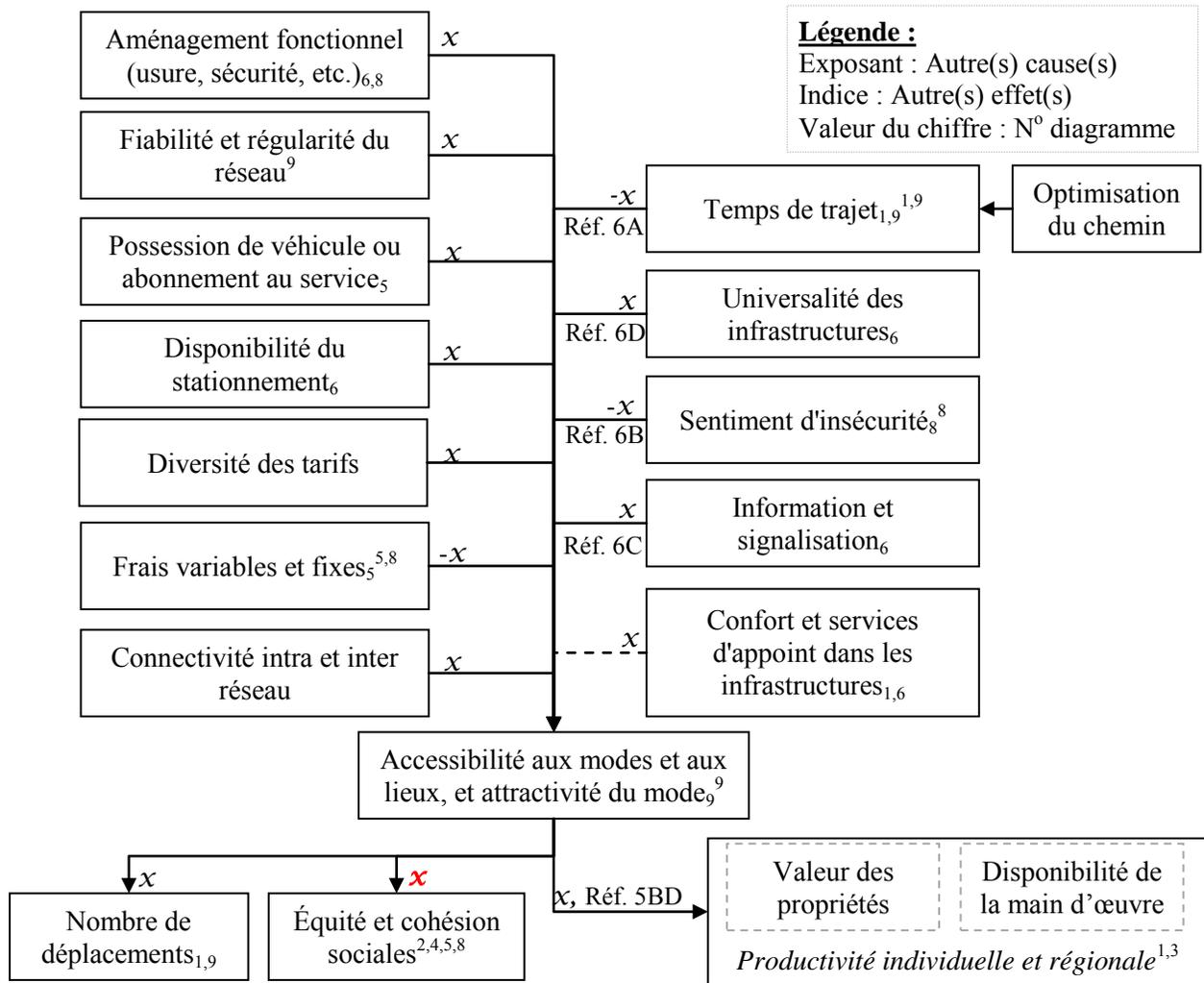
- Le caractère universel des infrastructures, leur présence, l'information et la signalisation sur l'utilisation et l'aménagement du réseau, l'aménagement fonctionnel (usure, sécurité, ...), le confort et les services d'appoint, ainsi que l'offre (et la disponibilité) de stationnement engendrent des coûts d'opération, d'entretien et de construction du réseau.



**Figure 3-15 : Chaîne de causalité sur les coûts collectifs (D6)**

*Accessibilité et attractivité* (Figure 3-16)

- Le temps de trajet (réduit avec une grande vitesse, une faible distance parcourue et un chemin emprunté optimisé pour éviter la congestion), l'universalité des infrastructures, le sentiment d'insécurité, l'information et la signalisation, le confort et les services d'appoint offerts, l'aménagement fonctionnel (usure, sécurité), la fiabilité et la régularité de l'offre, la possession de véhicule et l'abonnement au service, l'offre de stationnements, la diversité des tarifs (tarifs préférentiels), les frais fixes et variables d'utilisation du mode et, finalement, la connectivité du réseau influencent tous l'attractivité et l'accessibilité aux modes de transport et aux lieux.
- Une accessibilité accrue peut avoir un effet d'augmentation du nombre de déplacements (et donc la réalisation d'activités et les volumes et débits sur les liens), une influence sur l'équité sociale, une incidence sur la valeur des propriétés avoisinant les réseaux de transport.



**Figure 3-16 : Chaîne de causalité sur l'accessibilité et l'attractivité (D7)**

### Sécurité (Figure 3-17)

- La vitesse, les volumes et débits sur les liens, l'aménagement fonctionnel (usure, sécurité, éclairage) et les caractéristiques du véhicule (poids, taille), s'il y a lieu, influencent la fréquence et la gravité des accidents et des agressions. Elles influencent également le sentiment d'insécurité.
- Le sentiment d'insécurité modifie l'agréabilité de la communauté.
- Les accidents modifient temporairement la capacité du réseau et, donc, les débits. Ils provoquent également une usure prématurée des matériaux des véhicules, engendrant des coûts supplémentaires d'entretien du véhicule (dépenses individuelles fixes) et une consommation supplémentaire de ressources naturelles.
- Les accidents et les agressions peuvent être distribués non uniformément et ainsi influencer l'équité sociale.
- Les victimes d'accidents voient leur santé diminuer.

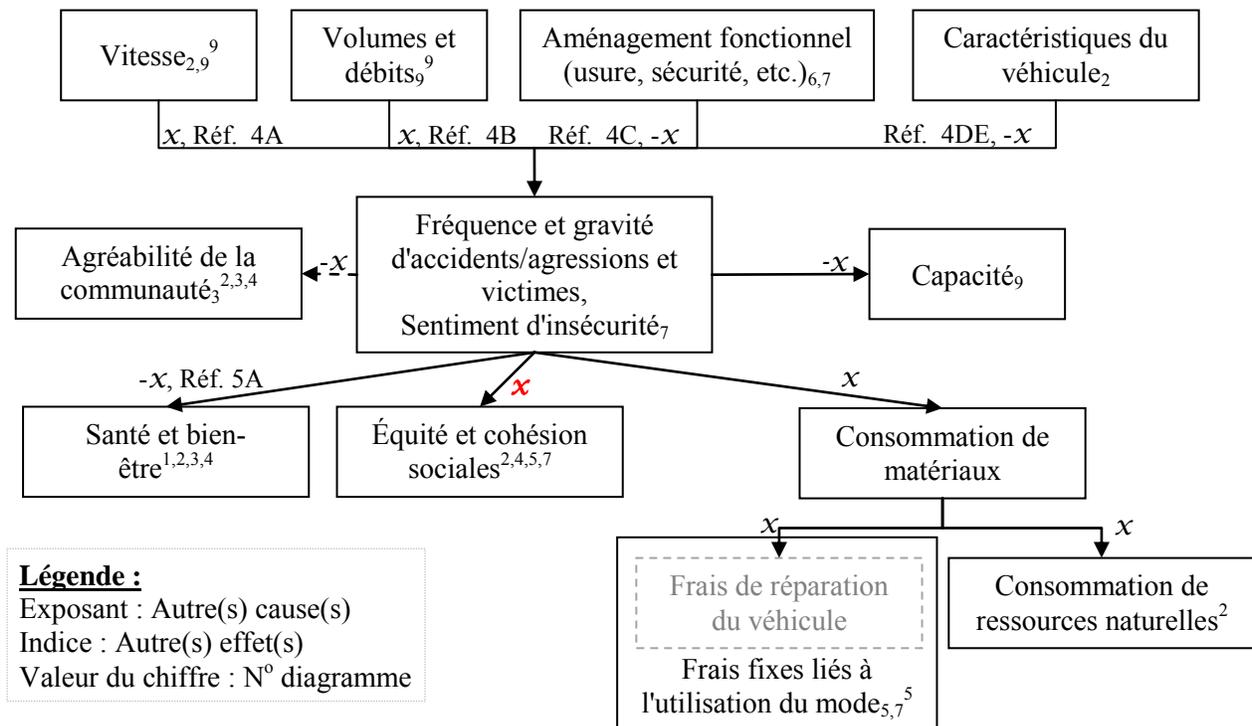
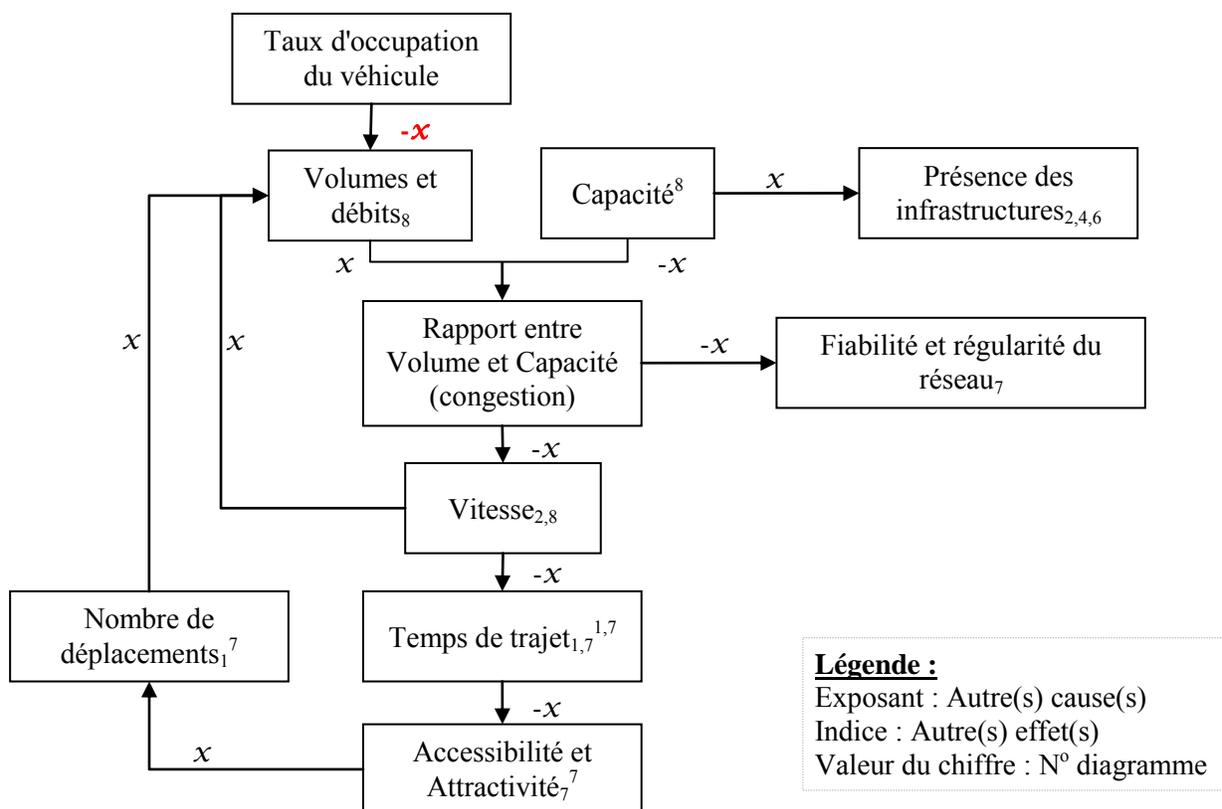


Figure 3-17 : Chaîne de causalité sur la sécurité (D8)

### Vitesse (Figure 3-18)

- Le volume de véhicules est fonction, entre autres, du taux d'occupation des véhicules. Les besoins de capacité déterminent la présence d'infrastructures.
- Ensemble, le volume et la capacité sur un lien peuvent générer de la congestion, qui détermine la vitesse et la fiabilité et la régularité du réseau.
- La vitesse modifie les débits et les temps de trajet.



**Figure 3-18 : Chaînes de causalité sur la vitesse (D9)**

#### 3.3.2.3 Thèmes reflétant les enjeux sociaux, économiques et environnementaux

Plusieurs enjeux présentés dans la *Pieuvre* peuvent être regroupés en un seul thème, souvent parce qu'ils découlent des mêmes causes et varient dans le même sens. Ces regroupements permettent d'alléger le *Cercle de causalité* en réduisant sa taille. La liste des thèmes de la partie inférieure du cercle est contenue dans le Tableau 3-1 et est séparée en trois catégories :

- enjeux sociaux de la mobilité (6 thèmes);
- enjeux environnementaux de la mobilité (10 thèmes);

- enjeux économiques de la mobilité (8 thèmes).

La description de chaque thème comprend :

- le nom de l'enjeu apparaissant dans le cercle;
- la définition de l'enjeu, qui apparaît dans l'encadré rose du schéma (Figure 3-2);
- le sens désiré de l'enjeu (augmentation ↑ ou diminution ↓);
- les modes de transport pour lesquels l'enjeu est applicable. Cette caractéristique redimensionne le cercle selon les enjeux qui sont applicables au mode de transport sélectionné. En raison de plusieurs enjeux applicables aux véhicules à moteurs, les cercles de modes non motorisés contiennent moins de thèmes et sont donc plus petits que les cercles de modes motorisés. Puisqu'il existe autant de cercles que de modes, on parle de *Cercles de causalité* dans le cadre d'évaluation de la mobilité durable.

Les principaux regroupements d'enjeux qui ont été faits dans le Tableau 3-1 sont les suivants :

#### ***Dimension société***

- liens sociaux et communauté : socialisation des individus et agréabilité de la communauté. La qualité de la communauté et la possibilité d'interactions sociales sont déterminés par des facteurs communs qui découlent de l'utilisation des transports actifs, du sentiment de sécurité et de la qualité locale de l'environnement;
- santé (physique et psychologique) et bien-être. Ces notions sont intimement liées, ce qui les rend difficile à séparer. Puisque les enjeux qui influencent la santé sont nombreux et variés, ils ont également leur propre thème (activité physique, liens sociaux, accidents, etc.);
- temps disponible et réalisation d'activités : activités en déplacement et substitution d'activités grâce à la réduction du temps de déplacement. La réalisation d'activités est étroitement liée au temps de disponibilité dans une journée, qui est réduit d'autant par le temps de trajet qui requiert une concentration pour la conduite. Ce dernier est en fait une soustraction entre le temps de trajet total et le temps de trajet où la concentration n'est pas requise pour la conduite;
- accessibilité et attractivité à un mode de transport. L'attractivité d'un mode de transport est en réalité une notion qui fait intervenir les préférences des personnes quant à

l'utilisation des modes. Cette notion est intimement liée à celle d'accessibilité : un meilleur accès à un mode le rend plus attractif. Aussi, les paramètres d'offre qui les influencent sont les mêmes : temps de trajet, information, signalisation, tarif, etc.;

- justice et cohésion sociales. L'atteinte de justice sociale favorise la cohésion sociale dans une communauté. Les deux concepts sont donc très liés et il n'est donc pas utile de les départager;

### *Dimension environnement*

- espace au sol, surface imperméable et surface minérale. Étant donné que les infrastructures de transport sont majoritairement en asphalte ou en béton en milieu urbain, le total des surfaces imperméables et minérales est très semblable à la surface totale occupée par les infrastructures. Si les techniques de construction changent, peut-être ce thème devra-t-il être décomposé;
- émissions de tous les polluants, sauf de gaz à effet de serre (GES). Ce thème regroupe les polluants dans tous les milieux, car les causes sont très similaires. Les seuls polluants demeurés dans un thème à part sont les GES, car ils participent à des enjeux particuliers, dont les changements climatiques qui sont actuellement sous la loupe des décideurs;
- santé des écosystèmes : habitat naturel (perte de superficie et fragmentation du territoire) et faune et flore (croissance, mortalité, diversité des espèces vivantes). La modification de l'habitat naturel est étroitement liée à la santé des espèces animales et végétales;

### *Dimension économie*

- dépenses individuelles en transport, frais fixes et frais variables. Les frais fixes et variables occupent deux thèmes séparés, car leurs causes sont passablement différentes. Les dépenses individuelles sont également considérées sous un thème séparé;
- productivité individuelle, locale et régionale : productivité et compétitivité individuelle, locale et régionale, disponibilité et flexibilité de la main d'œuvre, hausse des valeurs des propriétés. Ces effets sont tous reliés et difficilement séparables;
- coûts de mitigation des problèmes environnementaux et pression sur les infrastructures. Les constructions et entretiens des infrastructures (de transport ou non) résultant d'une pression accrue des phénomènes environnementaux sont considérés comme un type de mesure de mitigation.

**Tableau 3-1 : Tableau des thèmes regroupant les enjeux de la mobilité durable (A - Automobile, TC - Transport en commun, M - Marche, V – Vélo, Tous - Les quatre modes)**

6 thèmes sociaux de la mobilité	Modes
Liens sociaux et communauté ↑ Interactions sociales, sentiment d'appartenance à la communauté, agréabilité du quartier, et qualité des espaces publics.	Tous
Activité physique ↑ Réalisation d'activité physique quotidienne ou à la lutte contre la sédentarité du mode de vie.	TC,M, V
Santé et bien-être ↑ Santé physique, santé psychologique et bien-être des individus.	Tous
Temps disponible et réalisation d'activités ↑ Temps disponible en véhicule pour la réalisation d'activités, temps disponible hors-trajet pour la réalisation d'activités.	Tous
Accessibilité et attractivité ↑ Accès aux transports (tarifs, information à l'utilisateur, proximité, multiplicité des options de transports, etc) et aux opportunités (lieux générant des déplacements et offrant des services répondant aux besoins des individus), attractivités des modes de transport.	Tous
Justice et cohésion sociales ↑ Justice sociale ou équité sociale (base identique pour tous, équité sociale, aide aux défavorisés) en ce qui a trait à l'exposition aux polluants, l'accès aux opportunités, l'accès financier aux modes de transport, etc. L'équité sociale favorise la cohésion sociale.	Tous
10 thèmes environnementaux de la mobilité	Modes
↓ Consommation de matériaux Consommation de matériaux pour la construction et la réparation des véhicules et des infrastructures de transport.	A,TC, V
↓ Consommation d'énergie Consommation d'énergie fossile et d'autres formes d'énergie par les véhicules motorisés.	A,TC
↓ Consommation de ressources naturelles Consommation de ressources naturelles renouvelables et non renouvelables reliée à la consommation de matériaux et d'énergie.	A,TC, V
↓ Espace au sol, surface imperméable et non végétale Utilisation d'emprise au sol par les infrastructures de transport (stationnements, voies de circulation, espaces de sécurité) et surface imperméable et non végétale.	Tous
↓ Émissions de polluants (eau, sol, air, son, lumière, paysage) Émission de polluants dans l'air (NO <sub>x</sub> , COV, CO, SO <sub>2</sub> , particules fines, plomb, HAP et HAM), dans le sol et dans l'eau (sel, métaux lourds, hydrocarbures), ainsi que de pollution lumineuse, sonore et du paysage).	A,TC
↓ Émissions de GES Émissions de gaz à effet de serre (GES) issus des véhicules motorisés, qui contribuent au phénomène planétaire d'effet de serre.	A,TC
↓ Îlot de chaleur Zones de grandes chaleurs localisées dans les quartiers en raison de la présence d'infrastructures minéralisées, leur couleur de revêtement foncée et la concentration de gaz à effet de serre dans l'air.	Tous

**Tableau 3-1 (suite) : Tableau des thèmes regroupant les enjeux de la mobilité durable (A - automobile, TC - transport en commun, M - marche, V – vélo, Tous - les quatre modes)**

10 thèmes environnementaux de la mobilité (suite)	Modes
↓ Changements climatiques planétaires dû au phénomène d'effet de serre (intensification des climats régionaux, augmentation du nombre et de l'intensité des tempêtes, hausse du niveau des océans).	
↓ Exposition aux polluants (eau, sol, air, son, lumière, paysage) Exposition aux polluants dans l'air (NOx, COV, CO, SO2, particules fines, plomb, HAP et HAM) dans le sol et dans l'eau (sel, métaux lourds, hydrocarbures), ainsi qu'à la pollution lumineuse, sonore et du paysage.	A,TC
↑ Santé des écosystèmes (habitat, faune et flore) Santé des écosystèmes menacée par la perte de superficie et la fragmentation des habitats naturels, ainsi que la pollution qui perturbe la croissance et la mortalité des espèces animales et végétales et qui réduit la biodiversité.	Tous
8 thèmes économiques de la mobilité	Modes
↓ Dépenses individuelles en transport Frais fixes et variables liés à l'utilisation d'un mode de transport.	A,TC, V
↓ Coûts collectifs des services offerts Coûts de la collectivité pour construire, entretenir et opérer les réseaux de transport	Tous
↓ Frais variables d'utilisation d'un mode Frais individuels variables reliés à la mobilité à l'utilisation d'un mode de transport, qui varie selon les caractéristiques du déplacement, notamment les coûts de carburant, de stationnement et d'utilisation à l'unité.	A,TC, V
↓ Frais fixes d'utilisation d'un mode Frais individuels fixes reliés à la possession d'un véhicule ou d'un abonnement à un service de transport.	A,TC, V
↓ Coûts de mitigation des problèmes environnementaux et pression sur les infrastructures Coûts collectifs des mesures de protection de l'environnement et de mitigation des problèmes environnementaux, incluant les coûts de modification des infrastructures de transport ou autres qui résultent de problèmes environnementaux.	Tous
↓ Coûts des soins de santé Coûts individuels et collectifs en soins de santé reliés à la réduction de la santé physique et mentale, aux maladies, aux blessures et aux mortalités, auxquels contribue la mobilité.	Tous
↑ Productivité individuelle, locale et régionale Contribution à (1) la productivité et à la compétitivité individuelle, locale ou régionale, (2) la disponibilité et la flexibilité de la main d'œuvre et à (3) la hausse des valeurs des propriétés.	Tous
↑ Revenus collectifs des transports Revenus générés par la mobilité, provenant des tarifs (billet, abonnement, taxe sur l'essence, péages, etc.).	A,TC

#### 3.3.2.4 Thèmes reflétant les paramètres de mobilité

Essentiellement, les paramètres de mobilité sont des caractéristiques qui influencent les enjeux de la mobilité durable. **Le choix des paramètres inclus dans le cercle est sujet à discussion; il**

**pourrait s'adapter en fonction du mode de transport ou de l'échelle appropriés aux projets de l'utilisateur dudit cercle.** Les paramètres de mobilité se divisent en quatre catégories, chacune ayant sa propre teinte de violet : véhicule (4 thèmes), déplacement (5 thèmes), individu (4 thèmes), réseau (14 thèmes). Le Tableau 3-2 détaille les thèmes de la partie supérieure du *Cercle de causalité*. Les principaux regroupements de paramètres pour former un thème sont les suivants :

### *Véhicule*

- caractéristiques du véhicule, incluant celles qui modifient sa taille, son poids, ses taux de consommation et d'émission de polluants et de GES. Ces éléments évoluent tous suivant les tendances du marché et les normes en vigueur;

### *Déplacement*

- distance de trajet motorisé séparée de la distance de trajet non-motorisé. Les deux types de distances ont des effets très différents. Contrairement aux modes non motorisés, les modes motorisés consomment de l'énergie et produisent des émissions de polluants;

### *Individu*

- possession de véhicule et abonnement au service. Ces éléments correspondent aux qualifications requises pour avoir accès à un mode de transport. Ils engendrent des frais fixes d'utilisation d'un mode de transport. Pour l'automobile particulière et le vélo, il s'agit de posséder un véhicule. Pour le transport en commun, le vélopartage et l'autopartage, il s'agit de posséder un abonnement au service, s'il y a lieu;

### *Réseau*

- confort et services d'appoint des infrastructures : services offerts par un réseau de transport qui augmentent l'attractivité d'un mode sans modifier le temps de trajet;
- accidents, agressions et sentiment d'insécurité. Les accidents et les agressions engendrent des victimes, ce qui modifie le sentiment de sécurité. Tous sont également dépendants de la qualité de l'aménagement. Toutefois, le sentiment de sécurité est légèrement différent car il est sujet à la perception des individus;

- qualité de l'aménagement : usure et sécurité du réseau. L'usure des infrastructures d'un réseau est intimement (mais pas uniquement) liée à la sécurité des personnes l'empruntant;
- disponibilité de stationnements : tarifs et espaces de stationnement. La disponibilité des stationnements est à la fois physique (espace) et financière (tarif).

**Tableau 3-2 : Tableau des thèmes regroupant les paramètres de mobilité liés aux enjeux environnementaux, sociaux et économiques de la mobilité**

<b>4 thèmes liés au véhicule utilisé pour le déplacement</b>	<b>Modes</b>
Efficacité du moteur et autres caractéristiques du véh. Efficacité du moteur et des dispositifs anti-pollution, poids, taille, automatisation, capacité (nombre de places).	A,TC,V
Taux de consommation d'énergie du véh. La consommation d'énergie du véhicule, par kilomètre parcouru.	A,TC
Taux d'émission de polluants du véh. Les polluants émis (air, eau, son, lumière) par le véhicule, par kilomètre parcouru.	A,TC
Taux d'émission de GES Les GES émis par le véhicule, par kilomètre parcouru.	A,TC
<b>5 thèmes liés aux caractéristiques du déplacement</b>	<b>Modes</b>
Vitesse de déplacement La vitesse réelle observée ou vitesse moyenne du déplacement.	Tous
Optimisation du trajet Renseignements permettant d'optimiser le temps de trajet lors du déplacement, incluant les temps de transferts et d'attente.	Tous
Taux d'occupation des véhicules Nombre de personnes par véhicule.	A,TC,V
Distance de trajet motorisé Distance parcouru lors d'un déplacement en utilisant un véhicule motorisé.	A,TC
Distance de trajet non motorisé Distance parcouru lors d'un déplacement en utilisant un véhicule non motorisé.	TC,M, V
Temps de trajet Temps de parcours, d'attente et de transferts pour réaliser le déplacement.	Tous
<b>4 thèmes liés à l'individu</b>	<b>Modes</b>
Possession de véh. ou abonnement au service Nombre de véhicules par personne ou abonnement à un service de transport.	A,TC,V
Taux de dépenses caloriques Dépenses caloriques par kilomètre parcouru, d'après les caractéristiques de l'individu et de la géographie du terrain.	V,M

**Tableau 3-2 (suite) : Tableau des thèmes regroupant les paramètres de mobilité liés aux enjeux environnementaux, sociaux et économiques de la mobilité**

4 thèmes liés à l'individu (suite)		Modes
Conduite écologique Caractéristiques de la conduite qui influencent le taux de consommation d'énergie, notamment l'accélération et la vitesse.		A,V
Nombre de déplacements Nombre de déplacements total en un mode ou par personne par jour.		Tous
14 thèmes liés au réseau de transport et ses infrastructures		Modes
Universalité des infrastructures Infrastructures du réseau adaptées aux personnes à mobilité réduite et avec handicap.		Tous
Confort et services d'appoint des infrastructures Infrastructures offrant à l'usager des installations confortables et technologiques, propres et rendant le trajet agréable.		Tous
Accidents, agressions et sentiment d'insécurité Fréquence et gravité des accidents, incidents, agressions, ainsi que leurs victimes et le sentiment d'insécurité qu'ils engendrent chez les usagers du réseau.		Tous
Qualité de l'aménagement (usure, sécurité) Aménagement du réseau de façon à ce qu'il soit fonctionnel, en lien avec son usure, sa sécurité et son agréabilité.		Tous
Connectivité du réseau Infrastructures conçues pour maximiser les connexions entre les liens du réseau ainsi qu'avec les liens des autres réseaux.		Tous
Capacité du réseau Le nombre maximal possible de personnes ou de véhicules pouvant passer sur un lien du réseau.		Tous
Présence des infrastructures Taille, longueur, hauteur, largeur et beauté des infrastructures de transport.		Tous
Volumes et débits sur le réseau Le nombre de personnes ou de véhicules passant sur un lien du réseau (débit : par heure).		Tous
Rapport entre volume et capacité, congestion Rapport entre la demande et l'offre de transport, qui témoigne de l'efficacité du réseau.		Tous
Fiabilité et régularité du réseau Les conditions d'utilisation du réseau sont régulières et prévisibles, peu importe la période de la journée ou le type de jour.		Tous
Diversité des tarifs Existence d'une variété de tarifs représentant l'intensité d'utilisation d'un mode (principe d'utilisateur-payeur) et avantageux pour les populations vulnérables.		A,TC, V
Information et signalisation La quantité et la qualité des renseignements sur l'utilisation et l'état du réseau, ainsi que la facilité de les obtenir.		Tous
Prix de l'énergie Prix de vente du carburant ou de l'énergie.		A,TC
Disponibilité de stationnements Présence et tarifs d'infrastructures pour stationner le véhicule aux lieux d'extrémités du déplacement.		A,V

### 3.3.3 Exemple simple d'utilisation du *Cercle de causalité*

Cette section présente un cas simple d'utilisation du cercle de causalité pour illustrer une chaîne d'impacts. L'élément de départ choisi est le suivant : soit une volonté de réduction de la consommation d'énergie fossile. Le curseur pointe le symbole ↓ du thème « Consommation d'énergie », et le mode sélectionné est « Auto ».

La Figure 3-19 présente le *Cercle de causalité* au niveau hiérarchique 0, qui comprend les causes (flèches bleues) et les effets (flèches rouges) directs d'une diminution de la consommation d'énergie. Les Figure 3-20 et Figure 3-21 montrent le *Cercle de causalité* respectivement au niveau hiérarchique 1 et 2. Le Tableau 3-3 présente un résumé de tous les niveaux hiérarchiques.

**Tableau 3-3 : Exemple textuel sur la diminution de la consommation d'énergie des véhicules (Mode Auto)**

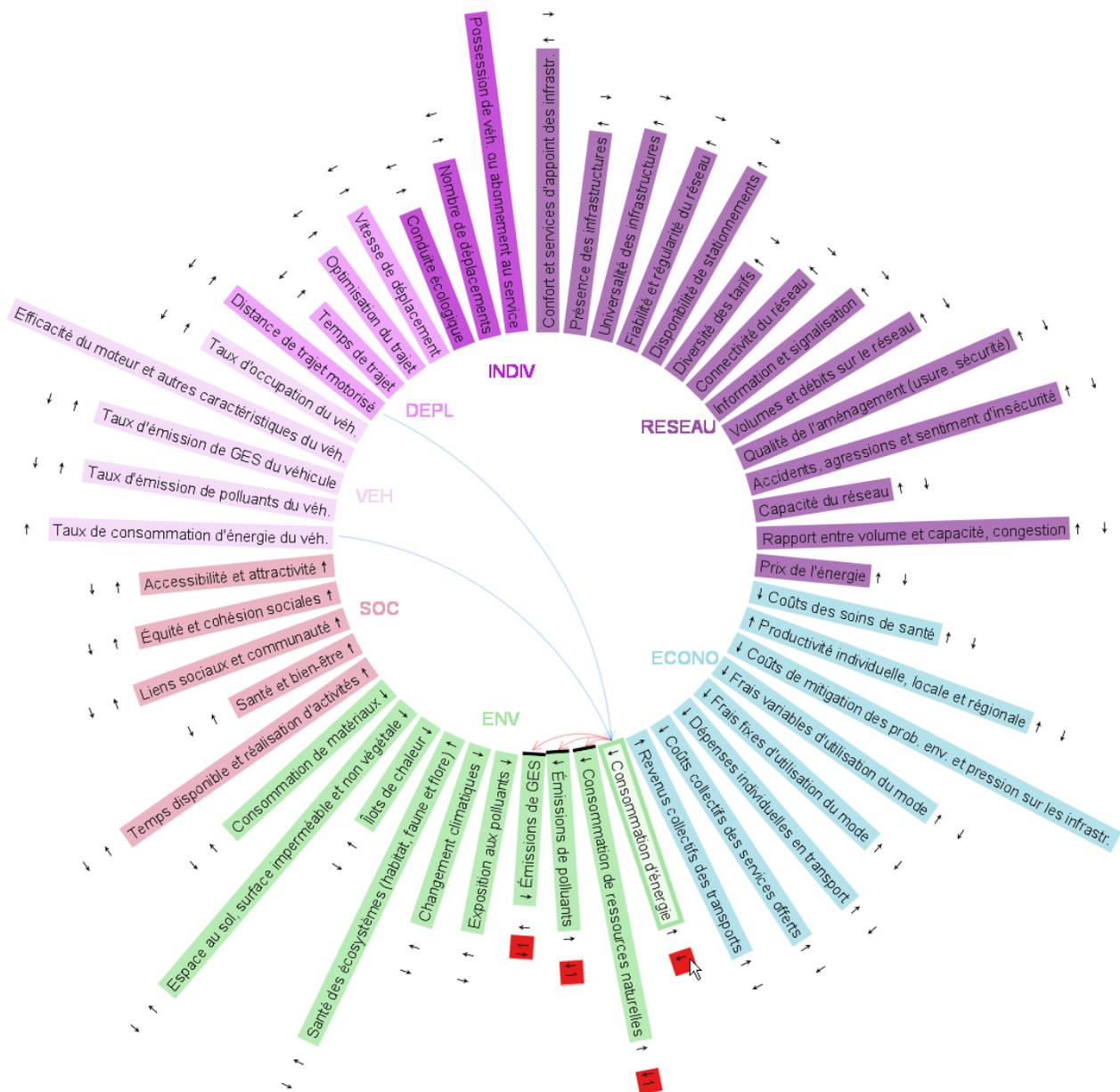
<b>Niveau hiérarchique 0</b>	
↓ Taux de consommation d'énergie des véhicules	
Causes possibles	Distance de trajet motorisé (1) Taux de consommation d'énergie (2)
Effets	↓1 Émissions de polluants (a) ↓1 Consommation de ressources naturelles (b) ↓1 Émissions de gaz à effet de serre (GES) (c)
<b>Niveau hiérarchique 1</b>	
(1) Distance de trajet motorisé	
Causes possibles	Nombre de déplacements (1.1)
(2) Taux de consommation d'énergie	
Causes possibles	Efficacité du moteur et autres caractéristiques du véhicule (2.1) Vitesse de déplacement (2.2) Conduite écologique (2.3)
↓ (a) Émissions de polluants	
Effets	↓1 Exposition aux polluants (a.a)
↓ (b) Émissions de GES	
Effets	↓1 Changements climatiques (b.a) ↓1 Îlots de chaleur (b.b)

**Tableau 3-3 (suite) : Exemple textuel sur la diminution de la consommation d'énergie des véhicules (Mode Auto)**

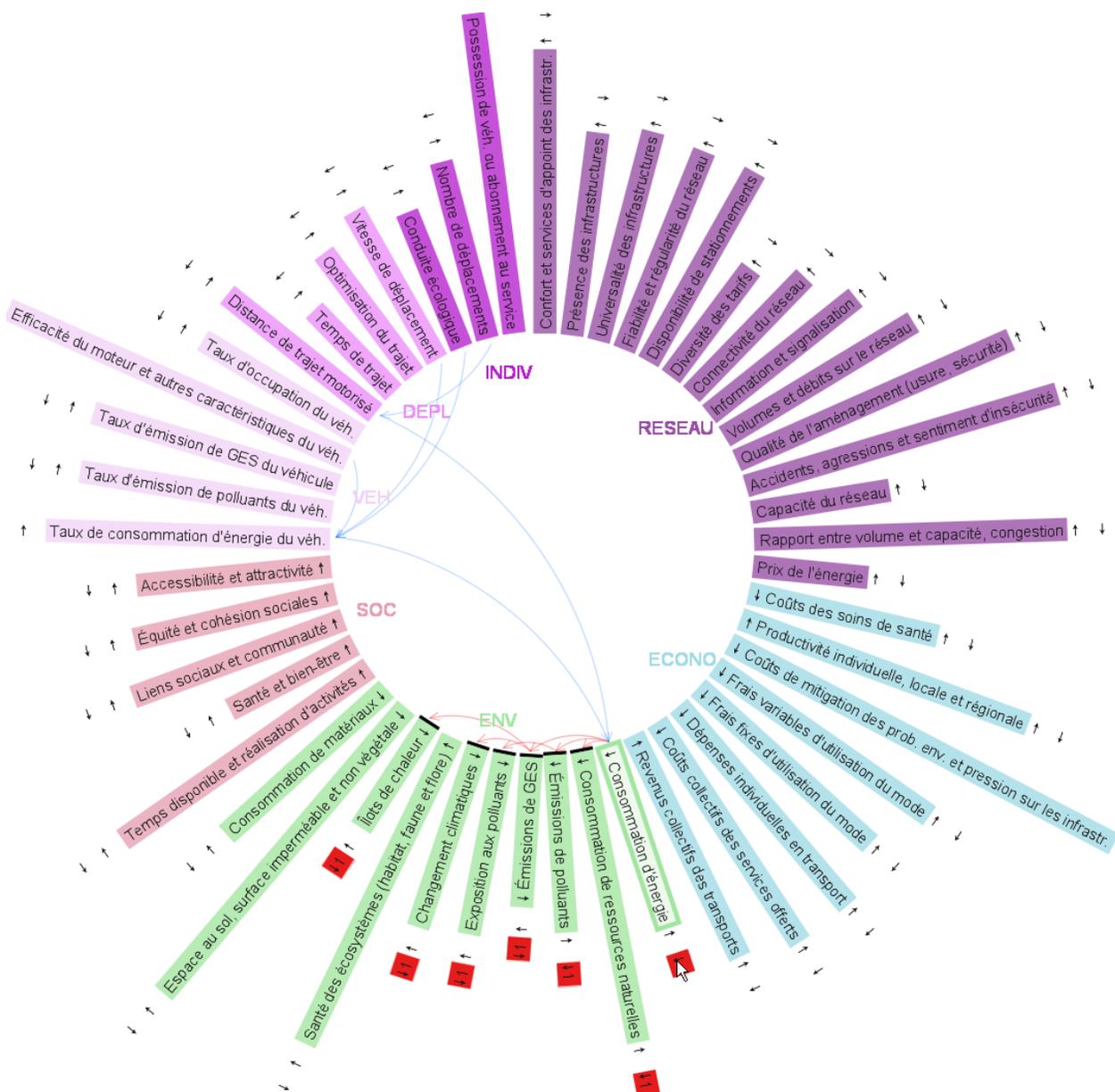
Niveau hiérarchique 2	
(2.2) Vitesse de déplacement	
Causes possibles	Rapport entre volume et capacité, congestion
(2.3) Nombre de déplacements	
Causes possibles	Accessibilité et attractivité
↓ (a.a) Exposition aux polluants	
Effets	↑1 Équité et cohésion sociale
	↑1 Liens sociaux et communauté
	↑1 Santé et bien-être
	↑1 Santé des écosystèmes
↓ (b.a) Changements climatiques	
Effets	↑1 Santé et bien-être
	↑1 Santé des écosystèmes
	↓1 Coûts de mitigation des problèmes environnementaux
↓ (b.b) Îlots de chaleur	
Effets	↑1 Équité et cohésion sociale
	↑1 Liens sociaux et communauté
	↑1 Santé et bien-être

Les effets de la consommation d'énergie se font d'abord sentir sur d'autres thèmes de la dimension environnementale (niveaux 0 et 1), puis sur la dimension sociale (niveau 2). Lorsque certains thèmes sont touchés à plusieurs reprises, les impacts sont cumulés et le total est affiché. Par exemple, la Figure 3-21 affiche « ↑3 » pour « Santé et bien-être », car trois thèmes pointent vers ce dernier : exposition aux polluants (↓), changements climatiques (↓) et îlots de chaleurs (↓). Il faudrait continuer l'analyse à des niveaux hiérarchiques supérieurs pour observer les effets sur la dimension économique.

Quant aux extrémités « origine » des flèches bleues, elles permettent d'identifier les paramètres de l'offre et de la demande à modifier pour réduire de la consommation d'énergie. Ainsi, la modification de la vitesse des automobiles (notamment via une réduction de la congestion), la diminution du nombre de déplacements (notamment via une diminution de l'attractivité de l'automobile), l'amélioration des caractéristiques du véhicule et l'instauration de programme d'écoconduite sont toutes des actions plausibles.



**Figure 3-19 : Niveau hiérarchique 0 : Exemple textuel sur la diminution de la consommation d'énergie des véhicules (Mode Auto)**



**Figure 3-20 : Niveau hiérarchique 1 : Exemple textuel sur la diminution de la consommation d'énergie des véhicules (Mode Auto)**

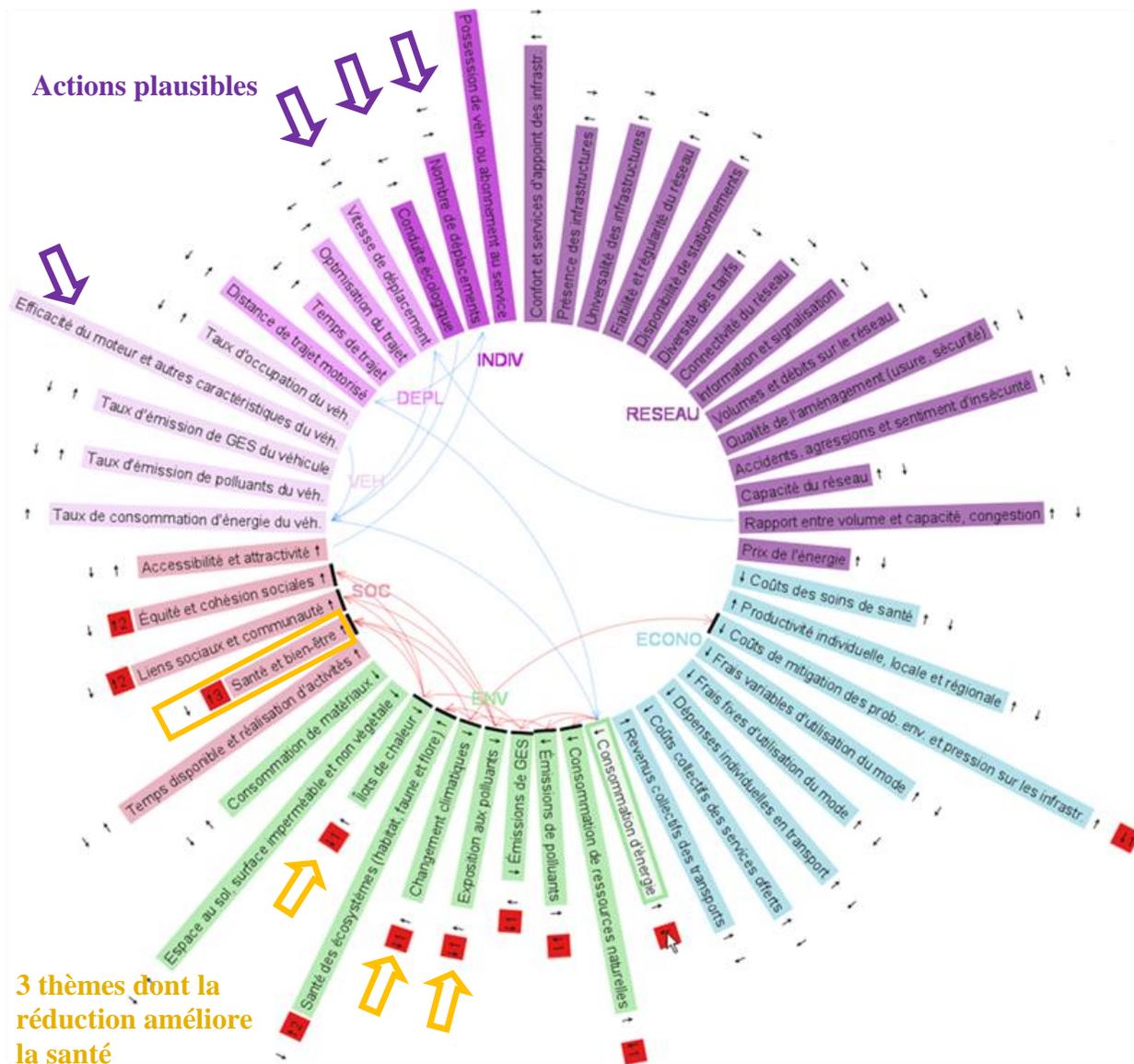


Figure 3-21 : Niveau hiérarchique 2 : Exemple textuel sur la diminution de la consommation d'énergie des véhicules (Mode Auto)

### 3.3.4 Contributions et limites du *Cercle de causalité*

#### 3.3.4.1 Contributions

En résumé, les principaux avantages du *Cercle de causalité* sont qu'il :

- intègre les relations de causalité, de façon systématique et transparente (grâce aux diagrammes qui l'accompagnent). Au besoin, il peut rapidement être modifié par l'ajout ou le retrait de liens de causalité;
- fait état de la redondance des impacts grâce au cumul du nombre de fois où un thème est touché par une relation de causalité;
- intègre les paramètres de mobilité (offre et demande), reliant ainsi mobilité et développement durable;
- structure de manière concise le concept de mobilité durable;
- est interactif, ce qui l'adapte aux besoins du planificateur.

### 3.3.4.2 Limites

Les limites et problématiques soulevées par le *Cercle de causalité* sont énoncées ci-après. Par rapport à la *Pieuvre*, le *Cercle de causalité* a **perdu de son caractère vaste reflétant la diversité des disciplines interpellées**. C'est pour cela que les deux font partie du cadre d'évaluation de la mobilité durable. La *Pieuvre* est également légèrement interactive dans le cadre, car les bulles s'illuminent lorsqu'ils correspondent à des effets systématiquement identifiés par le cercle.

Également, les thèmes sur les paramètres d'offre et de demande de transport ne représentent pas concrètement des actions à poser. Ainsi, le *Cercle de causalité* **n'intègre pas les leviers d'actions des décideurs**, soient les sources premières des chaînes de causalité. Cette question est traitée à la section suivante.

Une autre limite est que le *Cercle de causalité* n'identifie pas les indicateurs. Cette problématique est traitée au chapitre 4 (p. 136). Le *Cercle de causalité* **identifie toutefois de façon systématique les impacts, auxquels il faudra par la suite associer des indicateurs**.

Suivant les connaissances scientifiques sur chaque enjeu, les relations de causalité ne sont pas toutes démontrées hors de tout doute, bien définies et bien comprises, ce qui les place parfois au cœur de débats. Parfois même, l'identification du sens de la relation de causalité provoque dans certains cas des anomalies. Actuellement, **le schéma ne comprend que des relations linéaires**, alors que tous les liens de causalité ne le sont pas. Par exemple, la relation entre la vitesse et le taux de consommation d'essence n'est pas linéaire. Une vitesse d'environ 90 km/h minimise ce taux, alors que les vitesses faibles (en congestion) ou élevées l'augmentent. Pour réduire la

consommation de carburant, on peut soit viser une réduction de la vitesse lorsque la circulation actuelle est supérieure à 100 km/h, soit viser une augmentation de la vitesse en cas de congestion. Pourtant, tel que codé présentement, le *Cercle de causalité* ne permet qu'une relation linéaire de pente négative ( $-x$ ) entre la vitesse et le taux de consommation de carburant. C'est pour noter cette problématique que la relation «  $x$  » est mise en couleur rouge au diagramme D2 de la Figure 3-11. De surcoût, les chaînes de causalité forment parfois un **cycle sans fin**. Par exemple, le diagramme D9 sur la vitesse (Figure 3-18) illustre un problème d'**amplification de l'effet** : une augmentation de volume à capacité constante réduit la vitesse, qui a son tour réduit les débits.

### 3.3.4.3 Perspectives d'amélioration

Le *Cercle de causalité* pourrait subir quelques améliorations. D'abord, spécifier la taille, ou **l'ampleur, de l'effet pour chaque relation de causalité** permettrait d'éviter les boucles infinies ci-avant relevées comme problématiques. Reprenant l'exemple ci-haut du nombre de déplacements et de la réalisation d'activités, l'utilisateur pourrait ainsi mettre en perspective l'augmentation du nombre de déplacements résultant d'une intervention visant la diminution du nombre de déplacements (ce qui augmente le temps disponible). Tel qu'illustré à la Figure 3-22, il ressortira que la diminution de départ sera toujours plus grande que l'augmentation résultant du cycle.

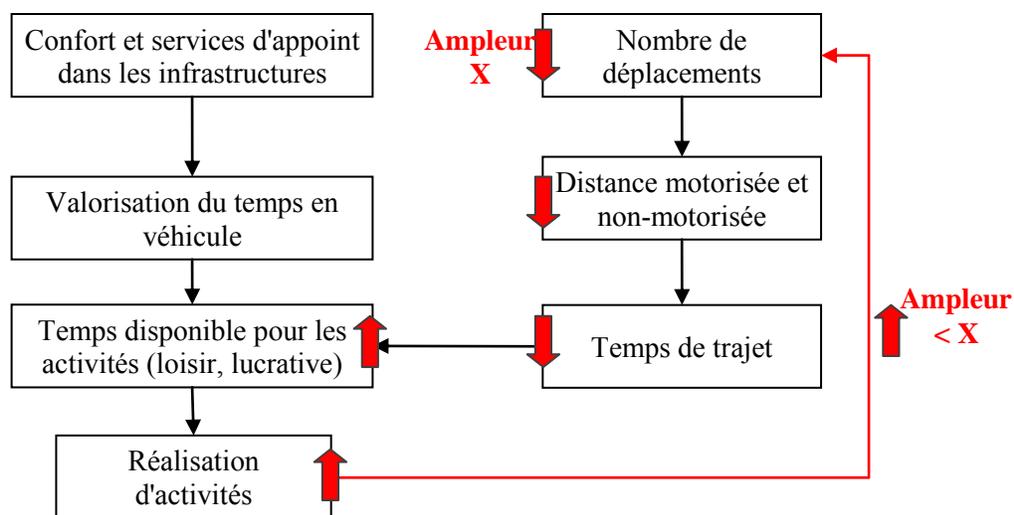


Figure 3-22 : Exemple de boucle infinie avec des effets contradictoires

De plus, **spécifier le terme de l'effet pour chaque relation de causalité** permettrait de mettre en perspectives les contradictions ou les amplifications issues des boucles infinies. Ainsi, si une action augmente un impact à court terme, elle peut avoir l'effet inverse à long terme. Ce pourrait être le cas par exemple de l'instauration d'une voie réservée au transport en commun qui :

- à court terme, augmente la congestion du mode automobile à cause de la diminution de capacité du réseau routier;
- à long terme, diminue la congestion du mode automobile à cause de l'augmentation de l'utilisation du transport en commun, en raison d'une vitesse accrue.

Enfin, le cercle pourrait **intégrer les notions sur l'aménagement du territoire**, et ce, en ajoutant des thèmes à la partie supérieure du *Cercle de causalité*. Des thèmes comme la mixité des usages et la densité de population ont des effets non négligeables sur la proximité des commerces et autres générateurs de déplacement, ce qui réduit les distances de parcours.

## 3.4 Interventions possibles

### 3.4.1 Présentation des catégories d'intervention

Tel que vu précédemment, il est intéressant de lier les paramètres d'offre et de demande du *Cercle de causalité* à des actions concrètes. Or, les décideurs disposent d'un très vaste choix de leviers d'actions en transport, tant à l'échelle locale que globale. L'utilisation d'un menu déroulant est dans ce cas approprié pour : lister les interventions de façon catégorisée et permettre à l'utilisateur du cadre d'évaluation de sélectionner la ou les interventions qui l'intéressent. Un menu déroulant directement à l'intérieur du logiciel utilisé est difficile à programmer, alors que cela est très simple en HTML. Pour cette raison, le programme développé jusqu'à présent à l'aide de Processing (Processing Development Team, 2014) est intégré à une page Internet.

Le Tableau 3-4 présente une catégorisation des leviers d'actions dont disposent les décideurs en transport. Pour chaque exemple d'intervention sont spécifiés :

- le mode de transport sur lequel l'action agit,
- le thème auquel il a été associé dans le *Cercle de causalité*, et
- le sens (↓ ↑) vers lequel l'action fait varier le thème associé.

**Tableau 3-4 : Catégorisation des interventions possibles, avec quelques exemples pour différents modes de transport**

Catégorie	Sous-catégorie	[Mode] Exemple d'intervention	Sens	Thème du Cercle de causalité
<b>Contrôle</b>	<b>Application des sanctions</b>	[A] Présence policière pour limiter l'alcool au volant	↓	Accidents, agressions et sentiment d'insécurité
	<b>Règlement sur les équipements</b>	[A] Renforcement des normes d'émissions polluantes maximales	↓	Efficacité du moteur et autres caractéristiques du véhicule
		[V] Obligation du port du casque à vélo	↓	Accidents, agressions et sentiment d'insécurité
<b>Économie</b>	<b>Fiscalité</b>	[A] Hausse de la taxe sur l'essence	↑	Prix de l'énergie
		[A] Hausse de taxe à l'achat de VUS	↑	Frais fixes d'utilisation du mode
		[A] Hausse de taxe sur l'immatriculation	↑	Frais fixes d'utilisation du mode
	<b>Subvention / Aide publique</b>	[A] Réduction du prix de vente des véhicules à faible consommation d'essence	↓	Frais fixes d'utilisation du mode
		[TC] Retour d'impôt pour l'achat de titres TC	↓	Frais fixes d'utilisation du mode
		[V] Réduction du prix de vente des vélos de ville	↓	Frais fixes d'utilisation du mode
<b>Tarif</b>	[A] Hausse des tarifs de stationnements	↑	Frais variables d'utilisation du mode	
	[A] Instauration d'un péage aux ponts	↑	Frais variables d'utilisation du mode	
	[A] Réduction de péage pour les 2 personnes et +	↑	Diversité des tarifs	
	[TC] Création de forfaits intégrant divers abonnements	↑	Diversité des tarifs	
		[TC] Diminution des tarifs TC (titre, passage)	↓	Frais variables d'utilisation du mode
<b>Information à l'utilisateur</b>	<b>Information en temps réel</b>	[A] Système de gestion de la circulation	↑	Fiabilité et régularité du réseau
		[A] Système de jumelage de covoitureurs	↑	Information et signalisation
		[TC] Système de visualisation de l'emplacement des bus sur le trajet	↑	Information et signalisation
	<b>Possibilités et facilitations</b>	[M] Calculateur pour les trajets à pieds	↑	Optimisation du trajet
		[TC] Calculateur de trajets TC	↑	Optimisation du trajet
[V] Calculateur pour les trajets à vélo		↑	Optimisation du trajet	
<b>Publicité</b>	[TC] Diffusion de publicité pour faire connaître le mode	↑	Information et signalisation	

**Tableau 3-4 (suite) : Catégorisation des interventions possibles, avec quelques exemples pour différents modes de transport**

Catégorie	Sous-catégorie	[Mode] Exemple d'intervention	Sens	Thème du Cercle de causalité
<b>Modernisation des équipements</b>		[A] Autorisation des véhicules électriques sur le réseau	↑	Efficacité du moteur et autres caractéristiques du véhicule
		[A] Réfection de la chaussée d'une section d'autoroute	↑	Aménagement fonctionnel
		[TC] Ajout de l'air climatisé dans le métro	↑	Confort et services d'appoint des infrastructures
<b>Modification physique du réseau</b>	<b>Modification de capacité</b>	[A] Ajout d'une voie sur l'autoroute	↑	Capacité du réseau
		[M] Élargissement des trottoirs	↑	Capacité du réseau
		[TC] Augmenter la fréquence de passage du métro	↑	Capacité du réseau
		[TC] Remplacer une ligne de bus par un tramway	↑	Capacité du réseau
	<b>Nouvelle</b>	[A] Nouveau pont	↑	Capacité du réseau
		[M] Nouveau trottoir, viaduc, ou passage piétonnier	↑	Capacité du réseau
		[N] Nouvelle piste cyclable	↑	Capacité du réseau
		[TC] Nouvelle ligne de bus	↑	Capacité du réseau
	<b>Prolongement</b>	[A] Prolongement de l'autoroute 19	↑	Capacité du réseau
		[TC] Prolongement du métro: ligne bleue vers l'Est	↑	Capacité du réseau
[V] Prolongement d'une piste cyclable		↑	Capacité du réseau	
<b>Planification</b>	<b>Planification</b>	[A] Programme employeur pour favoriser le covoiturage	↑	Taux d'occupation du véhicule
		[A] Programme télé-travail, télé-achat, etc.	↓	Nombre de déplacements

**Tableau 3-4 (suite) : Catégorisation des interventions possibles, avec quelques exemples pour différents modes de transport**

Catégorie	Sous-catégorie	[Mode] Exemple d'intervention	Sens	Thème du Cercle de causalité
<b>Priorisation du mode</b>	<b>À l'arrêt</b>	[A] Stationnements réservés aux véhicules covoitureurs	↑	Disponibilités des stationnements
		[M] Aménagement d'espaces publics piétons (bancs, toits, etc.)	↑	Aménagement fonctionnel
		[V] Installation de supports à vélo	↑	Disponibilités des stationnements
	<b>Sur la voie</b>	[A] Baisse de la limite de vitesse affichée dans les rues	↓	Vitesse de déplacement
		[M] Avancées de trottoir aux intersections	↑	Aménagement fonctionnel
		[M] Mise à niveau égal du trottoir et de la chaussée	↑	Universalité des infrastructures
		[M] Piétonisation d'une rue	↑	Volumes et débits sur le réseau
		[TC] Système de départs priorités aux autobus au feu vert	↑	Vitesse de déplacement
		[TC] Voie réservée aux autobus sur une artère	↑	Capacité du réseau
		[V] Ligne d'arrêt avancée aux intersections pour les vélos	↑	Aménagement fonctionnel

## 3.4.2 Limites et perspectives de l'intégration des interventions

### 3.4.2.1 Contributions

Intégrer les leviers d'action possibles dans le cadre d'évaluation de la mobilité durable **complète les chaînes de causalité afin qu'elles débutent par une action** en transport et se terminent par un objectif en lien avec le développement durable. Si les interventions ne sont pas représentées directement par des thèmes à l'intérieur du *Cercle de causalité*, c'est parce qu'elles sont innombrables. Également, elles n'ont pas de cause (sauf le choix politique), mais seulement un effet. La volonté de ne pas agrandir le *Cercle de causalité* rend logique leur disposition dans un menu déroulant placé à part, soit ici dans le HTML.

### 3.4.2.2 Limites

Tel que présenté au Tableau 3-4, chaque intervention est liée à un seul thème du *Cercle de causalité*. Or, cela pose certaines problématiques qui limitent actuellement l'outil.

- Certaines interventions ont des **répercussions sur plusieurs modes de transport** simultanément, par exemple :
  - voie réservée aux autobus sur une artère : augmentation de la capacité du réseau de transport en commun, mais diminution de la capacité du réseau routier;
  - piétonisation d'une rue : augmentation de la capacité du réseau piéton, mais diminution de la capacité du réseau routier;
  - programme de télé-travail et télé-achat : diminution du nombre de déplacements des personnes pour tous les modes de transport.
- Certaines interventions devraient **toucher plusieurs thèmes** à la fois, par exemple :
  - voie réservée aux autobus sur une artère : en plus d'augmenter la capacité du réseau de transport en commun, cela augmente la vitesse de déplacement, la fiabilité et la régularité;
  - piétonisation d'une rue : en plus d'augmenter la capacité du réseau piéton, cela diminue la fréquence et la gravité des accidents et le sentiment de sécurité;
  - réduction du péage pour les 2 personnes et plus : en plus de diversifier la tarification du péage en offrant des tarifs préférentiels aux covoitueurs, cette action augmente le taux d'occupation des véhicules particuliers;

- réduction du prix de vente des véhicules à faible consommation d'essence : en plus de réduire les frais fixes d'utilisation de l'automobile, cela réduit également les taux de consommation d'essence.
- Certaines interventions touchent de **façon contradictoire un thème du même mode de transport**, par exemple l'implantation d'une voie réservée pour les véhicules particuliers de deux personnes et plus : Cela « crée » un nouveau réseau de covoiturage (ajout de capacité), mais diminue du même coût la capacité du réseau automobile « conventionnel » (1 personne par véhicule).
- Certaines interventions **induisent un transfert modal** à court, moyen ou long terme, notamment toute intervention qui modifie l'offre d'un réseau de transport change l'attractivité et l'accessibilité d'un mode par rapport aux autres, ce qui se répercute sur le nombre de déplacements par mode.
- Certaines interventions de type investissement non ciblé sont **globales et impliquent plusieurs interventions en même temps**. C'est le cas notamment des investissements de mise en œuvre de certains programmes gouvernementaux.

### 3.4.2.3 Perspectives d'amélioration

Afin de remédier à ces limites, certaines fonctionnalités devront être ajoutées à l'outil. Il devra :

- tracer un *Cercle de causalité* pour chaque mode de transport. Il faudra définir au préalable ce qu'est un mode de transport. Chaque réseau de transport devrait-il avoir son propre *Cercle de causalité*?
- associer une intervention à plusieurs thèmes du *Cercle de causalité*, au besoin;
- ajouter des interventions dans le menu déroulant en spécifiant le(s) thème(s) touché(s);
- sélectionner plusieurs interventions simultanément, de façon à représenter des scénarios complexes ou des programmes d'interventions;
- spécifier l'ampleur et le terme de la relation entre une intervention et un thème touché.

## 3.5 Contributions et perspectives du cadre d'évaluation

### 3.5.1 Brève synthèse des contributions

Le cadre d'évaluation de la mobilité durable développé dans le présent chapitre clarifie le concept de mobilité durable en offrant une **visualisation vaste mais structurée dans la *Pieuvre***. Toujours **structuré mais plus concis**, le *Cercle de causalité* offre une autre façon de visualiser le concept de mobilité durable. Il **intègre les relations de causalité**, regroupe les multiples enjeux afin d'alléger la structure du schéma. Également, il **intègre les paramètres de mobilité** (offre et demande) qui influencent les enjeux de la mobilité durable. Les deux **schémas sont interactifs**, car c'est la position et les clics du curseur qui définissent à la fois la taille du cercle (mode de transport), les thèmes en surbrillance, les liens de causalité montrés dans le schéma. Cette partie du schéma est développée à l'aide du logiciel Processing.

De surcroît, les schémas sont intégrés à une page Internet contenant un menu déroulant offrant des **choix d'interventions**. Cela permet de **compléter la chaîne de causalité** : débiter par une action concrète en transport et identifier ses effets sur les enjeux préoccupants du développement durable.

Enfin, jusqu'à présent, le cadre rend possible l'**identification systématique des effets d'une intervention sur les trois dimensions du développement durable**.

### 3.5.2 Perspectives

Plusieurs améliorations ont déjà été proposées spécifiquement pour le *Cercle de causalité* et les interventions. Les principales sont l'ajout des paramètres d'aménagement des quartiers et l'ajout des notions d'ampleur et de terme des effets attribués aux relations de causalité. Le premier volet de la présente section consiste plutôt à suggérer des améliorations plus globales au niveau du cadre d'évaluation de la mobilité durable, afin d'assurer son opérationnalisation : formaliser les relations de causalité, intégrer le transport des marchandises, ajouter la proposition systématique d'indicateurs, intégrer la notion de transfert modal et satisfaire aux divers usages possibles. Le second volet de cette section résume les fonctionnalités que l'outil devra offrir et propose un schéma relationnel illustrant la façon dont il sera programmé.

### 3.5.2.1 Suggestions de développement

#### *Ajouter la proposition systématique d'indicateurs*

Afin que le cadre en soit un d'évaluation de la mobilité durable, ce dernier devra relier les effets identifiés à des indicateurs et leur méthodologie d'estimation. Sans être directement intégrés au cadre, le chapitre 7 propose des indicateurs en se basant sur les schémas développés dans ce chapitre et de façon à ce qu'ils y soient éventuellement intégrés lors des développements futurs.

**Le cadre d'évaluation pourra afficher et exporter les indicateurs à estimer, et ce, pour chacun des effets identifiés systématiquement par le Cercle de causalité.**

#### *Approuver et s'entendre sur le contenu fixe du Cercle de causalité*

Les thèmes contenus dans le *Cercle de causalité* seront validés et modifiés au besoin par les décideurs en transport. Il est possible de développer une représentation propre à chaque acteur en transport, qui sera révélatrice de ses préoccupations et son champ d'action. Il peut aussi exister une représentation commune sur laquelle tous les acteurs s'entendent. En résumé, le contenu suivant devra être discuté :

- l'identification des leviers d'action possibles, propres à chaque acteur;
- la sélection des impacts sur l'environnement, la société et l'économie et, au besoin, leur regroupement en un seul thème afin d'alléger le cercle. Même chose pour la sélection des paramètres de mobilité;
- le choix des sens souhaités d'évolution des impacts sur l'environnement, la société et l'économie.

#### *Formaliser les relations de causalité*

Un effort de formalisation des relations de causalité doit être réalisé. Dans l'idéal, toutes les relations de causalité seraient scientifiquement prouvées. Puisque tel n'est pas le cas à ce jour, il faut trouver un moyen de conserver les relations plus informelles ou qualitatives sans toutefois amputer le caractère opérationnel du cadre d'évaluation. Il s'agit principalement de faire preuve de transparence quant aux choix des relations de causalité, et ce, en :

- **rendant disponibles les diagrammes de chaînes de causalité** (1 à 9), dans la documentation au cadre d'évaluation;
- **caractérisant** les relations de causalité selon **le niveau et le type de connaissances**;

- identifiant quelles relations de causalité ont été prouvées scientifiquement, lesquelles sont observables à l'aide des données disponibles actuellement, lesquelles sont non prouvées mais observées et connues par les acteurs du milieu et, finalement, lesquelles pourraient être observées à l'aide de nouvelles données.

Cette caractérisation nécessite d'entreprendre des actions concrètes, telles que :

- réfléchir et discuter sur l'existence des relations non formelles ou traditionnelles;
- assurer une veille continue de la littérature afin d'enrichir et d'actualiser les relations de causalité;
- analyser les données disponibles afin de documenter l'existence des relations actuellement non prouvées scientifiquement.

Certaines pistes d'analyse sont à explorer pour enrichir les relations du *Cercle de causalité*. **La modélisation par équations structurelles (SEM)** est une technique statistique d'estimation de relations de causalité basée sur des données statistiques et des hypothèses causales qualitatives. Ce type de modélisation est utilisé pour tester des relations complexes entre des variables observées et non observées (latentes), et entre des variables latentes. Alors que la modélisation traditionnelle part de données observées qu'elle reproduit le plus fidèlement à l'aide d'un modèle, la SEM teste des théories qui pourraient expliquer les données résultantes observées.

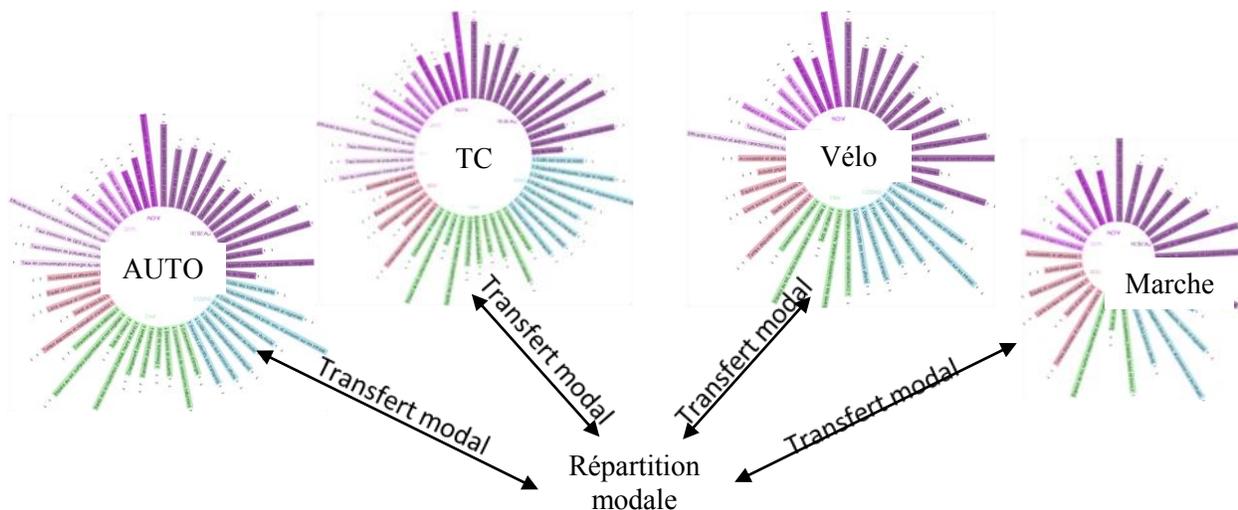
De plus, **les probabilités et les réseaux bayésiens** : Bien que l'occurrence d'un risque soit aléatoire, sa probabilité d'occurrence dépend de facteurs déterminants identifiables. Les réseaux bayésiens sont des modèles graphiques probabilistes qui représentent ces facteurs et ces risques. Si l'on dispose des données adéquates, pour une variable, il est possible de définir des tables de probabilité conditionnelles à certaines causes.

Appliqué à ce sujet de recherche, les risques sont représentés par les enjeux de la mobilité durable, et les causes par des paramètres de l'offre et de la demande, ou d'autres enjeux de la mobilité durable.

***Intégrer la notion de transfert modal et gérer les réseaux multimodaux et les multiservices pour un même réseau***

Abordée à la section 3.4.2.3, la notion de transfert modal doit être présente afin de rendre compte de la compétitivité entre les modes de transport. Jusqu'à présent dans le cadre, un *Cercle de*

*causalité* est défini pour chaque mode de transport. Or, ces cercles n'ont pas de connexion entre eux. Pour intégrer le transfert modal, il suffirait d'inclure une liaison entre les différents cercles, représentée par la répartition modale. Ce lien modifierait un thème déjà présent dans chacun des cercles : le nombre de déplacements. Ainsi, une intervention qui induit un transfert modal modifie la répartition modale et donc le nombre de déplacements de plusieurs modes de transport. La vue d'ensemble pourrait ressembler à la Figure 3-23.



**Figure 3-23 : Représentation de la vue d'ensemble des cercles de causalité intégrant le transfert modal**

### *Intégrer le transport des marchandises*

Jusqu'à présent, le cadre d'évaluation est centré sur la mobilité des personnes. Pourtant, le transport des marchandises occupe une grande part des déplacements. Il faut donc songer à intégrer les déplacements liés aux marchandises.

En raison de l'utilisation conjointe par les personnes et les marchandises de plusieurs réseaux de transports, ces deux types de transport devront faire partie du même cadre d'évaluation. Par exemple, il devra pouvoir traiter l'implantation de voies réservées aux camions, qui augmente la capacité pour les marchandises mais réduit celle pour les personnes.

La réflexion doit plutôt porter sur le choix entre l'intégration des paramètres de transport des marchandises aux *Cercles de causalité* existants, et la création de *Cercles de causalité* propres aux marchandises (réseau routier, rail, bateau, etc.). Le premier choix pourrait résulter en un *Cercle de causalité* de très grande taille.

### ***Intégrer la mobilité longue distance***

Une réflexion doit être menée sur la possibilité ou la légitimité d'appliquer les *Cercles de causalité* à la mobilité longue distance, soit les déplacements entre les régions ou les villes.

#### **3.5.2.2 Structures et fonctionnalités de l'outil**

##### *3.5.2.2.1 Modalités adaptatives de l'outil*

L'outil doit permettre l'adaptation constante du cadre d'évaluation de la mobilité durable de façon à ce que ce dernier évolue avec la société et ses préoccupations. Cela assure que les modes émergents et les nouvelles problématiques environnementales, sociales et économiques seront intégrés progressivement au cadre. Les fonctionnalités à ajouter à la forme actuelle de l'outil sont la possibilité :

- d'ajouter ou de supprimer un enjeu (une bulle dans la *Pieuvre*) ou un paramètre de mobilité (offre ou demande);
- de modifier les regroupements en thèmes dans le *Cercle de causalité*. Cela implique que les enjeux et les paramètres de mobilité peuvent être regroupés différemment pour former les thèmes du cercle;
- de créer des nouveaux modes de transport ou de modifier ceux existant, donnant naissance à un nouveau cercle de causalité. Les nouveaux modes à envisager sont le multimodal, l'autopartage, le vélopartage et le covoiturage.
- de créer et supprimer des relations de causalité;
- de spécifier une ampleur, un sens et un terme à une relation de causalité. Court, moyen, ou long, le terme représente la durée avant que l'effet soit perceptible;
- de créer, modifier et supprimer des interventions.

Ainsi construit, l'outil serait en évolution constante. Pour d'archivage, il serait donc nécessaire de pouvoir enregistrer la version de l'outil qui a été utilisée pour réaliser une analyse.

##### *3.5.2.2.2 Schéma relationnel du cadre d'évaluation*

Cette section présente les différentes tables nécessaires, ainsi que leur organisation, qui construiront la version à terme du cadre d'évaluation de la mobilité durable. Illustrées dans un

schéma relationnel simplifié à la Figure 3-24, les *tables – entre crochets en gras* - sont organisées de la manière suivante.

La première table, [*Catégorie*], comprend chaque bulle de la *Pieuvre*, soit les catégories et sous-catégories d'enjeux de la mobilité liés au développement durable. Chaque enregistrement correspond à une catégorie, et peut être lié à une ou plusieurs autres catégories de la même table.

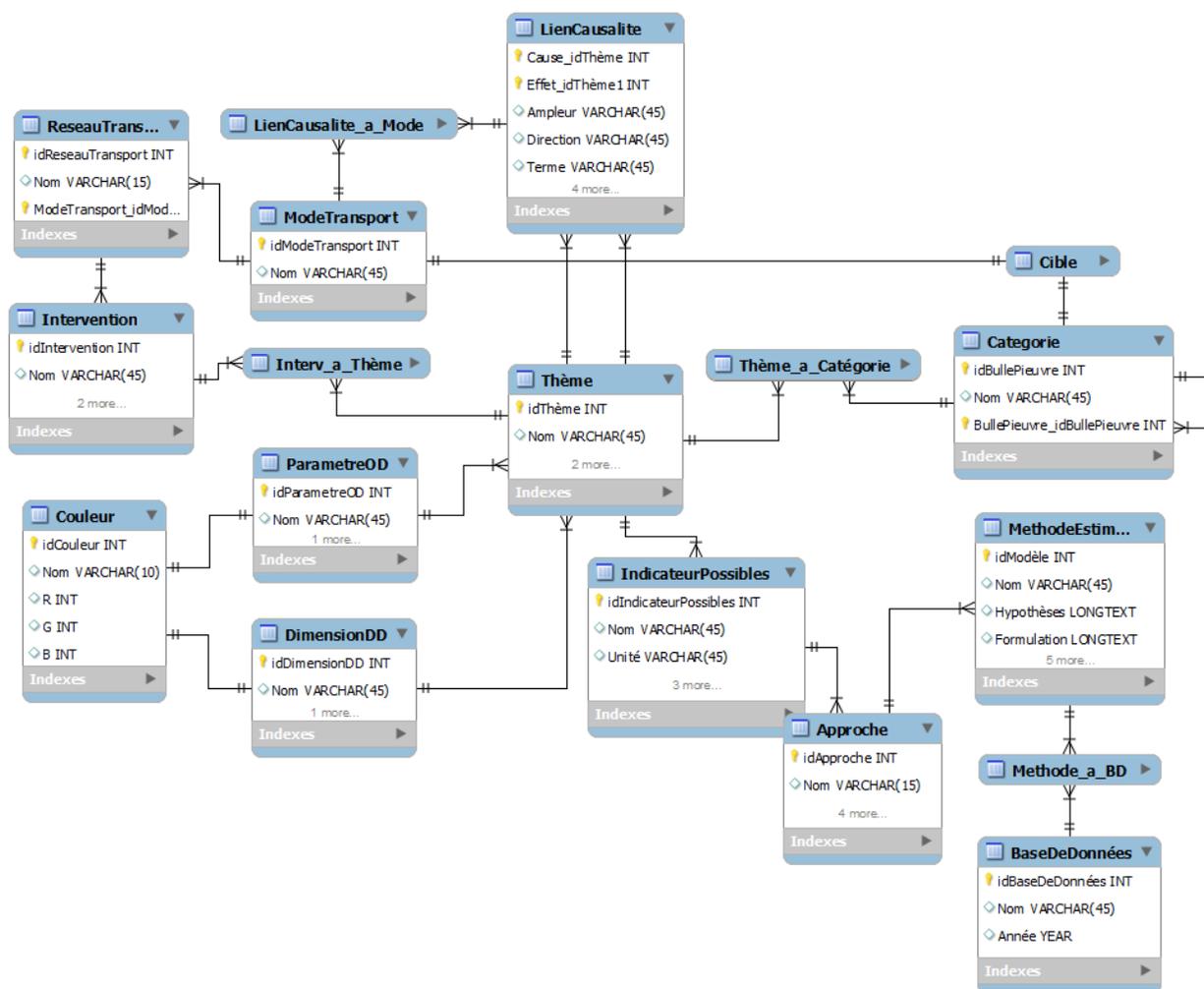
Certains enregistrements de [*Catégorie*] sont liés à un thème du *Cercle de causalité* répertorié dans la table [*Theme*], via la table de liaison [*Thème\_a\_Catégorie*].

Cette table [*Theme*] liste les thèmes qui forment le Cercle de causalité. Chacun est doté des attributs suivants : un identifiant, un nom, une définition, un sens souhaité (+1 ou -1), et des cumuls positifs et négatifs à calculer systématiquement selon ce qui est sélectionné. Il peut être lié à zéro, une ou plusieurs catégories de la *Pieuvre* [*Catégorie*]. Les tables suivantes sont également liées aux enregistrements de [*Theme*] de la façon suivante :

- Chaque thème du cercle représente soit un paramètre d'offre ou de demande [*ParamètreOD*], soit une dimension du développement durable [*DimensionDD*]. Ces deux petites tables contiennent uniquement un identifiant et un nom. Pour [*ParamètreOD*], les noms sont : Véhicule, Individu, Déplacement, Réseau. Pour [*DimensionDD*], ce sont plutôt : Environnement, Société ou Économie. Ces deux tables sont liées à une autre, [*Couleur*], qui comprend les codes associés aux couleurs du schéma.
- Chaque thème du cercle peut être relié à une ou plusieurs interventions touchant l'offre ou la demande, répertoriées dans la table [*Intervention*]. [*Interv\_a\_thème*] fait la liaison entre ces deux tables. Chaque intervention comprend un identifiant et un nom. Une intervention s'applique un ou plusieurs réseau de transport de la table [*RéseauTransport*], par exemple les réseaux de métro, d'autobus ou cyclable. Chaque réseau de transport est lié à un seul mode de transport de la table [*ModeTransport*], comme transport en commun ou vélo.
- Chaque thème du cercle peut être lié à un ou plusieurs indicateurs, listés dans [*IndicateurPossibles*]. Cette dernière liste ne contient qu'un identifiant, un nom et une unité pour chaque indicateur. De plus, chaque indicateur est lié à une ou plusieurs approches (zonale, désagrégée, corridor, segment socio-démographique) [*Approche*].

Chaque approche comprend une ou plusieurs méthodes d'estimation [*MethodeEstimation*]. Chaque méthode d'estimation est liée à une ou plusieurs bases de données [*BaseDeDonnées*].

- Chaque thème du cercle peut être lié à une ou plusieurs relations de causalité entre les thèmes du *Cercle de causalité* [*Thème*]. Ces relations de cause à effet entre les thèmes sont listées dans la table [*LienCausalite*]. Les attributs de cette table sont : la pente de la relation linéaire (+1 pour  $x$  ou -1 pour  $-x$ ), l'ampleur de l'effet et le terme de l'effet (court, moyen, long). Chaque lien de causalité est applicable à un ou plusieurs modes de transport, via la table de liaison [*LienCausalite\_a\_Mode*].



**Figure 3-24: Schéma relationnel simplifié de la version à terme du cadre d'évaluation de la mobilité durable**

### 3.5.2.2.3 Usages divers

À terme, cet outil sera flexible pour les différents besoins des planificateurs en transport. L'outil pourra satisfaire aux usages suivants en lien avec la mobilité durable :

- pour une intervention, un scénario ou un projet donné, l'outil permet :
  - l'identification systématique des impacts du projet (niveau hiérarchique au choix) sur les trois dimensions du développement durable;
  - l'identification d'indicateurs couvrant l'éventail des impacts de la mobilité sur le développement durable;
  - de valoriser une action à l'aide d'arguments traditionnellement non inclus dans le discours en transport, comme la cohésion sociale ou les îlots de chaleur;
  - la comparaison de plusieurs choix, peu importe leur échelle d'impacts;
- pour une cible donnée, l'outil permet :
  - l'identification systématique d'interventions appropriées;
  - l'identification des impacts non ciblés et résultant d'une intervention appropriée;
- pour un plan de mobilité appliqué à un territoire donné, un déplacement, un individu, un ménage, un groupe d'individu ou une autorité de transport, l'outil permet :
  - l'identification d'indicateurs de suivi de la mobilité durable;
  - l'identification d'efforts de collectes de données et de modélisation à faire;
  - l'identification des impacts non ciblés des interventions proposées;
  - de prendre conscience et de mettre de l'avant des enjeux laissés de côté en raison des difficultés de mesure ou du lien non traditionnel avec les transports.

Le cadre d'évaluation devrait être testé à l'aide d'exemple d'interventions, ayant des échelles temporelles et spatiales variées et répondant à des niveaux décisionnels différents (ministère, municipalité, opérateur de transport en commun, etc.).

## CHAPITRE 4 BOÎTE À OUTILS - PROPOSITION D'INDICATEURS

« Comme si la réalité du phénomène ne pouvait être appréhendée qu'à partir du moment où elle était quantifiable. Et comme si, a contrario, tout ce qui n'était pas mesurable n'existait pas.

*La dictature du chiffre, fondée sur une conception objectiviste de la science [...] permet d'occulter tout problème, sous prétexte que les outils pour le mesurer ne sont pas fiables. »*

Vincent de Gaujelac, 2005

Ce chapitre propose une série d'indicateurs pour évaluer la mobilité durable. Ultimement, ces indicateurs constitueront un module du cadre d'évaluation de la mobilité durable, car ils sont reliés à la *Pieuvre* et au *Cercle de causalité*.

D'abord, les objectifs et la méthodologie reliée au chapitre sont présentés (Figure 4-1). Ensuite, les indicateurs sélectionnés et leur lien avec les enjeux est expliqué. Chacun des indicateurs est présenté sommairement, et accompagné d'une fiche méthodologique fournie à l'Annexe C. Cette fiche contient notamment les formulations quant aux développements futurs à envisager. Finalement, une synthèse ajoutée de perspectives et de recommandations clôt le chapitre.



Figure 4-1 : Structure du chapitre « Boîte à outils – Proposition d'indicateurs » (Ch. 4)

### 4.1 Objectifs et méthodologie du chapitre

Cette section comprend les contributions attendues et la méthodologie du chapitre.

### 4.1.1 Objectifs et contributions attendues

Dans l'ensemble, ce chapitre vise à alimenter la discussion quant au choix des indicateurs et à leur développement méthodologique. Les propositions s'inscrivent dans un contexte québécois et, plus précisément, montréalais. Plus spécifiquement, les objectifs sont de :

- proposer un système d'indicateurs qui se greffe au cadre d'évaluation de la mobilité durable présenté au chapitre 3;
- sélectionner les indicateurs avec un souci de :
  - transparence vis-à-vis de la redondance des enjeux mesurés;
  - couverture des trois dimensions du développement durable;
  - couverture du plus grand nombre d'enjeux identifiés dans la *Pieuvre*;
  - minimisation du nombre d'indicateurs différents à estimer;
- proposer une méthodologie pour chaque indicateur, qui soit :
  - axée sur la valorisation des bases de données disponibles dans un contexte québécois et plus précisément montréalais, principalement l'EOD;
  - applicable à plusieurs modes ou réseaux de transport et favorisant la comparaison entre ces derniers;
  - sensible aux facteurs d'offre et de demande qui l'influence;
  - applicable à diverses approches ou objets ayant un niveau d'agrégation varié, notamment les déplacements, les individus, les ménages, les générateurs de déplacements, les liens du réseau, les corridors de déplacements et les territoires;
- identifier les axes à améliorer en terme de collecte de données et de modélisation.

### 4.1.2 Méthodologie

La méthodologie générale associée au développement de la boîte à outils est grandement interreliée aux chapitres précédents. En fait, les étapes préalables à la sélection et l'identification des indicateurs proposés dans ce chapitre sont celles 1 à 4 présentées à la méthodologie du chapitre 3 (Section 3.1.3). À partir des démonstrations des chapitres 4 à 6, de l'Inventaire d'indicateurs issu du rapport annuel de la Chaire Mobilité – Polytechnique Montréal (2011) et du *Cercle de causalité*, une sélection d'indicateurs a été réalisée et, pour chacun, une méthodologie est proposée.

## 4.2 Indicateurs sélectionnés

Au total, dix-sept indicateurs ont été retenus. La plupart des enjeux du *Cercle de causalité* sont retenus et un ou plusieurs indicateurs leur sont associés. Les indicateurs choisis et leur lien avec les enjeux du *Cercle de causalité* sont présentés au Tableau 4-1.

Les enjeux du *Cercle de causalité* (partie inférieure) auxquels un ou plusieurs indicateurs est directement associés sont (nombre d'indicateurs directement reliés entre parenthèses) :

- [Enjeux sociaux] liens sociaux et communauté (2), activité physique (1), temps disponible et réalisation d'activités (1), accessibilité et attractivité (2), équité et cohésion sociales (3);
- [Enjeux environnementaux] consommation de matériaux (1), consommation d'énergie (1), espace au sol (1), émissions de polluants (1), émissions de GES (1);
- [Enjeux économiques] coûts collectifs des services (1), frais variables d'utilisation (1), frais fixes d'utilisation (1), productivité individuelle, locale et régionale (2), revenus collectifs (1).

De plus, deux enjeux issus des paramètres de la mobilité sont intégrés au système d'indicateurs : les accidents et leurs victimes, et la congestion. Bien que ces derniers soient des paramètres de mobilité (partie supérieure du cercle) plutôt que des impacts sur une des trois dimensions du développement durable (partie inférieure du cercle), il importe de les ajouter car ils ne sont autrement pris en charge par aucun des indicateurs jusque-là proposés.

Il reste neuf enjeux qui n'ont pas d'indicateur associé directement. Pour ces derniers enjeux, le nombre d'hypothèses simplificatrices à ajouter dans l'estimation aurait été élevé et la complexité méthodologique accrue. Ce sont :

- [Enjeux sociaux] santé et le bien-être;
- [Enjeux environnementaux] consommation de ressources naturelles, îlots de chaleur, changements climatiques, exposition aux polluants, santé des écosystèmes;
- [Enjeux économiques] dépenses individuelles, Coûts reliés aux externalités (soins de santé et problèmes environnementaux).

Il n'en demeure pas moins que ces enjeux sans indicateur direct ne sont pas exclus du cadre : ils sont reliés par des relations de causes à effets avec les indicateurs retenus. Cela permet au système d'indicateurs de les inclure indirectement. Ceci peut être constaté dans la section

inférieure du Tableau 4-1, qui sert de sommaire. Par un cumul, elle récapitule le nombre d'indicateurs (parmi les 17) reliés à l'enjeu du cercle de causalité, selon le niveau hiérarchique (allant jusqu'au niveau 2).

Ainsi, on constate que, bien que n'ayant aucun indicateur directement attribué, la santé des individus est couverte neuf fois par des liens indirects, et les coûts en soins de santé cinq fois. Avec un cumul de dix, les trois enjeux les plus couverts directement et indirectement sont les interactions sociales et l'agrément de la communauté, l'équité et la cohésion sociale, ainsi que la productivité individuelle, locale et régionale.

L'équité est également l'enjeu le plus couvert directement, avec un cumul de trois liens directs, car plusieurs volets y sont associés : accessibilité physique et financière ainsi que l'exposition à la pollution.

Dans certains cas, plusieurs méthodologie d'indicateurs sont proposées, et ce, pour diverses raisons :

- lorsqu'une seule méthodologie ne peut satisfaire différentes approches, c'est-à-dire qu'il faut plusieurs méthodologies pour couvrir à la fois le déplacement, le lien du réseau ou le territoire [exemple : surface et taux d'utilisation de l'emprise au sol des réseaux de transport];
- lorsqu'une seule méthodologie ne peut couvrir deux volets distincts. Les deux méthodologies devraient éventuellement être jumelées pour former un seul indice [exemples : potentiel de contact social grâce aux déplacements; richesse et diversité des outils d'information à l'usager];
- lorsque plusieurs volets découlent d'une même méthodologie de base [exemples : accidents et leurs victimes par gravité; intensité de service, options de transport et équité d'accès].

**Tableau 4-1 : Indicateurs proposés (D pour lien direct, 0 à 2 pour le niveau du lien indirect d'après le *Cercle de causalité*)**

#	Indicateur proposé (Déplacement(s) = Dépl.)	Société					Environnement								Économie									
		Liens sociaux & communauté	Activité physique	Santé & bien-être	Temps disponible & activités	Accessibilité & attractivité	Équité & cohésion sociales	Conso. de matériaux	Conso. d'énergie	Conso. ressources naturelles	Espace au sol	Émissions de polluants	Émissions de GES	Îlot de chaleur	Changements climatiques	Exposition aux polluants	Santé des écosystèmes	Dépenses individuelles	Coûts collectifs des services	Frais variables d'utilisation	Frais fixes d'utilisation	Coûts de mitigation probl. env.	Coûts des soins de santé	Productivité ind., locale et rég.
1	Potentiel de contact social grâce aux dépl.	D	0																			1		
2	Dépl. avec peu de nuisances polluantes favorisant l'ambiance de quartier	D																					0	
3	Part d'activité physique recommandée attribuable aux déplacements		D	0																		1		
4	Indisponibilité en raison des déplacements			0	D																	1	0	
5	Richesse et diversité des outils d'information à l'utilisateur	2	2			D	0		2														0	
6	Intensités de service, options de transport et équité d'accès	2	2			D	D		2														0	
7	Quantité de matières désuètes et efficacité de récupération					1	2	D	0								1			0			2	1
8	Surface et taux d'utilisation de l'emprise au sol des réseaux de transport	1		1			1				D		0			0					0			
9	Quantité et efficacité d'utilisation d'énergie	2		2			2		D	0		0	0	1	1	1	2					2		
10	Quantité, efficacité et équité de distribution des émissions de polluants	2		2			D								D		0	1						

Tableau 4-2 (suite): Indicateurs proposés (D pour lien direct, 0 à 2 pour le niveau du lien indirect d'après le *Cercle de causalité*)

#	Indicateur proposé (Déplacement(s) = Dépl.)	Société					Environnement								Économie											
		Liens sociaux & communauté	Activité physique	Santé & bien-être	Temps disponible & activités	Accessibilité & attractivité	Équité & cohésion sociales	Conso. de matériaux	Conso. d'énergie	Conso. ressources naturelles	Espace au sol	Émissions de polluants	Émissions de GES	Îlot de chaleur	Changements climatiques	Exposition aux polluants	Santé des écosystèmes	Dépenses individuelles	Coûts collectifs des services	Frais variables d'utilisation	Frais fixes d'utilisation	Coûts de mitigation probl. env.	Coûts des soins de santé	Productivité ind., locale et rég.	Revenus collectifs	
11	Quantité et efficacité d'émissions de gaz à effet de serre	1		1		1																1	2	2		
12	Coûts directs de déplacement et équité de distribution des coûts					1	D											0		D	D			2	0	
13	Récupération des frais d'utilisation																		D						D	
14	Contribution du transport au PIB (en %)																								D	
15	Main d'œuvre disponible pour les générateurs d'emploi																								D	
16	Accidents et leurs victimes par gravité	0		0		0	0		2	1											2	1	1	1		
17	Niveau de congestion des routes principales	2		2	2	1	2	2	2												2				2	
TOTAL LIEN DIRECT		2	1		1	2	3	1	1		1	1							1	1	1				2	1
TOTAL LIEN INDIRECT niveau 0		1		4		1	2	1		2		1	1	2	1	1	1	1			1	1			4	1
TOTAL LIEN INDIRECT niveau 1		2		2		3	2			1				1	1	1	2	1				2	4	1	1	
TOTAL LIEN INDIRECT niveau 2		5	2	3	1		3	1	3	1							1			1	1	1	1	3		
TOTAL LIENS DIRECTS & INDIRECTS		10	3	9	2	6	10	3	4	3	2	2	2	3	2	2	4	2	1	2	3	4	5	10	3	

Chacun des dix-sept indicateurs compte une fiche méthodologique composée des volets suivants.

- Généralités :
  - **objectif général** : description de l'objectif d'évaluation;
  - **variations de l'enjeu évalué** : description des variations du phénomène dans l'espace (E), dans le temps (T) et/ou selon la perception des usagers (P);
  - **base de données** : description des données disponibles et relatives à l'enjeu évalué. Des symboles sont utilisés pour qualifier cette disponibilité : actuellement inexistantes (**\***), partiellement constituées ou disponibles (~), ou existantes et disponibles (✓);
  - **avancées de la recherche** : avancement de la recherche en ce qui a trait à la contribution des transports à l'enjeu évalué. Des symboles sont utilisés pour qualifier cette avancée : faible (**\***), moyenne (~), importante (✓).
- Indicateur proposé :
  - **hypothèses** : hypothèses simplificatrices pour estimer l'indicateur;
  - **formulation** : méthode de calcul, valeurs posées et formules. Possibilité d'application à une entité : un déplacement (D), un individu (I), un ménage (M), un générateur de déplacements (G), un territoire (T), un lien du réseau (L) et un corridor (C).
- Information requise pour l'estimation :
  - **données** et information sur le déplacement, la personne ou le ménage qui permettent de calculer l'indicateur proposé;
  - **manipulations** et calculs à réaliser à partir des données, pour lesquels il peut exister plusieurs niveaux de raffinement.
- **Limites, améliorations possibles et perspectives** : Énoncé des limites et des améliorations possibles de la méthodologie d'estimation proposée.

## 4.3 Synthèse des contributions, perspectives et recommandations

Cette dernière section du chapitre 4 résume les contributions à l'aide de deux synthèses : l'une sur l'applicabilité des indicateurs proposés, l'autre sur les indicateurs d'offre et de demande sous-jacents aux indicateurs proposés. Les perspectives closent le chapitre. Les dix-sept indicateurs couvrent, directement ou indirectement, tous les enjeux du *Cercle de causalité* développé au chapitre 3.

### 4.3.1 Synthèse sur l'applicabilité des indicateurs proposés

Les méthodologies d'estimation proposées sont pour la plupart basées sur des données qui existent déjà, sans toutefois provenir exclusivement du domaine de la planification ou de la modélisation en transport. Un effort particulier pour assembler les données est à envisager. Plusieurs des méthodologies d'estimations nécessitent :

- une EOD, avec des questions sur le déplacement allant de générales (origine et destinations, mode de transport) à précises (coûts, réseau de transport, etc.);
- une connaissance détaillée des caractéristiques des infrastructures de transport (liens, stationnements, nombre de voies, vitesses, etc.) et mise à jour périodiquement;
- un calculateur de chemin pour chaque réseau accompagné d'un modèle d'affectation des déplacements, entre autres pour satisfaire les besoins prévisionnels.
- la fusion avec d'autres données :
  - existantes (budgets, vitesses réelles, recyclage des véhicules, etc.)
  - qualitatives (attente des usagers, potentiel d'interactions sociales, etc.).

D'ailleurs, la dernière colonne du Tableau 4-3 montre les six indicateurs qui sont sujets à la perception des usagers. Ce sont la plupart de ceux directement reliés aux impacts sociaux (#1,2,4,5), ainsi que l'émission de polluants sonores et sur le paysage (#10) et le niveau de congestion (#17). Ces indicateurs bénéficieraient de collectes de données de nature qualitative, venant compléter les données plus objectives comme l'EOD.

Quant au besoin d'un calculateur de chemin et d'un modèle d'affectation sur le réseau, ce sont huit indicateurs qui en requièrent. Alors que les trois découlant de l'énergie consommée concernent

les modes motorisés uniquement, les cinq autres s'appliquent à tous les modes y compris le vélo et la marche. Quatre autres en bénéficieraient pour des fins de prévision.

Sans égard aux données, le Tableau 4-3 résume également les différents modes pour lesquels on peut appliquer les indicateurs. De manière générale, les indicateurs qui ne sont pas basés sur les modes empruntés lors du déplacement ne sont pas compatibles avec le mode « multimodal ». C'est le cas notamment de l'intensité de service (#6), des matières désuètes (#7), des indicateurs axés sur les finances (#13 et #14), des accidents (#16) et de la congestion (#17). De plus, les modes non-motorisés ne sont pas considérés pour tous les indicateurs qui découlent de la consommation de carburant. On considère également que la marche n'engendre ni dépenses (#12) ni déchets (#7).

Finalement, ce ne sont pas toutes les approches qui s'appliquent à tous les indicateurs proposés. Par exemple, les mesures d'accès (#5 et 6), de coûts de déplacements (#12), de main d'œuvre disponible (#15) et de matières désuètes (#7) ne se calculent pas au niveau du lien d'un réseau ou d'un corridor. Également, les indicateurs mesurant directement le volet économique sont pour la plupart impossibles à décomposer au niveau des déplacements, des individus, des ménages ou des générateurs d'emplois. Des études spécifiques à cette dernière problématique devraient être conduites.

**Tableau 4-3 : Synthèse de l'applicabilité des indicateurs proposés (modes, approches et désagrégation nécessaire)**

#	Indicateur  dépl. : Déplacement Prév. : Prévission TC : Transport en commun	Modes					Approches							Désagrégation			Affectation sur le réseau	Perception des usagers
		Auto	TC	Vélo	Marche	Multimodal	Dépl.	Individu	Ménage	Générateur	Lien	Corridor	Territoire	Spatialité	Temporalité	Segment de population		
1	Potentiel de contact social grâce aux dépl.	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•
2	Dépl. avec peu de nuisances polluantes favorisant l'ambiance de quartier	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•				•
3	Part d'activité physique recommandée attribuable aux déplacements	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	
4	Indisponibilité en raison des déplacements	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•
5	Richesse et diversité des outils d'information à l'usager	•	•	•	•	•		•	•	•		•		•				•
6	Intensités de service, options de transport et équité d'accès	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	•			
7	Quantité de matières désuètes et efficacité de récupération	•	•	•			•	•	•	•		•			•			
8	Surface et taux d'utilisation de l'emprise au sol des réseaux de transport	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	
9	Quantité et efficacité d'utilisation d'énergie	•	•			•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	
10	Quantité, efficacité et équité de distribution des émissions de polluants	•	•			•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•
11	Quantité et efficacité d'émissions de gaz à effet de serre	•	•			•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	
12	Coûts directs de déplacement et équité de distribution des coûts	•	•	•		•	•	•	•	•		•	•	•	•		Prév.	
13	Récupération des frais d'utilisation	•	•	•	•						•	•	•	•			Prév.	
14	Contribution du transport au PIB	•	•	•	•							•	•					
15	Main d'œuvre disponible pour les générateurs d'emploi	•	•	•	•	•				•		•	•	•			•	
16	Accidents et leurs victimes par gravité	•	•	•	•						•	•	•	•			Prév.	
17	Niveau de congestion des routes principales	•	•	•	•						•	•	•	•			Prév.	•

### 4.3.2 Indicateurs d'offre et de demande sous-jacents aux indicateurs proposés

Tel que vu au début du chapitre, les dix-sept indicateurs sont redondants, car ils mesurent des impacts qui ont des relations de cause à effet entre eux. Cette redondance s'observe par le biais du *Cercle de causalité* (Tableau 4-1). Si certains enjeux ne sont pas directement mesurés par un indicateur, ils le sont assurément indirectement par plus d'un.

Pour diverses raisons comme par exemple l'indisponibilité des données, il se peut que les indicateurs proposés ne puissent pas être estimés. Advenant ce cas, il importe de ne pas laisser tomber les enjeux qui étaient couverts par cet indicateur. Afin de faire preuve de transparence, il faudrait :

- s'il n'est pas possible de calculer l'indicateur proposé dans ce chapitre,
  - proposer une méthodologie d'estimation alternative basée sur des données disponibles;
  - utiliser un ou plusieurs proxy, soit des indicateurs d'offre ou de demande qui sont en fait des facteurs d'influence de l'enjeu à mesurer;
- comprendre la sensibilité de l'indicateur, notamment en identifiant les facteurs d'influence auxquels l'indicateur est et n'est pas sensible;
- mentionner les limites de la méthodologie d'estimation et les limites de son interprétation;
- montrer la couverture, les manques et la redondance des enjeux de la mobilité durable (la pieuvre) par le système d'indicateurs;
- planifier les étapes à suivre pour parvenir à l'estimation de l'indicateur idéal (ou à la une meilleure estimation de ce dernier).

Pour chaque indicateur proposé, le Tableau 4-4 montre les paramètres de l'offre ou la demande issus du *Cercle de causalité* auxquels l'indicateur est susceptible d'être sensible directement. Les cases roses sont des facteurs d'influence qui ne sont actuellement pas intégrés à la méthodologie proposée, mais qui devraient l'être. Pour ce faire, de nouvelles méthodologies d'estimation doivent être proposées, basées sur des données qui ne sont peut-être pas disponibles actuellement.

Aucun indicateur n'est sensible au taux de dépenses caloriques; il ne figure donc pas dans le Tableau 4-4. Cela est un signe qu'il devrait être enlevé du *Cercle de causalité*.

Également, la répartition modale a été ajoutée au tableau, car, bien qu'elle ne figure pas à l'intérieur du *Cercle de causalité*, elle fait le lien entre les cercles des différents modes de transport. Plusieurs paramètres de l'offre ou de la demande influencent la répartition modale, notamment la motorisation. Par exemple, la motorisation influence le choix modal, et donc la répartition modale, qui est également lié à la quantité d'activité physique réalisée. Cette relation indirecte entre un paramètre (dans l'exemple, la motorisation) et l'indicateur estimé (dans l'exemple, l'activité physique) n'est pas répertoriée dans le tableau.

**Tableau 4-4 : Indicateurs traditionnels de mobilité impliqués dans l'estimation des indicateurs proposés**

#	Indicateur	Véhicule			Déplacement				Ind.		Réseau													
		Taux conso. énergie	Taux émission	Taux d'occupation des véh.	Distance motorisée	Distance non motorisée	Temps de parcours	Vitesse de déplacement	Conduite écologique	Nombre de déplacements	Motorisation, abonnements	Services d'appoint et confort	Universalité des infrastr.	Fiabilité /régularité du service	Disponibilité stationnements	Diversité des tarifs	Connectivité du réseau	Information et signalisation	Volumes et débits	Qualité aménagement	Capacité du réseau	Prix de l'énergie	Répartition modale	
1	Potentiel de contact social grâce aux dépl.			•			•		•										•					•
2	Dépl. avec peu de nuisances polluantes favorisant l'ambiance de quartier																		•	•				•
3	Part d'activité physique recommandée attribuable aux dépl.					•	•		•															•
4	Indisponibilité en raison des dépl.				•	•	•		•		•													•
5	Richesse et diversité des outils d'information à l'utilisateur																	•						
6	Intensités de service, options de transport et équité d'accès									•		•		•		•			•			•		
7	Quantité de matières désuètes et efficacité de récupération				•					•														
8	Surface et taux d'utilisation de l'emprise au sol des réseaux			•			•		•										•			•		•
9	Quantité et efficacité d'utilisation d'énergie	•		•	•		•	•	•										•					•

Couleur Rose :  
la méthodologie devrait être  
directement sensible à ce paramètre,  
mais elle ne l'est pas actuellement

dépl. : déplacement  
véh. : véhicule  
infrastr. : infrastructure  
ind. : individu

**Tableau 4-5 (suite) : Indicateurs traditionnels de mobilité impliqués dans l'estimation des indicateurs proposés**

#	Indicateur  Couleur Rose : la méthodologie devrait être directement sensible à ce paramètre, mais elle ne l'est pas actuellement  dépl. : déplacement véh. : véhicule infrastr. : infrastructure ind. : individu	Véhicule			Déplacement				Ind.		Réseau													
		Taux conso. énergie	Taux émission	Taux d'occupation des véh.	Distance motorisée	Distance non motorisée	Temps de parcours	Vitesse de déplacement	Conduite écologique	Nombre de déplacements	Motorisation, abonnements	Services d'appoint et confort	Universalité des infrastr.	Fiabilité /régularité du service	Disponibilité stationnements	Diversité des tarifs	Connectivité du réseau	Information et signalisation	Volumes et débits	Qualité aménagement	Capacité du réseau	Prix de l'énergie	Répartition modale	
10	Quantité, efficacité et équité de distribution des émissions de polluants		•	•	•				•	•														•
11	Quantité et efficacité d'émissions de gaz à effet de serre		•	•	•				•	•														•
12	Coûts directs de déplacement et équité de distribution des coûts	•		•	•	•										•							•	•
13	Récupération des frais d'utilisation																							
14	Contribution du transport au PIB (en %)																							
15	Main d'œuvre disponible pour les générateurs d'emploi							•																
16	Accidents et leurs victimes par gravité				•	•			•										•					•
17	Niveau de congestion des routes principales						•	•		•			•						•			•		•

### 4.3.3 Perspectives

Le système d'indicateurs proposé cherche à alimenter la discussion sur l'estimation des enjeux habituellement laissés de côté. La sélection des indicateurs et de leur méthodologie doit être discutée par les décideurs et planificateurs qui en feront usage. Une standardisation pourrait être envisagée si les acteurs concernés s'entendent. De surcroît, l'évolution des indicateurs choisis et de leur méthodologie doit nécessairement suivre l'évolution des enjeux composant le cercle de causalité. Le cadre doit être sujet à une remise en question périodique, de façon être mis à jour selon les préoccupations nouvelles.

Les indicateurs devront se greffer aux schémas du cadre d'évaluation de la mobilité durable proposé au chapitre 3 (la *Pieuvre* et le *Cercle de causalité*). Des travaux de programmation et de visualisation restent donc à faire.

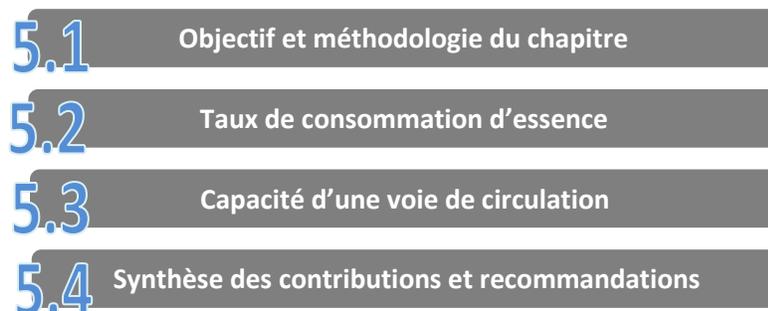
Dans un avenir rapproché, les améliorations générales à apporter ou les réflexions à entreprendre sont :

- la possibilité d'appliquer les méthodologies proposées aux intersections routières;
- l'inclusion du transport des marchandises au système d'indicateurs;
- l'inclusion du concept de cycle de vie;
- l'expérimentation du cadre d'évaluation sur un quartier, un plan, un individu, un générateur de déplacements, une région, un corridor, etc.

Concernant ce dernier point, les trois prochains chapitres (5 à 7) portent sur l'expérimentation de quelques indicateurs ou idées proposés dans la boîte à outils. Le chapitre 5 utilise deux démonstrations pour soulever les défis liés à la comparaison de modes de transport différents, ainsi que pour montrer l'importance du choix des hypothèses simplificatrices et de l'unité. Ces démonstrations sont liées à la surface au sol occupée (#8), à la consommation d'essence (#9) et aux émissions de GES (#11). Les chapitres 6 et 7 visent à contribuer au développement méthodologique de l'indicateur sur les intensités de service, options de transport et équité d'accès (#6) et de l'indicateur sur la congestion routière (#17).

## **CHAPITRE 5 TAUX DE CONSOMMATION D'ESSENCE ET CAPACITÉ D'UNE VOIE DE CIRCULATION**

Les deux chapitres précédents présentent le cadre d'évaluation de la mobilité durable proposant un système d'indicateurs. Pour chaque indicateur, une fiche décrit brièvement une méthodologie d'estimation envisagée. Les trois prochains chapitres (5 à 7) creusent certains de ces indicateurs afin de contribuer à leur développement et de soulever plusieurs défis relatifs à leur estimation. Les différentes sections du chapitre 4 sont montrées à la Figure 5-1. D'abord, les objectifs et la méthodologie générale du chapitre sont présentés. Ensuite, deux démonstrations s'enchaînent : (1) taux de consommation d'essence et (2) capacité d'une voie de circulation. Chacun possède une mise en contexte, des objectifs et une méthodologie spécifiques, des résultats et une discussion. Enfin, une synthèse des contributions et des recommandations clôtent le présent chapitre.



**Figure 5-1 : Structure du chapitre « Taux de consommation d'essence et capacité d'une voie de circulation » (Chapitre 4)**

### **5.1 Objectif et méthodologie du chapitre**

#### **5.1.1 Problématique et principaux constats**

Souvent, l'indicateur choisi pour suivre l'évolution d'un phénomène fait défaut : il est peu, pas ou trop sensible aux interventions réalisées. Les raisons sont multiples et entrent en jeu les choix méthodologiques comme le niveau d'agrégation et l'unité. La problématique est ici abordée en rapportant de la littérature deux méthodes d'estimation pour un même indicateur évaluant sur les émissions de GES. Ces deux méthodes sont à l'opposé : celle québécoise du Programme climat municipalité (2012) et celle lyonnaise du Laboratoire d'économie des transports (LET)

(Bouzouina, Nicolas, & Vanco, 2011). La première est très simplifiée, tandis que la seconde repose sur des hypothèses très détaillées.

Le Programme climat municipalité se base sur une proportion entre les véhicules immatriculés dans la Municipalité régionale de comté (MRC) et le total de la province :

$$\begin{aligned} \text{Émissions GES (tonnes } \dot{e}\text{q. CO}_2\text{/an)}_{MRC} \\ = \sum_i \text{Émissions GES annuelles}_{Qc} \times \frac{\text{nombre véhicules}_{MRC,i}}{\text{nb véhicules}_{Qc,i}} \end{aligned}$$

Où  $i$  est le type de véhicules (automobiles, camions légers, motocyclettes, cyclomoteurs, etc.).

Cette méthode d'estimation rend l'indicateur peu sensible aux interventions qui touchent des facteurs d'influence. Par exemple, avec un nombre de véhicules stable, l'évolution de la MRC suivra celle provinciale. Ainsi, une réduction provinciale résulterait en une réduction dans la MRC. La réalité pourrait cependant être tout autre, comme une augmentation ou une constance dans la MRC mais une réduction provinciale. L'indicateur porterait dans ce cas à de mauvaises interprétations. De plus, il se peut que la population de la MRC diminue, réduisant le nombre de véhicules immatriculés et donc les émissions totales. Sans qu'il n'y ait eu de changements de comportement de mobilité, l'indicateur est modifié. Enfin, l'indicateur n'est nullement sensible aux interventions qui touchent le taux d'occupation des véhicules, la distance parcourue, la propagation des véhicules moins énergivores, le type de conduite, etc. En somme, le seul facteur auquel l'indicateur est justement sensible est la motorisation des personnes.

Le second exemple est celui du LET, pour les automobiles seulement. Les émissions régionales de GES sont estimées à partir d'une enquête ménages-déplacements dans laquelle sont précisées des informations sur les véhicules possédés par le ménage (âge, puissance fiscale, type de carburant). La cylindrée du véhicule est estimée d'après ces informations. À l'aide d'une classification européenne des véhicules basée sur l'âge et la cylindrée, le véhicule est associé à une classe ayant des taux d'émissions de GES particuliers. Ces facteurs d'émissions sont attribués aux déplacements automobiles répertoriés dans l'enquête-ménage. La température du moteur, ainsi qu'une vitesse du déplacement estimée séparément, entrent également dans le calcul. Au final, cette méthode d'estimation rend l'indicateur sensible aux facteurs

d'influence principaux : les caractéristiques des véhicules, les distances parcourues, la vitesse sur le réseau et le nombre de déplacements.

Ces deux exemples de la littérature montrent à quel point la méthode d'estimation peut différer. Cela soulève plusieurs questions, notamment :

- À quel point la précision et les choix d'agrégation dans la méthodologie d'estimation influencent-ils la valeur de l'indicateur estimé?
- Quel est l'ordre de grandeur des erreurs que l'on peut faire en utilisant des approximations (moyennes)?
- Est-il nécessaire que l'indicateur soit sensible à tous les paramètres d'offre et de demande qui sont sensés l'influencer?

### **5.1.2 Objectifs et contributions du chapitre**

Les deux démonstrations suivantes cherchent à illustrer les implications de certains choix méthodologiques. Le premier objectif est d'illustrer l'importance de la sensibilité de l'indicateur, du niveau d'agrégation, du choix de l'unité et de l'objet de référence. Le second objectif visé est de proposer des choix méthodologiques qui facilitent la comparaison entre les différents modes ou réseaux de transport, ainsi que d'assurer la sensibilité d'un indicateur à ses facteurs d'influence.

### **5.1.3 Méthodologie du chapitre**

Les deux démonstrations choisies dans ce chapitre sont concrètes : elles sont basées sur des données réelles et quantifient un phénomène. Cependant, elles sont illustratives : elles ne représentent pas l'exacte réalité, mais plutôt des ordres de grandeur grâce au test de plusieurs scénarios basés sur des valeurs extrêmes. Les deux démonstrations portent sur :

1. L'efficacité de consommation d'essence pour un déplacement;
2. La capacité d'une voie de circulation.

Chaque démonstration a été réalisée à l'aide de données qui lui sont propres. Une méthodologie spécifique est donc présentée pour chacun. Les résultats et leur analyse sont suivis d'une discussion.

## **5.2 Taux de consommation des véhicules**

Lorsque l'on analyse l'efficacité énergétique actuellement, on fait référence à l'efficacité de consommation de carburant des véhicules. Alors qu'il est relativement facile, pour un individu, de comparer une automobile à une autre en regardant leur consommation d'essence respective, la comparaison est beaucoup moins facile pour un décideur qui doit comparer entre l'automobile et l'autobus. Dans ce dernier cas, il ne suffit pas de comparer directement la consommation de carburant d'une automobile à celle d'un autobus : la prise en compte des taux d'occupation de chacun s'avère essentielle. Le passager d'un autobus consomme-t-il plus ou moins de carburant qu'un automobiliste? Combien faut-il de passagers dans l'autobus afin que chacun consomme moins que s'il prenait son véhicule personnel?

### **5.2.1 Objectifs et méthodologie spécifique**

#### **5.2.1.1 Généralités**

Cet exercice présente la relation entre la consommation d'essence des passagers de différents véhicules, selon différents scénarios de taux d'occupation. Peu importe le nombre d'occupants, le taux de consommation du véhicule reste le même. Pourtant, la consommation par passager, elle, varie selon le nombre de passagers dans le véhicule.

L'objectif spécifique de cette expérimentation est de démontrer que l'efficacité de consommation d'essence est plus près de la réalité lorsqu'elle est abordée d'un point de vue individuel plutôt que par véhicule. La consommation de carburant, par kilomètre, des passagers automobile a été comparée à celle d'usagers d'autobus, ce pour différents modèles d'automobile et de types d'autobus.

#### **5.2.1.2 Données et traitements préalables**

Pour les automobiles, les consommations utilisées sont celles des tests en ville, données par l'Office de l'efficacité énergétique (2009b). Par exemple, une Smart consomme 5,9 l/100 km ou 0,059 l/km.

Les consommations des autobus en ville proviennent de documents publics de la Société de transport de Montréal (Marchal, 2009; STM, 2009). Pour les autobus hybrides biodiesel-

électrique et standards, les valeurs de consommation de carburant sont issues d'essais à 18 km/h (excluant le système de chauffage d'appoint, incluant le temps d'arrêt avec moteur en marche).

La deuxième colonne du Tableau 5-1 montre les taux de consommation d'essence et les capacités maximales de sept modèles de véhicules et de trois types d'autobus (hybride, standard et articulé).

### 5.2.1.3 Méthodologie

Le taux de consommation d'essence par passager est estimé pour tous les véhicules montrés au Tableau 5-1, et ce, pour différents taux d'occupation du véhicule.

L'hypothèse posée pour le calcul du taux de consommation d'essence par passager est la suivante. Par kilomètre parcouru, la consommation d'essence d'un passager dans un véhicule est estimée en divisant la consommation d'essence du véhicule (l/km) par le nombre de passagers à l'intérieur du véhicule.

$$\begin{aligned} & \textit{Taux de consommation d'essence / passager} \\ & = \frac{\textit{Taux de consommation d'essence / véhicule}}{\textit{Nombre de passagers / véhicule}} \end{aligned}$$

Le Tableau 5-1 montre des exemples de consommation d'essence par passager pour différents cas. Par exemple, un conducteur seul dans sa Smart consomme 5,9 l/100 km ou 0,059 l/km, soit l'équivalent du taux de consommation d'essence du véhicule. S'il transporte un passager, chacun consomme alors 2,95 l/100 km, soit la moitié du taux de consommation d'essence du véhicule.

**Tableau 5-1 : Consommation d'essence pour différents véhicules**

AUTOMOBILE (places assises)	Consommation d'essence			
	Par véhicule (l/100 km)	Par passager-kilomètre		
		1 passager (l/km)	2 passagers (l/km)	5 passagers (l/km)
Honda Civic Hybride (5)	4,7	0,047	0,024	0,009
Smart Fortwo (2)	5,9	0,059	0,030	-
Toyota Yaris (5)	7,0	0,070	0,035	0,014
Mazda3 (5)	8,4	0,084	0,042	0,017
Honda Accord 2.4 (5)	9,9	0,099	0,050	0,020
Dodge Grand Caravan (7)	12,2	0,122	0,061	0,024
Ford F-150 4.6 Hummer 4X4	14,7	0,147	0,074	0,029
AUTOBUS (places assises et debout)		10 passagers (l/km)	25 passagers (l/km)	50 passagers (l/km)
Hybride – 12,2 m (80)	45	0,045	0,018	0,009
Standard – 12,2 m (80)	65	0,065	0,026	0,013
Articulé – 18,9 m (112)	95	0,095	0,038	0,019

### 5.2.2 Résultats et analyse

Si sept usagers du transport en commun parcourent un kilomètre dans un autobus hybride (0,45 litre d'essence par kilomètre), chacun consomme 0,064 l/kilomètre. Dans le cas de huit passagers dans l'autobus, chacun consomme 0,056 l/km, et ainsi de suite jusqu'à pleine capacité. Selon cette logique, il est possible d'affirmer que huit passagers d'un autobus hybride consomment chacun assurément moins de carburant qu'un conducteur seul dans sa Smart consommant 0,059 l/km. On dira dans ce cas qu'il y a **équivalence en matière de consommation d'essence par passager-kilomètre**. La formule suivante permet de déterminer le minimum de passagers requis dans un autobus afin que chacun consomme moins d'essence que les passagers d'un véhicule particulier :

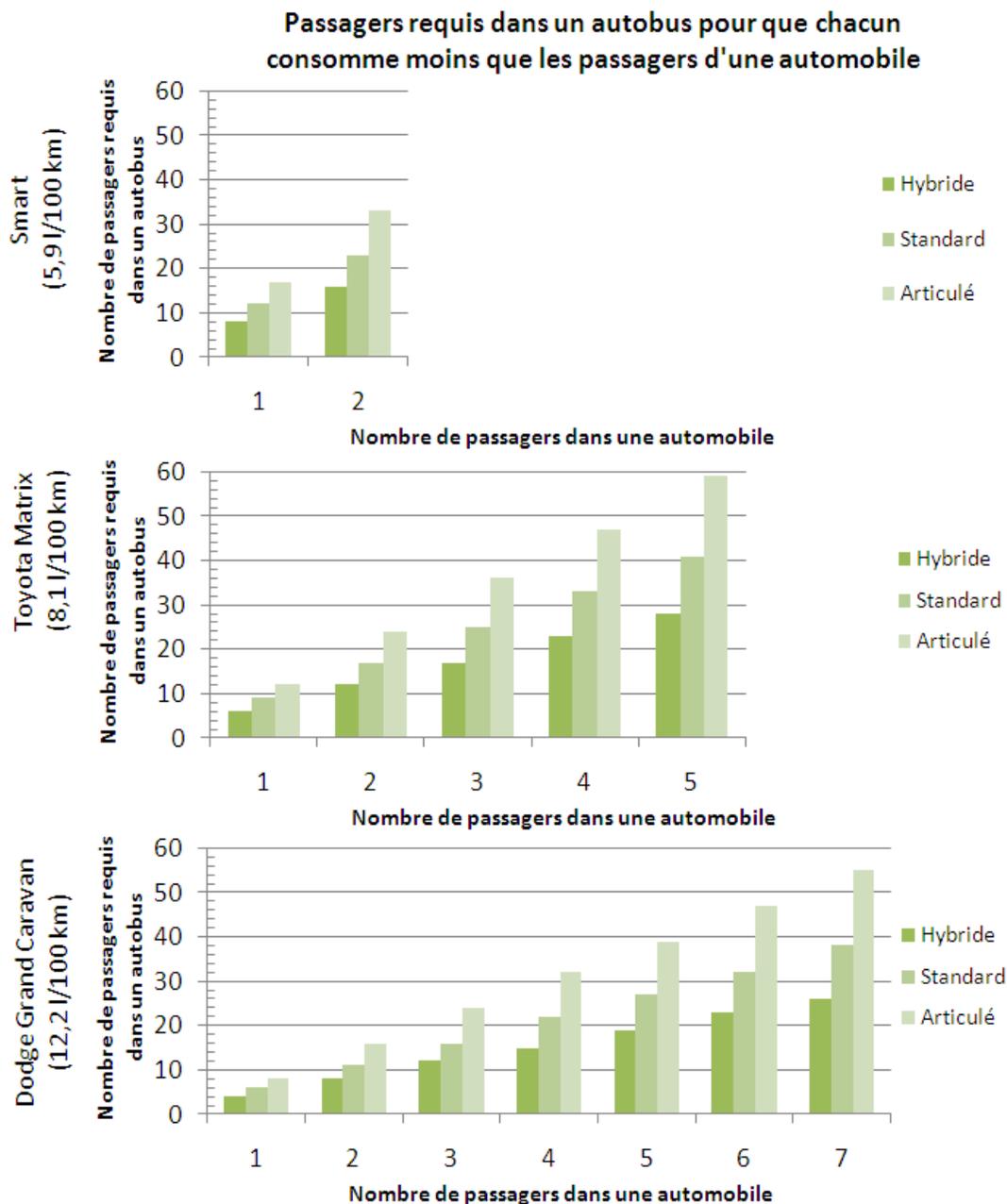
$$Taux\ occupation_{bus} = Arrondi.\ sup \left( \frac{Taux\ consommation_{bus} \times Taux\ occupation_{auto}}{Taux\ consommation_{auto}} \right)$$

La Figure 5-2 présente les taux d'occupation pour une consommation de carburant par passager-kilomètre équivalente pour trois types d'automobiles et d'autobus. Par exemple, en matière de consommation d'essence par passager-kilomètre, un conducteur seul dans une Smart équivaut à huit passagers dans un autobus hybride. Dans le cas des autobus standard et articulés, cette équivalence est atteinte lorsqu'ils contiennent 12 et 17 passagers respectivement.

Or, le parc automobile québécois est loin d'être composé uniquement de Smart. Un véhicule plus représentatif du parc automobile est la Toyota Matrix (8,1 l/100 km). Dans ce cas, il faut qu'un autobus standard transporte neuf usagers pour que leur consommation par passager-kilomètre (0,072 l/km) soit équivalente à celle d'un conducteur d'une Matrix (0,081 l/km).

Cependant, un conducteur est parfois accompagné de passagers. Une Matrix comprend jusqu'à cinq places, alors que la Smart n'en a que deux au maximum. Ainsi, une Matrix à pleine capacité a une consommation par passager équivalente à celle d'un autobus standard transportant 41 passagers ou d'un autobus hybride transportant 28 passagers. Le moyen de transport des passagers d'une Matrix à pleine capacité n'est toutefois pas plus écoénergétique que celui des sept passagers d'une minifourgonnette Dodge Grand Caravan (12,2 l/100 km). En effet, leur consommation de carburant par passager équivaut à celle de chacun des 38 passagers d'un autobus standard (26 passagers d'un autobus hybride).

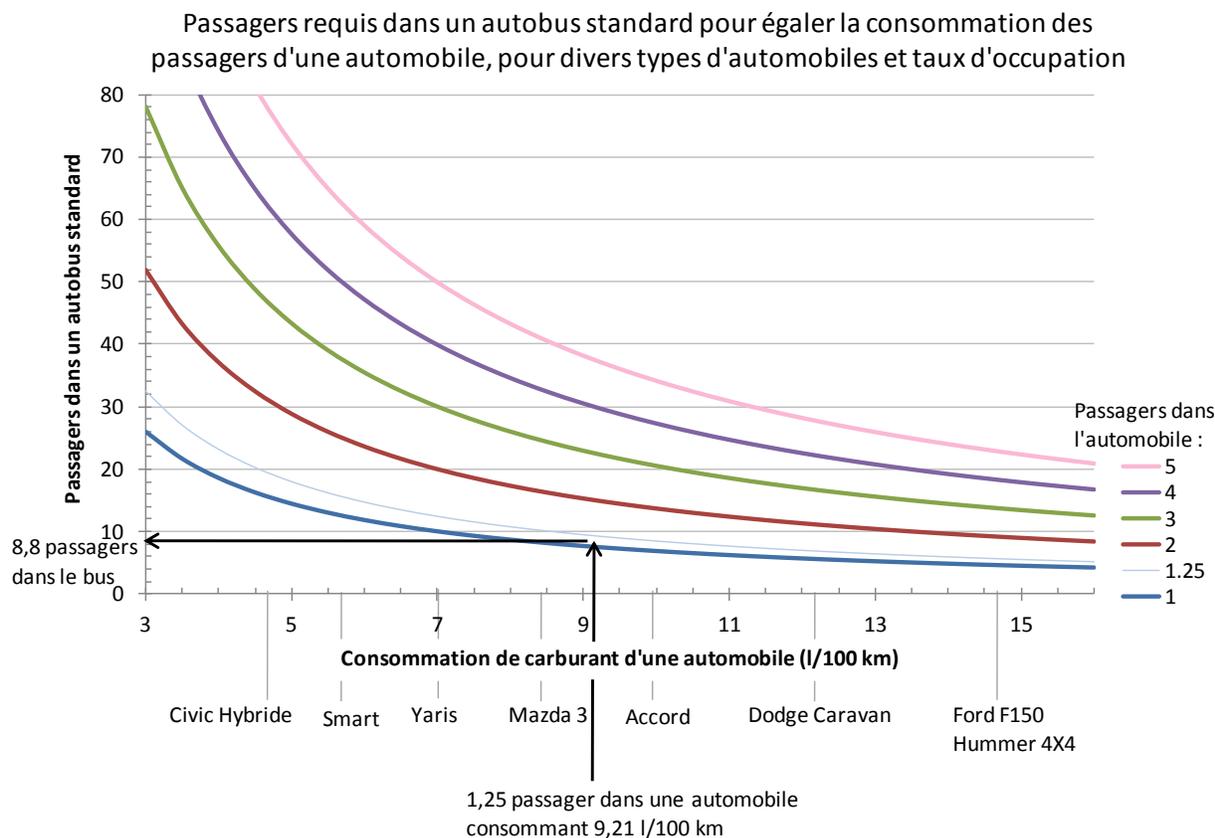
Les extrêmes sont particulièrement impressionnants. Lorsqu'on regarde l'autobus articulé : 24 passagers dans l'autobus sont nécessaires pour égaler la consommation d'essence de seulement deux passagers dans une Matrix. Inversement, lorsqu'on regarde les véhicules utilitaires sport : il faut seulement quatre passagers dans l'autobus hybride pour que chacun de ses passagers consomme moins de carburant qu'un conducteur de Hummer 4X4.



**Figure 5-2 : Équivalence en matière de consommation d'essence par passager-kilomètre, entre différents autobus et véhicules privés**

Si l'on revient à une situation plus réaliste pour la grande région de Montréal. En posant que le parc automobile est constitué de véhicules consommant en moyenne 9,2 litres d'essence/100 km et que le taux d'occupation moyen des automobiles est de 1,25, un minimum de 8,3 passagers est requis dans l'autobus standard. Cette valeur est de 6,1 et de 12,9 pour les autobus hybrides et articulés respectivement. C'est ce type d'analyse comparative qui peut être conduite grâce au

graphique suivant (Figure 5-3) qui illustre la relation entre les taux d'occupation et la consommation de carburant des automobiles pour un autobus standard.



**Figure 5-3 : Passagers requis dans un autobus standard pour égaler la consommation des passagers d'une automobile**

## 5.2.3 Synthèse des contributions, perspectives et recommandations

### 5.2.3.1 Contributions et limites

Bien entendu, la valeur moyenne de 8,8 passagers comme seuil du taux d'occupation des autobus standards ne peut être retenue telle quelle. En effet, le parc d'autobus des sociétés de transport en commun n'est pas composé uniquement d'autobus standards. Cependant, cette analyse souligne l'importance de la diversification du parc d'autobus pour répondre à la demande. De plus, les consommations de carburant observées risquent de varier fortement d'une société de transport à l'autre, notamment en raison du type de véhicule, des périodes de service et des conditions de circulation sur le réseau routier (arrêts fréquents, voie réservée, autoroute, etc.). Également, il

serait possible d'ajuster les estimations de consommation des autobus en fonction du kilométrage non productif (à vide). Cette analyse pourrait donc être approfondie en s'appuyant sur les données opérationnelles des sociétés de transport en commun.

En ramenant le taux de consommation d'essence à une caractéristique du déplacement d'une personne plutôt que du véhicule, cette démonstration facilite la comparaison entre les modes et réseaux de transport. La comparaison, et donc l'interprétation qui en découle, est ainsi plus juste et transparente. Elle permet également d'objectiver les réflexions autour des contributions et des rôles respectifs des différents modes motorisés. Toutefois, l'analyse n'aborde pas la complexité de la variation du taux d'occupation durant un même trajet. Bien que cette réalité soit valable tant pour les automobiles que les autobus, elle est bien plus notable pour le transport en commun. Cela a pour effet de complexifier la transposition de cette analyse théorique à une version plus pratique.

### **5.2.3.2 Perspectives et recommandations**

Cette démonstration propose de revoir les indicateurs d'efficacité de consommation de carburant avec une perspective « personne » plutôt que « véhicule ». De façon générale, cette analyse met de l'avant l'importance du choix de l'unité et d'un référentiel (ici les personnes plutôt que les véhicules) pour un indicateur. Plusieurs autres indicateurs basés sur les véhicules gagneraient à redéfinir ainsi leur référentiel, notamment ceux sur l'efficacité d'émissions, la capacité d'une voie de circulation, etc.

## **5.3 Capacité d'une voie de circulation**

Un des impacts des systèmes de transport est l'occupation du sol par ses infrastructures, emprise qui amplifie le ruissellement des eaux et les îlots de chaleur. Lorsqu'on quantifie cet impact, on aborde souvent le phénomène sous l'angle de la surface au sol utilisée par les infrastructures de transport. Et c'est aussi là qu'on s'arrête.

Advenant une meilleure efficacité des transports, cette emprise pourrait être libérée et utile à d'autres usages plus valorisés. Dès lors, pour le planificateur en transport, la question qui se pose n'est pas tant la quantité de surface occupée par les infrastructures, mais plutôt l'efficacité et la performance de son utilisation. Est-il possible d'augmenter la capacité des réseaux sans

augmenter leur surface au sol? Améliorer l'efficacité d'utilisation de l'espace signifie augmenter la capacité théorique du réseau sans étendre son emprise au sol.

### 5.3.1 Objectifs et méthodologie spécifique

#### 5.3.1.1 Objectifs

Un des facteurs qui est susceptible d'influencer la capacité d'une voie et auquel on pense peu souvent est la taille des véhicules. En effet, des véhicules de plus petite taille libèrent de l'espace sur la voie pour d'autres véhicules, augmentant ainsi la capacité de cette voie en termes de débit de véhicules. Un des objectifs spécifiques de cet exercice est d'évaluer l'impact de la longueur des véhicules sur la capacité d'une voie de circulation. Quel est l'ordre de grandeur de la variation de capacité théorique en fonction d'une variation de la taille des véhicules?

Cette démonstration intègre également les recommandations proposées à la démonstration précédente, soit de passer d'une perspective « véhicule » à une perspective « personne ». Ainsi, on vise également à évaluer la capacité d'une voie en personnes, plutôt qu'en véhicules. En évaluant la capacité selon les caractéristiques des véhicules qui circulent sur une voie, on peut comparer différents modes de transport.

#### 5.3.1.2 Méthodologie

##### *Automobiles*

La capacité d'une voie d'autoroute est traditionnellement calculée en véhicules par heure, ou en Unité Véhicule Particulière (UVP) par heure. La capacité d'une voie de circulation équivaut au débit horaire maximal  $Q_{max}$ . De façon générale, le débit  $Q$  dépend de la vitesse de circulation  $V$  (km/h) et de la densité des véhicules  $K$  (nombre de véhicules / longueur du tronçon) :

$$Q = V \times K$$

Jusqu'à un point de saturation, le débit augmente avec la vitesse des véhicules. Dépassé ce point, la circulation à de hautes vitesses requiert une distance de sécurité trop grande, faisant diminuer le débit. Ainsi, le débit maximal apparaît pour une vitesse et une densité optimales.

En théorie, la distance sécuritaire de freinage pour un véhicule correspond à la distance requise pour qu'il arrête sans collision alors que le véhicule devant fait un arrêt sec, soit une décélération infinie de ce dernier. La distance de sécurité à respecter  $D_{sécurité}$  suit la formule suivante :

$$D_{sécurité} = \text{Temps de réaction} \times V + \frac{V^2}{2g \times \text{Décélération}_{véh}}$$

La décélération du véhicule pour lequel on calcule la distance de sécurité est posée à  $6 \text{ m/s}^2$  et le temps de réaction du conducteur à 1,4 secondes. Le paramètre  $g$  est l'accélération gravitaire, soit  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Le nombre de véhicules maximal  $N_{véhicules}$  sur un tronçon de longueur  $L_{tronçon}$  est calculé à partir de cette distance de sécurité  $D_{sécurité}$  et de la taille moyenne des véhicules  $L_{véhicule}$  :

$$N_{véhicules} = \frac{L_{tronçon}}{L_{véhicule} + D_{sécurité}}$$

La densité  $K$  correspond au nombre de véhicules divisé par la longueur du tronçon :

$$K \left( \frac{véh.}{m} \right) = \frac{N_{véhicules}}{L_{tronçon}} = \frac{1}{L_{véhicule} + D_{sécurité}}$$

À chaque vitesse, une densité  $K$  peut donc être associée, ainsi qu'un débit  $Q$  d'après la formule initiale  $Q = V \times K$ . La vitesse  $V$  qui donne un débit maximal en utilisant la formule suivante correspond donc à la capacité théorique de la voie, en véhicules.

$$Q \left( \frac{véh.}{h} \right) = V \times K = 3600 \times \frac{V \left( \frac{m}{s} \right)}{L_{véhicule} \times D_{sécurité}}$$

Puisque cette analyse vise entre autres à comparer la capacité d'une voie selon différents modes de transport, l'analyse doit se faire en personnes plutôt qu'en véhicules. Le débit maximal trouvé précédemment doit donc être multiplié par le taux d'occupation des véhicules :

$$\text{Capacité} \left( \frac{pers}{h} \right) = Q_{max} \left( \frac{véh.}{h} \right) \times \text{Taux d'occupation} \left( \frac{pers}{véh.} \right)$$

Les scénarios théoriques testés sont basés sur différentes taille de véhicules et différents taux d'occupation de ceux-ci. Les hypothèses sur la taille et la capacité des véhicules sont données au Tableau 5-2 :

**Tableau 5-2 : Capacité et longueur d'automobiles**

Véhicule	Capacité (places)	Longueur (m)
Compact	5	4,1
Mini-fourgonnette	7	4,8
Micro-urbain	2	2,7

***Transport en commun***

Pour le transport en commun, la fréquence de passage des véhicules (inverse de l'intervalle) et le nombre de places offertes déterminent le débit maximal :

$$Q_{max} = \text{Capacité} \left( \frac{\text{places}}{\text{véh}} \right) \times \text{Fréquence} \left( \frac{\text{passages}}{h} \right)$$

$$Q_{max} = \text{Capacité} \left( \frac{\text{places}}{\text{véh}} \right) \times \frac{60}{\text{Intervalle de passage (min)}}$$

La capacité d'un véhicule diffère si l'on tient compte des places assises ou également de celles debout. Le Tableau 5-3 résume les longueurs et places disponibles pour différents véhicules de transport en commun (STM, 2012b). Le midibus est un petit autobus comprenant seulement 20 places assises.

**Tableau 5-3 : Capacité et longueur des véhicules de transport en commun**

Véhicule	Capacité Assise	Capacité Assise + debout	Longueur (m)
Midibus	20	35	9.5
Bus normal	30	75	12
Bus articulé ou Trolleybus	54	105	18
Tramway (1 voiture)	75	200	35
Métro (9 voitures)	216	1200	152

***Piétons et cyclistes***

Dans ces cas, il est supposé que des piétons ou cyclistes passent en continu sur le tronçon étudié. En supposant une largeur de voie d'environ 2,5 m pour les automobiles ou les véhicules de transport en commun, deux individus piétons ou cyclistes peuvent être côte-à-côte. La formule utilisée est donc la suivante pour estimer le débit maximal, en utilisant les valeurs du Tableau 5-4 ci-dessous.

$$Q_{max} = \frac{Vitesse \left(\frac{km}{h}\right)}{Espacement \text{ entre les individus (m)}} \times 2 \frac{personnes}{largeur \text{ de voie}}$$

**Tableau 5-4 : Vitesse et longueur occupées par les piétons et cyclistes**

Véhicule	Vitesse (km/h)	Longueur (m)
Piétons	3,5	1
Cyclistes	10	1,7

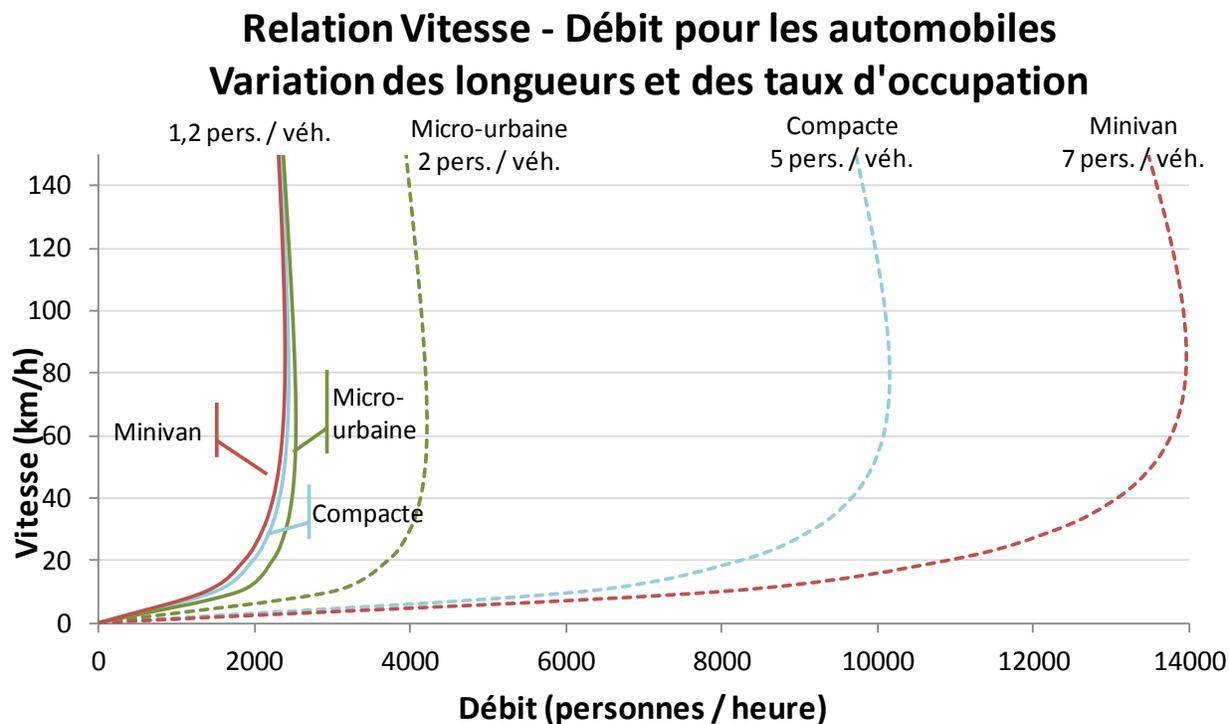
### 5.3.2 Résultats et analyse

Si l'on compare les trois types de véhicules particuliers montrés au Tableau 5-2, on obtient les courbes vitesse – débit du graphique de la Figure 5-4. Le débit maximal s'observe à environ 80 km/h.

Les véhicules micro-urbains, de type Smart, offrent la plus grande capacité en véhicules : 2 113 véhicules / heure comparativement à 2 030 véhicules / heure pour les automobiles compactes et à 1 995 véhicules / heure pour les minivans.

Pour un taux d'occupation moyen de 1,2 personne / véhicule, ces proportions relatives sont respectées en personnes / heure : 2 394 pour les minivans, 2 436 pour les automobiles compactes et 2 536 pour les micro-urbaines. Pour une période de pointe d'une durée de 3 h et une autoroute à 3 voies, les voitures micro-urbaines représentent un gain de 600 personnes par rapport aux automobiles compactes.

Par contre, si les véhicules particuliers étaient utilisés à pleine capacité, ces proportions ne tiendraient plus car les véhicules micro-urbains n'ont que deux sièges, les automobiles compactes cinq et les minivans sept. Ces capacités sont représentées par les courbes vitesse/débit tirées du graphe de la Figure 5-4. Dans ces conditions, c'est la mini-fourgonnette qui offre la plus grande capacité (13 966 personnes / heure). Les automobiles compactes permettent un débit maximal horaire de 10 151 personnes. Ce débit maximal tombe à 4 226 personnes / heure avec les véhicules micro-urbains.



	Longueur véhicule (m)	Taux occupation		Capacité	
		(personnes / véhicule)	(personnes / heure)	(véhicules / heure)	
Micro-urbaine	2,7	Occupation à pleine capacité	2	4 226	2 113
Auto compacte	4,1		5	10 151	2 030
Minivan	4,8		7	13 966	1 995
Micro-urbaine	2,7	Occupation moyenne	1,2	2 536	2 113
Auto compacte	4,1		1,2	2 436	2 030
Minivan	4,8		1,2	2 394	1 995

**Figure 5-4 : Débit et capacité d'une voie de circulation automobile**

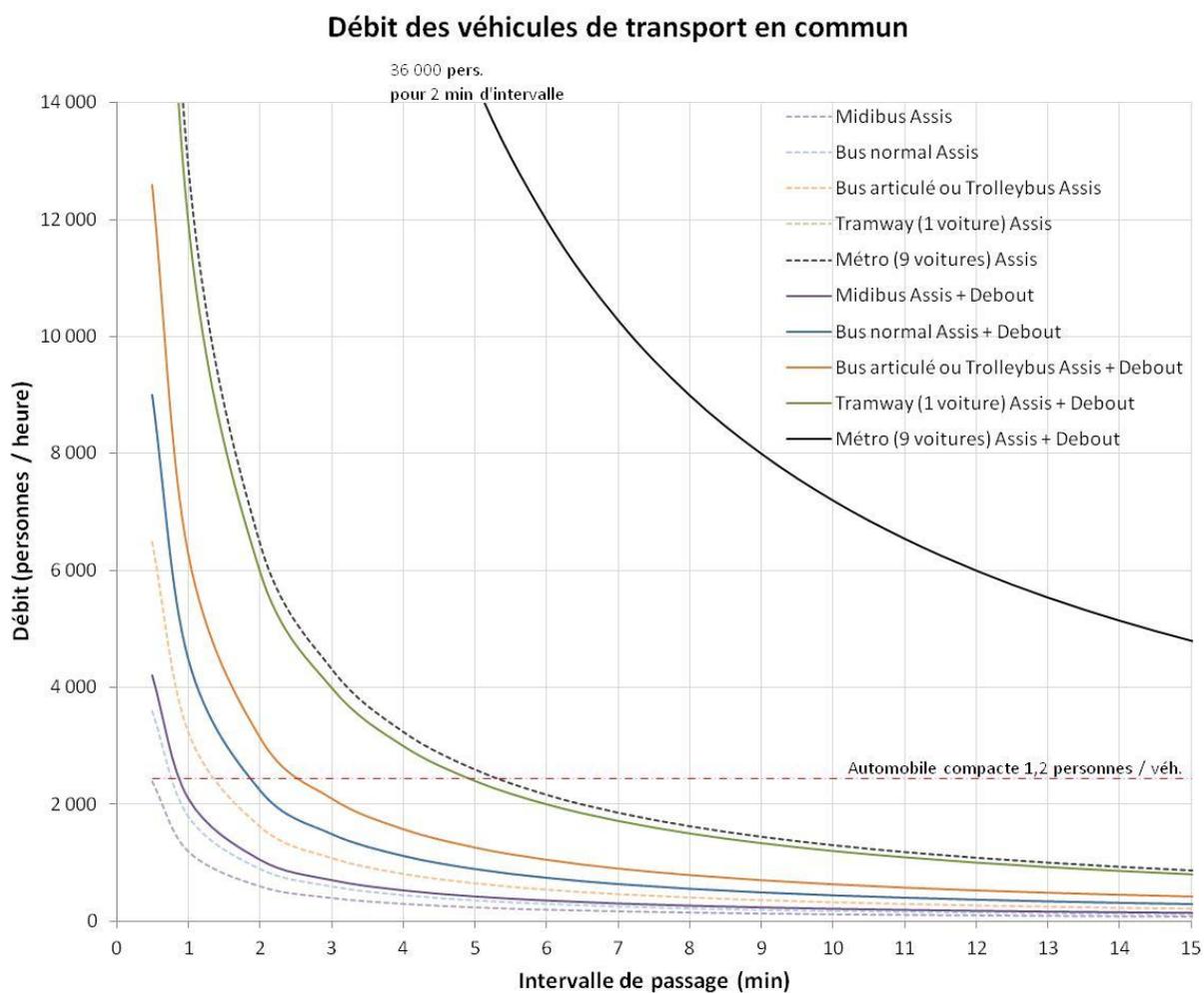
Ces débits de personnes en automobile peuvent être comparés aux débits passagers en transport en commun. La Figure 5-5 montre les débits pour les différents véhicules de transport en commun du Tableau 5-3, en fonction de l'intervalle entre deux passages. Les courbes tiretées représentent les débits pour les capacités de véhicules en places assises, alors que les courbes pleines sont pour les places assises et debout.

On observe que le métro (9 voitures) a une capacité bien plus grande que les autres véhicules, allant jusqu'à un débit de 72 000 personnes/heure pour un intervalle d'une minute. Les valeurs

sont similaires entre le métro places assises seulement et le tramway places assises et debout. Si une voiture est rajoutée au tramway, les débits augmentent en conséquence.

Si l'on compare avec une voie routière où circulent des automobiles compactes (4,1 m de longueur en moyenne) occupées à 1,2 personnes / véhicule, on obtient un débit maximal de 2 436 personnes / heure, ce qui équivaut à (places assises et debout) :

- un métro aux 30 minutes environ (environ 2 trains à l'heure);
- environ un tramway aux 5 minutes (environ 12 trains à l'heure);
- un bus articulé à chaque 2 minutes 30 secondes (24 bus à l'heure);
- un bus normal à un intervalle d'environ 1 min 45 sec (environ 33 bus à l'heure);
- un midibus à un intervalle d'environ 55 secondes (environ 66 bus à l'heure).



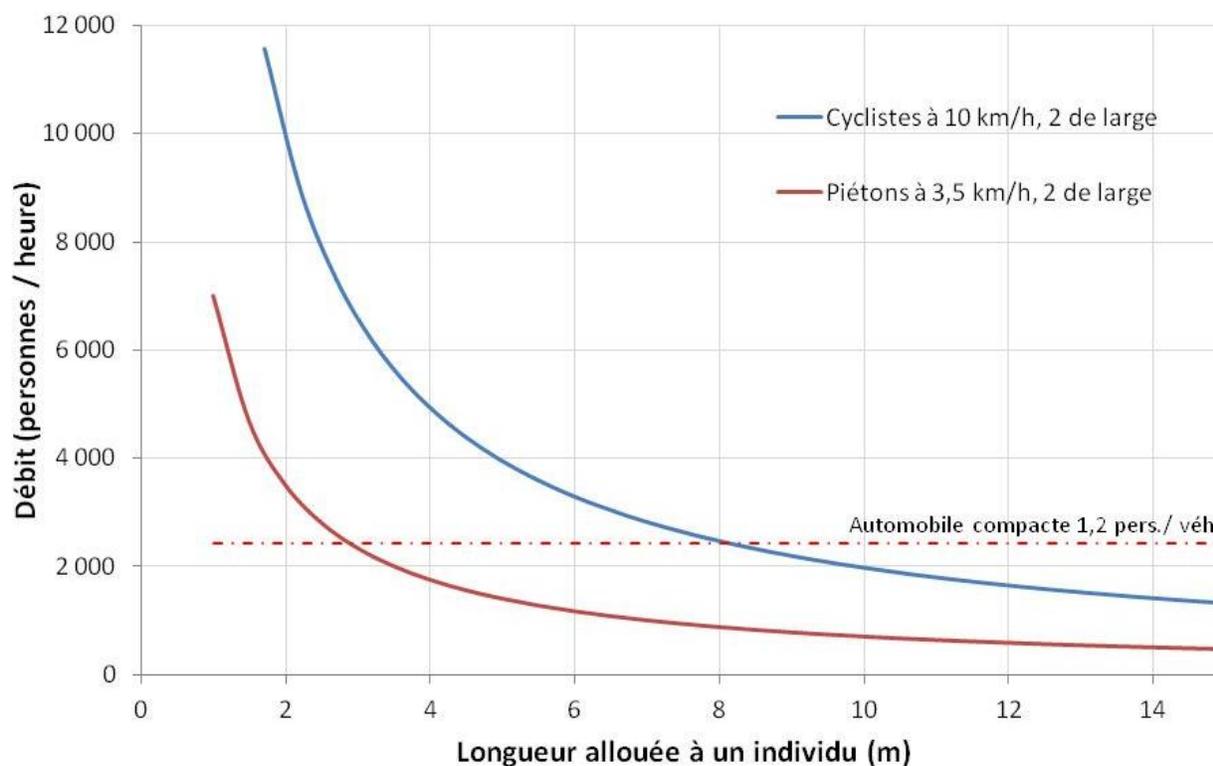
**Figure 5-5 : Débit de personnes pour les véhicules de transport en commun selon l'intervalle de passage**

Pour qu'un système de midibus équivaille au débit maximal de mini-fourgonnettes utilisées à pleine capacité, il faudrait qu'un midibus avec les 20 places assises occupées passe à un intervalle de 5,3 secondes (fréquence de 680 passages / heure).

En ce qui a trait aux piétons et aux cyclistes, le débit maximal correspond toujours à l'état où les individus sont collés un derrière l'autre. Dans cette démonstration, cela a été établi à 1 m d'espacement pour les piétons et à 2 m pour les cyclistes. Les débits correspondants sont de 7 000 piétons / heure et de 9 836 cyclistes / heure. Tel qu'attendu, la Figure 5-7 montre que plus l'espacement augmente, moins le débit de personnes est élevé.

Une voie de circulation pour automobiles compactes ayant un taux d'occupation de 1,2 personnes / véhicule équivaut à :

- une voie piétonne dans laquelle les piétons sont espacés de 2,9 mètres. Cela équivaut au tiers de la capacité maximale de piétons (espacement de 1 m);
- une voie cyclable dans laquelle les cyclistes sont espacés de 8 mètres. Cela équivaut au quart de la capacité maximale de cyclistes (espacement de 2 m).



**Figure 5-6 : Débit de personnes pour les piétons et les cyclistes selon la longueur allouée**

La Figure 5-7 résume la capacité d'une voie de 2,5 m de largeur pour les différents modes de transport et les divers véhicules. On constate facilement que le métro est de loin le plus performant. Toutefois, les mini-fourgonnettes à pleine capacité (7 personnes / véhicule) talonnent un métro passant aux 5 minutes. Les cyclistes en file à seulement 2 m d'espacement sortent presque aussi performants que des automobiles compactes remplies avec 5 passagers / véhicule.

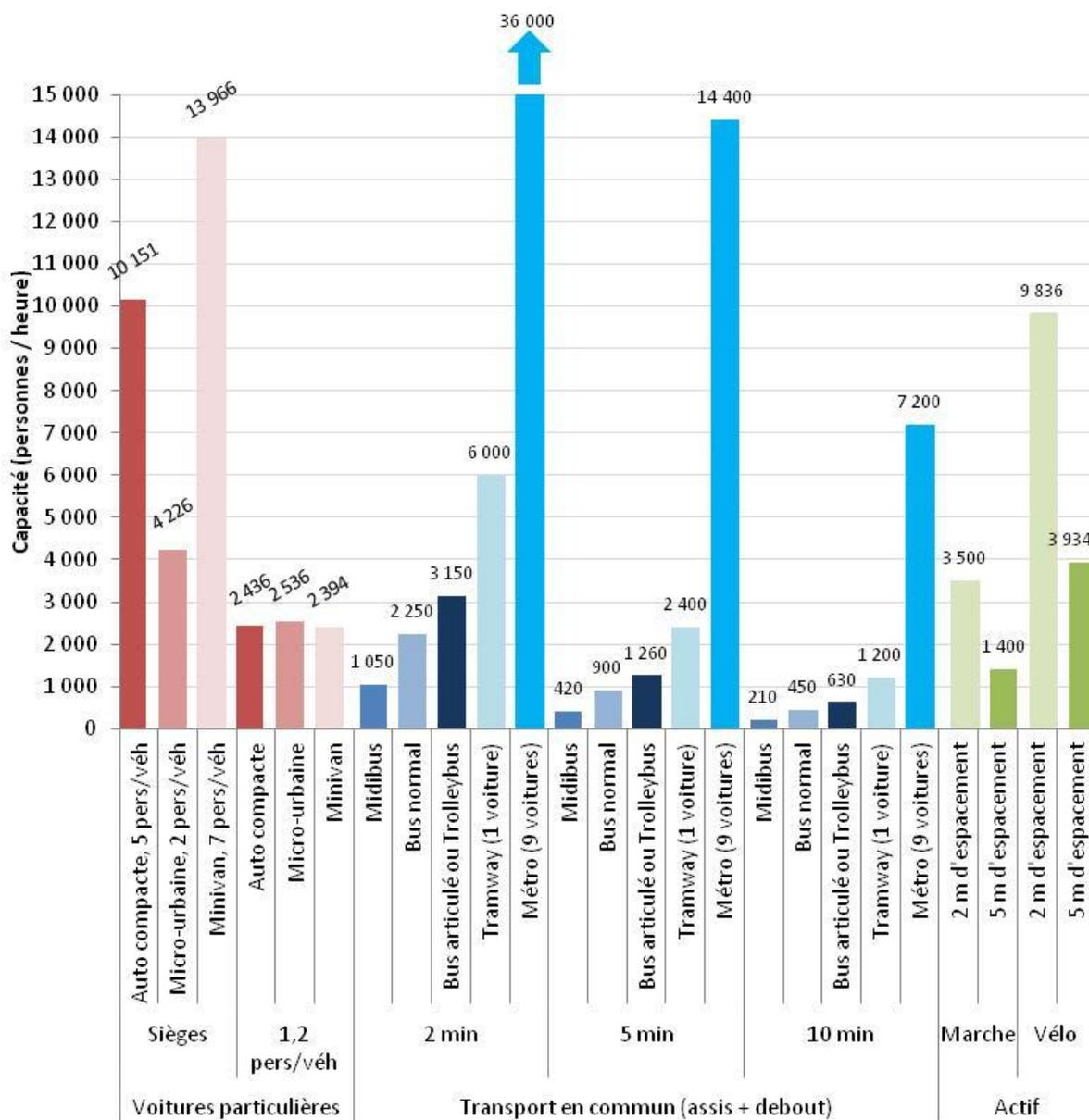
Globalement, pour offrir la même performance que des véhicules particuliers en circulation fluide et à un taux d'occupation moyen de 1,2 personnes / véhicule, le bus doit avoir une fréquence de passage plutôt élevée (intervalles de passage de moins de 2 minutes 30 secondes). Toutefois, notons qu'advenant un phénomène de congestion causé par une trop grande affluence de véhicules particuliers, la vitesse diminue, diminuant du même coup le débit de personnes en automobile. Dans ce cas de congestion routière, le bus peut passer à une fréquence moindre pour équivaloir au débit de personnes en véhicules particuliers.

Le faible taux d'occupation des véhicules (1,2 personnes) par rapport à leur capacité et leur longueur rend les véhicules particuliers peu performants. D'ailleurs, pour ce taux d'occupation moyen, la capacité d'une voie est moindre que celle de piétons ou de cyclistes avançant en file avec un petit espacement entre les individus. L'autobus commence à être aussi performant que les voitures lorsque l'intervalle de passage descend au-dessous de 3 minutes. Le métro offre quant à lui une capacité très élevée par rapport aux autres modes.

Ces résultats dépendent évidemment des hypothèses simplificatrices posées sur la taille et la capacité des véhicules, sur la fréquence de passage, ou sur l'espacement minimal entre les véhicules ou les personnes.

### **5.3.3 Synthèse des contributions, perspectives et recommandations**

Dans cette démonstration, la capacité d'une voie est fonction, selon le mode de transport analysé, du taux d'occupation des véhicules, de leur capacité, de leur taille et de leur vitesse. Toutes ces considérations sont des facteurs d'influence de la capacité d'une voie. Pour l'automobile, les expérimentations montrent que le taux d'occupation des véhicules particuliers a une influence beaucoup plus grande sur le débit maximal que la taille des véhicules.



**Figure 5-7 : Capacité d'une voie de 2,5 m de largeur par type de véhicule**

De plus, cet exercice renforce l'idée de passer des analyses basées sur les véhicules à celles basées sur les personnes. L'utilisation des personnes comme référentiel pour la capacité d'une voie de circulation a permis de comparer différents modes de transport : l'automobile, le transport en commun, la marche et le vélo. C'est ainsi que l'on distingue le métro et un parc composé entièrement de mini-fourgonnettes utilisées à pleine capacité. Malgré leur faible vitesse de mouvement, les modes actifs surprennent avec des capacités plus grandes que les véhicules particuliers occupés avec un taux moyen de 1,2 personne.

Cet exercice est à titre illustratif et, pour en tirer des conclusions, il bénéficierait de l'intégration de valeurs plus réalistes. D'abord, l'emprise au sol (ou sous-sol pour le métro) est en réalité plus grande que la largeur d'un véhicule (ici posée à 2,5 m). Par exemple, sur les autoroutes, les accotements et les bandes vertes de sécurité sont des espaces à inclure, car ils sont nécessaires au fonctionnement de la voie de circulation. Les capacités pourraient être exprimées en personnes par heure par un mètre de large pour pouvoir comparer les différents modes de transport.

De surcroît, il serait intéressant de comparer des voies partagées entre plusieurs modes de transport : autobus-vélo, vélo-marche, automobile-tramway, etc. Quel partage fournit la capacité la plus élevée ?

## **5.4 Contributions et perspectives**

La première démonstration compare les taux de consommation d'essence par mode, alors que la seconde compare la capacité d'une voie de circulation par mode. Ces deux comparaisons sont possibles grâce au choix de l'objet de référence, soit l'individu plutôt que, traditionnellement, le véhicule. Ces deux exercices intègrent également des facteurs d'influence à la méthode d'estimation, notamment le taux d'occupation et la taille des véhicules.

L'intégration des facteurs d'influence à la méthode d'estimation rendent l'indicateur sensible aux évolutions socio-économiques, aux changements de comportements de mobilité et aux modifications des lois qui dictent les caractéristiques de l'offre et de la demande. Cela facilite l'interprétation de l'évolution d'un indicateur, met en lumière les leviers d'action possibles et guide les interventions à mettre en œuvre.

Enfin, le choix du référentiel, qui modifie aussi l'unité, influence l'interprétation concernant les variations de valeur de l'indicateur. Par exemple, le fait de passer du véhicule à l'individu comme référentiel pour le taux de consommation d'essence et la capacité d'une voie facilitent la comparaison entre les modes de transport.

## CHAPITRE 6 CONGESTION

*« Les rapports entre l'offre et la demande sont des rapports récursifs et mouvants. Elles se coproduisent. L'offre est productrice d'une demande à laquelle elle répond. »*

*Vincent de Gaujelac, 2005*

Divisé en quatre sections (Figure 6-1), ce chapitre présente des expérimentations visant à contribuer à la mesurer la congestion routière. D'abord, le contexte, les objectifs visés et la méthodologie sont énoncés. Ensuite, pour trois différentes segmentations temporelles, des tests statistiques sont menés et une série d'indicateurs sont testés. C'est ce qui sera appelé l'analyse « systématique ». Ensuite, en lumière des observations issues de la première analyse, d'autres expérimentations sont menées pour des segmentations temporelles particulières. Le chapitre se termine avec la synthèse des expérimentations, des perspectives et des recommandations.

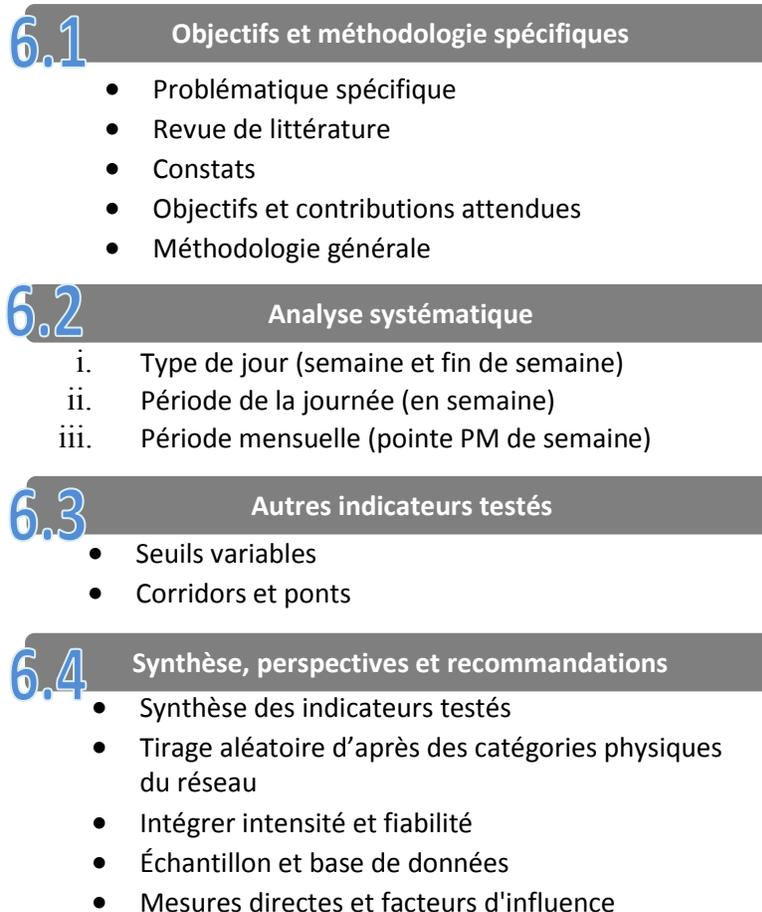
### 6.1 Objectifs et méthodologie

Cette section expose d'abord la problématique spécifique à la congestion, une brève revue de littérature et les principaux constats qui en sont issus. Puis, les objectifs visés et les contributions attendues sont énoncés. Enfin, la méthodologie poursuivie dans l'estimation de la congestion est présentée.

#### 6.1.1 Problématique spécifique

Les autorités de transport de Montréal notent des problèmes de congestion sérieux. Dans son plan de transport, la Ville de Montréal (2005) souligne que les réseaux autoroutier et artériel souffrent respectivement de congestion récurrente et d'encombrement sérieux. D'ailleurs, le MTQ (2014) note dans sa stratégie nationale de mobilité durable que « Le réseau urbain est surchargé à certaines heures de la journée, ce qui entraîne des phénomènes de congestion, nuit à la mobilité et se traduit en coûts importants sur le plan économique. »

De surcroît, les objectifs formulés par les principales autorités organisatrices du transport à Montréal témoignent de problèmes grandissant de congestion. Dans son Plan métropolitain d'aménagement et de développement, la CMM (2011) possède également un critère visant la « réduction des délais et des retards occasionnés par la congestion ».



**Figure 6-1 : Structure du chapitre 5 « Congestion »**

Alors que l'on réalise actuellement que la congestion amplifie les effets néfastes de l'utilisation de l'automobile sur les temps de déplacement, la santé publique, l'environnement et l'économie, il apparaît logique de supposer qu'une réduction de la congestion réduirait ces effets. Transport Canada (Delcan, iTRANS, & Conseillers ADEC, 2005) affirme que la congestion est souvent mentionnée comme un défi urbain majeur et grandissant pour l'environnement et l'économie. Ce qui est souhaité, c'est qu'une diminution de la congestion engendre une augmentation de la vitesse des véhicules et ainsi une réduction des temps de parcours. Ces deux conséquences escomptées diminueront la consommation de carburant, les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques, ce qui devrait améliorer la qualité de l'air et ainsi diminuer les effets sur la santé des individus. En parallèle, la réduction des temps de parcours offre aux usagers plus de temps pour effectuer d'autres activités, valorisant socialement ou économiquement leur temps, autrement perdu en congestion. Une variété de stratégies d'intervention peut être envisagée par

les décideurs en transport afin de réduire la congestion, et ainsi réduire les impacts de ce phénomène.

Le suivi de la congestion, l'étude de son évolution et l'analyse des effets de certaines interventions sur les réseaux de transport sont donc des besoins cruciaux des planificateurs et décideurs en transport. Ces besoins doivent s'appuyer sur des indicateurs de la congestion.

## 6.1.2 Revue de littérature

Cette section présente une brève synthèse de la revue de littérature sur la congestion. Elle se divise en cinq sous-sections qui décortiquent tour à tour les définitions, la complexité du phénomène, les besoins et les usages des indicateurs, les attributs souhaités et les mesures existantes.

La mesure de la congestion est à elle seule un concept vaste, dont les recherches sur ses méthodes d'estimation ont lieu depuis plusieurs décennies. Cependant, les bases de données disponibles informant sur les conditions de circulation ont également évolué et leur potentiel doit être analysé.

### 6.1.2.1 Définitions de la congestion

Les définitions de la congestion sont multiples (Brilon & Estel, 2009), et il n'en existe pas de communément acceptée (Downs, 2004). En se basant sur Aftabuzzaman (2007) et Lomax, Turner, & Shunk (1997), les différentes définitions se présentent comme suit :

1) Les définitions **basées sur la capacité et la demande** de transport, centrées sur les **causes**. Ces définitions affirment que lorsque la demande de transport, exprimée par exemple par un volume de véhicules ou de passagers, excède la capacité des infrastructures, il en résulte un état de congestion. La définition la plus fréquente selon Brilon & Estel (2009) est : « un évènement qui survient lorsque la demande de transport routier excède la capacité de la route pendant un intervalle de temps spécifique. »

2) Les définitions **basées sur le temps de parcours ou le retard**, centrées sur les **effets**. La congestion s'exprime ainsi par le temps de parcours réel, ou le retard, excédant le temps de parcours normal ou acceptable. Le temps de parcours acceptable est établi selon un accord commun de seuil d'acceptabilité. Il peut s'agir par exemple des conditions de circulation fluide

(écoulement libre). Chaque organisme peut choisir son propre seuil. Par exemple, le Ministère des Transports du Québec a choisi le seuil de congestion à 60% de la vitesse à écoulement libre, peu importe le type de route (Gourvil & Joubert, 2004). Il peut varier selon le mode, le type d'infrastructure, le lieu et le moment de la journée (Lomax et al., 1997). Il reflète en fait des attentes et des objectifs sous différentes conditions (Levinson & Lomax, 1996).

### **6.1.2.2 La congestion: un phénomène complexe**

Puisqu'à la fois la demande et la capacité sont changeantes, la congestion varie elle aussi (Bertini, 2006). Le phénomène de congestion est dynamique, à la fois dans le temps et l'espace (Taylor, Woolley, & Zito, 2000). En effet, le nombre et la durée des incidents varient d'un jour à l'autre, de même que la circulation et l'usage des routes varient selon le jour de la semaine et la saison (Cambridge Systematics Inc. & Texas Transportation Institute, 2005). Ces derniers auteurs identifient sept principales sources de la congestion : les incidents de circulation, les chantiers, la météorologie, les fluctuations normale de la circulation (heures de pointe, jour de la semaine, ...), les événements spéciaux, les dispositifs de contrôle de la circulation et les goulots d'étranglement. Le niveau de performance du système est donc sujet à des variations selon le type d'infrastructures de transport, la géographie et le moment de la journée (Lomax et al., 1997).

### **6.1.2.3 Besoins et usages des indicateurs de congestion**

Dans la littérature, les mesures de la congestion servent à de multiples usages. Il est possible de les catégoriser de la même façon que le sont les indicateurs en général, soit selon trois catégories d'usages possibles (voir section 1.3.6.4). Ainsi, un indicateur doit :

- cerner l'évolution des phénomènes de congestion :
  - être applicable pour des situations variées (différents modes de transport et types d'infrastructures) et différentes échelles temporelles et spatiales (Aftabuzzaman, 2007; Boarnet, Kim, & Parkany, 1998; Levinson & Lomax, 1996; Lomax et al., 1997);
  - refléter l'éventail de la performance des autoroutes (Boarnet et al., 1998) et la qualité de service pour tout type de système (Turner, 1992);
  - permettre la description (Lomax et al., 1997), et ce, pour différents niveaux de conditions de circulation sous congestion (Levinson & Lomax, 1996);

- mesurer la réalisation et l'action politique :
  - permettre la comparaison entre les régions métropolitaines (Boarnet et al., 1998; Turner, 1992);
  - quantifier l'impact des transports collectifs sur la congestion routière (Aftabuzzaman, 2007);
- aider à la prise de décision :
  - réfléchir sur les politiques tarifaires, comme le péage urbain (Boarnet et al., 1998);
  - comparer des scénarios impliquant différents modes de transports (Aftabuzzaman, 2007);
  - permettre la prévision (Lomax et al., 1997).

#### **6.1.2.4 Attributs souhaités pour un indicateur de la congestion**

Les chercheurs mentionnent plusieurs attributs souhaités pour un indicateur de la congestion, dont plusieurs sont directement en lien avec les principales fonctions d'un indicateur en général (Section 1.3). Par exemple, pour satisfaire à ses rôles de simplification et de communication, un indicateur de congestion doit être (Levinson & Lomax, 1996; Lomax et al., 1997; Turner, 1992) :

- simple, clair et bien défini;
- facilement compréhensible, interprétable par des audiences variées et facile à communiquer.

Pour remplir sa fonction de quantification, l'indicateur de congestion doit souscrire aux spécificités suivantes :

- leur mise en relation avec un standard (Levinson & Lomax, 1996);
- leur capacité à fournir des valeurs continues (Levinson & Lomax, 1996);
- leur capacité à permettre des analyses statistiques (Lomax et al., 1997), car l'utilisation de « moyennes » ou de conditions « typiques » ne suffiront plus (Cambridge Systematics Inc. & Texas Transportation Institute, 2005);
- être basé sur des données de temps de parcours pour s'appliquer à d'autres modes de transport (Levinson & Lomax, 1996).

Enfin, la fonction de gestion dans le temps et dans l'espace pour les indicateurs de congestion est évidemment une priorité compte tenu du caractère très variable du phénomène de congestion (spatialement et temporellement). Pour ce faire, un indicateur de congestion doit :

- être basé sur des données disponibles et larges (Boarnet et al., 1998);
- être basé sur de l'information en temps réel pour le temps de parcours, les vitesses et les mouvements de véhicules, et ce, afin de rendre plus utiles les mesures de performance du réseau (D'este, Zito, & Taylor, 1999);
- souscrire à la relativement nouvelle tendance de baser la période de pointe sur plusieurs heures plutôt que la traditionnelle heure de pointe, et ce, afin de couvrir l'aspect temporel de la congestion (Cambridge Systematics Inc. & Texas Transportation Institute, 2005);
- être sensible à l'étendue de la congestion sur un corridor ou un territoire plutôt que seulement sur un court segment de route, et ce, afin de couvrir l'aspect spatial de la congestion (Cambridge Systematics Inc. & Texas Transportation Institute, 2005).

#### 6.1.2.5 Mesures existantes pour l'intensité de la congestion

Les indicateurs sont généralement basés sur quatre mesures de base : les véhicules-kilomètres, les véhicules-heures, la vitesse et le temps de parcours. Le Tableau 6-1 présente ces mesures de base, tout en indiquant quel aspect de la congestion elles visent, à quel objet elles s'appliquent et quelles données sont requises.

**Tableau 6-1 : Mesures de base des indicateurs de congestion**

Mesures de base	Abré- viation	Détails	Aspect mesuré	Objet mesuré	Données
Véhicules-kilomètres	VMT		Étendue	Tronçon	Comptages
Passagers-kilomètres	PMT				
Véhicules-heures	VHT		Durée	Tronçon	Comptages
Passagers-heures	PHT				
Vitesse moyenne	V		Intensité	Tronçon Déplacement	Appareils au sol GPS
Dérivée	Vder	Distance / Tdir			
Directe	Vinst				
Temps de parcours	T		Intensité	Tronçon Déplacement	Appareils au sol GPS
Dérivé	Tder	1 / Vinst			
Direct	Tdir				
En mouvement	Tmouv	Vitesse > 0			

Beaucoup d'indicateurs existent et s'appuient sur ces mesures de base. Aftabuzzaman (2007) et Mohan Rao & Ramachandra Rao (2012) en font une revue exhaustive et une critique. La congestion peut être décrite selon quatre aspects : son intensité ou sa sévérité, sa durée, son étendue ou le nombre de déplacements affectés, et sa fiabilité ou variabilité (Levinson & Lomax, 1996). En lien avec les expérimentations qui suivent, la brève revue ci-dessous est centrée sur les indicateurs d'intensité de la congestion.

Plusieurs comparent les volumes à la capacité de la route. C'est le cas notamment du ratio volume sur capacité et des niveaux de conditions d'opération (« Levels of service »). Ces derniers permettent la différenciation des niveaux de congestion. Ils ont été adoptés en 1985 par le *Highway Capacity Manual*, manuel de référence en transport. Leur désavantage principal est qu'ils ne sont pas des valeurs continues. Or, pour la démonstration qui suit, les données de volumes ne sont pas disponibles. En raison des données GPS qui seront utilisées dans cette démonstration, les indicateurs qui sont particulièrement intéressants sont ceux basés uniquement sur la vitesse et le temps de parcours. Ces principaux indicateurs d'intensité sont répertoriés au Tableau 6-2.

Plusieurs des indicateurs sont calculés à partir du retard (« Delay »), soit le temps de parcours supplémentaire pour un usager de la route par rapport à un temps de référence. Ce temps de parcours référentiel est soit la vitesse à écoulement libre, soit une vitesse jugée acceptable par l'auteur.

Le choix du seuil de référence se rapporte à la notion de fluidité; il en existe plusieurs interprétations :

- il survient lorsque le rapport volume sur capacité est de 0,77, ce qui correspond à une vitesse de 89 km/h (Lindley, 1987);
- il change selon le type de route et le type d'urbanisation. Par exemple, la vitesse de référence est de 97 km/h pour les autoroutes et de 56 km/h pour les artères (Schrank, Eisele, & Lomax, 2012);
- il est déterminé selon la vitesse affichée (Hall & Vyas, 2000);
- il correspond au 85<sup>e</sup> centile de la vitesse en période hors-pointe (Cambridge Systematics Inc. & Texas Transportation Institute, 2005).

**Tableau 6-2 : Indicateurs d'intensité de la congestion basés sur les vitesses ou les temps de parcours (T : temps, réf : référence qui correspond à l'écoulement libre ou à ce qui est jugé acceptable)**

Indicateur	Abré- viation	Détails
Proportion du temps à l'arrêt		$(T - T_{\text{mouvement}}) / T$
Retard (Delay)	D	$T - T_{\text{réf}}$
Retard total (Total delay)	D <sub>tot</sub>	$\sum D$
Indice de congestion (Congestion index)	CI	$D / T_{\text{réf}}$
Taux de déplacement (Travel rate)	TR	$1 / V$ $T / \text{Longueur tronçon}$
Taux de retard (Delay rate)	DR	$TR - TR_{\text{réf}}$
Taux de retard relatif (Relative delay rate)	RDR	$DR / TR_{\text{réf}}$
Ratio des retards (Delay ratio)	DRA	$DR / TR$
Indice de taux de déplacement (Travel rate index)	TRI	$TR_{\text{pointe}} / TR_{\text{réf}}$
Indice de temps de parcours (Travel time index)	TTI	Semblable au TRI + incidents
Indice de fardeau de la congestion (Congestion burden index)	CBI	$TRI \times \text{part modale auto-conducteur motif travail}$

Les indicateurs les plus communs sont basés sur le taux de déplacement (« Travel rate »), soit l'inverse de la vitesse, et le taux de retard (« Delay rate ») qui représente la différence des taux de déplacements entre les conditions actuelles et celles de référence. Il s'agit notamment du Taux de retard relatif (« Relative delay rate »), du Ratio des délais (« Delay ratio »), de l'indice de taux de déplacement (« Travel rate index ») et de l'indice de temps de parcours (« Travel time index »).

Aux États-Unis, le Texas Transportation Institute (TTI) et la Federation Highway administration (FHWA) publient périodiquement des indicateurs de suivi de la congestion pour plusieurs villes. Publié annuellement, le « Urban mobility report » du TTI utilise entre autres les données de Inrix pour calculer ses indicateurs (Schrank et al., 2012). Ces données collectées par Inrix proviennent de plusieurs sources. Il s'agit, par exemple, d'opérateurs de parc de véhicules qui fournissent leurs données à Inrix dans le cadre d'une entente ou d'applications installées sur des cellulaires personnels. C'est Inrix qui filtre et compile les bases de données pour le TTI. D'ailleurs, Inrix

publie lui-même son indice de congestion (indice Inrix), qu'il rend disponible en ligne (Inrix inc., 2014).

Finalement, Boarnet et al. (1998) conseillent de porter davantage d'attention à la fiabilité statistique des indices de congestion, et ce, afin que de petites variations reflètent véritablement une évolution du phénomène.

### **6.1.3 Constats issus de la revue de littérature**

Les définitions se divisent principalement en deux catégories : celles basées sur les causes (volume et capacité) et celles basées sur les effets (temps de parcours et délais). Il semble que les définitions plus récentes soient axées davantage sur les effets, car les outils actuels comme les GPS y sont plus adaptés. Les données disponibles actuellement, et moins coûteuses, donnent de l'information sur la vitesse ou le temps de parcours des véhicules. Ces dernières sont donc plus concrètes et plus accessibles que la capacité de la route, qui est un concept théorique. Également, il semble qu'il soit plus facile de désagréger les indicateurs basés sur des vitesses ou temps de parcours. En effet, ils sont plus adaptés à la description du phénomène pour différents types d'infrastructures, d'échelles temporelles et spatiales, et aussi différents niveaux de circulation. Plus les données sont fines et nombreuses, plus elles sont susceptibles d'alimenter des indicateurs en temps réel.

Dans un autre ordre d'idées, la définition même de la congestion fait référence à un état acceptable des conditions de circulation, et cette acceptabilité varie selon les attentes des usagers, le lieu et le moment. Ainsi, l'utilisation de seuils qui représentent ces niveaux d'acceptabilité semble inévitable dans la construction d'indicateurs de congestion. Un seul seuil fixe s'avère toutefois incompatible avec l'esprit de cette définition, qui suggère une variation selon le contexte (perception, lieu, moment).

Toutefois, l'utilisation de seuils peut compromettre la sensibilité de l'indicateur, le rendant peu sensible la plupart du temps et soudainement très sensible lorsque le seuil est dépassé. Également, cela risque d'exclure les valeurs continues, attribut pourtant désiré afin d'étayer les analyses et les interprétations sur l'évolution des conditions de circulation.

En résumé, les principaux constats qui orienteront les expérimentations menées dans ce chapitre sur la congestion sont :

- l'utilisation d'une valeur continue permet à l'indicateur de suivre l'évolution des conditions de circulation;
- l'utilisation d'un seuil sert de référence et représente les conditions acceptables de circulation;
- les seuils représentant les conditions acceptables reflètent les attentes des usagers, qui sont variables selon le lieu, le moment (type de jour, saison, heure de la journée) et le type de déplacement (motif);
- les quatre aspects qui caractérisent la congestion sont l'intensité, la durée, l'étendue et la fiabilité.

#### **6.1.4 Objectifs et contributions attendues**

L'objectif du chapitre est de contribuer au développement d'un indicateur faisant le suivi de la congestion sur les autoroutes dans la région de Montréal. Plus précisément, les expérimentations visent à :

- valoriser les données GPS collectées de manière passive par les véhicules de Communauto, en alimentant l'élaboration d'un indicateur de congestion pour la région de Montréal;
- tester l'adaptabilité de l'indicateur d'intensité à différents besoins d'évaluation en modifiant la sélection des entités spatiales entrant dans le calcul méthodologique;
- tester la sensibilité de l'indicateur d'intensité de la congestion en comparant sa variation entre différentes limites temporelles et en modifiant artificiellement les conditions de circulation sur le réseau.

#### **6.1.5 Méthodologie générale du chapitre**

La méthodologie générale illustrée à la Figure 6-2 est décrite dans cette section. Avant tout, elle est précédée par une description de la base de données principale utilisée. Ensuite, le traitement des bases de données et la mesure de base sont expliqués. Ils sont suivis du choix des limites et de découpages spatio-temporels. Les différentes formulations testées sont également présentées. Finalement, le processus mené pour l'analyse de sensibilité est détaillé.

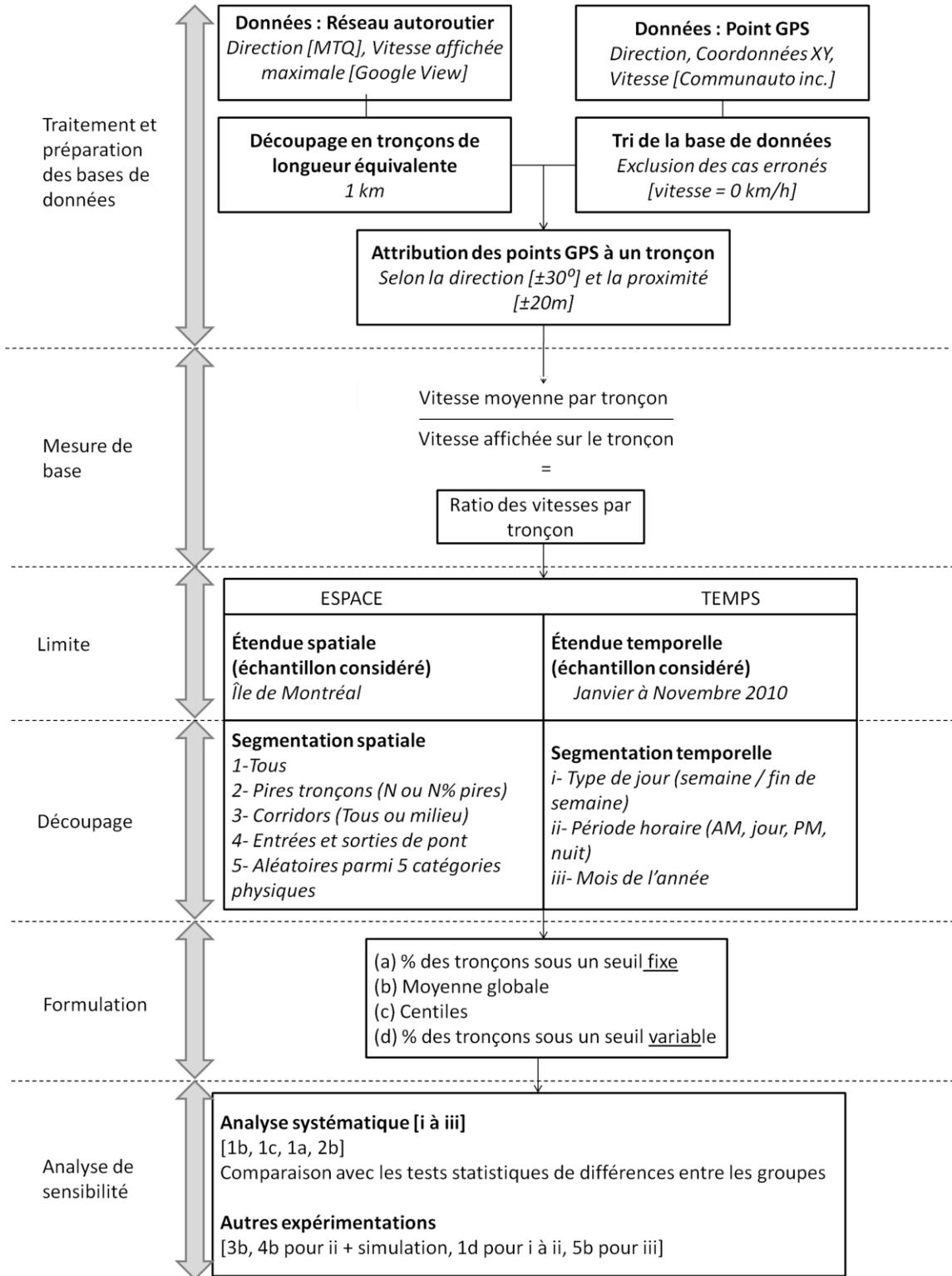


Figure 6-2 : Méthodologie générale du chapitre 5

### **6.1.5.1 Base de données principale utilisée**

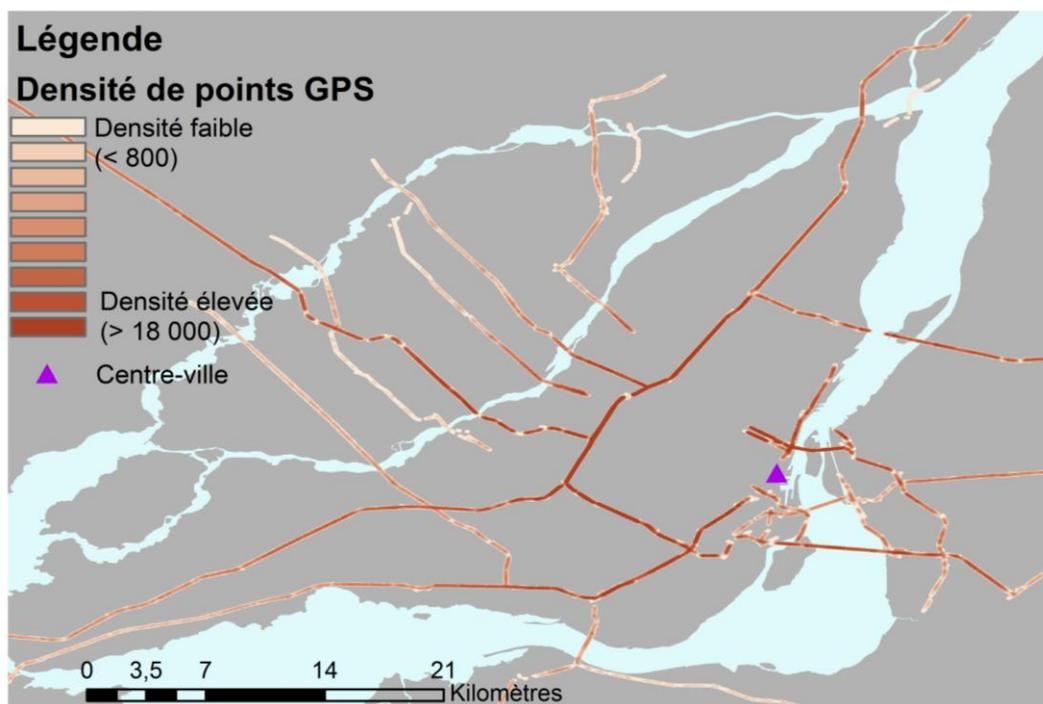
Une méthode traditionnelle de collecte de données sur la vitesse est l'utilisation de boucles de détection. Cependant, ces détecteurs coûtent cher, sont localisés en des endroits bien précis et manquent de couverture spatiale (Tong, Merry, & Coifman, 2006). Une autre méthode de collecte de données, utilisée par le Ministère des transports du Québec, est celles des véhicules flottants qui parcourent le réseau autoroutier expressément pour collecter les vitesses et les temps de parcours. Cela suppose une grande organisation et des coûts importants, étant donné que des véhicules et des conducteurs doivent sillonner le réseau routier de façon coordonnée pour récolter le plus de données possibles.

Des travaux portant sur l'étude des temps de parcours à partir d'échantillons tirés de véhicules flottants sont résumés dans Loustau (2009; Loustau, Grasset, Morency, & Trépanier, 2010). Des analyses à partir d'autres méthodes de collecte de données ont été réalisées, notamment sur les capteurs Bluetooth et les vitesses extraites de bandes vidéo (Saunier & Morency, 2011).

Retenue pour la présente étude, une autre technologie de collecte de données sur les vitesses et les temps de parcours est celle des GPS installés dans des véhicules circulant sur le réseau routier. À Montréal, l'entreprise d'autopartage de véhicules Communauto inc. a équipé une partie de sa parc avec des GPS, ce qui procure une base de données de traces GPS réparties sur tout le réseau routier montréalais. Jusqu'à maintenant, les travaux effectués à partir de ces bases de données portent sur la comparaison avec les résultats obtenus à partir des véhicules flottants du ministère (Loustau et al., 2010). À partir de ces mêmes données, une autre étude propose différentes analyses des vitesses observées en différents lieux et selon différentes conditions (période, journée, saison, etc.) (Verreault, Morency, & Saunier, 2011).

Le principal avantage de données GPS provenant d'une grande parc de véhicules est de procurer un échantillon large. Bertini (2006) affirme que jusqu'à maintenant, les mesures sont souvent basées sur des échantillons très petits, relatifs et variables. Depuis peu, cette affirmation tend à disparaître avec les bases de données construites à partir de diverses sources par des compagnies comme Inrix. Communauto est un service de location de véhicules réservé à ses membres; les 1 500 véhicules à la disposition des membres sont distribués sur le territoire montréalais. En 2010, environ 400 de ces véhicules étaient équipés de GPS et émettaient un signal à un intervalle compris entre deux et cinq minutes. Parmi les avantages du GPS figurent un faible coût

d'installation et de récupération des données, et une exactitude élevée du lieu collecté (Tong et al., 2006). La Figure 6-3 cartographie les points GPS recueillis entre janvier et novembre 2010. Cela représente environ 185 000 observations en semaine et 105 000 observations en fin de semaine, sur les autoroutes et routes principales.



**Figure 6-3 : Densité de points GPS issus des véhicules de Communauto sur le réseau supérieur dans la région de Montréal (janvier à novembre 2010)**

### 6.1.5.2 Traitement préalables des bases de données

La démarche de traitement est la suivante. Le premier volet méthodologique concerne la préparation des deux bases de données utilisées dans cette étude. La principale base de données est celle des observations GPS issues des véhicules du service d'autopartage Communauto. Les données collectées par les GPS sont le lieu référencé temporellement, la vitesse et la direction du véhicule. La base de données initiale comporte certaines observations erronées se repérant par des vitesses égales à zéro qui se répètent sur une longue durée. Il a été décidé d'exclure toutes les vitesses nulles de l'étude, car il est difficile de distinguer les réelles vitesses nulles de celles issues d'une erreur du GPS. Ultérieurement, une méthode devra être développée afin d'exclure uniquement les vitesses nulles erronées.

Les observations, situées spatialement, doivent être attribuées au réseau routier. Dans cette étude, le réseau routier de référence auquel sont reliés les points GPS est celui du recensement. Le réseau autoroutier typiquement échantillonné par le MTQ a été **systematiquement segmenté en tronçons d'un kilomètre** afin de faciliter l'analyse des temps de parcours et la comparaison entre différents types de tronçons. En tout, cela crée **231 tronçons**.

Les **vitesse maximale affichées** et associées à chacun des tronçons routiers analysés ont été entrées à l'aide des vitesses affichées sur l'autoroute à l'aide de l'outil Google Street View de Google Maps. Une zone tampon de 20 m de part et d'autre du centre de la route est considérée pour tenir compte de la possibilité d'existence de plusieurs voies de circulation. Les autoroutes étant bidirectionnelles, c'est la direction par rapport à l'azimut fournie par le GPS qui permet d'attribuer une observation à un tronçon routier (avec une tolérance de plus ou moins 30 degrés).

### 6.1.5.3 Mesure de base

La mesure de base utilisée pour l'intensité est un ratio entre la vitesse moyenne observée et la vitesse affichée :

$$\text{Ratio des vitesses} = \frac{\text{Vitesse moyenne observée}}{\text{Vitesse affichée}}$$

Cela correspond en quelque sorte au temps de parcours divisé par le temps de parcours à vitesse acceptable (considéré ici comme celle affichée). Le fait de diviser par la vitesse affichée permet de traiter ensemble les tronçons ayant des vitesses affichées différentes (70 km/h ou 100 km/h).

### 6.1.5.4 Limites spatiales et temporelles

Les plages temporelle et spatiale couvertes par ces données GPS demeurent sujettes à l'usage que les membres font des véhicules partagés. L'itinéraire choisi, la journée et l'heure de déplacements dépendent des besoins des membres du service d'autopartage. Or, en général, ces membres utilisent les véhicules pour des déplacements occasionnels, souvent pour des loisirs ou du magasinage. Leurs déplacements pendulaires et habituels sont en grande partie effectués en transport collectif ou actif (Sioui, Morency, & Trépanier, 2013). Dans la base de données GPS, il en résulte un nombre d'observations non uniforme dans le temps et dans l'espace (Verreault et al., 2011). Par exemple, le nombre d'observations est plus élevé les jours de fin de semaine, alors que les activités de loisir et de magasinage sont plus fréquentes. En outre, la majorité des membres

résidant à Montréal, c'est-à-dire là où sont localisés les véhicules d'autopartage, le nombre d'observations est très faible en période de pointe du matin sur les tronçons routiers dirigés vers le centre-ville.

Ainsi, les **limites spatiales** choisies sont **l'Île de Montréal**. Les **limites temporelles** sont dictées par les données, soit de **janvier à novembre 2010**.

#### **6.1.5.5 Définitions des segments spatiaux et temporels**

Ces segmentations seront utilisées comme éléments de comparaison afin d'analyser la sensibilité des indicateurs testés.

##### *6.1.5.5.1 Segmentation temporelle*

Trois découpages temporels servent pour l'analyse de sensibilité :

- i. type de jour : jour de semaine, jour de fin de semaine;
- ii. période de la journée : pointe avant-midi, pointe après-midi, hors-pointe de jour, hors-pointe de nuit;
- iii. période mensuelle : 11 mois de l'année en pointe de l'après-midi (janvier à novembre).

Les indicateurs de congestion seront mesurés pour chacun des segments temporels. **La variation de l'indicateur entre ces segments temporels servira pour les analyses de sensibilité.**

##### *6.1.5.5.2 Segmentation spatiale*

La liste ci-dessous montre différentes segmentations de tronçons qui entrent dans l'estimation de l'indicateur. D'abord, une segmentation spatiale est utilisée systématiquement pour tous les groupes temporels : (1) tous les tronçons et (2) les tronçons critiques. Suite à cette analyse systématique, il a été décidé de tester d'autres segmentations spatiales (3 à 5), mais uniquement pour des groupes temporels particuliers :

1. [Systématique] tous les tronçons;
2. [Systématique] tronçons critiques avec les plus faibles ratios des vitesses (Nombre ou pourcentage);
3. tronçons situés à l'entrée ou à la sortie d'un pont;
4. tronçons formant un corridor :

- a. tous les tronçons formant 14 corridors autoroutiers;
  - b. tronçons situés dans le milieu des 14 corridors autoroutiers;
5. tronçons sélectionnés aléatoirement parmi des catégories physiques [Section Perspectives].

### **6.1.5.6 Analyse de sensibilité de l'indicateur et formulations testées**

#### *6.1.5.6.1 Tests statistiques préparatoires sur la distribution des ratios de vitesses sur les tronçons*

L'objectif de ces tests statistiques est d'observer si la distribution des ratios de vitesses pour les tronçons est significativement différente entre les périodes analysées (jour de semaine ou de fin de semaine, périodes horaires d'un jour de semaine, mois de l'année). Les échantillons comparés sont indépendants. Les étapes suivies sont :

1. la compilation des distributions de chaque période temporelle;
2. la réalisation de test de normalité sur les distributions : test de Shapiro-Wilk. Afin de choisir les tests statistiques de comparaison applicables, il est nécessaire de vérifier si les distributions de chacun des groupes sont normales;
3. la réalisation de tests de différence entre les périodes choisies:
  - a. hypothèse d'échantillons paramétriques : test t de Student;
  - b. hypothèse d'échantillons non-paramétriques : test de Komogorov-Smirnov, test de Kruskal-Wallis, test de Wilcoxon-Mann-Whitney.

Les tests de Kruskal-Wallis, de Kolmogorov-Smirnov et de Wilcoxon-Mann-Whitney sont non-paramétriques, c'est-à-dire applicables même si les distributions ne sont pas normales. Pour ces trois tests, si la p-value est inférieur à 0,05, l'hypothèse d'égalité entre deux distributions est rejetée avec un intervalle de confiance de 95%. Cela signifie qu'il est possible d'affirmer que les deux groupes étudiés sont statistiquement différents. Le dernier donne de plus une information sur l'ordre de grandeur entre les groupes étudiés, soit quel est le plus grand et le plus petit.

Le test t-Student, est habituellement destiné à l'étude d'échantillons paramétriques. Cependant, il peut être aussi utilisé avec des échantillons non paramétriques lorsque le nombre d'observations est grand. Puisque le nombre d'observations est ici toujours supérieur à 25 tronçons, il est possible d'étudier la différence entre deux échantillons à partir de ce test de t-Student. Avec un tel

nombre d'observations, la p-value seuil est de 1,96, ce qui signifie que l'hypothèse d'égalité est rejetée lorsque la p-value est plus grande que ce seuil, donc que les échantillons sont différents.

Les résultats de ces tests sur la distribution des ratios de vitesses sur les tronçons permettront de savoir si les différentes périodes analysées sont identiques ou significativement différentes. Cela servira par la suite de repère pour évaluer la sensibilité des indicateurs.

#### *6.1.5.6.2 Analyse systématique pour toutes les segmentations temporelles [i à iii]*

Cette analyse consiste à observer la variation des indicateurs estimés (formulation et segmentation spatiale) entre différents segments temporels. Ces variations sont comparées aux résultats des tests statistiques. Ainsi, on souhaite obtenir un indicateur constant lorsque les distributions sont statistiquement identiques, et un indicateur variant lorsque ces distributions sont statistiquement différentes.

Pour les différentes segmentations spatiales et temporelles, plusieurs formulations d'indicateurs sont testées. Il s'agit en fait de la méthode d'agrégation des tronçons choisie par la segmentation spatiale :

- a) proportion des tronçons sous un seuil de ratio des vitesses (0,5 à 1,0);
- b) moyenne des tronçons;
- c) centiles (10e au 90e).

#### *6.1.5.6.3 Autres expérimentations*

D'autres formulations sont également testées pour quelques segmentations temporelles, et portent sur les seuils variables, les corridors et les ponts et les tronçons aléatoires [Section Perspectives].

## **6.2 Analyse systématique**

Les mêmes méthodologies d'estimation d'indicateurs sont utilisées pour chacune des segmentations temporelles : type de jour, période de la journée, mois. Cette analyse systématique comporte les éléments suivants :

- distributions des ratios des vitesses;
- tests statistiques (normalité et comparaison entre les segments temporels);
- modalités d'estimation testées (formulations et segmentation spatiale) :

- [graphes a] part des tronçons sous un ratio des vitesses seuil (0,5 à 1,0);
- [graphes b] moyenne pour tous;
- [graphes b] moyenne des 10, 15, 20, 25 ou 30 pires ou 10 %, 15 %, 20 %, 25 % ou 30% pires;
- [graphes c] Centiles (10e au 90e).

## 6.2.1 Type de jour : semaine et fin de semaine

### 6.2.1.1 Distributions des ratios des vitesses

Le tracé des distributions des ratios pour les différents types de jour permet d'avoir un premier aperçu de comparaison des ratios entre les différents groupes. Ce tracé est présenté à la Figure 6-4. Tous les tronçons sont considérés, soit 231 tronçons de 1 km, car ils ont plus de 10 observations durant leur période respective de janvier à novembre 2010. Les ratios les plus fréquents sont entre 0,9 et 1, ayant donc une vitesse très légèrement sous celle maximale affichée (Figure 6-4). Les ratios faibles ( $< 0,9$ ) sont plus nombreux en semaine, alors qu'en fin de semaine les ratios sont concentrés à 48 % entre 0,9 et 1. Peu de ratios sont plus grands que 1, et leur nombre décroît très rapidement. Cela s'explique entre autres par le fait que des dépassements de vitesses maximales affichées sont prohibés par la loi et passibles d'une amende.

### 6.2.1.2 Tests statistiques

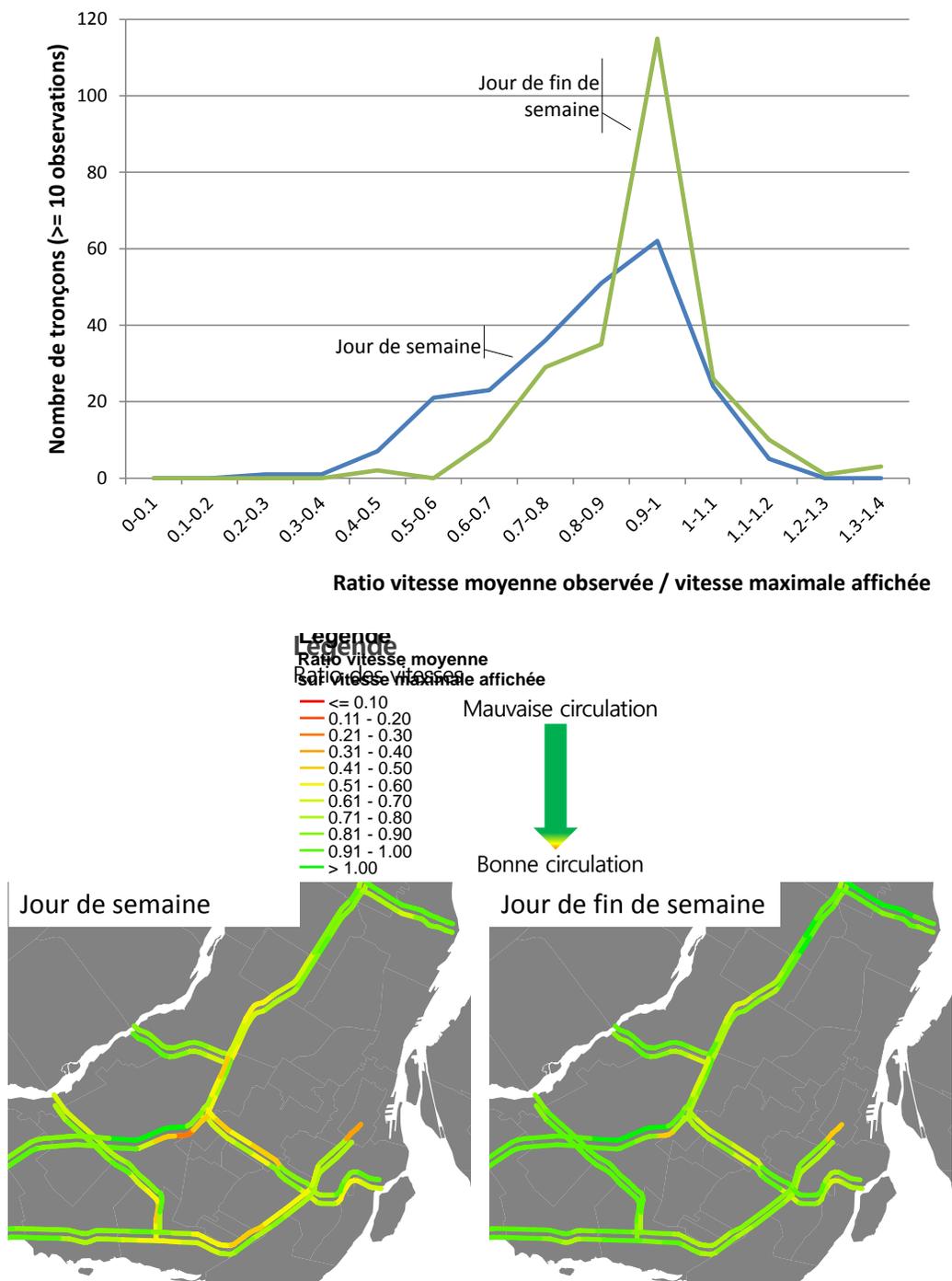
Le test de Shapiro-Wilk rejette l'hypothèse de normalité pour chaque type de jour (Tableau 6-3).

**Tableau 6-3 : Résultats du test de Shapiro-Wilk, par type de jour**

$H_0$  : La distribution suit une loi normale.

Si la Probabilité  $< 0,05$ ,  $H_0$  est rejetée avec un niveau de confiance de 95 %

	<b>N</b>	<b>W</b>	<b>V</b>	<b>z</b>	<b>Probabilité &gt; z</b>	<b>Distribution</b>
<b>Semaine</b>	231	0,95558	7,516	4,675	0	Rejetée
<b>Fin de semaine</b>	231	0,93853	10,401	5,427	0	Rejetée



**Figure 6-4 : Distributions des ratios des vitesses par type de jour**

Tous les tests de comparaison des échantillons permettent de conclure que les jours de semaine sont différents des jours de fin de semaine (Tableau 6-4). Comme aperçu sur le tracé des distributions, le test de Wilcoxon-Mann-Whitney confirme que les ratios de vitesses sont plus

faibles durant la semaine par rapport à la fin de semaine. Ces révélations sont en phase avec l'impression que la congestion est plus importante la semaine, et plus faible la fin de semaine.

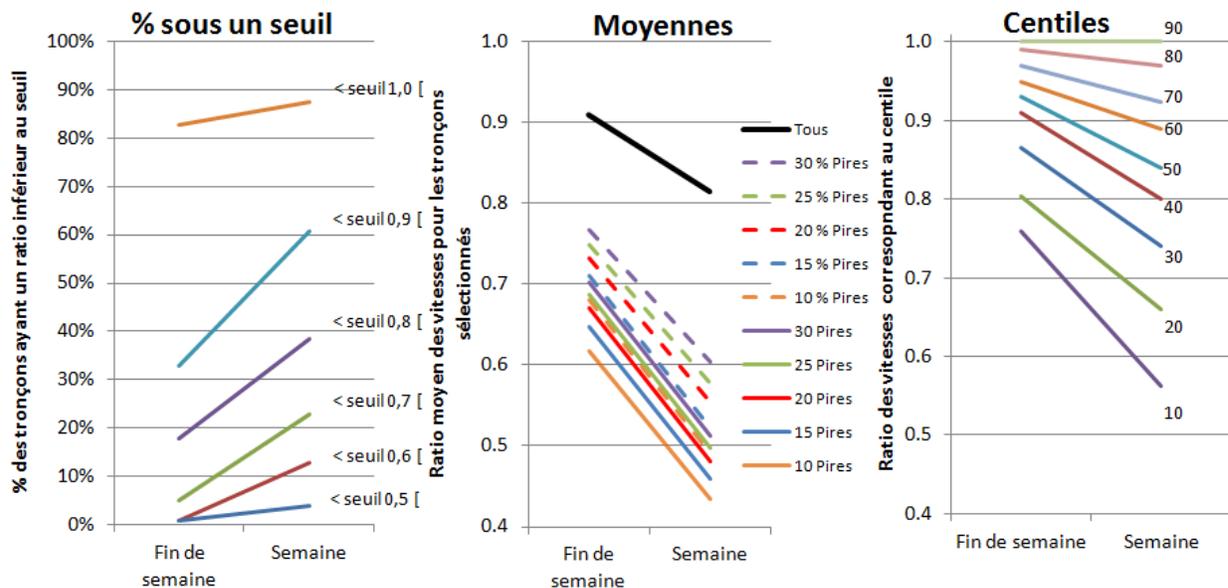
**Tableau 6-4 : Résultats des tests de différence, par type de jour**

		Test statistique de comparaison				Conclusion
		t-Student	Kolmogorov-Smirnov	Kruskal-Wallis	Wilcoxon-Mann-Whitney	
H <sub>0</sub> : Les 2 échantillons ...		ont une moyenne identique.	proviennent d'une même loi.	sont égaux.	sont égaux.	Conclusion
Rejet de H <sub>0</sub> si :		p-value >  1.96	P < 0.05 (Éloignement D)	P < 0.05	P < 0.05	
Semaine (S)	Fin de semaine (FDS)	7,08	0 → S < FDS (D = 0,2771)	0,0001	0 S < FDS	Différents

### 6.2.1.3 Indicateurs de congestion testés

On s'attend à une variation considérable de l'indicateur estimé entre les deux types de jour, en raison des distributions qui sont statistiquement différentes avec un éloignement assez grand. L'indicateur de fin de semaine devrait donc être plus élevé que celui de semaine. Les résultats des indicateurs testés sont montrés à la Figure 6-5.

- (1a) Pourcentage des tronçons dont le ratio est inférieur à un seuil. Plus la valeur du seuil de référence augmente, plus la valeur de l'indicateur augmente. Cela signifie qu'il y a de plus en plus de tronçons avec un ratio inférieur à ce seuil. **Un seuil de référence trop élevé ou trop faible occasionne une faible variation de l'indice.** Le seuil qui occasionne la plus grande variation entre les indices est de 0,9.
- (1b courbe « Tous ») Moyenne globale. La moyenne globale des ratios des vitesses est très légèrement inférieure à un. **Tel qu'attendu, la moyenne globale est influencée par les valeurs les plus récurrentes parmi l'ensemble des tronçons, ici situées entre 0,9 et 1,0.** La variation entre les jours de semaine et ceux de fin de semaine est petite (0,1).
- (2b) Moyenne des tronçons ayant les pires conditions de circulation. Lorsque l'indicateur est une moyenne calculée à partir des tronçons ayant les pires conditions de circulation, sa valeur (entre 0,43 et 0,77) est toujours inférieure à la moyenne globale des ratios des vitesses (entre 0,81 et 0,91).



Formulation : (1a) (1b courbe « Tous »; 2b) (1c)

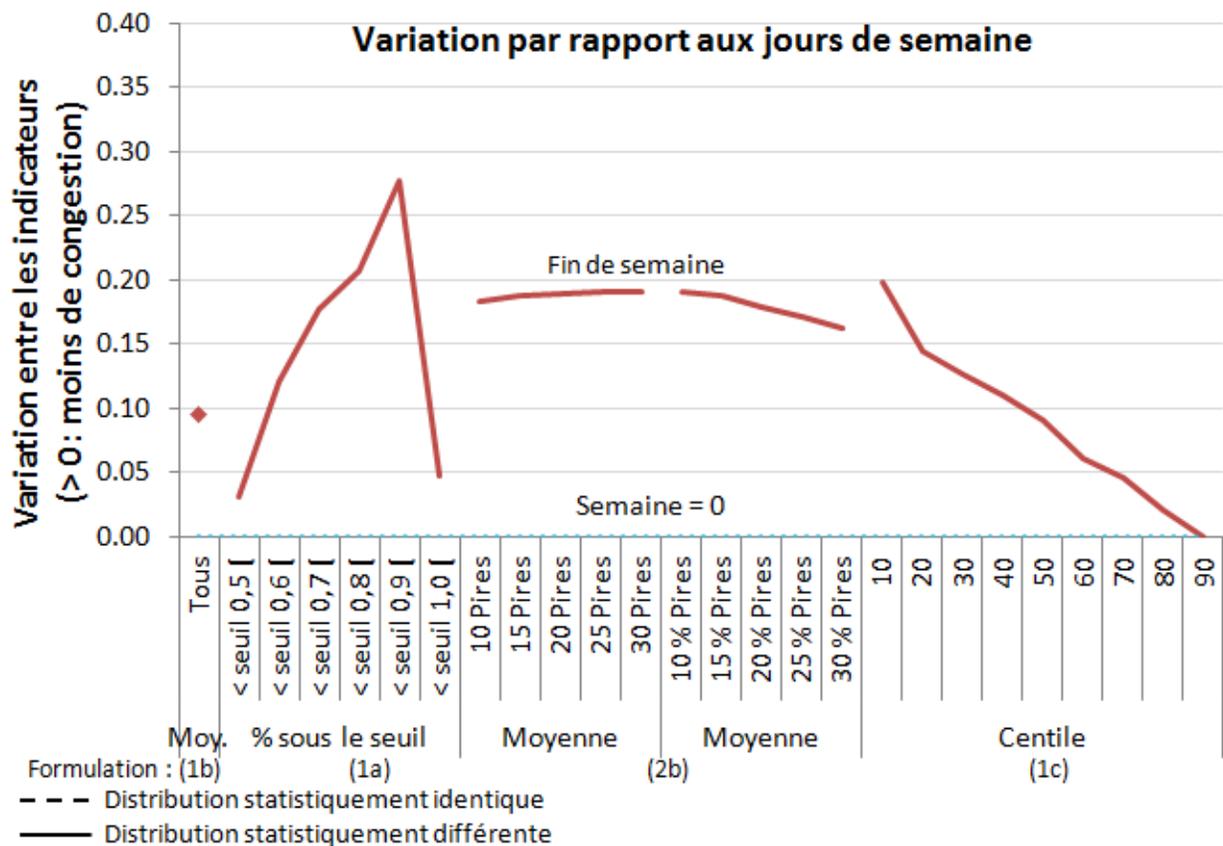


Figure 6-5 : Indicateurs d'intensité de la congestion par type de jour

On constate que plus le nombre de tronçons pris en compte est élevé (de 10 à 30 ou de 10% à 30%), plus l'indicateur augmente et se rapproche de la moyenne globale (a,i). La variation entre les jours de semaine et fins de semaine est plutôt constante, peu importe le nombre de tronçons pris en compte ( $\pm 0,19$ ). **Les pires conditions de circulation de la fin de semaine sont toujours meilleures que celle des jours de semaine.** Il n'est cependant pas possible d'identifier si les « pires tronçons » sont les mêmes pour les deux types de jour.

- (1c) Centile. Puisque les distributions ont tendance à plafonner à 1,0, plus le centile est élevé, plus il se rapproche de 1,0. Ainsi, les variations entre semaine et fin de semaine diminuent lorsque le centile augmente. **Cela montre que les distributions sont différentes pour les ratios des vitesses faibles, mais qu'elles se rattrapent lorsqu'on tend vers des valeurs proches de 1,0.**

## 6.2.2 Période de la journée (en semaine)

### 6.2.2.1 Distribution des ratios des vitesses

Les distributions des ratios pour les différentes périodes horaires sont présentées à la Figure 6-6. Les périodes horaires choisies pour les jours de semaine sont la pointe du matin (AM) de 6 h à 8 h 59, le jour en hors-pointe de 9 h à 14 h 59, la pointe de l'après-midi (PM) de 15 h à 17 h 59 et la soirée et la nuit de 18 h à 5 h 59. Ces périodes sont souvent utilisées pour faire des analyses de mobilité; une analyse des heures de début et de fin de période de pointe selon l'emplacement du tronçon serait appropriée. Au total, 188 tronçons possèdent au moins 10 observations pour chacune des périodes horaires.

Le graphe de la Figure 6-6 montre que le jour et la nuit se ressemblent, avec un pic pour les ratios compris entre 0,8 et 1,0. Ce pic est un peu moins prononcé le jour que le nuit, ce qui suppose une plus grande congestion le jour. De plus, la période de pointe PM a des ratios beaucoup plus étalés, ayant entre 19 et 32 tronçons pour chaque groupe de ratios entre 0,2 et 1,0. En outre, peu de ratios sont plus grands que 1,0. Enfin, la période de pointe AM a aussi des ratios faibles comme en PM, mais on observe un pic comme en hors-pointe autour de 1,0.

On peut donc supposer que la période de pointe PM est la plus congestionnée, suivie de la pointe AM et des périodes hors-pointe de jour puis de nuit.

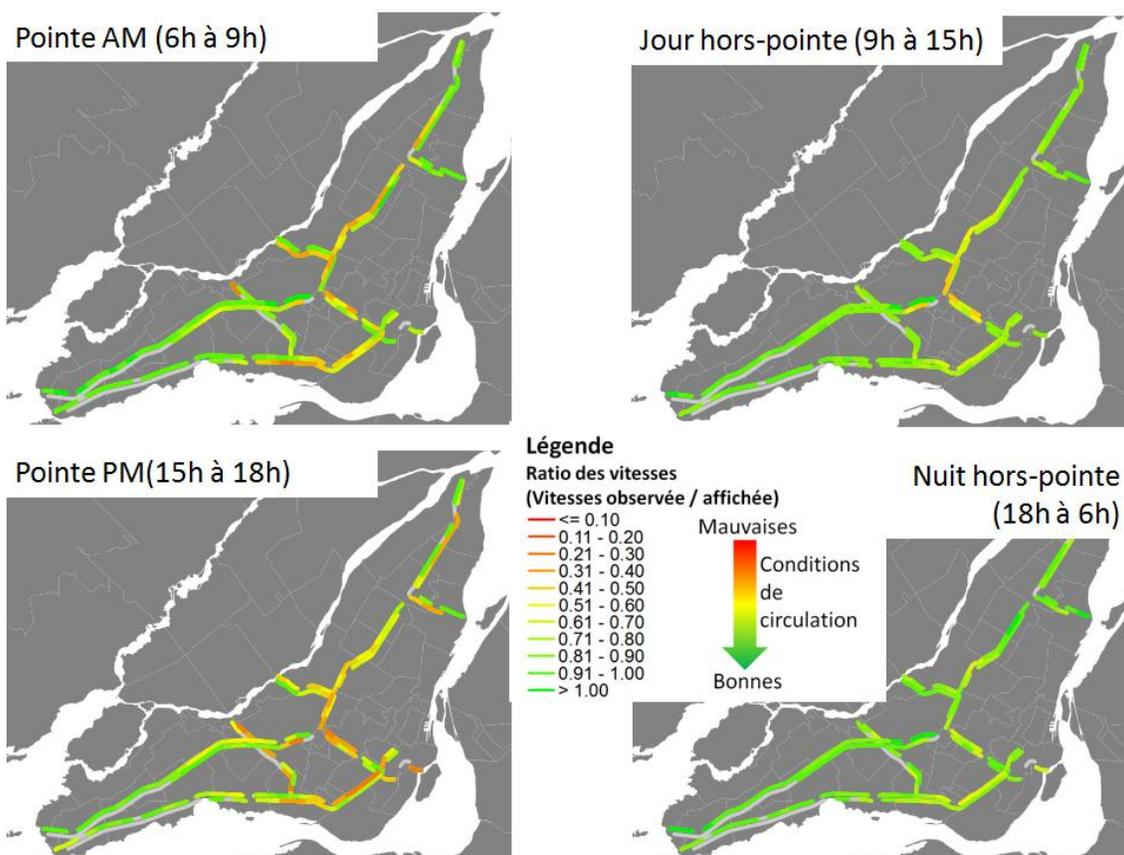
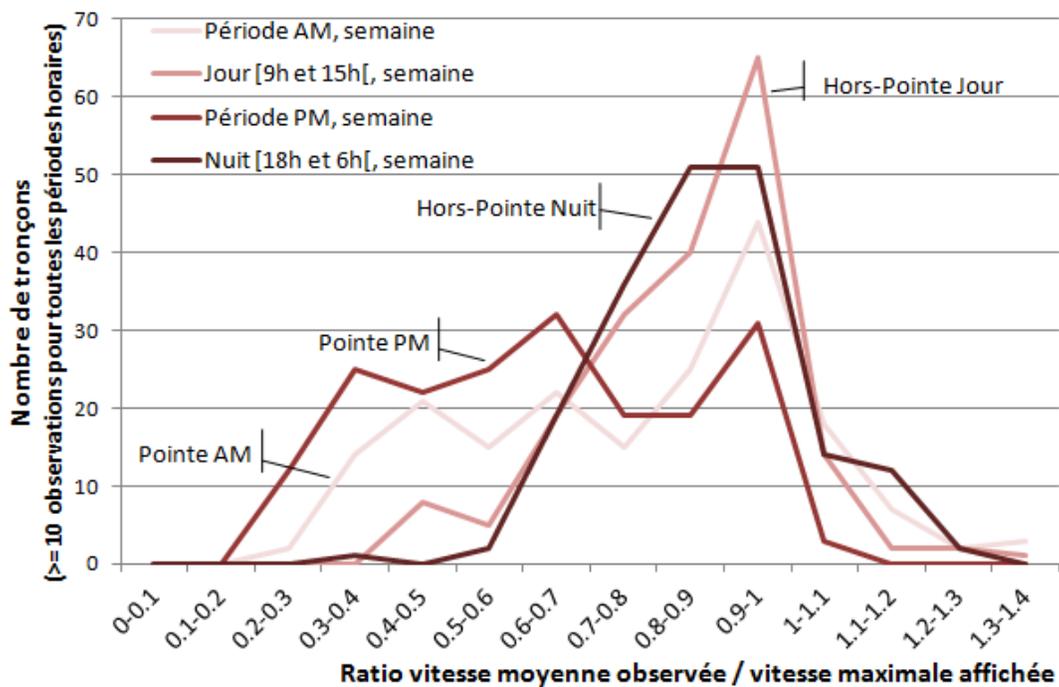


Figure 6-6 : Distributions des ratios des vitesses par période horaire

Les cartes de la Figure 6-6 illustrent les conditions de circulation pour chacune des périodes horaire d'une journée moyenne de semaine. La période hors-pointe de nuit montre des ratios de vitesses élevés sur toute l'Île. En période hors-pointe de jour, les ratios de vitesse plus faibles sont concentrés autour de l'échangeur des autoroutes 40 et 15. En périodes de pointe, cet échangeur est aussi un des points les plus critiques du réseau, avec le segment de l'autoroute 20 entre la 13 et la 15. De plus, les tronçons vers le centre-ville en pointe AM et ceux vers les banlieues en pointe PM apparaissent plus orangés, ce qui témoigne des déplacements pendulaires de semaine.

### 6.2.2.2 Tests statistiques

Les résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk montrent que seule la distribution de la période de pointe de l'après-midi (PM) est normale (Tableau 6-5).

**Tableau 6-5 : Résultats du test de Shapiro-Wilk, par période horaire**

$H_0$  : La distribution suit une loi normale.

Si la Probabilité < 0.05,  $H_0$  est rejetée avec un niveau de confiance de 95 %

	N	W	V	z	Probabilité > z	Distribution
<b>AM [6 à 9h[</b>	188	0,96184	5,394	3,866	0,00006	Rejetée
<b>Jour [9 à 15h[</b>	188	0,9604	5,598	3,951	0,00004	Rejetée
<b>PM [15 à 18h[</b>	188	0,98942	1,495	0,923	0,17812	Normale
<b>Nuit [18 à 6h[</b>	188	0,9564	6,164	4,171	0,00002	Rejetée

Les tests non-paramétriques de comparaison ont été faits par rapport à la période hors-pointe de nuit, qui semble avoir les meilleures conditions de circulation (Tableau 6-6). Tel qu'attendu suite au tracé des distributions, ces tests révèlent que les périodes de pointe sont statistiquement différentes (plus petites) que la nuit, alors que la période hors-pointe de jour n'est pas statistiquement différente de celle de nuit bien qu'elle soit légèrement inférieure.

**Tableau 6-6 : Résultats des tests de différence, par période horaire**

		Test statistique de comparaison				Conclusion
		t-Student	Kolmogorov-Smirnov	Kruskal-Wallis	Wilcoxon-Mann-Whitney	
H <sub>0</sub> : Les 2 échantillons ...		ont une moyenne identique.	proviennent d'une même loi.	sont égaux.	sont égaux.	
Rejet de H <sub>0</sub> si :		p-value >  1.96	P < 0.05 (Éloignement D)	P < 0.05	P < 0.05	
AM [6 à 9h[	Nuit [18 à 6h[	- 4,8721	0 (D = 0,2872)	0,0007	0,0007 AM < N	Différents
Jour [9 à 15h[	Nuit [18 à 6h[	- 1,7211	0,455 (D = 0,0851)	0,2479	0,2477 J < N	Identiques
PM [15 à 18h[	Nuit [18 à 6h[	12,2507	0 (D = 0,5106)	0,0001	0 PM < N	Différents
AM [6 à 9h[	PM [15 à 18h[	5,609	0 (D = 0,25)	0,0001	0 AM > PM	Différents

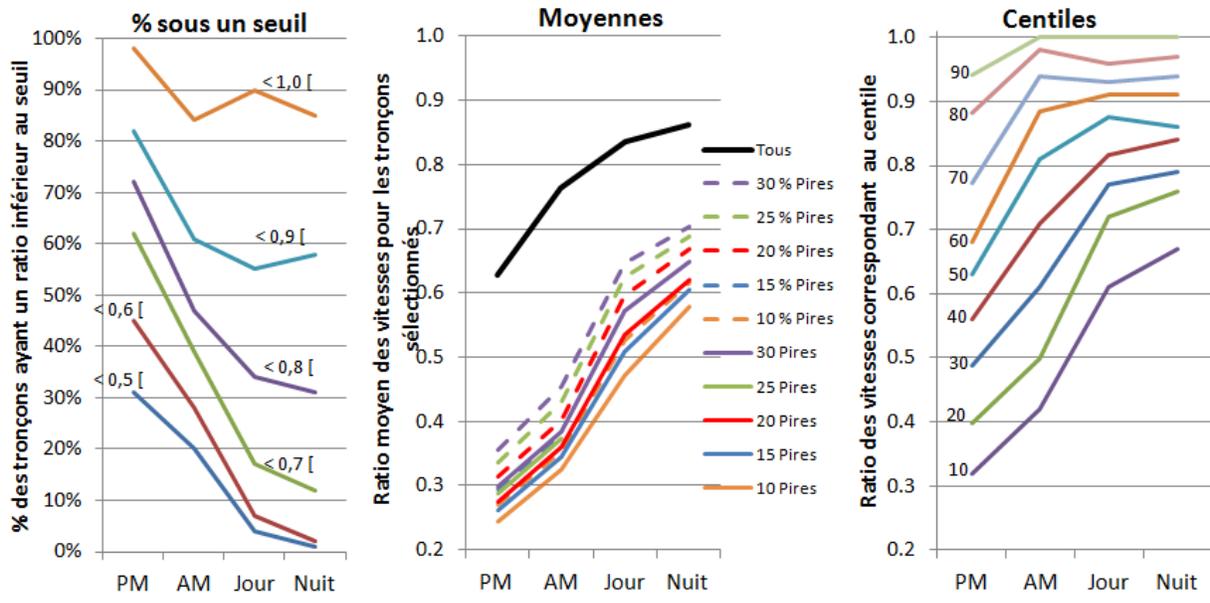
### 6.2.2.3 Indicateurs de congestion testés

Les valeurs des indicateurs se retrouvent dans la partie supérieure de la Figure 6-7. Le bas de cette figure illustre la proportion de variations des indicateurs estimés pour les différentes périodes horaires par rapport à celle hors-pointe de nuit. Une valeur négative de la proportion indique une détérioration de la circulation, ce qui équivaut à une plus forte congestion. Plus la valeur de l'indicateur de congestion (dont celle de référence, la nuit) est grande, moins une grande variation de l'indicateur signifie un changement important des conditions de circulation. Les observations découlant des indicateurs testés sont les suivantes.

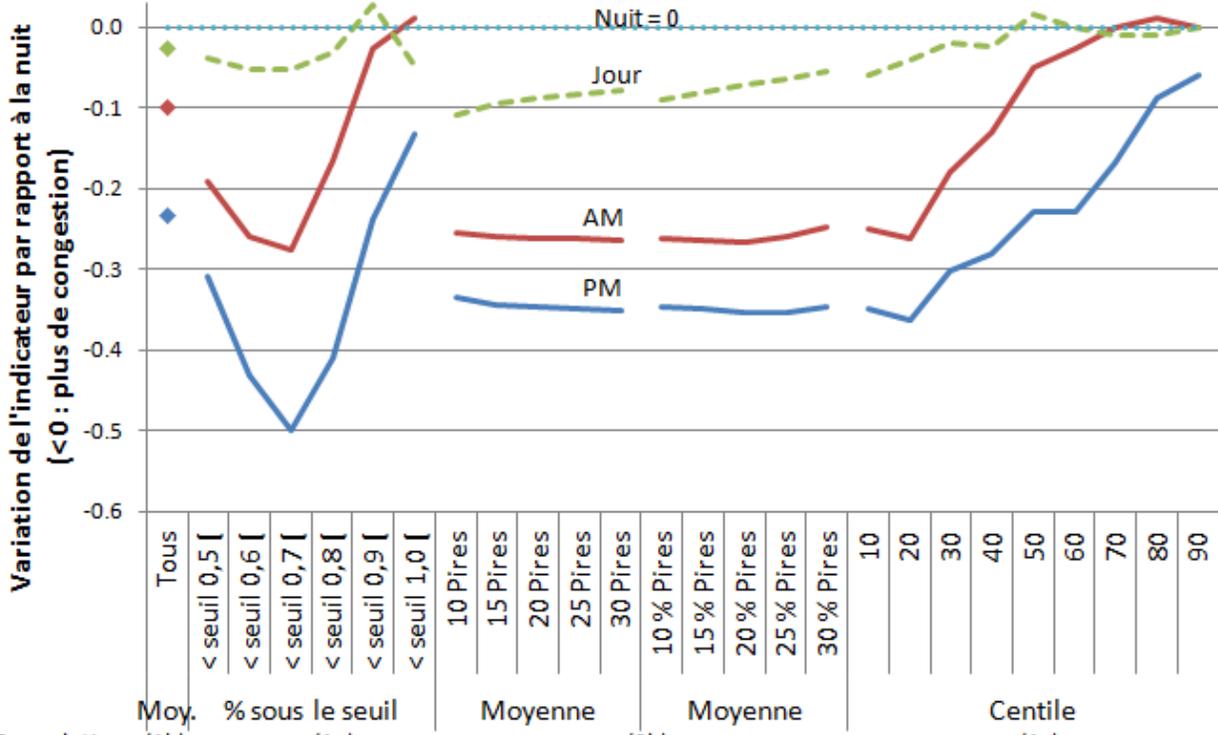
- (1a) Pourcentage des tronçons dont le ratio des vitesses est inférieur à un seuil. Le seuil de 0,7 occasionne la plus grande variation de l'indice par rapport à celui de nuit. Plus le seuil se rapproche de 1,0, plus la variation est faible d'une période horaire à l'autre.
- (1b Courbe « Tous ») Moyenne globale. **La variabilité de cet indicateur est amortie par le grand nombre de tronçons ayant toujours de bonnes conditions de circulation.** Une variation de l'indice de plus de 0,1 semble être significative (- 0,1 pour AM et - 0,2 pour PM).
- (2b) Moyenne des tronçons ayant les pires conditions de circulation. Les valeurs des indicateurs « N % pires » sont légèrement plus élevées que celles des « N pires ». Par exemple, si l'on compare les 10 pires avec les 10 % pires (10 % de 188 tronçons

correspond presque à 20 tronçons). Les 10 tronçons de plus à entrer dans le calcul des « N % pires » affichent nécessairement de meilleures conditions de circulation, ce qui hausse la moyenne.

- (1c) Centile. **Pris un à la fois, les centiles élevés ne reflètent pas les différences observées dans les tests statistiques.** Par exemple, les centiles 70, 80 et 90 affichent des variations faibles et semblables pour la période de pointe AM et hors-pointe de jour. Ceci est incohérent, car le premier est statistiquement différent de la nuit mais pas le second.



Formulation : (1a) (1b courbe « Tous »); 2b) (1c)



Formulation : (1b) (1a) (2b) (1c)

- - - Distribution statistiquement identique
- Distribution statistiquement différente

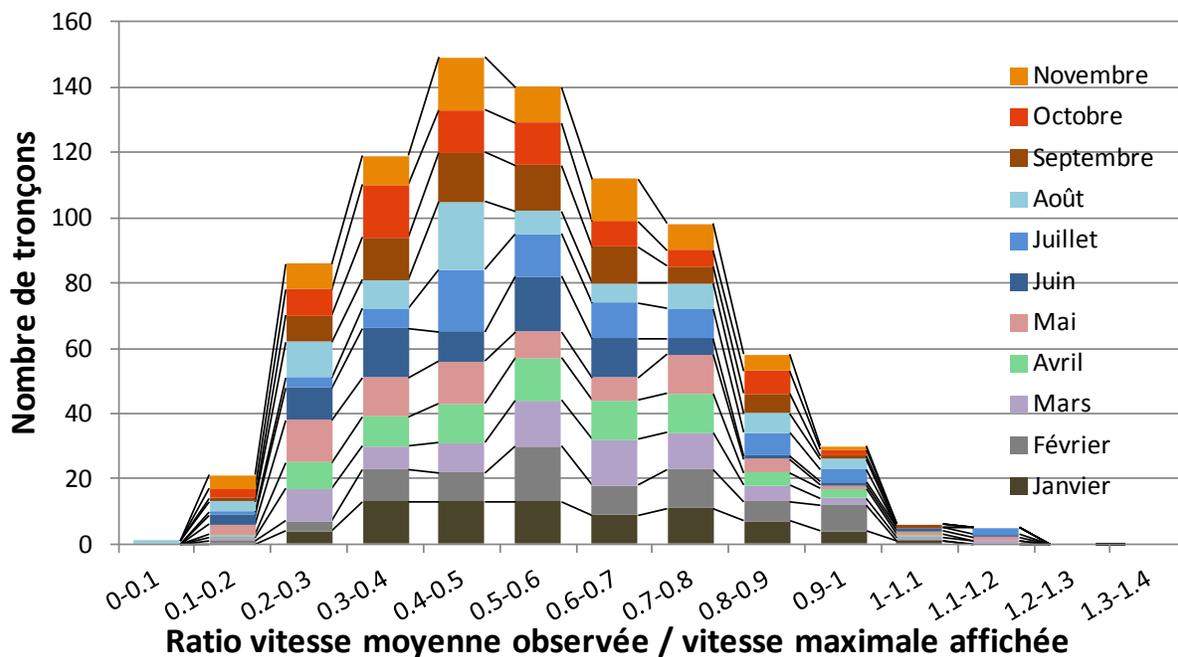
Figure 6-7 : Indicateurs de congestion, par période horaire d'une journée de semaine

## 6.2.3 Période mensuelle (pointe PM de semaine)

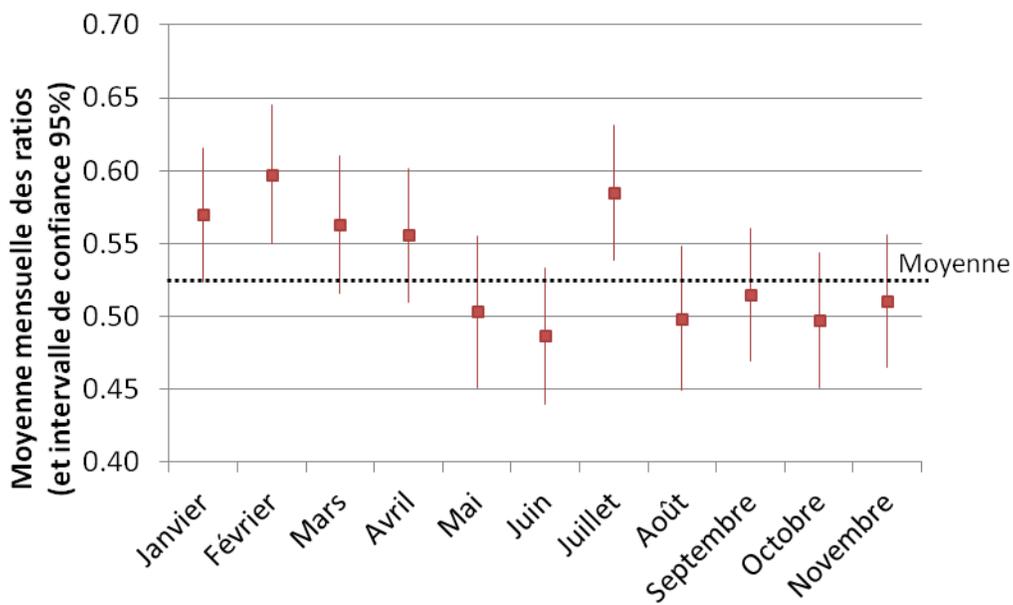
### 6.2.3.1 Distribution des ratios des vitesses

Cette section cherche à capter la variabilité mensuelle de la congestion en période de pointe de l'après-midi (PM) lors des jours de semaine de janvier à novembre 2010. En tout, ce sont 75 tronçons qui ont au moins dix observations chaque mois et qui ont été gardés pour la suite de l'analyse mensuelle. Le graphique inférieur (b) de la Figure 6-8 illustre l'indicateur de la moyenne globale et l'intervalle de confiance à 95 % pour chacun des mois. La distribution (partie supérieure (a) de la Figure 6-8) montre une grande proportion de ratios des vitesses faibles, ainsi que peu de valeurs supérieures à 0,9. Le ratio des vitesses moyen sur l'année est de 0,53.

- Janvier semble le plus constant, avec un nombre similaire de ratios entre 0,3 et 0,8.
- D'après le graphique inférieur (b) de la Figure 6-8, février et juillet sont les mois avec les meilleurs ratios moyens. Le pic semble entre 0,4 et 0,5 en juillet, et entre 0,5 et 0,6 en février.
- Mai, juin et août ont beaucoup de tronçons avec des valeurs inférieures à 0,5.
- La congestion est moins forte durant les mois d'hiver et au début du printemps. Les mois d'été sont les pires avec ceux d'automne, excepté juillet qui sort du lot avec une moyenne très semblable au meilleur mois d'hiver. À prime abord, on aurait pu s'attendre à une plus grande congestion durant l'hiver, notamment à cause des mauvaises conditions météorologiques : gel, verglas, neige. Il pourrait y avoir deux raisons principales pourquoi ces intempéries ne se répercutent pas sur les distributions. D'abord, ces tempêtes sont très ponctuelles et pourraient être trop peu nombreuses pour influencer la moyenne. Ensuite, on peut aussi supposer que les véhicules d'autopartage sont peu utilisés durant ces jours de tempête par les usagers, qui reportent leurs activités à une autre journée. Cela provoquerait un sous-échantillonnage des vitesses lors des journées de tempête. Les mauvaises circulations estivales pourraient s'expliquer notamment par la présence de chantiers, qui sont absents l'hiver. D'ailleurs, l'amélioration de la circulation au mois de juillet serait elle aussi liée à la construction, car il s'agit du mois durant lequel les chantiers de construction sont arrêtés durant deux semaines en raison des « vacances de la construction ».



(a) Distribution



(b) Moyenne et intervalle de confiance des ratios des vitesses

**Figure 6-8 : Distribution des ratios des vitesses, par mois en pointe PM de semaine**

### 6.2.3.2 Tests statistiques

Tel que montré au Tableau 6-7, les distributions mensuelles des tronçons selon le ratio des vitesses sont normales selon le test de normalité de Shapiro-Wilk, sauf mai et juin (probabilité  $< 0,05$ ). Pour cette raison, les tests de comparaison seront encore des tests non-paramétriques.

**Tableau 6-7 : Résultats du test de Shapiro-Wilk, par mois (période de pointe PM)**

$H_0$  : La distribution suit une loi normale.

Si la Probabilité  $< 0.05$ ,  $H_0$  est rejetée avec un niveau de confiance de 95 %

	N	W	V	z	Probabilité > z	Distribution
<b>Janvier</b>	75	0,97085	1,898	1,399	0,08089	Normale
<b>Février</b>	75	0,97515	1,618	1,05	0,14686	Normale
<b>Mars</b>	75	0,98492	0,982	-0,039	0,51573	Normale
<b>Avril</b>	75	0,98633	0,89	-0,254	0,60023	Normale
<b>Mai</b>	75	0,96109	2,533	2,029	0,02122	Rejetée
<b>Juin</b>	75	0,96503	2,277	1,796	0,03624	Rejetée
<b>Juillet</b>	75	0,97758	1,46	0,826	0,20452	Normale
<b>Août</b>	75	0,97066	1,91	1,413	0,07886	Normale
<b>Septembre</b>	75	0,97559	1,589	1,012	0,15584	Normale
<b>Octobre</b>	75	0,96895	2,022	1,537	0,06214	Normale
<b>Novembre</b>	75	0,9830	1,107	0,222	0,41224	Normale
<b>Tous les mois</b>	75	0,98426	1,025	0,054	0,47843	Normale

Concernant les tests statistiques de comparaison, le référentiel n'est pas facile à choisir. Deux comparaisons différentes ont été menées, soit le mois à l'étude par rapport à la distribution (1) du mois de janvier et (2) de la moyenne annuelle. Les résultats se trouvent au Tableau 6-8 et au Tableau 6-9.

On a vu plus tôt que janvier n'est pas très congestionné, légèrement au-dessus de la moyenne (graphique b de la Figure 6-8). Selon les tests de comparaison des distributions par rapport à celle de janvier, les mois de mai, de juin, d'août et d'octobre sont significativement différents et inférieurs à janvier. Ces mois auraient donc les moins bonnes conditions de circulation.

Dans les tests par rapport à la moyenne annuelle, un seul mois ressort (Tableau 6-9). En effet, seul février apparaît avoir une distribution statistiquement différente, supérieure, de la distribution moyenne annuelle. Il appert donc que février est le mois où les conditions de circulation sont les meilleures. Cela confirme les observations précédentes sur les distributions.

À cause de la reprise de l'année scolaire, il était attendu que le mois de septembre soit particulièrement plus congestionné. Pourtant, septembre ne se démarque pas, ce qui pourrait s'expliquer par la période construction sur les tronçons routiers qui ralentit la circulation durant tous les mois estivaux.

**Tableau 6-8 : Résultats des tests de différence par rapport au mois de janvier, par mois (période de pointe PM)**

		Test statistique de comparaison				Conclusion
		t-Student	Kolmogorov-Smirnov	Kruskal-Wallis	Wilcoxon-Mann-Whitney	
H <sub>0</sub> : Les 2 échantillons ...		ont une moyenne identique.	proviennent d'une même loi.	sont égaux.	sont égaux.	
Rejet de H <sub>0</sub> si :		p-value >  1.96	P < 0,05 (Éloignement D)	P < 0,05	P < 0,05	
Janvier (J)	Février	- 0,8359	0,864 (D = 0,0933)	0,4266	0,4265 J < Février	Identiques
Janvier (J)	Mars	0,2057	0,864 (D = 0,0933)	0,8879	0,8879 J > Mars	Identiques
Janvier (J)	Avril	0,4294	0,956 (D = 0,08)	0,7493	0,7493 J > Avril	Identiques
Janvier (J)	Mai	1,9123	0,109 (D = 0,01867)	<b>0,0418</b>	<b>0,0418</b> J > Mai	Identiques
Janvier (J)	<b>Juin</b>	<b>2,534</b>	0,072 (D = 0,2872)	<b>0,0136</b>	<b>0,0136</b> J > Juin	<b>Différents</b>
Janvier (J)	Juillet	- 0,4719	0,446 (D = 0,1333)	0,656	0,656 J < Juillet	Identiques
Janvier (J)	<b>Août</b>	<b>2,1067</b>	<b>0,029 → J &gt; Août</b> (D = 0,2267)	<b>0,0366</b>	<b>0,0366</b> J > Août	<b>Différents</b>
Janvier (J)	Septembre	1,6838	0,446 (D = 0,1333)	0,0985	0,0985 J > Sept.	Identiques
Janvier (J)	<b>Octobre</b>	<b>2,2069</b>	0,234 (D = 0,16)	<b>0,0363</b>	<b>0,0363</b> J > Oct.	<b>Différents</b>
Janvier (J)	Novembre	1,832	0,446 (D = 0,1333)	0,1001	0,1 J > Nov.	Identiques

**Tableau 6-9 : Résultats des tests de différences par rapport à la moyenne annuelle, par mois (période de pointe PM)**

		Test statistique de comparaison				Conclusion
		t-Student	Kolmogorov-Smirnov	Kruskal-Wallis	Wilcoxon-Mann-Whitney	
H <sub>0</sub> : Les 2 échantillons ...		ont une moyenne identique.	proviennent d'une même loi.	sont égaux.	sont égaux.	
Rejet de H <sub>0</sub> si :		p-value >  1.96	P < 0.05 (Éloignement D)	P < 0.05	P < 0.05	
Janvier	Tous les mois (μ)	1,3428	0,328 (D = 0,1467)	0,2219	0,2218 Janv. > μ	Identiques
<b>Février</b>	Tous les mois (μ)	<b>2,1699</b>	0,162 (D = 0,1733)	<b>0,0398</b>	<b>0,0397</b> <b>Fév. &gt; μ</b>	<b>Différents</b>
Mars	Tous les mois (μ)	1,1079	0,732 (D = 0,1067)	0,2969	0,2968 Mars > μ	Identiques
Avril	Tous les mois (μ)	0,8974	0,732 (D = 0,1067)	0,37	0,3699 Avril > μ	Identiques
Mai	Tous les mois (μ)	- 0,7027	0,446 (D = 0,1333)	0,3914	0,3913 Mai < μ	Identiques
Juin	Tous les mois (μ)	- 1,2677	0,446 (D = 0,1333)	0,1447	0,1446 Juin < μ	Identiques
Juillet	Tous les mois (μ)	1,8142	0,162 (D = 0,1733)	0,0933	0,0932 Juillet > μ	Identiques
Août	Tous les mois (μ)	- 0,8683	0,234 (D = 0,16)	0,3542	0,3541 Août < μ	Identiques
Septembre	Tous les mois (μ)	- 0,3801	0,994 (D = 0,0667)	0,237	0,6264 Sept. < μ	Identiques
Octobre	Tous les mois (μ)	- 0,9285	0,585 (D = 0,12)	0,3004	0,3003 Oct. < μ	Identiques
Novembre	Tous les mois (μ)	- 0,5292	0,994 (D = 0,0667)	0,6412	0,6411 Nov. < μ	Identiques

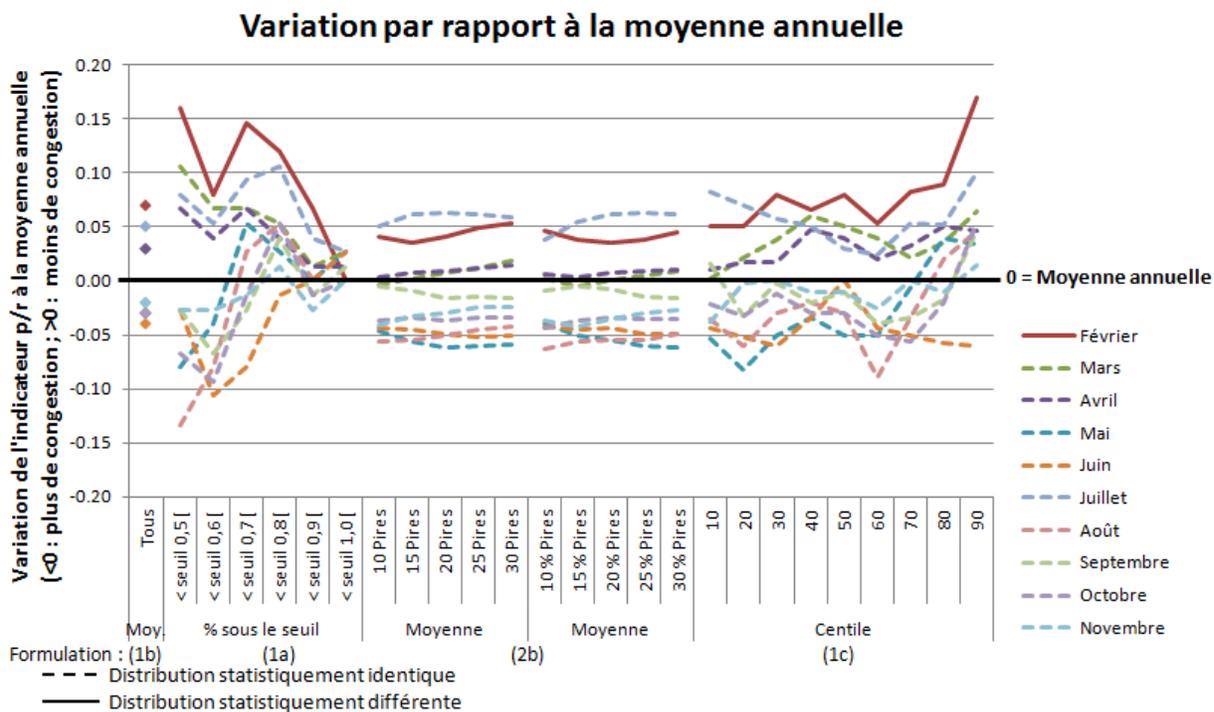
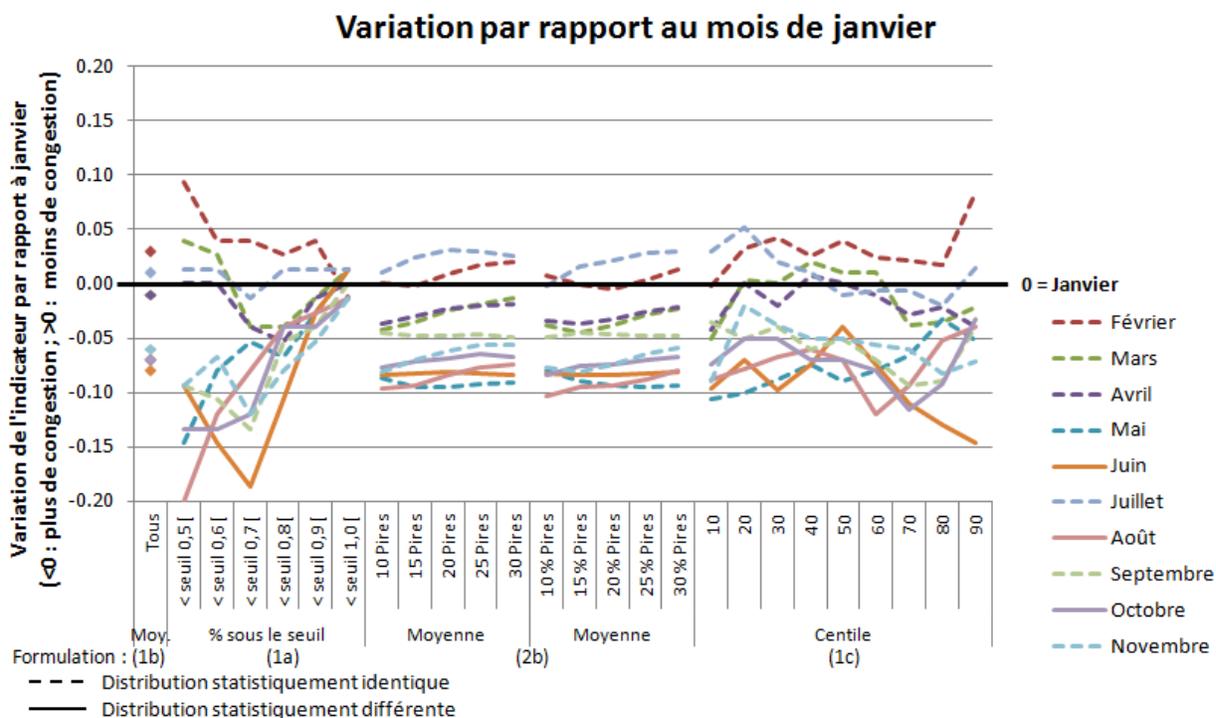
### 6.2.3.1 Indicateurs de congestion testés

Les valeurs des indicateurs testés sont présentées graphiquement à l'Annexe D. La Figure 6-9 illustre la part de variation des différents indicateurs par rapport (I) au mois de janvier et (II) à la moyenne annuelle.

- (1a) Pourcentage des tronçons dont le ratio des vitesses est inférieur à un seuil. Les seuils offrant de grandes variations sont 0,5 et 0,7. Par rapport à la moyenne annuelle, février se démarque, peu importe le seuil choisi. Cet indicateur est instable et il arrive souvent qu'il

varie même s'il s'agit d'un mois statistiquement identique à la référence (janvier ou moyenne annuelle).

- (1b Courbe « Tous ») Moyenne globale. Les mois de janvier à avril ont les moyennes les plus élevées (près de 0,6). Les moyennes de mai à novembre sont stabilisées autour d'un ratio des vitesses de 0,5, excepté pour juillet qui se démarque en ayant un indicateur comparable à celui des mois d'hiver. Les variations par rapport au mois de référence sont petites ( $< |0,07|$ ), ce qui témoigne d'une **faible sensibilité de l'indicateur**. Pour les mois statistiquement différents de janvier (juin, août, octobre), leur variation ne se différencie pas de celle d'autres mois statistiquement identiques à janvier (novembre et mai). Cependant, pour le mois de février statistiquement différent de la moyenne annuelle, la variation se démarque en étant plus élevée que tous les autres.
- (2b) Moyenne des tronçons ayant les pires conditions de circulation. Ces indicateurs suivent les mêmes tendances mensuelles que celles de la moyenne globale ci-haut présentées. Étant donné qu'il y a un peu moins de 100 tronçons analysés, le nombre de tronçons retenus pour l'indicateur basé sur les 10 % pires tronçons est moindre que le nombre retenu pour l'indicateur basé sur les 10 pires tronçons. L'indicateur « N % pires » est donc généralement légèrement inférieur au « N pires ». D'après la Figure 6-9, pour tous les mois statistiquement différents du référentiel, leur variation n'est pas plus élevée (en valeur absolue) que pour les autres mois statistiquement identiques. Notamment, les pires conditions de juillet semblent être meilleures que celles de février. **L'indicateur a donc possiblement tendance à ne pas représenter les différences pour l'ensemble de la distribution. Il ne pourrait donc pas être utilisé pour suivre le portrait global des la situation.**
- (1c) Centile. Puisque l'ensemble des centiles de février sont élevés par rapport à la distribution moyenne, on constate que la distribution complète de février est plus élevée; tous les tronçons ont une meilleure circulation en février. Par rapport à janvier, les mois statistiquement différents ont des centiles généralement plus faibles, mais ne se démarquent pas d'autres mois statistiquement identiques (mai, septembre, novembre). Cela en fait un indicateur instable.



**Figure 6-9 : Indicateurs de congestion, par mois (pointe PM de semaine)**

## 6.3 Autres indicateurs testés

À la lumière de l'analyse précédente, il apparaît intéressant de réaliser d'autres expérimentations, soit l'utilisation de seuils variables comme référence, l'agrégation par corridor et pont, la sélection aléatoire de tronçons et l'intégration de la notion de fiabilité.

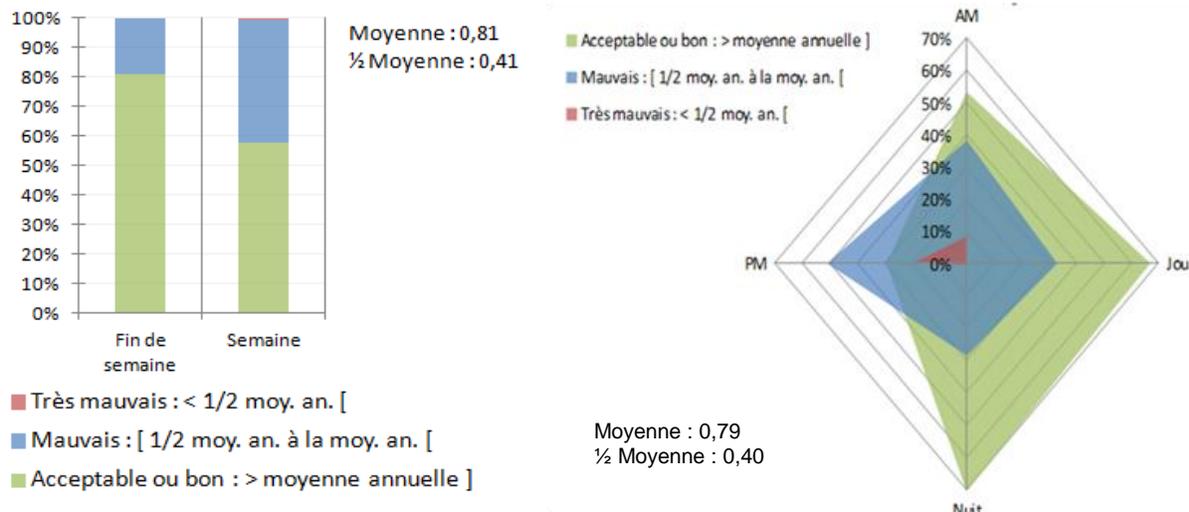
### 6.3.1 Seuils variables

Les analyses précédentes sur l'indicateur (1c) « pourcentage des tronçons dont le ratio des vitesses est inférieur à un seuil » ont montré que pour avoir une grande sensibilité, le seuil à choisir varie : 0,9 pour les types de jour; 0,7 pour les périodes horaires de semaine; et 0,5 ou 0,7 pour les mois en pointe PM de semaine. **Le seuil qui occasionne la plus grande variation de l'indicateur dépend des distributions des groupes étudiés.**

Ainsi, suite à ces constatations, une autre approche est expérimentée : on propose de varier le seuil de référence utilisé en fonction de ce qui est analysé. Ainsi, on pose l'hypothèse que les usagers de la route s'attendent à des conditions de circulation qu'ils observent en moyenne sur le réseau en général. Le seuil de référence utilisé correspond à la vitesse moyenne pour les limites temporelles de l'analyse. De surcroît, afin de faire ressortir les pires conditions, un second seuil est utilisé : la moitié de la moyenne. On dira d'un tronçon qu'il offre de « très mauvaises conditions » s'il est sous la moitié de la moyenne, et de « mauvaises conditions » s'il est sous la moyenne.

Ainsi, pour les types de jour, la moyenne annuelle des ratios des vitesses pour les deux types de jours pour les 231 tronçons est de 0,81. Elle est de 0,79 pour les 188 tronçons utilisés pour les indicateurs par période horaire. La Figure 6-10 illustre les résultats.

- a) Alors que seuls 20% des tronçons ont des conditions mauvaises en fin de semaine, ils sont plus de 40% en semaine. Aucun n'a de conditions très mauvaises (sous un seuil de 0,41).
- b) Les deux périodes hors-pointe offrent des conditions similaires : 0 % des tronçons avec de très mauvaises conditions (sous 0,40) et 33 % des tronçons avec des mauvaises conditions de circulations (sous 0,79). La pointe PM (20 % très mauvaises conditions, 29 % bonnes conditions) est pire que celle AM (9 % très mauvaises conditions, 53 % bonnes conditions).

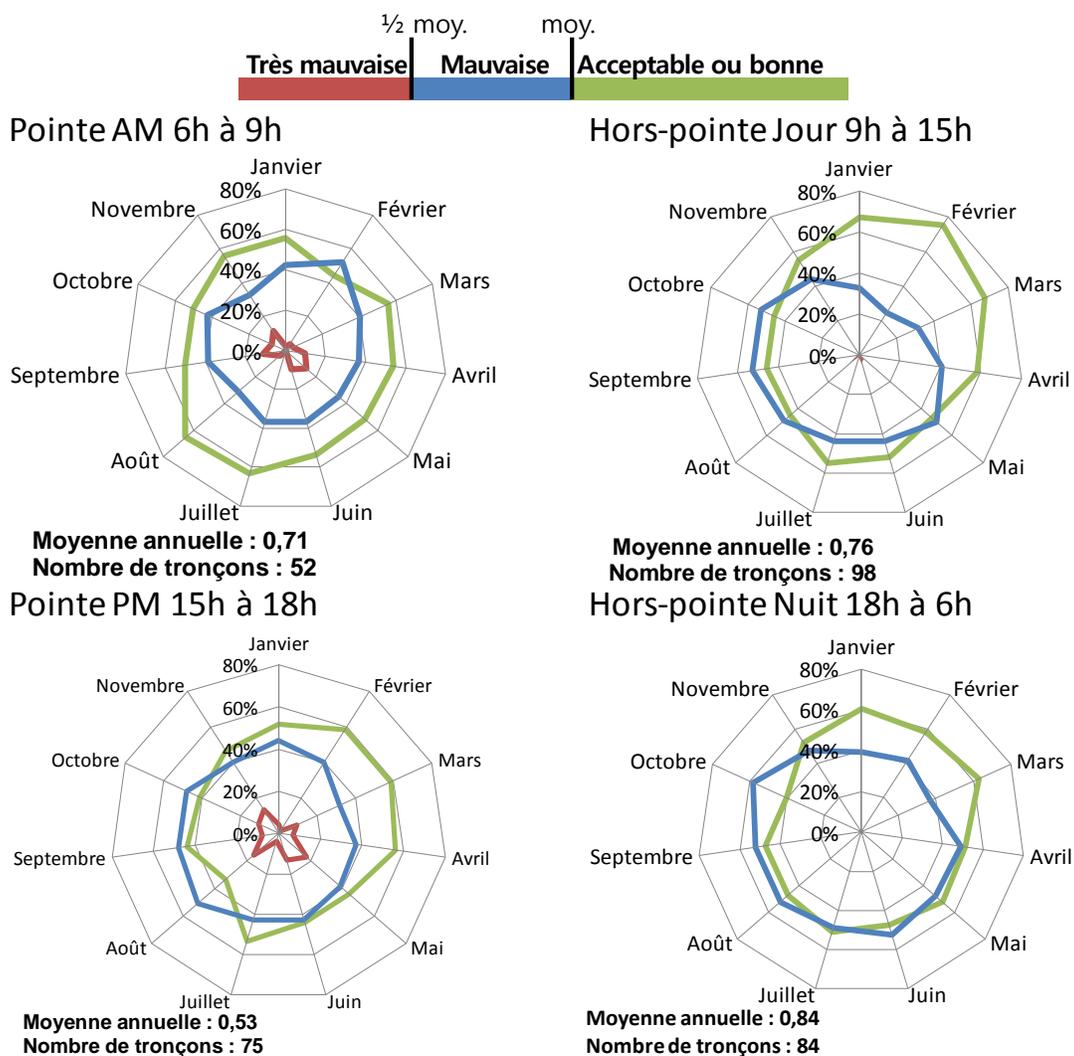


(a) Type de jour (231 tronçons) (b) Période horaire de semaine (188 tronçons)

**Figure 6-10 : Indicateur de part des tronçons par rapport à deux seuils fixés selon la moyenne annuelle, par type de jour et par période horaire.**

Cette méthodologie est également appliquée à la segmentation mensuelle, mais cette fois-ci pour chacune des périodes horaires. Ainsi, le seuil de référence correspond à la moyenne annuelle pour la période horaire concernée. Pour chaque période horaire, seuls les tronçons ayant au moins 10 observations GPS par mois ont été retenus. Étant donné que les tronçons retenus ne sont pas les mêmes pour chaque période horaire, les quatre périodes ne peuvent pas être comparées entre elles. La moyenne annuelle du ratio des vitesses, qui correspond au seuil d'acceptabilité des usagers, est calculée à partir des tronçons retenus : 0,71 en pointe AM, 0,76 en hors-pointe du jour, 0,53 en pointe PM et 0,84 en hors-pointe de nuit.

Les quatre graphiques de la Figure 6-11 montrent la part des tronçons dans chacune de ces trois catégories de condition de circulation. Tels qu'analysé précédemment pour la période de pointe PM, l'état de la circulation se détériore aux mois de mai et juin, et de août à novembre (% très mauvaises conditions élevés). Les mois de janvier à avril, ainsi que celui de juillet, sont plus fluides (% conditions acceptables élevés). En pointe AM, les mois les plus fluides sont toujours ceux d'hiver, ainsi que ceux de juillet et d'août (% très mauvaises conditions faibles). La reprise scolaire en septembre semble transparaître par la démarcation entre les proportions entre août et septembre (diminution du % acceptable et augmentation du % très mauvais).



**Figure 6-11 : Indicateur de part des tronçons par rapport à deux seuils fixés selon la moyenne annuelle, par mois et par période horaire.**

Pour ce qui est des périodes hors-pointe, aucun (ou très peu) tronçon n'a de très mauvaises conditions de circulation. La nuit, les mois de juin à novembre comptent des parts égales de tronçons catégorisés mauvais et bons, ce qui traduit peut-être la construction de nuit sur les tronçons routiers, inexistante lors des mois de gel. Les mois de janvier à mars comptent une grande part de tronçons de bonne condition de circulation. Le jour entre 9h et 15h, les mois d'hiver (de janvier à mars) comptent une grande majorité des tronçons avec de bonnes conditions de circulation (entre 67 % et 76 %).

Bref, cette formulation de l'indicateur se réfère à un seuil variable qui permet de représenter les attentes des usagers, qui varie selon le moment du déplacement. Cela semble une alternative au

seuil fixe à explorer davantage. Afin de poursuivre cette démarche de seuil variant en fonction des attentes des usagers, il pourrait être envisagé de faire varier le seuil en fonction de la position d'un tronçon sur le territoire. En effet, un usager ne s'attend-il pas à plus de congestion lorsqu'il se rapproche d'un centre urbain et inversement lorsqu'il s'en éloigne?

### **6.3.2 Corridors et ponts**

Afin de pousser plus loin les analyses précédentes, les expérimentations suivantes tentent :

- d'étudier l'impact d'une segmentation par corridor, plutôt que l'utilisation de la moyenne globale de tous les tronçons comme précédemment estimée (1a, courbe « Tous »). Pour cette expérimentation, le réseau a été divisé en 13 corridors autoroutiers (Figure 6-12);
- de pousser plus loin la sélection stratégique de tronçons. Précédemment, les plus critiques (en nombre ou en pourcentage) constituaient une sélection des tronçons indiquant l'évolution des pires conditions plutôt que la tendance globale. Un autre intérêt particulier concerne les ponts : un indicateur basé sur les entrées et sorties de pont est donc également testé.

Pour des raisons de comparaison, certains indicateurs présentés ci-haut sont conservés. Les expérimentations sont réalisées seulement pour la segmentation des périodes horaires. Le Tableau 6-10 résume les cinq formulations testées pour quatre sélections différentes d'unités spatiales (cas #1 à 4). Les quatre sélections d'unités spatiales (tous, 15 plus critiques, ponts, milieu de corridor) sont cartographiées à la Figure 6-12.

Tableau 6-10 : Cas testés

Facteurs à déterminer		Cas #1	Cas #2	Cas #3	Cas #4
Partie du réseau routier	Physique	Autoroutes			
	Fonction	Primaire			
Unités de base	Spatiales	Tronçons de 1 km de longueur			
	Temporelles	Période de la journée (AM, jour, PM, nuit)			
Limites	Spatiales	Île de Montréal			
	Temporelles	An (Janvier à novembre 2010), jours de semaine			
Méthode de calcul de l'indicateur	Unités spatiales sélectionnées	Tous	15 tronçons les plus critiques	Entrées et sorties de pont	Milieu du corridor autoroutier
	Formule	(a) Moyenne globale de tous les tronçons (b) 85e centile (c) Moyenne par corridor autoroutier, puis du réseau complet (d) % sous un seuil fixe de 0,6 (e) % sous un seuil variable (moyenne différente pour chaque période de la journée)			
Analyse de sensibilité		1) Différences entre les périodes de la journée 2) Différences par rapport à une simulation : réduction de 50% du			

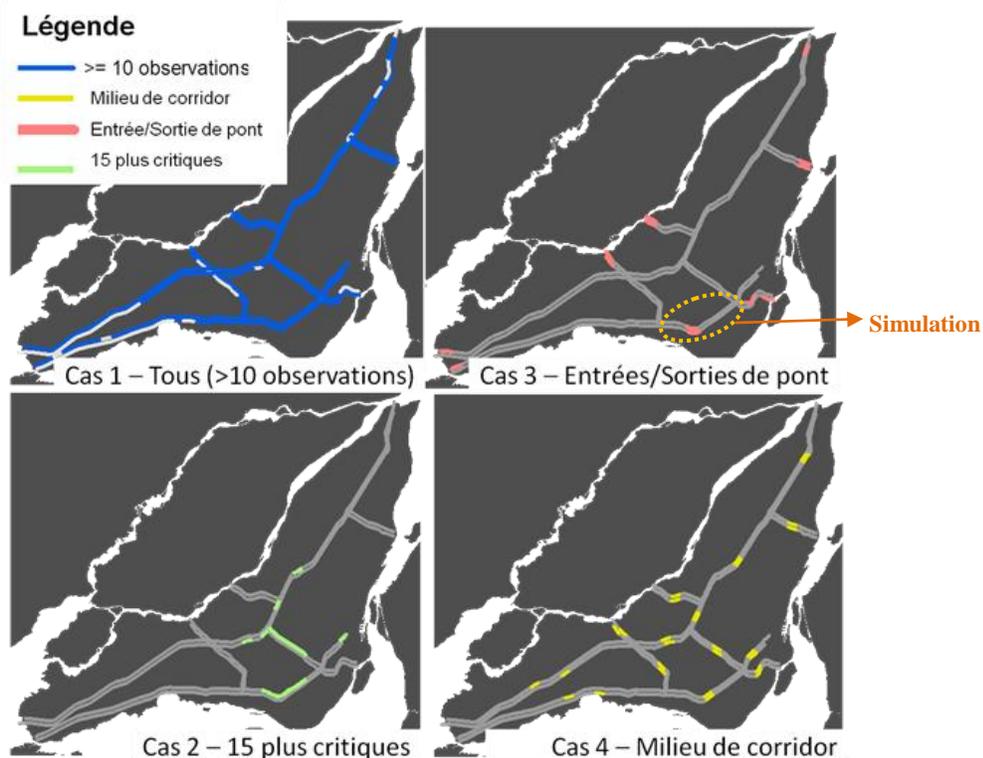


Figure 6-12 : Cartographie des quatre sélections spatiales testées

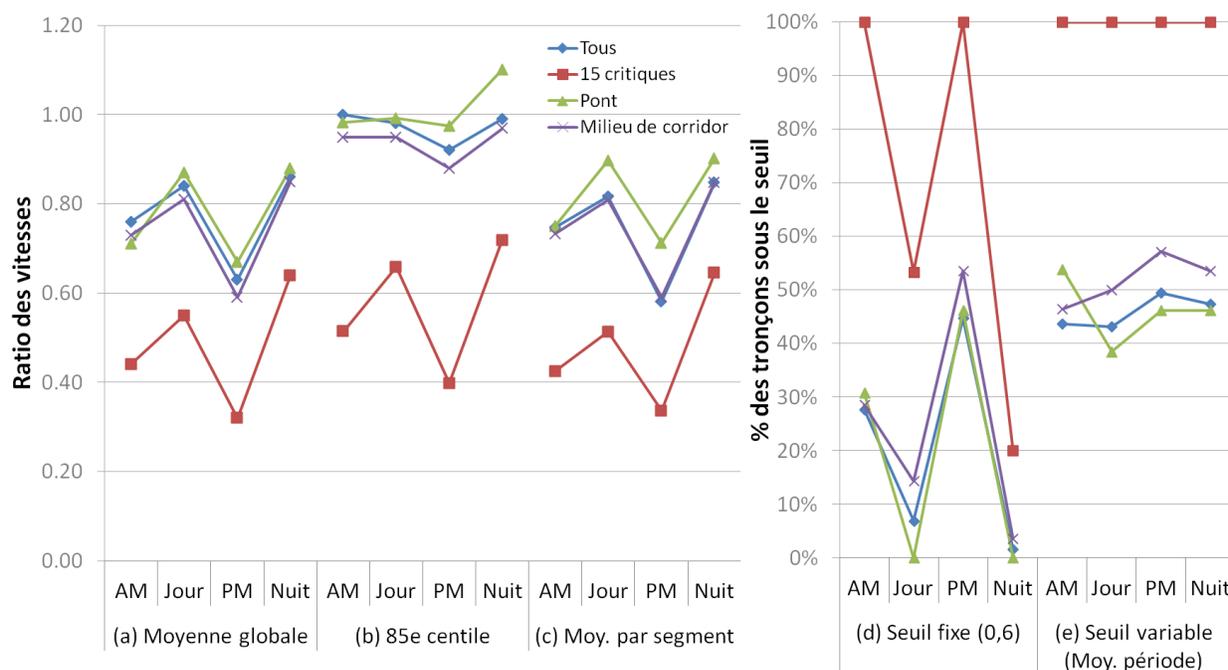
Les cinq formulations testées pour chacun des quatre cas sont :

- a) moyenne globale (identique à (a) de l'analyse systématique de la Section 6.2);
- b) 85<sup>e</sup> centile de la distribution des ratios des vitesses (identique à (b) de l'analyse systématique de la Section 6.2);
- c) agrégation multi-niveaux : moyenne des tronçons par corridor, puis moyenne des corridors pour l'île complète;
- d) pourcentage des tronçons sous le seuil de 0,6 (identique à (c) de l'analyse par défaut). Lomax et al. (1997) affirme que les « automobilistes sont généralement avisés de la congestion quand la vitesse de trajet est réduite à environ 60% à 70% de la vitesse fluide. » Ce seuil de 0,6 a aussi été suggéré par MTQ (Gourvil & Joubert, 2004);
- e) un seuil variable égal à la moyenne annuelle pour la période horaire concernée, utilisée afin de refléter la variation des attentes de l'utilisateur selon l'heure de la journée.

Les résultats de chacune des formulations (a à e) pour tous les cas (#1 à #4) sont présentés au haut de la Figure 6-13. Sélectionner tous les tronçons (#1), seulement les entrées et sorties de pont (#3) ou le milieu des corridors (#4) donne des valeurs similaires d'indicateur. Les valeurs basées sur les ponts sont légèrement supérieures alors que c'est l'inverse pour les milieux de corridors. Les variations entre les périodes horaires sont généralement plus élevées pour les formulations calculées à partir des 15 pires tronçons (#2). Cela suggère que les conditions alarmantes engendrent un indicateur plus sensible aux changements de conditions de circulation.

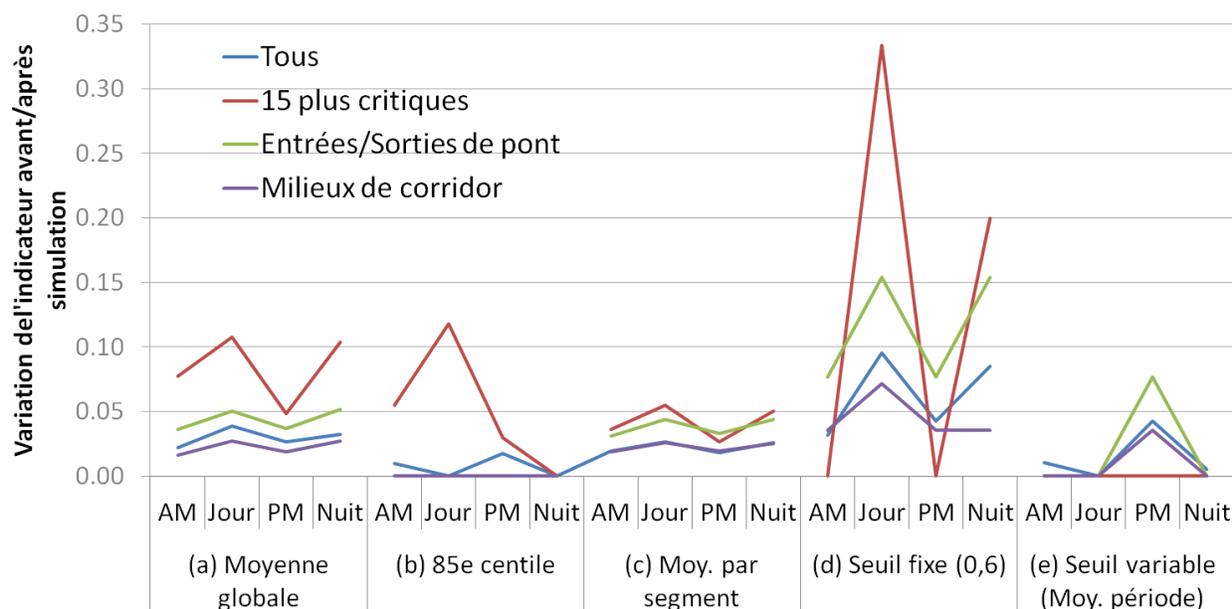
La formulation avec un seuil fixe (d) engendre beaucoup de valeurs extrêmes (0% et 100%). Le seuil de 0,6 semble trop élevé pour les périodes de pointe mais trop faible pour les périodes hors-pointe de jour. L'utilisation de seuils variables (e) règle ces problèmes de valeurs extrêmes. Cependant, cet indicateur basé sur les seuils variables ne donne pas toujours des valeurs cohérentes avec les résultats des tests statistiques. Par exemple, pour les cas #1 et #4, la nuit obtient des conditions de circulation moins bonnes qu'en AM et hors-pointe de jour. On peut conclure qu'on ne peut pas comparer les périodes entre elles si le seuil est variable. Mais cet indicateur risque d'être pertinent si l'on suit l'évolution dans le temps pour une même période (section 6.3.1). Il n'est pas non plus approprié lorsqu'il est basé sur les 15 tronçons les plus critiques (#2), avec des valeurs stables à 100%.

Finalement, une simulation simple et théorique est réalisée pour tester la sensibilité des indicateurs : les vitesses observées sur l'autoroute 20 entre la A13 et la A15 sont diminuées de moitié. L'endroit est indiqué par une ellipse sur la carte de la Figure 6-12. Les résultats sont présentés dans le graphique inférieur de la Figure 6-13. Plus le ratio de variation avant/après est grand, plus la simulation de réduction de vitesses affecte l'indicateur, et plus ce dernier y est sensible. Ce corridor comprend un pont et cinq tronçons critiques. C'est pourquoi ce sont généralement ces derniers (courbes vertes et rouges) qui varient le plus, notamment pour les moyennes globales et multi-niveaux. La proportion des tronçons sous le seuil de 0,6 est aussi beaucoup affectée (d), car il s'agit d'une réduction importante des conditions de circulation. Étonnamment, les variations sont amplifiées de jour et de nuit, alors que la même réduction de vitesses a été appliquée à toutes les périodes horaires.



Valeurs issues des données initiales

Figure 6-13 : Résultats des quatre cas testés



Valeurs issues de la simulation de réduction de vitesse

Figure 6-13 (suite) : Résultats des quatre cas testés

## 6.4 Synthèse des contributions, perspectives et recommandations

Divisée en quatre parties, cette dernière section du chapitre 5 comporte une synthèse des indicateurs de congestion testés précédemment. Puis, sont discutées les limites et les améliorations envisagées relativement à l'échantillon, aux bases de données et à l'intégration des facteurs d'influence.

### 6.4.1 Synthèse des indicateurs de congestion testés

Les observations suivantes peuvent être tirées des expérimentations précédentes.

La moyenne globale est influencée par les valeurs les plus récurrentes parmi l'ensemble des tronçons, ici situées entre 0,9 et 1. Cependant, ces valeurs les plus récurrentes ne proviennent pas nécessairement des tronçons les plus achalandés. Ainsi, la variabilité de cet indicateur est amortie par le grand nombre de tronçons ayant toujours de bonnes conditions de circulation. Pour ces raisons, l'indicateur demeure peu sensible aux variations des conditions de circulations. Toutefois, ses variations sont dans la bonne direction. La moyenne multi-niveaux (par corridor,

puis globale) donne des résultats semblables à la moyenne globale. Elle n'offre donc pas d'avantage. L'utilisation de la moyenne comme formulation est à privilégier pour suivre l'évolution de la tendance générale des conditions de circulation.

De façon générale, les centiles ont permis d'observer que les distributions se différencient plus pour les ratios des vitesses faibles et moins pour des valeurs proches de 1,0. Pour cette raison, regardés séparément, les centiles élevés ne suivent pas du tout les observations issues des tests statistiques. Le calcul des centiles peut toutefois servir à bien interpréter les variations de la moyenne globale et l'évolution des tendances.

Un seuil de référence trop élevé ou trop faible peut rendre l'indicateur insensible aux variations des conditions de circulation. Également, certaines variations inattendues de l'indicateur surviennent lorsque des tronçons passe ce seuil. On pourrait donc se leurrer par un indicateur constant en pensant que la situation est constante alors qu'elle se dégrade graduellement. Le seuil qui occasionne la plus grande variation de l'indicateur dépend des distributions des groupes étudiés.

D'après les expérimentations de seuils fixes (ratio des vitesses de 0,5 à 1,0), le seuil pour s'assurer que l'indicateur est adéquatement sensible est : 0,9 pour une comparaison des types de jour; 0,7 pour une comparaison des périodes horaires en semaine; et 0,5 ou 0,7 pour une comparaison mensuelle en pointe PM de semaine. Une suggestion est de prendre la moyenne annuelle pour la période étudiée : 0,8 pour les types de jour et, pour chaque période horaire : 0,71 en pointe AM, 0,53 en pointe PM, 0,76 en hors-pointe de jour et 0,84 en hors-pointe de nuit.

Utiliser des seuils variables est intéressant, car cela traduit en quelque sorte le côté subjectif de la congestion. Puisque chaque seuil correspond à la moyenne annuelle pour la période étudiée, on peut supposer que c'est ce à quoi les usagers s'attendent et, par conséquent, jugent acceptable. Par contre, ces seuils empêchent la comparaison entre les différentes périodes étudiées, celles-ci n'ayant pas le même seuil.

L'indicateur bâti sur une sélection spécifique de tronçons (pires ou ponts) a tendance à ne pas représenter les variations de l'ensemble de la distribution. Il ne pourrait donc pas être utilisé pour suivre le portrait global de la situation. Cependant, il répond à des besoins spécifiques, notamment le suivi des pires conditions ou des points névralgiques du réseau.

En général, les indicateurs basés sur les milieux de corridors étaient similaires à la moyenne globale de tous les tronçons. Il a l'avantage de ne pas dépendre d'une large couverture de l'échantillon. Cependant, il sera moins sensible si les conditions de circulation sont modifiées à des endroits autres qu'au milieu, aux extrémités des corridors notamment.

#### **6.4.2 Tirage aléatoires d'après des catégories physiques du réseau**

La dernière expérimentation naît de la problématique créée par le fait que la présente étude ne contrôle pas l'échantillon disponible. En effet, les distributions spatiale et temporelle des observations dépendent des usagers de l'autopartage. Les tronçons avec suffisamment d'observations risquent donc de varier constamment. Par exemple, un tronçon Y peut avoir plus de dix observations durant chacun des neuf premiers mois de l'année, en période de pointe AM, mais avoir moins de dix observations durant les trois derniers mois. Dans les analyses précédentes, un tel tronçon aurait été enlevé des analyses, diminuant ainsi la taille de l'échantillon.

Dans cette section, on tente de contourner ce problème en tirant aléatoirement quelques tronçons pour estimer l'indicateur final. Ainsi, par exemple, le tronçon Y précédent fera parti de l'ensemble de tirage et pourra être tiré durant les neuf premiers mois de l'année.

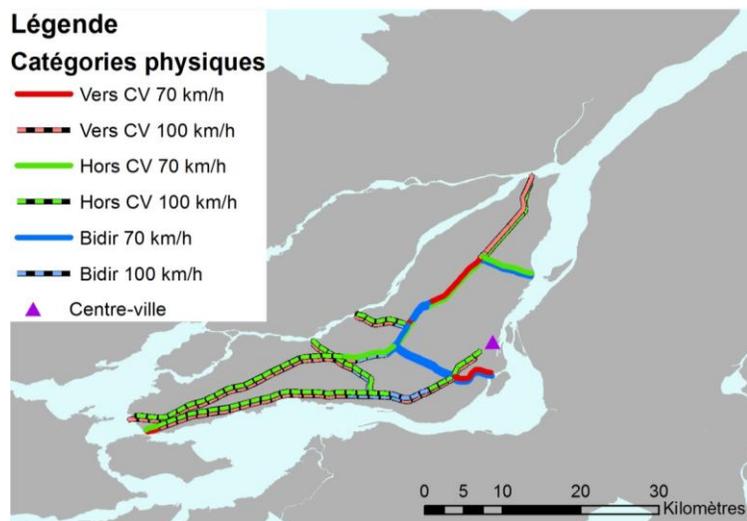
Avant tout, on s'assure d'avoir une représentativité minimale de tous les types de tronçons, et ce, en découpant le réseau autoroutier selon les caractéristiques physiques des tronçons. Six catégories de tronçons ont été définies : (1) selon la direction par rapport au centre-ville (vers le centre-ville en rouge, vers la banlieue en vert, bidirectionnel en bleu à la Figure 6-14) et (2) selon la vitesse affichée (70 km/h en trait plein et 100 km/h en tireté à la Figure 6-14). Chaque catégorie ne comporte pas le même nombre de tronçons, celui-ci variant de 13 à 75 (tableau de la Figure 6-14).

La formulation choisie est la moyenne globale pour l'ensemble des tronçons de même catégorie. La segmentation est mensuelle, et calculée pour chacune des périodes horaires. Les graphiques de la Figure 6-14 montrent les résultats :

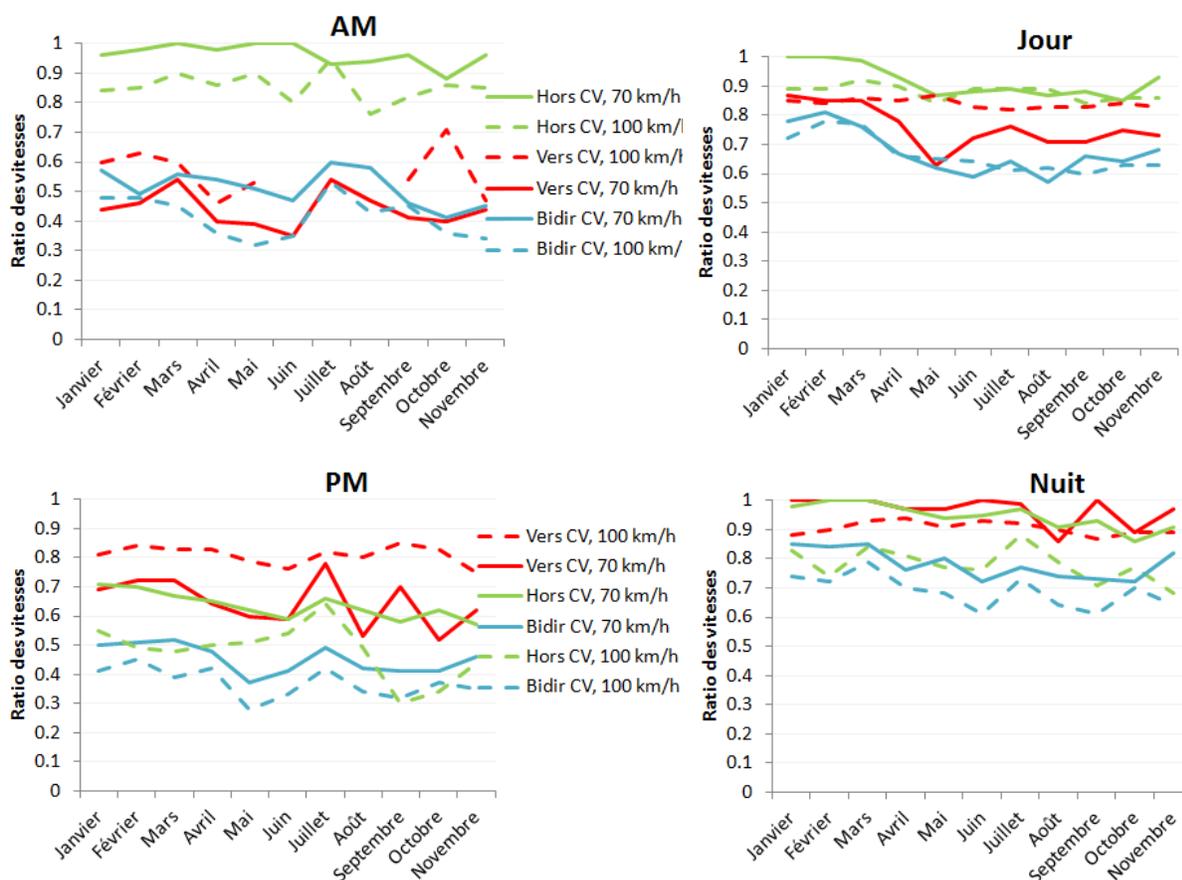
- il ne semble pas y avoir de logiques ayant trait à la vitesse affichée;
- les liens bidirectionnels (bleu) sont constamment parmi les plus congestionnés. Ils représentent Décarie et l'A40 autour de l'A15;

- la logique d'inversement des pointes est respectées : les tronçons avec les meilleurs ratios sont ceux vers la banlieue en AM (vert) et vers le centre-ville en PM (rouge);
- alors que de nuit tous les ratios sont sensiblement égaux, les liens à 70 km/h vers le centre-ville sont assez bas le jour (rouge plein) et rejoignent les liens bidirectionnaux (bleu).

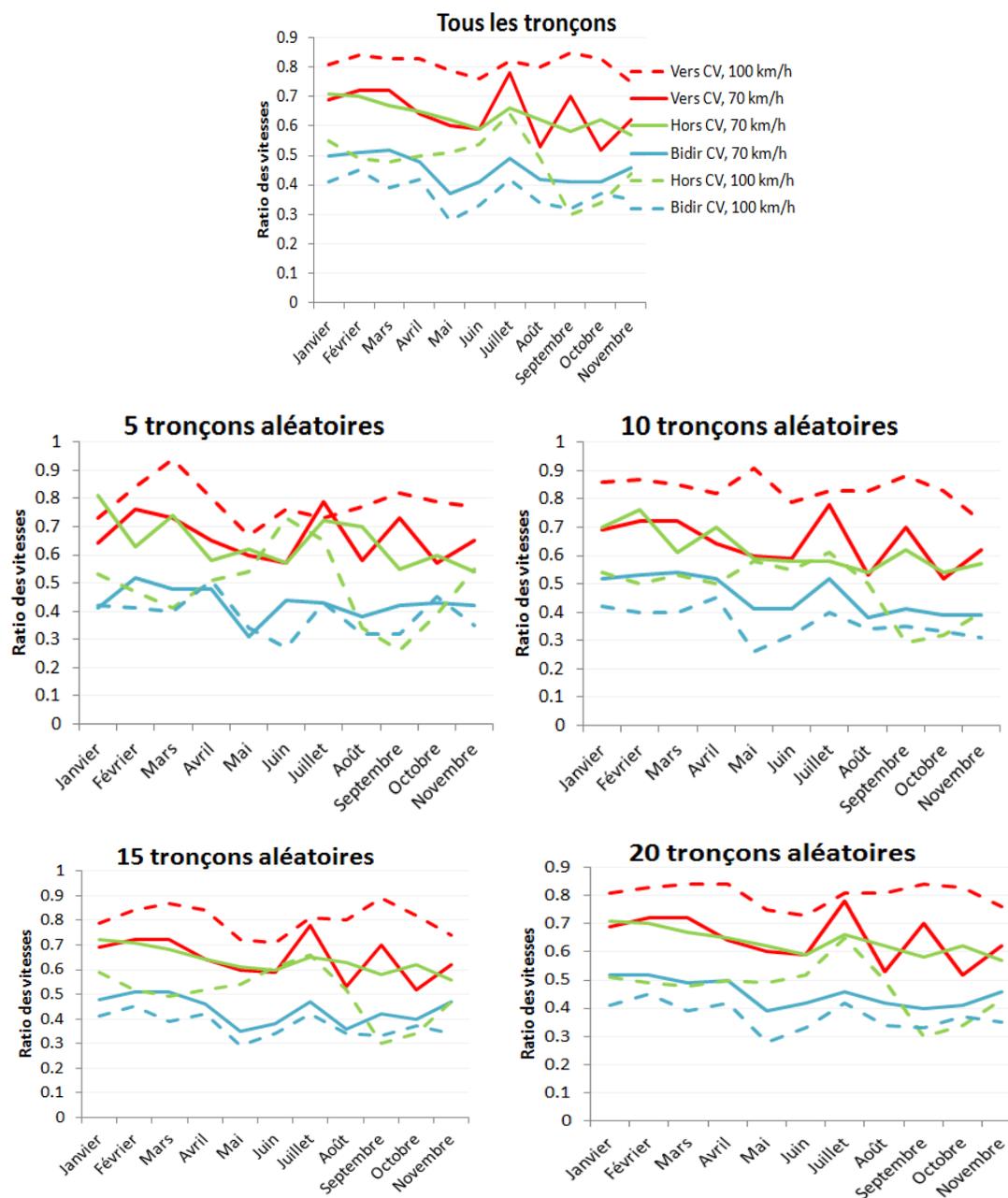
Pour la pointe PM, différents tirages aléatoires sont effectués : 5, 10, 15 et 20 tronçons. Lorsque la catégorie contient moins de tronçons que le nombre aléatoire, tous les tronçons sont pris en considération. C'est le cas notamment de la catégorie vers le centre-ville à 70 km/h qui ne comprend que treize tronçons ( $< 15$  ou  $20$  tirés aléatoirement). On peut ainsi comparer les tendances mensuelles de tous les 75 tronçons avec les tendances issues des tirages aléatoires (Figure 6-15). Avec aussi peu que cinq tronçons, les tendances sont brouillées, bien qu'on observe globalement des liens bidirectionnels plus congestionnés.



Direction	Vitesse affichée	Nombre de tronçons
Vers CV	70	13
Vers CV	100	71
Hors CV	70	23
Hors CV	100	75
Bidir CV	70	32
Bidir CV	100	17



**Figure 6-14 : Moyenne des ratios des vitesses selon les catégories physiques (tous les tronçons avec au moins dix observations sur l'année pour la période horaire étudiée)**



**Figure 6-15 : Moyenne des ratios des vitesses par catégorie physique (tronçons aléatoires parmi ceux avec au moins dix observations sur l'année pour la période de pointe PM)**

On s'aperçoit que les tendances commencent à être discernables à partir de 15 tronçons, et deviennent très similaires avec 20 tronçons tirés aléatoirement.

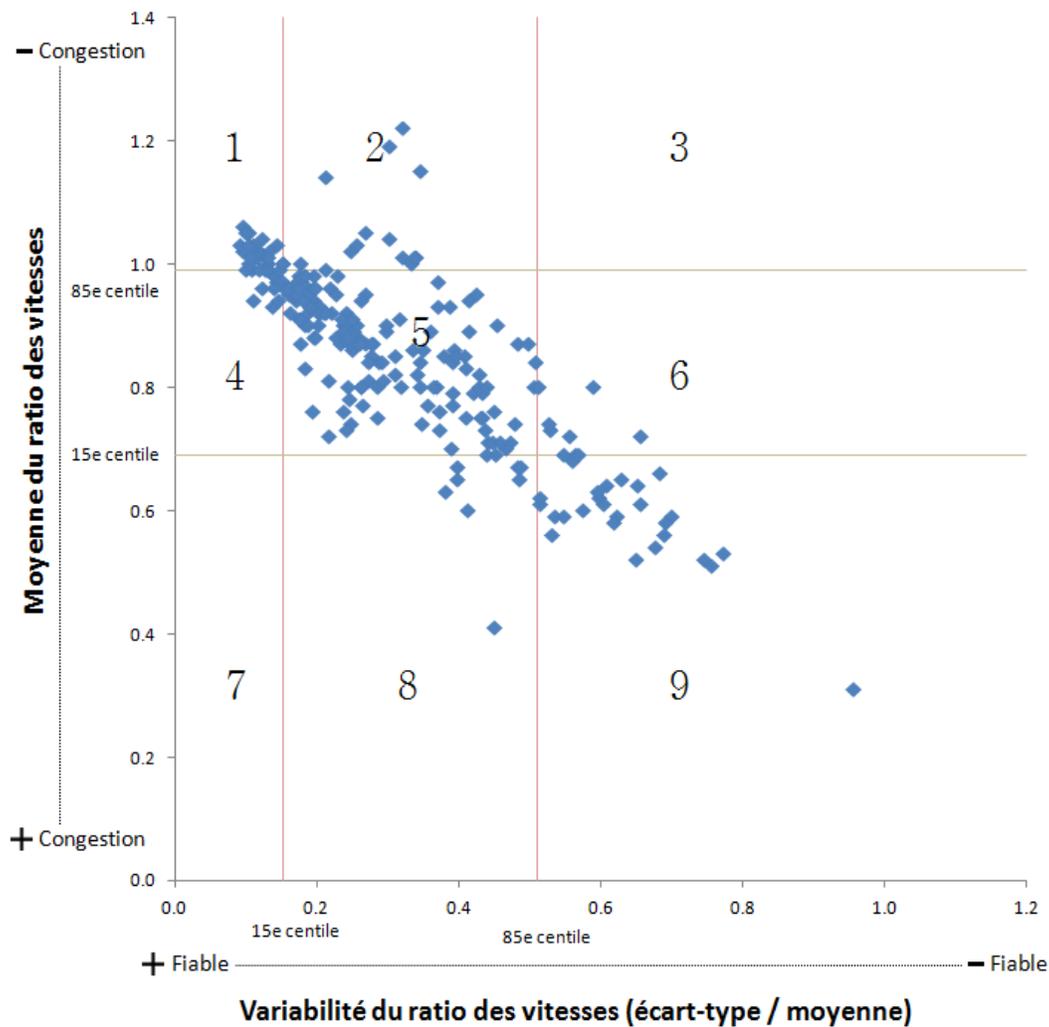
Cette approche mérite d'être approfondie. La typologie par catégorie physique est différente de celle par corridor. Ici, seules la vitesse et la direction par rapport au centre-ville ont été utilisées pour définir les catégories. La réduction ou l'augmentation de voies, le nombre d'entrées ou de

sorties, le rayon de courbure, la présence d'accotements seraient certainement d'autres caractéristiques à considérer. En créant les catégories, il faut toutefois faire attention à garder un nombre suffisant de tronçons pour que l'échantillon contienne suffisamment de valeurs.

Quant au tirage aléatoire de tronçons, il a pour avantage de ne pas se soucier de la distribution des observations. Avec des données passives comme celles de Communauto, on ne peut pas prévoir d'avance quels tronçons auront assez d'observations; ce ne seront pas toujours les mêmes. Il serait intéressant de faire le tirage aléatoire par corridor plutôt que par catégorie physique. Pour ce faire, des tirages pour une même période horaire et un même mois doivent être répétés maintes fois. Cela permettra d'observer si les tendances sont toujours similaires à l'utilisation de tous les tronçons, et ainsi de déterminer le nombre de tronçons minimal à tirer aléatoirement.

### **6.4.3 Intégrer intensité et fiabilité**

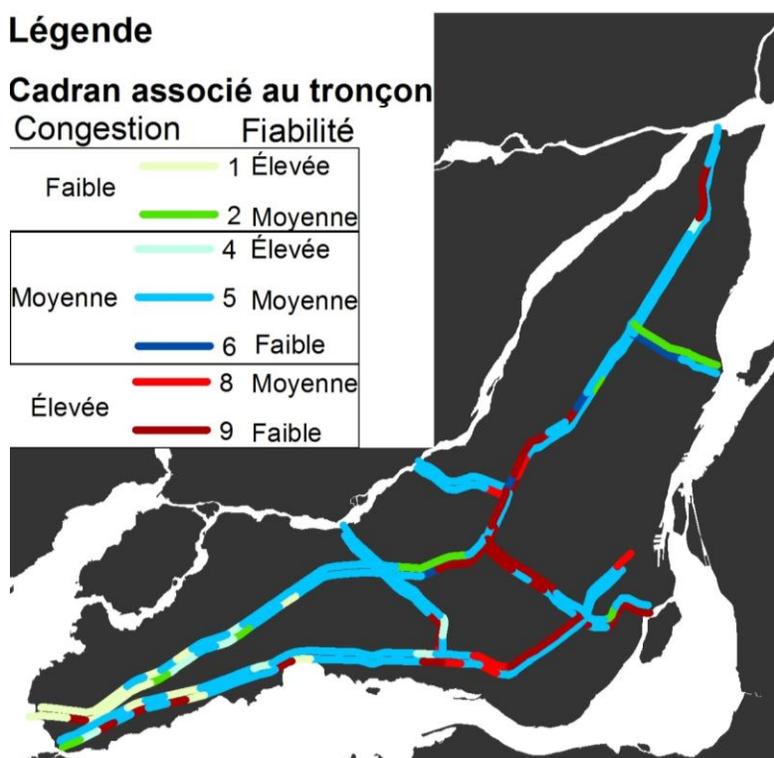
Avec l'intensité, la fiabilité est des quatre aspects de la congestion à évaluer. Une catégorisation des tronçons est proposée en fonction à la fois des conditions de circulation et de la variabilité de ces conditions. Les 231 tronçons autoroutiers sont divisés en neuf catégories, ou cadrans, selon leur moyenne et leur variabilité (écart-type sur moyenne) pour les jours de semaine. Les deux seuils d'intensité de la congestion sont fixés d'après les 15<sup>e</sup> et 85<sup>e</sup> centiles de la distribution des ratios des vitesses moyennes pour tous les tronçons. Les deux seuils de la fiabilité sont fixés d'après les 15<sup>e</sup> et 85<sup>e</sup> centiles de la distribution de la variabilité de ratios des vitesses, pour tous les tronçons. La Figure 6-16 illustre la distribution des tronçons parmi les cadrans. La plupart d'entre eux sont dans les cadrans 1 (faible congestion, fiabilité élevée) et 5 (fiabilité et congestion moyenne). Aucun tronçon n'a à la fois une faible congestion et une piètre fiabilité, de même qu'une faible congestion jumelée à mauvaise fiabilité.



**Figure 6-16 : Neuf catégories (cadrons) déterminées en fonction du niveau des conditions de circulation et de la variabilité de ces dernières.**

En les répartissant sur le territoire (Figure 6-17), on s'aperçoit que la majorité des tronçons de forte congestion et de faible fiabilité (9, rouge foncé) sont situés sur ou autour de Décarie. Ceux à faible congestion et grande fiabilité (1, vert pâle) sont à l'extrémité ouest de l'Île.

En résumé, cette classification a l'avantage d'intégrer l'intensité et la fiabilité. Il faudrait étudier sa sensibilité sur une période temporelle plus grande.



**Figure 6-17 : Carte des tronçons autoroutiers par cadran d'intensité et de fiabilité de la congestion**

#### 6.4.4 Échantillon et bases de données

De façon générale, les expérimentations démontrent que la base de données GPS issue des véhicules de la compagnie d'autopartage Communauto est très riche et peut mener à la production d'un indicateur périodique de congestion. Cependant, le niveau de désagrégation demeure limité dans l'espace et dans le temps à cause de l'échantillon. En effet, on a vu que les observations reflètent les habitudes de déplacements et d'utilisation du service d'autopartage. Pour améliorer l'échantillon simplement, il faudrait augmenter le nombre de véhicules équipés du système GPS ou augmenter la fréquence de relevé des vitesses. Pour augmenter considérablement l'échantillon, on pourrait également fusionner cette base de données GPS avec une autre issue d'une toute autre parc de véhicules, tels les taxis. Avec plus de données, il pourrait être intéressant d'étendre ces analyses au-delà du réseau autoroutier, comme par exemple aux artères principales.

Dans un autre ordre d'idées, la connaissance des volumes de véhicules (ou des débits journaliers moyens) sur les liens autoroutiers pourrait permettre de tester d'autres indicateurs de congestion. Les volumes peuvent être utilisés notamment pour attribuer un poids à chaque tronçon. Sans de

tels poids, la moyenne de tous les tronçons accorde autant de poids à un tronçon peu utilisé et éloigné du centre-ville qu'à un tronçon très achalandé à proximité du centre-ville. Dans la littérature, plusieurs chercheurs utilisent le volume des liens dans la construction d'un indicateur de congestion.

#### **6.4.5 Mesures directes et facteurs d'influence**

L'autre principale limite est de ne pas pouvoir lier les mesures observées aux facteurs d'influence du phénomène mesuré. En effet, puisque les points GPS sont des mesures directes, on ne peut connaître précisément les facteurs qui les influencent. Par exemple, un chantier de construction fermant plusieurs voies sur plusieurs mois occasionne de la congestion. Or, bien que les mesures directes permettent d'observer la congestion, la méthodologie d'estimation actuelle ne permet pas d'identifier les causes de cette dernière. Ainsi, pour comparer des scénarios ou faire de la prévision, ces méthodologies ne sont pas appropriées. Pour qu'elles le deviennent, il faudrait mettre ces bases de données GPS en relation avec d'autres sur les chantiers, les incidents, les tempêtes climatologiques, les radars, les opérations de déneigement, etc. Puis, il faudrait étudier, sur une longue période les relations entre les facteurs d'influence et les mesures directes de vitesse. Ensuite, il pourrait être possible de créer des modèles de prévision.

## CHAPITRE 7 ÉQUITÉ D'ACCÈS

*« L'équité s'oppose à l'efficacité,  
la collectivité abandonne une partie de son efficacité globale  
pour améliorer le sort d'une partie de ses membres :  
c'est l'expression de la solidarité. »  
(Béguin & Zoller, 1992)*

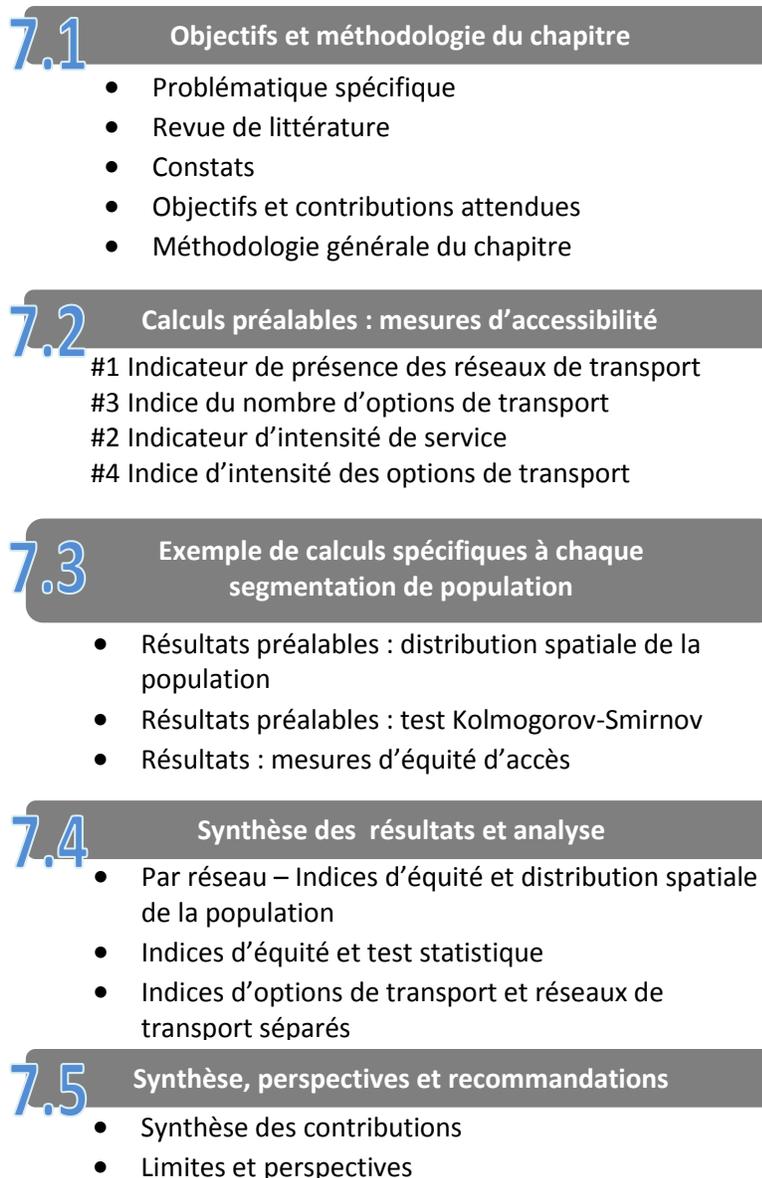
Suivant les expérimentations des chapitres 5 et 6, le présent chapitre consiste en une dernière démonstration de développement d'indicateurs appliquée à l'équité d'accès. Ce chapitre se divise en six grandes sections illustrées à la Figure 7-1. D'abord, une courte mise en contexte introduit les objectifs et la méthodologie du chapitre. Ensuite, la démarche de calcul est présentée à travers un exemple précis. Puis, une synthèse des résultats rend possible l'analyse des indicateurs d'équité proposés. Finalement, une conclusion présente les perspectives et les recommandations.

### 7.1 Objectifs et méthodologie du chapitre

Cette section présente une mise en contexte accompagnée d'un survol de la revue de littérature sur les indicateurs d'équité et d'accessibilité. Puis suivent les principaux constats issus de cette revue et, enfin, les objectifs et la méthodologie générale du chapitre.

#### 7.1.1 Problématique spécifique

En raison de l'appropriation tardive du développement durable par les acteurs sociaux et de la nature qualitative des impacts sociaux, ces derniers souffrent de lacunes conceptuelles et techniques. L'équité d'accès est un des importants impacts sociaux à étudier.



**Figure 7-1 : Structure du chapitre « Équité d'accès » (Chapitre 6)**

### **7.1.1.1 La sphère sociale, une dimension jusque-là négligée**

C'est la dimension sociale qui a pris le plus de temps à s'immiscer dans les discussions sur le concept de développement durable. Les recherches en durabilité se sont généralement concentrées sur la protection de l'environnement (Boschmann & Kwan, 2008). Cette arrivée tardive s'est également fait sentir en mobilité durable, et on assiste actuellement à la reconnaissance croissante de l'importance des impacts sociaux (Geurs et al., 2009). Dans la littérature plus générale sur les transports, la sphère sociale apparaît de façon implicite, alors

qu'elle est abordée plus explicitement dans la littérature sur les transports durables (Boschmann & Kwan, 2008). Cela se traduit notamment par un manque d'avancées sur les mesures des impacts sociaux de la mobilité, qui sont demeurés sous-exposés dans le domaine de l'évaluation des politiques de transport (Geurs et al., 2009). Toutefois, il existe certaines tentatives, notamment dans les années 1960 à 1974, de développement d'indicateurs sociaux pour contrebalancer l'influence de la quantification économique sur la décision publique (Perret, 2002).

### **7.1.1.2 Défis d'inclusion des impacts sociaux**

Plusieurs raisons sont à l'origine des lacunes touchant les impacts sociaux : à la fois les concepts et les techniques laissent place à amélioration. D'abord, les concepts théoriques liés aux impacts sociaux comportent des obstacles majeurs :

- ils peuvent prendre plusieurs formes (Geurs et al., 2009);
- l'importance qui leur est accordée est fonction de la perception (Geurs et al., 2009);
- leur définition manque de clarté (Forkenbrock, Benschhoff, & Weisbrod, 2001);
- les préoccupations varient selon l'échelle d'analyse (globale ou locale) (Boschmann & Kwan, 2008).

Ensuite, il manque de travaux alimentant des méthodes, des outils et des techniques d'estimation (Geurs et al., 2009). En ce qui a trait à la mesure, les difficultés rencontrées sont les suivantes :

- des problèmes engendrés par les lacunes des concepts théoriques;
- une précision difficile à obtenir (Geurs et al., 2009);
- des relations causales complexes (Geurs et al., 2009);
- des mesures quantitatives difficiles (Kennedy, 2002; Perret, 2002);
- des impacts à long terme (Geurs et al., 2009).

Geurs et al. (2009) recommandent de « décrire l'état de la pratique concernant les méthodes d'estimation, et [de] suggérer des types d'analyse pour mesurer ces impacts ».

### **7.1.1.3 L'équité appliquée à la mobilité**

Dans la société, un des enjeux sociaux d'importance concerne l'équité entre les individus, ou plutôt la diminution des iniquités. Baron (1999) affirme que « la ville résulte d'un processus

d'agglomération, c'est-à-dire d'une inégale répartition des hommes et des activités dans l'espace ». Une trop faible visibilité des concepts sociaux résulte en une croissance des inégalités et de la ségrégation (Maloutas, 2010). Dans la même foulée, Caubel (2007) mentionne une croissance des inégalités et une persistance de la ségrégation, qui « apparaissent non seulement sur le marché de l'emploi, sur les conditions de réussite scolaire et de constitution d'un capital humain, mais aussi plus généralement sur les potentialités urbaines ». Il souligne également qu'en vue d'une meilleure cohésion sociale, le droit au transport et à la chance pour tous d'accéder aux ressources de la ville doivent être développés (Caubel, 2007). Selon Boschmann & Kwan (2008), il est possible de créer un environnement plus humain et viable en maximisant l'accès et la mobilité à travers les groupes sociaux. L'objectif ultime de l'équité en transport est de fournir un accès égal aux opportunités économiques et sociales en offrant des niveaux équitables d'accès aux lieux (Sanchez, Stolz, & Ma, 2003).

Feitelson (2002), qui se positionne sur l'équité environnementale en particulier, conclut que l'enjeu prédominant est l'intégration de l'équité au discours sur la mobilité durable. Rappelons que la notion d'équité est intrinsèque à la définition de développement durable issue du rapport Brundtland (CMED, 1987). Sanchez, Stolz, & Ma (2003) recommandent, entre autres, d'encourager les études portant sur l'impact des projets de transport sur l'équité sociale, ainsi que d'intégrer des mesures évaluant si les décisions et leurs impacts sont équitables.

L'équité peut être abordée sous des angles variés dans le domaine des transports :

- distribution des investissements économiques collectifs et individuels (Szeto & Lo, 2006) et caractère abordable des coûts de déplacement (Raux & Souche, 2001);
- distribution des impacts négatifs de la mobilité, notamment l'exposition aux polluants de l'air, au bruit et aux risques d'accidents (Bullard, Johnson, & Torres, 2004; Feitelson, 2002; Schweitzer & Stephenson, 2007; Schweitzer & Valenzuela, 2004);
- distribution de l'accessibilité et exclusion sociale résultant de l'inaccessibilité (Preston & Rajé, 2007);
- distribution des bénéfices économiques reliés à une augmentation d'accessibilité (Leck, Bekhor, & Gat, 2008), tel que la valeur des propriétés (Rodier, Abraham, Dix, & Hunt, 2010; Sanchez, 1998);

Litman & Brenman (2012) affirment que des indicateurs sur ces sujets doivent être proposés et discutés afin d'en tirer une meilleure compréhension des phénomènes et des pratiques d'évaluation cohérentes. Ce chapitre se penche uniquement sur l'équité d'accessibilité.

## 7.1.2 Revue de littérature sur l'équité

Cette revue de littérature est non exhaustive et constitue un rappel des définitions d'équité, d'accès et d'équité d'accès, ainsi qu'une recension des principaux indicateurs qui y sont reliés.

### 7.1.2.1 Définitions

#### 7.1.2.1.1 *Équité sociale*

Le terme « justice sociale » est également utilisé pour désigner l'équité sociale. Selon Litman (2013), l'équité réfère à la distribution des impacts (coûts et bénéfiques) et au caractère juste et approprié de cette distribution. Il s'agit de traiter les différences entre les groupes de population et de les évaluer en termes d'injustice sociale (Geurs et al., 2009). Bonnafous & Masson (2003) affirment que « le souci de justice est relatif à la façon dont sont distribués entre les individus les avantages et les charges associés aux différents états de l'économie de manière à ce que chacun ait « son dû ». »

Comme pour la congestion, l'équité est un phénomène en partie subjectif. Geurs et al. (2009) insistent donc sur la distinction entre la différence sociale, à caractère objectif que l'analyste tente de découvrir, et l'injustice sociale, à caractère subjectif, avec lequel le décideur attache une étiquette d'injustice à une différence sociale (Geurs et al., 2009).

Les chercheurs abordent souvent l'équité à l'aide de concepts sous-jacents. L'**exclusion sociale** est la situation dans laquelle certains membres de la société sont, ou deviennent, séparés de la majorité considérée normale (R. J. Johnston, Gregory, Pratt, & Watts, 2000 dans Boschmann & Kwan, 2008). Preston & Rajé (2007) affirment que des contraintes causent la non-participation individuelle ou en groupe aux activités normales de la société. Exclusion sociale est antonyme d'**inclusion sociale**, soit le processus qui encourage la participation à la société civile (Preston & Rajé, 2007). Selon ces auteurs, la participation à la société civile est déterminée par l'accès au travail, à l'éducation, aux services de santé, aux commerces, aux infrastructures de loisirs, aux finances et aux logements, mais aussi par les liens familiaux et organisationnels. Van Wee & Geurs (2011) rappellent qu'il manque de travaux sur l'exclusion sociale causée par un manque d'accessibilité.

Quant à l'**égalité**, elle fait référence à une distribution égale pour des individus qui ont tous des besoins égaux. Puisque l'espace, de part sa nature, est divisé entre le centre et la périphérie, tous les points d'un plan ne peuvent être équidistants aux opportunités; l'inégalité d'accès est donc inévitable (Martens et al., 2012). L'égalité se distingue ainsi de l'équité sociale, laquelle fait plutôt appel à une impartialité de la distribution où tous n'ont pas des besoins égaux (Boschmann & Kwan, 2008);

La **qualité de vie** est une situation déterminée par la satisfaction des besoins importants des individus (Steg & Gifford, 2005). Selon Boschmann & Kwann (2008), cela inclut l'égalité d'accès aux opportunités, la capacité de trouver un emploi et avoir assez de temps de loisir;

L'**équité horizontale** réfère au traitement égal des personnes aux positions inégales. Cela met de l'avant le principe d'utilisateurs-payeurs, soit que les individus reçoivent et utilisent ce pour quoi ils paient (Boschmann & Kwan, 2008);

L'**équité verticale** s'appuie sur le fait que les personnes les plus désavantagées devraient recevoir les plus grands bénéfices, et ce au plus bas coût (Boschmann & Kwan, 2008). Cela recoupe le concept d'inclusion sociale. Litman (2013) distingue deux types d'éléments qui peuvent représenter un désavantage, soit (1) le revenu et la classe sociale, et (2) les besoins et les capacités.

Preston & Rajé (2007) soulignent qu'il y a un manque de consensus sur la signification de l'exclusion sociale, mais cela vaut tout autant pour l'équité et les autres concepts sous-jacents. Boschmann & Kwann (2008) rapportent également une ambiguïté autour de ces concepts. Ces problématiques d'ambiguïté et de subjectivité rejoignent étonnamment celles faites sur le développement durable et les impacts sociaux en général. Elles constituent donc autant de défis à relever lors du développement d'indicateurs mesurant l'équité d'accès.

#### *7.1.2.1.2 Accessibilité*

Puisque ce chapitre se penche sur l'équité d'accès, il est nécessaire de définir également la notion d'accessibilité. L'accès est un pré-requis essentiel à la pleine participation à la société ainsi qu'à la satisfaction des opportunités de vie (Martens et al., 2012). Le territoire est en fait un espace d'opportunités offrant des équipements et des services. Il est également le lieu de rencontre de

populations différentes ayant divers rythmes et mobilités (Bailly & Heurgon, 2001 dans Caubel, 2007).

Comme pour l'équité, l'accessibilité n'a pas de définition commune, en raison de son caractère subjectif. Dalvi & Marin (1976) proposent celle-ci : la facilité avec laquelle une activité donnée peut être atteinte à partir d'un lieu d'origine et à l'aide d'un système de transport particulier. Reprenons également une définition proposée par Van Wee & Geurs (2011) : l'accessibilité est la mesure qui rend compte du fait que l'occupation du sol et les systèmes de transport permettent aux individus d'atteindre les activités ou les destinations par le biais d'une combinaison de modes de transport. Quoi qu'il en soit, l'aspect spatial est très important dans la notion d'équité d'accès. Preston & Rajé (2007) soulignent que l'exclusion sociale a des manifestations spatiales importantes.

Geurs & Ritsema van Eck (2001) résumant les mesures d'accessibilité en trois perspectives : (1) basée sur les infrastructures, (2) basée sur les activités et (3) basée sur l'utilité. Également, les mesures peuvent être abordées en fonction :

- 1- du lieu : consiste à identifier les interactions potentielles entre les places ou l'importance relative d'un lieu selon un paquet d'opportunités (Boschmann & Kwan, 2008);
- 2- de l'individu : mesure la disponibilité des opportunités offertes à un individu dans un contexte spatial et temporel, selon ses contraintes personnelles et selon le contexte géographique ((Boschmann & Kwan, 2008).

Enfin, l'accessibilité est fonction à la fois de l'aménagement (occupation du sol) et des performances des systèmes de transport (Bonnaïfous & Masson, 2003). La possibilité de déplacement d'un individu dépend certes de ses propres caractéristiques (âge, statut, handicaps, habitudes, etc.), mais elle dépend également des moyens de transport auxquels il a accès (qualité de l'offre de transport) ainsi que des lieux et des institutions que ces moyens de transport lui permettent d'atteindre (opportunités). L'accessibilité est un critère particulièrement bien approprié pour évaluer les services fournis par le système de transport aux différentes catégories d'utilisateurs (Bonnaïfous & Masson, 2003).

### 7.1.2.2 Méthodes d'estimation courantes pour l'équité

Cette section résume différentes analyses et expérimentations ayant trait au développement d'indicateurs d'équité d'accès.

#### 7.1.2.2.1 Identification des activités à atteindre

La **notion de panier de biens** sert à concrétiser les besoins des individus. Il s'agit d'un ensemble de biens et de services qui correspondent aux besoins de base des individus. Il est à noter que l'ensemble des individus peut exprimer les mêmes besoins sans toutefois accéder aux mêmes types de biens ou de services. L'accès à un panier de biens devrait donc être unique pour tous (Caubel, 2007). Également, chaque individu n'a pas les mêmes besoins d'accès pour satisfaire ses besoins de participation à la société et ses « opportunités de vie » (Martens et al., 2012). Il peut donc être juste que des personnes différentes expérimentent des niveaux d'accès différents, en autant que ces disparités s'apparentent aux différences dans les besoins sociaux (Sen, 1973 dans Martens et al., 2012).

Plusieurs indicateurs d'équité utilisent la notion de « panier de biens » pour identifier les activités à atteindre. Parfois, les activités étudiées sont très variées : biens, services, loisirs, soins de santé, etc. (Rodier et al., 2010; Preston & Rajé, 2007; Caubel, 2007). Parfois, les chercheurs ne considèrent que l'emploi (Johnston & Gao, 2009; Sanchez, 1998).

#### 7.1.2.2.2 Mesure de la facilité à atteindre ces activités

La facilité d'atteindre les activités ou les zones étudiées est parfois estimée d'après la distance ou le temps de parcours (Sanchez, 1998). Certaines mesures sont basées sur ce temps, comme le nombre d'activités pour un temps de trajet donné (Johnston & Gao, 2009; Caubel, 2007) ou le coût de transport généralisé. Ces mesures sont souvent calculées de manière agrégée, soit entre les centroïdes de zones (Rodier et al., 2010). L'indice de Hansen demeure une façon courante d'estimer l'accessibilité. L'accessibilité  $A$  de la zone d'origine  $i$  est basée sur un nombre de destinations pondérées par la fonction de résistance liée au déplacement :

$A_i = \sum_j D_j e^{-\beta c_{ij}}$  où  $D$  est la somme des attractions de la zone de destination  $j$  et  $\beta$  est la sensibilité du trafic au coût  $c_{ij}$ . Un exemple d'attraction  $D_j$  est l'emploi.

Enfin, les modes de transport pris en compte pour ces mesures d'accessibilité sont très majoritairement l'automobile et, moins souvent, le transport en commun (Johnston & Gao, 2009; Sanchez, 1998; Caubel, 2007). Rodier et al., 2010 tiennent compte de la congestion.

Le Surface Transportation Policy Project (STPP, 2001) utilise un indicateur basé sur l'offre de transport plutôt que sur les opportunités. Le ratio de choix de transport, par une division, compare l'offre de transport en commun à l'offre routière pour une région métropolitaine. Un ratio faible indique que le réseau de routes principales est bien plus présent que celui de transport en commun, inversement pour un ratio élevé.

#### *7.1.2.2.3 Approche comparative*

Dans bien des cas, l'analyse sur l'équité se fait en comparant les mesures d'accessibilité. Deux perspectives sont généralement adoptées :

- une perspective spatiale, visant à comparer les différences d'accès entre les zones d'un territoire donné (Bonnafous & Masson, 2003; Caubel, 2007; Golub & Martens, 2013; Leck et al., 2008);
- une perspective populationnelle, comparant les différences d'accès entre les groupes socio-économiques (Caubel, 2007; Golub & Martens, 2013; Rodier et al., 2010).

Le revenu et la motorisation sont des segmentations de population souvent utilisées (Caubel, 2007). Johnston & Gao, 2009 utilisent également la taille des ménages. Rodier et al. (2010) segmentent également par types d'emploi.

Les individus dépendants du transport en commun sont souvent mentionnés comme étant les jeunes, les personnes âgées, les pauvres ou ceux qui ne peuvent pas conduire. Jiao & Dillivan (2013) constatent que ces groupes s'entrecroisent et que les additionner créerait un double comptage de certains individus. La population dépendante du transport en commun est donc estimée de cette façon : le nombre de personnes possédant un permis de conduire dans les ménages moins le nombre de véhicules disponibles, additionné des personnes âgées entre 12 et 15 ans et des individus vivant en collectivité (non-institutionnalisés). Ceci permet de centrer les analyses sur les individus qui n'ont pas accès à l'automobile plutôt que sur la raison pour laquelle ils n'y ont pas accès.

#### 7.1.2.2.4 Deux conceptions générales de l'équité

Finalement, il est possible de présenter deux principales conceptions de l'équité qui influencent les tentatives de sa mesure et la façon d'interpréter les résultats sur les mesures d'accessibilité : la perspective utilitariste et celle égalitariste.

La **perspective utilitariste** recherche le plus grand bonheur pour le plus grand nombre (Raux & Souche, 2001). Elle est basée sur l'Analyse Bénéfices-Coûts traditionnelle (Van Wee & Geurs, 2011). Le principe de base est de maximiser le surplus global de productivité (Bonnafous & Masson, 2003), soit maximiser l'utilité agrégée qui est la somme des utilités individuelles et dans laquelle tous les individus ont la même importance. L'objectif est l'efficacité. Le surplus économique  $\Delta S$  entre un projet et la situation de référence est basé sur la variation des recettes ( $\Delta R$ ), la variation des coûts de réalisation du projet ( $\Delta C$ ) et la variation du surplus des usagers ( $\Delta S_i$ ) :

$$\Delta S = \Delta R + \Delta C + \sum_i \Delta S_i \quad \text{où} \quad \Delta S_i \cong \sum_i (-T_{ij} \Delta c_{ij})$$

$T$  représente le trafic et  $\Delta c_{ij}$  les baisses des coûts de transport engendrés par d'importants trafics. La question est donc de réussir à intégrer la notion d'accessibilité dans cette formule de surplus économique. Par défaut, ces principes proposent des investissements d'offre de transport qui sont peu compatibles avec un souci d'équité, car ils se moquent des inégalités pouvant survenir dans les distributions des utilités individuelles.

La **perspective égalitariste** émane des théories de Rawls (1971). Cette conception égalitariste se base sur le fait que les individus supportent le même coût généralisé de transport pour satisfaire les mêmes besoins de déplacement. Rawls (1971) segmente en trois sous-concepts celui de justice sociale :

1. base identique pour tous. On doit souscrire à un principe de liberté de base pour tous. Il existe un seuil minimal (ou maximal) auquel tous ont droit. Il s'agit de favoriser la mobilité pour tous;
2. égalité des chances. Les inégalités sociales et économiques sont attachées à des fonctions et à des positions ouvertes à tous. Cela fait référence à l'équité horizontale et au principe d'utilisateur-payeur. Il s'agit de favoriser également la mobilité pour des personnes semblables;

3. exclusion sociale. Les plus désavantagés peuvent tirer le plus grand bénéfice attendu des inégalités sociales et économiques. Cela fait référence au premier énoncé du principe de différence dans l'équité verticale et de la lutte contre l'exclusion sociale. Il s'agit de favoriser la mobilité des personnes désavantagées socialement.

Bonnafous & Masson (2003) estiment nécessaire de « dépasser la conception égalitariste de l'équité », car celle-ci implique des « coûts exorbitants pour la collectivité » et une détérioration pour le plus grand nombre. Il découle de ces sous-concepts quatre principes de distribution : maximiser les niveaux d'accès moyen, maximiser le niveau d'accès moyen avec la contrainte d'un seuil minimum, maximiser le niveau d'accès moyen avec la contrainte d'une fourchette de valeurs définies et maximiser le plus faible niveau d'accès (Martens et al., 2012).

### **7.1.2.3 Exemples de méthodologies d'estimation se démarquant**

#### *7.1.2.3.1 Identification des lacunes dans le transport en commun*

Jiao & Dillivan (2013) utilisent les systèmes d'information géographiques (SIG) pour développer une méthode de quantification de l'offre de service de transport en commun et d'identification des zones où il existe un écart entre la demande et cette offre.

La quantification de l'offre de transport en commun est déterminée pour chaque zone de recensement selon les quatre mesures suivantes :

1. le nombre d'arrêts de bus (ou autre réseau de transport);
2. le nombre de passages quotidien à chaque arrêt sur semaine;
3. le nombre de lignes;
4. la longueur des pistes cyclables et des trottoirs.

Après avoir divisé les mesures par la superficie de la zone de recensement, les auteurs utilisent un score pour standardiser et agréger les mesures qui ont différentes unités. L'indicateur final est l'écart, soit la soustraction des z-scores entre la demande et l'offre.

#### *7.1.2.3.2 Exclusion sociale*

Preston & Rajé (2007) cherchent à identifier le degré d'exclusion social. Leur prémisse est que l'exclusion sociale est due à un manque d'accès aux opportunités plutôt qu'à un manque

d'opportunités sociales. Ils utilisent trois critères, chaque critère ayant un niveau (faible ou élevé) afin de définir des catégories :

- 1- niveau de mobilité de la zone, applicable pour la région (mobilité régionale);
- 2- niveau de mobilité des individus ou groupes d'individus (mobilité individuelle);
- 3- accessibilité globale de la région.

L'exclusion sociale survient lorsque le niveau de mobilité individuelle est faible. Les auteurs analysent ensuite quel type de population réside dans chacune des catégories.

#### 7.1.2.3.3 *Principe du maximin*

Certaines contradictions résultent de disparités spatiales d'accès. En effet, la réduction de disparités entre les zones peut en même temps détériorer la situation des zones les moins accessibles. C'est pourquoi Bonnafous & Masson (2003) proposent d'intégrer le principe du maximin, issu du troisième sous-concept de la théorie de la justice de Rawls (1971). Inspiré également de la théorie utilitariste, il consiste en la minimisation du coût d'accès maximal et en la maximisation de l'accessibilité minimale. Le projet retenu est ainsi celui qui maximise la variation du surplus où l'accessibilité est la plus faible. La formule du surplus économique serait donc modifiée en ajoutant un terme :

$$\Delta S = \Delta R + \Delta C + \sum_i \Delta S_i A_i^{-\alpha}$$

où : la variation des recettes ( $\Delta R$ ), la variation des coûts de réalisation du projet ( $\Delta C$ ) et la variation du surplus des usagers ( $\Delta S_i$ ), l'accessibilité ( $A_i$ )

où  $\alpha$  est un paramètre subjectif sensé refléter l'aversion du décideur contre l'iniquité spatiale. Une valeur nulle, qui revient à ne pas considérer le terme d'accessibilité, reflète la seule considération de l'efficacité économique. Plus la valeur de  $\alpha$  est grande, plus la formule s'approche du principe de maximin et reflète la volonté d'inclure de l'équité dans les décisions.

#### 7.1.2.3.4 *Principe du maximax*

Inspirés par les Sphères de la justice de Walzer (1983) et les principes qui découlent de la théorie de Rawls (1971), Martens et al. (2012) proposent une définition d'une distribution juste des bénéfices du transport en commun. Les biens ordinaires sont soumis aux lois du marché, à l'offre

et à la demande. Selon Walzer (1983), les biens auxquels une société attache un sens social distinct sont différents. Ils possèdent une distribution autonome propre à leur sphère.

Quant à Rawls (1971), sa théorie de la justice mène à un des principes suivants, celui du maximax : maximiser la moyenne tout en étant contraint par un écart maximal. Ainsi, Martens et al. (2012) appliquent le concept de sphère de justice (1983) et de maximax (1971) au transport en commun. Selon eux, l'écart maximum entre l'accessibilité la plus faible et la plus élevée, par mode et par zone, doit être limité de façon à maximiser l'accès moyen.

Ils affirment également qu'un programme d'investissement en transport devrait garantir que :

1. l'écart entre les zones à plus faible et à plus élevé niveau d'accès devrait demeurer à l'intérieur d'une fourchette définie;
2. l'écart entre les ménages motorisés et non-motorisés d'une même zone devrait demeurer à l'intérieur d'une fourchette définie;
3. le niveau d'accès visé est celui le plus élevé possible à travers les différentes zones et groupes de mode.

### 7.1.3 Constats issus de la revue de littérature

La revue de la littérature sur l'équité d'accès permet de faire sept constats généraux.

1. Les concepts d'équité et d'accessibilité sont dotés d'une part de subjectivité et les concepts théoriques sur lesquels ils se basent comportent des lacunes. Cela fait en sorte qu'il n'existe **ni conception ni définition communes**, ce qui complexifie la quantification.
2. Les études sur l'équité d'accès sont centrées sur deux modes de transport seulement : l'automobile et le transport en commun. Pourtant, plusieurs autres modes de transport peuvent favoriser l'accès aux opportunités. Litman & Brenman (2012) affirment que les études sur l'équité d'accès devraient s'attarder à **reconnaître la valeur de la diversité des systèmes de transport**. Ainsi, cela confirme le bienfondé d'inclure les modes de transport actifs comme la marche et le vélo, ainsi que ceux émergents comme les modes partagés.
3. Plusieurs études **se concentrent sur l'accès à l'emploi**. Or, **d'autres types d'activités** dont la réalisation est nécessaire à l'amélioration de la qualité de vie **devraient être intégrés**.

4. Les études considèrent que tous les individus ont les mêmes besoins de déplacement pour satisfaire leurs opportunités de vie. Tel que Koenig (1974 dans Bonnafous & Masson, 2003). le fait remarquer, l'additivité d'un indicateur quelconque, par exemple d'équité d'accès, suppose nécessairement qu'on considère indifféremment une unité de cet indicateur attribuée à un individu ou à un autre. Est-il possible **d'intégrer les besoins de déplacements individuels** dans la notion d'équité d'accès? Une approche désagrégée basée sur les personnes et les ménages, dont les caractéristiques et les comportements de mobilité sont conservées, offre la possibilité de réaliser une telle intégration.
5. La plupart des études sur l'équité d'accès sont **agrégées selon des zones territoriales**, auxquelles la localisation retenue est celle du centroïde et les caractéristiques socio-démographiques attribuées sont celles du recensement. Pourtant, l'offre de transport et la localisation des lieux de destinations peuvent varier considérablement à l'intérieur d'une zone. Une approche désagrégée serait plus appropriée.
6. Plutôt que de proposer un indicateur d'équité, les études sur l'équité d'accès **se limitent souvent à une comparaison d'une mesure d'accès pour différentes zones ou groupes socio-démographiques**. Est-il possible de développer un indicateur d'équité qui intègre cette comparaison à l'intérieur même de sa méthode de calcul?
7. Les études utilisent des mesures d'accès statiques (sauf celle de Jiao & Dillivan, 2013). Cela cause problème quant à la capacité de ces indicateurs à évaluer les variations temporelles de l'offre de transport.

#### 7.1.4 Objectifs et contributions attendues

Ce chapitre, par le biais d'expérimentations de développement d'un indicateur d'équité d'accès, répond à ces deux objectifs principaux :

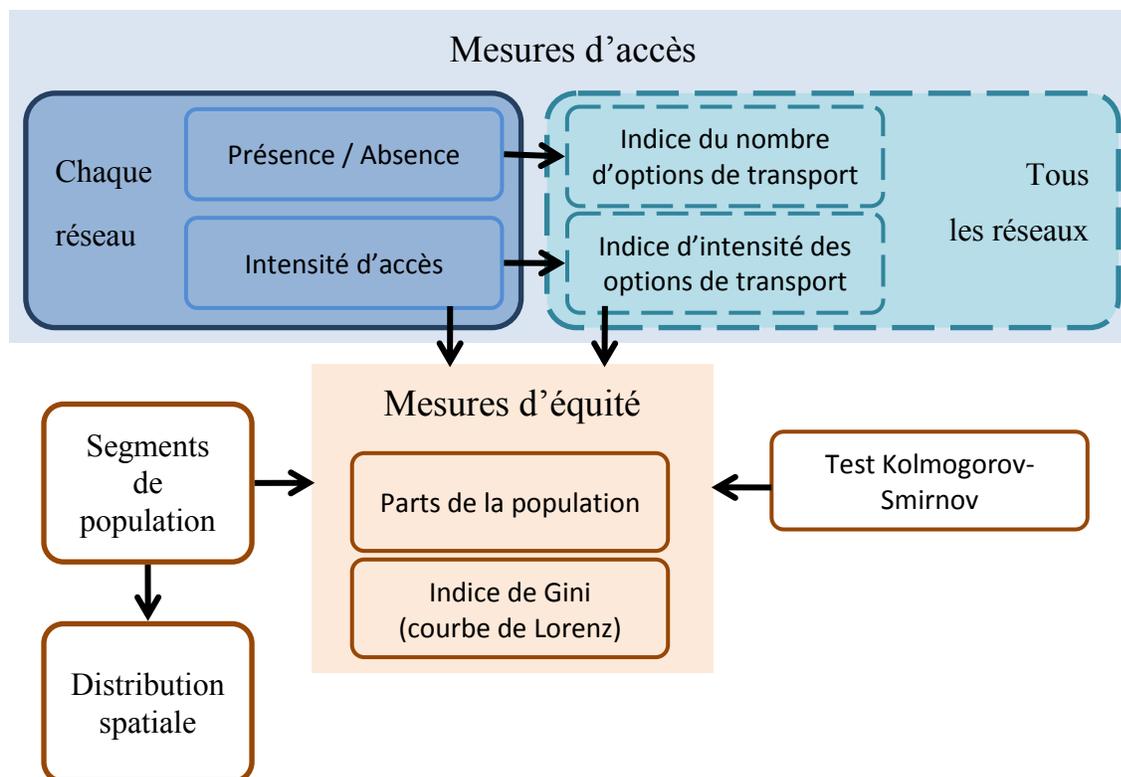
- **mesurer l'accès aux différents modes de transport**. Plus précisément, la démonstration de développement d'indicateurs d'accès dans ce chapitre vise à :
  - valoriser les données sur l'offre de transport en développant des mesures quantifiant le niveau de service;
  - favoriser des mesures du niveau de service reflétant les variations spatiales et temporelles de l'offre;
  - intégrer les modes de transport émergents, tels que les modes actifs et partagés;

- adopter une vision globale de l'offre de transport valorisant la diversité des modes de transport. Plutôt que d'analyser chaque mode de transport en silo, cette vision « cocktail transport » appuie le choix modal rationnel et approprié selon les besoins de déplacement. Dans cette optique, on cherche à développer des indicateurs intégrant tous les modes de transport simultanément;
- utiliser les mesures d'accès pour alimenter celles d'équité;
- **mesurer l'équité, soit :**
  - étudier la distribution des segments de population par rapport à l'offre de transport;
  - comparer l'accès de différents segments de population vulnérables par rapport au reste de la population;
  - tester des indicateurs d'équité appliqués à d'autres disciplines.

### **7.1.5 Méthodologie générale du chapitre**

Figure 7-2 présente la méthodologie générale. Globalement, les mesures d'accès alimentent les mesures d'équité d'accès. Deux indicateurs d'accès, appliqués à chacun des réseaux de transport, servent de base à deux indices d'options de transport. Différents segments de population permettent de réaliser les analyses sur l'équité d'accès, dont l'interprétation peut être améliorée grâce à des analyses préalables de distribution spatiale et à des tests statistiques de comparaison des distributions (Kolmogorov-Smirnov). Le territoire étudié est celui de l'Île de Montréal.

Dans cette section, les segments de population vulnérables utilisés dans les expérimentations sont définis et les données sources sont décrites.



**Figure 7-2 : Méthodologie générale sur l'équité d'accès**

### 7.1.5.1 Définition des segments de population et postulats d'équité

Tel que vu dans la revue de littérature, la recherche de l'équité appliquée à l'accessibilité et aux transports implique de fournir une offre de service qui, de façon combinée, est :

- minimale, physiquement accessible à tous;
- distribuée également au sein d'un même groupe de population;
- favorise les populations vulnérables.

L'étude de l'équité implique une comparaison de l'accès entre différents groupes de population. Bien que sujets à interprétation par l'acteur qui souhaite étudier l'équité, les segments de population étudiés doivent représenter les populations vulnérables et les différentes générations à l'intérieur de la société (groupes d'âge). Dans une optique de réduction des exclusions sociales, les groupes financièrement défavorisés – ou ceux dont les caractéristiques sont réputées être corrélées à un faible revenu – retiendront l'attention pour définir les segments de population. Également, la possession et l'utilisation automobile sont dispendieuses et dépendent de l'âge ou des aptitudes physiques. Les caractéristiques socio-démographiques représentant les contraintes

dans l'usage automobile seront utilisées pour définir les segments de population vulnérables. Selon les cas, les populations sont segmentées sur la base des personnes ou des ménages. Les détails concernant les groupes de population sont présentés dans les deux listes suivantes.

### ***Personnes***

- i. Sexe : Hommes et femmes.
- ii. Âge : 10 cohortes d'âge.
- iii. Groupes d'âge :
  - a. Adolescents âgés entre 12 et 15 ans / Autres personnes (adultes et enfants);
  - b. Enfants de 17 ans ou moins / Adultes de 18 ans ou plus;
  - c. Personnes âgées de 65 ans ou plus / Personnes de 64 ans ou moins.
- iv. Permis de conduire : Personnes détenant un permis de conduire / Personnes sans permis de conduire excluant celles qui ne peuvent en détenir un (enfants de moins de 16 ans).

### ***Ménages***

- i. Revenu : Ménages à faible revenu / Autres ménages. Un ménage à faible revenu est défini par un revenu moyen par personne inférieur à 10 000\$. Le revenu moyen par personne est estimé au maximum de la tranche de revenu du ménage divisé par la taille du ménage. Idéalement, il faudrait respecter les seuils de faible revenu par taille de ménage établis par Statistique Canada pour les RMR de 500 000 habitants et plus (Statistique Canada, 2014).
- ii. Motorisation : Ménages avec au moins un véhicule / Ménages sans véhicule.
- iii. Personnes âgées seules : Ménages d'une seule personne âgée de 65 ans ou plus / Autres ménages.
- iv. Parent seul : Ménages monoparentaux / Autres ménages. Les ménages monoparentaux se caractérisent par un seul adulte (18 ans ou plus) et au moins un enfant de 17 ans ou moins.

Suite à l'identification des segments de population étudiés, des postulats d'équité seront posés pour guider subséquemment l'analyse et les comparaisons entre segments de population. En effet, il importe de déterminer pour chaque comparaison entre segments de population si, à travers la recherche d'équité, on souhaite une égalité ou une différence de distributions d'accès aux offres de transport. Par exemple, dans le cas d'équité selon le sexe, on recherche une égalité de distribution. Dans le cas des populations non motorisées, on vise plutôt à favoriser l'accès aux

modes alternatifs de façon à réduire l'exclusion sociale. Le Tableau 7-1 résume les segments de population et montre les postulats d'équité qui leur correspondent.

**Tableau 7-1 : Segments de population étudiés et postulats d'équité correspondants**  
(√ : Population vulnérable à favoriser; = : Respecter l'égalité entre les deux populations)

PERSONNES		Postulats	Caractéristiques modales à favoriser pour la population vulnérable
<i>Population vulnérable</i>	<i>Population autre</i>		
Femmes	Hommes	=	
Enfants de 17 ans ou moins	Adultes de 18 ans ou plus	√	Non conducteur
Adolescents entre 12 et 15 ans	Autres personnes	√	Non conducteur
Adultes de 65 ans ou plus	Autres personnes	√	Non conducteur, passif
Sans permis de conduire	Avec permis de conduire	√	Non conducteur
<b>MÉNAGES</b>			
Personnes âgées seules	Autres ménages	√	Peu coûteux, passif
Monoparentaux	Autres ménages	√	Peu coûteux
Non motorisés	Motorisés	√	Peu coûteux

Pour tout le chapitre, les informations sur les personnes (permis de conduire, âge, sexe) et les ménages (taille, motorisation, lieu de domicile) sont tirées de l'EOD 2008.

### 7.1.5.2 Réseaux de transport étudiés

Rappelons que les définitions sur l'accessibilité portent sur la facilité d'atteindre les activités et la notion d'opportunités. Étant donné que les données sur les opportunités ne sont pas disponibles, il a fallu poser une hypothèse simplificatrice. Ainsi, l'hypothèse à la base des mesures d'accès subséquentes est qu'un meilleur accès aux modes de transport près du domicile facilite l'accessibilité aux opportunités. Cette hypothèse a été conservée bien qu'elle ne soit que partiellement vraie. En réalité, elle devrait être complétée par le fait que l'accès aux modes doit également être bon près de l'activité (à destination).

Le terme « réseau de transport » est utilisé et désigne un service de transport distinct offert aux résidents. Les réseaux de pistes cyclables et de vélopartage sont donc traités séparément. Les réseaux de transport considérés dans cette analyse, ainsi que les données utilisées, sont résumés dans le Tableau 7-2. Cinq réseaux de transport ont été sélectionnés, soit ceux de routes, de transport en commun, cyclable, d'autopartage et de vélopartage. Le réseau routier provient du fichier de routes du Recensement Canada. Seul le réseau supérieur a été retenu : autoroutes et

boulevards. Les réseaux des modes partagés sont fournis par les opérateurs. Le réseau cyclable est tiré de l'application libre Internet OpenStreetMap (Les contributeurs d'OpenStreetMap, 2012). Malheureusement, ce réseau comporte plusieurs liens cyclables manquants. Ces lacunes étant trop importantes à l'extérieur de l'Île de Montréal, l'étude sur l'équité d'accès a donc été restreinte à cette île. Sur l'Île de Montréal, le réseau cyclable a pu être bonifié par l'ajout des liens cyclables manquant.

Quant au réseau de transport en commun, la majorité des mesures d'accès développées sont basées sur les données General Transit Feed Specification (GTFS) de la STM. Les autres sources de données alimentent seulement les perspectives d'indicateurs que l'on retrouve à la fin du présent chapitre. Il s'agit des données GTFS pour les sociétés de transport de toute la Grande région montréalaise, ainsi qu'un calculateur de trajet basé sur l'algorithme de Dibbelt, Pajor, Strasser, & Wagner (2013).

**Tableau 7-2 : Données source utilisées pour estimer les mesures d'accès**

Réseau	Données	Source (année)
Routier	Tracés des routes, types autoroute et boulevard	Recensement Canada (2006)
Autopartage	Emplacements des stations et nombre de véhicules	Communauto (2008)
Transport en commun (TC)	GTFS des arrêts et passages aux arrêts	STM (Mai 2012) STL, STM, RTL, AMT, CIT (Novembre 2011)
	Temps de parcours entre deux points	Calculateur Google Maps API (2012)
	Surface accessible à partir d'un point	Calculateur de trajet basé sur les GTFS de la STM (Printemps 2013) et sur l'algorithme de Dibbert et al. (2013)
Cyclable	Tracés des pistes cyclables	Open Street Map (Juillet 2012) amélioré
Vélopartage	Points d'ancrage de Bixi	Ville de Montréal (19 octobre 2012)

## 7.2 Calculs préalables : Mesures d'accessibilité

Cette section énonce les concepts théoriques reliés aux mesures d'accessibilité. Elle comprend aussi les résultats pour chacune des quatre mesures d'accès. Les mesures d'accessibilité sont : la présence des réseaux de transport, l'indice du nombre d'options de transport, l'intensité de

service et l'indice d'intensité des options de transport.

Présentées au Tableau 7-3, les mesures d'accès sont estimées d'abord pour tous les réseaux de transport d'abord séparément, puis de façon agrégée afin de représenter les options de transport. Une zone tampon autour des domiciles des résidents est utilisée pour représenter la zone d'accès au réseau de transport. Le rayon utilisé pour cette zone tampon varie en fonction du réseau. Pour l'autopartage, le vélopartage et le transport en commun, il représente la distance de marche que les usagers sont prêts à parcourir pour se rendre à la station ou l'arrêt, soit respectivement 750 m, 300 m et 500 m. Pour l'autoroute, la distance de 1 km a été utilisée. L'utilisation du vélo étant un mode plus exigeant physiquement, la distance a été réduite à 500 m pour le réseau cyclable.

**Tableau 7-3 : Mesures d'accès estimées**

Mesure	Réseau et définition de la zone tampon autour du domicile				
	Routes	TC	Cyclable	Autopartage	Vélopartage
#1. Présence	1 km	500 m	500 m	750 m	300 m
#2. Intensité de service	Km réseau	Passages-arrêts en 24h	Km réseau	Véhicules-stations	Ancrages-stations
	Options de transport				
#3. Indice du nombre d'options de transport	Cumul des réseaux présents				
#4. Indice d'intensité des options de transport	Cumul des catégories d'intensité d'accès				

Au total, quatre mesures d'accès sont estimées et utilisées pour les indicateurs d'équité. Deux mesures d'accès (1 et 2) estimées pour chaque réseau de transport servent de base à deux indices agrégeant tous les réseaux (3 et 4). Ils sont tous expliqués ci-après.

### 7.2.1 Indicateur de présence des réseaux de transport (#1)

L'accessibilité à un mode de transport peut se mesurer par la présence ou non d'infrastructures reliées à ce mode de transport à proximité de l'objet étudié (personne ou ménage). Il s'agit d'une mesure statique puisqu'elle ne tient pas compte des variations d'offre de service qui peuvent survenir sur le réseau de transport étudié.

Chaque réseau de transport a sa propre distribution sur le territoire qui ne couvre pas nécessairement tous les domiciles des personnes. Tel que montré au Tableau 7-4, les réseaux de

routes (autoroutes et boulevards) et de transport collectif sont présents pour presque toute la population, desservant respectivement 97 % et 99 % de toute la population. La présence du réseau cyclable est valable pour 72 % de la population. Quant aux modes partagés, leur réseau est beaucoup moins développé et dessert moins de la moitié de la population (48 % pour l'autopartage et 28 % pour le vélopartage).

**Tableau 7-4 : Accès aux réseaux de transport aux domiciles des résidents de Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008)**

Réseau de transport	Rayon de la zone tampon autour du domicile	Présence du réseau de transport	
		Nombre de personnes	Pourcentage du total (1 854 3780 personnes)
Routes	1 000 m	1 796 000	97 %
Transport collectif	500 m	1 828 360	99 %
Cyclable	500 m	1 338 440	72 %
Autopartage	750 m	897 710	48 %
Vélopartage	300 m	514 740	28 %

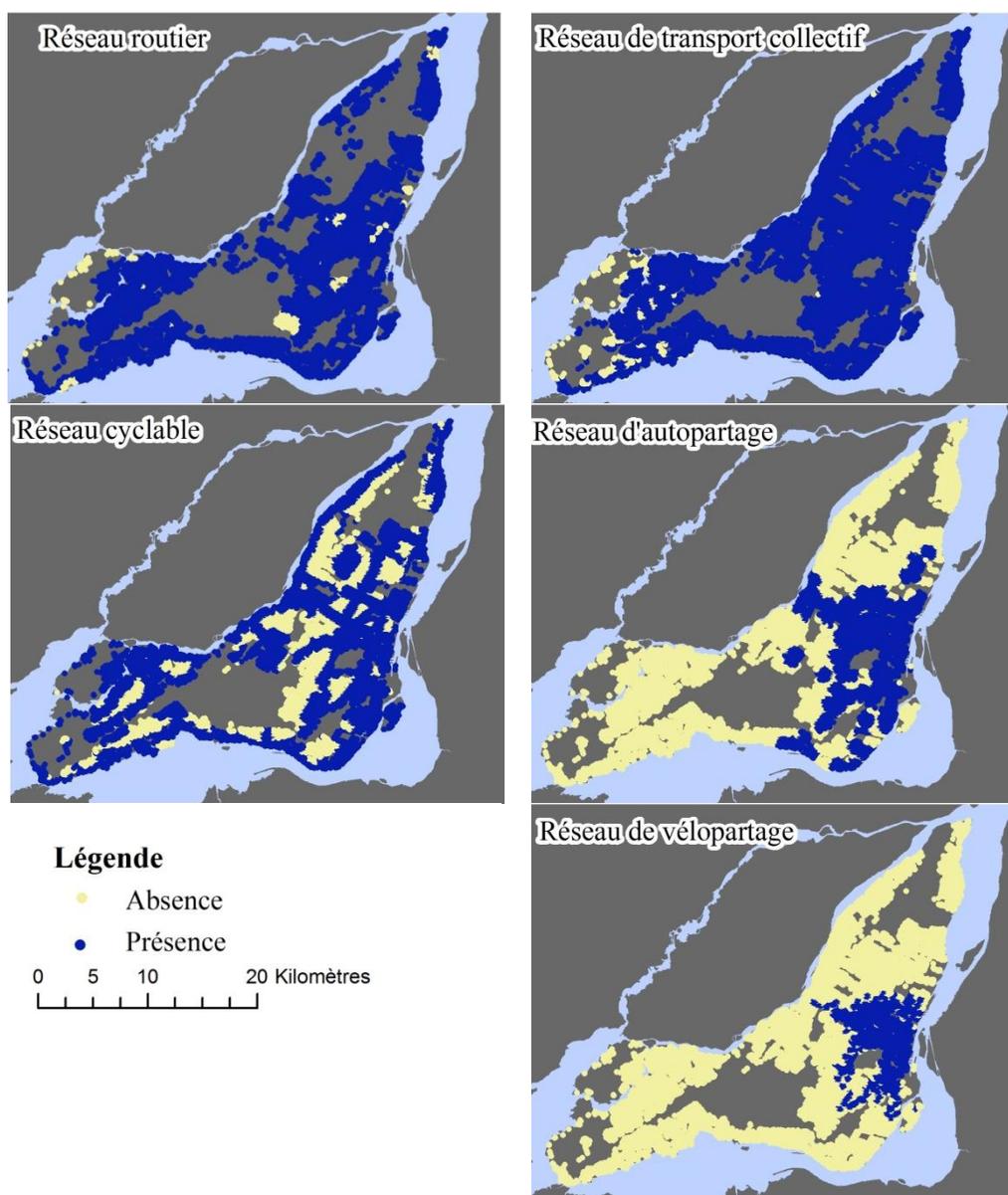
Cartographier la présence et l'absence des réseaux de transport permet de situer l'offre de transport dans l'espace. La Figure 7-3 montre que les réseaux autoroutier et de transport en commun couvrent presque entièrement les zones résidentielles. Notons que très peu d'endroits sont isolés dans le cas des autoroutes. Seuls une partie de l'Île Bizard et quelques domiciles dans l'Ouest ne sont pas desservis par le transport en commun.

Bien que tous deux concentrés dans le centre, le service de vélopartage est moins étendu que celui de l'autopartage. Quant au réseau cyclable, il semble suivre une double-logique de développement : (1) un réseau récréatif qui est situé sur le contour de l'Île de Montréal et (2) un réseau utilitaire non uniformément réparti dans les zones ouest et centre.

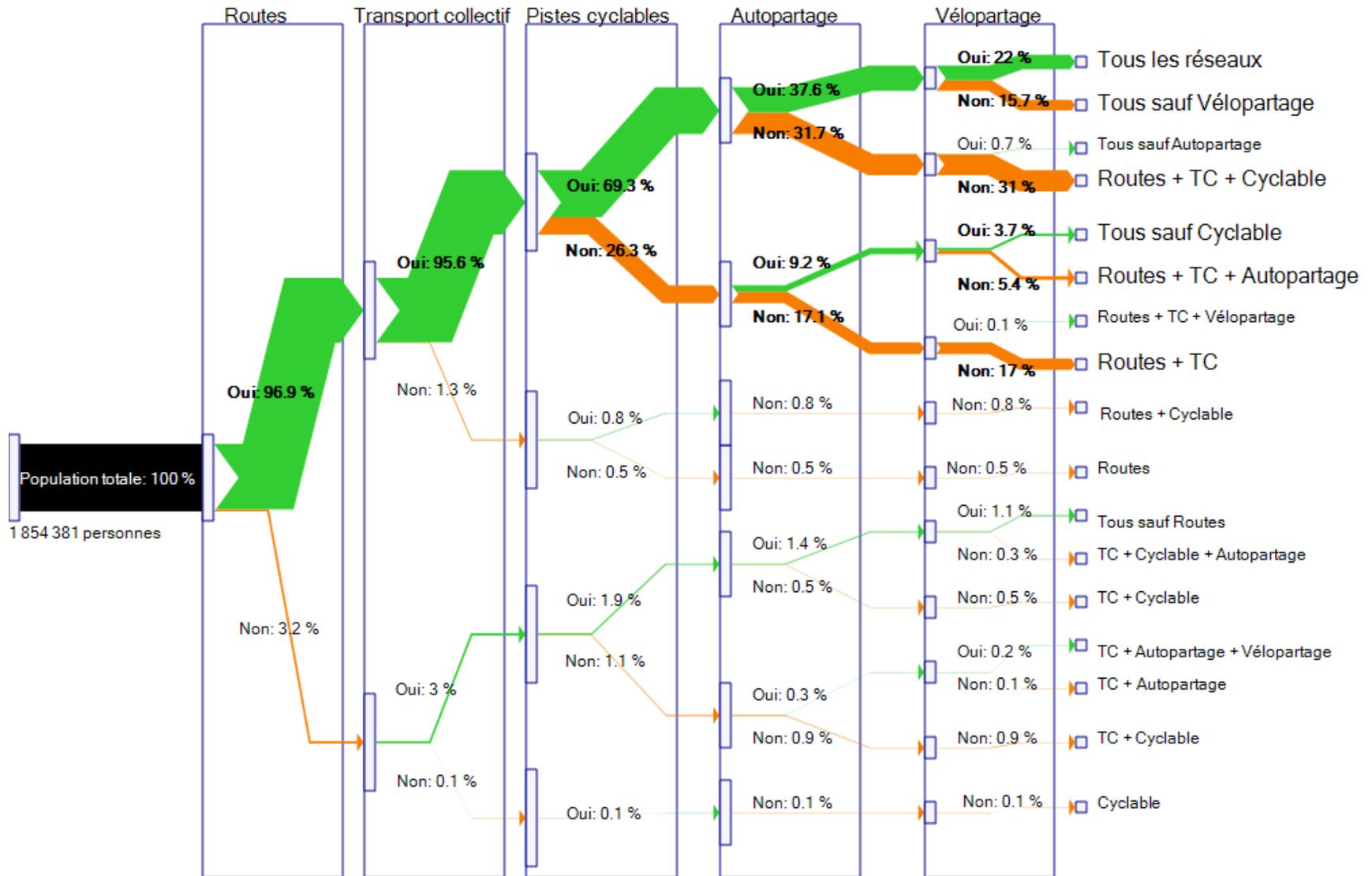
Les indicateurs de présence de tous les réseaux ont été regroupés de façon à représenter toutes les options possibles de dessertes, allant d'un seul réseau à tous, sous forme d'arborescence. Cette classification a pour objectif de quantifier la diversité des réseaux de transport. Les résultats créés à l'aide du logiciel e!Sankey (ifu Hamburg GmbH, 2013) sont illustrés à la Figure 7-4. 96 % de la population a accès aux deux réseaux de transport principaux, soit à la fois l'autoroute et le transport collectif. 17 % de la population totale a accès à ces deux réseaux seulement. Ceux qui ont accès à ces deux réseaux et au réseau cyclable comptent pour 69 % de la population. En ajoutant l'autopartage, ce pourcentage baisse à 38 % de la population. Environ 22 % de la population a accès à tous les réseaux de transport. Seuls 1 % ont accès à tous les réseaux

alternatifs à l'automobile, avec une absence du réseau autoroutier.

De façon générale, la présence du réseau de vélopartage est fortement associée à la présence de l'autopartage : 97 % des personnes ayant accès à Bixi ont aussi accès à Communauto. Également, la présence d'un mode partagé est associée à une présence plus élevée du réseau cyclable. En effet, les voies cyclables sont présentes pour 81 % et 86 % des personnes ayant accès respectivement au réseau d'autopartage et de vélopartage, plutôt que 72 % pour la population générale.



**Figure 7-3 : Cartographies de la présence de chacun des réseaux de transport aux domiciles des résidents de l'Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008)**



**Figure 7-4 : Arborescence de la présence des réseaux de transport à proximité des domiciles des résidents de l'Île de Montréal (pourcentage du total, domiciles tirés de l'EOD 2008)**

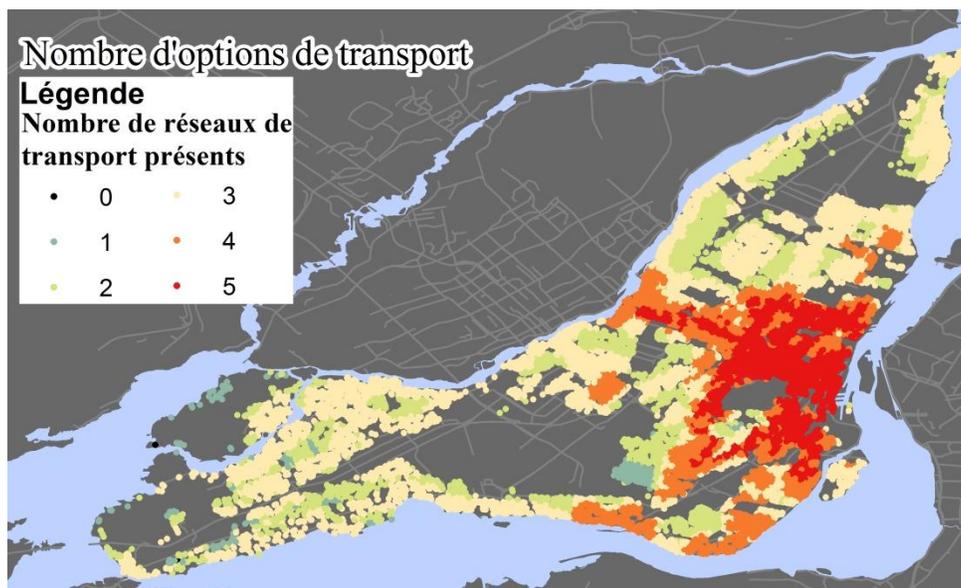
### 7.2.2 Indice du nombre d'options de transport (#3)

Le nombre d'options de transport est en fait le cumul de l'indicateur de présence présenté précédemment pour tous les réseaux. Il s'agit donc du nombre de réseaux différents  $i$  étant présents aux alentours d'un domicile  $j$  :

$$Nb\ d'options_j = \sum_i P_{ij}$$

La variable  $P_{ij}$  est nulle si le réseau  $i$  est absent aux alentours du domicile  $j$  et égale à 1 s'il y est présent.

La Figure 7-5 illustre l'indice du nombre d'options de transport, qui consiste en un cumul des cartographies de la Figure 7-5. Puisque cinq réseaux de transport sont analysés, l'indice varie de 0 (aucun réseau présent) à 5 (tous les réseaux présents). La zone centrale de l'île offre une grande diversité d'options de transport, avec des valeurs variant généralement entre 4 et 5. Les autres endroits sur l'île disposent en grande majorité de 2 à 3 options de transport. On réalise rapidement que cette carte ne reflète pas les nuances de l'offre de service. Par exemple, la présence d'un arrêt de transport en commun ne distingue pas la fréquence de passage des véhicules. C'est pourquoi l'indicateur d'intensité de service a été développé.



**Figure 7-5 : Cartographie du nombre d'options de transport aux domiciles des résidents de l'Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008)**

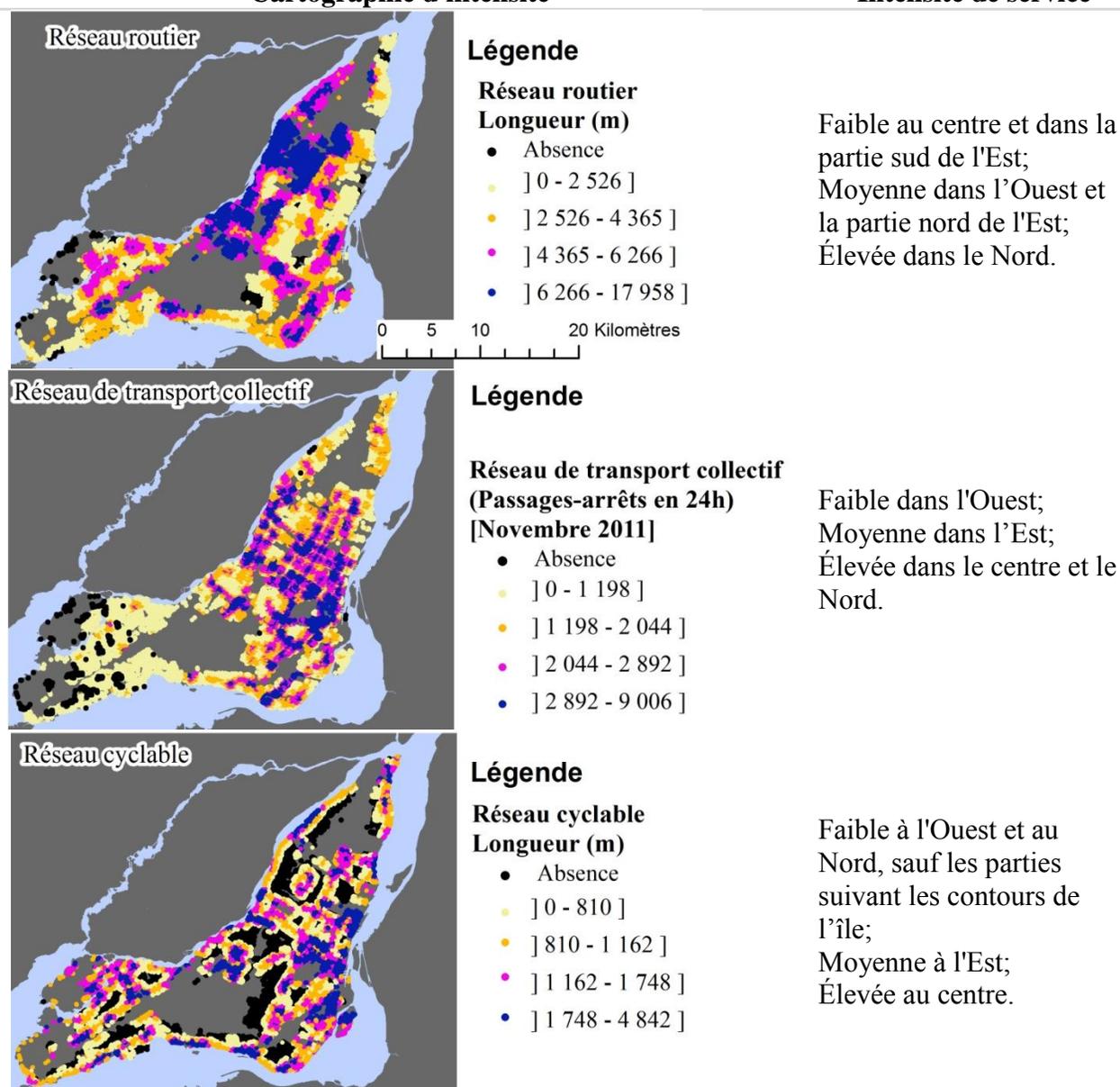
### 7.2.3 Indicateur d'intensité de service (#2)

Le second indicateur estimé pour chacun des réseaux de transport séparément est celui d'intensité de service de l'offre de transport. On cherche ici à diminuer le caractère statique et peu sensible que représente un indicateur d'accès basé uniquement sur la présence d'une infrastructure. Les méthodes d'estimation des indicateurs d'intensité d'accès et leurs unités sont uniques à chaque réseau de transport et sont résumées au Tableau 7-3. Les réseaux autoroutiers et cyclables sont représentés par la longueur des routes à l'intérieur de la zone tampon. Le transport en commun est représenté par le nombre de passages-arrêts d'autobus ou de métro dans un rayon de 500 mètres du domicile, en 24 h et sur semaine. Les modes partagés sont représentés par le nombre de véhicules (autopartage) ou de points d'ancrage (vélopartage).

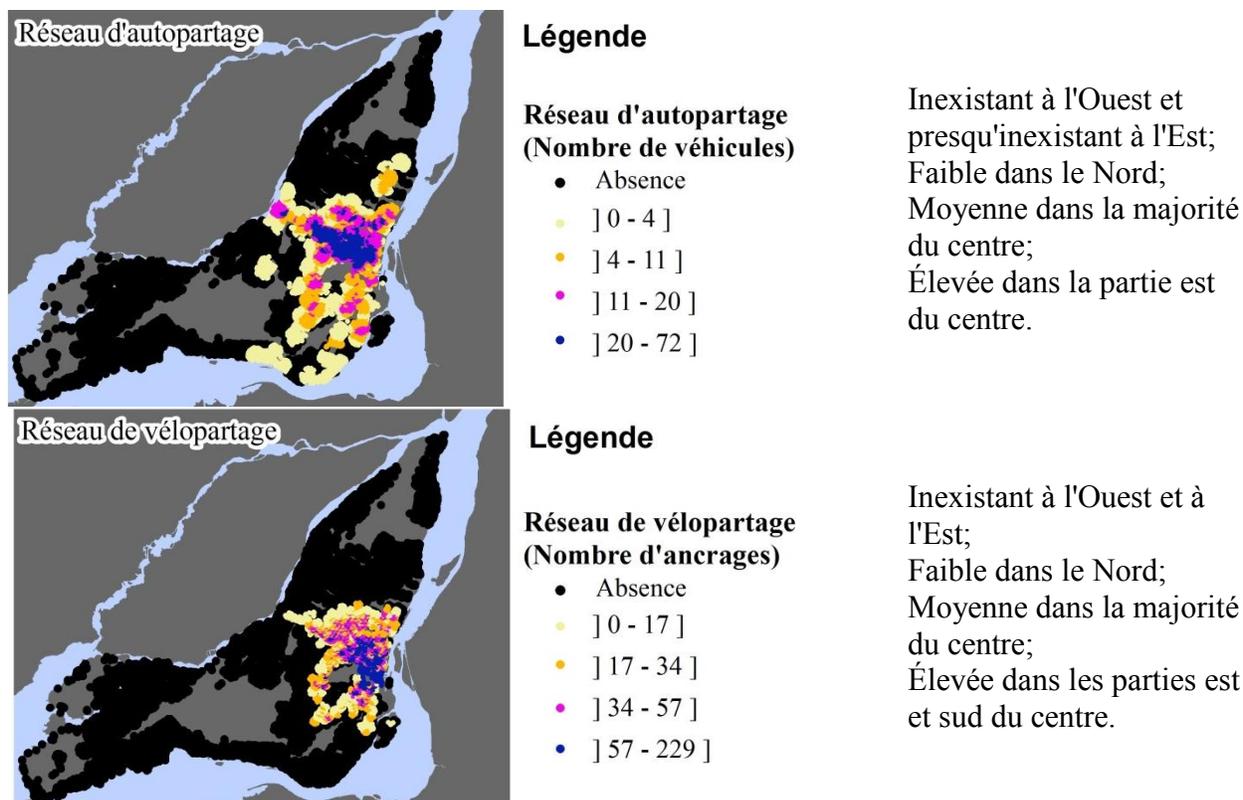
La Figure 7-6 cartographie l'intensité de service de chacun des réseaux de transport étudiés. Dans les quartiers centraux de l'île, soit les plus denses en population, on observe une intensité élevée de service des réseaux de transport, excepté pour le réseau routier. Pour ce dernier, les plus hautes densités se retrouvent dans la zone Nord alors que les plus faibles sont situées dans le centre. Les réseaux d'autopartage et de vélopartage sont distribués similairement, bien que le premier soit un peu plus développé au nord de la zone Centre et le second au sud de la zone Centre. Quant au réseau cyclable, il est très disparate, ce qui rend difficile l'identification d'une tendance spatiale. Toutefois, on peut observer qu'il semble s'intensifier le long des contours de l'île ainsi que dans certaines poches « aléatoires ». Il se peut que ce soit le résultat d'un développement qui, plutôt que de refléter la densité de population, est relié à la volonté politique locale. Finalement, le réseau de transport en commun semble mieux développé le long des artères principales du réseau routier, dans les zones Centre et Nord. La zone Ouest de l'île est visiblement délaissée.

## Cartographie d'intensité

## Intensité de service



**Figure 7-6 : Cartographie de l'intensité de service des réseaux de transport aux domiciles des résidents de l'Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008)**



**Figure 7-6 (suite): Cartographie de l'intensité de service des réseaux de transport aux domiciles des résidents de l'Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008)**

#### 7.2.4 Indice d'intensité des options de transport (#4)

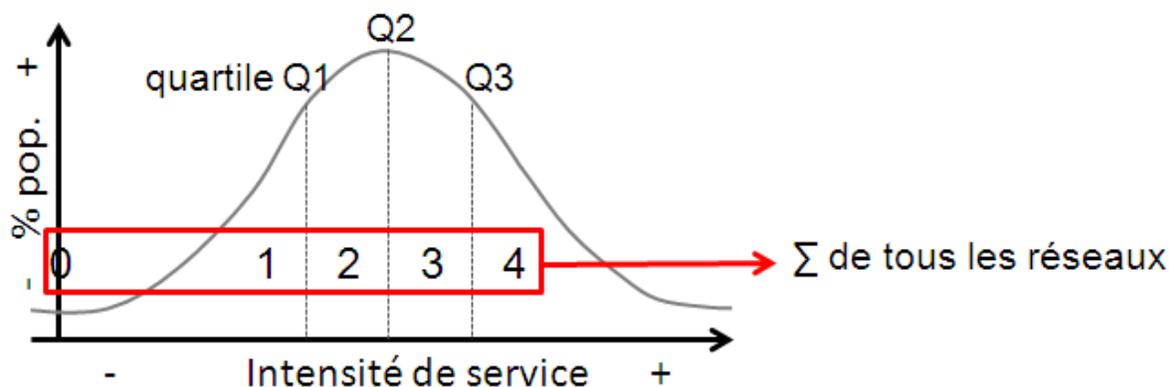
L'intensité d'options de transport est basée sur les indicateurs d'intensité de service (#3). Cependant, il n'est pas possible d'estimer cet indice à l'aide d'une simple addition de l'intensité de service des différents réseaux, et ce, en raison de leurs unités différentes. Les valeurs sont donc uniformisées en classant l'intensité parmi cinq catégories. Tel qu'illustré à la Figure 7-7, pour chaque réseau de transport, les limites de ces catégories sont basées sur les quartiles de la distribution pondérée de l'indicateur d'intensité de service. Une absence du réseau rentre dans la catégorie nulle. L'indice d'intensité d'options de transport est ensuite calculé avec la somme des catégories des réseaux différents  $i$  étant présents aux alentours d'un domicile  $j$  :

$$\text{Intensité d'options}_j = \sum_i C_{ij}$$

où les catégories  $C$  sont égales à :

- 0 : Absence du réseau  $i$ ;

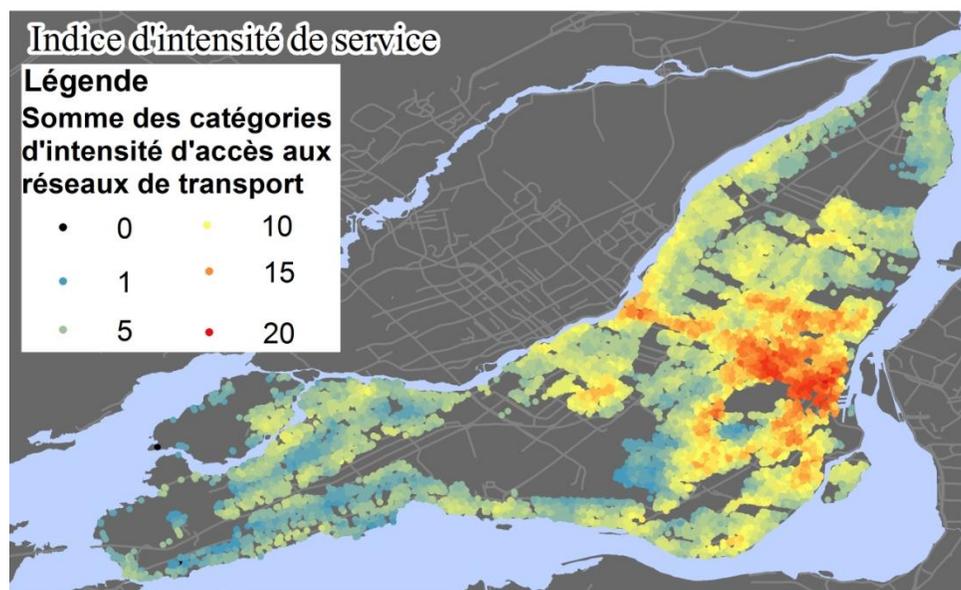
- 1 : Intensité inférieure au 1<sup>er</sup> quartile;
- 2 : Intensité entre le 1<sup>er</sup> quartile et le 2<sup>e</sup> quartile (médiane);
- 3 : Intensité entre le 2<sup>e</sup> quartile (médiane) et le 3<sup>e</sup> quartile;
- 4 : Intensité supérieure au 3<sup>e</sup> quartile.



**Figure 7-7 : Schéma explicatif des catégories d'intensité de service basées sur les quartiles**

Comme l'indicateur de nombre d'options de transport, l'intensité d'options a pour objectif de quantifier la diversité des réseaux de transport.

La Figure 7-8 illustre l'indice d'intensité des options de transport. Puisque cinq réseaux de transport sont analysés et que pour chacun la valeur maximale est 4, l'indicateur peut varier de 0 (aucun réseau présent) à 20 (tous les réseaux ont une très grande intensité de service). La partie est de la zone centrale de l'île offre une grande diversité d'options de transport, avec des valeurs plus grandes que 15. Le restant de la zone Centre, la zone Nord et la partie ouest de la zone Est ont une diversité moyenne de l'offre de transport (valeur entre 10 et 15). Les restes de la zone Est et la zone Ouest sont finalement mal desservis, avec des valeurs oscillant entre 1 et 10.



**Figure 7-8 : Cartographie de l'indice d'intensité des options de transport aux domiciles des résidents de l'Île de Montréal (domiciles tirés de l'EOD 2008)**

Cette carte est beaucoup plus nuancée que celle de l'indice du nombre d'options de transport (Figure 7-5). Toutefois, elle perd de la précision par rapport aux cartes d'intensité de service (Figure 7-6), d'abord à cause de la catégorisation qui atténue les nuances et, ensuite, parce que le cumul fait disparaître l'information concernant le mode de transport.

### **7.3 Exemple de calculs spécifiques à chaque segmentation de population**

Cette section résume la démarche liée aux indicateurs d'équité d'accès. Elle se divise en trois étapes principales : la distribution spatiale de la population, les tests statistiques de comparaison entre le groupe vulnérable et le reste de la population, et le calcul des mesures d'équité d'accès. À chaque étape, l'exemple du segment de population avec ou sans permis de conduire est utilisé pour illustrer la démarche.

#### **7.3.1 Résultats préalables : distribution spatiale de la population**

Une brève analyse des densités de population et de l'éloignement par rapport au centre-ville a été réalisée pour chaque segment de population. Celle-ci est disponible à l'Annexe E.

L'estimation de la densité de population autour des domiciles des résidents permet d'anticiper la distribution de l'offre de transport. Par exemple, les endroits les plus denses sont généralement mieux desservis par le transport en commun. Cette analyse sert également à connaître le type de voisinage, caractérisé par la densité de population, où l'on retrouve les différents segments de population. Il est proposé d'estimer une densité de population du voisinage pour chaque domicile de l'EOD, en personnes/ km<sup>2</sup>. Le voisinage est ici défini comme la zone circulaire de rayon de 1 km autour du domicile, ayant pour superficie  $\pi$  km<sup>2</sup>.

Afin d'étayer l'analyse précédente sur les densités de population, les graphes cumulés de population ont été tracés en fonction de la distance du domicile par rapport au centre-ville. Ces graphes sont montrés l'Annexe E. Les coordonnées du centre-ville utilisées sont celles de l'hôtel de ville de Montréal.

Voici un exemple de ces résultats sur la possession d'un permis de conduire. Les personnes ne possédant **pas de permis de conduire** ont un voisinage de **densité moyenne plus élevée** que celles en possédant un (7 130 contre 6 440 personnes/km<sup>2</sup>). On peut donc supposer qu'elles sont plus nombreuses à vivre dans les quartiers les plus denses, soit dans les quartiers centraux. Également, les personnes sans permis de conduire sont domiciliées plus proche du centre-ville que les autres.

### 7.3.2 Résultats préalables : test Kolmogorov-Smirnov

Il est utile de réaliser des tests statistiques de comparaison entre les groupes de population vulnérables et le reste de la population. Ces derniers serviront de base de référence lors de l'interprétation des variations des indicateurs d'équité estimés et discutés aux sections subséquentes.

Les distributions ne correspondant pas forcément à des lois normales, un test non paramétrique a été choisi : le test de comparaison de deux échantillons non paramétriques de Kolmogorov-Smirnov. Ce test repose sur l'hypothèse nulle  $H_0$  que les deux échantillons répondent à une même loi. Une valeur de p combinée (p-value combinée) proche de 0 signifie un rejet de cette hypothèse nulle et que les deux groupes testés ne peuvent être considérés identiques. Le test donne également une valeur de p associée à chacun des groupes comparés. Lorsqu'un des groupes possède une valeur nulle et l'autre groupe une valeur proche de l'unité, cela signifie que la

distribution du premier est plus faible que la distribution du second. Le premier est donc défavorisé dans son offre de transport par rapport au second.

Le test est appliqué aux intensités de service, par réseau de transport, ainsi qu'aux deux indices. Le test n'est pas appliqué aux indicateurs de présence du réseau de transport, car seulement deux valeurs sont possibles pour chaque observation (0 ou 1).

Les résultats de ce test pour tous les segments de population se trouvent à l'Annexe F. Voici la suite de l'exemple sur la possession d'un permis de conduire. Pour ce segment de population, les résultats sont répertoriés au Tableau 7-5.

**Tableau 7-5 : Exemple de résultats du test Kolmogorov-Smirnov pour chaque réseau de transport et chaque mesure d'accès (#2 à #4) (possession d'un permis de conduire)**

Réseau	Permis de conduire	Résultats individuels		Résultats combinés			K-S
		Éloignement	p-value	Éloignement	p-value	p-value corrigée	
<b>Indicateur d'intensité de service</b>							
Routes	Sans	-0,0020	0,906	0,0361	0,000	0,000	>
	Avec	0,0361	0,000				
Transport en commun	Sans	-0,0004	0,995	0,1127	0,000	0,000	>
	Avec	0,1127	0,000				
Pistes cyclables	Sans	-0,0216	0,000	0,0216	0,000	0,000	<
	Avec	0,0074	0,264				
Autopartage	Sans	-0,0007	0,989	0,0736	0,000	0,000	>
	Avec	0,0736	0,000				
Vélopartage	Sans	-0,0004	0,996	0,0414	0,000	0,000	>
	Avec	0,0414	0,000				
<b>Indice du nombre d'options de transport</b>							
	Sans	0,000	1,000	0,0601	0,000	0,000	>
	Avec	0,0601	0,000				
<b>Indice d'intensité des options de transport</b>							
	Sans	0,000	1,000	0,0803	0,000	0,000	>
	Avec	0,0803	0,000				

Les personnes sans permis de conduire sont plus éloignées du réseau de pistes cyclables, avec une p-value 0,264 pour celles avec un permis de conduire contre 0,000 pour celles sans permis. Pour tous les autres réseaux, les personnes sans permis de conduire sont légèrement mieux

desservies. Cette différence est notable dans le cas du transport en commun, en raison d'un éloignement d'une valeur assez élevée de 0,1127.

Si on intègre tous les réseaux de transport en un indice, on constate que les personnes sans permis de conduire sont avantagées dans leur niveau d'accessibilité par rapport aux autres. En effet, pour l'indice du nombre d'options de transport, la p-value est de 1 pour les personnes sans permis de conduire et de 0 pour les personnes en possédant un. Cette différence est plus marquée avec l'indice d'intensité des options de transport, car son éloignement de 0,0803 est plus grand que celui de l'indice du nombre d'options de transport (0,0601).

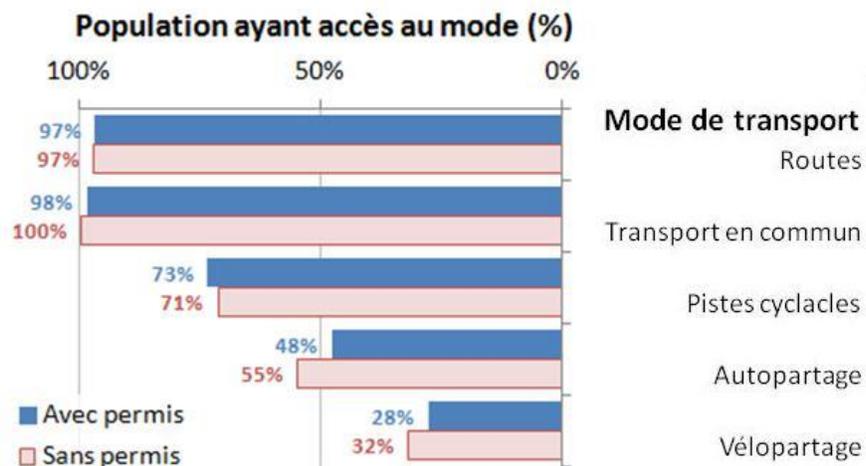
### **7.3.3 Résultats : mesures d'équité d'accès**

Lorsque possible, les mesures d'équité sont calculées à partir des quatre mesures d'accessibilité définies précédemment. Deux indicateurs d'équité sont utilisés pour la comparaison : les parts de population pour différents niveaux d'accès et l'indice de Gini. À partir de ces mesures, les différents segments de population sont comparés. Cette analyse permet d'interpréter quels groupes sont favorisés ou défavorisés, s'il y a lieu.

#### **7.3.3.1 Parts de population pour différents niveaux d'accès**

Il s'agit du pourcentage de la population qui a un accès particulier A. Il est également possible de regarder les pourcentages cumulés de la population. Cela permet notamment d'indiquer la part de la population qui a un accès minimal, faisant ainsi référence au principe de la justice sociale selon lequel un accès de base doit être fourni pour tous.

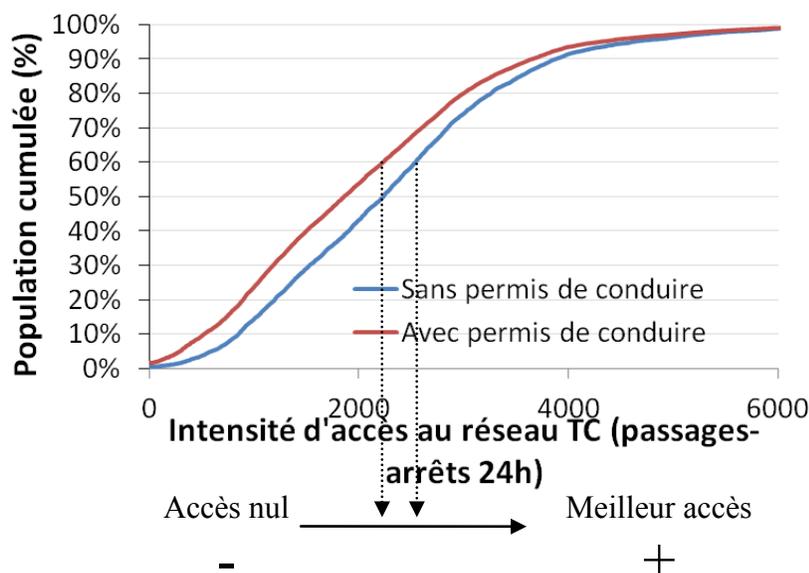
D'après la Figure 7-9, la totalité des personnes sans permis de conduire a accès au transport en commun. Les modes partagés (autopartage et vélopartage) sont plus présents chez les personnes ne possédant pas de permis de conduire (55 % et 32 %) que chez celles en possédant un (48 % et 28 %).



**Figure 7-9 : Exemple de parts de population ayant accès aux réseaux de transport (possession d'un permis de conduire)**

La Figure 7-10 représente la distribution de l'intensité de service du transport collectif pour les personnes sans permis de conduire. L'interprétation des courbes se fait ainsi :

- 50 % des personnes ne possédant pas de permis de conduire ont accès à 2 235 passages-arrêts de bus ou métro ou moins en 24 heures, contre 60 % dans le cas des personnes avec permis. Les premiers sont donc moins nombreux à avoir un plus faible accès. Plus le pourcentage augmente rapidement à des intensités basses, moins la population de ce groupe a un bon accès. Dans l'exemple, la courbe des personnes avec permis augmente plus rapidement, montrant un moins bon accès au transport en commun par rapport aux personnes sans permis de conduire.
- Si l'on regarde les 60 % des personnes les moins desservies, les personnes sans permis de conduire ont un meilleur accès avec 2 540 passages-arrêts par jour (plutôt que 2 235 passages-arrêts pour celles possédant un permis). Ainsi, pour un même pourcentage de population  $P$ , le segment de population ayant l'intensité de service la plus élevée détient un meilleur accès.



**Figure 7-10 : Exemple de distribution cumulée de la population en fonction de l'intensité de service du transport en commun (possession d'un permis de conduire)**

Ainsi, les personnes sans permis de conduire sont légèrement favorisées par rapport aux autres dans leur accès au transport en commun. Ceci reflète probablement un phénomène d'auto-sélectivité : ceux qui ne veulent pas ou ne peuvent pas se motoriser choisissent d'habiter dans une zone bien desservie par le transport en commun.

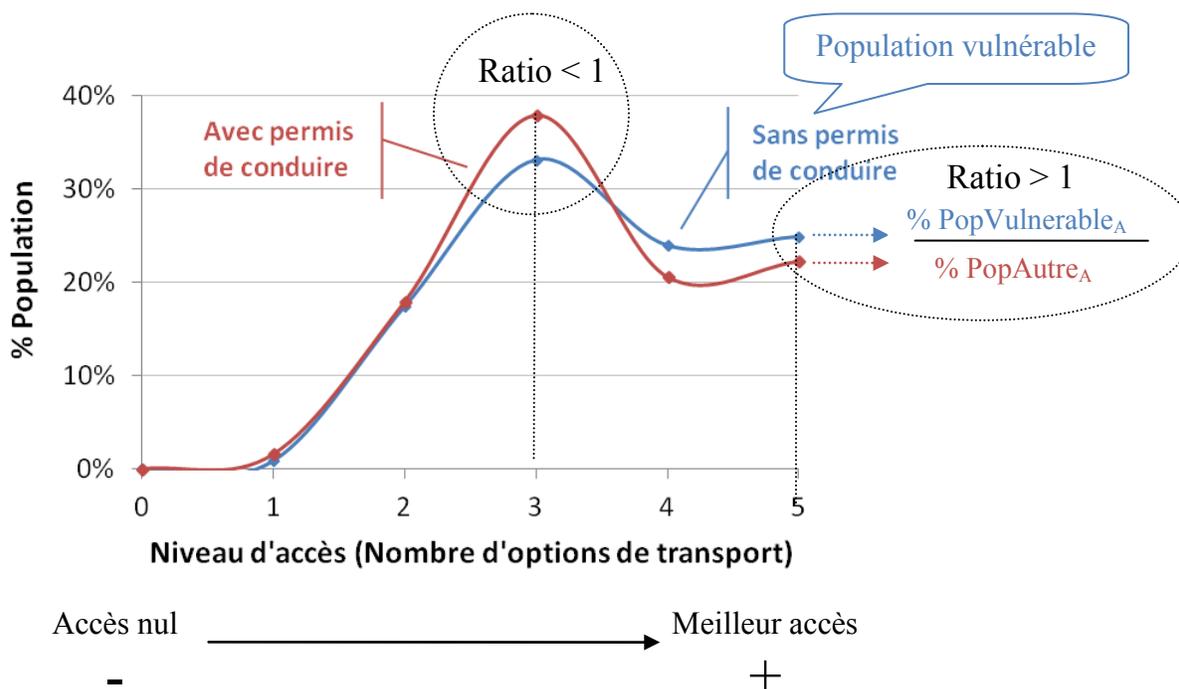
Ces graphes ont également été tracés pour chaque réseau de transport. Pour le réseau routier supérieur et de pistes cyclables, les courbes de distributions cumulées sont très similaires. Les personnes sans permis de conduire ont un léger meilleur accès à l'autopartage et au vélopartage.

Afin de faire la comparaison directement, un ratio des parts de population est calculé pour chaque niveau d'accès. Ce ratio est appliqué à chaque segment de population et aux deux indices d'accessibilité (nombre d'options de transport et intensité des options de transport) :

$$Ratio_A = \frac{\% PopVulnerable_A}{\% PopAutre_A}$$

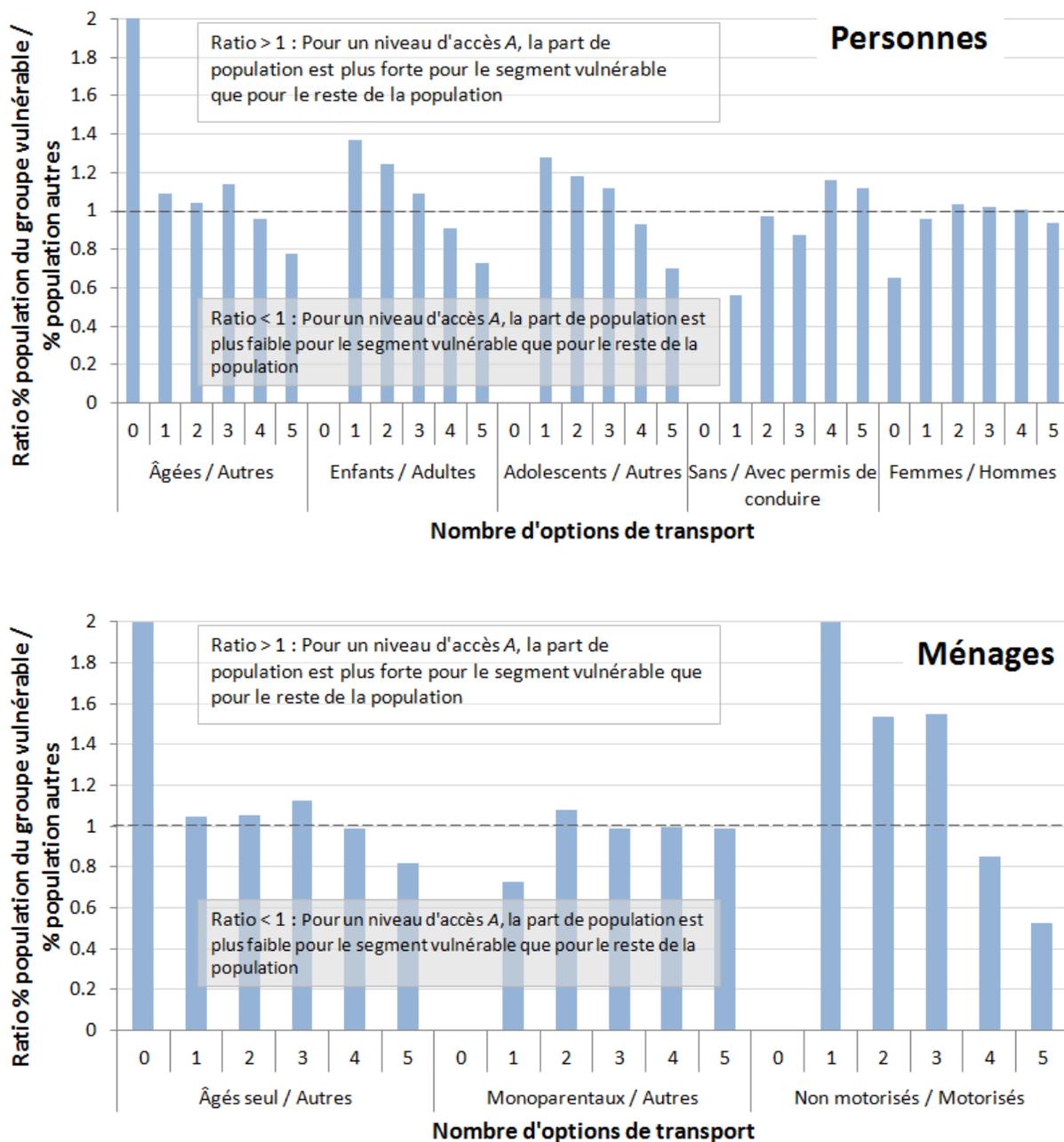
La population vulnérable *PopVulnerable* et les autres *PopAutre* ont leur propre distribution de population et un pourcentage pour chacun des niveaux d'accès A. Les valeurs du ratio permettent d'interpréter ceci :

- ratio est égal à 1 : la part de population qui a un niveau d'accès  $A$  est la même pour le segment de population vulnérable que pour le reste de la population;
- ratio supérieur à 1 : la part de population qui a un niveau d'accès  $A$  pour le segment de population vulnérable est plus grande que pour le reste de la population. Si c'est le cas pour de hauts niveaux d'accès (comme à la Figure 7-11), cela signifie que la population vulnérable bénéficie d'un meilleur accès globalement. Cela devrait s'accompagner d'un ratio inférieur à 1 pour de faibles niveaux d'accès;
- ratio inférieur à 1 amène les interprétations inverses au ratio supérieur à 1.



**Figure 7-11 : Exemple de distribution de la population selon l'indice du nombre d'options de transport (possession d'un permis de conduire)**

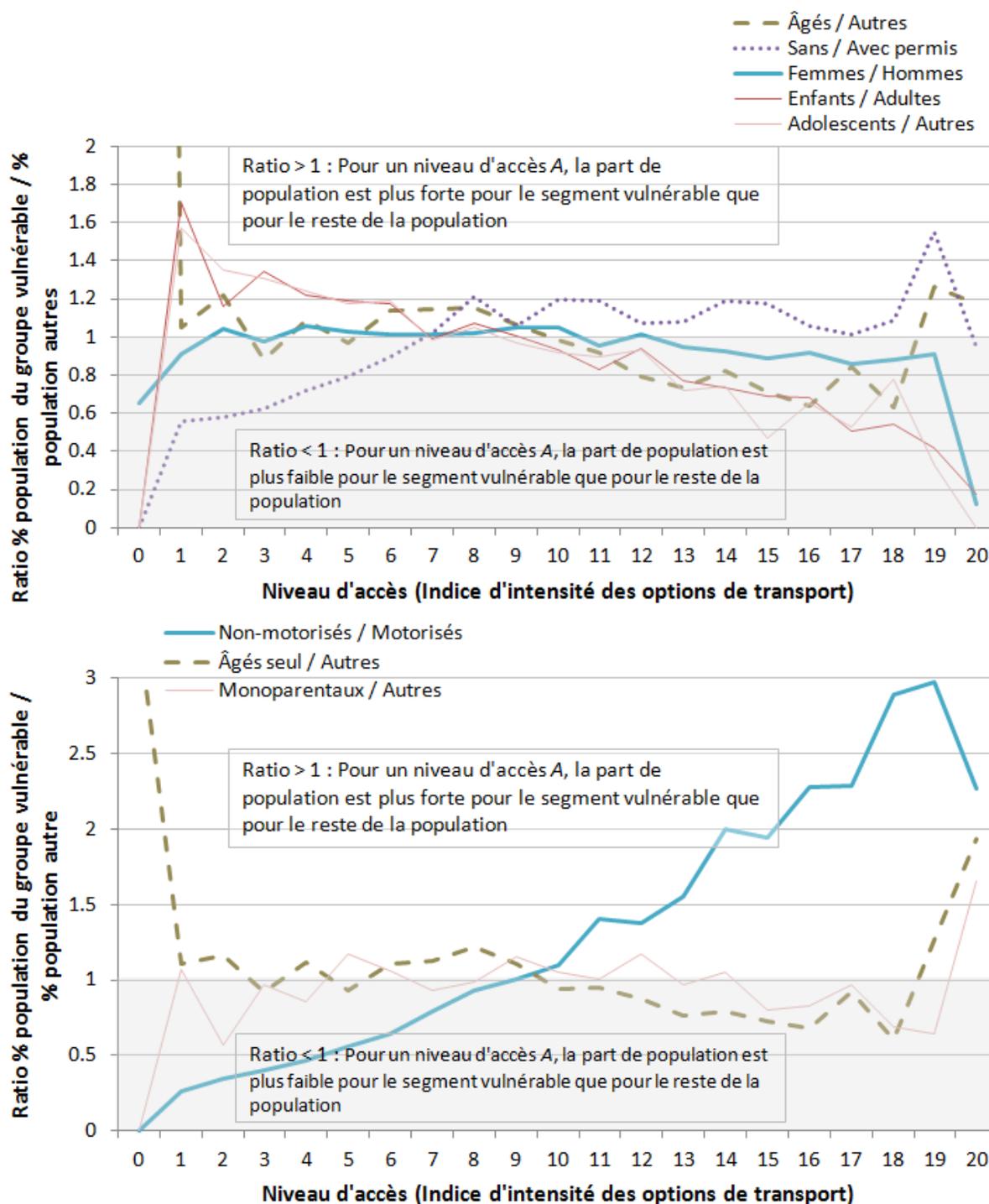
La Figure 7-12 présente ces ratios pour l'indice du nombre d'options de transport, pour chaque segment de population. Cette analyse nous permet de constater que les personnes sans permis de conduire sont sous-représentées pour un niveau d'accès faible (ratio < 1 sur la Figure 7-12) et sont en proportion plus grande pour les accès élevés (ratio > 1 pour les niveaux d'accès 4 et 5). Globalement, ils ont donc un meilleur accès aux réseaux de transport. L'analyse pour les autres segments de population est présentée à l'Annexe G.



**Figure 7-12 : Ratio des parts de population vulnérable sur les parts de population autre, selon l'indice du nombre d'options de transport**

Le ratio peut également être calculé à partir de l'indice d'intensité des options de transport, présenté selon le segment de population à la Figure 7-13. La courbe de possession d'un permis de conduire est en bleu pointillé dans le graphe supérieur. On observe les mêmes tendances que pour l'indice du nombre d'options (ratio > 1 pour des niveaux d'accès élevé). Le niveau de détail est

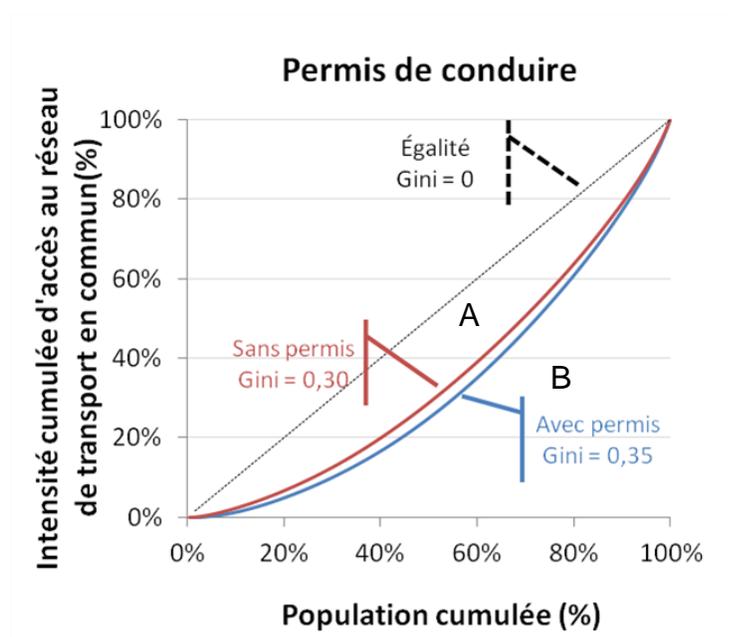
cependant plus important qu'avec l'indice du nombre d'options, et ce, grâce au plus grand nombre de classifications du niveau d'accès (21 plutôt que 5).



**Figure 7-13 : Ratio des parts de population vulnérable sur les parts de population autre, selon l'indice d'intensité des options de transport**

### 7.3.3.2 Indice de Gini et courbe de Lorenz

Traditionnellement, la courbe de Lorenz met en relation la part cumulée du revenu et la part cumulée de la population (Lorenz, 1905). Ici, le revenu a été remplacé par l'indicateur d'accès. Une distribution égale de l'offre de transport à travers la population serait représentée par une ligne droite de pente 1 (ligne d'égalité illustrée à la Figure 7-14). Moins la population est distribuée également autour de l'offre, plus la courbe de Lorenz s'éloigne de la droite.



**Figure 7-14 : Exemple sur la courbe de Lorenz et du calcul de l'indice de Gini (intensité de service du transport en commun, personnes avec ou sans permis de conduire)**

L'indice de Gini est calculé à partir d'aires tirées de la courbe de Lorenz (Lerman & Yitzhaki, 1984). Il s'agit de diviser l'aire entre la ligne d'égalité et la courbe de Lorenz avec l'aire sous la ligne d'égalité.

$$\text{Indice Gini} = \frac{A}{A + B}$$

Les valeurs de l'indice permettent d'interpréter ceci :

- valeur nulle : distribution égalitaire à l'intérieur d'un segment de population;
- valeur proche de 1 : distribution inégalitaire d'un segment de population.

En traçant les courbes de Lorenz et en estimant l'indice de Gini pour les différents segments de population, il sera possible :

- pour un segment de population en particulier, de savoir s'il est distribué également autour de l'offre. Cette analyse fait référence au concept d'égalité des chances à l'intérieur d'un même groupe social;
- pour deux segments de population, de savoir lequel est le mieux distribué autour de l'offre. Un indice de Gini plus grand indique que ce segment est moins bien distribué autour de l'offre par rapport à l'autre segment.

Prenons l'exemple de la possession d'un permis de conduire, dont les résultats sont présentés au Tableau 7-6. Ceux pour toutes les segmentations de la population se trouvent à l'Annexe G. Selon les analyses de l'indicateur d'intensité de service pour chaque réseau de transport, les personnes sans permis de conduire sont mieux distribuées autour des réseaux (ratio < 1), sauf pour ceux de routes et de pistes cyclables (ratio >= 1).

L'indice de Gini appliqué à chacun des indices d'accès agrégeant les réseaux donne des résultats contradictoires. Pour l'indice du nombre d'options de transport, l'indice de Gini est pratiquement identique (0,001 de différence) et laisse entendre que les personnes sans permis ont un moins bon accès global que celles avec permis (ratio > 1). À l'inverse, l'indice de Gini basé sur l'indice des intensités d'options de transport affiche un ratio inférieur à 1, soit que les personnes sans permis sont favorisées dans leur accès aux réseaux de transport. Ce dernier est plus cohérent avec l'analyse par réseau de transport.

**Tableau 7-6 : Indice de Gini pour les intensités de service, par groupe de population vulnérable (Gris : Vulnérables moins également distribués que les autres; Gras : Inverse)**

<i>(Population vulnérable en italique)</i>	Routes	TC	Cyclable	Autopartage	Vélopartage
<b>Indicateur d'intensité de service</b>					
<i>Sans permis de conduire</i>	0,34	0,30	0,56	0,76	0,86
<i>Avec permis de conduire</i>	0,34	0,35	0,54	0,81	0,88
<b>RATIO Vulnérable / Autre</b>	1,00	<b>0,86</b>	1,04	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>
<b>Indice du nombre d'options de transport</b>		<b>Gini</b>	<b>Ratio</b>	<b>  Ratio-1   &gt; 0,02</b>	
<i>Sans permis de conduire</i>		0,138	1,01	(<)	
<i>Avec permis de conduire</i>		0,137			
<b>Indice des intensités d'options de transport</b>		<b>Gini</b>	<b>Ratio</b>	<b>  Ratio-1   &gt; 0,02</b>	
<i>Sans permis de conduire</i>		0,224	<b>0,91</b>	>	
<i>Avec permis de conduire</i>		0,246			

## 7.4 Synthèse des résultats et analyse

La présente section rassemble les résultats précédents, détaillés à l'Annexe G, et les commente en regard des analyses préliminaires. Les mesures d'équité sont notamment comparées aux tests statistiques préalablement calculés. Les résultats des analyses préalables et des mesures d'équité d'accès sont résumés au Tableau 7-7.

Les analyses sont divisées en trois parties. D'abord, l'analyse porte sur la cohérence entre les indices d'équité calculés séparément pour chaque réseau de transport et la distribution spatiale de la population. Ensuite, les résultats des indices d'équité sont comparés à ceux du test statistique Kolmogorov-Smirnov. Finalement, la discussion a trait à la cohérence entre les indices intégrant tous les modes et les résultats séparés par modes de transport. Le Tableau 7-7 sert d'appui à ces analyses.

### 7.4.1 Par réseau - Indices d'équité et distribution spatiale de la population

Cette analyse porte sur la partie supérieure du Tableau 7-7 et utilise les mesures calculées pour chaque réseau de transport, séparément. Les résultats préliminaires sur la densité de population et la proximité du centre-ville pour les domiciles sont comparés à la fois (a) aux parts de population basées sur la présence des réseaux et (b) aux indices Gini basés sur l'intensité de service.

Résidant dans des quartiers légèrement moins denses et plus éloignés du centre-ville, les **femmes** ont moins accès aux réseaux de modes partagés. Cela correspond à la zone centrale (milieu de population dense) et très limitée des réseaux d'autopartage et de vélopartage. Les résultats suggèrent également qu'elles auraient possiblement un moins bon accès aux pistes cyclables.

Vivant dans des milieux peu denses et éloignés du centre-ville, les **enfants de 17 ans ou moins** sont eux aussi plus loin des réseaux partagés. Puisqu'ils n'ont pas l'âge pour conduire ou s'abonner au réseau Bixi, cette défaveur n'a pas nécessairement de conséquence. Cependant, il apparaît qu'ils sont également défavorisés dans leur accès au réseau cyclable et au transport collectif. Cette observation reflète une difficulté, car ce sont les deux seuls réseaux qui peuvent rendre les enfants autonomes dans leur mobilité.

Tel qu'attendu, les analyses pour les **adolescents entre 12 et 15 ans** sont semblables à celles concernant les enfants. Si les constatations sur les modes partagés sont identiques, celles sur les

réseaux cyclables et de transport en commun ne sont pas aussi marquées. C'est dans un sens rassurant : si les adolescents sont moins désavantagés que les enfants dans leur accès au transport en commun et au vélo, alors ils ont la possibilité d'être plus autonomes dans leur mobilité.

On observe peu de différence entre les résultats pour les **personnes âgées** et ceux pour les ménages d'une seule personne âgée. Il semble que les personnes âgées seules soient légèrement moins bien desservies par le réseau cyclable. Ceci a peu d'incidence étant donné que les personnes âgées ne sont d'emblée pas des utilisateurs potentiels du vélo. Vieillissantes et en perte de leur permis de conduire, on s'intéresse davantage à leur accès au transport en commun. Selon l'analyse spatiale, les personnes âgées sont plus nombreuses à vivre dans des quartiers à distance moyenne du centre-ville. Les résultats varient selon la méthode d'estimation, ils ne permettent pas de déduire s'ils sont favorisés ou non en ce qui a trait au transport collectif.

Les **ménages monoparentaux** sont davantage domiciliés dans des quartiers moyennement éloignés du centre-ville. Les résultats diffèrent d'un indice d'équité à l'autre, oscillant entre un meilleur ou un moins bon accès pour plusieurs réseaux.

Les **personnes sans permis de conduire** vivent plus proches du centre-ville, dans des quartiers plus denses. Leur accès aux modes partagés est donc meilleur, suivant l'étendue de l'offre de ces réseaux en zone centrale. Ils ont également un meilleur accès au transport collectif. Certains résultats indiquent cependant un désavantage d'accès au réseau cyclable. Cette dernière observation soulève un élément à améliorer, car le vélo peut constituer un excellent mode complémentaire au transport collectif.

Les **ménages ne possédant pas d'automobile** résident dans des quartiers beaucoup plus denses et plus près du centre-ville que les autres ménages. Leur accès aux différents réseaux est favorisé, sauf dans le cas du réseau routier pour lequel ils sont défavorisés. Il s'agit du seul segment de population analysé dans cette étude pour lequel on dénote une différence d'accès au réseau de routes.

**Tableau 7-7 : Synthèse des résultats des mesures d'équité d'accès**  
*(Groupe vulnérable en italique)*

ratio-1  <= 0.02 : ( )  ratio-1  > 0.10 : Double symbole  < : défavorisé > : défavorisé - : aucune différence	Personnes					Ménages		
	Femmes / Hommes	Enfants / Adultes	Adolescents / Autres	Personnes âgées / Autres	Sans permis de conduire / Avec	Personnes âgées seules / Autres	Monoparentaux / Autres	Non motorisés / Motorisés
Densité de population	(<)	<	<	(>)	>	<	>	>>
Proximité du centre-ville OBS	(<)	<	<	moy	>	moy	moy	>
Présence des réseaux								
Parts de la population								
Routes	-	-	(>)	-	-	-	(>)	-
Transport collectif	-	(<)	(<)	-	(>)	-	-	(>)
Cyclable	(<)	<	<	<	<	(<)	(<)	>
Autopartage	<	<<	<<	<	>>	<	(<)	>>
Vélopartage	<	<<	<<	<<	>>	<<	(<)	>>
Intensités de service								
Test Kolmogorov-Smirnov → Si distributions non identiques et de sens inconnu : ( )								
Routes	-	>	(-)	>	>	>	-	<
Transport collectif	-	<	<	(-)	>	(-)	-	>
Cyclable	<	<	<	<	<	<	-	>
Autopartage	<	<	<	<	>	<	-	>
Vélopartage	<	<	<	<	>	<	-	>
Indice de Gini								
Routes	-	-	-	-	-	-	<	-
Transport collectif	-	<	<	>	>>	>	>	>>
Cyclable	-	<	<	-	<	(<)	(<)	>
Autopartage	(<)	<	<	<	>	<	-	>>
Vélopartage	(<)	<	<<	<	(>)	<	-	>>
Indice du nombre d'options								
Test Kolmogorov-Smirnov	<	<	<	<	>	<	=	>
Indice de Gini	(<)	<	<	(<)	(<)	(<)	(<)	>>
Parts de population	-	<	<	(<)	(>)	(<)	-	>>
Indice des intensités d'options								
Test Kolmogorov-Smirnov	<	<	<	<	>	<	=	>
Indice de Gini	(>)	(>)	-	>	>	(>)	>	>>
Parts de population	(<)	<	<	(<)	>	(<)	-	>>

### 7.4.2 Indices d'équité et test statistique

Cette analyse étudie la cohérence des résultats des indices d'équité par rapport aux résultats statistiques du test de Kolmogorov-Smirnov (partie supérieur du Tableau 7-7).

- [Parts de population basées sur la présence des réseaux] Cet indice est peu sensible aux différences entre les groupes. En effet, dans plusieurs cas, le ratio des parts de population reste égal ou très proche de 1, bien que les tests statistiques montrent une différence entre les segments de population. Étonnement, il sur-estime les différences entre les ménages monoparentaux et le reste de la population. En effet, alors que le test statistique ne peut différencier les distributions, les parts des ménages monoparentaux sont légèrement plus faibles pour le réseau cyclable et les modes partagés.
- [Indices Gini basé sur l'intensité de service] Cet indice sous-estime les différences pour le réseau de routes. À l'inverse, comme pour les ménages monoparentaux, il accentue parfois les différences.
- [Parts de population basées sur l'indice du nombre d'options de transport] Cet indicateur suit le test statistique, sauf les femmes où il reste constant plutôt que de les montrer comme défavorisées.
- [Indices Gini basés sur l'indice du nombre d'options de transport] Cet indicateur suit généralement le test statistique. Dans le cas de la possession de permis de conduire, sa tendance est cependant inverse au test statistique. De plus, pour les ménages monoparentaux, il varie plutôt que de rester constant.
- [Parts de population basées sur l'indice d'intensité des options de transport] Cet indicateur suit dans tous les cas le test statistique.
- [Indices Gini basés sur l'indice d'intensité des options de transport] Cet indicateur ne suit pas les tests statistiques en inversant souvent les sens. Il réagit mal et semble trop sensible.

### 7.4.3 Indice d'options de transport et réseaux de transport séparés

Idéalement, puisqu'ils cumulent tous les réseaux de transport, les indices d'options de transport devraient refléter les tendances observées séparément.

- [Femmes] Les indices d'options de transport devraient indiquer que les femmes sont légèrement défavorisées globalement, en raison des modes partagés. Pourtant, l'indice de parts de population basé sur le nombre d'options reste constant. Aussi, l'indice de Gini des intensités d'options est incohérent en évoluant dans le sens inverse.
- [Enfants et adolescents] Comme ils sont généralement défavorisés (sauf pour les routes), on s'attend à ce que les indices d'options varient dans ce sens. Tous les indices d'options de transport varient bien, sauf celui de Gini basé sur les intensités de service.
- [Personnes âgées] Les personnes âgées sont défavorisées pour certains réseaux, et la situation n'est pas claire pour les autres réseaux. Ainsi, on s'attend à des indices d'options montrant un légèrement moins bon accès pour les personnes âgées. Seul l'indice de Gini des intensités d'options de transport réagit à l'inverse de cette tendance attendue.
- [Ménages monoparentaux] Les analyses par réseau ne montrent aucun avantage ou désavantage d'accès. On s'attend donc à ce que les indices d'accès soient constants. L'indice de Gini basé sur les intensités d'options de transport fait défaut en étant instable : il varie alors que les tests statistiques montrent que les deux groupes sont identiques.
- [Absence de permis de conduire] Les personnes sans permis de conduire sont défavorisées dans leur accès cyclable et, selon le test statistique, pour les routes également, mais elles sont favorisées pour les réseaux de transport collectif et de modes partagés. Ces variations sont inverses et, lorsque vient le temps de cumuler les réseaux de transport en un seul indice, on ne sait pas à quoi s'attendre. Les indices basés sur le nombre d'options montrent qu'ils ont un accès global légèrement moindre (Gini) ou légèrement meilleur (parts), selon le cas. Cependant, les deux indices basés sur les intensités d'options varient « considérablement », montrant la population vulnérable comme favorisée. Cela peut être parce qu'elle apparaît fortement favorisée pour le TC.
- [Ménages non motorisés] Les ménages non motorisés sont nettement favorisés dans leur accès à tous les réseaux, excepté le réseau routier. On s'attend donc à ce que les indices varient dans ce sens, ce qui est le cas sans équivoque.

## **7.5 Synthèse des contributions, perspectives et recommandations**

Cette dernière section du chapitre 6 présente la synthèse des expérimentations sur l'équité d'accès et une discussion sur les perspectives, les limites et les améliorations.

## 7.5.1 Synthèse des contributions

### 7.5.1.1 Mesure de l'accès aux différents modes de transport

Dans ce chapitre, le niveau d'accès a été estimé pour cinq différents réseaux de transport. Parmi ces cinq, trois ne sont pas utilisés traditionnellement en planification : pistes cyclables, autopartage et vélopartage. Des sources de données différentes ont été utilisées pour estimer l'offre pour chaque réseau de transport. Un indicateur de présence ou d'absence du réseau à proximité du domicile a d'abord été calculé. Puis, afin de mieux refléter les variations spatiales de l'offre, un second indicateur basé sur l'intensité de service a été calculé. L'intensité de service, risquant de varier lorsque le réseau est modifié, permet de capter l'évolution de l'offre à chaque année ou chaque saison. Les réseaux routier et cyclable sont définis par la longueur des routes. Les véhicules-stations et les ancrages-stations sont utilisés respectivement pour l'autopartage et le vélopartage. Seule la mesure pour le transport en commun, soit les passages-arrêts, permet des agrégations plus fines (par heure ou par type de jour).

Enfin, des indices cumulant les indicateurs d'accès par réseaux sont estimés. Deux indices d'options de transport sont donc créés, le premier basé sur le nombre de réseaux présents et le second agrégeant des niveaux d'intensités de service de tous les réseaux. Cette agrégation cherche à alimenter l'analyse globale de l'offre de transport, en indiquant la diversité et la quantité d'offre de service à l'aide d'un indice unique.

### 7.5.1.2 Mesure d'équité

Les indicateurs d'accès servent de base aux indicateurs d'équité. Au total, huit segmentations ont été définies afin de mener les comparaisons entre la population vulnérable et celle dite normale. Deux indicateurs d'équité ont été calculés : le premier est la part de population qui a un certain accès et le second est l'indice de Gini. Voici un aperçu des résultats intéressants :

- il existe peu de différence entre les hommes et les femmes. Ces dernières ont toutefois moins accès à l'autopartage et au vélopartage, car les jeunes hommes adultes sont plus nombreux qu'elles à vivre dans la zone centrale de l'Île de Montréal;
- les jeunes et les adolescents sont similaires : ils ont un moins bon accès aux réseaux de transport en commun et à celui des pistes cyclables. Les adolescents sont un peu moins touchés par ces désavantages que les jeunes en général;

- les résultats sont contradictoires quant à l'accès au transport collectif pour les personnes âgées (seules ou non). Aucune conclusion ne peut être tirée;
- les ménages monoparentaux ont un accès similaire au reste de la population;
- les ménages non motorisés ont un meilleur accès aux modes partagés, au réseau cyclable et au transport en commun. À l'exception du réseau cyclable, ces constats valent également pour les personnes sans permis de conduire.

Cette analyse met en évidence les populations vulnérables qui ont un accès défavorable aux alternatives à l'automobile. Ce genre d'indicateurs pourrait donc figurer parmi les outils d'aide à la décision.

Les indicateurs basés sur l'intensité de service sont généralement plus nuancés et permettent de différencier le niveau de service pour les personnes qui ont accès à un réseau de transport. Lorsqu'on regarde les réseaux de transport séparément, les indicateurs d'équité basés sur la simple présence sont plus extrêmes, plus sensibles, en s'éloignant toutefois de la réalité mieux représentée par les intensités de service. Lors de l'intégration de tous les réseaux de transport en un seul indice, les indicateurs d'équité ne sont pas toujours fiables. Il semble qu'à la fois les parts de population et l'indice de Gini soient adéquatement sensibles lorsqu'ils sont basés sur le nombre d'options de transport. Les parts de population construites à partir de l'intensité des options de transport réagissent aussi convenablement. Cependant, cette observation ne tient plus pour l'indice de Gini basé sur l'intensité des options de transport. Dans ce dernier cas, ses variations sont inattendues. Cela s'explique par des accès « contradictoires » émanant du fait que les accès favorisés et défavorisés sont mélangés (additionnés).

Ainsi, trois recommandations émanent de ces observations. D'abord, l'intensité de service est plus adéquate que la présence seule pour capter les variations de l'offre. Ensuite, le cumul de tous réseaux de transport en un indice doit être étudié davantage. D'autres façons d'intégrer tous les réseaux devront être revues. Peut-être devrait-on inclure seulement les réseaux pour lesquels on veut que le segment de population vulnérable soit favorisé par rapport aux autres? Finalement, l'indice de Gini doit être utilisé pour comparer la distribution autour de l'offre à l'intérieur d'un segment de population. Il ne devrait pas être utilisé pour comparer plusieurs groupes de population entre eux. Dans ce dernier cas, il est opportun d'utiliser les parts de population ou alors simplement le test statistique Kolmogorov-Smirnov.

## 7.5.2 Limites et perspectives

Cette section fait part des limites et des idées d'améliorations d'abord pour les indicateurs d'accès, ensuite pour les indicateurs d'équité.

### 7.5.2.1 Indicateurs d'accès

#### 7.5.2.1.1 Zone d'accès autour du domicile

Actuellement, la zone d'accès autour du domicile est circulaire et de rayon propre à chaque réseau de transport. Le rayon est un choix méthodologique qui influence les résultats : un rayon plus grand ou plus petit influence le niveau de service. Plutôt que d'être circulaire, la zone d'accès pourrait être basée sur une distance (ou un temps) parcourue dans le mode utilisé pour accéder au réseau analysé. Cette distance (ou ce temps) devrait être définie d'après des études sur une moyenne acceptable pour se rendre à un réseau.

#### 7.5.2.1.2 Nombre et choix des réseaux considérés

D'autres réseaux de transport pourraient être ajoutés, notamment les réseaux piétonniers, de train et de taxi. Pour le taxi, la proximité à l'aire d'attente la plus proche pourrait être utilisée. Quant aux réseaux étudiés dans ce chapitre, certains pourraient être améliorés. Le réseau de transport en commun pourrait être divisé en deux : métro et bus. Lors du cumul pour les indices d'options de transport, cela accentuerait la plus-value apportée par le métro (mode en site propre, rapide et avec peu d'arrêts). Les autobus sur voies réservées pourraient également être regardées sur un réseau séparé.

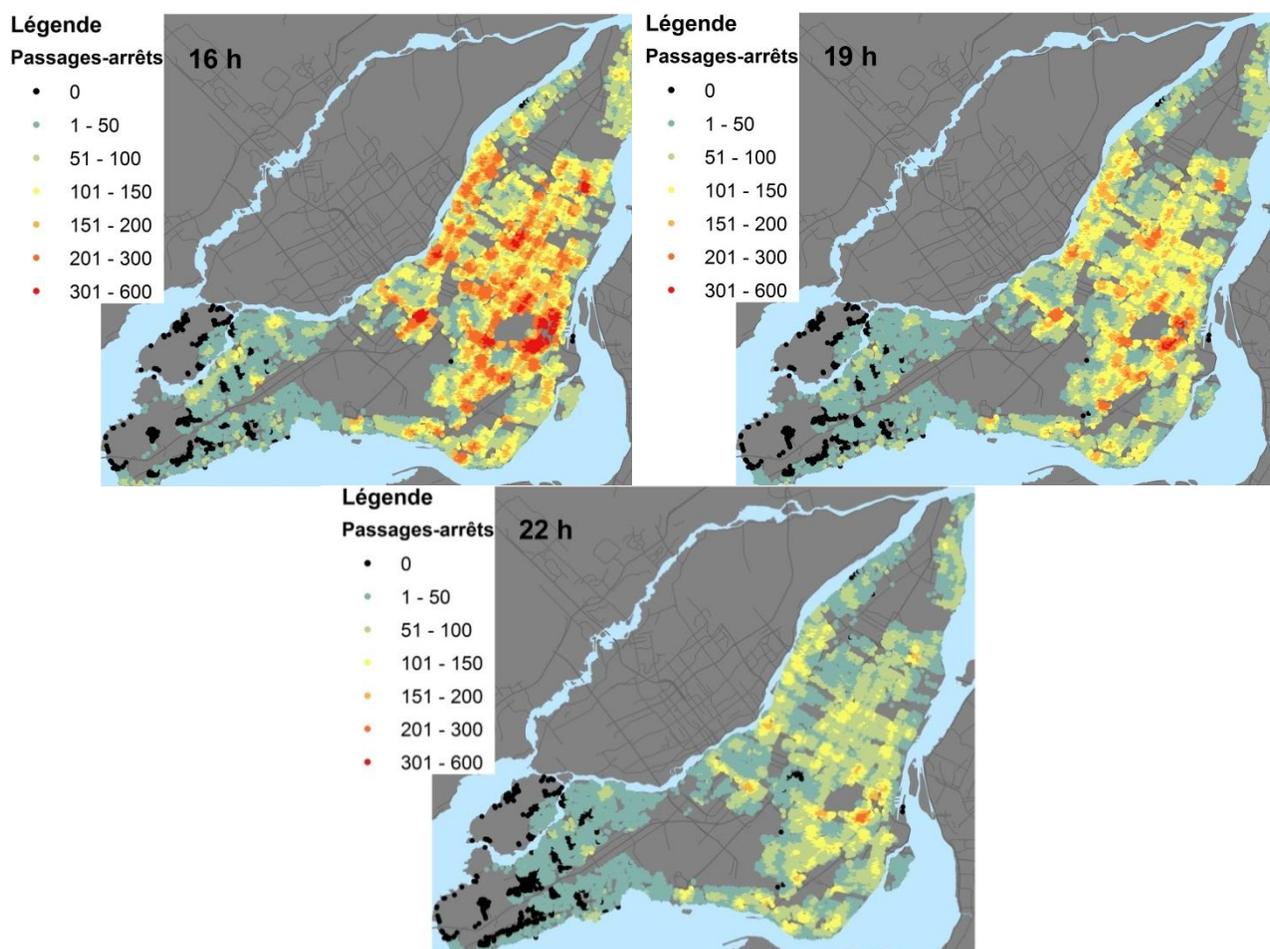
Aussi, plutôt que de mesurer la longueur des pistes pour le réseau cyclable, il serait préférable d'utiliser un indicateur de tortuosité ou de connectivité considérant les types de voies cyclables (qui influencent le niveau de sécurité et la vitesse de trajet).

Enfin, plutôt que de tenir compte de la longueur des autoroutes et boulevards, le réseau routier supérieur pourrait être représenté seulement par les entrées et sorties d'autoroutes. Cela permettrait de différencier davantage les quartiers centraux et extrêmes de l'Île de Montréal.

### 7.5.2.1.3 Caractère dynamique des indicateurs

Afin de mettre en évidence la variation de l'offre de service, des mesures plus dynamiques sur l'accès doivent être priorisées. Cela permet de faire des agrégations temporelles variant selon les besoins de l'indicateur. Pour le transport en commun, les passages-arrêts peuvent être agrégés au niveau horaire plutôt que quotidien. La Figure 7-15 illustre les variations importantes d'intensité de service du transport collectif durant une fin de journée de semaine (16h, 19h et 22h). Ces avenues sont à explorer pour rendre l'indicateur d'accès dynamique :

- [routes] intégrer la congestion sur les liens du réseau;
- [autopartage] intégrer un critère de disponibilité des véhicules, comme la possibilité de réserver un véhicule à la dernière minute;
- [vélopartage] intégrer la probabilité de trouver un vélo ou le taux de roulement des vélos à une station.



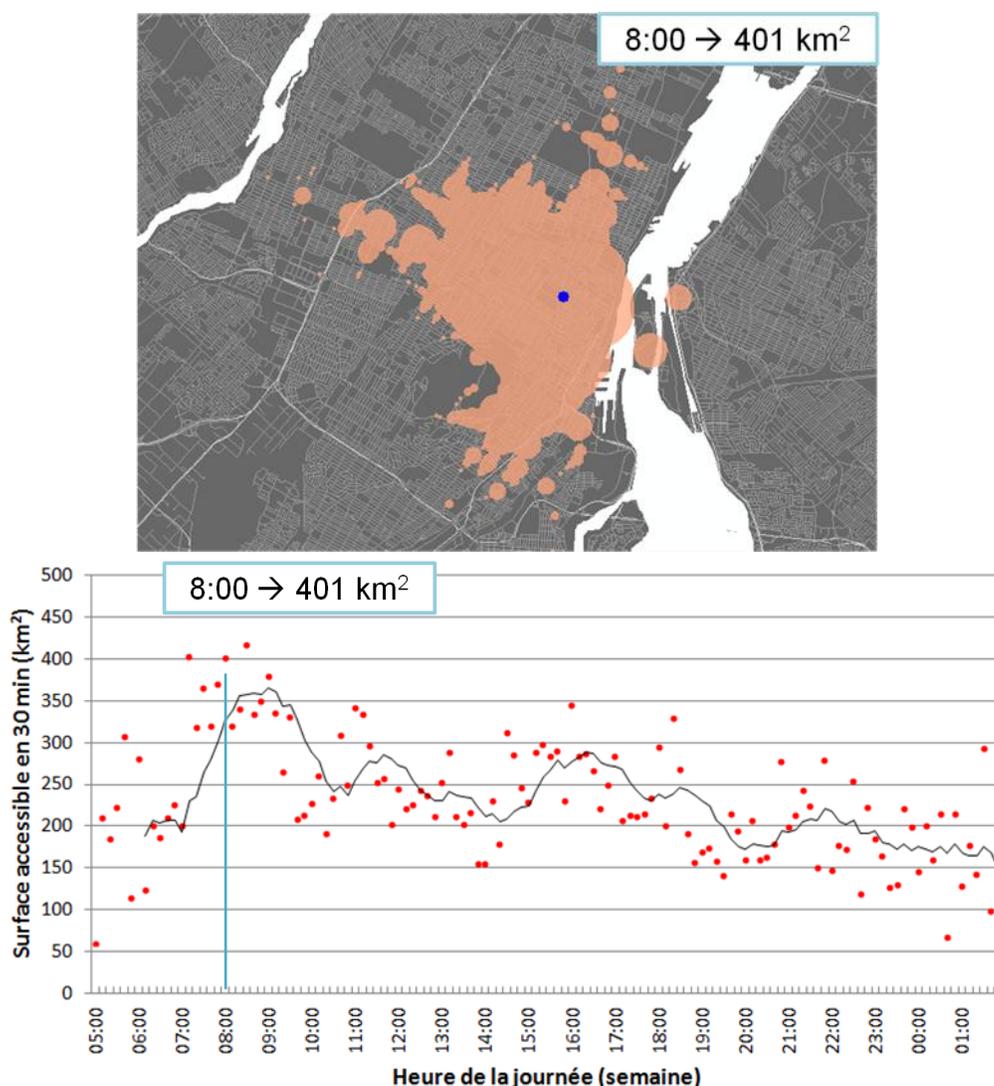
**Figure 7-15 : Passages-arrêts du bus et du métro à 16h, 19h et 22h sur semaine (Mai 2012) dans un rayon de 500 m autour des domiciles des ménages (domiciles tirés de l'EOD 2008)**

#### 7.5.2.1.4 *Notion de panier de biens et d'opportunités*

Tel qu'abordé jusqu'à maintenant, le niveau d'offre de service au domicile ne témoigne pas directement des opportunités atteignables pour un individu. Tout d'abord, il ne faudrait pas se restreindre au domicile, mais plutôt élargir l'étude à plusieurs points d'ancrage quotidien pour un individu. Les concepts d'espace-temps abordent ces problématiques. Ensuite, il faudrait passer à la notion de panier de biens, c'est-à-dire considérer les différentes opportunités atteignables à partir des points d'ancrage, pour un temps déterminé. Un calculateur de trajet basé sur un réseau géocodé doit être mis au point. La surface accessible calculée à partir d'un point de départ peut ensuite être jumelée à une base de données d'opportunités par type de services (commerces, santé, emploi, éducation, etc.).

La Figure 7-16 montre un exemple de surface accessible en transport en commun à partir de l'hôpital Notre-Dame. En haut, la carte illustre que 401 km<sup>2</sup> sont accessibles lorsque le départ est à 8 h. Le graphe au-dessous compile les surfaces accessibles durant une journée de semaine, à chaque 15 minutes. On peut observer la variation horaire de l'offre. Un défi consiste à décider du niveau d'agrégation temporel. Pour connaître les activités qui tombent à l'intérieur de cette surface, il faut disposer d'une base de données des opportunités.

Des calculateurs de trajet pour les modes actifs et émergents doivent également être développés.

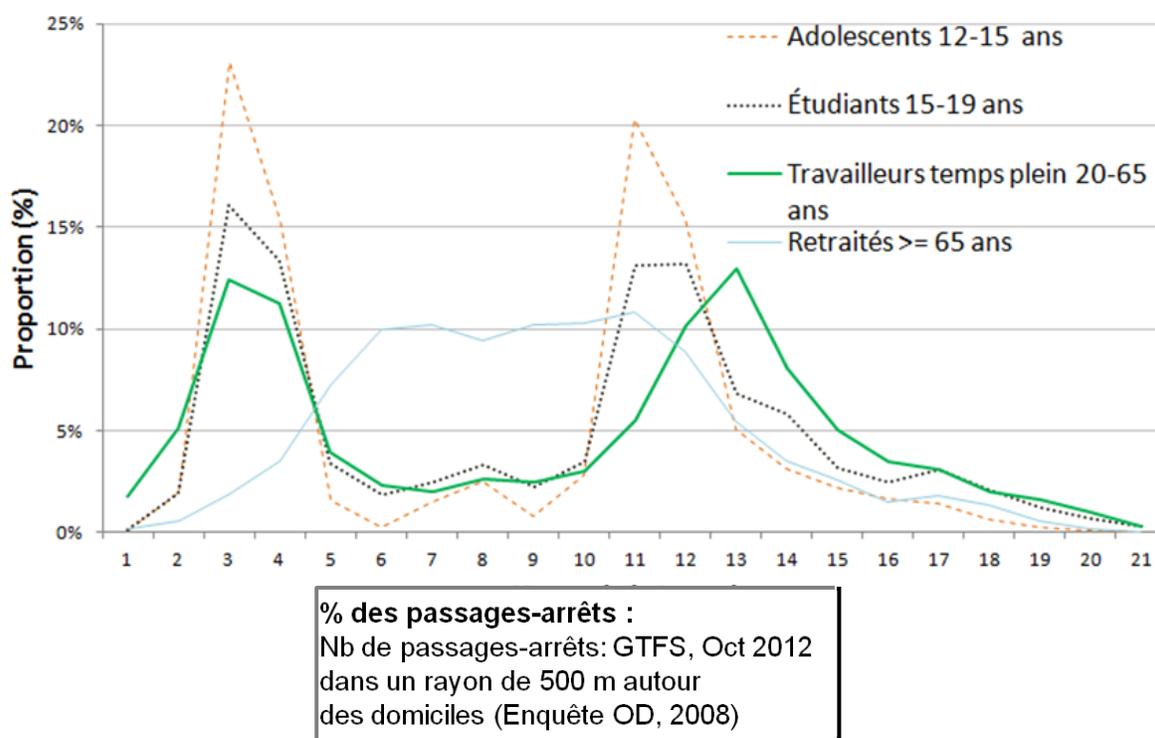


**Figure 7-16 : Surface accessible en 30 min de transport en commun à partir de l'hôpital Notre-Dame (Calculateur de trajet basé sur l'algorithme de Dibbelt et al., 2013)**

### 7.5.2.2 Intégration des indicateurs d'accès en un seul indice

Dans cette étude, deux façons d'intégrer tous les réseaux de transport ont été testées : le nombre d'options de transport et le cumul des catégories d'intensité de service. Or, les cumuls ainsi estimés cachent en quelque sorte des effets contradictoires. En effet, lorsqu'une population est favorisée pour un premier réseau, et défavorisée pour un second, l'indice cumulé ne rapporte aucune différence avec la seconde population. Or, il se peut que dans un objectif d'équité, on souhaite observer ces différences pour favoriser la population vulnérable au premier mode. L'indice cumulé ne serait donc d'aucune aide dans ce cas.

Pour contourner ce problème, il serait intéressant que l'indice cumulé soit bâti seulement à partir des réseaux pour lesquels on souhaite voir apparaître une différence favorable. Par exemple, pour les personnes âgées en perte de permis de conduire, seul le transport en commun serait comptabilisé. De surcroît, les plages temporelles à l'étude pourraient même varier en fonction des habitudes de comportement du segment de population étudié. En reprenant l'exemple des personnes âgées, on aperçoit à la Figure 7-17 qu'elles se déplacent davantage en période hors-pointe de jour, alors que le reste de la population se déplace davantage en période de pointe. Ainsi, une question pertinente serait : les personnes âgées (se déplaçant en hors-pointe de jour) sont-elles défavorisées dans leur accès au transport en commun par rapport au reste de la population (se déplaçant en pointe)? Puisque le niveau de transport collectif est plus élevé en pointe qu'en hors-pointe, de telles considérations risquent de montrer que les personnes âgées sont plus défavorisées que ce que les analyses de ce chapitre ne laissent paraître.



**Figure 7-17 : Répartition des heures de départ des déplacements selon le segment de population**

### 7.5.2.3 Indicateurs d'équité

Les indicateurs d'équité testés sont les parts de population ayant un accès à un ou plusieurs réseaux et l'indice de Gini. Ici, deux perspectives à étudier sont énoncées.

#### 7.5.2.3.1 Indice d'entropie

Plus général, le concept d'entropie a initialement été développé par Shannon (1951). À partir de ce dernier, Theil (1972) a développé un indice d'entropie servant à mesurer l'égalité. Ils indiquent dans quelle mesure les groupes sont également distribués parmi les unités organisationnelles (Massey & Denton, 1988). Traditionnellement, ces indices sont utilisés pour la distributions des groupes de population à l'intérieur des quartiers d'une région.

L'indice de Theil (1972) est une dérivation de l'entropie qui mesure la différence moyenne entre les proportions d'un groupe unitaire et un système global. Soit  $A_i$  un groupe de population ayant une intensité de service de transport  $E_i$ . La population totale  $A$  a un niveau de service total  $E$ . Les proportions du total  $p_i$  et  $w_i$  sont estimées à partir respectivement de  $A_i / A$  et  $E_i / E$ .

$$\text{Indice symétrique de Theil } T = \frac{1}{2} \sum [(p_i - w_i) \cdot \ln(p_i/w_i)]$$

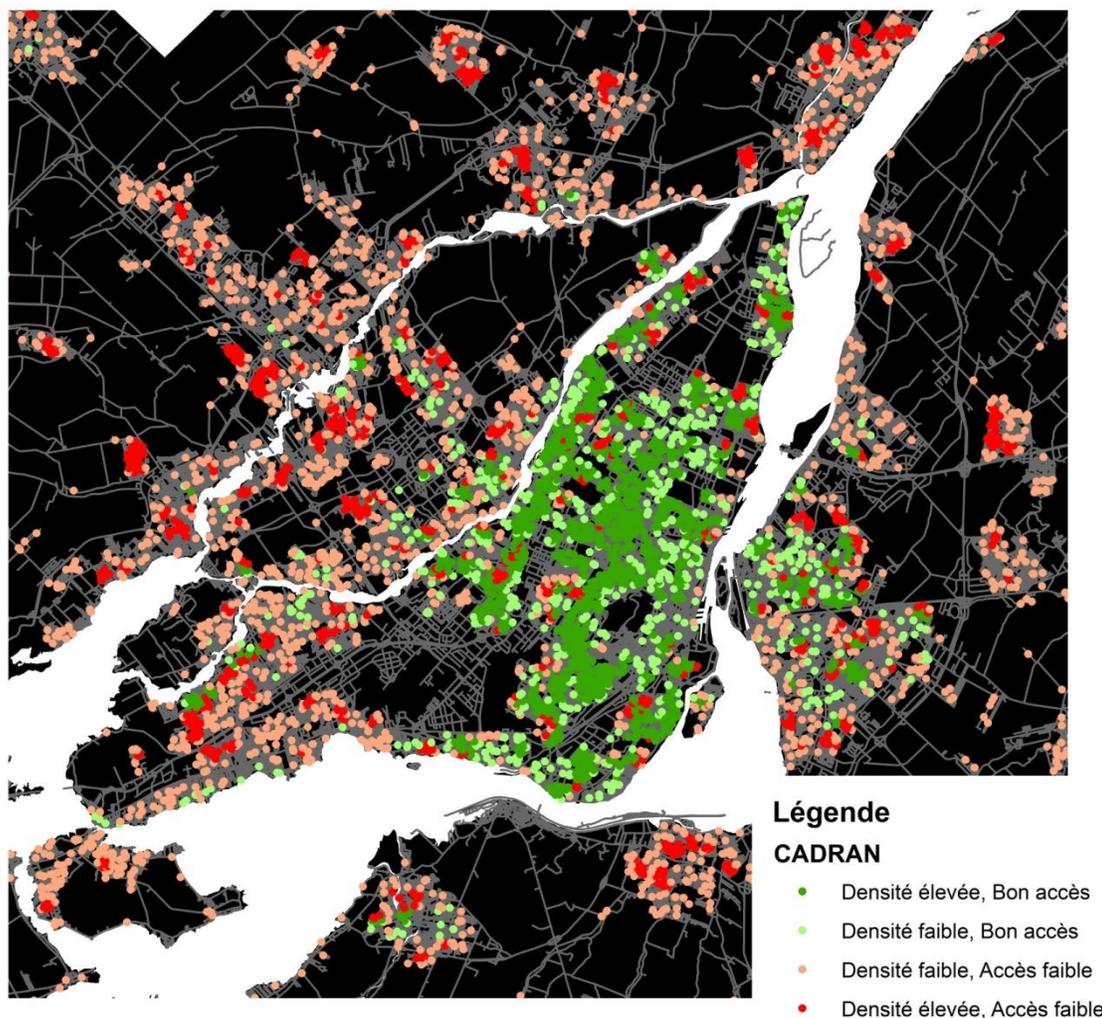
Ainsi, si le service de transport est distribué également à travers les différents groupes, l'indice de Theil est nul. Plus le chiffre est grand, plus la distribution est inégale.

#### 7.5.2.3.2 Cadrans

Soit un segment de population que l'on sait être défavorisé dans son accès à la lumière des analyses d'équité réalisées. Est-il possible d'identifier les zones où il faudrait améliorer l'offre, pour rendre la distribution de l'offre de service plus équitable vis-à-vis de cette population? Une façon est de localiser les endroits où l'accès est faible, mais la densité de cette population est élevée. Dans cette optique, des cadrans ont été créés en prenant l'exemple des adolescents (domiciles tirés de l'EOD 2008) et leur accès au transport en commun (passages-arrêts à l'intérieur d'une zone circulaire de rayon de 500 m, tirés des GTFS de 2012). Quatre cadrans ont été définis d'après deux seuils estimés à partir de l'ensemble adolescents :

1. La densité moyenne d'adolescents résidant dans un rayon de 500 m du domicile;
2. Le nombre moyen de passages-arrêts en 24h dans un rayon de 500 m du domicile.

La Figure 7-18 cartographie la distribution des adolescents avec l'un des quatre cadrans qui leur est associé. Les zones rouges foncé sont celles où l'accès est inférieur au seuil moyen de passages-arrêts, mais où la densité d'adolescents est plus élevée que la moyenne. Ces zones sont des cibles potentielles où une amélioration de l'offre du transport en commun mènerait probablement à une amélioration de l'équité de distribution des adolescents par rapport à l'offre de transport.



**Figure 7-18 : Cadrans permettant de localiser les endroits qui pourraient améliorer l'équité de distribution des adolescents par rapport au transport en commun**

## CHAPITRE 8 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Tel qu'illustré à la Figure 8-1, la conclusion se divise en trois sections. La première reprend les principaux constats issus de la revue de littérature et résume le projet de recherche. La seconde fait une synthèse des contributions analytiques et méthodologiques. La dernière section discute des limites et des perspectives du projet, tout en formulant des recommandations.

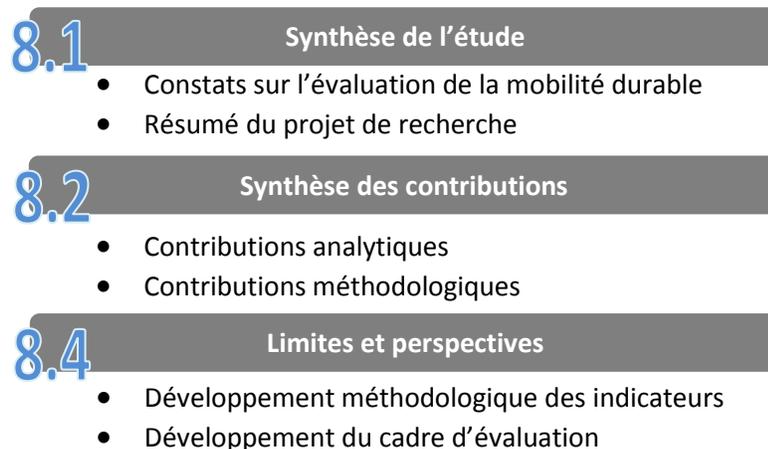


Figure 8-1 : Structure du chapitre 8 « Conclusion et perspectives »

### 8.1 Synthèse de l'étude

#### 8.1.1 Constats sur l'évaluation de la mobilité durable

Bien que le concept de mobilité durable soit de plus en plus discuté et étudié dans la littérature comme dans la pratique, il manque de profondeur, de clarté et de standardisation. Les tentatives d'évaluation et de mesure du progrès envers la mobilité durable sont difficiles. Les points suivants résument les constats reliés à la mobilité durable et à son évaluation.

On observe un **manque de clarté** du concept de mobilité durable, occasionné par : une définition large et peu concrète, ce qui rend le concept **ambigu**; une **multiplicité des enjeux**, qui les rend désordonnés; un concept **variant selon le contexte et l'utilisateur** (l'existence, la reconnaissance et la priorité des enjeux dépendent notamment de la technologie, des problèmes de société alarmants et des acteurs en jeu); et des enjeux couvrant des **disciplines et des champs d'actions diversifiés** parfois bien différents de ceux des acteurs traditionnels en transport. Les

collaborations et le partage d'information entre le secteur des transports et les domaines de la santé, de l'environnement et de l'économie sont parfois nouveaux.

Également, on dénote un **manque de structure** de la mobilité durable, engendré par des **relations de causalité entre les enjeux** (offre, demande, impacts) qui ne sont pas nécessairement claires ou connues, ainsi qu'un **double-comptage** de certains effets découlant d'un seul événement.

Un **manque de standardisation** du concept de mobilité durable génère plusieurs défis. D'abord, le développement d'un cadre d'évaluation de la mobilité durable doit viser les objectifs suivants :

- mettre ensemble des **préoccupations différentes selon le mode de transport** étudié. Pensons par exemple aux différentes formes de mobilité qui n'engendrent pas nécessairement les mêmes impacts ni le même ordre de grandeur d'impact;
- être utile **aux planificateurs, aux institutions, aux concepteurs et aux décideurs ayant des responsabilités et des leviers d'actions divers**.

En ce qui a trait au processus méthodologique d'estimation des indicateurs, les défis suivants sont à relever :

- supporter des **approches différentes selon l'unité à l'étude**, par exemple un corridor de déplacements, un générateur de déplacements, une superficie de territoire occupé, un segment de population spécifique, etc.;
- s'adapter à des **échelles d'analyse variées et définies d'après l'objet d'étude** (intervention envisagée et impact estimé), à déterminer à la fois dans le temps et l'espace;
- répondre à des **objectifs d'évaluation différents**, passant de la mesure d'un état actuel à la prévision des effets d'une intervention;
- requérir des **données de sources variées**, dont l'existence de collecte n'est pas assurée, dont la disponibilité des données dépend de fournisseurs issus de diverses disciplines et dont le niveau de résolution et la précision ne sont pas nécessairement adéquats.

Finalement, on constate un **manque d'opérationnalisation et de recherche** concernant plusieurs aspects. Il manque de recherche pragmatique et approfondie permettant de **prouver les liens de cause à effet qui existent entre un comportement de mobilité et ses impacts, entre une action et ses impacts, et entre les impacts de différentes dimensions**. Les recherches sur un cumul de

ces actions ou comportements sont aussi manquantes. De plus, les modèles traditionnels de transport et de mobilité devrait chercher à intégrer les recherches issues d'autres disciplines que le transport, notamment en santé, en environnement et en économie.

De surcroît, les **méthodologies d'estimation des impacts sociaux**, à la fois ceux bénéfiques que néfastes, sont **peu étudiées**. Les **enjeux** qui se définissent d'après la perception de l'utilisateur (critères qualitatifs), d'après des comportements exclus des mécanismes actuels de collectes de données ou d'après un consensus social sont **soit ignorés soit mesurés en évacuant le caractère subjectif** du concept.

Enfin, des **recherches sur les répercussions des hypothèses et simplifications méthodologiques** sur la valeur de l'indicateur utilisé (perte de précision, de fiabilité et de sensibilité) sont à faire.

### 8.1.2 Résumé du projet de recherche

Cette thèse propose un cadre de définition, de représentation et d'évaluation de la mobilité durable. Ce cadre se décompose en trois volets qui remplissent chacun un objectif différent.

**La *Pieuvre*** est une **représentation schématique de la vaste liste des impacts** de la mobilité sur les trois dimensions du développement durable. Les impacts sont catégorisés par ensembles et sous-ensembles, **sans toutefois faire état des relations de cause à effet qui peuvent exister entre les différents impacts**. Cette représentation répond au besoin de clarification de ce qui peut être inclus dans la mobilité durable, ce qui est entendu au sens large par le concept de mobilité durable.

**Le *Cercle de causalité*** est une **représentation schématique des principaux impacts** de la mobilité sur les trois dimensions du développement durable, **des comportements de mobilité et des leviers d'action possibles**. Ces éléments sont reliés lorsqu'existent des **relations de cause à effet entre eux**. Cette représentation vise à synthétiser le concept de mobilité durable et le relier systématiquement aux changements de comportements de mobilité et aux interventions des décideurs.

**La boîte à outils** est une **proposition d'un système d'indicateurs et d'indices** pour évaluer les enjeux de la mobilité durable. Idéalement, elle sera rattachée à la *Pieuvre* et au *Cercle de causalité* par un rapport synthèse compilant automatiquement les impacts à considérer et les

indicateurs associés, en fonction des éléments sélectionnés dans le cadre. Cela permet de synthétiser textuellement les informations du cercle relativement à un cas particulier. Les choix méthodologiques des indicateurs du système proposé sont complétés par des expérimentations reliées aux indicateurs de la boîte à outils. Ce sont le taux de consommation de carburant (chapitre 5), la capacité d'une voie de circulation (chapitre 5), la congestion (chapitre 6) et l'équité d'accès (chapitre 7).

## 8.2 Synthèse des contributions

### 8.2.1 Contributions analytiques

Tout d'abord, le cadre d'évaluation de la mobilité durable, découpé en trois volets qui sont la *Pieuvre*, le *Cercle de causalité* et la boîte à outils, permet d'en améliorer la compréhension de plusieurs façons (chapitres 3 et 4). Il aide notamment à la **compréhension du concept de mobilité durable** et, plus spécifiquement, des enjeux et des impacts qui doivent ou peuvent être inclus lorsque ce concept est abordé. Les représentations proposées éclaire la *Pieuvre* offre un **cadre statique** rendant compte de tous les aspects qui peuvent être soulevés par la mobilité durable, et ce, de façon étendue et non limitée. Cette caractéristique est très importante, car elle constitue un rappel systématique de **l'étendue de couverture du concept** et de toutes les facettes que l'on peut lui donner. Ceci est particulièrement utile dans un monde où ceux qui s'approprient le concept de mobilité durable ont tendance à le centraliser sur un ou quelques débats seulement (par exemple actuellement les émissions de gaz à effet de serre).

Le cadre **clarifie également les relations de causalité qui unissent les enjeux entre eux**. Le *Cercle de causalité* offre un **cadre interactif** de représentation de ces liens. Cela permet d'identifier les impacts « en aval » qui reposent sur ceux plus « en amont ». Les premiers nécessitent plus d'hypothèses simplificatrices. Le cadre proposé permet de mieux **apprécier le niveau de redondance** ou de double-comptage d'un système d'indicateurs.

Enfin, le cadre d'évaluation améliore la **compréhension des relations de causalité entre la mobilité - offre et demande - et ses impacts sur les trois dimensions** du développement durable. Le cadre formalise ces relations. Ces dernières sont tirées de la littérature bien que, dans certains cas, elles bénéficieraient d'études plus approfondies. Les diagrammes illustrant les chaînes de causalité (chapitre 3) permettent d'identifier celles qui sont peu soutenues par la

littérature (lignes tiretées). Interactif, le cercle **identifie systématiquement les impacts à considérer pour une intervention envisagée** sur l'offre ou pour une modification prévue des comportements de mobilité. Il met en valeur **les relations qui sont cycliques** (la cause et l'effet sont à la fois cause et effet) et **les impacts inattendus**.

Ce travail a fait l'objet de plusieurs communications :

[Article de vulgarisation] La pieuvre et le cercle, base d'un cadre d'évaluation de la mobilité durable. *Routes et Transports*, 43(1), revue de l'Association québécoise du transport, Québec (2014);

[Atelier] *Atelier de discussion sur les indicateurs de mobilité durable*. Au près des partenaires de la Chaire Mobilité, Montréal, Québec (2013);

[Présentation] Sioui, L. Et si les nombreux tentacules de la mobilité durable formaient un cercle? Présentation à *48e congrès annuel de l'Association Québécoise des Transports*, Montréal, Québec (2013);

[Présentation] Sioui, L. et Morency, C. Où en sommes-nous dans la conception d'indicateurs de développement durable en transport ? Présentation au *78e Congrès de l'Acfas*, Montréal, Québec (2010);

et d'un article scientifique avec révision :

Sioui, L. & Morency, C. (2012). Où en sommes-nous dans la conception d'indicateurs de développement durable en transport ? *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-Série 11.

D'autres communications sont également prévues prochainement :

[Présentation] La pieuvre et le cercle, base d'un cadre d'évaluation de la mobilité durable. Présentation au *Congrès et exposition de 2014 de l'Association des transports du Canada*, Montréal, Québec (2014);

et un article scientifique avec révision est actuellement en préparation en vue de le soumettre au journal *Transport*, dans un dossier spécial *Smart and Sustainable Transport* :

Sioui, L. & Morency, C. *La pieuvre et le cercle, base d'un cadre d'évaluation de la mobilité durable*. En préparation (2014).

## 8.2.2 Contributions méthodologiques

Les fiches méthodologiques d'indicateurs et les expérimentations des chapitres 4 à 7 abordent plusieurs défis à relever lors de l'estimation, et proposent des pistes de solutions. De façon générale, les problématiques soulevées sont [chapitres 4 à 7] :

- la variation du phénomène dans le temps et l'espace [6,7];
- la perception des individus [6,7];
- le choix d'un référentiel [5,6];
- l'intégration de données populationnelles et d'offre de transport [7];
- les différences méthodologies pour les divers usages par les planificateurs ou les institutions décisionnelles [6];
- les différences méthodologiques selon l'approche (individu, corridor, générateur, territoire, etc.) [6,7];
- l'intégration des modes émergents [5,7];
- la sensibilité adéquate de l'indicateur [6,7];
- l'importance des hypothèses simplificatrices [5];
- les notions de quantité et d'efficacité ne répondent pas aux mêmes objectifs d'évaluation [6].

Tous ces enjeux sont aussi abordés de façon intrinsèque dans les fiches méthodologiques des indicateurs proposés au chapitre 4. La boîte à outils de ce chapitre est un volet de l'article scientifique en préparation mentionné ci-haut.

La démonstration sur les taux de consommation de carburant a fait l'objet d'un article de vulgarisation :

Sioui, L. Parabole théorique : dans l'automobile ou l'autobus, quel passager consomme moins de carburant ? *Routes et Transports*, 40(1), revue de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec (2011).

De plus, les expérimentations sur la congestion contribuent au développement d'un indicateur dans la région de Montréal. Elles ont mené à une affiche :

Sioui, L. & Morency, C. Building congestion indexes from GPS data: Demonstration for the freeway network. *13th World Conference of Transportation Research*, Rio, Brésil (2013),

et à un article scientifique qui est présentement en soumission :

Sioui, L. & Morency, C. *Building congestion indexes from GPS data: Demonstration for the freeway network*. En soumission au *International Journal Of Urban Planning and Transportation* (2014).

Finalement, les expérimentations sur l'équité d'accès avancent les études sur le développement d'indicateurs d'équité. Elles ont été présentées à :

Morency, C. & Sioui, L. How equitable is access to transportation options? Présenté à *Women's Issues in Transportation*, Paris, France (2014);

Sioui, L. Un « cocktail transport » équitable? Présentation à *49e congrès annuel de l'Association Québécoise des Transports*, Québec, Québec (2014);

Morency, C. & Sioui, L. How equitable is accessibility to transit? Présentation à *Differential Mobilities*, Montréal, Québec (2013);

et un article scientifique est en préparation :

Sioui, L. & Morency, C. How equitable is access to transportation options? En soumission au *Travel behaviour and society* (2014).

### 8.3 Limites et perspectives

Les limites sont énoncées en gras, suivies par les recommandations et les perspectives qui y sont reliées.

#### 8.3.1 Développement méthodologique des indicateurs

##### 8.3.1.1 Le système d'indicateurs proposé (boîte à outils)

**Certains indicateurs du système sont des pistes d'estimation sans toutefois être nécessairement applicables immédiatement.** Pour qu'ils le soient, il sera nécessaire de réaliser une recherche plus approfondie sur la formulation de l'indicateur. S'il y a lieu, on pourrait proposer et tester une méthodologie de collecte de données. Ce besoin de nouvelles données concerne surtout les phénomènes qualitatifs et subjectifs, principalement les impacts sociaux. Idéalement cette information nouvellement collectée serait intégrée l'EOD, enquête déjà en place et périodique. Également, il est essentiel de constituer les réseaux de transport actifs et émergents, ainsi que de développer des modèles de calcul de chemin et de temps de parcours.

D'ailleurs, **les indicateurs proposés dans le système n'ont pas été testés, à l'exception de la congestion et de l'équité.** Les démarches futures à envisager sont donc d'estimer les indicateurs proposés pour différentes approches, échelles spatiales et temporelles, ainsi que d'analyser leur sensibilité suite à des variations des facteurs d'influence. Lorsque c'est pertinent, une méthode d'estimation de l'indicateur applicable au transport des marchandises devra être proposée.

Aussi, **les indicateurs liés à l'économie collective sont peu transposables à une approche par déplacement, par individu, par ménage, par corridor ou par générateur de déplacements.**

Des indicateurs sur l'économie collective applicables à d'autres approches que celles territoriales devront être développés. Pour les indicateurs traditionnellement traités par une autre discipline que les transports, il serait opportun de :

- faire une revue des bases de données existantes dans les autres disciplines que le transport (environnement, développement économique, industrie automobile);
- tisser des liens avec ces autres disciplines afin d'arrimer leurs bases de données avec celles du secteur des transports, notamment l'EOD;
- renforcer les liens entre les institutions décisionnelles en transport, afin d'arrimer les bases de données et les modèles existants.

**Pour la plupart, les indicateurs proposés reposent sur l'EOD. Cela réduit la possibilité de transposer le système à l'extérieur du Québec, où les enquêtes sur la mobilité sont différentes. Au Québec, cela restreint l'application aux régions métropolitaines qui sont dotées d'une telle enquête.** Pour les régions ou les municipalités moins peuplées et sans EOD, étudier la possibilité d'élaborer une enquête alternative, mais semblable, à l'EOD. Moins coûteuse, cette enquête aurait un questionnaire moins long et serait réalisée sur demande. Elle pourrait être autodidacte pour l'institution qui souhaite la lancer, et facile d'implémentation. Une enquête Internet montée d'avance avec une interface interactive serait une possibilité.

Finalement, tel que présenté dans ce document, **le système d'indicateurs n'est pas encore directement relié aux schémas interactifs, la Pieuvre et le Cercle de causalité.** À terme, le système d'indicateurs sera partie intégrante du cadre d'évaluation proposé. Étant reliés aux thèmes du *Cercle de causalité*, les indicateurs à estimer s'afficheront lors de la sélection d'une intervention. La méthodologie d'estimation proposée s'adaptera également au mode de transport sélectionné.

### 8.3.1.2 La congestion

**Les données de vitesses issues des véhicules de Communauto sont limitées en raison de l'utilisation que les usagers font des véhicules.** Pour certaines périodes temporelles, notamment le matin, le nombre et l'étendue des données est très limité. Il serait donc avantageux de se tourner vers d'autres sources de données de vitesse pour compléter ou remplacer celles de Communauto. Les données de taxi ou de camions sont des possibilités à explorer.

**Les indicateurs estimés n'ont pas été confrontés aux conditions réelles du réseau. On ne peut actuellement pas expliquer les causes des variations observées de vitesse.** Afin de s'assurer que les variations de vitesses observées reflètent des modifications réelles des conditions de circulation, il serait approprié de trouver d'autres bases de données complémentaires informant par exemple sur la météorologie, la position de radars, les chantiers, les incidents, etc. Par la suite, il sera possible d'étudier la sensibilité des données de vitesse et des indicateurs de congestion testés aux variations des conditions de circulation.

**Les démonstrations sur la congestion sont basées sur des mesures directes. Ainsi, cet indicateur ne peut être utilisé pour la prévision des répercussions d'une intervention sur les conditions de circulation.** Cette contrainte rejoint le point précédent : les autres bases de données constituent des facteurs d'influence potentiels à la base d'un modèle d'estimation de la congestion utilisé à des fins de prévision.

**Les démonstrations ne concernent que l'évaluation de l'intensité de la congestion, alors que cette dernière comporte d'autres caractéristiques tout aussi importantes : la fiabilité, la durée et l'étendue.** Il serait opportun d'élaborer des indicateurs relatifs à ces autres caractéristiques.

Un indicateur d'intensité de la congestion, accompagné d'autres sur la fiabilité, l'étendue et la durée, permettra de suivre l'évolution des conditions de circulation. Il sera également possible de cibler des interventions appropriées, dans l'espace et dans le temps, qui vise à réduire la congestion. Les défis qui accompagnent l'élaboration de cet indicateur sont de mettre en commun différentes bases de données et de s'assurer de la sensibilité de l'indicateur aux variations des conditions de circulation.

### **8.3.1.3 L'équité d'accès aux réseaux de transport**

**Le choix des populations vulnérables à l'étude a été réalisé d'après les données disponibles dans l'EOD. Cependant, d'autres populations sont peut-être plus socialement démunies.** Il serait pertinent de développer un processus d'identification des populations vulnérables qui reflètent les préoccupations sociales et qui sont en lien avec les transports.

**L'indice de Gini utilisé dans la démonstration est calculé à partir de la formule de base de ce coefficient. Or, cette formulation a des lacunes et, pour y pallier, il existe des indices de**

**Gini corrigés.** Les tests de sensibilité pourraient être réalisés de nouveau avec les indices de Gini corrigés.

Les mesures d'équité sont basées sur des mesures d'accès, estimées à partir des données de réseau disponibles. **Le calcul de ces mesures d'accès peut être fastidieux, bien qu'il ne soit qu'une étape préalable au développement des mesures d'équité.** Il est recommandé de calculer systématiquement les variables d'intensité de service dans le voisinage du domicile des personnes, afin d'alléger les calculs préalables au développement d'un indicateur d'équité d'accès. Ces variables peuvent également servir à l'estimation d'autres indicateurs que l'équité d'accès, notamment à alimenter les modèles de choix modal. **De plus, la plupart des mesures d'accès étaient également statiques (sans évolution dans le temps).** Les tests sur les mesures d'équité mériteraient d'être réalisés à nouveau, cette fois-ci en se basant sur des mesures d'accès estimées à partir de données plus dynamiques.

**Les mesures d'accès utilisées dans cette recherche se basent sur la proximité et l'intensité de service offert autour du domicile des individus. Cette approche simplifie grandement la notion d'accessibilité,** qui devrait plutôt tenir compte des lieux d'origine et de destination, et se baser sur les temps de parcours. Pour que ces derniers éléments soit pris en compte, il est nécessaire de :

- améliorer les calculs de chemin et de temps de parcours, idéalement en intégrant la congestion;
- constituer les réseaux de transport actifs et émergents, et développer des modèles de calcul de chemin et de temps de parcours;
- constituer une base de données des opportunités afin de passer à une approche de panier de biens.

À terme, l'indicateur d'équité d'accès aux réseaux de transport pourrait fournir un argument complémentaire à la prise de certaines décisions d'intervention. En effet, une meilleure équité d'accès favorise la cohésion sociale. Toutefois, beaucoup d'expérimentations restent à faire afin de s'assurer que l'indicateur témoigne adéquatement des différences entre les segments de population, afin d'en tirer des interprétations justes. Un des principaux défis demeure la clarification du concept générale d'équité.

### 8.3.2 Développement du cadre d'évaluation

**L'exercice de revue de littérature, et conséquemment le cadre d'évaluation proposé, n'a pas été élaboré dans une optique de cycle de vie. Suivant une telle démarche, plusieurs impacts de la mobilité et des infrastructures de transport sont probablement manquant.** L'analyse du cycle de vie pourrait notamment reconstituer la chaîne des matériaux utilisés pour la construction, l'entretien et l'utilisation des infrastructures et des composantes liées.

**Bien que vaste, la revue de littérature ne tient pas compte des effets peu connus ou inconnus de la mobilité.** Il est recommandé de faire une veille constante ou périodique de la littérature afin de mettre à jour les effets de la mobilité sur les trois dimensions du développement durable. En outre, une veille de la littérature plus importante serait de mise s'assurer de l'exactitude des relations de causalité entre les thèmes du *Cercle de causalité*.

**Les thèmes du Cercle de causalité sont actuellement fixes.** Pourtant, les instances décisionnelles peuvent avoir des préoccupations différentes et, par exemple, vouloir dissocier un enjeu d'un thème du *Cercle de causalité* qui, actuellement, en regroupe plusieurs. Également, les paramètres de l'offre pourraient être modifiés en fonction du mode de transport ou de l'instance décisionnelle qui l'utilise. Par exemple, le cercle pour le transport en commun pourrait se voir ajouter des thèmes dans la catégorie « Réseau », notamment la fréquence de passage des autobus. Il serait donc opportun de discuter des thèmes qui composent le *Cercle de causalité* (regroupement, positionnement), d'intégrer les notions d'aménagement et d'environnement bâti parmi les paramètres d'offre et de demande de transport et, finalement, d'analyser le *Cercle de causalité* en fonction du transport des marchandises. S'il ne permet pas d'intégrer ces préoccupations, étudier la façon de les intégrer.

**Le Cercle de causalité intègre seulement des relations linéaires, sans donner l'ampleur de l'impact ni s'il est à court, moyen ou long terme.** Pourtant, l'interprétation tirée du *Cercle de causalité* peut changer en fonction de ces éléments. Il faudrait donc trouver un moyen d'intégrer au *Cercle de causalité* les relations de causalité non linéaires, ainsi que les notions d'ampleur et de terme de l'impact.

**En outre, les relations de causalité Cercle de causalité sont les mêmes pour tous les modes de transport.** Pourtant, il est probable que certaines relations soient différentes selon le mode ou le

réseau de transport étudié. Il sera nécessaire de revoir les relations de causalité selon le mode de transport et, si possible, trouver des références bibliographiques dans chaque cas.

**Enfin, le cadre d'évaluation n'est pas complètement interactif et adaptable aux besoins des planificateurs.** Le rendre entièrement interactif nécessite de reprogrammer le schéma, éventuellement sur une autre plate-forme que le logiciel Processing. Il devrait contenir les éléments suivants :

- un module attendant produisant un rapport synthèse pour une intervention (relations de causalité et indicateurs proposés);
- un module permettant de visualiser plusieurs modes en même temps (plusieurs cercles liés par la répartition modale);
- un module de création de nouveaux modes, de modification des relations de causalité (ayant la forme de diagrammes à boîtes), de nouvelles interventions et de nouveaux indicateurs;
- la possibilité de sélectionner un enjeu pour cible et l'identification systématique de ses causes (cheminement inverse à celui actuel).

Plusieurs de ces modules nécessite un travail en continu, car ils risquent d'évoluer dans le temps. Pour ce faire, un processus de mises à jour devrait être prévu.

Le cadre d'évaluation pourrait être intégré dans le milieu pratique des planificateurs en transport. Tel quel, il permet de structurer et de clarifier le concept de mobilité durable. Cependant, il pourrait servir à beaucoup plus. Afin qu'il soit opérationnel, plusieurs étapes restent à réaliser dont les recommandations précédemment décrites, ainsi qu'une mise à jour périodiques. Un effort de formalisation du *Cercle de causalité* devra passer conjointement par une revue de littérature plus approfondie, des recherches sur certaines relations de causalité précises, et une discussion entre les décideurs sur les relations plus informelles et encore peu étudiées.

Dans son ensemble, le cadre pourrait servir de plate-forme centrale en vue d'une certaine standardisation entre les différents organismes décisionnels en transport au Québec. L'usage d'indicateurs uniques pour tous les décideurs n'est certes pas possible, mais le choix des enjeux considérés et certains aspects méthodologiques pourraient être discutés et uniformisés. Une telle uniformisation de la démarche d'évaluation des projets faciliterait la prise de décision cohérente

au niveau métropolitain. De plus, cela permettrait de concentrer les efforts de chacun, ainsi que de partager et de valoriser différentes bases de données et modèles de transport.

D'un point de vue encore plus général, les concepts de la *Pieuvre* et du *Cercle de causalité* pourraient être adaptés à d'autres secteurs d'activité que les transports. La *Pieuvre* pourrait être bonifiée relativement au secteur étudié, la partie inférieure du cercle reconfigurée en fonction de cette bonification et la partie supérieure remplacée par les facteurs d'influence spécifiques à ce secteur.

## RÉFÉRENCES

- ACTU. (2003). *Les arguments économiques à l'appui du transport collectif au Canada*. Toronto, Canada.
- AEE. (2002). *Ouvrir la voie à l'élargissement de l'Union Européenne. TERM 2002. Résumé*. Copenhague, Danemark.
- Aftabuzzaman, M. (2007). Measuring traffic congestion: A critical review. *30th Australasian Transport Research Forum*. Melbourne, Australia.
- Alm, C., & Lindberg, E. (2000). *Perceived risk, feelings of safety and worry associated with different travel modes. Pilot study*. Stockholm, Suède: Kommunikationsforskningsberedningen.
- Alton, D., Adab, P., Roberts, L., & Barrett, T. (2007). Relationship between walking levels and perceptions of the local neighbourhood environment. *Archives of Disease in Childhood*, 92(1), 29-33.
- AMT. (2011). *Transports collectifs d'avenir pour la région métropolitaine de Montréal : vision 2020*. Montréal, Québec.
- Andrews, A. (1990). Fragmentation of habitat by roads and utility corridors: a review. *Australian Zoologist*, 26, 130-141.
- Andrieu, C. (2009). *Analyse statistique d'une expérience d'étude de l'éco-conduite: vers la conception d'un « éco-index »*. Mémoire de maîtrise, Université Pierre et Marie Curie, France.
- Angold, P. G. (1997). Effects of road infrastructure on nature. *3rd IENE Meeting*. Vladimir, Russie.
- Anquez, P., & Herlem, A. (2011). *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal: Causes, impacts et solutions*. Montréal, Québec: Chaire de responsabilité sociale et de développement durable, Université de Montréal.
- Apparicio, P., Dussault, G., Polese, M., & Shearmur, R. (2007). *Infrastructures de transports et développement économique local. Étude de la relation entre accessibilité continentale et croissance locale de l'emploi, Canada, 1971-2001*. Montréal, Québec: Institut national de la recherche scientifique Urbanisation, Culture et Société, Université du Québec.
- Archer, J., Fotheringham, N., Symmons, M., & Corben, B. (2008). The impact of lowered speed limits in urban and metropolitan areas. Victoria, Australia: Accident Research Centre, Monash University.

- Asaeda, A. (1994). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, 30(8), 1237-1249.
- ASDCM. (2009). *Soutenir le développement du commerce de proximité à Montréal*. Montréal, Québec. Consulté à l'adresse <http://asdc.com/index.php?id=37&mod=publications>
- ATUQ. (2009). *Impact économique des sociétés de transport collectif au Québec*. Montréal, Québec.
- Azenkot, S., Prasain, S., Borning, A., Fortuna, E., Ladner, R. E., & Wobbrock, J. O. (2011). Enhancing independence and safety for blind and deaf-blind public transit riders. Dans *Conference on Human Factors in Computing Systems* (p. 3247-3256). Vancouver, Canada.
- Babey, N., & Clivaz, C. (s. d.). *La définition d'indicateurs du développement durable : D'un problème « technique » à une remise en cause des logiques politico-administratives - Le cas de la ville du Locle (Suisse)*. Suisse. Consulté à l'adresse [http://www.unil.ch/webdav/site/ouvdd/shared/Colloque\\_2005/Communications/C\) Mise en oeuvre/C1/O. Babey et Ch. Clivaz.pdf](http://www.unil.ch/webdav/site/ouvdd/shared/Colloque_2005/Communications/C) Mise en oeuvre/C1/O. Babey et Ch. Clivaz.pdf)
- Badland, H., & Schofield, G. M. (2008). Health associations with transport-related physical activity and motorized travel to destinations. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2(2), 77-90.
- Bailly, J.-P., & Heurgon, E. (2001). *Nouveaux rythmes urbains et organisation des transports*. Paris, France: Études et Prospective.
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15, 73-80.
- Barcelo, M. (1999). Des indicateurs de la qualité environnementale urbaine. Dans INRS-Urbanisation (Éd.), *Les indicateurs de positionnement (Benchmarking) des métropoles : besoins et potentialités en contexte montréalais. Actes du colloque*. (p. 69-82). Montréal, Québec.
- Barjonet, P., Gezentsvey, M., & Mores, C. (2010). Perception des risques et choix du mode de transport. Approche conceptuelle et modélisation prédictive. *Flux*, 81(3), 96.
- Baron, C. (1999). Villes, croissance et exclusion. Dans J.-M. Huriot & A. Bailly (Éd.), *Villes et croissance : théories, modèles, perspectives* (p. 207-238). Paris, France: Anthropos.
- Bastien, I. (2012). *Outil de prise de décision en développement durable pour les municipalités du Québec*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec.
- Beauvais, J.-M. (1996). Impact des formes de distribution sur l'emploi et sur les flux de transport. *Transports Urbains*, 91(1), 23-28.

- Béguin, H., & Zoller, H. (1992). *Aide a la décision : l'évaluation des projets d'aménagement*. Paris, France: Economica.
- Bell, M. L., Ebisu, K., & Belanger, K. (2007). Ambient air pollution and low birth weight in Connecticut and Massachusetts. *Environmental Health Perspectives*, 115(7), 1118-1124. doi:10.1289/ehp.9759
- Benitez-Lopez, A., Alkemade, R., & Verweij, P. A. (2010). The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: a meta-analysis. *Biological Conservation*, 143(6), 1307-1316.
- Bertini, R. L. (2006). You are the traffic jam: an examination of congestion measures. *85th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington DC, USA.
- Biddle, S. J., Gorely, T., & Stensel, D. J. (2004). Health-enhancing physical activity and sedentary behavior in children and adolescents. *Journal of Sports Sciences*, 22(8), 679-701.
- Bilbao-Ubillos, J. (2008). The costs of urban congestion: Estimation of welfare losses arising from congestion on cross-town link roads. *Transport Research Part A*, 42, 1098-1108.
- Black, J. A., Paëz, A., & Suthanaya, P. A. (2002). Sustainable urban transportation: performance indicators and some analytical approaches. *Journal of Urban Planning and Development*, 128(4), 184-209.
- Black, W. R. (1996). Sustainable transportation: a US perspective. *Journal of Transport Geography*, 4, 151-159.
- Black, W. R. (2010). *Sustainable transportation: problems and solutions*. New York, USA: Guilford Press.
- Black, W. R., & Sato, N. (2007). From global warning to sustainable transport 1989-2006. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1(2), 73-89.
- BNQ. (2013). *Lutte aux îlots de chaleur urbains - Aménagement des aires de stationnement - Guide a l'intention des concepteurs*. Québec, Québec.
- Boarnet, M. G., Kim, E. J., & Parkany, E. (1998). Measuring Traffic Congestion. *77th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC, USA.
- Bonnafous, A., & Masson, S. (2003). Évaluation des politiques de transports et équité spatiale. *Revue D'économie Régionale et Urbaine*, (4), 547-572.
- Boreham, C., & Riddoch, C. (2001). The physical activity, fitness and health of children. *Journal of Sports Sciences*, 19(9), 15-29.

- Boschmann, E. E., & Kwan, M.-P. (2008). Toward socially sustainable urban transportation: progress and potentials. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2, 138-157.
- Bossel, H. (1999). *Indicators for sustainable development: Theory, Method, Applications. A report to the Balaton Group*. Winnipeg, Canada: International Institute for Sustainable Development.
- Both, J.-F. (2003). Évaluation du territoire, développement durable et indicateurs : Un pragmatisme raisonné. Dans *Développement durable et aménagement du territoire* (p. 221-238). Lausanne, Suisse: Presse polytechniques et universitaires romandes.
- Boulanger, P.-M. (2004). Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique. *Séminaire Développement Durable et Économie de L'environnement No 12*. Paris, France: Institut du développement durable et des relations internationales.
- Bouni, C. (1998). L'enjeu des indicateurs du développement durable. Mobiliser des besoins pour concrétiser des principes. *Nature, Science et Société*, 6(3), 18-26.
- Bourgeois, C. S. (1999). Démarche de Montréal TechnoVision sur la question du développement d'indicateurs. Dans INRS-Urbanisation (Éd.), *Les indicateurs de positionnement (Benchmarking) des métropoles : besoins et potentialités en contexte montréalais. Actes du colloque*. (p. 47-57). Montréal, Québec.
- Bouzouina, L., Nicolas, J.-P., & Vanco, F. (2011). Évolution des émissions de CO2 liées aux mobilités quotidiennes : une stabilité en trompe l'oeil. *Recherche Transports Sécurité*, 27(2), 128-139.
- Brilon, W., & Estel, A. (2009). A differentiated analysis of level of service F within the german highway capacity journal. *88th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC, USA.
- Briones, R., Dey, M. M., Ahmed, M., Stobutzki, I., Prein, M., & Acosta, B. O. (2004). Impact pathway analysis for research planning : the case of aquatic resources research in the WorldFish Center. *NAGA WorldFish Center Quartely*, 27(3 & 4), 51-55.
- Bullard, R. D., Johnson, G. S., & Torres, A. O. (2004). *Highway robbery : transportation racism and new routes to equity*. Cambridge, Mass. : South End Press.
- Button, K. J. (1995). Transport and UK environmental policy. Dans T. S. Gray (Éd.), *UK Environmental Policy in the 1990s* (p. 173-188). London, UK: Macmillan.
- CAA. (2012). *Coûts d'utilisation d'une automobile en 2012*. Ottawa, Canada. Consulté à l'adresse [http://caa.ca/docs/fr/CAA\\_Driving\\_Costs\\_French.pdf](http://caa.ca/docs/fr/CAA_Driving_Costs_French.pdf)

- Cambridge Systematics Inc., & Texas Transportation Institute. (2005). *Traffic Congestion and Reliability : Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation*. Cambridge, MA, USA: Federal Highway Administration.
- Camirand, H., & Dumitru, V. (2008, mai). L'activité physique chez les adultes québécois en 2005. *Zoom Santé*. Consulté à l'adresse <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/sante/bulletins/zoom-sante-200805.pdf>
- Caratti, P., Pinelli, D., & Tarzia, V. (2001). Sustainable urban transportation - SUTRA - Sustainable indicators. First interim report. Fondazione Eni Enrico Matte.
- Carsten, O. M. J., & Tate, F. N. (2005). Intelligent speed adaptation: accident savings and cost-benefit analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 407-416.
- Castillo, H., & Pitfield, D. E. (2010). ELASTIC: a methodological framework for identifying and selecting sustainable transport indicators. *Transportation Research Part D*, 15(4), 179-188.
- Caubel, D. (2007). Réduire les disparités d'accès à la ville? Une réponse concrète, mais imparfaite, par les transports collectifs. *Les Cahiers Scientifiques Du Transport*, 51, 9-36.
- Cavayas, F., & Beaudoin, Y. (2008). *Étude des biotopes urbains et périurbains de la CMM. Volets 1 et 2 : évolution des occupations du sol, du couvert végétal et des îlots de chaleur sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal*. Laval, Québec: Conseil Régional de l'Environnement de Laval.
- Cavill, N., Biddle, S., & Sallis, J.-F. (2001). Consensus statement: health enhancing physical activity for young people, Statement of the United Kingdom Expert Consensus Conference. *Pediatric Exercise Science*, 13(1), 12-25.
- CCMM. (2004). *Transport en commun: un puissant moteur du développement économique de la région métropolitaine de Montréal*. Montréal, Québec.
- CERTU. (2001). *Observatoires des plans de déplacements urbains: De la méthode aux indicateurs*. France.
- Chaire Mobilité - Polytechnique Montréal. (2011). *Rapport d'activités 2010-2011*. Montréal, Québec. Consulté à l'adresse <http://www.polymtl.ca/mobilite/pub/>
- Chepesiuk, R. (2009). Missing the dark: health effects of light pollution. *Environmental Health Perspectives*, 117(1), A20-A27.
- Clark, C., & Stansfeld, S. A. (2007). The effect of transportation noise on health and cognitive development: a review of recent evidence. *International Journal of Comparative Psychology*, 20(2), 145-158.

- CMED. (1987). *Notre avenir à tous - Rapport Brundtland*. Montréal, Québec: Éditions du Fleuve.
- CMM. (2011). *Un grand Montréal attractif, compétitif et durable : projet de Plan métropolitain d'aménagement et de développement*. Montréal, Québec: Communauté métropolitaine de Montréal.
- Cohen, A. J., Anderson, H. R., Ostro, B., Dev Pandey, K., Krzyznowski, M., Künzli, N., ... Smith, K. R. (2004). Urban air pollution. Dans *Comparative quantification of health risks* (p. 1353-1433). Genève, Suisse: World Health Organization.
- Collin, J.-P., Séguin, A.-M., & Pelletier, H. (1999). Présentation du document. Dans INRS-Urbanisation (Éd.), *Les indicateurs de positionnement (Benchmarking) des métropoles : besoins et potentialités en contexte montréalais. Actes du colloque*. (p. 7-9). Montréal, Québec.
- Conseil de la science et de la technologie. (2010). *L'innovation dans la chaîne logistique des marchandises*. Québec, Québec: Gouvernement du Québec.
- CTD. (2005). *Defining sustainable transportation*. Winnipeg, Canada.
- Cushman, S. A. (2006). Effects of habitat loss and fragmentation on amphibians: a review and prospectus. *Biological Conservation*, 128(2), 231-240.
- D'este, G. M., Zito, R., & Taylor, M. A. P. (1999). Using GPS to measure traffic system performance. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 14, 255-265.
- Dalvi, M. Q., & Martin, K. M. (1976). The measurement of accessibility: some preliminary results. *Transportation*, 5(1), 17-42.
- Daniels, E. J., Carpenter, J. A., Duranceau, C., Fisher, M., Wheeleret, C., & Winlow, G. (2007). Sustainable end-of-life vehicle recycling: R&D collaboration between industry and the U.S. DOE. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 56(8), 28-32.
- Davis, A., Valsecchi, C., & Fergusson, M. (2007). *Unfit for purpose : how car use fuels climate change and obesity*. London, UK: Institute for European Environmental Policy.
- De Gaujelac, V. (2005). *La société malade de la gestion. Idéologie gestionnaire, pouvoir managérial et harcèlement social*. Paris, France: Éditions du Seuil.
- De Villers, J., & Reniers, J.-M. (2000). *Élaboration et application d'un set d'indicateurs pour un développement durable des transports en Belgique. Seconde partie : Description méthodologique, application et évaluation des indicateurs*. Bruxelles, Belgique: Centre d'études économiques et sociales de l'environnement, Université Libre de Bruxelles.

- Deakin, E. (2001). Sustainable development and sustainable transportation: strategies for economic prosperity, environmental quality, and equity. *IURD Working Paper Series*. Berkeley, Ca, USA: Institute of Urban and Regional Development.
- Degobert, P. (1992). *Automobile et pollution*. Paris, France: Éditions Technip.
- Delcan, iTRANS, & Conseillers ADEC. (2005). Costs of Congestion in Canada's Transportation Sector. Affaires environnementales, Transports Canada.
- Dell'Olio, L., Ibeas, A., & Cecin, P. (2010). Modelling user perception of bus transit quality. *Transport Policy*, 17(6), 388-397.
- Développement durable et territoires. (2002). Dossier 2: Gouvernance locale et développement durable. *Développement Durable et Territoires, Dossier 2*. Consulté à l'adresse <http://developpementdurable.revues.org/1068>
- Di Gallo, A., Barton, J., & Parry-Jones, W. L. (1997). Road traffic accidents: early psychological consequences in children and adolescents. *The British Journal of Psychiatry*, 170, 358-362.
- Diamond, J. (2009). *Effondrement : comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*. (Folio essais, Éd.). Paris, France: Gallimard.
- Diaz, R. B. (1999). Impacts of rail transit on property values. *Business and Community Development*.
- Dibbelt, J., Pajor, T., Strasser, B., & Wagner, D. (2013). Intriguingly simple and fast transit routing. Dans LNCS (Éd.), *Southern Economic Association (SEA)* (Vol. 7933, p. 43-54). Tampa, FL, USA: Springer.
- Direction de santé publique de Montréal. (2006). *Rapport annuel 2006 sur la santé de la population. Le transport urbain, une question de santé*. Montréal, Québec: Agence de la santé et des services sociaux de Montréal, Gouvernement du Québec. Consulté à l'adresse [http://www.dsp.santemontreal.qc.ca/publications/publications\\_resume.html?tx\\_wfqbe\\_pil\[id\]=212](http://www.dsp.santemontreal.qc.ca/publications/publications_resume.html?tx_wfqbe_pil[id]=212)
- Dobranskyte-Niskota, A., Perujo, A., Jesinghaus, J., & Jensen, P. (2009). *Indicators to assess sustainability of transport activities - Part two*. Ispra, Italy: Institute for Environment and Sustainability, European Commission.
- Dore, M. H. I. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environmental International*, 31(8), 1167-1181.
- Douthwaite, B., Alvarez, S., Cook, S., Davies, R., George, P., Howell, J., ... Rubiano, J. (2007). Participatory impact pathways analysis: A practical application of program theory in research-for-development. *The Canadian Journal of Program Evaluation*, 22(2), 127-159.

- Downs, A. (2004). *Still stuck in traffic: Coping with peak-hour traffic congestion*. Washington DC, USA: Brookings Institution Press.
- Dwyer, J. F., McPherson, F. G., Schroeder, H. W., & Rowntree, R. A. (1992). Assessing the benefits and costs of the urban forest. *Journal of Arboriculture*, 18(5).
- Dziekan, K., & Kottenhof, K. (2007). Dynamic at-stop real-time information displays for public transport: effects on customers. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(6), 489-501.
- Edwards, R. D. (2008). Public transit, obesity, and medical costs: assessing the magnitudes. *Preventive Medicine*, 46, 14-21.
- Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686-688.
- Environnement Canada. (2007). *Rapport d'étape quinquennal : standards pancanadiens relatifs aux particules et à l'ozone*. Gatineau, Québec: Gouvernement du Canada.
- Environnement Canada. (2010). *Données sur les émissions de polluants atmosphériques. Inventaire national des rejets de polluants*. Gouvernement du Canada. Consulté 27 novembre 2013, à l'adresse <http://www.ec.gc.ca/inrp-npri/donnees-data/ap/index.cfm?lang=Fr>
- Environnement Canada. (2013). *Les pluies acides. Air, Enjeux de pollution*. Gouvernement du Canada. Consulté 26 novembre 2013, à l'adresse <http://www.ec.gc.ca/air/default.asp?lang=Fr&n=AA1521C2-1>
- EPA. (2011). *Guide to sustainable transportation performance measures*. USA Government.
- Ericsson, E. (2001). Independent driving pattern factors and their influence on fuel use and exhaust emission factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(5), 325-345.
- Esri. (2014). *ArcGIS Desktop*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute. Consulté à l'adresse <https://www.arcgis.com/features/>
- Ettema, D., & Verschuren, L. (2007). Multitasking and value of travel time savings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 19-25.
- Evans, R., Guy, S., & Marvin, S. (2001). Views of the city: multiple pathways to sustainable transport futures. *Local Environment*, 6(2), 121-133.
- Fedra, K. (2004). Sustainable urban transportation: a model-based approach. *Cybernetics and Systems : An International Journal*, 35(5-6), 455-485.

- Feitelson, E. (2002). Introducing environmental equity dimensions into the sustainable transport discourse : issues and pitfalls. *Transportation Research Part D*, 7, 99-118.
- Fernandez-Sanchez, G., & Rodriguez-Lopez, F. (2010). A methodology to identify sustainability indicators in construction project management : application to infrastructure projects in Spain. *Ecological Indicators*, 1, 193-1201.
- Ferris, B., Watkins, K., & Borning, A. (2010). OneBusAway: results from providing real-time arrival information for public transit. *Conference on Human Factors in Computing Systems*. Atlanta, GA, U.S.A.
- Fléchais, S. (2011). *Modélisation des effets de la végétalisation en milieu urbain sur les eaux de ruissellement dirigées à l'égout*. Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, Québec.
- Forkenbrock, D. J., Benschhoff, S., & Weisbrod, G. E. (2001). *Assessing the social and economic effects of transportation projects* (Vol. B25.19). Washington DC, USA: National cooperative highway research program, Transportation research Board.
- Fries, R., Dunning, A., & Chowdhury, M. (2009). Traveler's value of real-time transit information. *2009 Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC, USA.
- Gagné, R., & Haarman, A. (2011). *Les infrastructures publiques au Québec : Évolution et investissements et impact sur la croissance de la productivité*. Montréal, Québec: Centre sur la productivité et la prospérité de HEC Montréal.
- Garant, D. (2009). *La problématique des surverses dans l'agglomération montréalaise : les aménagements alternatifs et complémentaires aux bassins de rétention*. Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- Garber, N. J., & Ehrhart, A. A. (2000). Effect of speed, flow, and geometric characteristics on crash frequency for two-lane highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1717, 76-83.
- Gautier, C., & Valluy, J. (1998). Générations futures et intérêt général. Éléments de réflexion à partir du débat sur le « développement durable ». *Politix*, 11(2), 7-36.
- Gehl, J., & Gemzoe, L. (2004). *Public spaces - Public life* (3<sup>e</sup> éd.). Copenhagen, Danemark: Danish Architectural Press & the Royal Danish Academy of Fine Arts, School of Architecture Publishers.
- Gendron, C., & Revéret, J.-P. (2000). Le développement durable. *Économies et Sociétés, Série F*, D(37), 111-124.

- Geurs, K. T., Boon, W., & Van Wee, B. (2009). Social impacts of transport: literature review and the state of the practice of transport appraisal in the Netherlands and the United Kingdom. *Transport Reviews*, 29(1), 69-90.
- Geurs, K. T., & Ritsema van Eck, J. R. (2001). *Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transport scenarios, and related social and economic impacts*. Bilthoven, The Netherlands: National Institute of Public Health and the Environment, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment.
- Giguère, M. (2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains : revue de littérature. 2009*. Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut national de santé publique du Québec, Gouvernement du Québec.
- Gilbert, R., Irwin, N., Hollingworth, B., & Blais, P. (2002). *Sustainable transportation performance indicators (STPI) project. Report on phase 3*. Winnipeg, Canada: Centre pour un transport durable.
- Giorgi, L. (2003). Mobilité durable. Enjeux, possibilités et conflits. Le regard des sciences sociales. *Revue Internationale Des Sciences Sociales*, 2(176), 201-205.
- Glanz, T. A. (2011). *Walkability, social interaction, and neighborhood design*. Thèse de doctorat, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, USA.
- Godwin, K. S., Hafner, S. D., & Buff, M. F. (2003). Long-term trends in sodium and chloride in the Mohawk River, New York: the effect of fifty years of road-salt application. *Environmental Pollution*, 124(2), 273-281.
- Golub, A., & Martens, K. (2013). Assessing benefit distribution of transportation investment programs: a proposal and its application. *13th World Conference on Transportation Research*. Rio de Janeiro, Brazil.
- Goodwin, P., Hallett, S., Kenny, F., & Stokes, G. (1991). *Transport: The New Realism*. Oxford, UK: Rees Jeffreys Road Fund.
- Google. (s. d.). *Google developers*. Consulté 13 septembre 2014, à l'adresse <https://developers.google.com/maps/?hl=FR>
- Google. (2014). *Chrome Navigateur*. Consulté à l'adresse <https://www.google.com/chrome/browser/>
- Gourvil, L., & Joubert, F. (2004). *Évaluation de la congestion routière dans la région de Montréal*. Montréal, Québec: Gouvernement du Québec.
- Gouvernement du Québec. (2004). *Plan de développement durable du Québec, Document de consultation*. Québec, Québec.

- Gouvernement du Québec. (2007). *Stratégie gouvernementale de développement durable 2008-2013*. Québec, Québec.
- Gouvernement du Québec. (2008). *Plan d'action 2006-2012. Le Québec et les changements climatiques, un défi pour l'avenir*. Québec, Québec.
- Gouvernement du Québec. (2011). *Plan d'action 2011-2020 sur les véhicules électriques*. Québec, Québec.
- Gouvernement du Québec, ISQ, & MDDEP. (2012). *Indicateurs de suivi de la Stratégie gouvernementale de développement durable 2008-2013*. Québec, Québec.
- Gudmundsson, H. (2002). The role of performance indicators in sustainable transport policy. Dans K. C. P. Wang, G. Xiao, L. Nie, & H. Yang (Éd.), *2002 International Conference on Traffic and Transportation Studies* (p. 33-40). Guilin, China: American Society of Civil Engineers.
- Gudmundsson, H. (2003). Donner un sens aux concepts. La mobilité durable et les systèmes d'indicateurs dans le domaine de la politique des transports. *Revue Internationale Des Sciences Sociales*, 2(176), 221-242.
- Gudmundsson, H., & Sorensen, C. H. (2011). The use and influence of indicators in european sustainable transport policy. *ETC 2011*. Glasgow, UK. Consulté à l'adresse [http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:72137/datastreams/file\\_6320237/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:72137/datastreams/file_6320237/content)
- Guy, S., & Marvin, S. (1999). Towards a new logic of transport planning? *Transport Planning Review*, 70(2), 139-148.
- Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2007). *Vehicle propulsion systems*. New York, USA: Springer.
- Haddington, P., & Rauniomaa, M. (2011). Technologies, multitasking, and driving: attending to and preparing for a mobile phone conversation in a car. *Human Communication Research*, 37(2), 223-254.
- Hall, R. W., & Vyas, N. (2000). Buses as a traffic probe: demonstration project. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1731, 96-103.
- Handy, S., Cao, X., & Mokhtarian, P. (2005). Correlation or causality between the built environment and travel behavior? Evidence from Northern California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(6), 427-444.
- Handy, S. L. (2002). Accessibility vs mobility : enhancing strategies for addressing automobile dependence in the U.S. *European Conference of Ministers of Transport*. Paris, France.
- Hardi, P., & Barg, S. (1997). La mesure du développement durable : étude des pratiques en vigueur. *Institut International Du Développement Durable, Hors-Série*(17), 129.

- Hardy, D. K. (2011). Sustainability 101: a primer for ITE members. *ITE Journal*, 81(4), 28-34.
- Hasse, J. E., & Lathrop, R. G. (2003). Land resource impact indicators of urban sprawl. *Applied Geography*, 23(2-3), 159-175.
- Héran, F. (2003). *Commerces de centre-ville et de proximité et modes non motorisés. Rapport final no 4841*. Lille, France: Institut Fédératif de Recherche sur les Economies et les Sociétés Industrielles.
- Hille, J. (1997). The concept of environmental space: implications for policies, environmental reporting and assessments. Copenhagen, Denmark: AEE.
- Hood, C. (2006). Gaming in targetworld: the targets approach to managing british public services. *Public Administration Review*, 66(4), 515-521.
- Horan, T. A., Abhichandani, T., & Rayalu, R. (2006). Assessing User Satisfaction of E-Government Services: Development and Testing of Quality-in-Use Satisfaction with Advanced Traveler Information Systems (ATIS). *39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Koloa, HI, USA: IEEE.
- ifu Hamburg GmbH. (2013). *e!sankey*. Hamburg, Allemagne. Consulté à l'adresse [www.e-sankey.com/en/](http://www.e-sankey.com/en/)
- Inrix inc. (2014). *INRIX traffic scorecard*. Consulté 25 mai 2014, à l'adresse <http://inrix.com/scorecard/default.asp>
- ISQ. (2009). *Données sociales du Québec. Édition 2009*. Gouvernement du Québec. Consulté à l'adresse <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/conditions-vie-societe/donnees-sociales09.pdf#page=175>
- Jacobs, J. (1961). *The death and life of great american cities*. New York, USA: Random House.
- Jemelin, C., Pflieger, G., Barbey, J., & Kaufmann, V. (2007). Inégalités sociales d'accès: quels impacts des politiques locales de transport? *EspacesTemps.net*. Consulté à l'adresse <http://www.espacestemp.net/articles/inegalites-sociales-drsquoacces-quels-impacts-des-politiques-locales-de-transport/>
- Jenerette, G. D., Harlan, S. L., Brazel, A., Jones, N., Larsen, L., & Stefanov, W. L. (2007). Relational relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem. *Landscape Ecology*, 22(3), 353-365.
- Jeon, C. M., & Amekudzi, A. (2005). Addressing sustainability in transportation systems: definitions, indicators, and metrics. *Journal of Infrastructure Systems*, 31, 31-50.

- Jeon, C. M., Amekudzi, A., & Guensler, R. L. (2013). Sustainability assessment at the transportation planning level: performance measures and indexes. *Transport Policy*, 25, 10-21.
- Jiao, J., & Dillivan, M. (2013). Transit deserts: the gap between demand and supply. *Journal of Public Transportation*, 16(3), 23-39.
- Joffe, M., & Mindell, J. (2002). A framework for the evidence base to support health impact assessment. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 56(2), 132-138.
- Johnston, R. A., & Gao, S. (2009). *Public versus private mobility for the poor: Transit improvements versus increased car ownership in the Sacramento region*. San Jose, CA, USA: Mineta Transportation Institute.
- Johnston, R. J., Gregory, D., Pratt, G., & Watts, M. (2000). *The dictionary of human geography* (4e éd.). Oxford, UK: Wiley.
- Jones, S., Tefe, M., & Appiah-Opoku, S. (2013). Proposed framework for sustainability screening of urban transport projects in developing countries: a case study of Accra, Ghana. *Transport Research Part A*, 49, 21-34.
- Joumard, R. (2009). *Le concept de gouvernance. Rapport no LTE0910*. Bron cedex, France: Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité.
- Joumard, R., & Gudmundsson, H. (2010). *Indicators of environmental sustainability in transport: an interdisciplinary approach to methods*. (R. Joumard & H. Gudmundsson, Éd.). Bron cedex, France: Les collections de l'INRETS.
- Joumard, R., Gudmundsson, H., & Folkesson, L. (2011). Framework for assessing indicators of environmental impacts in the transport sector. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2242, 55-63.
- Jozsa, A., & Brown, D. (2005). *Neighborhood sustainability indicators: report on a best practice*. Montréal, Québec: McGill University.
- Karraker, N. E., Gibbs, J. P., & Vonesh, J. R. (2007). Impacts of road deicing salt on the demography of vernal pool-breeding amphibians. *Ecological Applications*, 18(3), 724-734.
- Katsouyanni, K. (2003). Ambient air pollution and health. *British Medical Bulletin*, 68(1), 143-156.
- Kennedy, C. A. (2002). A comparison of the sustainability of public and private transportation systems: study of the Greater Toronto Area. *Transportation*, 29(4), 459-493.
- Kilpatrick, J. A., Throupe, R. L., Carruthers, J. I., & Krause, A. (2007). The impact of transit corridors on residential property values. *JRER*, 29(3), 303-320.

- Koenig, G. (1974). Théorie économique de l'accessibilité urbaine. *Revue Économique*, 25(2).
- Lachance, G., Beaudoin, Y., & Guay, F. (2006). Étude des îlots de chaleur montréalais dans une perspective de santé publique. *Bulletin D'information En Santé Environnementale*, 17(3), 1-5.
- Laherrere, J. (2001). Estimates of oil reserves. *EMF/IEA/IEW Meeting IIASA*. Laxenburg, Austria.
- Larousse. (s. d.). Mobilité. Dans *Dictionnaire Larousse en ligne*. Paris, France: Éditions Larousse. Consulté à l'adresse <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/mobilit%C3%A9/51890?q=mobilit%C3%A9#51768>
- Lauriol, J. (2004). Le développement durable à la recherche d'un corps de doctrine. *Revue Française de Gestion*, 5(152), 137-150.
- Lautso, K. (2004). *The Propolis Approach to Urban Sustainability – Theory and Results form Seven European Case Cities* (p. 17). Strasbourg, France: Association for European Transport.
- Leck, E., Bekhor, S., & Gat, D. (2008). Equity impacts of transportation improvements on core and peripheral cities. *Journal of Transport and Land Use*, 2(1), 153-182.
- Lee, W.-K., Kin, C., & Kuo, F.-Y. (2008). Developing a sustainability evaluation system in Taiwan: infrastructure investment decisions. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2(3), 194-212.
- Leermakers, E. A., Dunn, A. L., & Blair, S. N. (2000). Exercise management of obesity. *Medical Clinics of North America*, 84(2), 419-440.
- Lerman, R. I., & Yitzhaki, S. (1984). A note on the calculation and interpretation of the Gini index. *Economics Letters*, 15, 363-368.
- Les contributeurs d'OpenStreetMap. (2012). *OpenStreetMap*. Consulté 15 juillet 2012, à l'adresse [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)
- Levinson, H. S., & Lomax, T. (1996). Developing a travel time congestion index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1564, 1-10.
- Lewis, P., & Torres, J. (2010). Les parents et les déplacements entre la maison et l'école primaire : quelle place pour l'enfant dans la ville? *L'enfant et La Ville*, (12), 44-64. Consulté à l'adresse <http://www.erudit.org/revue/efg/2010/v/n12/044392ar.html?vue=integral>
- Lindley, J. A. (1987). Urban freeway congestion: quantification of the problem and effectiveness of potential solutions. *ITE Journal*, 57(1), 27-32.

- Lippmann, M. (1989). Health effects of ozone: a critical review. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 39(5), 672-695.
- Litman, T. (2007a). Developing indicators for comprehensive and sustainable transport planning. *Transport Research Record*, 2017, 10-15.
- Litman, T. (2007b). Evaluating the quality of accessibility for transportation planning. 2008 *Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC, USA.
- Litman, T. (2010). *Well measured : developing indicators for sustainable and livable transport planning*. Victoria, Canada: Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T. (2011). *Economic value of walkability*. Victoria, Canada: Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T. (2013). *Evaluating transportation equity : Guidance for incorporating distributional impacts in transportation planning*. Victoria, Canada: Victoria Transport Policy Institute. Consulté à l'adresse [www.vtppi.org](http://www.vtppi.org)
- Litman, T., & Brenman, M. (2012). A new social equity agenda for sustainable transportation. 2012 *Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC, USA.
- Litman, T., & Burwell, D. (2006). Issues in Sustainable Transportation. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(4), 331-347.
- Lobstein, T., Baur, L., & Uauy, R. (2004). Obesity in children and young : a crisis in public health. *Obesity Reviews*, 5(s1), 4-85.
- Lomax, T., Turner, S., & Shunk, G. (1997). *Quantifying Congestion*. Washington DC, USA: National Academy Press.
- Lorenz, M. O. (1905). Methods of measuring the concentration of wealth. *Publications of the American Statistical Association*, 9(70), 209-210.
- Loukaitou-Sideris, A. (2005). Is it safe to walk here? Design and policy responses to women's fear of victimization in public places. Dans *Research on Women's Issues in Transportation* (p. 102-112). Chicago, IL, USA: Transportation Research Board of the National Academies.
- Loukaitou-Sideris, A., Liggett, R., & Iseki, H. (2002). The geography of transit crime - Documentation and evaluation of crime incidence on and around the Green line stations in Los Angeles. *Journal of Planning Education and Research*, 22(2), 135-151.
- Loustau, P. (2009). *Modélisation des temps d eparcours sur un réseau routier à l'aide de données de véhicules flottants. Département de mathématiques et génie industriel. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Québec.*

- Loustau, P., Grasset, V., Morency, C., & Trépanier, M. (2010). Comparing Floating Car Data and Carsharing GPS Data for Travel Time Assessment. *12th World Conference on Transport Research*. Lisbonne, Portugal.
- Maloutas, T. (2010). Promoting social sustainability: the case of Athens. *City: Analysis of Urban Trends, Culture, Theory, Policy, Action*, 7(2), 167-181.
- Mangin, D. (2004). *La ville franchisée, Formes et structures de la ville contemporaine* (p. 398). Paris, France: Éditions de La Villette.
- Maoh, H., & Kanaroglou, P. (2009). A tool for evaluating urban sustainability via integrated transportation and land use simulation models. *Environnement Urbain / Urban Environment*, 3, 28-46.
- Marchal, M. (2009, août 12). Premier aperçu des nouveaux autobus articulés à la STM. *Journal Le Métro*. Montréal, Québec.
- Mardsen, G., Kelly, C., & Snell, C. (2006). Selecting Indicators for Strategic Performance Management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1956, 21-29.
- Marsden, G. (2007a). *Designing a monitoring strategy to support sustainable transport goals*. Leeds, UK: Institute for Transport Studies, The University of Leeds.
- Marsden, G. (2007b). *Designing a monitoring strategy to support sustainable transport goals. Distillate project* (p. 28). Leeds, UK: Institute for Transport Studies, The University of Leeds. Consulté à l'adresse [www.distillate.ac.uk](http://www.distillate.ac.uk)
- Marsden, G., Kelly, C., & Snell, C. (2006). Selecting indicators for strategic performance management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1956, 21-29.
- Marsden, G., Kimble, M., Nellthorp, J., & Kelly, C. (2010). Sustainability assessment: the definition deficit. *International Journal of Sustainable Transportation*, 4(4), 189-211.
- Marshall, S. (2001). The challenge of sustainable transport. Dans A. Layard, S. Davoudi, & S. Batty (Éd.), *Planning for a Sustainable Future*. (p. 131-147). London, UK: Spon Press.
- Martens, K., Golub, A., & Robinson, G. (2012). A justice-theoretic approach to the distribution of transportation benefits: implications for transportation planning practices in the United States. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(2), 684-695.
- Massey, D. S., & Denton, N. A. (1988). The dimensions of residential segregation. *Social Forces*, 67(2), 281-315.

- May, A. D. (2003). *Pour des stratégies de développement durable des transports et de l'aménagement urbain: guide pour les décideurs. Livrable 15 du projet Prospects*. Énergie, l'environnement et le développement durable de la Commission Européenne.
- McMichael, A. J., Woodruff, R. E., & Hales, S. (2006). Climate change and human health: Present and future risks. *Lancet*, 367(9513), 859-869.
- MDDEP. (2002). *Le marché du carbone*. Gouvernement du Québec. Consulté 26 juin 2013, à l'adresse <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/changements/carbone/index.htm>
- MDDEP. (2009). *Plan d'action de développement durable 2008-2013*. Québec, Québec: Gouvernement du Québec.
- MDDEP. (2011). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2009 et leur évolution depuis 1990*. Québec, Québec: Gouvernement du Québec.
- MDDEP. (2012). *Guide d'inventaire des émissions de GES d'un organisme municipal. Programme Climat municipalités*. Québec, Québec.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth*. New York, USA: Universe Books.
- Meyer, M., & Miller, E. (2001). *Urban transportation planning: a decision-oriented approach* (2<sup>e</sup> éd.). New York, USA: McGraw-Hill Higher Education.
- Michaud, D. S., Fidell, S., Pearsons, K., Campbell, K. C., & Keith, S. E. (2007). Review of field studies of aircraft noise-induced sleep disturbance. *Journal of the Acoustic Society of America*, 121(1), 32-41.
- Microsoft. (2014a). *Excel*. Consulté 13 septembre 2014, à l'adresse <http://office.microsoft.com/fr-ca/excel/>
- Microsoft. (2014b). *Visual FoxPro developer center*. Consulté 13 septembre 2014, à l'adresse <http://msdn.microsoft.com/en-us/vfoxpro/bb190225.aspx>
- MNRF. (2006). *Stratégie énergétique du Québec 2006-2015*. Québec, Québec: Gouvernement du Québec.
- Mohan Rao, A., & Ramachandra Rao, K. (2012). Measuring urban traffic congestion: a review. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 2(4), 286-305.
- Moons, P., Budts, W., & De Geest, S. (2006). Critique on the conceptualisation of quality of life: a review and evaluation of different conceptual approaches. *International Journal of Nursing Studies*, 43(7), 891-901.

- Morency, C., & Demers, M. (2012). *The relevance of causal chains for planning and evaluating sustainable transport policies*. Notes de recherche, Chaire mobilité, Montréal, Québec. Consulté à l'adresse [www.polymtl.ca/mobilite/pub](http://www.polymtl.ca/mobilite/pub)
- Morency, C., Demers, M., & Poliquin, É. (2014). Shifting short motorized trips to walking: the potential of active transportation for physical activity in Montreal. *Journal of Transport & Health*, 1(2), 100-107.
- Morency, P., & Cloutier, M.-S. (2005). Distribution géographique des blessés de la route sur l'Île de Montréal (1999-2003). Montréal, Québec: Direction de Santé Publique de Montréal, Gouvernement du Québec.
- MTQ. (2006). *La politique québécoise du transport collectif. Pour offrir de meilleurs choix aux citoyens*. Québec, Québec: Gouvernement du Québec.
- MTQ. (2009a). *Plan d'action de développement durable 2009-2013*. Québec, Québec: Gouvernement du Québec.
- MTQ. (2009b). *Politique sur le transport routier des marchandises 2009-2014*. Québec, Québec: Gouvernement du Québec.
- MTQ. (2009c). *Stratégie de développement durable 2009-2013*. Québec, Québec: Gouvernement du Québec.
- MTQ. (2013). *Développement durable: Un acteur clé du développement durable*. Gouvernement du Québec. Consulté 19 novembre 2013, à l'adresse [https://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/ministere/ministere/developpement\\_durable](https://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/ministere/ministere/developpement_durable)
- MTQ. (2014). *Stratégie nationale de mobilité durable : Une approche responsable et novatrice*. Québec, Québec: Gouvernement du Québec.
- Munck, I. A., Bennett, C. M., Camilli, K. S., & Nowak, R. S. (2010). Long-term impact of de-icing salts on tree health in the Lake Tahoe Basin: environmental influences and interactions with insects and diseases. *Forest Ecology and Management*, 260(7), 1218-1229.
- Nesbit, S. M., Conger, J. C., & Conger, A. J. (2007). A quantitative review of the relationship between anger and aggressive driving. *Aggression and Violent Behavior*, 12(2), 156-176.
- Neufeld, A. J., & Mokhtarian, P. L. (2012). *A survey of multitasking by Northern California commuters: Description of the data collection process*. Davis, CA, USA: Institute of Transportation Studies, University of California.
- Nichols, J. E., Garrick, N. W., & Atkinson-Palombo, C. (2009). A framework for developing indicators of sustainability for transportation planning. *2009 Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC, USA.

- Nicolas, J.-P., Bonnel, P., Cabrera, J., Godinot, C., Homocianu, M., Routhier, J.-L., ... Zuccarello, P. (2009). *Rapport final du projet Simbad*. Lyon, France: Laboratoire d'Économie des Transports.
- Nicolas, J.-P., Pochet, P., & Poimboeuf, H. (2002). Mobilité urbaine et développement durable : quels outils de mesure pour quels enjeux? *Les Cahiers Scientifiques Du Transport*, 41, 53-76.
- Nicolas, J.-P., Pochet, P., & Poimboeuf, H. (2003). Towards sustainable mobility indicators: application to the Lyons conurbation. *Transport Policy*, 10, 197-208.
- Nisbet, A. (2000). Transport planning performance indicators, democracy and best value. *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, 139, 91-102.
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Stamp, A., Zah, R., & Althaus, H.-J. (2010). Contribution of Li-Ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 44(17), 6550-6556.
- OCDE. (1997). *Eco-Efficiency in Transport*. Paris, France.
- OCDE. (1999). *Indicators for the integration of environmental concerns into transport policies*. Environment directorate. Paris, France.
- OCDE. (2006). *L'impact environnemental des transports. Comment le découpler de la croissance économique* (Vol. 55314). Paris, France: Les éditions de l'OCDE.
- Office de l'efficacité énergétique. (2009a). *Évolution de l'efficacité énergétique au Canada, 1990 à 2004. Ressources naturelles Canada, Ottawa*. Gouvernement du Canada. Consulté 28 novembre 2013, à l'adresse <http://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistiques/evolution06/chapitre6.cfm?attr=0>
- Office de l'efficacité énergétique. (2009b). *Guide de consommation de carburant 2009*. Gouvernement du Canada. Consulté à l'adresse [www.nrcan.gc.ca](http://www.nrcan.gc.ca)
- Oldenburg, R. (1999). *The great good place: cafés, coffee shops, bookstores, bars, hair salons, and other hangouts at the heart of a community* (3<sup>e</sup> éd.). Marlowe.
- Orfeuil, J.-P. (2003). La mobilité habituelle. Dans J. Brun, M. Segaux, & J. C. Driant (Éd.), *Dictionnaire de l'habitat et du logement*. Paris, France: Armand Colin.
- Overseas Development Institute. (2009). *Planning tools: problem tree analysis*. Consulté à l'adresse <http://www.odi.org.uk/publications/5258-problem-tree-analysis>
- Owens, S. (1995). From « predict and provide » to « predict and prevent »? Pricing and planning in transport policy. *Transport Policy*, 2(1), 43-51.

- Pagotto, C. (1999). *Etude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures, en domaine routier*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Poitiers, France.
- Pauley, S. M. (2004). Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical Hypotheses*, 63(4), 588-596.
- Peirce, C. S. (1998). *The essential Peirce*. (Peirce edition Project, Éd.). Bloomington, IN, USA: Indiana University Press.
- Perret, B. (2002). Indicateurs sociaux : état des lieux et perspectives. *Les Papiers Du CERC*, 2002(01), 1-37.
- Pileri, P., & Pucci, P. (2009). Milan, entre air et bruit. Dans *Des indicateurs pour gouverner: boussoles ou miroirs déformants?* (p. 199-218). Paris, France: PUCA coll. Recherches.
- Pollution Probe. (2002). *L'abécédaire du smog*. Toronto, Canada. Consulté à l'adresse <http://www.pollutionprobe.org/report/smogprimerfrench.pdf>
- Preston, J., & Rajé, F. (2007). Accessibility, mobility and transport – related social exclusion. *Journal of Transport Geography*, 15, 151-160.
- Processing Development Team. (2014). *Processing*. Consulté à l'adresse <http://processing.org/>
- Programme des nations unies pour le développement. (1997). *La bonne gouvernance et le développement humain durable*.
- Puel, H. (1989). *L'économie au défi de l'éthique: essai d'éthique économique*. Paris, France: Éditeurs Cujas/Cerf.
- Quantum GIS Development Team. (2014). Quantum GIS Système d'information géographique libre et open source. Open Source Geospatial Foundation Project. Consulté à l'adresse <http://qgis.osgeo.org>
- Rahbi, P. (2009). *La part du colibri. L'espèce humaine face a son devenir*. La Tour d'Aigues, France: Éditions de l'aube.
- Ramage-Morin, P. L. (2008). *Décès dus aux accidents de véhicules à moteur*. Statistique Canada. Consulté 28 novembre 2013, à l'adresse <http://www.statcan.gc.ca/pub/82-003-x/2008003/article/5202433-fra.htm>
- Ramakrishna, D. M., & Viraraghavan, T. (2005). Environmental impact of chemical deicers: a review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 166(1-4), 49-63.

- Ramani, T. L., Zietsman, J., Potter, J., & Smith Reeder, V. (2012). A guidebook for sustainability performance measurement for transportation agencies. *2012 Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC, USA.
- Rassafi, A. A., & Vaziri, M. (2007). Assessment of modal transportation sustainability: application of data envelopment and concordance analyses. *Iranian Journal of Science & Technology*, *31*(B2), 179-193.
- Raux, C., & Souche, S. (2001). Comment concilier efficacité et équité dans la politique tarifaire des transports? Le cas de TEO à Lyon. *Les Cahiers Scientifique Des Transport*, *40*, 27-52.
- Rawls, J. (1971). *A theory of justice* (p. 607). Cambridge, MA, USA: Harvard University Press.
- Reitzes, D. C., Mutran, E. J., & Verrill, L. A. (1995). Activities and self-esteem: continuing the development of activity theory. *Reserach on Aging*, *17*(3), 260-277.
- Remarais, F.-H. (2004). *Les coûts et recettes associés aux réseaux routiers de l'Île de Montréal et de la région métropolitaine de recensement de Montréal pour 1999*. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Québec.
- Richardson, B. C. (2005). Sustainable transport : analysis frameworks. *Journal of Transport Geography*, *13*(1), 29-39.
- Rodier, C., Abraham, J. E., Dix, B. N., & Hunt, J. D. (2010). *Equity analysis of land use and transport plans using an integrated spatial model* (Vol. 09-08). San José, CA, USA: Mineta Transportation Institute, San José State University.
- Rodrigues da Silva, A. N., Costa, M. da S., & Ramos, R. A. R. (2010). Development and application of I\_SUM: an index of sustainable urban mobility. *Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC, USA.
- Rodriguez, D. A., & Joo, J. (2004). The relationship between non-motorized mode choice and the local physical environment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *9*(2), 151-173.
- Ross, M. (1994). Automobile fuel consumption and emissions: effects of vehicle and driving characteristics. *Annual Review of Energy and the Environment*, *19*, 75-112.
- Rousval, B., & Maurin. (2008). Évaluation de l'impact des transports dans l'environnement: quels outils pour quels enjeux? *Recherche Transports Sécurité*, *100*, 169-184.
- SAAQ. (2012a). *Bilan routier 2011*. Gouvernement du Québec.
- SAAQ. (2012b). *Dossier statistique - Bilan 2011: Accidents, parc automobile et permis de conduire*. Québec, Québec: Gouvernement du Québec.

- Sachs, I. (1980). *Stratégie de l'écodéveloppement. Économie et Humanisme*. Paris, France: Ouvrières.
- Sahlqvist, S., Song, Y., & Ogilvie, D. (2012). Is active travel associated with greater physical activity? The contribution of commuting and non-commuting active travel to total physical activity in adults. *Preventive Medicine, 55*(3), 206-211.
- Samet, J. M., Dominici, F., Curriero, F., Coursac, I., & Zeger, S. L. (2000). Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994. *The New England Journal of Medicine, 343*(24), 1742-1749.
- Samet, J. M., Zeger, S. L., Dominici, F., Curriero, F., Coursac, I., Dockery, D. W., ... Zanobetti, A. (2000). *The national morbidity, mortality, and air pollution study - Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States. Report 94*. Cambridge, MA, USA: Health Effects Institute.
- Sanchez, T. W. (1998). Equity analysis of personal transportation system benefits. *Journal of Urban Affairs, 20*(1), 69-86.
- Sanchez, T. W., Stolz, R., & Ma, J. S. (2003). *Moving to equity: addressing inequitable effects of transportation policies on minorities*. Cambridge, MA, USA: The Civil Rights Project of Harvard University.
- Saunier, N., & Morency, C. (2011). Comparing data from mobile and static traffic sensors for travel time assessment. Dans I. Al-Qadi & S. Murrell (Éd.), *T&DI Congres 2011: Integrated Transportation and Development for a Better Tomorrow* (p. 1178-1187). Chicago, IL, USA: American Society of Civil Engineers.
- Saxifrage, B. (2013). *Do electric cars cause more or less climate pollution than gasoline cars? Take a look*. Vancouver Observer. Consulté 28 novembre 2013, à l'adresse <http://www.vancouverobserver.com/blogs/climatesnapshot/do-electric-cars-cause-more-or-less-climate-pollution-gasoline-cars-take-look>
- Schrank, D., Eisele, B., & Lomax, T. (2012). *TTI's 2012 Urban mobility report powered by INRIX Traffic Data*. College Station, TX, USA: Texas A&M Transportation Institute.
- Schwartz, J. (1999). Air pollution and hospital admissions for heart disease in eight U.S. counties. *Epidemiology, 10*(1), 17-22.
- Schwartz, J., & Morris, R. (1995). Air pollution and hospital admissions for cardiovascular disease in Detroit, Michigan. *American Journal of Epidemiology, 142*(1), 23-35.
- Schweitzer, L., & Stephenson, M. (2007). Right answers, wrong questions: environmental justice as urban research. *Urban Studies, 44*(2), 319-337.

- Schweitzer, L., & Valenzuela, A. (2004). Environmental injustice and transportation: the claims and the evidence. *Journal of Planning Literature*, 18(4), 383-398.
- Sen, A. K. (1973). *On economic inequality*. Oxford, UK: Clarendon Press.
- Shannon, C. (1951). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423, 623-656.
- Sioui, L., Morency, C., & Trépanier, M. (2013). How carsharing affects the travel behavior of households: case study of Montréal, Canada. *International Journal of Sustainable Transportation*, 7(1), 52-69.
- Sonnentag, S. (2001). Work, recovery activities, and individual well-being: a diary study. *Journal of Occupational Health Psychology*, 6(3), 196-210.
- Spellerberg, I. F. (1998). Ecological effects of roads and traffic: a literature review. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 7(5), 317-333.
- Spielmann, M., & Althaus, H.-J. (2007). Can a prolonged use of a passenger car reduce environmental burdens? Life Cycle analysis of Swiss passenger cars. *Journal of Cleaner Production*, 15(11), 1122-1134.
- Springer-Heinze, A., Hartwich, F., Henderson, J., Horton, D., & Minde, I. (2003). Impact pathway analysis: an approach to strengthening the impact orientation of agricultural research. *Agricultural System*, 78(1), 267-285.
- StataCorp. (2014). *Stata Data analysis and statistical software*. Consulté 13 septembre 2014, à l'adresse <http://www.stata.com/>
- Statistique Canada. (2014). *Tableau 1. Seuils de faible revenu (base de 1992) après impôt*. Consulté 14 septembre 2014, à l'adresse <http://www.statcan.gc.ca/pub/75f0002m/2013002/tbl/tbl01-fra.htm>
- Steg, L., & Gifford, R. (2005). Sustainable transportation and quality of life. *Journal of Transport Geography*, 13(1), 59-69.
- STM. (2009). Les résultats. *Bulletin D'information Sur La Mise À L'essai Des Bus Hybrides À La STM*, 2.
- STM. (2012a). *Plan stratégique 2020*. Montréal, Québec.
- STM. (2012b). *Programme triennal d'immobilisations 2013-2014-2015*. Montréal, Québec. Consulté à l'adresse [http://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/pti\\_13-15.pdf](http://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/pti_13-15.pdf)
- STPP. (2001). *Easing the burden: a companion analysis of the Texas Transportation Institute's congestion study*. Washington DC, USA.

- Sunyer, J., Atkinson, R., Ballester, F., Le Tertre, A., Ayres, J. G., Forastière, F., ... Katsouyanni, K. (2003). Respiratory effects of sulphur dioxide: a hierarchical multicity analysis in the APHEA 2 study. *Occupational & Environmental Medicine*, 60(8).
- Sunyer, J., Ballester, F., Le Tertre, A., Atkinson, R., Ayres, J. G., Forastiere, F., ... Katsouyanni, K. (2003). The association of daily sulfur dioxide air pollution levels with hospital admissions for cardiovascular diseases in Europe (The Apha-II study). *European Heart Journal*, 24, 752-760.
- Sustainable Transportation Indicators Subcommittee. (2009). Sustainable transportation indicators - A recommended research program for developing sustainable transportation indicators and data. *2009 Transportation Research Board Annual Meeting (Paper 09-3403)*. Washington DC, USA.
- Szeto, W. Y., & Lo, H. K. (2006). Transportation network improvement and tolling strategies : the issue of intergeneration equity. *Transportation Research Part A*, 40, 227-243.
- Tanguay, G. A., Rajaonson, J., Lefebvre, J.-F., & Lanoie, P. (2010). Measuring the sustainability of cities: an analysis of the use of local indicators. *Ecological Indicators*, 10, 407-418.
- Taylor, M. A. P., Woolley, J. E., & Zito, R. (2000). Integration of the Global Positioning System and Geographical Information Systems for Traffic Congestion Studies. *Transportation Research Part C*, 8, 257-285.
- Teller, J., & Cremasco, V. (2009). Impact des infrastructures de transport sur les paysages ordinaires : Application au cas de l'espace périurbain liégeois en Belgique. Dans *Acte du Colloque international Environnement et transports dans des contextes différents* (p. 51-59). Ghardaïa, Algérie: ENP Éd.
- TERM. (2000). *Are we moving in the right direction? Indicators on transport and environment integration in the EU*. Environmental issues series. Copenhagen, Denmark: EEA.
- Theil, H. (1972). *Statistical decomposition analysis*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland Publishing Company.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., ... Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145-148.
- Tong, D., Merry, C. J., & Coifman, B. (2006). Traffic Information Deriving Using GPS Probe Vehicle Data Integrated with GIS. *GIS for Transportation Symposium*. Columbus, OH, USA.
- Transportation Research Board. (1997). *Toward a sustainable future: addressing the long-term effects of motor vehicle transportation on climate and ecology (Special report 251)*. Washington DC, USA: National Academy Press.

- Tsai, C. Y., & Chang, A. S. (2012). Framework for developing construction sustainability items: the example of highway design. *Journal of Cleaner Production*, 20, 127-136.
- Turner, S. M. (1992). Examination of indicators of congestion level. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1360, 150-157.
- UMQ. (2008). *Politique de mobilité et transport durables*. Québec, Québec.
- UMQ. (2010). *Plan d'action stratégique : un avenir viable pour tous les territoires du Québec*. Québec, Québec.
- UMQ. (2012). *Livre blanc municipal : l'avenir a un lieu*. Québec, Québec.
- Underwood, G., Chapman, P., Wright, S., & Crundall, D. (1999). Anger while driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 2(1), 55-68.
- Van de Walle, I. (2005). *Commerce et mobilité: l'activité commerciale face aux nouvelles politiques publiques de déplacements urbains*. Cahier de recherche no 216, Paris, France: Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de Vie.
- Van Wee, B., & Geurs, K. (2011). Discussing equity and social exclusion in accessibility evaluations. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 11(4), 350-367.
- Vandersmissen, M.-H. (2003). Mobilité, accessibilité et cohésion sociale. *Cahiers de Géographie Du Québec*, 47(131), 201-222. Consulté à l'adresse <http://id.erudit.org/iderudit/007572ar>
- Vérificateur général du Québec. (2009). *Rapport du Vérificateur général du Québec à l'Assemblée nationale pour l'année 2008-2009, Tome II* (p. 42). Québec, Québec.
- Verreault, H., Morency, C., & Saunier, N. (2011). Des espions GPS au service de la gestion des réseaux. *Dixièmes Rencontres Francophones Est-Ouest de Socio-Économie Des Transports*. Montréal, Québec.
- Verry, D., & Nicolas, J.-P. (2005). *Indicateurs de mobilité durable : de l'état de l'art à la définition des indicateurs dans le projet SIMBAD. Rapport intermédiaire no2 du projet Simbad, Simuler les MoBilités pour une Agglomération Durable*. Lyon, France: Laboratoire d'Économie des Transports.
- Vickerman, R., Spiekermann, K., & Wegener, M. (1999). Accessibility and economic development in Europe. *Regional Studies*, 33(1), 1-15.
- Viegas, J. M., & Macario, R. (2001). Acceptabilité des prix dans les systèmes de transport. *Les Cahiers Scientifiques Du Transport*, 40, 9-26.
- Vigar, G. (2000). Local « barriers » to environmentally sustainable transport planning. *Local Environment*, 5(1), 19-32.

- Ville de Laval. (2013). *Plan de mobilité active de Laval*. Laval, Québec.
- Ville de Laval, & STL. (2011). *Laval 2031 Une ville en mouvement : Plan de mobilité durable, Document de consultation*. Laval, Québec.
- Ville de Longueuil. (2012a). *Projet de plan de mobilité active*. Longueuil, Québec.
- Ville de Longueuil. (2012b). *Vision stratégique du Plan d'urbanisme : Diagnostic préliminaire, Rapport de présentation*. Longueuil, Québec.
- Ville de Longueuil. (2013). *Transports : Plan de mobilité et de transport*. Consulté 17 février 2013, à l'adresse [http://www.longueuil.ca/vw/asp/gabarits/Gabarit.asp?ID\\_CATEGORIE=2136&ID\\_MESSA\\_GE=26853&CAT\\_RAC=7](http://www.longueuil.ca/vw/asp/gabarits/Gabarit.asp?ID_CATEGORIE=2136&ID_MESSA_GE=26853&CAT_RAC=7)
- Ville de Montréal. (2005). *Plan de transport de Montréal: vision et objectifs*. Montréal, Québec.
- Ville de Montréal. (2008). *Réinventer Montréal : plan de transport*. Montréal, Québec.
- Vivien, F.-D. (2003). Jalons pour une histoire de la notion de développement durable. *Mondes En Développement*, 1(121), 1-21.
- Vuillemin, A. (2011). Le point sur les recommandations de santé publique en matière d'activité physique. *Science & Sports*, 26(4), 183-190.
- Walzer, M. (1983). *Spheres of justice: a defense of pluralism and equality*. New York, USA: Basic Books.
- Wegener, M. (2004). Overview of Land Use Transport Models. Dans D. Hensher, K. J. Button, K. Haynes, & P. Stopher (Éd.), *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems* (p. 127-146). Amsterdam, The Netherlands.
- Weisbrod, G., Vary, D., & Treyz, G. (2003). Measuring the economic costs of urban traffic congestion to business. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1839.
- Wiel, M. (1999). Mobilité, système d'interactions sociales et dynamiques territoriales. *Espace, Populations et Sociétés*, 17(2), 187-194.
- Williams, D. D., Williams, N. E., & Cao, Y. (2000). Road salt contamination of groundwater in a major metropolitan area and development of a biological index to monitor its impact. *Water Research*, 34(1), 127-138.
- Wood, L., Frank, L. D., & Giles-Corti, B. (2010). Sense of community and its relationship with walking and neighborhood design. *Social Science & Medicine*, 70(9), 1381-1390.

- Yigitcanlar, T., & Dur, F. (2010). Developing a sustainability assessment model: the sustainable infrastructure, land-use, environment and transport model. *Sustainability*, 2, 321-340.
- Zaloshnja, E., Miller, T., Romano, E., & Spicer, R. (2004). Crash costs by body part injured, fracture involvement, and threat-to-life severity, United States, 2000. *Accident Analysis & Prevention*, 36(3), 415-427.
- Zegras, C. (2006). Sustainable transport indicators and assessment methodologies. *Conference and Exhibit of the Clean Air Initiative for Latin American Cities*. Sao Paulo, Brésil.
- Zheng, J., Atkinson-Palombo, C., McCahill, C., O'Hara, R., & Garrick, N. (2011). Quantifying the economic domain of transportation sustainability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2242, 19-28.
- Zietsman, J., Ramani, T. L., Potter, J., Smith Reeder, V., & DeFlorio, J. (2011). *A guidebook for sustainability performance measurement for transportation agencies* (Vol. 708). Washington DC, USA: National cooperative highway research program, Transportation research Board.
- Zittoun, P. (2009). *Des indicateurs pour gouverner: boussoles ou miroirs déformants?* Paris, France: PUCA coll. Recherches.
- Zuindeau, B. (2006). Spatial approach to sustainable development: challenges of equity and efficacy. *Regional Studies*, 40(5), 459-470.

**ANNEXES**

## ANNEXE A      LIENS DE CAUSALITÉ

**Tableau A-1 : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Confort et services d'appoint des infrastructures.	Temps disponible et réalisation d'activités	1	Le confort et les services d'appoints peuvent réduire la concentration requise pour conduire un véhicule et rendre l'environnement plus propice à la réalisation d'autres activités lors du déplacement (appels téléphonique, travail, lectures, etc.).
Temps disponible et réalisation d'activités	Santé mentale et physique, bien-être	1	La réalisation d'activités de loisir, sociales, de travail ou autres est bénéfique au bien être des individus (confiance en soi, estime de soi, etc.), et donc leur santé mentale.
Temps disponible et réalisation d'activités	Productivité individuelle, locale et régionale	1	La réalisation d'activités de travail augmente la productivité de l'individu, et donc celle de son entreprise et de sa communauté. La réalisation d'activités de loisir peut générer la consommation de biens et de services, qui augmentent la productivité des commerces et des entreprises, et donc de la communauté.
Santé mentale et physique, bien-être	Coûts des soins de santé	-1	Les problèmes de santé mentale occasionnent des frais de traitements psychologiques, ou un dysfonctionnement en société qui peut résulter en une dépendance financière auprès du gouvernement. Soigner les problèmes de santé physique occasionnent des frais médicaux (individuels ou collectifs).
Temps de trajet	Temps disponible et réalisation d'activités	-1	Puisque la durée d'une journée est fixe, le temps requis pour se déplacer est du temps non alloué à des activités plus valorisées, notamment de travail ou de loisir.
Distance de trajet motorisé	Temps de trajet	1	La distance à parcourir est un déterminant du temps de trajet.

**Tableau A-1 (suite) : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Distance de trajet non-motorisé	Temps de trajet	1	La distance à parcourir est un déterminant du temps de trajet.
Nombre de déplacements	Distance de trajet motorisé	1	Le tout, ou une partie, d'un déplacement implique une distance motorisée (en véhicule motorisé) à parcourir.
Nombre de déplacements	Distance de trajet non-motorisé	1	Le tout, ou une partie, d'un déplacement se traduit par une distance non-motorisé (vélo, marche) à parcourir.
Conduite écoresponsable	Taux de consommation d'énergie du véhicule	1	Les comportements de conduite du chauffeur du véhicule influencent le taux de consommation d'énergie du véhicule.
Taux de consommation d'énergie du véhicule	Consommation d'énergie	1	Le taux de consommation (/km) d'énergie (carburant, électricité, etc.) du véhicule est un des déterminants de la consommation totale d'énergie.
Distance de trajet motorisé	Consommation d'énergie	1	La distance parcourue en véhicule motorisé est un déterminant de la consommation d'énergie.
Efficacité du moteur et des dispositifs anti-pollution, légèreté, petite taille, automatisation	Taux de consommation d'énergie du véhicule	-1	Les caractéristiques du moteur (cylindrée) et le poids du véhicule sont des déterminants du taux de consommation d'énergie.
Consommation d'énergie	Consommation de ressources naturelles	1	La consommation d'énergie (électricité, carburant) implique la consommation de ressources naturelles renouvelables ou non (pétrole, eau, charbon, etc.).
Consommation d'énergie	Émissions de polluants (eau, air, son, lumière, paysage)	1	La consommation d'énergie (électricité, carburant) par les moteurs génère des émissions de polluants (air, eau, sol, bruit, lumière).
Consommation d'énergie	Émissions de GES	1	La consommation d'énergie (électricité, carburant) par les moteurs génère des émissions de gaz participant à l'effet de serre (GES).

**Tableau A-1 (suite) : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Efficacité du moteur et des dispositifs anti-pollution, légèreté, petite taille, automatisation	Taux d'émission de polluants du véhicule	-1	Les dispositifs anti-pollution et anti-bruit du véhicule sont des déterminants du taux d'émission de polluants.
Efficacité du moteur et des dispositifs anti-pollution, légèreté, petite taille, automatisation	Taux d'émission de GES du véhicule	-1	Les dispositifs anti-pollution du véhicule sont des déterminants du taux d'émission de GES.
Présence des infrastructures	Taux d'émission de polluants du véhicule	1	La présence d'infrastructures et des services liés (éclairage, déglçage) émettent des polluants, par exemple à un taux par unité de surface.
Taux d'émission de polluants du véhicule	Émissions de polluants (eau, air, son, lumière, paysage)	1	Le taux d'émission de polluants est un déterminant des émissions de polluant totales.
Taux d'émission de GES du véhicule	Émissions de GES	1	Le taux d'émission de polluants est un déterminant des émissions de GES totales.
Émissions de polluants (eau, air, son, lumière, paysage)	Exposition aux polluants	1	Les émissions de polluant (et les réactions chimiques s'il y a lieu) définissent les concentrations de polluants dans le milieu considéré (air, eau, sol) et le territoire considéré. Les populations et espèces sur le territoire considéré sont exposées à ces concentrations de polluant.
Exposition aux polluants	Équité et cohésion sociales	1	L'exposition aux polluants peut varier inégalement sur le territoire ou le groupe socio-démographique.
Exposition aux polluants	Liens sociaux et communauté	-1	La présence et la taille des infrastructures de transport exercent une pression sur les paysages. Plus le niveau d'exposition aux polluants est élevé, plus il nuit à l'agrément d'un quartier.

**Tableau A-1 (suite) : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Exposition aux polluants	Santé mentale et physique, bien-être	-1	Plus le niveau d'exposition aux polluants est élevé, plus les risques pour la santé sont élevés.
Exposition aux polluants	Santé des écosystèmes (habitat naturel, faune et flore)	-1	L'exposition aux polluants a un effet sur la santé animale, la croissance des végétaux, et potentiellement leur biodiversité.
Liens sociaux et communauté	Productivité individuelle, locale et régionale	1	Une communauté agréable est vivante et favorise la réalisation d'activités, et donc d'achats de biens et de services.
Émissions de GES	Changement climatiques	1	Les émissions de GES contribuent à l'effet de serre planétaire et aux changements climatiques.
Émissions de GES	Îlots de chaleur	1	Les émissions de GES contribuent à la création d'îlots de chaleur dans les quartier.
Changement climatiques	Santé des écosystèmes (habitat naturel, faune et flore)	-1	Les changements climatiques modifient les habitats naturels et les écosystèmes, ce qui a un effet sur la croissance et la diversité de la faune et la flore.
Changement climatiques	Santé mentale et physique, bien-être	-1	Les changements climatiques modifient le territoire d'étendue de certaines maladies qui peuvent toucher l'humain.
Changement climatiques	Coûts de mitigation des problèmes environnementaux et pression sur les infrastructures	1	Les changements climatiques se concrétisent entre autres par des événements climatiques plus extrêmes et plus fréquents, faisant pression sur les infrastructures autres que le transport (comme le système d'égouts).

**Tableau A-1 (suite) : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Santé des écosystèmes (habitat naturel, faune et flore)	Coûts de mitigation des problèmes environnementaux et pression sur les infrastructures	-1	La modification des écosystèmes et de l'habitat naturel, ainsi que leurs effets sur la faune et la flore, sont des problèmes environnementaux engendrant des coûts de mitigation et d'adaptation.
Distance de trajet non-motorisé	Activité physique	1	La distance parcourue à l'aide d'un mode actif permet de faire de l'activité physique.
Taux de dépenses caloriques	Activité physique	1	Les caractéristiques du réseau et de l'individu déterminent le taux de dépenses caloriques, qui détermine la quantité d'activité physique réalisée.
Activité physique	Santé mentale et physique, bien-être	1	Le niveau d'activité physique pratiqué quotidiennement est bénéfique pour la santé.
Présence des infrastructures	Espace au sol, surface imperméable et non végétale	1	La présence et la taille des infrastructures de transport déterminent leur espace occupé au sol. Cette surface a des propriétés imperméables et une couleur souvent foncée, en plus d'être non végétale.
Espace au sol, surface imperméable et non végétale	Coûts de mitigation des problèmes environnementaux et pression sur les infrastructures	1	Les surfaces imperméables augmentent les eaux de ruissellement lors des pluies, ce qui exerce une pression sur le réseau d'égouts.
Espace au sol, surface imperméable et non végétale	Îlots de chaleur	1	Les surfaces foncées, imperméables et non végétales augmentent la chaleur près du sol et contribuent ainsi aux îlots de chaleur.
Îlots de chaleur	Liens sociaux et communauté	-1	Les îlots de chaleur se caractérisent par une chaleur accablante, ce qui nuit à l'agréabilité du quartier.

**Tableau A-1 (suite) : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Îlots de chaleur	Santé mentale et physique, bien-être	-1	Les îlots de chaleur se caractérisent par une chaleur accablante, ce peut engendrer des problèmes de santé pour les personnes à risque (personnes âgées, bébés, etc.)
Îlots de chaleur	Équité et cohésion sociales	1	Les îlots de chaleur peuvent être inégalement distribués sur le territoire ou le groupe socio-démographique.
Taux de consommation d'énergie du véhicule	Frais variables d'utilisation du mode	1	Le taux de consommation (/km) d'énergie (carburant, électricité, etc.) du véhicule est un des déterminants des frais variables liés à l'utilisation d'un véhicule motorisé.
Distance de trajet motorisé	Frais variables d'utilisation du mode	1	La distance de trajet motorisé est un des déterminants des frais variables liés à l'utilisation d'un véhicule motorisé.
Frais variables d'utilisation du mode	Revenus collectifs des transports	1	Plusieurs frais d'utilisation d'un mode (péages, stationnement, prix de l'énergie, distance parcourue, taux de consommation d'énergie, etc.) constituent des revenus d'opération qui sont collectés par un organisme public.
Frais variables d'utilisation du mode	Dépenses individuelles en transport	1	Plusieurs frais d'utilisation d'un mode (péages, stationnement, prix de l'énergie, distance parcourue, taux de consommation d'énergie, etc.) constituent des dépenses personnelles.
Dépenses individuelles en transport	Équité et cohésion sociales	1	Les dépenses individuelles liées au transport peuvent être inégalement distribués sur le territoire ou le groupe socio-démographique.
Possession de véhicule ou abonnement au service	Frais fixes d'utilisation du mode	1	Le fait de posséder un véhicule ou de s'abonner à un service (annuellement par exemple) occasionne des frais fixes.

**Tableau A-1 (suite) : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Frais fixes d'utilisation du mode	Dépenses individuelles en transport	1	Les frais fixes liés à un mode (possession de véhicule: immatriculation, achat, location, entretien, réparation; abonnement au service : frais d'adhésion de départ, frais annuel d'abonnement au service) sont des dépenses personnelles.
Temps de trajet	Accessibilité et attractivité	-1	Le temps de trajet en un mode de transport influence l'attractivité de ce mode, ainsi que les activités qui sont accessibles.
Aménagement fonctionnel (usure, sécurité)	Accessibilité et attractivité	1	La fonctionnalité de l'aménagement d'un réseau (design, usure, agréabilité, sécurité) influence l'attractivité du mode de transport.
Universalité des infrastructures	Accessibilité et attractivité	1	Des infrastructures de transport adaptées aux personnes à mobilité réduite influencent l'attractivité et l'accessibilité du mode de transport.
Accidents, agressions et sentiment d'insécurité	Accessibilité et attractivité	-1	Les accidents, les agressions et le sentiment d'insécurité qui y est relié causent une réduction de l'attractivité d'un mode.
Information et signalisation	Accessibilité et attractivité	1	Les informations et la signalisation (simplicité, quantité, temps réel, etc.) influencent l'attractivité et l'accessibilité du mode de transport.
Connectivité du réseau	Accessibilité et attractivité	1	La connectivité interne d'un réseau ainsi que sa connectivité avec d'autres réseaux influencent l'attractivité et l'accessibilité du mode de transport.
Confort et services d'appoint des infrastructures.	Accessibilité et attractivité	1	Le confort, la propreté et les services d'appoint (Internet, etc.) influencent l'attractivité du mode de transport.
Fiabilité et régularité du réseau	Accessibilité et attractivité	1	La fiabilité et la régularité d'un service influencent l'attractivité du mode de transport.

**Tableau A-1 (suite) : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Possession de véhicule ou abonnement au service	Accessibilité et attractivité	1	Le fait de posséder un véhicule particulier ou un abonnement à un service modal influence l'attractivité du mode de transport et son accès.
Disponibilité de stationnements	Accessibilité et attractivité	1	La disponibilité des stationnements influence l'attractivité du mode de transport nécessitant un véhicule particulier.
Diversité des tarifs	Accessibilité et attractivité	1	La diversité des tarifs influence l'attractivité du mode de transport.
Frais fixes d'utilisation du mode	Accessibilité et attractivité	-1	Les frais d'utilisation d'un mode influencent l'attractivité du mode de transport et son accès.
Frais variables d'utilisation du mode	Accessibilité et attractivité	-1	Les frais d'utilisation d'un mode influencent l'attractivité du mode de transport et son accès.
Optimisation du trajet	Temps de trajet	-1	Les mesures d'optimisation du trajet (calculateur de trajet) réduisent le temps de déplacement.
Accessibilité et attractivité	Nombre de déplacements	1	Une accessibilité accrue aux lieux d'activités est susceptible de générer des déplacements supplémentaires pour un individu.
Accessibilité et attractivité	Équité et cohésion sociales	1	L'accessibilité aux modes et aux lieux d'activité peut être inégalement distribuée sur le territoire ou le groupe socio-démographique.
Vitesse de déplacement	Accidents, agressions et sentiment d'insécurité	1	Une vitesse élevée augmente la fréquence et la gravité des accidents.
Volumes et débits sur le réseau	Accidents, agressions et sentiment d'insécurité	1	Un volume élevé de véhicule sur un lien augmente la fréquence des accidents.
Aménagement fonctionnel (usure, sécurité)	Accidents, agressions et sentiment d'insécurité	-1	Un aménagement du réseau sécuritaire diminue la fréquence et la gravité des accidents.

**Tableau A-1 (suite) : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Efficacité du moteur et des dispositifs anti-pollution, légèreté, petite taille, automatisation	Accidents, agressions et sentiment d'insécurité	-1	La petite taille des véhicules et leur automatisation diminue la fréquence et la gravité des accidents.
Accidents, agressions et sentiment d'insécurité	Liens sociaux et communauté	-1	Les accidents, les agressions et le sentiment d'insécurité qui y est relié causent une réduction de l'agréabilité du quartier.
Accidents, agressions et sentiment d'insécurité	Santé mentale et physique, bien-être	-1	Les accidents ou les agressions occasionnent des problèmes de santé chez leurs victimes.
Accidents, agressions et sentiment d'insécurité	Équité et cohésion sociales	1	Les accidents ou les agressions et leurs victimes peuvent être inégalement distribués sur le territoire ou le groupe socio-démographique.
Accidents, agressions et sentiment d'insécurité	Consommation de matériaux	1	Les accidents occasionnent le bris de véhicules et d'équipement qui nécessitent des réparations et donc de la consommation de matériaux supplémentaires.
Accidents, agressions et sentiment d'insécurité	Fiabilité et régularité du réseau	-1	La fréquence des accidents et des incidents cause une réduction de la capacité qui occasionne des délais ponctuels et affectent la fiabilité et la régularité du réseau.
Consommation de matériaux	Frais fixes d'utilisation du mode	1	La consommation de matériaux neufs implique des coûts.
Consommation de matériaux	Consommation de ressources naturelles	1	La consommation de matériaux neufs implique la consommation de ressources naturelles renouvelables ou non.
Capacité du réseau	Rapport entre volume et capacité, congestion	-1	La capacité du réseau modifie le rapport Volume/Capacité.
Volumes et débits sur le réseau	Rapport entre volume et capacité, congestion	1	Le volume entrant sur le réseau modifie le rapport Volume/Capacité.

**Tableau A-1 (suite) : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Capacité du réseau	Présence des infrastructures	1	L'augmentation de capacité d'un réseau peut nécessiter une augmentation de la présence et de la taille des infrastructures de transport.
Rapport entre volume et capacité, congestion	Vitesse de déplacement	-1	Un volume près ou excédant la capacité ralentit la vitesse de déplacement.
Vitesse de déplacement	Temps de trajet	-1	La vitesse du déplacement influence le temps de trajet.
Vitesse de déplacement	Volumes et débits sur le réseau	1	Une vitesse faible diminue le débit.
Nombre de déplacements	Volumes et débits sur le réseau	1	Le nombre de déplacements influence les débits.
Espace au sol, surface imperméable et non végétale	Santé des écosystèmes (habitat naturel, faune et flore)	-1	Les surfaces imperméables et non-végétales fragmentent l'habitat naturel, et influencent donc la faune et la flore.
Frais fixes d'utilisation du mode	Revenus collectifs des transports	1	Certains frais fixes liés à un mode (possession de véhicule: immatriculation; abonnement au service : frais d'adhésion de départ, frais annuel d'abonnement au service) génèrent des revenus pour les organismes publics.
Prix de l'énergie	Frais variables d'utilisation du mode	1	Le prix du carburant est un des déterminants des frais variables liés à l'utilisation du mode.
Rapport entre volume et capacité, congestion	Fiabilité et régularité du réseau	2	L'irrégularité du service fait varier la capacité.
Distance de trajet non-motorisé	Liens sociaux et communauté	1	La distance parcourue à l'aide d'un mode actif favorise les interactions sociales dans l'espace public.
Liens sociaux et communauté	Santé mentale et physique, bien-être	1	Les interactions sociales favorisent le bien-être des individus.

**Tableau A-1 (suite) : Liste des liens de causalité du *Cercle de causalité***

Cause	Effet	Sens	Explication
Accessibilité et attractivité	Productivité individuelle, locale et régionale	1	Une meilleure accessibilité favorise la disponibilité de la main d'œuvre. La proximité des commerces favorise le développement local.
Vitesse de déplacement	Taux de consommation d'énergie du véhicule	1	La vitesse influence le taux de consommation d'énergie du véhicule.
Taux d'occupation du véhicule	Volumes et débits sur le réseau	-1	Le taux d'occupation des véhicules influence le volume de personnes sur un lien.
Taux d'occupation du véhicule	Confort et services d'appoint des infrastructures.	-1	Un taux d'occupation élevé diminue le confort lors de l'utilisation du réseau.

## ANNEXE B RÉFÉRENCES DES CHÂÎNES DE CAUSALITÉ

**Tableau B-1: Références liées aux relations de causalité des diagrammes (Chapitre 3)**

Préoccupation globale	Relation de causalité	CODE	Références
<b>Temps et Activités</b>	Confort et services d'appoint des infrastructures & Réalisation d'activités	1A	Ettema & Verschuren, 2007 Haddington & Rauniomaa, 2011 Neufeld & Mokhtarian, 2012
	Réalisation d'activités & Santé et bien-être	1B	Reitzes et al., 1995 Sonnentag, 2001
	Temps en congestion & Productivité individuelle, locale et régionale	1C	Weisbrod, Vary, & Treyz, 2003
<b>Liens sociaux et Communauté</b>	Transport & Interactions sociales	2A	Glanz, 2011 Jacobs, 1961 Oldenburg, 1999 Wood et al., 2010
	Transport & Sentiment d'appartenance au quartier	2B	Gehl & Gemzoe, 2004 Wood et al., 2010
	Transport & Proximité des commerces	2C	Mangin, 2004
	Surface végétale & Communauté	2D	Dwyer et al., 1992
<b>Activité physique</b>	Transport & Activité physique & Santé	3A	Badland & Schofield, 2008 Davis et al., 2007 Sahlqvist et al., 2012

**Tableau B-1(suite) : Références liées aux relations de causalité des diagrammes (Chapitre 3)**

Préoccupation globale	Relation de causalité	CODE	Références
<b>Sécurité</b>	Vitesse & Accidents	4A	Archer, Fotheringham, Symmons, & Corben, 2008 Garber & Ehrhart, 2000
	Volume & Accidents	4B	Direction de santé publique de Montréal, 2006 Garber & Ehrhart, 2000
	Aménagement & Victimes (enfants)	4C	Lewis & Torres, 2010 Garber & Ehrhart, 2000
	Automatisation du véhicule & Accidents	4D	Carsten & Tate, 2005
	Taille du véhicule & Accidents	4E	Direction de santé publique de Montréal, 2006
	Transport & Décès	4F	Ramage-Morin, 2008 SAAQ, 2012a
<b>Finances</b>	Accidents, victimes & Coûts des soins de santé	5A	Remarais, 2004 Zaloshnja, Miller, Romano, & Spicer, 2004
	Transport & Valeur des propriétés	5B	Diaz, 1999 Kilpatrick et al., 2007
	Transport & Frais de possession et d'utilisation d'une automobile	5C	CAA, 2012
	Transport & Emplois et disponibilité de la main d'œuvre	5D	Apparicio et al., 2007 ATUQ, 2009 CCMM, 2004 Vickerman et al., 1999
<b>Accessibilité et Attractivité</b>	Temps de trajet & Attractivité	6A	Dell'Olio, Ibeas, & Cecin, 2010
	Sentiment d'insécurité & Attractivité	6B	Alm & Lindberg, 2000 Loukaitou-Sideris et al., 2002
	Information en temps réel & Accessibilité	6C	Fries, Dunning, & Chowdhury, 2009
	Universalité des infrastructures & Accessibilité	6D	Azenkot et al., 2011

**Tableau B-1(suite) : Références liées aux relations de causalité des diagrammes (Chapitre 3)**

Préoccupation globale	Relation de causalité	CODE	Références
<b>Espace au sol</b>	Infrastructures & Perte et fragmentation de l'habitat naturel & Faune et flore	7A	Andrews, 1990 Benitez-Lopez et al., 2010 Cushman, 2006
	Surface minéralisée & Faune et flore	7B	Angold, 1997 Dwyer et al., 1992
	Surface imperméable & Ruissellement et pression sur les infrastructures	7C	Fléchais, 2011 Garant, 2009
<b>Consommation d'énergie et Émissions de polluants et de GES</b>	Conduite écologique & Consommation d'essence	8A	Andrieu, 2009 Ericsson, 2001
	Caractéristiques du véhicule & Consommation d'essence et émissions de polluants et de GES	8B	Guzzella & Sciarretta, 2007 Ross, 1994
	Transport & Sels dans l'eau	8C	Godwin et al., 2003 Ramakrishna & Viraraghavan, 2005
	Transport & Métaux lourds dans l'eau	8D	Pagotto, 1999
	Transport & Bruit & Santé	8E	Clark & Stansfeld, 2007
	Transport & Lumière & Santé	8F	Chepesiuk, 2009 Pauley, 2004
	Pollution de l'air & Santé	8G	Bell et al., 2007 Cohen et al., 2004 Degobert, 1992 Katsouyanni, 2003 Lippmann, 1989 Samet, Zeger, et al., 2000 Sunyer, Atkinson, et al., 2003

**Tableau B-1(suite) : Références liées aux relations de causalité des diagrammes (Chapitre 3)**

Préoccupation globale	Relation de causalité	CODE	Références
<b>Consommation d'énergie et Émissions de polluants et de GES (suite)</b>	Polluants de l'air, bruit et lumière & Habitat naturel, faune et flore	8H	Spellerberg, 1998 Environnement Canada, 2013
	Sels & Habitat naturel, faune et flore	8I	Karraker et al., 2007 Munck et al., 2010 Williams et al., 2000
	Infrastructures & Paysage	8J	Teller & Cremasco, 2009
	Changements climatiques & Santé	8K	McMichael et al., 2006
	Changements climatiques & Écosystèmes	8L	Thomas et al., 2004
	Changements climatiques & Pression sur les infrastructures	8M	W. R. Black & Sato, 2007 Dore, 2005 Emanuel, 2005
	Transport & Consommation de ressources autres que l'essence	8N	Daniels et al., 2007 Notter et al., 2010 Saxifrage, 2013
<b>Îlots de chaleur</b>	Infrastructures & Îlots de chaleur & Santé	9A	Asaeda, 1994 BNQ, 2013 Lachance et al., 2006
	GES & Îlots de chaleur	9B	Giguère, 2009

## ANNEXE C FICHES MÉTHODOLOGIQUES DES INDICATEURS PROPOSÉS

### DESCRIPTION D'UNE FICHE TYPE

#### Généralités

##### Objectif général

---

Description de l'objectif d'évaluation.

##### Variations de l'enjeu évalué

---

Variations dans l'espace (E) dans le temps (T), selon la perception des usagers (P), selon les caractéristiques de l'individu (I) ou selon une autre raison (A).

##### Base de données

---

Description des données disponibles relatives à l'enjeu évalué. Des symboles sont utilisés pour qualifier cette disponibilité : actuellement inexistantes (✖), partiellement constituées ou disponibles (~), ou existantes et disponibles (✓).

##### Avancées de la recherche

---

Avancement de la recherche en ce qui a trait à la contribution des transports à l'enjeu évalué. Des symboles sont utilisés pour qualifier cette avancée : faible (✖), moyenne (~), importante (✓).

#### Indicateur proposé

*Nom de l'indicateur proposé*

##### Hypothèses

---

Hypothèses simplificatrices pour estimer l'indicateur.

##### Formulation

---

Méthode de calcul et possibilité d'application à une entité : un déplacement (D), un individu (I), un ménage (M), un générateur de déplacements (G), un territoire (T), un lien du réseau (L) et un corridor (C).

#### Information requise pour l'estimation

Données et information sur le déplacement, la personne ou le ménage qui permettent de calcul l'indicateur proposé.

Manipulations et calculs à réaliser à partir des données, pour lesquels il peut exister plusieurs niveaux de raffinement.

#### Limites, améliorations possibles et perspectives

Énoncé des limites et des améliorations possibles de la méthodologie d'estimation proposée.

## POTENTIEL DE CONTACT SOCIAL GRÂCE AUX DÉPLACEMENTS

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution de la mobilité aux interactions sociales qui surviennent dans la vie d'un individu. Les interactions sociales peuvent survenir à la fois (1) durant le déplacement et (2) lors de la réalisation d'une activité à l'extérieur de chez soi, activité possible grâce au déplacement.

#### Variations de la quantité d'interactions sociales

E-T-P

✓	Espace	Lieux plus ou moins propices aux interactions sociales, selon l'aménagement.
✓	Temps	Moments plus ou moins propices aux interactions sociales, selon la saison ou la période de la journée.
✓	Perception	L'utilisateur définit ce qu'il considère comme une interaction sociale, et la valeur qu'il lui associe (enrichissante ou embarrassante).

#### Base de données

x

Aucun secteur d'activités ne quantifie systématiquement les interactions sociales : il n'existe donc pas de base de données sur cet aspect.

#### Avancées de la recherche

x

La recherche est peu avancée en ce qui a trait à la contribution des comportements de mobilité aux interactions sociales.

### Indicateur proposé - Volet 1

*Part des déplacements réalisés en compagnie d'autres personnes que celles du ménage*

#### Hypothèses

- On vise à tirer avantage du temps de déplacement réalisé plutôt qu'à contribuer en valeur absolue aux interactions sociales totales quotidiennes pour un individu. C'est donc un taux qui est nous intéresse plutôt que le nombre.
- Le nombre réel d'interactions peut être représenté par un potentiel d'interactions. Tous les usagers ont la même perception du potentiel d'interactions.
- Le potentiel d'interactions varie entre 0 et 1 selon le mode de transport utilisé :
  - Potentiel nul : Auto-solo, Automobile avec des personnes du ménage, vélo.  
On pose l'hypothèse que les interactions sociales qui participent au développement de soi sont différentes de celles à l'intérieur de chez soi, soit avec les personnes de notre ménage.
  - Potentiel non nul : Auto avec passagers autres que des personnes du ménage, marche, transport en commun.

## Formulation

D-I-M-G-T-L-C

Déplacement, individu, ménage, générateur de déplacements ou territoire :

$$Part\ interaction = \frac{\sum_{mode}(Potentiel\ d'interaction_{mode} \times Temps\ dépl._{mode})}{\sum Temps\ de\ dépl.}$$

Lien ou corridor :

$$Part\ interaction = \frac{\sum_{mode}(Potentiel\ d'interaction_{mode} \times Volume - heure\ dépl._{mode})}{\sum Volume - heure\ dépl.}$$

## Indicateur proposé - Volet 2

*Durée d'activités extérieures au domicile*

## Hypothèse

On suppose que plus la durée des activités réalisées à l'extérieur du domicile est grande, plus les interactions sociales sont nombreuses.

## Formulation

D-I-M-G-T

Déplacement  $i$  :

$$Durée\ activité_i(min) = Heure\ départ_{i+1} - Heure\ départ_i - Durée\ de\ trajet_i$$

Individu ou ménage :

Somme des déplacements

Générateur de déplacements ou territoire :

Moyenne de la durée par personne

Lien ou corridor : N/A

## Information requise pour l'estimation

Information sur les déplacements	Origine / Destination
	Mode de transport
	Type de covoitureur (mode auto)
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau
	Temps de parcours

## Limites, améliorations possibles et perspectives

- Idéalement, les deux indicateurs devraient en former un seul.
- Alimenter la recherche sur le potentiel d'interactions sociales selon le type de mode de transport utilisé.
- Étudier la valeur des interactions sociales, tel qu'elles sont perçues par les individus. En effet, toutes les interactions ne sont pas édifiantes ou positives.
- En ce qui a trait au second volet concernant les interactions sociales lors de la réalisation d'activités :
  - Il pourrait être bonifié en intégrant la densité de déplacements qui se destinent au même endroit que là où l'individu réalise son activité. En effet, la probabilité de rencontrer quelqu'un en travaillant au centre-ville, zone forte d'emplois, risque d'être plus élevée que dans une banlieue à faible dynamisme. L'heure joue également un rôle : les travailleurs de nuit ont moins de chance de rencontrer d'autres personnes que ceux de jour.

## DÉPLACEMENTS AVEC PEU DE NUISANCES ET FAVORISANT L'AMBIANCE DE QUARTIER

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution de la mobilité et des systèmes de transport à ce qui rend une communauté vivante et améliore l'ambiance. Cet indicateur cherche à témoigner de l'agrément de la communauté, qui dépend par exemple du sentiment de sécurité, de l'ambiance, de la beauté, de la convivialité et de la fonctionnalité du lieu.

#### Variations de l'ambiance du quartier

E-T-P

✓	Espace	Lieux plus ou moins agréables.
✓	Temps	Moments plus ou moins agréables, selon la saison ou la période de la journée, etc.
✓	Perception	L'utilisateur a son propre sentiment de sécurité et d'agrément.

#### Base de données

~

Il n'existe pas de base de données expressément sur le niveau d'agrément des communautés, ni sur ce qui le rend agréable (sentiment de sécurité, ambiance, etc.). Cependant, les municipalités possèdent sûrement un inventaire du matériel urbain, comme les lampadaires, les bancs, la largeur des trottoirs, etc. Peut-être qu'il est en partie géolocalisé. Il existe également des données sur les accidents de la route. Leur géolocalisation permettrait de témoigner du sentiment de sécurité.

#### Avancées de la recherche

x

La recherche est peu avancée en ce qui a trait à la quantification de la contribution des systèmes de transport et de la mobilité à rendre la communauté agréable. Certes, il existe des études sur l'influence de l'aménagement et de l'environnement bâti sur les choix de mobilité (S. Handy, Cao, & Mokhtarian, 2005; Rodriguez & Joo, 2004), et sur le sentiment de sécurité (Barjonet, Gezentsvey, & Mores, 2010).

### Indicateur proposé

*Part des déplacements à vélo, à la marche et en TC, pour un territoire donné*

#### Hypothèses

La pollution atmosphérique et sonore issue des véhicules, ainsi que leur présence et leur vitesse, rendent un territoire désagréable. Ainsi, on suppose que plus les déplacements y sont effectués à la marche et à vélo plus le territoire est agréable. Le transport en commun y est aussi du nombre, car pour y accéder la marche ou le vélo sont également utilisés. En supposant que l'automobile est stationnée sur un terrain privé, la marche pour y accéder n'a pas d'impact sur l'agrément du quartier. Le sentiment de sécurité et les agressions ne sont pas tenus en compte par cet indicateur.

Territoire :

$$Part\ des\ dépl.\ avec\ peu\ de\ nuisances = \frac{\sum\ Origines\ et\ destinations_{TC, Marche, Vélo}}{\sum\ Origines\ et\ destinations}$$

Le nombre de déplacements comprend à la fois les origines et les destinations, pour la période horaire au choix. La définition du territoire étudié varie selon l'approche :

- Individu, ménage, générateur : rayon de 750 m autour du lieu étudié
- Lien ou corridor : zone tampon de (largeur de la route + 50m) de part et d'autre du centre du lien
- Territoire : tout le territoire

Exception pour le déplacement :

- Déplacement : valeur 1 (modes TC, marche, vélo) ou 0 (autre mode polluant)

### Information requise pour l'estimation

Information sur les déplacements	Origine / Destination
	Mode de transport
	Géolocalisation des domiciles des personnes
Manipulations et calculs	-

### Limites, améliorations possibles et perspectives

- Avancer la recherche sur le lien entre l'attractivité et l'agréabilité d'une zone. Puisque seule une proportion est utilisée, le niveau d'agréabilité peut être jugé adéquat bien qu'il y ait peu d'attractivités dans une zone (notamment à certaines heures de la journée ou certains jours de semaine).
- Avancer la recherche sur le niveau de contribution de chaque mode de transport à l'agréabilité de la communauté.
- Étudier l'influence de la taille de la zone tampon autour du lieu étudié.
- Intégrer des notions de qualité de l'aménagement piéton (connectivité, luminosité, largeur des traversées, etc.).
- Intégrer la notion du sentiment de sécurité, influencée notamment par les volumes sur les liens (véhicules et personnes), le nombre d'accidents et le nombre d'agressions.
- Plutôt que cet indicateur de part modale qui est en fait un témoin de l'agréabilité du quartier, développer un indicateur qui mesure directement le niveau d'agréabilité du quartier.

## PART D'ACTIVITÉ PHYSIQUE RECOMMANDÉE ATTRIBUABLE AUX DÉPLACEMENTS

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution des transports à la réalisation d'activité physique quotidienne pour les individus. Outre la longueur du déplacement, les dénivelés du trajet emprunté et les caractéristiques de l'individu, chaque mode de transport contribue différemment à la réalisation d'activité physique. Idéalement, l'indicateur doit être sensible au nombre de déplacements faits par l'individu dans une journée, et aux besoins énergétiques selon l'âge et le sexe. Il doit également être sensible à la quantité d'activité physique réalisée lors d'un déplacement, selon le mode de transport utilisé, la distance parcourue, le chemin emprunté et les caractéristiques physique de l'individu.

#### Variations de l'activité physique réalisée lors des déplacements

E - T - I

✓	Espace	Selon la distance parcourue et le profil géographique du lieu.
✓	Temps	Le mode de transport utilisé est influencé par la température et les précipitations.
✓	Individu	Les caractéristiques de l'individu (taille, poids, âge, sexe, etc.) influencent le tau de dépenses caloriques.

#### Possibilité de collecte de données

~

Il existe certaines informations sur la santé de la population et ses comportements quant à la réalisation d'activité physique pour les loisirs et les déplacements. Cependant, ces données ne sont pas collectées de façon systématique (Camirand & Dumitru, 2008).

#### Avancées de la recherche

~

Plusieurs études portent sur l'activité physique et les comportements quotidiens de mobilité, la santé et le bien-être. Cependant, cet enjeu n'est pas considéré de façon systématique lors de la prise de décision en transport.

### Indicateur proposé

*Part du nombre de pas quotidien recommandé attribuables aux déplacements*

#### Hypothèses

L'activité physique lors d'un déplacement a trait à la marche et au vélo. D'autres modes actifs existent, tel que le patin à roues alignées, la course à pied, la planche à roulettes et la trottinette, mais ils sont ici considérés comme marginal.

La marche est utilisée pour les déplacements à pied, mais également comme mode d'accès aux points de service d'autres modes de transport. La marche pour se rendre et revenir des arrêts de transport en commun est considérée dans l'estimation. La marche résultant des transferts de ligne est ici négligée en raison d'un manque de données. La marche pour se rendre et revenir à l'automobile stationnée est négligée.

Déplacement :

$$\text{Nb de pas équivalent} = \frac{\text{Distance trajet}_{\text{marche}}(m)}{\text{Foulée} \left(\frac{m}{\text{pas}}\right)} + \text{Temps trajet}_{\text{vélo}}(\text{min}) \times \text{Féq} \left(\frac{\text{pas}}{\text{min}}\right)$$

Où la foulée moyenne est déterminée selon l'âge de l'individu;

Où le Facteur d'équivalence *Féq* pour le vélo, considéré comme une activité modérée, correspond à 4 500 pas pour 15 minutes de vélo, 10 000 pas pour 30 minutes et 13 500 pas pour 60 minutes (Leermakers, Dunn, & Blair, 2000).

Individu, avec un âge, un sexe, et *i* déplacements par jour:

$$\text{Part d'activité physique (\%)} = \frac{\sum \text{Nb de pas équivalent}_i}{\text{Nb de pas recommandé quotidiennement}}$$

Où le nombre de pas quotidien recommandé varie selon l'âge et le sexe : 10 000 pas / jour pour les adultes et, pour les jeunes de 6 à 18 ans, 12 000 pas / jour pour les filles et 14 000 pour les garçons (Vuillemin, 2011).

Ménage, lien, corridor, territoire ou générateur de déplacements :

Moyenne des individus dans la zone correspondant à l'entité étudiée.

### Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur le déplacement	Origine / Destination
	Mode de transport
Information sur la personne	Âge
	Sexe
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau
	Distance de trajet

### Limites, améliorations possibles et perspectives

- Intégrer la marche pour les transferts entre les lignes de transport en commun et entre les modes de transport.
- Intégrer la marche entre le stationnement automobile et le lieu d'origine ou de destination. Cela implique de développer une méthodologie d'estimation du lieu de stationnement par rapport au lieu de destination.
- Évaluer les possibilités de développer un indicateur basé sur la durée d'activité physique réalisée, par type d'effort et d'intensité. Évaluer également la possibilité de développer un indicateur basé sur les calories dépensées.
- Lier la topographie du lieu à l'effort physique réalisé.

## INDISPONIBILITÉ EN RAISON DES DÉPLACEMENTS

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution de la mobilité au temps disponible pour réaliser des activités bénéfiques au bien-être d'un individu. Le temps de déplacement restreint le temps quotidien disponible pour les activités. La perte de temps en déplacement peut être atténuée par des installations propices à la réalisation d'activités lors du déplacement. Les activités lors du déplacement peuvent susciter différentes facultés : mentales (repos, relaxation, réflexion, introspection, méditation, etc.), sonore (musique), visuelles (lecture, film, jeux vidéos, etc.) ou autre (dessin, écriture, conversation, etc.). Moins le déplacement demande de la concentration, d'attention et de prise de décision, autrement dit plus l'individu est passif par rapport à la tâche de se déplacer, plus il a la possibilité de réaliser une activité durant le déplacement.

#### Variations du temps indisponible en véhicule

E-T-P

✓	Espace	La distance des déplacements quotidiens dépend entre autres des lieux de domicile et de destinations.
✓	Temps	La durée de trajet varie selon l'heure de la journée, le type de jour, les précipitations.
✓	Perception	La notion de ce qui est une activité agréable et/ou valorisée varie selon l'utilisateur.

#### Possibilité de collecte de données

x

Il n'existe pas de base de données sur les activités réalisées lors du déplacement.

#### Avancées de la recherche

x

Les recherches sur les activités possibles lors du déplacement, et leur valeur du point de vue des individus, sont peu nombreuses, car l'intérêt vis-à-vis de ce phénomène est très récent (Ettema & Verschuren, 2007).

### Indicateur proposé

*Temps de trajet excluant le temps actif (vélo, marche) et le temps comme passager*

#### Hypothèses

Le temps de déplacement enlève du temps disponible à la réalisation d'activités plus valorisées. Certaines formes de mobilité permettent toutefois de valoriser le temps en déplacement :

- **Le temps de déplacement alloué à la marche ou vélo n'est pas perdu**, car il permet à l'individu de réaliser de l'activité physique,
- **Le temps comme passager d'une automobile ou du transport en commun n'est pas perdu**, car il ne nécessite pas la concentration de l'individu,
- Le temps assis comme conducteur est perdu, car il requiert la concentration de l'individu à cette tâche.

Déplacement  $i$  :

$$\text{Indisponibilité (min)} = \text{Durée}_{\text{dépl.}} - \text{Durée}_{\text{mode actif}} - \text{Durée}_{\text{passager}}$$

Individu, avec  $i$  déplacements par jour :

$$\text{Indisponibilité (min/jour)} = \sum \text{Indisponibilité}_i$$

Ménage, générateur de déplacement ou territoire :

Moyenne des individus dans la zone correspondant à l'entité étudiée.

Lien ou corridor :

Soit un usager  $j$  de l'entité traversée :

$$\text{Indisponibilité}_j \text{ (min)} = (\text{Durée}_{\text{traversée}} - \text{Durée}_{\text{mode actif}} - \text{Durée}_{\text{passager}})$$

$$\text{Indisponibilité}_{\text{lien ou corridor}} \text{ (personnes - min)} = \sum \text{indisponibilité}_j$$

### Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur le déplacement	Origine / Destination
	Mode de transport
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau
	Temps de parcours

### Limites, améliorations possibles et perspectives

- Développer un indice sur la diversité d'activités possibles relativement au confort et à la concentration requise lors du déplacement, par type de mode (écoute de musique, chaleur, espace-table à disposition, internet, etc.). Ainsi, les hypothèses posées ci-dessus sont à reconsidérer, et un facteur représentant le « potentiel de réalisation d'activités » devrait être attribué à chaque déplacement. En réalité, pour tous les modes, conducteur ou passager, il existe un potentiel non nul de réalisation d'activités dont le spectre est plus ou moins large selon le confort et la concentration requise.
- Intégrer le confort selon l'heure et le type de jour. Pour le transport en commun, cela concerne le taux de remplissage du véhicule, qui affecte la position (assis/debout) et donc les activités possibles. Pour l'automobile, les conditions de circulation modifient le confort.

## RICHESSE ET DIVERSITÉ DES OUTILS D'INFORMATION À L'USAGER

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution des systèmes de transport aux renseignements sur les moyens possibles d'accéder aux activités. La diffusion d'information à l'utilisateur permet à ce dernier de se familiariser avec et de l'utiliser. Les outils d'information devraient être diversifiés et facile d'utilisation. L'information peut se retrouver sur différentes plates-formes (sur le véhicule, à l'arrêt, sur la route, sur Internet, etc.), ainsi qu'être statique (panneau fixe) ou dynamique (en temps réel). Un manque d'information risque de diminuer l'attractivité du réseau, voire même jusqu'à le rendre. Deux volets principaux peuvent être mesurés : la qualité du service prévu et celle du service réel.

#### Variation de l'information à l'utilisateur

E-P

✓	Espace	Selon la zone administrative, l'opérateur du réseau de transport, etc.
✓	Perception	La qualité, la convivialité et la simplicité du service d'information dépend de la perception de l'utilisateur (technologies connues, habitudes, etc.)

#### Possibilité de collecte de données

~

La diffusion ou non d'information, ainsi que la quantité d'outils à disposition des usagers, est possible à mesurer sans toutefois l'être de façon systématique et mise en commun. Il est beaucoup plus difficile de juger de la qualité de cette information.

#### Avancées de la recherche

~

Les recherches récentes sur la mesure de la qualité de l'information à l'utilisateur sont axées sur les services fournis sur Internet (Dziekani & Kottenhof, 2007; Horan, Abhichandani, & Rayalu, 2006).

### Indicateur proposé

*Indice de la quantité et de la diversité des outils d'information à l'utilisateur*

#### Hypothèses

La quantité et la diversité des outils qui contiennent l'information sur le service offert reflètent en partie la qualité de l'information donnée à l'utilisateur.

#### Formulation

D-I-M-G-T

Pour chaque réseau de transport d'un territoire étudié, calculer le cumulatif d'un pointage attribué aux services offrant de l'information sur le réseau de transport (détails dans la section ci-dessous).

## Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur les opérateurs	<p>Type de plates-formes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>statique (panneaux d'indication, Internet, données libres)</li> <li>temps réel (radio, Internet, messages textes, courriel, téléphone, données libres)</li> </ul> <p>Type d'information :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>planifier le chemin emprunté (le trajet)</li> <li>grille tarifaire</li> <li>accéder au réseau</li> <li>cheminer à l'intérieur du réseau</li> </ul> <p>Intégration de plusieurs réseaux à l'intérieur d'un même outil (information tarifaire et de calcul de trajet)</p>
--------------------------------	--

## Limites, améliorations possibles et perspectives

- Réaliser un relevé de toutes les types et les plates-formes d'information concernant les réseaux de transport.
- Étudier les façons d'attribuer un tel pointage et de faire l'agrégation en un seul indice. Chaque plate-forme et chaque type d'information offrent différentes précisions d'information.
- Évaluer la perception de qualité de l'information diffusée en fonction des différents types d'utilisateurs.

## INTENSITÉS DE SERVICE, OPTIONS DE TRANSPORT ET ÉQUITÉ D'ACCÈS

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution des systèmes de transport à offrir un éventail de possibilités pour réaliser le trajet entre une origine et une destination, ainsi que l'équité de la distribution de cette offre parmi la population. Cet enjeu de l'accessibilité compte trois volets : (1) l'intensité des services offerts, (2) la diversité des services offerts et (3) l'équité de distribution autour des services offerts.

Variations de l'intensité et de la diversité de l'offre de service, ainsi que son équité de distribution  
E-T-P

✓	Espace	Selon la variation spatiale de l'offre de service
✓	Temps	Selon la variation temporelle de l'offre de service (heure, type de jour)
✓	Perception	Les notions d'équité et de justice sont sujettes à interprétation

#### Possibilité de collecte de données

Beaucoup de données statiques sont pour la plupart déjà disponibles pour la plupart des réseaux. Les réseaux cyclables et piétonniers sont pourtant à bonifier. Les données dynamiques sont plus difficiles à obtenir, notamment pour le réseau routier (congestion) car elles ne sont pas planifiées. Pour le transport en commun, les GTFS sont disponibles.

#### Avancées de la recherche

La mesure de l'offre de service est généralement statique, et gagnerait grandement à être dynamique (variant dans le temps). Également, les modes actifs ou émergents sont rarement considérés. Un des défis est de créer un seul indice intégrant les différents modes et reflétant la diversité des options de transport. Un autre défi est d'élaborer un indice d'équité relatif à l'accessibilité.

### Indicateur proposé - Volet 1

*Intensités de service pour chaque mode de transport*

#### Hypothèses

L'accessibilité aux opportunités augmente avec un meilleur accès aux modes de transport. L'accès aux modes de transport se caractérise notamment par l'intensité de service autour du lieu de domicile.

#### Formulation

D-I-M-G-T

Chaque réseau de transport offre un service associé à un territoire donné. Ce territoire est une zone autour du domicile. Il varie selon le réseau de transport et représente une distance acceptable qu'un individu est prêt à parcourir pour entrer dans le réseau. Le mode utilisé pour accéder au réseau varie. Par exemple, on accède aux autoroutes en utilisant une automobile, alors qu'on marche pour se rendre à la station de métro. Pour les déplacements (origine), les générateurs, les individus et les ménages (domicile), la zone d'accès

étudiée est circulaire et de rayon variant selon le réseau. Les rayons proposés sont inscrits au Tableau C-1 de la page suivante.

L'étude d'un territoire complet se fait grâce à la moyenne des accès des personnes qui y résident, en utilisant les domiciles.

Dans la zone étudiée et pour chaque réseau de transport, le service offert est représenté par une intensité de service. Le Tableau C-1 rapporte des exemples d'intensité de service, statiques et dynamiques, pour chaque réseau de transport. Les indicateurs dynamiques permettent d'agréger l'intensité de service selon différentes périodes (24 heures, périodes de pointe, horaire, type de jour).

## Indicateur proposé - Volet 2

*Indice des options de transport, agrégeant les intensités de services de tous les modes de transport*

### Hypothèses

---

L'accès à une plus grande diversité de modes de transport augmente les options de transport. Cela favorise un choix modal rationnel pour chaque déplacement.

### Formulation

D-I-M-G-T

---

L'indice des options de transport agrège les intensités de service des réseaux présentés précédemment. La méthodologie proposée est expliquée à la section 7.2. Il s'agit de faire la somme des catégories d'intensité de service de chaque réseau. Les catégories (0 à 4) sont fonction des quartiles des distributions de l'intensité de service.

## Indicateur proposé - Volet 3

*Indice de Gini mesurant la distribution des segments de population vulnérable par rapport à l'offre*

### Hypothèses

---

Les segments de population vulnérables ne doivent pas dépendre uniquement de l'automobile car c'est un mode coûteux individuellement.

### Formulation

D-I-M-G-T

---

Quant à l'indicateur d'équité d'accès, il nécessite d'abord la définition de segments de population vulnérables socialement. L'aspect de vulnérabilité peut être attribué d'après l'accès restreint à l'automobile (en fonction de l'âge, de la motorisation ou du permis de conduire), le sexe des individus ou le revenu du ménage (ménages à faible revenu ou monoparentaux). Ensuite, l'indice de Gini appliqué aux options de transport et aux intensités de service, et ce par segment de population, donne un aperçu de l'équité de la distribution autour des services offerts. Pour plus de détails méthodologiques, consultez le chapitre 6 du présent document.

**Tableau C-1 : Zones et intensité de service des réseaux de transport**

Réseau de transport	Mode d'accès au réseau	Rayon définissant la zone autour du domicile (m)	Intensité de service		
			Statique	Dynamique	Aspects à intégrer
<b>Autoroute</b>	Auto	1 000	Nb entrées et sorties	Km-h non congestionnées	
<b>Bus</b>	Marche	500	Arrêts-lignes	Passages-arrêts	
<b>Métro</b>	Marche	750	Stations-lignes	Passages-arrêts	
	Vélo	1 000			
<b>Train de banlieue</b>	Auto	2 000	Stations-lignes	Passages-arrêts	
	Marche	750			
	Vélo	1 000			
<b>Cyclable</b>	Vélo	500	Longueur avec poids selon le type de voie		Tortuosité des voies Nb d'intersections (par type)
<b>Auto-partage</b>	Marche	750	Véhicules	Véhicules-heures disponibles	
<b>Vélo-partage</b>	Marche	300	Ancrages	Vélo-heures disponibles / Ancrages-heures vides*	
<b>Piéton</b>	Marche	1 000	Longueur des trottoirs**		Tortuosité des voies Nb d'intersections (par type) Avancées de trottoir
<b>Taxi</b>	Auto / aucun	1 000	Nb aires d'attente de taxi		Temps d'attente après appel et sur la rue

\* Une station équilibrée offre un meilleur service qu'une station toujours pleine ou vide.

\*\* Distinguer entre les rues avec aucun trottoir, un trottoir d'un seul côté et un des deux côtés.

## Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur le réseau	Arrêts, liens, passages, stations, etc.
Information sur les ménages	Géolocalisation des domiciles
	Type de ménage
	Revenu
Information sur les individus	Âge, sexe
Information sur les déplacements	Origine / Destination

## Limites, améliorations possibles et perspectives

Indicateurs d'accessibilité :

- Changer la zone circulaire basée sur le rayon pour une zone représentant un temps de marche, à vélo ou en automobile.
- Pour les liens et les corridors, étudier les définitions possibles d'intensité de service et des zones considérées.
- Étudier les possibilités d'intégrer la notion de multimodalité, la disponibilité de places de stationnement, le transport adapté.
- Passer à des indicateurs axés sur les opportunités atteignables, comme le nombre d'opportunités pour un temps de trajet déterminé par le mode emprunté. Les opportunités ne varient pas nécessairement seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps si l'on considère les heures d'ouverture.

Indicateurs d'équité :

- Tester la sensibilité de l'indice de Gini, et voir au développement d'autres indices d'équité.
- Établir une structure des réseaux à considérer selon le segment de population étudié. En effet, les segments de population ont des contraintes particulières, Par exemple, les jeunes ne peuvent posséder de permis de conduire, et donc l'étude de leur accès à l'autopartage n'a aucun intérêt.

## QUANTITÉ DE MATIÈRES DÉSUÈTES ET EFFICACITÉ DE RÉCUPÉRATION

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la quantité de déchets provenant des véhicules, ce qui implique également la connaissance de la proportion des déchets recyclés.

#### Variations de la quantité de matières produites et de l'efficacité de récupération

E

✓	Espace	L'administration, associée à un territoire, définit les programmes de recyclage en vigueur.
---	--------	---

#### Base de données

~

Les données existent probablement au ministère de l'environnement, du développement durable et des parcs (MDDEP). Le défi est donc de récupérer ces données et de les mettre au profit du secteur des transports.

#### Avancées de la recherche

~

La consommation de matériaux issus des véhicules est peu prise en compte dans les analyses traditionnelles en transport. Cependant, des analyses du cycle de vie portant sur les véhicules et les carburants existent (Spielmann & Althaus, 2007).

### Indicateur proposé

*Quantité de matières désuètes (véhicule, pneus et huiles usés) et proportion de ces matières qui sont recyclées ou réutilisées*

#### Hypothèses

Les véhicules, les pneus et les huiles usés sont répertoriés. Une partie des matériaux est recyclée ou réutilisée à d'autres usages. Le reste se retrouve dans les sites d'enfouissement.

#### Formulation

D-I-M-G-T

Territoire  $s$ :

$$\begin{aligned} \text{Quantité matière désuète}_s & \\ &= \text{Quantité de matières usées ou hors d'usage}_s \\ &- \text{Quantité de matières recyclées}_s \end{aligned}$$

$$\text{Efficacité de récupération}_s = \frac{\text{Quantité de matières recyclées ou réutilisées}_s}{\text{Quantité de matières usées ou hors d'usage}_s}$$

Déplacement  $i$  :

Soit un véhicule dont l'utilisation produit la quantité moyenne de déchets (pneus, huiles)  $Matière\ usée_{veh\ vie}$  durant sa durée de vie utile moyenne  $t_{vie}$  (correspondant à un kilométrage de vie utile  $Distance_{veh\ vie}$ ) :

$$\begin{aligned} & \text{Quantité de matière désuète} \\ &= \frac{Distance_i}{Distance_{veh\ vie}} \times Matière\ usée_{veh\ vie} \times (1 \\ & \quad - Efficacité\ de\ récupération_s) \end{aligned}$$

Individu, ménage ou générateur :

Remplacer la distance du déplacement par la somme des distances des déplacements d'un jour moyen de semaine.

Lien ou corridor : N/A

### Information requise pour l'estimation

Information sur le territoire étudié	Véhicules hors d'usages, ainsi que des huiles et des pneus usés Matières récupérées pour réutilisation et recyclable
Information sur la parc de véhicules	Kilométrage moyen correspondant à la durée de vie utile d'un véhicule Quantité moyenne de déchets (véhicule, pneus, huiles) durant la durée de vie utile d'un véhicule
Information sur le déplacement	Origine / Destination
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau Distance de trajet

### Limites, améliorations possibles et perspectives

- Cet indicateur exclut la construction, l'opération et l'entretien liés aux infrastructures. Étudier la pertinence et la possibilité d'intégrer d'autres objets que les véhicules.
- Faire une distinction entre les matières désuètes mises au dépotier conventionnel, les matières dangereuses récupérées pour entreposer de façon sécuritaire (sans réutilisation) et les matières recyclées ou revalorisées à d'autres usages.
- Développer une méthodologie d'estimation pour les liens et les corridors.
- Intégrer les autres modes de transport (autobus, vélos, souliers, etc.).
- Étudier la possibilité d'utiliser l'année comme référentiel pour l'indicateur. Cela suppose de pouvoir estimer le kilométrage annuel parcouru par le véhicule analysé. Cette donnée ne peut pas être tirée directement des EOD, qui sont traditionnellement constituées pour les jours de semaine. Advenant des enquêtes réalisées tout au long de l'année et incluant la fin de semaine, cette donnée pourrait être estimée.

## SURFACE ET TAUX D'UTILISATION DE L'EMPRISE AU SOL DES RÉSEAUX DE TRANSPORT

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution de la mobilité à l'occupation d'espace au sol et à la minéralisation de cet espace.

Évaluer l'efficacité d'utilisation des infrastructures qui occupent de l'espace au sol et minéralisent ce dernier.

On cherche à maximiser le nombre de passagers tout en minimisant la surface occupée. Les situations à éviter sont :

- Un espace vide (réservé en vue d'être utilisé),
- Un espace rempli par des véhicules immobiles (en congestion ou stationné).

Cet indicateur se décompose donc en deux volets : (1) surface au sol occupée par les infrastructures et (2) l'efficacité d'utilisation de cet espace.

#### Variations de l'utilisation par les usagers de l'emprise au sol réservée aux infrastructures E-T

✓	Espace	<p>L'achalandage du réseau varie selon le nombre d'individus qui se destinent à un endroit.</p> <p>La présence ou l'absence d'infrastructures au sol témoignent de cette variation.</p>
✓	Temps	<p>L'achalandage du réseau varie dans le temps, selon l'heure à laquelle se déplacent les individus.</p> <p>Les voies réservées à un type de véhicule varient dans le temps.</p>

#### Base de données ~

Les données de localisation et de caractérisation des voies de circulation sont disponibles. Dans le cas de l'automobile, l'information sur les stationnements (sur rue ou hors-rue) est plus compliquée à compiler. Quant à l'utilisation de ces infrastructures, elles peuvent être estimées à partir de comptages ou d'échantillons de données sur les déplacements, lorsqu'ils existent.

#### Avancées de la recherche ~

Les indicateurs sur l'occupation du sol consistent habituellement en l'emprise au sol du réseau routier (ou la surface par habitant). Quant à l'utilisation des voies de circulation, les modèles d'estimation de la demande pour l'automobile et le transport en commun (et sa distribution sur le réseau) sont développés depuis longtemps (et sont en constante évolution). Un intérêt grandissant se fait sentir pour les stationnements automobiles.

## Indicateur proposé - Volet 1

*Emprise au sol occupée par les voies de circulation et les stationnements par passager-kilomètre, par réseau de transport.*

### Hypothèses

---

L'emprise au sol rend compte de la surface réelle allouée à la circulation et au stationnement, utilisée ou non. Le fait de diviser par des passagers-kilomètres permet d'estimer le taux d'utilisation de cette emprise. Également, les différents réseaux de transport peuvent être comparés entre eux.

### Formulation

---

½(I-M-G)-T-L-C

Territoire, lien ou corridor :

Soit le réseau de transport  $i$

*Taux de l'utilisation de l'emprise au sol<sub>i</sub>*

$$= \frac{\text{Emprise des voies de circulation}_i}{\text{Passagers}_i} + \frac{\text{Emprise des stationnements}_i}{\text{Passagers}_i}$$

Le nombre de passagers correspond à l'achalandage du réseau.

L'emprise au sol des stationnements automobile et cyclable n'est probablement pas une donnée connue pour la plupart des territoires.

Générateur, personnes ou ménages :

Seule la partie sur le stationnement s'applique

Déplacements : N/A

## Indicateur proposé - Volet 2

*Surface-heure réservée (occupée par le véhicule ou en attente de l'être) par passager.*

### Hypothèses

La surface-heure réservée est le cumul du temps où les surfaces de stationnement et de circulation sont allouées à un déplacement et au véhicule qui lui est associé, s'il y a lieu.

### Formulation

D-I-M-G-T

Déplacement :

Soit le déplacement  $j$  effectué à l'aide du réseau de transport  $i$

$$\begin{aligned}
 \text{Surface – heure réservée} \\
 &= \text{Surface – heure de stationnement (occupé + attente)}_{\text{origine}} \\
 &+ \text{Surface – heure en circulation} \\
 &+ \text{Surface – heure de stationnement (occupé + attente)}_{\text{destination}}
 \end{aligned}$$

Où

$$\begin{aligned}
 \text{Surface – heure de stationnement occupée} \\
 &= \frac{\text{Surface du stationnement} \times \text{Durée de stationnement}}{\text{Nombre de passagers / véhicule}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Surface – heure de stationnement en attente} \\
 &= \frac{\text{Surface du stationnement} \times \text{Durée d'attente du véhicule}}{\text{Nombre de passagers / véhicule}}
 \end{aligned}$$

$$\text{Surface – heure de circulation} = \frac{\text{Surface du véhicule} \times \text{Durée de déplacement}}{\text{Nombre de passagers / véhicule}}$$

Personne ou ménage :

Somme des surfaces-heures pour tous les déplacements d'une journée.

Territoire ou générateur :

Moyenne des surfaces-heures par personne.

Lien ou corridor : N/A

### Information requise pour l'estimation

Information sur le déplacement	Origine / Destination
	Mode de transport
	Durée d'activités
	Type de stationnement (partagé ou non)
Information sur le véhicule	Taille du véhicule
	Taux d'occupation du véhicule
Information sur le réseau	Longueur et largeur des voies de circulation, des voies d'accotement et des stationnements
	Nombre de déplacements ou achalandage (en personnes)
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau
	Temps de parcours

### Limites, améliorations possibles et perspectives

- Analyser la sensibilité des indicateurs proposés. Cet indicateur devrait permettre d'intégrer les réseaux de transport émergents et non conventionnels, comme le taxi, l'autopartage et le vélopartage.
- Constituer une base de données des surfaces de stationnement actuellement existantes.
- Améliorer l'information sur les voies de circulation et de stationnement à usage partagé. Étudier comment les insérer dans les calculs. Par exemple, durant certaines heures, des voies d'autoroutes sont réservées aux bus ou au covoiturage. Aussi, certains stationnements sont partagés par des entreprises aux horaires différents (jour/nuit) se qui maximise l'utilisation de l'espace.
- Le second volet qui témoigne de l'usage d'une infrastructure comporte un paradoxe qui peut nuire à l'interprétation : l'infrastructure offerte est corrélée avec son achalandage. En effet, il se peut que l'infrastructure soit existante mais très peu utilisée, en raison d'un mauvais aménagement ou d'autres facteurs. C'est le cas par exemple de certains quartiers conçus pour les modes motorisés : des trottoirs y existent mais peu de piétons les utilisent. Ce paradoxe mérite d'être étudié, et l'indicateur proposé également.
- Étudier la possibilité d'intégrer les deux volets en un seul indice.

## QUANTITÉ ET EFFICACITÉ D'UTILISATION D'ÉNERGIE

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution de la circulation des véhicules à la consommation d'énergie, et ce, pour les différentes sources d'énergie (carburants fossiles, électricité, etc.). L'approche met de l'avant le lien avec la consommation de ressources naturelles.

#### Variations de la consommation d'énergie

E - T

✓	Espace	La distribution spatiale des types de véhicules, et donc leur taux de consommation, ainsi que la distance parcourue et le taux d'occupation des véhicules influencent la distribution de la consommation d'énergie sur le territoire.
✓	Temps	La température, qui varie selon les saisons, influence l'utilisation du chauffage et de l'air climatisé dans les véhicules. Cela fait varier le taux de consommation de carburant.

#### Possibilité de collecte de données

~

La quantité totale de carburant vendu est disponible. Cependant, cette donnée est trop agrégée, comprenant tous les véhicules et tous les déplacements, sans distinctions. Ceci est un obstacle pour les analyses sur la contribution individuelle. La Société d'assurance automobile du Québec (SAAQ) possède une base de données des véhicules immatriculés, selon le code postal. Cette information sur le type de véhicule permet de connaître le taux de consommation d'essence.

La quantité d'électricité consommée pour recharger les véhicules n'est pas disponible.

#### Avancées de la recherche

✓

De nombreuses et récentes recherches s'intéressent à l'estimation de la consommation d'essence. Les autres sources d'énergie sont moins étudiées, étant donné leur faible part dans la parc actuelle de véhicules.

### Indicateur proposé

*Consommation d'énergie, par source d'énergie*

*(a)totale et (b) par passager-km*

#### Hypothèses

- Le corps humain dépense de l'énergie lorsqu'il utilise des modes actifs (marche, vélo), et utilise de la nourriture et de l'eau pour subvenir à ces dépenses. Ces ressources naturelles consommées par le corps humain sont exclues.
- La quantité totale d'énergie reflète la pression exercée sur les ressources naturelles, captant à la fois les effets d'augmentation de population et d'allongement des distances parcourues.

- La consommation d'énergie par passager-km, ou l'efficacité de consommation d'énergie, exclut les variations de population et de distances parcourues. Seule l'évolution du parc de véhicules et du taux de remplissage des véhicules apparaissent. Cet unité rend possible la comparaison entre différents modes de transport.
- L'indicateur n'agrège pas les types d'énergie.
- Automobile : Étant donné que l'EOD ne collecte pas d'information sur le type d'automobile possédée, le taux de consommation associé à un véhicule est équivalent à la moyenne pour les véhicules immatriculés dans un territoire du domicile (zonage le plus fin possible).

## Formulation

## D-I-M-G-T-L-C

### **AUTOMOBILE**

Déplacement :

Soit un type de véhicules  $i$  (électrique, hybride, essence, diesel, ...) ayant un taux de consommation moyen d'énergie  $j$  (type de carburant ou électricité)

- $tv_j$  en ville et
- $tr_j$  sur la route.

Soit un territoire  $S$  du domicile de la personne réalisant le déplacement sur lequel est immatriculé un nombre total  $N_i$  de véhicules de type  $i$ . La proportion de véhicules de type  $i$  se calcule ainsi :

$$P_{i,S} = \frac{N_i}{\sum N_i}$$

Soit la distance de trajet  $dist\_trajet$  divisée en deux, en raison de taux de consommation moyens différents selon les conditions de ville ou d'autoroute :

- la distance parcourue en ville ou sur autoroute sous congestion  $dist\_ville_{\acute{e}q}$  est associée au taux de consommation  $tv_j$ ;
- la distance parcourue sur autoroute sans congestion  $dist\_route_{\acute{e}q}$  est associée au taux de consommation  $tr_j$ .

(a) Pour chaque énergie  $j$  est associée une quantité consommée :

$$\acute{E}nergie\ consomm\acute{e}e_j = \sum (P_{i,S} \times dist\_ville_{\acute{e}q} \times tv_j) + \sum (P_{i,S} \times dist\_route_{\acute{e}q} \times tr_j)$$

(b) Soit l'efficacité énergétique dudit déplacement  $Efficacite\_energie$ ,

$$Efficacite\_energie_j \left( \frac{l\ ou\ kWh}{pass - km} \right) = \frac{\acute{E}nergie\ consomm\acute{e}e_j (l\ ou\ kWh)}{dist\_trajet (km) \cdot Taux\ occupation_{veh,t} \left( \frac{passagers}{v\acute{e}hicule} \right)}$$

Individu, ménage, générateur, territoire, lien ou corridor :

Somme de tous les déplacements pour un jour de semaine

### **TRANSPORT EN COMMUN**

Déplacement :

Soit une ligne de transport en commun *ligne* desservie par un véhicule de type *i* ayant un taux de consommation d'énergie *j* moyen :

- $t_{i,p}$  pour le kilométrage productif,
- $t_{i,imp}$  pour le kilométrage improdactif (haut-le-pied, soit les distances parcourues à vide pour réaliser un nouveau trajet).

Son trajet est composé de  $N$  arrêts et donc de  $(N-1)$  segments de ligne :

- Distance productive de la ligne  $d_{prod}$ ,
- Distance improdactive de la ligne  $d_{improd}$ .

Chaque segment de ligne  $SL$  de longueur  $d_{SL}$

- Improductivité liée au segment de ligne :

$$d_{improd_{SL}} = \frac{d_{SL}}{d_{prod}} \times d_{improd}$$

(a) Énergie consommée pour le segment de ligne :

$$\text{Énergie consommée}_{SL,j} = (d_{improd} \times t_{i,imp}) + (d_{prod} \times t_{i,p})$$

(b) Efficacité énergétique du segment de ligne :

$$\text{Efficacite\_energie}_{SL,j} = \frac{(d_{improd} \times t_{j,i,imp}) + (d_{prod} \times t_{j,i,p})}{d_{SL} \cdot \text{Taux de remplissage}_{SL}}$$

- Idéalement, le taux de remplissage est une moyenne pour le segment de ligne et l'heure d'emprunt de la ligne. La donnée peut cependant être simplifiée à une moyenne par jour pour la ligne.

Déplacement, individu, ménage, générateur, territoire, lien ou corridor :

- Faire la somme de tous les segments de lignes empruntés lors des déplacements pour l'énergie totale consommée de type  $j$ ;
- Pour l'efficacité énergétique, faire la moyenne des efficacités pondérées par le distance du segment de ligne :

$$\text{Efficacite\_energie}_j = \sum \left( \text{Efficacite\_energie}_{SL,j} \times \frac{d_{SL}}{\text{distance totale de parcours}} \right)$$

### Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur les déplacements	Origine / Destination
	Mode de transport
	Taux d'occupation des véhicules
Information sur les véhicules	Taux de consommation d'énergie
	Kilométrage à vide
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau
	Distance de parcours

### Limites, améliorations possibles et perspectives

- Étudier les possibilités de développer un indice agrégeant tous les types d'énergie.
- La méthodologie ci-haut proposée peut être raffinée ou simplifiée au besoin, en utilisant des données plus ou moins désagrégées. Par exemple, pour le transport en commun, le niveau de détail demandé ici est élevé. Il serait possible d'utiliser une moyenne pour le kilométrage improductif. Pour l'automobile, le taux de consommation de carburant pourrait être raffiné, par exemple selon la température du moteur au démarrage du véhicule.
- Étudier la variation temporelle et spatiale du taux de remplissage des véhicules de transport collectif. L'efficacité énergétique varierait ainsi dans le temps (selon l'heure et le type de jour).

## QUANTITÉ, EFFICACITÉ ET ÉQUITÉ DE DISTRIBUTION DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS

Par polluants, on entend :

- les polluants émis dans l'air (NO<sub>x</sub>, COV, CO, SO<sub>2</sub>, particules fines, plomb, HAP et HAM) par la circulation des véhicules motorisés;
- le bruit émis par la circulation des véhicules motorisés;
- les polluants se retrouvant dans l'eau suite au ruissellement (circulation, entretien et stationnement);
- la lumière émise par les infrastructures de transport, les stationnements et la circulation des véhicules motorisés;
- la nuisance à la beauté du paysage.

### Généralités

#### Objectif général

---

Évaluer la contribution de la mobilité à l'émission de polluants, ainsi que la dispersion de ces polluants et l'équité de distribution de la population autour de ces polluants. Cet indicateur se divise en deux volets : (1) la quantité d'émissions et (2) l'équité de distribution de ces émissions.

#### Variations des émissions émises

E-T-P

✓	Espace	La distribution spatiale des types de véhicules, et donc leur taux d'émission de polluants, ainsi que la distance parcourue et le taux d'occupation des véhicules influencent la distribution des émissions de polluants sur le territoire.
✓	Temps	La température et le vent influencent les émissions de polluants et leur dispersion.
✓	Perception	Chaque personne perçoit différemment le bruit, la lumière et le paysage.

#### Possibilité de collecte de données

---

Les émissions atmosphériques à la source des véhicules sont largement étudiées en laboratoire, mais moins bien en situation réelle.

Sur le terrain, les données sur la concentration de polluants atmosphériques ou le niveau de bruit ambiant sont collectées. Cependant, la contribution des transports à ces concentrations est plus difficile à isoler.

Il n'existe pas de collecte de données officielle sur la luminosité ou l'impact sur le paysage.

#### Avancées de la recherche

---

Les modèles d'émissions de bruit et de polluants atmosphériques existent. Les quantités produites sont estimées à partir des modèles d'affectation des déplacements sur le réseau. Bien que les modèles de dispersion existent, il est difficile de reproduire la réalité sans inclure les autres sources de polluants, qui influencent les dynamiques de dispersion.

### Indicateur proposé - Volet 1

*Quantité de polluants émis par la circulation des véhicules, par type de polluant*

*(a)totale et (b) par passager-km*

#### Hypothèses

L'efficacité d'émissions par passager-kilomètre permet de comparer les modes entre eux.

#### Formulation

D-I-M-G-T-L-C

Formulation identique à l'indicateur sur l'énergie.

### Indicateur proposé - Volet 2

*Indice de Gini appliqué à la distribution de la population par rapport aux émissions de polluants.*

#### Hypothèses

Puisqu'il est difficile d'isoler la contribution des transports dans les modèles de dispersion, seul le lieu d'émission est ici pris en compte.

#### Formulation

D-I-M-G-T

Formulation identique à l'indicateur d'équité d'accès (Intensités de services, options de transport et équité d'accès Volet 3), mais appliqué à l'émission.

### Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur les déplacements	Origine / Destination
	Mode de transport
	Taux d'occupation des véhicules
Information sur les véhicules	Kilométrage à vide
	Taux d'émission de polluants
Information sur les ménages	Type de ménage
	Revenu
Information sur les individus	Âge, sexe
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau
	Distance de parcours

## Limites, améliorations possibles et perspectives

- Développer une mesure de la lumière émise la nuit par la circulation des véhicules motorisés et par le système d'éclairage du réseau.
- Développer une mesure du niveau de beauté des infrastructures, selon la perception des citoyens.
- Développer une mesure de la quantité de polluants émis dans l'eau (sel, métaux lourds, hydrocarbures) en raison de l'entretien et de l'utilisation des infrastructures.
- Développer la possibilité d'intégrer les émissions de polluants atmosphériques en un seul indice.

## QUANTITÉ ET EFFICACITÉ DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE (GES)

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution de la mobilité à l'émission de gaz à effet de serre.

#### Variations des émissions de GES

E-T

✓	Espace	La distribution spatiale des types de véhicules, et donc leur taux d'émission de GES, ainsi que la distance parcourue et le taux d'occupation des véhicules influencent la distribution des émissions de GES sur le territoire.
✓	Temps	La température et le vent influencent les émissions de GES.

#### Possibilité de collecte de données

~

Les émissions atmosphériques à la source des véhicules sont largement étudiées en laboratoire, mais moins bien en situation réelle.

#### Avancées de la recherche

~

Les modèles d'émissions de GES sont tirés de l'affectation des déplacements sur le réseau. Ces derniers intègrent mal certains facteurs d'influence comme la température du moteur au démarrage, l'utilisation du chauffage ou de l'air climatisé, le type de chaussée et son état, etc.

### Indicateur proposé

*Quantité de GES émis par la circulation des véhicules*

*(a) totale et (b) par passager-kilomètre*

#### Hypothèses

L'efficacité d'émissions par passager-kilomètre permet de comparer les modes entre eux.

#### Formulation

D-I-M-G-T-L-C

Formulation identique à l'indicateurs sur l'énergie, en remplaçant les taux de consommation par le taux d'émission.

### Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur les déplacements	Origine / Destination
	Mode de transport
	Taux d'occupation des véhicules
Information sur les véhicules	Taux d'émission de GES
	Kilométrage à vide
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau
	Distance de parcours

### Limites, améliorations possibles et perspectives

Limites et perspectives identique à l'indicateur sur l'énergie.

## COÛTS DIRECTS DE DÉPLACEMENT ET ÉQUITÉ DE DISTRIBUTION DES COÛTS

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer les dépenses privées reliées à la mobilité, et la contribution des systèmes de transport à l'accès financier équitable aux réseaux de transport. Deux volets divisent cet indicateur : (1) le coût de la mobilité et (2) l'équité de distribution des tarifs.

#### Variations des tarifs et des coûts d'utilisation

E-T-I-A

✓	Espace	Les tarifs peuvent varier selon la distance parcourue et les zones administratives définies par les opérateurs des réseaux de transport.
✓	Temps	Le tarif est parfois modulé selon le type de jour ou l'heure de la journée.
✓	Individu	Certains groupes de population bénéficient de tarifs réduits en raison de leur vulnérabilité sociale ou économique.
✓	Autre	Le tarif peut être moindre plus la fréquence d'utilisation du réseau de transport est élevée. Par exemple, il peut être possible de payer un abonnement plutôt qu'à l'unité.

#### Possibilité de collecte de données

~

Pour le transport en commun, les données tarifaires existent mais sont gérées par des opérateurs différents, ce qui complique la mise en commun de l'information. La même problématique, mais encore plus complexe, se retrouve pour les frais de stationnement.

#### Avancées de la recherche

~

La quantification des coûts de déplacement n'est pas un nouvel enjeu. Un des défis principaux est de ramener les coûts dans la même unité temporelle, et ce, afin de pouvoir les additionner. Plusieurs coûts sont traditionnellement calculés annuellement, alors que d'autres le sont mensuellement ou au kilométrage parcouru. De plus, certains coûts sont partagés entre les membres d'un même ménage, ou même avec l'employeur (ou tout lieu offrant le stationnement « gratuit » pour l'utilisateur).

### Indicateur proposé - Volet 1

*Coût moyen du déplacement, par mode et par segment de population.*

#### Hypothèses

Tous les coûts sont répertoriés au Tableau C-2Tableau , soit ceux liés :

- à la possession d'un véhicule pour l'automobile et le vélo (achat, entretien, permis, assurances);
- à l'accès aux réseaux de transport en commun, aux réseaux d'un mode partagé ou au réseau routier dans le cas des péages. Le coût peut être par un abonnement ou être payé à la pièce;

- au déplacement : l'énergie consommée, la durée du déplacement dans le cas des modes partagés et le stationnement si le véhicule est privé.

Les coûts liés à la marche sont nuls.

**Tableau C-2: Types de coûts liés au déplacement (TC = transport collectif)**

	Coûts	Dist- ance	Caract. Personne	Autres	Référence logique	Modes applicables
Possession de véhicule	Achat		Revenu	Durée de vie	\$ / Durée de vie (km ou ans) \$ / mois (location)	Automobile Vélo
	Entretien	✓		Pneus Huiles	\$ / km	Automobile Vélo
	Permis				\$/ 2 ans	Automobile
	Assurances	✓	Âge Antécédents		\$ / an	Automobile
Accès au réseau	Abonnement		Âge Statut	Opérateurs	\$ / soirée \$ / semaine \$ / mois \$ / an	TC Autopartage Vélopartage Automobile
	Entrée ou passage	✓	Âge Statut	Parcours	\$ / dépl.	Automobile TC
Déplace- ment	Énergie	✓	Conduite	Taux de consommation Prix de l'énergie	\$ / km	Automobile Autopartage
	Durée	✓		Parcours	\$ / h	Autopartage Vélopartage
	Stationnement		Statut	Heure Lieu Durée	\$ / h \$ / mois \$ / an	Automobile Vélo

### Formulation

### D-I-M-G-T-½(L-C)

Déplacement, individu, ménage, générateur ou territoire :

Puisque tous les coûts sont assumés selon des référentiels différents, il importe de les transposer au même référentiel. Idéalement, ce référentiel est le déplacement et la personne :

- Les coûts kilométriques ou à l'heure peuvent facilement être estimés à partir de l'affectation des déplacements sur le réseau utilisé. Pour les véhicules privés, il est nécessaire de diviser les coûts par le nombre de passagers dans le véhicule.

- Les coûts reliés à la possession d'un véhicule sont très difficiles à ramener au déplacement, ou même à la journée. Les assurances varient grandement selon l'âge de l'assuré, le type et l'âge du véhicule, et depuis peu selon le type de conduite et le kilométrage parcouru. L'entretien varie également selon l'âge du véhicule et les accidents. Certains individus achètent leur véhicule alors que d'autres le louent. L'idéal serait d'obtenir une moyenne de ces coûts selon l'âge et le statut (ou le revenu), et ce, par kilomètre parcouru.
- Le coût de l'entrée ou de passage dans un réseau est difficile à estimer dans le cas des abonnements. Il faut d'abord que l'information sur la possession d'un abonnement soit disponible (ce qui est le cas dans les EOD). Ensuite, pour ceux qui ont un abonnement, il est nécessaire de faire des hypothèses sur le nombre d'utilisations sur la période d'abonnement pour calculer un tarif par passage. Ces hypothèses risquent d'être très simplificatrices. Pour les véhicules privés, il est nécessaire de diviser les coûts par le nombre de passagers dans le véhicule.
- Les coûts de stationnement ou d'abonnement sont parfois gratuits pour l'utilisateur, mais payés par l'entreprise ou l'employeur. Les enquêtes origine-destination recueillent le type de stationnement et même, parfois, son tarif. Il faudrait estimer une moyenne du coût horaire par type de stationnement. Pour les véhicules privés, il est nécessaire de diviser les coûts par le nombre de passagers dans le véhicule.

Une fois tous les coûts ramenés par personne et par déplacement, il suffit :

- de les additionner pour rendre compte du coût quotidien par personne et par ménage, en divisant par le nombre d'occupants du véhicule.
- de faire une moyenne des coûts pour le territoire ou le générateur de déplacements.

Lien ou corridor :

Relativement au lien et au corridor, seuls ceux exprimés selon la distance, la durée ou le passage s'incluent facilement. Pour le stationnement, c'est plus délicat et cela devrait être étudié.

### **Indicateur proposé - Volet 2**

*Indice de Gini appliqué à la distribution des coûts quotidiens de déplacement.*

#### Hypothèses

Puisqu'il est difficile d'isoler la contribution des transports dans les modèles de dispersion, seul le lieu d'émission est ici pris en compte.

#### Formulation

D-I-M-G-T

Formulation identique à l'indicateur d'équité d'accès (Intensités de services, options de transport et équité d'accès Volet 3), mais appliqué aux coûts quotidiens de mobilité (calculé précédemment).

## Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur les déplacements	Origine / Destination
	Mode de transport
	Taux d'occupation des véhicules
	Type de stationnement
Information sur les véhicules	Type de véhicule possédé, s'il y a lieu
Information sur les ménages	Type de ménage
	Revenu
Information sur les individus	Âge, sexe
Information sur les réseaux de transport	Tarifs pour les différents réseaux : péages, tarifs d'entrées et d'abonnement, permis, stationnements, etc.
	Coûts de possession automobile, ramenés en kilométrage parcouru, par type de véhicule
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau
	Distance de parcours

## Limites, améliorations possibles et perspectives :

- Intégrer à la fois les tarifs à l'unité (utilisation unique) et d'abonnement pour une période variable (semaine, mois, année, etc.)
- Pour les véhicules privés dont l'utilisation est partagée à l'intérieur d'un ménage, étudier la possibilité de répartir les coûts de possession à tous les détenteurs du véhicule.
- L'indicateur devrait également se soucier des modes émergents (autopartage, vélopartage) et du transport adapté. En effet, leurs coûts sont différents des modes traditionnels. Par exemple, le premier donne accès à un véhicule particulier à un coût inférieur à la possession de ce véhicule. Le fait d'intégrer des modes émergents pose un défi particulier : l'EOD informe sur le mode du déplacement sans tenir compte du réseau emprunté (sauf dans le cas du transport en commun).
- Étudier si l'indice de Gini est approprié pour mesurer l'équité de distribution des coûts de déplacements.

## RÉCUPÉRATION DES FRAIS D'UTILISATION

Les dépenses courantes collectives pour l'opération et l'entretien des réseaux de transport sont mises en relation avec les revenus tirés des tarifs (billet, abonnement, taxe sur l'essence, péages, etc.).

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution des usagers (grâce à leur mobilité) à l'opération, à l'entretien courant et au maintien des différents réseaux de transport. Cela réfère à la responsabilité financière des biens collectifs.

#### Variations des revenus provenant des usagers

E-T-I-A

Variet de façon similaire à la variation des tarifs, avec quelques ajouts.

✓	Espace	Les tarifs peuvent varier selon la distance parcourue et les zones administratives définies par les opérateurs des réseaux de transport. Le climat et la géographie (hydrographie et géologie) influence la détérioration des infrastructures.
✓	Temps	Le tarif est parfois modulé selon le type de jour ou l'heure de la journée. La durée de vie des infrastructures est fonction de leur utilisation.
✓	Individu	Certains groupes de population bénéficient de tarifs réduits en raison de leur vulnérabilité sociale ou économique.
✓	Autre	Le tarif peut être moindre plus la fréquence d'utilisation du réseau de transport est élevée. Par exemple, il peut être possible de payer un abonnement plutôt qu'à l'unité.

#### Possibilité de collecte de données

✓

Pour les systèmes en place, les données financières existent. Pour les nouveaux projets mais aussi pour le maintien des actifs, les hypothèses financières dépendent de la planification des opérations d'entretien des infrastructures et des prévisions de la demande.

#### Avancées de la recherche

~

Les coûts de maintien des actifs peuvent être sous-estimés ou remis à plus tard dans les calculs. De plus, la valeur visée pour le taux de récupération des frais d'utilisation est sujet à débat social. En effet, la part des dépenses qui doit être attribuée directement aux usagers et celle attribuée aux différents paliers de gouvernement dépend des points de vue et peut être différente selon le mode de transport.

## Indicateur proposé

*Taux de récupération des frais d'utilisation (revenus et budget d'opération), par réseau et par type de dépenses (matériaux et main d'œuvre)*

### Hypothèses

Chaque déplacement :

- occasionne un coût de déplacement à l'utilisateur;
- engendre l'utilisation de liens du réseau (distance spécifique et corridors spécifiques).

Chaque réseau occasionne des coûts d'opération et d'entretien. Ils sont décomposables en autant de liens qui structurent ce réseau.

### Formulation

T-L-C

Soit le lien de réseau  $i$  correspondant également à un segment de trajet réalisé par l'individu  $j$  lors d'un déplacement. Le budget d'opération et d'entretien  $Budget_i$  :

$$Budget_{réseau} = \sum_i^{N \text{ liens de réseau}} Budget_i$$

Un déplacement effectué par l'individu  $j$  a un coût  $T$  et une distance totale  $D$ . Il se décompose en une série de liens du réseau  $i$  empruntés de longueur  $d_i$  auxquels sont attribués un coût  $t_i$  :

$$Budget \text{ alloué au lien } i : t_i = \frac{d_i}{D} T$$

Soit le volume  $V$  sur le lien  $i$  représenté par la somme des individus  $j$  qui l'empruntent lors d'un jour moyen de semaine :

$$Récupération \text{ des frais d'utilisation } i = \frac{\sum_j^V t_{i,j}}{B_i}$$

## Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur les déplacements	Origine / Destination Mode de transport
Information sur les réseaux de transport	Volumes et débits pour les différents liens du réseau Dépenses de matériaux et de main d'œuvre pour assurer l'opération et l'entretien du service
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau Distance de parcours

### **Limites, améliorations possibles et perspectives**

Cet indicateur est facilement estimable pour un opérateur de transport, dans son ensemble. Sa transposition au déplacement, à l'individu, au ménage, au générateur de déplacement, au lien ou au corridor est plus compliquée et à investiguer.

Étudier quelles dépenses doivent être incluses dans le calcul.

Étudier la pertinence d'intégrer les autres sources de financement et d'obtenir ainsi un portrait global.

## CONTRIBUTION DU TRANSPORT AU PIB

### Généralités

#### Objectif général

Contribution du secteur des transports à la productivité et à la compétitivité régionale.

#### Variations de la contribution du transport à la productivité régionale

E

- |   |        |  |  |
|---|--------|--|--|
| ✓ | Espace |  | La distribution de l'offre de transport varie dans l'espace. |
|---|--------|--|--|

#### Possibilité de collecte de données

~

Les données financières et sur les ressources humaines et matérielles existent, et sont répertoriés dans différents bilans annuels des opérateurs. Les répercussions indirectes sont plus difficiles à colliger.

#### Avancées de la recherche

~

Plusieurs bilans ont déjà permis d'estimer cette contribution pour le secteur automobile et le transport collectif. Cependant, des études similaires pour les modes actifs et émergents sont encore peu nombreuses.

### Indicateur proposé

*Proportion du Produit Intérieur Brut (PIB) attribuable au secteur des transports, par réseau de transport.*

#### Hypothèses

L'indicateur devrait tenir compte de :

- La main d'œuvre embauchée pour opérer et entretenir le réseau de transport;
- Le développement urbain induit par la présence d'un axe principal du réseau étudié (artère piétonne, station de métro et de train, etc.).

#### Formulation

T

Traditionnellement, la valeur du PIB est la somme des rémunérations des facteurs de production (salaires et autres revenus bruts avant impôts).

### Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur les réseaux de transport

Employés équivalent temps plein

Masse salariale

Dépenses de fonctionnement et d'immobilisation

### Limites, améliorations possibles et perspectives

Cet indicateur est estimable pour un opérateur de transport dans son ensemble. Sa transposition au déplacement, à l'individu, au ménage, au générateur de déplacement, au lien ou au corridor est plus compliquée et à investiguer.

## MAIN D'ŒUVRE DISPONIBLE POUR LES GÉNÉRATEURS D'EMPLOI

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la contribution de la mobilité à rendre la main d'œuvre disponible pour les générateurs d'emplois.

#### Variations de la disponibilité de la main d'œuvre

E-T

✓	Espace	La population active et les lieux d'emploi ont une distribution spatiale précise.
✓	Temps	L'offre de transport varie selon l'heure et le type de jour.

#### Possibilité de collecte de données

~

Le recensement ou l'EOD sont des sources existantes fournissant les domiciles des travailleurs. Cependant, les données d'emplois par type ne sont pas disponibles dans l'EOD (possibilité de le dériver à étudier). Les données sur les générateurs d'emplois existent probablement de façon éparse à travers différentes organisations, sans être colligées.

#### Avancées de la recherche

~

En recherche et en pratique, ce type d'analyse est réalisé par zone. Le passage à des méthodes désagrégées est plus difficile et moins courant en raison des données qui ne sont pas désagrégées non plus.

### Indicateur proposé

#### *Nombre de travailleurs à proximité des générateurs d'emplois.*

Pour un générateur d'emplois, il s'agit du nombre de personnes actives à l'intérieur d'une surface autour du générateur d'emplois définie par un temps de trajet fixe.

#### Hypothèses

Le temps de trajet doit correspondre au temps maximal acceptable pour se rendre au travail. Il pourrait être égal à la moyenne des temps de trajet pour motif travail dans une région métropolitaine. Pour l'instant, nous proposons ici 45 minutes.

En supposant que ce temps de parcours est fixe pour tous les modes de transport, la surface géographique autour du générateur d'emplois est moindre plus le mode de transport utilisé est lent. Ainsi, la marche aura une surface plus petite que celle du transport collectif, et donc moins d'emplois.

#### Formulation

G-T

Soit un mode de transport  $i$  générateur d'emplois  $j$  :

À partir de la géolocalisation du générateur d'emplois, une surface d'accès  $S_{i,j}$  correspondant aux lieux atteignables en 45 min en pointe de l'après-midi.

$$Nb\ travailleurs_{i,j} = Nb\ de\ pers.\ actives\ (travailleurs\ ou\ chômeurs)\ résidant\ dans\ S_{i,j}$$

Puisqu'il est souhaité d'obtenir un seul indicateur pour un générateur d'emplois, tous les modes de transport peuvent être cumulés :

$$Nb\ travailleurs_j = \sum Nb\ travailleurs_{i,j}$$

Un travailleur peut résider à l'intérieur de plusieurs surfaces d'accès simultanément. Dans ce cas, il sera comptabilisé autant de fois qu'il y a de modes de transport étudiés. Cela devient une façon d'octroyer une disponibilité plus élevée à cette main d'œuvre.

Puisqu'il est souhaité d'obtenir un seul indicateur pour un territoire donné, une moyenne de tous les générateurs d'emplois peut être réalisée.

### Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur territoire	Générateurs d'emplois géolocalisés. Distribution spatiale de la population, par type d'occupation (ou d'emploi si possible).
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau Temps de parcours

### Limites, améliorations possibles et perspectives

- Étudier les différentes façons d'agréger les nombre d'emplois accessibles pour les différents modes de transport.
- Si les données sont disponibles, le nombre d'emplois pourrait être subdivisé par secteur d'activité et correspondre au type d'activité du générateur d'emplois. Étudier diverses façons d'agréger les différents générateurs d'emplois.
- Cet indicateur est estimable pour une région dans son ensemble, à partir des générateurs d'emplois à l'intérieur de cette région. Sa transposition possible au déplacement, à l'individu, au ménage, au lien ou au corridor est plus compliquée et à investiguer.
- Les horaires de travail peuvent varier selon le type de générateur d'emplois. Le temps de trajet ici calculé en pointe d'après-midi pourrait être appelé à varier.
- Les générateurs localisés en périphérie d'une région auront un indicateur plus faible. Ce sera également le cas pour un territoire moins peuplé. Une analyse des conséquences de ces résultats devrait être suivie.

## ACCIDENTS ET LEURS VICTIMES PAR GRAVITÉ

Cet indicateur aborde un volet de la santé publique qui n'est couvert par aucun autre des indicateurs jusque-là présentés dans le système d'indicateurs. Les accidents touchent également à la quantité de matériaux utilisés et les coûts d'entretien de véhicules, s'il y a lieu.

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la fréquence et la gravité des accidents et de leurs victimes survenant lors des déplacements. On cherche à minimiser les retombées négatives d'accidents survenus lors de déplacements sur la santé physique des individus. On souhaite donc minimiser le nombre de blessures et leur gravité, ce qui implique également de minimiser le nombre et la gravité des accidents.

#### Variations des accidents et de leur gravité

E-T-P

✓	Espace	La quantité et le niveau de gravité des accidents et de leurs victimes varient dans l'espace et dans le temps, selon notamment la géométrie du réseau, la température et l'état de la chaussée, la vitesse et le volume d'utilisation..
✓	Temps	
✓	Perception	Le sentiment d'insécurité et le niveau de gravité d'un accident dépend en partie de la perception de l'individu.

#### Possibilité de collecte de données

✓

Les données sur les accidents de la route se trouvent notamment dans les rapports de police. Puisqu'ils ne sont initialement pas compilés à cette fin, ils ne sont pas géolocalisés automatiquement et cette tâche peut actuellement s'avérer complexe. Quoiqu'il en soit, toutes les données sont compilées annuellement pour donner le nombre d'accidents et de blessés par type de gravité, avec les modes de transport impliqués.

#### Avancées de la recherche

~

La comparaison entre les différents modes de transport n'est pas aisée. Les accidents sans victime ou avec victimes faiblement blessées sont moins répertoriés, voire aucunement dans le cas des modes actifs, parce qu'il n'y pas de bri matériel. De plus, la quantité d'accidents dépend de l'utilisation générale du mode : une augmentation des volumes et des débits sur les liens augmente le risque d'accidents (Direction de santé publique de Montréal, 2006).

### Indicateur proposé

*Indice des accidents par passager-kilomètre, par mode de transport*

*Indice des victimes par passager-kilomètre, par mode de transport*

#### Hypothèses

- Pour chaque mode, les passagers-kilomètres sont estimés à partir d'une affectation des déplacements sur le réseau.

- Un poids  $\beta$  pour chaque type de gravité est appliqué afin d'intégrer en un seul indice tous les types de gravité.

## Formulation

T-L-C

### Victimes

Territoire :

Soit un mode de transport  $i$ ,

$$\begin{aligned} \text{Nombre de victimes pondéré}_i &= \beta_{\text{lég}} \times \text{Nb blessés légers}_i + \beta_{\text{moy}} \times \text{Nb blessés moyens}_i + \beta_{\text{grav}} \\ &\times \text{Nb blessés graves}_i + \beta_{\text{décès}} \times \text{Nb décès}_i \end{aligned}$$

Où, par exemple,  $\beta_{\text{lég}}$  est égal à 1/10,  $\beta_{\text{moy}}$  à 2/10 et  $\beta_{\text{grav}}$  à 3/10 et  $\beta_{\text{décès}}$  à 4/10.

$$\text{Indice des victimes}_i = \frac{\text{Nombre de victimes pondéré}_i}{\text{Pass} - \text{km}_i}$$

Pour agréger tous les modes, additionner les victimes et les passagers-kilomètres totaux.

Lien ou corridor :

Géolocaliser les accidents.

### Accidents

Remplacer les blessés par le nombre d'accidents

## Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur le déplacement	Origine / Destination Mode de transport
Information sur territoire	Accidents et victimes par gravité, avec les modes de transport impliqués et le lie
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau Distance de parcours

## Limites, améliorations possibles et perspectives

- Cet indicateur est estimable pour une région dans son ensemble, à partir des générateurs d'emplois à l'intérieur de cette région. Sa transposition possible au déplacement, à l'individu, au ménage et au générateur de déplacement est plus compliquée et à investiguer.
- Afin de faire de la prévision ou de la planification d'interventions, développer pour l'indicateur une méthodologie d'estimation sensible à ces paramètres :
- Le nombre d'accidents dépend des caractéristiques du réseau (dévers de la route, visibilité, etc.), les caractéristiques du véhicule (pneus lisses, etc.), du débit d'entités en mouvement (véhicule ou piéton), de la vitesse du véhicule, des conditions météorologiques qui affectent le coefficient de frottement de la chaussée et la visibilité.

- Le nombre de victimes dépend du taux d'occupation du véhicule et du débit d'entité en mouvement (véhicule ou piéton).
- La gravité de blessure des victimes dépend de la vitesse du véhicule, des caractéristiques du véhicule (coussin gonflable, etc.) ou de l'absence de véhicule (piéton).

## NIVEAU DE CONGESTION DES ROUTES PRINCIPALES

### Généralités

#### Objectif général

Évaluer la congestion sur les réseaux de transport, soit les retards causés par un volume trop élevé sur le réseau. Cet indicateur est divisé en deux volets : (1) l'étendue et la durée de la congestion et (2) l'intensité et la variabilité de la congestion.

#### Variations de la congestion

E-T-P

✓	Espace	Selon le nombre d'origines et de destinations, ainsi que les choix de modes et de chemins empruntés.
✓	Temps	Selon les heures de départ des déplacements
✓	Perception	L'attente des usagers vis-à-vis la performance du réseau change en fonction des caractéristiques de l'individu et du déplacement.

#### Possibilité de collecte de données

✓

Les données existantes sur les vitesses sont multiples (GPS, bluetooth, etc.), et comportent chacun leur biais respectif.

#### Avancées de la recherche

~

Plusieurs études sont en cours pour valoriser les différentes bases de données de vitesses existantes. Cependant, ces indicateurs sont axés sur l'observation et le suivi de la congestion. Une fois l'analyse faite sur les tendances et variations de la congestion, la prévision et la comparaison de scénarios pourra être envisagée.

### Indicateur proposé - Volet 1

*Kilomètres-heures de congestion*

#### Hypothèses

Le kilométrage doit tenir compte du nombre de voies, ce qui intègre les voies réservées au transport en commun.

#### Formulation

T-L-C

Territoire, lien ou corridor :

Soit un tronçon  $i$  avec  $nvoies$  voies, de longueur  $long$  et étudié pour la période de temps  $t$ .

Soit la vitesse seuil de congestion  $S_i$  déterminée d'après la période de temps  $t$  et l'attente des usagers pour ce tronçon (en fonction par exemple de sa position par rapport au centre d'activité) :

$$km - h congestion_i = long_i \cdot nvoies_i \cdot t \text{ où } (vitesse\ moyenne < S_i)$$

Cet indicateur pourrait être dérivé pour différents niveaux de congestion (faible, modérée, élevée).

Une somme permet de calculer l'indicateur pour un lien, un corridor ou un territoire.

Pour s'appliquer aux déplacements, aux individus et aux ménages, on peut estimer la proportion des déplacements (en kilomètres) qui est réalisée en utilisant des tronçons congestionnés, en s'assurant que l'heure de passage sur le tronçon correspond à un moment où le tronçon est congestionné.

$$\text{Contribution à la congestion} = \frac{\text{Distance réalisée sur un tronçon congestionné}}{\text{Distance totale de parcours}}$$

## Indicateur proposé - Volet 2

*Délai : moyenne et variabilité*

### Hypothèses

Le réseau est découpé en tronçon égaux de 1 km de longueur. Le temps de parcours est égal à 1 sur la vitesse. Pour un tronçon, le délai représente le temps de parcours observé moins le temps de parcours attendu par les usagers. La variabilité du délai rend compte de la fiabilité du réseau.

### Formulation

T-L-C

Lien :

Pour un tronçon  $i$  :

$$\text{Délai}_i = \text{Temps de parcours moyen observé}_i - \text{Temps de parcours attendu}$$

Où le temps de parcours attendu est établi selon l'heure, le lieu ou tout autre élément influençant l'attente des usagers vis-à-vis le réseau.

$$\text{Variabilité}_i = \frac{\text{Écart - type}_i}{\text{Moyenne}_i}$$

Territoire :

Moyenne des délais de tous les tronçons et de leur variabilité.

Déplacement, individu, ménage, générateur, ou corridor:

Somme de tous les tronçons empruntés par le(s) déplacement(s) de la ou des personne(s).

## Requis pour l'estimation et l'interprétation

Information sur le déplacement	Origine / Destination
	Mode de transport
Information sur réseau	Vitesses réelles et affichées
Manipulations et calculs	Affectations sur le réseau
	Temps de parcours

## Limites, améliorations possibles et perspectives

- Étudier l'applicabilité de ces indicateurs aux autres modes que l'automobile. En principe, c'est applicable pour tous les modes dont le réseau est connu (vitesse affichée, nombre de voies), l'attente des usagers est connue, et des données de vitesse réelle sur le réseau sont disponibles.
- Étudier comment agréger la variabilité calculée sur un tronçon à un trajet complet (déplacement, corridor), puis à un ou plusieurs individus (ménages, générateur de déplacements, etc.).

## ANNEXE D      INDICATEURS DE CONGESTION

**Tableau D-1 : Résultats des indicateurs d'intensité de la congestion sur les autoroutes de Montréal, par type de jour**

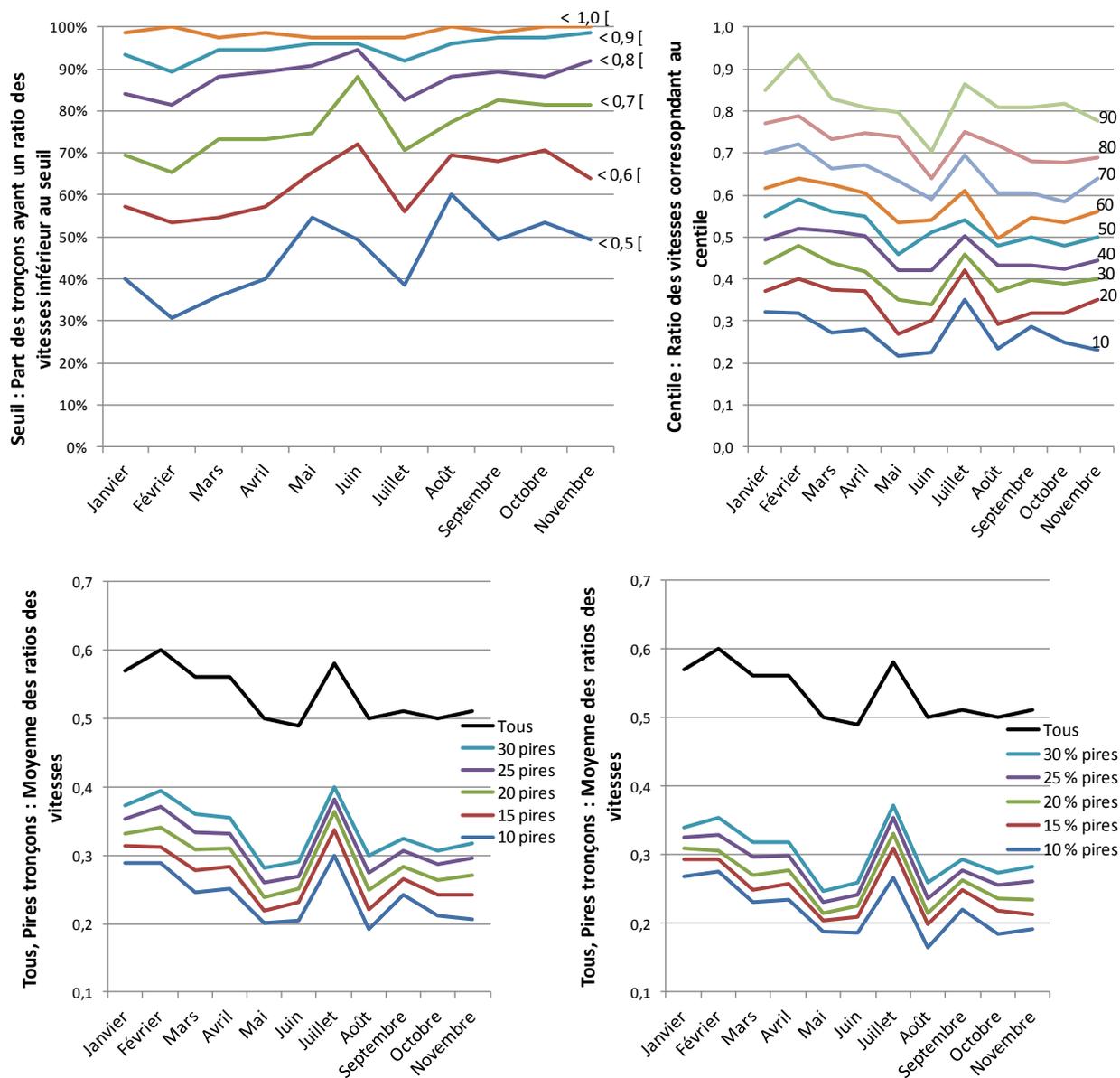
		Fin de semaine	Semaine	Amplitude
<b>Moyenne de tous les ratios Tous</b>		0.91	0.81	0.10
<b>Proportion des ratios sous le seuil</b>	< seuil 0,5 [	1%	4%	0.03
	< seuil 0,6 [	1%	13%	0.12
	< seuil 0,7 [	5%	23%	0.18
	< seuil 0,8 [	18%	39%	0.21
	< seuil 0,9 [	33%	61%	0.28
	< seuil 1,0 [	83%	87%	0.05
<b>Moyenne des X ratios pires</b>	10 Pires	0.62	0.43	0.18
	15 Pires	0.65	0.46	0.19
	20 Pires	0.67	0.48	0.19
	25 Pires	0.69	0.50	0.19
	30 Pires	0.70	0.51	0.19
<b>Moyenne de X % pires ratios</b>	10 % Pires	0.68	0.49	0.19
	15 % Pires	0.71	0.52	0.19
	20 % Pires	0.73	0.55	0.18
	25 % Pires	0.75	0.58	0.17
	30 % Pires	0.77	0.60	0.16
<b>Centile</b>	10	0.76	0.56	0.20
	20	0.80	0.66	0.14
	30	0.87	0.74	0.13
	40	0.91	0.80	0.11
	50	0.93	0.84	0.09
	60	0.95	0.89	0.06
	70	0.97	0.92	0.05
	80	0.99	0.97	0.02
	90	1.00	1.00	0.00

**Tableau D-2 : Résultats des indicateurs d'intensité de la congestion sur les autoroutes de Montréal, par période horaire en semaine**

	PM	AM	Jour	Nuit	Amplitude	
<b>Moyenne de tous les ratios</b> Tous	0.63	0.76	0.84	0.86	0.23	
<b>Proportion des ratios sous le seuil</b>	< seuil 0,5 [	31%	20%	4%	1%	0.31
	< seuil 0,6 [	45%	28%	7%	2%	0.43
	< seuil 0,7 [	62%	39%	17%	12%	0.50
	< seuil 0,8 [	72%	47%	34%	31%	0.41
	< seuil 0,9 [	82%	61%	55%	58%	0.27
	< seuil 1,0 [	98%	84%	90%	85%	0.14
<b>Moyenne des X ratios pires</b>	10 Pires	0.24	0.33	0.47	0.58	0.34
	15 Pires	0.26	0.34	0.51	0.60	0.34
	20 Pires	0.27	0.36	0.53	0.62	0.35
	25 Pires	0.29	0.37	0.55	0.64	0.35
	30 Pires	0.30	0.38	0.57	0.65	0.35
<b>Moyenne de X % pires ratios</b>	10 % Pires	0.27	0.35	0.53	0.62	0.346
	15 % Pires	0.30	0.38	0.56	0.64	0.349
	20 % Pires	0.31	0.40	0.60	0.67	0.354
	25 % Pires	0.34	0.43	0.62	0.69	0.353
	30 % Pires	0.36	0.45	0.65	0.70	0.347
<b>Centile</b>	10	0.32	0.42	0.61	0.67	0.35
	20	0.40	0.50	0.72	0.76	0.36
	30	0.49	0.61	0.77	0.79	0.30
	40	0.56	0.71	0.82	0.84	0.28
	50	0.63	0.81	0.88	0.86	0.25
	60	0.68	0.88	0.91	0.91	0.23
	70	0.77	0.94	0.93	0.94	0.17
	80	0.88	0.98	0.96	0.97	0.10
	90	0.94	1.00	1.00	1.00	0.06

**Tableau D-3 : Résultats des indicateurs d'intensité de la congestion sur les autoroutes de Montréal, par mois en période de pointe de l'après-midi (semaine)**

		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	An	Amplitude
<b>Moyenne de tous les ratios</b>	<b>TOUS</b>	0,57	0,60	0,56	0,56	0,50	0,49	0,58	0,50	0,51	0,50	0,51	0,53	0,11
<b>Proportion des ratios sous le seuil</b>	<b>&lt; 0,5 [</b>	0,40	0,31	0,36	0,40	0,55	0,49	0,39	0,60	0,49	0,53	0,49	0,47	0,29
	<b>&lt; 0,6 [</b>	0,57	0,53	0,55	0,57	0,65	0,72	0,56	0,69	0,68	0,71	0,64	0,61	0,19
	<b>&lt; 0,7 [</b>	0,69	0,65	0,73	0,73	0,75	0,88	0,71	0,77	0,83	0,81	0,81	0,80	0,23
	<b>&lt; 0,8 [</b>	0,84	0,81	0,88	0,89	0,91	0,95	0,83	0,88	0,89	0,88	0,92	0,93	0,13
	<b>&lt; 0,9 [</b>	0,93	0,89	0,95	0,95	0,96	0,96	0,92	0,96	0,97	0,97	0,99	0,96	0,09
	<b>&lt; 1,0 [</b>	0,99	1,00	0,97	0,99	0,97	0,97	0,97	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,03
<b>Moyenne des X ratios pires</b>	<b>10 pires</b>	0,29	0,29	0,25	0,25	0,20	0,20	0,30	0,19	0,24	0,21	0,21	0,25	0,11
	<b>15 pires</b>	0,31	0,31	0,28	0,28	0,22	0,23	0,34	0,22	0,27	0,24	0,24	0,28	0,12
	<b>20 pires</b>	0,33	0,34	0,31	0,31	0,24	0,25	0,36	0,25	0,28	0,26	0,27	0,30	0,13
	<b>25 pires</b>	0,35	0,37	0,33	0,33	0,26	0,27	0,38	0,28	0,31	0,29	0,30	0,32	0,12
	<b>30 pires</b>	0,37	0,39	0,36	0,35	0,28	0,29	0,40	0,30	0,32	0,31	0,32	0,34	0,12
<b>Moyenne de X % pires ratios</b>	<b>10 % pires</b>	0,27	0,28	0,23	0,23	0,19	0,19	0,27	0,17	0,22	0,18	0,19	0,23	0,11
	<b>15 % pires</b>	0,29	0,29	0,25	0,26	0,20	0,21	0,31	0,20	0,25	0,22	0,21	0,25	0,11
	<b>20 % pires</b>	0,31	0,31	0,27	0,28	0,22	0,23	0,33	0,22	0,26	0,24	0,24	0,27	0,12
	<b>25 % pires</b>	0,33	0,33	0,30	0,30	0,23	0,24	0,35	0,24	0,28	0,26	0,26	0,29	0,12
	<b>30 % pires</b>	0,34	0,35	0,32	0,32	0,25	0,26	0,37	0,26	0,29	0,27	0,28	0,31	0,12
<b>Centile</b>	<b>10</b>	0,32	0,32	0,27	0,28	0,22	0,23	0,35	0,23	0,29	0,25	0,23	0,27	0,14
	<b>20</b>	0,37	0,40	0,37	0,37	0,27	0,30	0,42	0,29	0,32	0,32	0,35	0,35	0,15
	<b>30</b>	0,44	0,48	0,44	0,42	0,35	0,34	0,46	0,37	0,40	0,39	0,40	0,40	0,14
	<b>40</b>	0,49	0,52	0,51	0,50	0,42	0,42	0,50	0,43	0,43	0,42	0,44	0,45	0,10
	<b>50</b>	0,55	0,59	0,56	0,55	0,46	0,51	0,54	0,48	0,50	0,48	0,50	0,51	0,13
	<b>60</b>	0,62	0,64	0,63	0,61	0,54	0,54	0,61	0,50	0,55	0,54	0,56	0,59	0,14
	<b>70</b>	0,70	0,72	0,66	0,67	0,63	0,59	0,69	0,61	0,61	0,58	0,64	0,64	0,14
	<b>80</b>	0,77	0,79	0,73	0,75	0,74	0,64	0,75	0,72	0,68	0,68	0,69	0,70	0,15
	<b>90</b>	0,85	0,93	0,83	0,81	0,80	0,70	0,86	0,81	0,81	0,82	0,78	0,76	0,23



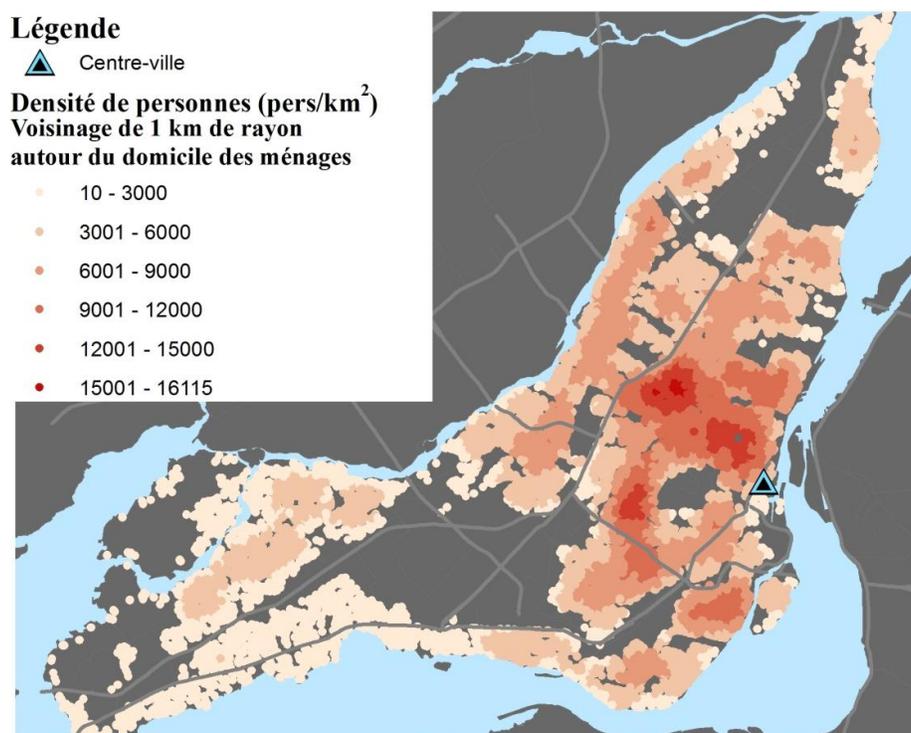
**Figure D-1 : Graphiques présentant les résultats des indicateurs d'intensité de la congestion sur les autoroutes de Montréal, par mois en période de pointe de l'après-midi (semaine)**

## ANNEXE E DISTRIBUTION SPATIALE DE LA POPULATION

Basée sur les données de l'EOD 2008, voici une brève analyse de la distribution spatiale des ménages et des personnes sur l'Île de Montréal, sans égard à l'offre de transport. Ces graphiques et cartes servent à étoffer l'interprétation des résultats et à mettre en perspective les analyses subséquentes sur l'équité d'accès. Une brève analyse des densités de population et de l'éloignement par rapport au centre-ville a été réalisée pour chaque segment de population.

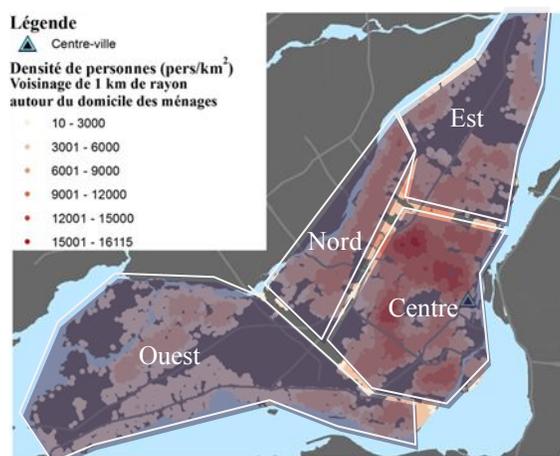
### *Densité de population du voisinage*

La carte de la Figure E-1 donne un aperçu de la distribution de la population sur le territoire de l'Île de Montréal. Avec la densité de population dans le voisinage des domiciles des ménages, elle montre que les quartiers les plus denses sont ceux autour du Mont-Royal (entre 9 000 et 16 200 personnes/km<sup>2</sup>). Les quartiers au centre-Nord de l'île, longeant la Rivière des Prairies, ainsi que ceux à l'Est du boulevard Papineau au sud de l'autoroute 40 sont moyennement denses (entre 6 000 et 9 000 personnes/km<sup>2</sup>). Enfin, les parties Ouest et extrême Est de l'île sont les moins denses (entre 10 et 6 000 personnes/km<sup>2</sup>).



**Figure E-1 : Carte des densités de personnes dans un voisinage de 1 km de rayon autour du domicile des ménages (personnes/km<sup>2</sup>) [Compilations réalisées à partir de l'EOD 2008]**

Pour faciliter la description des résultats préliminaires sur les mesures d'accès, les zones suivantes ont été définies (Figure E-2) : centre, nord, ouest et est.



**Figure E-2 : Identification des zones de population de l'Île de Montréal**

Le Tableau E-1 fait état des densités moyennes de population dans le voisinage des domiciles des personnes et des ménages, par segment de population. Ces calculs donnent un aperçu de la densité des quartiers dans lesquels vivent les différents segments de population:

- Personnes
  - Les personnes entre **20 et 34 ans** ont une moyenne de densité de population du voisinage élevée, avec plus de 7 000 personnes/km<sup>2</sup>. On peut donc supposer qu'elles sont plus nombreuses à vivre dans les quartiers les **plus denses**, soit ceux centraux.
  - Les personnes entre **5 et 19 ans** ont une moyenne de densité de population du voisinage faible, avec moins de 6 200 personnes/km<sup>2</sup>. Les jeunes (adolescents et enfants) ont une **moyenne de densité légèrement plus faible** que les autres. Cette différence est plus marquée chez les adolescents. On peut donc supposer qu'elles sont plus nombreuses à vivre dans les quartiers les moins denses, soit aux extrémités de l'île.
  - Il ne semble **pas y avoir de différence majeure** de densité de voisinage entre les **hommes** et les **femmes** (6 610 contre 6 540 personnes/km<sup>2</sup>), ni entre les **personnes âgées et les autres** (6 250 contre 6 230 personnes/km<sup>2</sup>).

- Les personnes ne possédant **pas de permis de conduire** ont un voisinage de **densité moyenne plus élevée** que celles en possédant un (7 130 contre 6 440 personnes/km<sup>2</sup>). On peut donc supposer qu'elles sont plus nombreuses à vivre dans les quartiers les plus denses, soit dans les quartiers centraux.
- Ménages
  - Il ne semble **pas y avoir de différence majeure** de densité de voisinage entre **ménages monoparentaux et les autres**, ni entre les **ménages à faible revenu** et les autres.
  - Les ménages **non-motorisés** ont une moyenne de densité de population du voisinage très élevée (7 910 personnes/km<sup>2</sup>). On peut donc supposer qu'ils vivent dans les **quartiers très denses**, au centre de l'île.
  - Les **personnes âgées vivant seules** ont une moyenne de densité de population du voisinage plus faible que le reste de la population (6 510 contre 6 900 personnes/km<sup>2</sup>). On peut donc supposer qu'ils sont plus nombreux à vivre dans les **quartiers un peu moins denses**, soit aux extrémités de l'île.

Ces observations sont compilées sous forme synthèse au Tableau E-1.

**Tableau E-1 : Densité de personnes dans un voisinage de 1 km de rayon autour du domicile des ménages (personnes/km<sup>2</sup>) [Compilé à partir de l'EOD 2008]**

<b>PERSONNES</b> <i>(Population vulnérable en italique)</i>	<b>Densité moyenne du voisinage</b> <b>(personnes / km<sup>2</sup>)</b>	<b>MÉNAGES</b> <i>(Population vulnérable en italique)</i>	<b>Densité moyenne du voisinage</b> <b>(personnes / km<sup>2</sup>)</b>
<i>Femmes</i>	6 540	<i>Personnes âgées seules</i>	6 510
<i>Hommes</i>	6 610	<i>Autres ménages</i>	6 900
<i>Enfants de 17 ans ou moins</i>	6 240	<i>Monoparentaux</i>	7 020
<i>Adultes de 18 ans ou plus</i>	6 650	<i>Autres ménages</i>	6 810
<i>Adolescents entre 12 et 15 ans</i>	6 060	<i>Non motorisés</i>	7 910
<i>Autres personnes</i>	6 590	<i>Motorisés</i>	6 300
<i>Adultes de 65 ans ou plus</i>	6 250		
<i>Autres personnes</i>	6 230		
<i>Sans permis de conduire</i>	7 130		
<i>Avec permis de conduire</i>	6 440		
<b>COHORTES</b>		<b>COHORTES (suite)</b>	
0 à 4 ans	6 540	25 à 34 ans	7 390
5 à 10 ans	6 190	35 à 44 ans	6 660
11 à 14 ans	6 080	55 à 64 ans	6 300
15 à 19 ans	6 150	65 à 74 ans	6 240
20 à 24 ans	7 020	75 ans et plus	6 260

### *Distance du domicile par rapport au centre-ville*

Les graphes cumulés de population ont été tracés en fonction de la distance du domicile par rapport au centre-ville. Ces graphes sont montrés à la Figure E-3 et leur interprétation est résumée au Tableau E-2. Les coordonnées du centre-ville utilisées sont celles de l'hôtel de ville de Montréal. Les graphiques confirment les tendances énoncées à la section précédente :

- Les adolescents et les enfants sont domiciliés plus loin du centre-ville que les autres (Graphes a et b);
- Les personnes entre 20 et 34 ans sont plus près du centre-ville (Graphe c);
- Les femmes sont très légèrement plus éloignées du centre-ville que les hommes (Graphe f);
- Les personnes sans permis de conduire et, dans une plus grande mesure, les ménages non motorisés sont domiciliés plus proche du centre-ville que les autres (Graphes g et h);

- Pour les personnes âgées, les personnes âgées vivant seules, les ménages monoparentaux et les ménages à faible revenu :
  - Très proche du centre-ville, la population vulnérable est sous-représentée par rapport à la population générale. Cependant, la population vulnérable rattrape ce « retard », en étant plus représentée pour des distances moyennes. Cela mène les courbes à se croiser (Graphes d à j).

**Tableau E-2 : Tableau synthèse de la distribution spatiale de la population**  
(p/r : par rapport)

<b>Comparaison du groupe vulnérable par rapport aux autres</b>			
<b>PERSONNES</b> <i>(Population vulnérable en italique)</i>	<b>Densité de population</b>	<b>Distance p/r centre-ville</b>	<b>Commentaire</b>
<i>Femmes</i>	-70	(+ élevée)	Très légère différence
<i>Hommes</i>			
<i>Enfants de 17 ans ou moins</i>	-410	+ élevée	
<i>Adultes de 18 ans ou plus</i>			
<i>Adolescents entre 12 et 15 ans</i>	-530	+ élevée	
<i>Autres personnes</i>			
<i>Adultes de 65 ans ou plus</i>	+20	+ moyenne	Sur représentés pour des distances moyennes p/r au CV
<i>Autres personnes</i>			
<i>Sans permis de conduire</i>	+690	+ faible	La différence apparaît à partir de 6km du CV
<i>Avec permis de conduire</i>			
<b>MÉNAGES</b>			
<i>Personnes âgées seules</i>	-390	+ moyenne	Sur représentés pour des distances moyennes p/r au CV
<i>Autres ménages</i>			
<i>Monoparentaux</i>	+210	(+ moyenne)	Très légèrement sur représentés pour des distances moyennes p/r au CV
<i>Autres ménages</i>			
<i>Non motorisés</i>	+1 610	++ faible	Grande différence
<i>Motorisés</i>			

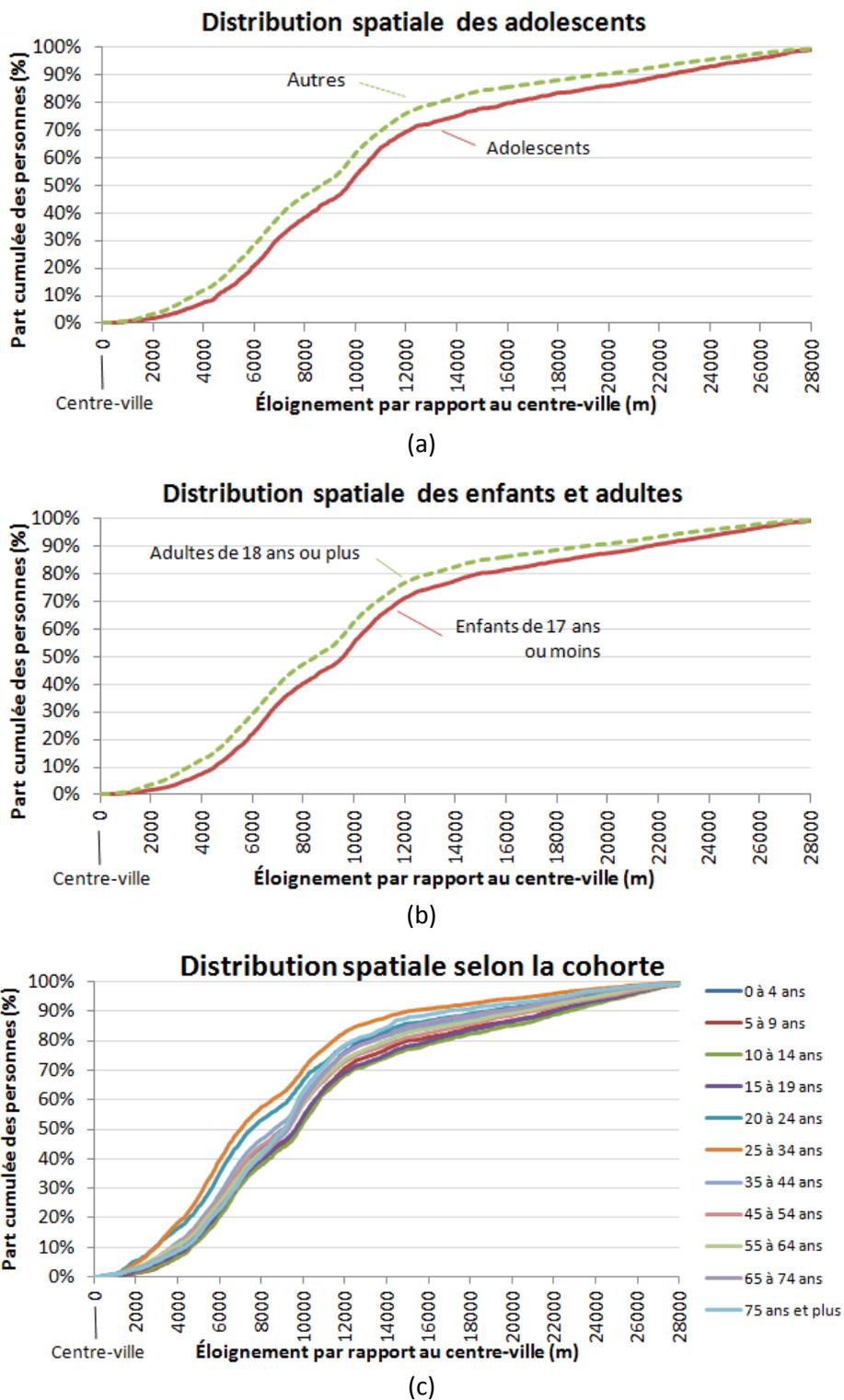
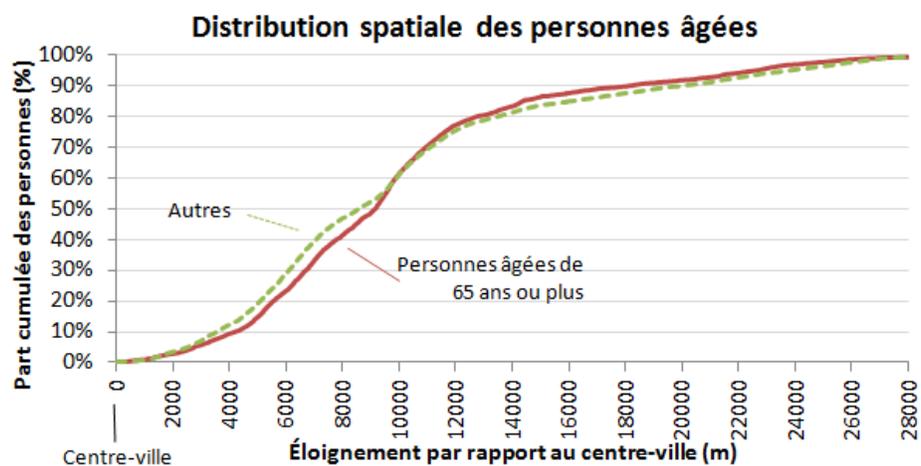
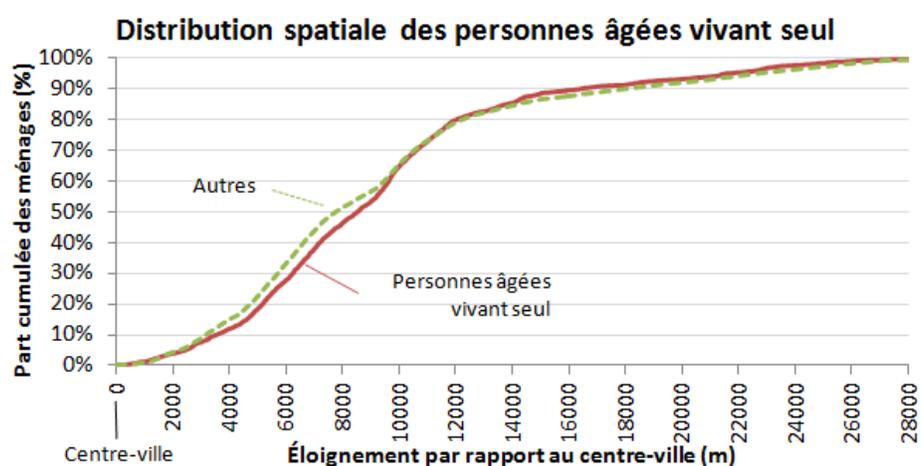


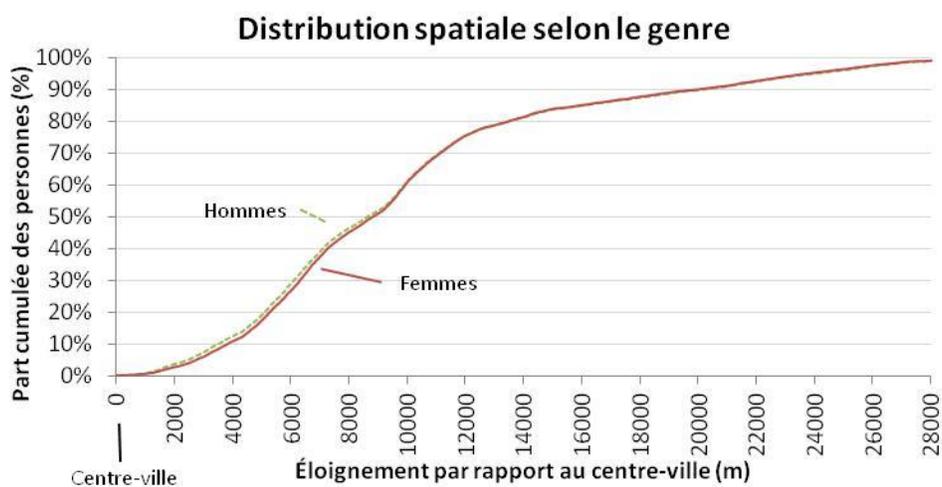
Figure E-3 : Éloignement par rapport au centre-ville [Compilé à partir de l'EOD 2008]



(d)

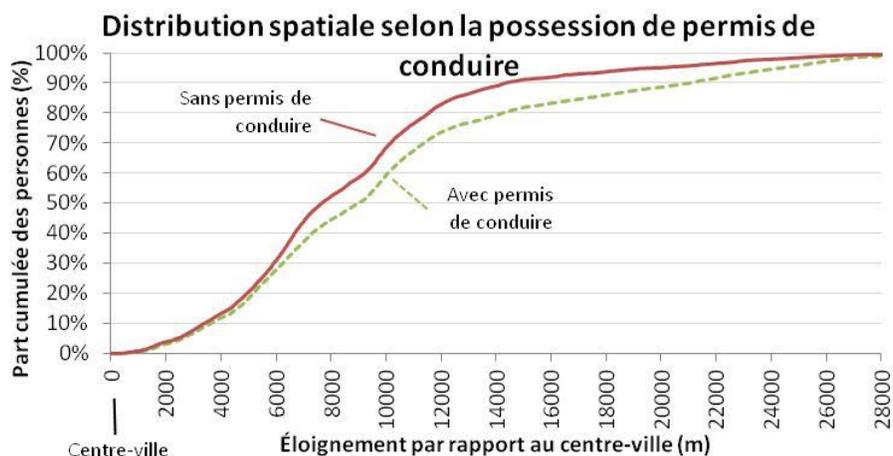


(e)

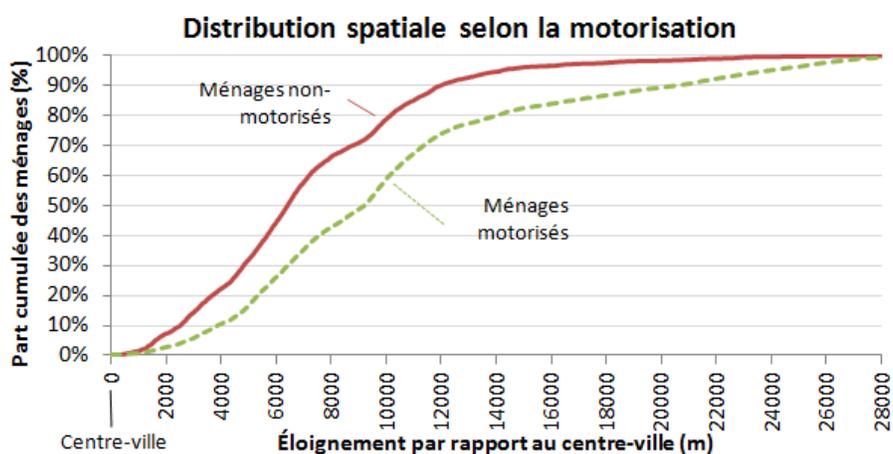


(f)

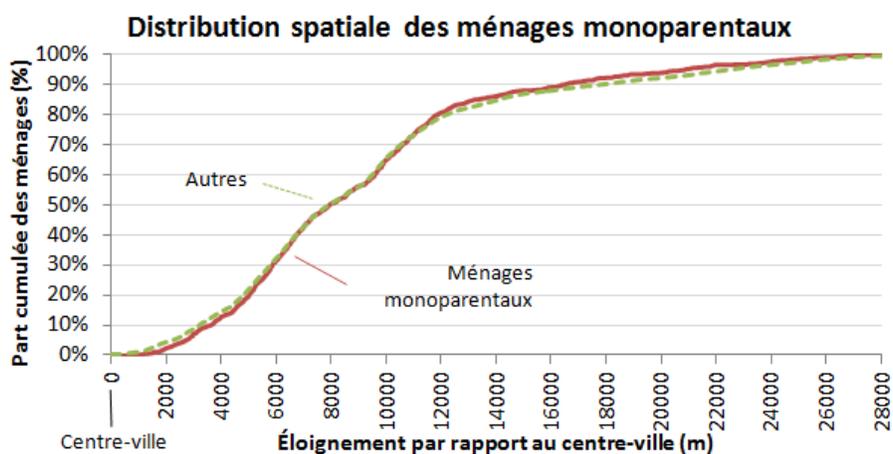
**Figure E-3 (suite) : Éloignement par rapport au centre-ville [Compilé à partir de l'EOD 2008]**



(g)

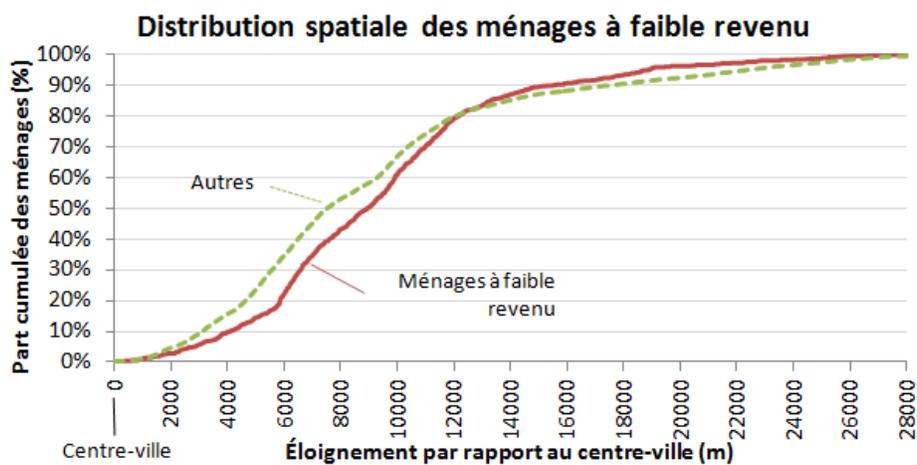


(h)



(i)

**Figure E-3 (suite) : Éloignement par rapport au centre-ville [Compilé à partir de l'EOD 2008]**



(j)

**Figure E-3 (suite) : Distribution spatiale en fonction de l'éloignement au centre-ville, par segment de population [Compilations d'après l'EOD 2008]**

## ANNEXE F      RÉSULTATS DU TEST KOLMOGOROV-SMIRNOV

Les informations ci-dessous expliquent les tableaux de résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov.

Pour une segmentation de population, il y a :

- Groupe 1 (G1): Groupe vulnérable
- Groupe 2 (G2) : Autre population

Les résultats de cette segmentation s'interprètent ainsi :

- Ligne des résultats combinés :
  - Hypothèse nulle  $H_0$ :  $G1 = G2$  (les deux échantillons proviennent d'une même loi)
  - Si p-value corrigée  $< 0.05$ , alors il y a une faible probabilité d'erreur au fait de rejeter  $H_0$ . L'hypothèse est donc rejetée : G1 n'est pas identique à G2.
- Ligne 1 des résultats individuels :
  - Hypothèse nulle  $H_0$ :  $G1 < G2$
  - Si p-value est grand (proche de 1), alors on peut rejeter  $H_0$ . G1 est donc plus grand que G2.
- Ligne 2 des résultats individuels :
  - Hypothèse nulle  $H_0$ :  $G1 > G2$
  - Si p-value est grand (proche de 1), alors on peut rejeter  $H_0$ . G1 est donc plus petit que G2.

### *Intensités de service*

Les Tableaux F-1 à F-5 répertorient les résultats de ce test appliqué aux intensités de service, pour tous les segments de population et réseaux de transport étudiés. Les observations issues des tests statistiques comparatifs sont les suivantes :

- [Ménages monoparentaux] Les ménages monoparentaux ont un accès statistiquement identique aux autres, pour tous les réseaux de transport (p-values combinées  $> 0,05$ ).
- [Hommes et femmes] Hommes et femmes ont un accès statistiquement identique pour les réseaux de routes, de transport en commun et de pistes cyclables (p-values combinées  $> 0,05$ ). Les femmes ont une distribution plus faible pour les réseaux cyclables,

d'autopartage et de vélopartage. En effet, la p-value de 0,078 pour les femmes est inférieure à celle des hommes (1,000).

- [Enfants et Adolescents] Les enfants et les adolescents ont un accès statistiquement différent (p-value combinée de 0.000) et plus faible que la population générale (p-value des jeunes inférieures à celle des autres) à tous les réseaux de transport, excepté les routes. Pour l'accès aux routes, les enfants ont une distribution différente (p-value combinée de 0,000) et plus élevée que les adultes (p-value de 0,922 contre 0,000). Quant aux adolescents, on ne peut statistiquement conclure qu'ils sont différents des autres individus (p-value combinée de 0,534).
- Les autres segments de population montrent des distributions statistiquement différentes :
  - [Personnes âgées et Personnes âgées seules] Leurs distributions sont plus élevées pour le réseau de routes, et plus faibles pour les réseaux cyclables et de modes partagés.
  - [Non motorisés] Leurs distributions sont plus faibles pour le réseau de routes (p-value 0,996 contre 0,000), et plus élevées pour les quatre autres réseaux.
  - [Sans permis de conduire] Leurs distributions sont plus faibles pour le réseau de routes et cyclable, et plus élevées pour les réseaux de transport collectif et de modes partagés.

**Tableau F-1 : Résultats du test Kolmogorov-Smirnov appliqué aux intensités de service, pour le réseau routier supérieur**

PERSONNES	Résultats individuels		Résultats combinés			K-S
	Éloignement	P-Value	Éloignement	p-value	p-value corrigée	
Femmes	-0.0012	0.953	0.0077	0.239	0.236	=
Hommes	0.0077	0.120				
Enfants de 17 ans ou moins	-0.0019	0.922	0.0217	0.000	0.000	>
Adultes de 18 ans ou plus	0.0217	0.000				
Adolescents entre 12 et 15 ans	-0.0145	0.278	0.0145	0.543	0.534	=
Autres personnes	0.0133	0.340				
Adultes de 65 ans ou plus	-0.0007	0.989	0.0332	0.000	0.000	>
Autres personnes	0.0332	0.000				
Sans permis de conduire	-0.0020	0.906	0.0361	0.000	0.000	>
Avec permis de conduire	0.0361	0.000				
<b>MÉNAGES</b>						
Personnes âgées seules	-0.0003	0.999	0.0371	0.000	0.000	>
Autres ménages	0.0371	0.000				
Monoparentaux	-0.0266	0.221	0.0266	0.437	0.421	=
Autres ménages	0.0240	0.294				
Non motorisés	-0.0279	0.000	0.0279	0.000	0.000	<
Motorisés	0.0005	0.996				

**Tableau F-2 : Résultats du test Kolmogorov-Smirnov appliqué aux intensités de service, pour le réseau de transport en commun**

PERSONNES	Résultats individuels		Résultats combinés			K-S
	Éloignement	P-Value	Éloignement	p-value	p-value corrigée	
Femmes	-0.0061	0.255	0.0061	0.502	0.498	=
Hommes	0.0038	0.595				
Enfants de 17 ans ou moins	-0.0666	0.000	0.0666	0.000	0.000	<
Adultes de 18 ans ou plus	0.000	1.000				
Adolescents entre 12 et 15 ans	-0.0742	0.000	0.0742	0.000	0.000	<
Autres personnes	0.000	1.000				
Adultes de 65 ans ou plus	-0.0251	0.000	0.0272	0.000	0.000	(-)
Autres personnes	0.0272	0.000				
Sans permis de conduire	-0.0004	0.995	0.1127	0.000	0.000	>
Avec permis de conduire	0.1127	0.000				
<b>MÉNAGES</b>						
Personnes âgées seules	-0.0252	0.001	0.0252	0.002	0.002	(-)
Autres ménages	0.0024	0.005				
Monoparentaux	-0.0266	0.221	0.0289	0.336	0.322	=
Autres ménages	0.0289	0.169				
Non motorisés	0.000	1.000	0.2107	0.000	0.000	>
Motorisés	0.2107	0.000				

**Tableau F-3 : Résultats du test Kolmogorov-Smirnov appliqué aux intensités de service, pour le réseau de pistes cyclables**

PERSONNES	Résultats individuels		Résultats combinés			K-S
	Éloignement	P-Value	Éloignement	p-value	p-value corrigée	
Femmes	-0.0084	0.078	0.0084	0.155	0.153	=
Hommes	0.000	1.000				
Enfants de 17 ans ou moins	-0.047	0.000	0.0470	0.000	0.000	<
Adultes de 18 ans ou plus	0.0002	0.999				
Adolescents entre 12 et 15 ans	-0.0458	0.000	0.0458	0.000	0.000	<
Autres personnes	0.000	1.000				
Adultes de 65 ans ou plus	-0.0271	0.000	0.0271	0.000	0.000	<
Autres personnes	0.000	1.000				
Sans permis de conduire	-0.0216	0.000	0.0216	0.000	0.000	<
Avec permis de conduire	0.0074	0.264				
<b>MÉNAGES</b>						
Personnes âgées seules	-0.0219	0.006	0.0219	0.012	0.012	<
Autres ménages	0.000	1.000				
Monoparentaux	-0.0304	0.140	0.0304	0.280	0.267	=
Autres ménages	0.0029	0.982				
Non motorisés	0.000	1.000	0.0512	0.000	0.000	>
Motorisés	0.0512	0.000				

**Tableau F-4 : Résultats du test Kolmogorov-Smirnov appliqué aux intensités de service, pour le réseau d'autopartage**

PERSONNES	Résultats individuels		Résultats combinés			K-S
	Éloignement	P-Value	Éloignement	p-value	p-value corrigée	
Femmes	-0.0183	0.000	0.0183	0.000	0.000	<
Hommes	0.0006	0.988				
Enfants de 17 ans ou moins	-0.0849	0.000	0.0849	0.000	0.000	<
Adultes de 18 ans ou plus	0.000	1.000				
Adolescents entre 12 et 15 ans	-0.0854	0.000	0.0854	0.000	0.000	<
Autres personnes	0.000	1.000				
Adultes de 65 ans ou plus	-0.0695	0.000	0.0695	0.000	0.000	<
Autres personnes	0.00002	0.999				
Sans permis de conduire	-0.0007	0.989	0.0736	0.000	0.000	>
Avec permis de conduire	0.0736	0.000				
<b>MÉNAGES</b>						
Personnes âgées seules	-0.0686	0.000	0.0686	0.000	0.000	<
Autres ménages	0.0013	0.981				
Monoparentaux	-0.0127	0.708	0.0181	0.877	0.869	=
Autres ménages	0.0181	0.498				
Non motorisés	0.000	1.000	0.2340	0.000	0.000	>
Motorisés	0.2340	0.000				

**Tableau F-5 : Résultats du test Kolmogorov-Smirnov appliqué aux intensités de service, pour le réseau de vélopartage**

PERSONNES	Résultats individuels		Résultats combinés			K-S
	Éloignement	P-Value	Éloignement	p-value	p-value corrigée	
Femmes	-0.0203	0.000	0.0203	0.000	0.000	<
Hommes	0.000	1.000				
Enfants de 17 ans ou moins	-0.0731	0.000	0.0731	0.000	0.000	<
Adultes de 18 ans ou plus	0.0003	0.998				
Adolescents entre 12 et 15 ans	-0.0794	0.000	0.0794	0.000	0.000	<
Autres personnes	0.0001	1.000				
Adultes de 65 ans ou plus	-0.0596	0.000	0.0596	0.000	0.000	<
Autres personnes	0.0001	1.000				
Sans permis de conduire	-0.0004	0.996	0.0414	0.000	0.000	>
Avec permis de conduire	0.0414	0.000				
<b>MÉNAGES</b>						
Personnes âgées seules	-0.0593	0.000	0.0593	0.000	0.000	<
Autres ménages	0.0002	1.000				
Monoparentaux	-0.0148	0.626	0.0148	0.973	0.971	=
Autres ménages	0.000	1.000				
Non motorisés	-0.0001	1.000	0.2089	0.000	0.000	>
Motorisés	0.2089	0.000				

### *Indice du nombre d'options de transport*

Le Tableau F-6 montre les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov appliqué à l'indice du nombre d'options de transport. Selon ces tests :

- Les ménages monoparentaux n'affichent aucune différence statistique par rapport aux autres (p-value combinée = 1).
- Les femmes, les enfants, les adolescents, les personnes âgées, ainsi que les ménages composés d'une personne âgée et les ménages à faible revenu ont un moins bon accès que le reste de la population (p-value vulnérable < p-value autre).
- Les personnes sans permis de conduire et les ménages non motorisés sont avantagés dans leur niveau d'accessibilité par rapport aux autres. Ces différences sont très marquées pour les ménages non motorisés (valeur de l'éloignement grande).

**Tableau F-6 : Résultats du test Kolmogorov-Smirnov (K-S) appliqué à l'indice du nombre d'options de transport**

<i>(Population vulnérable en italique)</i> <b>PERSONNES</b>	<b>Résultats individuels</b>		<b>Résultats combinés</b>			<b>Analyse</b>
	<b>Éloignement</b>	<b>P-Value</b>	<b>Éloignement</b>	<b>p-value</b>	<b>p-value corrigée</b>	
<i>Femmes</i>	-0.0150	0.000	0.0150	0.001	0.001	<
<i>Hommes</i>	0.0006	0.987				
<i>Enfants de 17 ans ou moins</i>	-0.0815	0.000	0.0815	0.000	0.000	<
<i>Adultes de 18 ans ou plus</i>	0.000	1.000				
<i>Adolescents entre 12 et 15 ans</i>	-0.0812	0.000	0.0812	0.000	0.000	<
<i>Autres personnes</i>	0.000	1.000				
<i>Adultes de 65 ans ou plus</i>	-0.0590	0.000	0.0590	0.000	0.000	<
<i>Autres personnes</i>	0.000	1.000				
<i>Sans permis de conduire</i>	0.000	1.000	0.0601	0.000	0.000	>
<i>Avec permis de conduire</i>	0.0601	0.000				
<b>MÉNAGES</b>						
<i>Personnes âgées seules</i>	-0.0506	0.000	0.0506	0.000	0.000	<
<i>Autres ménages</i>	0.000	1.000				
<i>Monoparentaux</i>	-0.0096	0.822	0.0096	1.000	1.000	=
<i>Autres ménages</i>	0.0032	0.979				
<i>Non motorisés</i>	0.000	1.000	0.2137	0.000	0.000	>
<i>Motorisés</i>	0.2137	0.000				

### *Indice d'intensité des options de transport*

Le Tableau F-7 montre les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov appliqué à l'indice d'intensité de service. À l'exception de quelques points, les résultats sont semblables à ceux de l'indice du nombre d'options de transport. Les différences sont :

- moins marquées (éloignement combiné plus petit) dans le cas des enfants, des adolescents, des personnes âgées, des ménages non motorisés.
- plus marquées (éloignement combiné plus grand) pour les autres : femmes, sans permis de conduire, personnes âgées seules.

**Tableau F-7 : Résultats du test Kolmogorov-Smirnov (K-S) appliqué à l'indice d'intensité des options de transport**

<i>(Population vulnérable en italique)</i> PERSONNES	Résultats individuels		Résultats combinés			Analyse
	Éloignement	P-Value	Éloignement	p-value	p-value corrigée	
<i>Femmes</i>	0.0184	0.000				
Hommes	-0.0006	0.988	0.0184	0.000	0.000	<
<i>Enfants de 17 ans ou moins</i>	-0.0772	0.000				
Adultes de 18 ans ou plus	0.000	1.000	0.0772	0.000	0.000	<
<i>Adolescents entre 12 et 15 ans</i>	-0.0809	0.000				
Autres personnes	0.000	1.000	0.0809	0.000	0.000	<
<i>Adultes de 65 ans ou plus</i>	-0.0580	0.000				
Autres personnes	0.0023	0.899	0.0580	0.000	0.000	<
<i>Sans permis de conduire</i>	0.000	1.000				
Avec permis de conduire	0.0803	0.000	0.0803	0.000	0.000	>
<b>MÉNAGES</b>						
<i>Personnes âgées seules</i>	-0.0596	0.000				
Autres ménages	0.0033	0.893	0.0596	0.000	0.000	<
<i>Monoparentaux</i>	-0.0213	0.379				
Autres ménages	0.0172	0.531	0.0213	0.718	0.704	=
<i>Non motorisés</i>	0.000	1.000				
Motorisés	0.2012	0.000	0.2012	0.000	0.000	>

## ANNEXE G      MESURES D'ÉQUITÉ D'ACCÈS

Cette annexe comprend les résultats détaillés sur les indicateurs d'équité d'accès : parts de population et indice de Gini. Les analyses sur ces résultats se trouvent à la section suivante 7.4.

Les deux indicateurs d'équité sont appliqués aux deux indicateurs d'accès, calculés pour chaque réseau de transport, et aux deux indices cumulant tous les réseaux. À cette démarche existe une exception : l'indice de Gini n'est pas appliqué aux indicateurs de présence des réseaux pour chaque réseau de transport.

### G.1 Parts de la population

La première mesure proposée pour l'équité d'accès est la part de la population qui a un certain accès, pour chaque segment de population.

#### G.1.1 Présence des réseaux

Ici, l'accès est basé sur l'indicateur de présence des modes de transport (section 7.2.1), ainsi que l'arborescence développée à la Figure G-1.

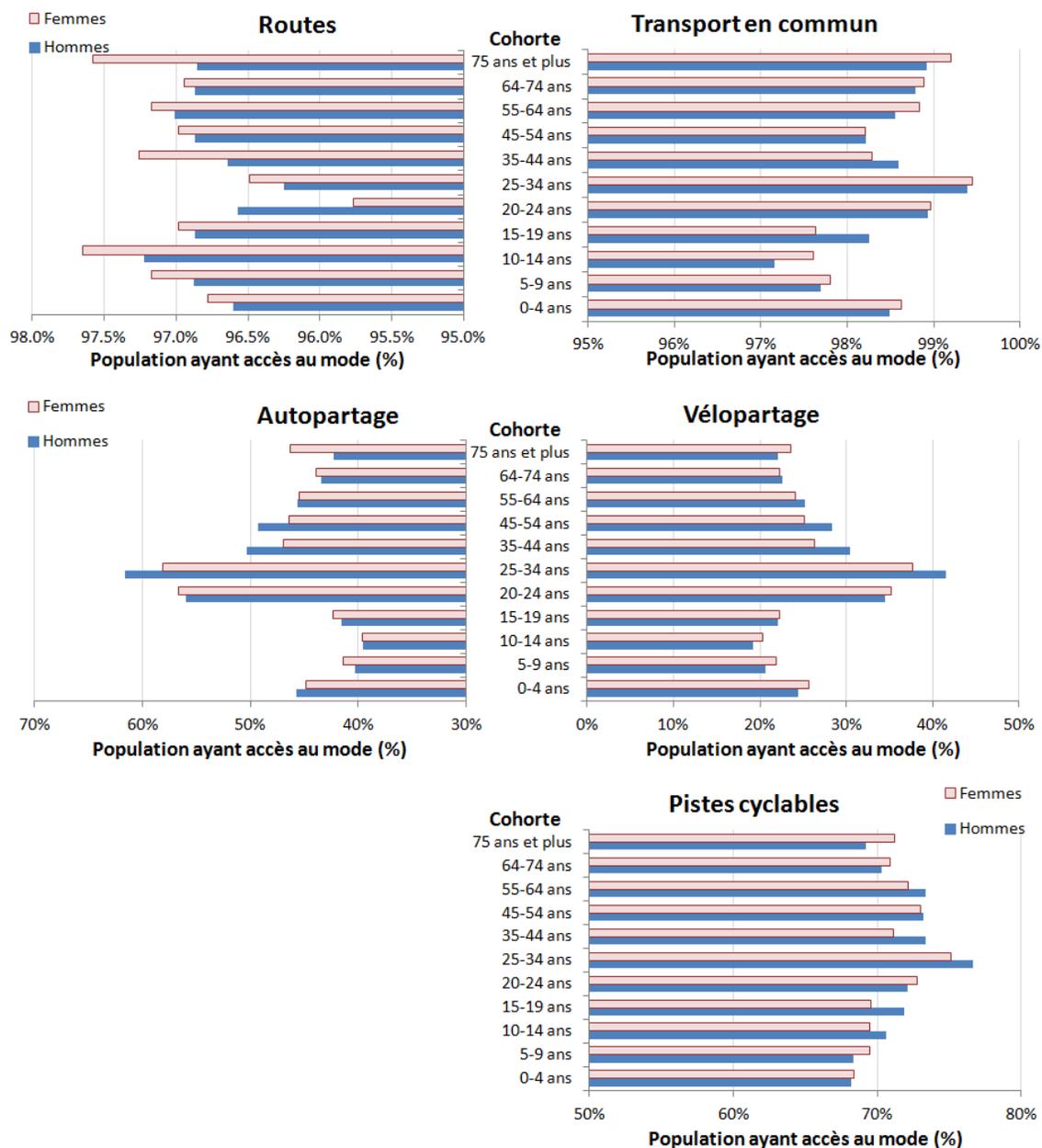
##### *Sexe et âge*

Selon le sexe et la cohorte d'âge, la Figure G-1 montre le pourcentage de la population pour laquelle chaque réseau de transport est présent autour du domicile. Par exemple, plus de 99% des hommes et des femmes entre 25 et 34 ans ont accès au transport en commun, alors que ce taux est à peine de 97% pour les garçons de 10 à 14 ans. La Figure G-2 reprend les principales catégories de l'arborescence de diversité de présence (section 7.2.1) pour analyser les différences entre les groupes d'âges et le sexe.

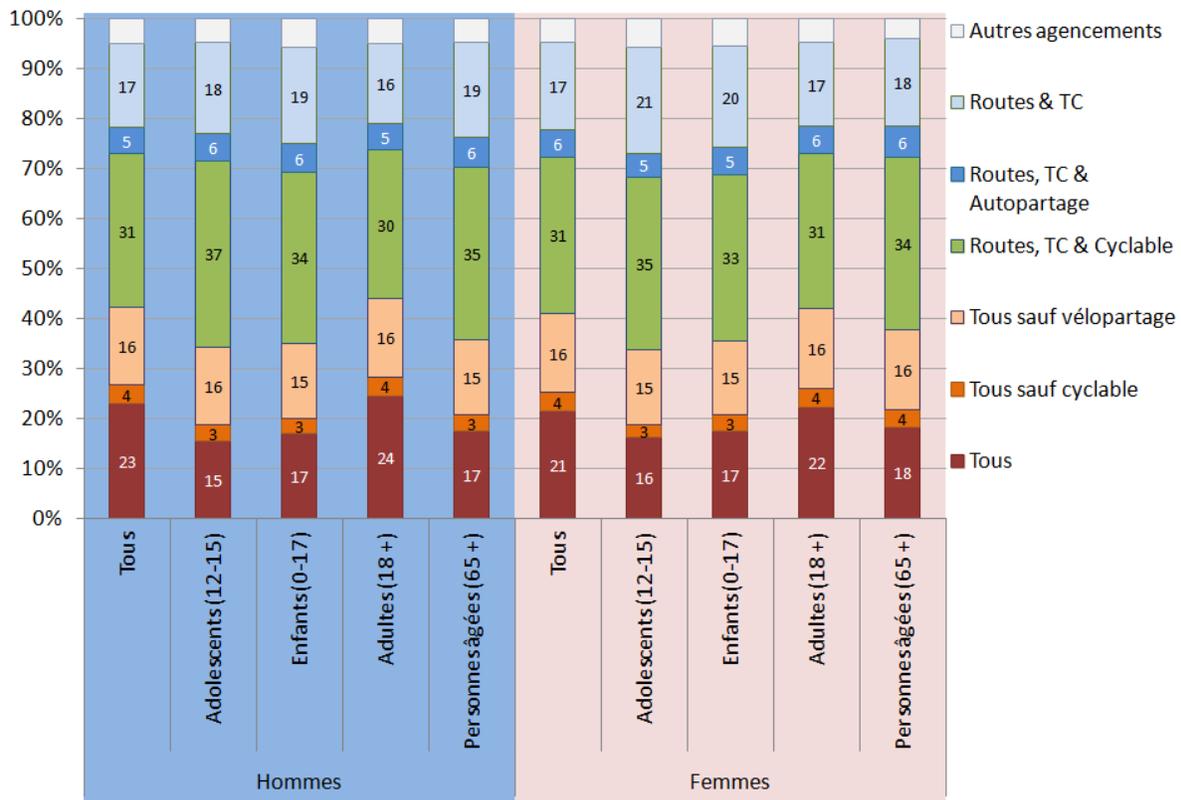
À partir de ces deux figures, il est possible d'observer ces différences entre segments de population :

- Âge et groupes d'âge
  - [Globalement] Par rapport aux mineurs, les adultes ont davantage accès aux réseaux cyclables, d'autopartage et de vélopartage.
  - [20-34 ans] Davantage d'absence du réseau routier, accompagné de davantage de présence du réseau de transport en commun, d'autopartage et de vélopartage.

- [0-19 ans] Pour les 5-19 ans, faible présence des réseaux de transport en commun, d'autopartage et de vélopartage, accompagné d'une forte présence du réseau routier. Tendances semblable mais moins prononcée pour les 0-4 ans.
  - [Pistes cyclables] Peu de variations entre les cohortes d'âge, bien que pour les 25-34 ans le réseau cyclable semble légèrement plus présent, et pour les 0-19 ans, légèrement moins.
  - [Personnes âgées] Les personnes âgées de 65 ans ou plus se distinguent par un accès moindre aux réseaux d'autopartage et de vélopartage. On observe des tendances similaires mais moins fortes pour les personnes âgées vivant seules (Figure G-1).
- Sexe
    - Par rapport aux femmes, les hommes entre 25 et 64 ans semblent plus près des réseaux de vélopartage et de l'autopartage.
    - Les femmes sont en général plus près des réseaux de transport en commun et d'autoroutes. Ces constatations globales sont pourtant démenties dans les cas des cohortes de 20-24 ans pour la présence du réseau autoroutier, ainsi que les cohortes 15-19 ans et 35-44 ans pour la présence du réseau de transport en commun.



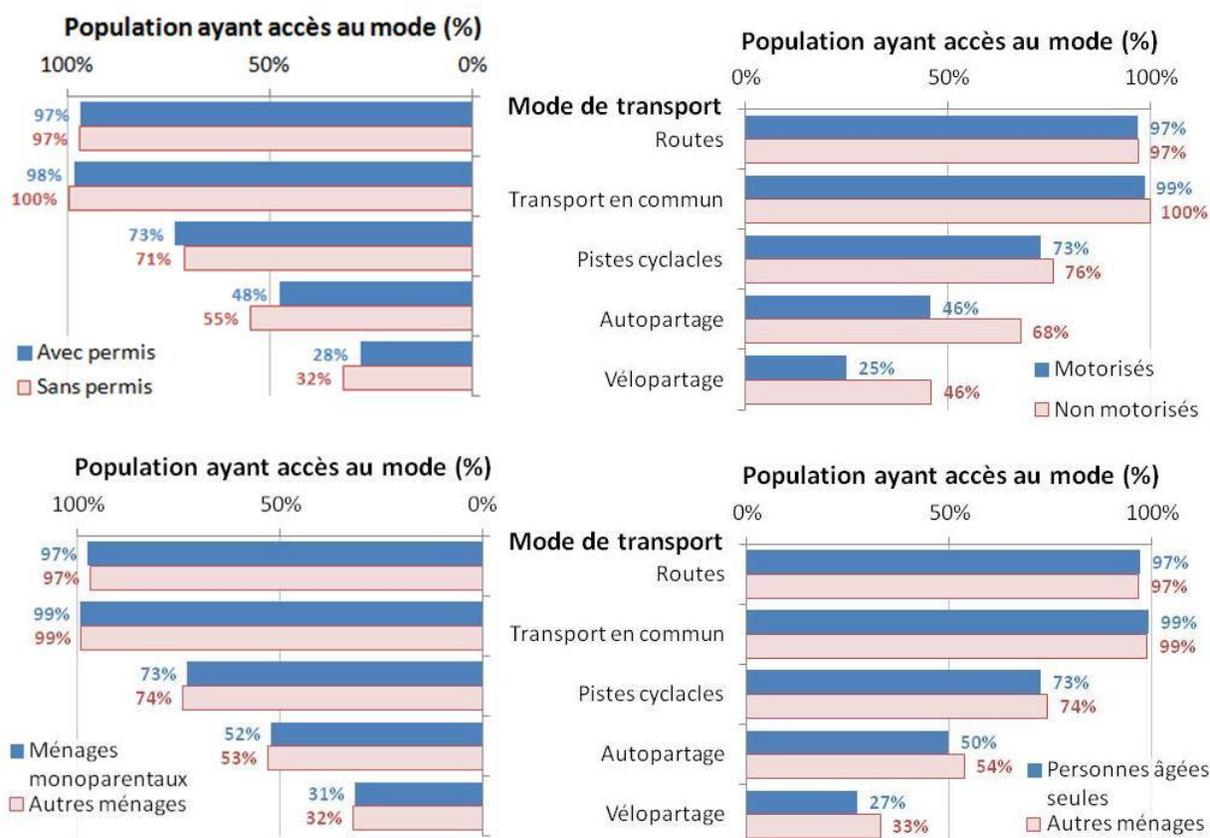
**Figure G-1 : Indice des parts de la population appliqué à l'indicateur de présence des réseaux de transport, selon le sexe et la cohorte d'âge**



**Figure G-2 : Diversité de présence des réseaux de transport, selon le sexe et le groupe d'âge**  
*Motorisation, revenu et autres segments de population vulnérables*

Les graphiques de la Figure G-3 permettent de comparer les personnes ou ménages vulnérables par rapport aux autres. Les différences remarquées entre les segments de population sont les suivantes :

- Permis de conduire et motorisation
  - La totalité des personnes sans permis de conduire a accès au transport en commun. Les modes partagés (autopartage et vélopartage) sont plus présents chez les personnes ne possédant pas de permis de conduire (55 % et 32 %) que chez celles en possédant un (48 % et 28 %).
  - Les résultats sont similaires pour les ménages motorisés. Les tendances concernant l'accès aux modes partagés (autopartage et vélopartage) sont toutefois davantage prononcées entre les ménages non motorisés (68 % et 46 %) et ceux qui le sont (46 % et 25 %).
- Ménages monoparentaux : Aucune tendance marquée.



**Figure G-3 : Présence des réseaux de transport, selon les segments de population vulnérables**

De façon générale, il y a peu de différences entre les segments de population en ce qui a trait à la présence des réseaux autoroutiers, de transport en commun et de pistes cyclables. Ces observations peuvent être en partie explicables par les faits suivants :

- [Autoroutes et transport en commun] Des normes sociales engendrent un accès minimal à certains réseaux de transport, tel un droit accordé au citoyen. La connexion au réseau routier est implicitement obligée lors de la construction d'un lieu de résidence. Quant aux sociétés de transport en commun, elles ont des normes de desserte minimale basées sur la proximité entre les lieux de résidence et les arrêts de transport en commun.
- [Pistes cyclables] À l'exception des ménages à faible revenu, la présence ou l'absence du réseau de pistes cyclables varie très peu entre les différents groupes étudiés.

### G.1.2 Intensité de service des réseaux de transport

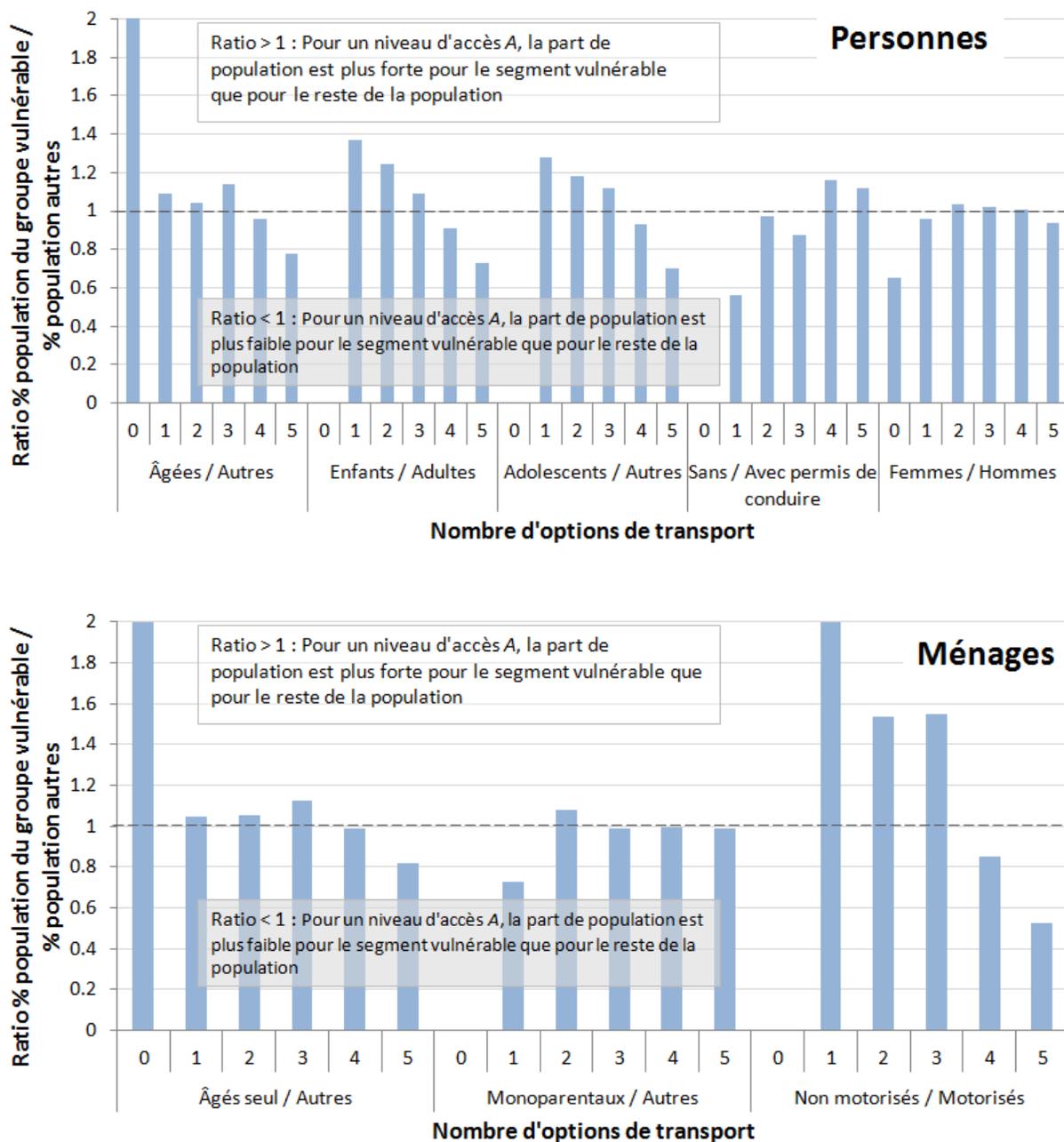
Les intensités de service sont des valeurs continues, ce qui complique la comparaison. Des courbes cumulées ont donc été tracées pour chaque réseau de transport et chaque segment de population. Les observations tirées de ces graphiques sont les suivantes :

- [Routes] Les courbes de distributions cumulées sont très similaires.
- [Transport en commun] Les enfants et adolescents sont légèrement défavorisés par rapport aux autres (courbe au-dessus) dans leur accès au transport en commun. Les personnes sans permis de conduire et, de façon plus marquée, les ménages non-motorisés, sont légèrement favorisés par rapport aux autres (courbe au-dessous) dans leur accès au transport en commun. Ceci reflète un phénomène d'auto-sélectivité : ceux qui ne veulent pas ou ne peuvent pas se motoriser choisissent d'habiter dans une zone bien desservie par le transport en commun.
- [Pistes cyclables] Les enfants, les adolescents et les personnes âgées sont très légèrement défavorisés par rapport aux autres (courbe au-dessus) dans leur accès aux pistes cyclables. Les ménages non-motorisés sont légèrement favorisés par rapport aux autres (courbe au-dessous) dans leur accès au réseau cyclable.
- [Autopartage] Les hommes sont très légèrement favorisés par rapport aux femmes dans leur accès à l'autopartage. Les enfants, les adolescents et les personnes âgées sont très légèrement défavorisés par rapport aux autres (courbe au-dessus). Les ménages non-motorisés sont très favorisés par rapport aux autres dans leur accès au réseau d'autopartage. Cette différence n'existe pas lorsqu'on compare la possession d'un permis de conduire.
- [Vélopartage] Les hommes sont très légèrement favorisés par rapport aux femmes dans leur accès au vélopartage. Les enfants, les adolescents et les personnes âgées sont très légèrement défavorisés par rapport aux autres (courbe au-dessus) dans leur accès au vélopartage. Les personnes âgées vivant seules sont moins touchées par cette tendance. Les ménages non-motorisés sont très favorisés par rapport aux autres dans leur accès au réseau de vélopartage. Cette différence est presque inexistante lorsqu'on compare la possession d'un permis de conduire.

### G.1.3 Indice du nombre d'options de transport

La Figure G-4 présente les ratios de parts de population vulnérable sur la population restante (explications à la section 7.3.3.1). Globalement, des ratios inférieurs à l'unité pour un accès faible accompagnés de ratios supérieurs à l'unité pour un accès élevé indiquent que la population vulnérable a un meilleur accès. Les résultats montrent que :

- [Enfants/Adultes et Adolescents/Autres] Les jeunes ont un accès inférieur aux adultes, car la distribution montre de plus grandes proportions pour les niveaux d'accès bas, et de plus petites proportions pour les niveaux d'accès élevés.
- [Personnes âgées, Personnes âgées seules] Les tendances sont similaires à celles des jeunes, quoique moins prononcées.
- [Femmes/Hommes, Ménages monoparentaux/Autres] Le ratio est généralement proche de 1, ce qui veut dire que les distributions sont semblables pour les deux groupes.
- [Personnes Sans / Avec permis de conduire, Ménages Non motorisés / motorisés] Les ménages non motorisés, et dans une moindre mesure les personnes sans permis de conduire, sont davantage distribués dans les niveaux d'accès forts. Ils ont donc un meilleur accès.



**Figure G-4 : Ratio des parts de population vulnérable sur les parts de population autre, pour différentes valeurs de l'indice du nombre d'options de transport**

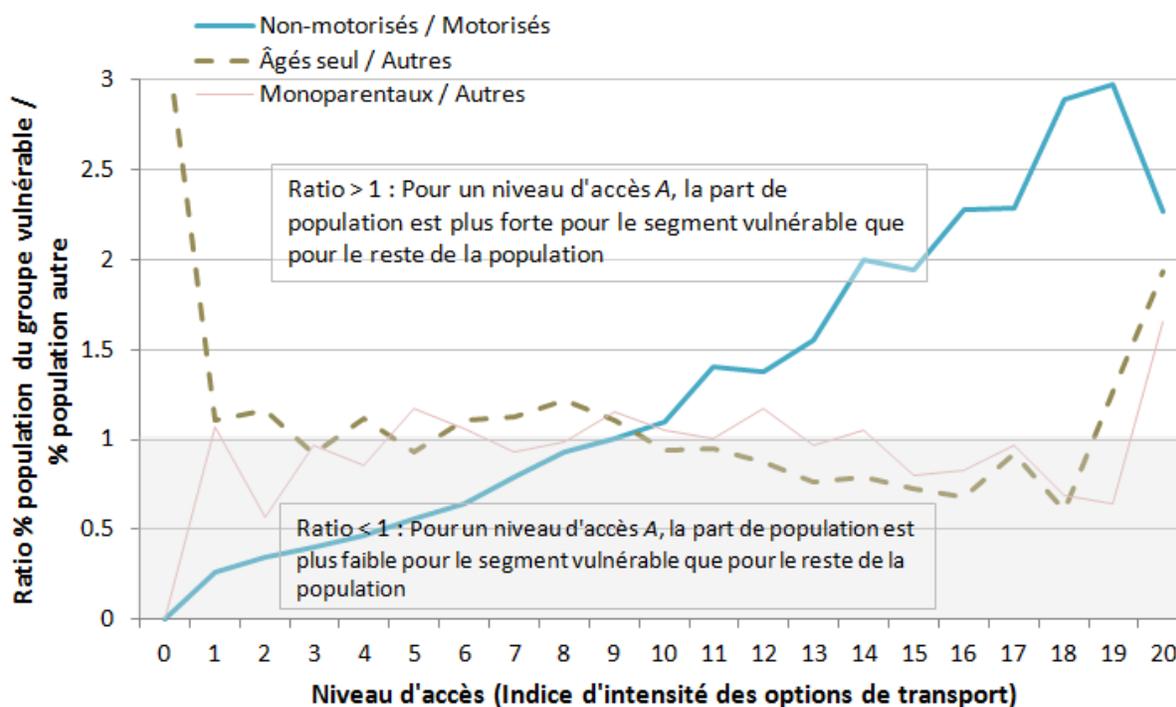
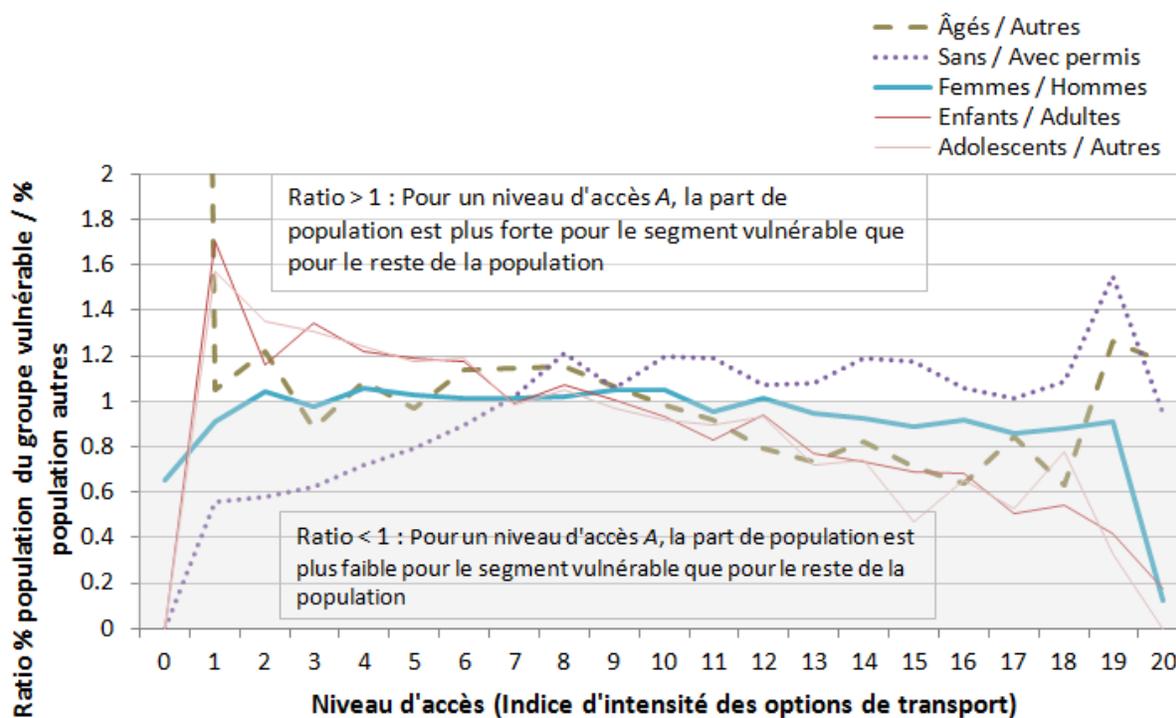
#### G.1.4 Indice des intensités de service

L'indice des intensités de service (valeur de 0 à 20) cumule les catégories d'intensité d'accès (0 à 4) de chaque réseau de transport. Tel que précédemment, le ratio Population vulnérable sur

Population autre a été calculé. La Figure G-5 montre ces ratios pour les différents segments de population.

- [Enfants/Adultes et Adolescents/Autres] Les jeunes ont un accès inférieur aux adultes, car la distribution montre de plus grandes proportions pour les niveaux d'accès bas, et de plus petites proportions pour les niveaux d'accès élevés.
- [Personnes âgées, Personnes âgées seules] Les ratios sont proches de 1, avec une légère tendance défavorisant les personnes âgées pour un niveau d'accès élevé.
- [Femmes/Hommes] Le ratio est généralement proche de 1, mais pour des niveaux d'accès élevés, les hommes sont favorisés.
- [Ménages monoparentaux/Autres] Le ratio oscille autour de 1, ce qui rend similaires les deux groupes.
- [Personnes Sans / Avec permis de conduire, Ménages Non motorisés / motorisés] Les ménages non motorisés, et dans une moindre mesure les personnes sans permis de conduire, sont davantage distribués dans les niveaux d'accès forts. Ils ont donc un meilleur accès.

On observe les mêmes tendances que pour l'indice de présence des réseaux, mais avec un niveau de détail plus important.



**Figure G-5 : Ratio des parts de population vulnérable sur les parts de population autre, selon le niveau d'accès calculé à partir des intensités de service**

## G.2 Indice de Gini

L'indice de Gini est estimé à partir d'une courbe de Lorenz, tracée pour chaque segment de population. L'indice de Gini et la courbe de Lorenz indiquent un élément supplémentaire : la distribution d'un segment de population autour de l'offre. Une valeur proche de zéro de l'indice de Gini reflète une distribution égalitaire de la population autour du réseau de transport étudié. À l'opposé, une valeur proche de l'unité reflète une distribution très inégale de la population autour de l'offre. Enfin, la comparaison des indices Gini de deux groupes permet également d'observer si l'un est défavorisé par rapport à l'autre. Un indice de Gini plus grand (plus proche de l'unité) pour la population vulnérable que pour les autres montre que la population vulnérable est distribuée moins également autour de l'offre que les autres.

### G.2.1 Intensité de service

#### *Sexe et âge*

Les Tableau G-1 et Tableau G-2 présentent les valeurs d'indice de Gini selon le sexe et l'âge, pour chaque réseau de transport.

- [Âge]
  - [Réseau cyclable] Les cohortes entre 0 et 14 ans ont un indice de Gini plus élevé ( $\pm 0,58$ ) que les autres cohortes d'âge ( $\pm 0,54$ ), ce qui leur confère une distribution moins égalitaire autour du réseau cyclable (orange foncé, Tableau G-1).
  - [Modes partagés] Les cohortes entre 20 et 34 ans ont un indice de Gini plus faible ( $\pm 0,73$  et  $\pm 0,82$ ) que les autres ( $\pm 0,82$  et  $\pm 0,90$ ), ce qui confère aux premiers une distribution plus égalitaire autour des réseaux de modes partagés (jaune pâle, Tableau G-1).
  - [Transport en commun] Les enfants entre 5 et 19 ans sont moins également distribués autour du transport en commun (Tableau G-1,  $\pm 0,36$  contre  $\pm 0,33$ ).
- [Sexe]
  - Les femmes entre 25 et 54 ans sont moins également distribuées autour des modes partagés par rapport aux hommes du même âge, avec ratio variant entre 1,02 et 1,04 (Tableau G-2).

- Les hommes de 75 ans et plus sont moins également distribués que les femmes autour de tous les modes de transport, avec un ratio variant entre 0,95 à 0,99 (Tableau G-1).
- Les femmes âgées entre 35 et 44 ans sont moins bien distribuées autour des réseaux de transport (ratios de 1,03), sauf dans le cas du réseau routier (ratio de 0,99, Tableau G-2).

**Tableau G-1 : Indice de Gini pour les intensités de service, selon l'âge et le sexe (orange foncé : indice élevé à l'intérieur d'un même mode de transport; jaune pâle : inverse)**

Cohorte d'âge	Indice de Gini pour les intensités de service									
	Routes		Transport en commun		Cyclable		Autopartage		Vélopartage	
	Femmes (F)	Hommes (H)	F	H	F	H	F	H	F	H
0-4 ans	0.34	0.34	0.33	0.34	0.58	0.59	0.82	0.82	0.89	0.90
5-9 ans	0.33	0.35	0.36	0.36	0.57	0.59	0.84	0.85	0.91	0.91
10-14 ans	0.34	0.35	0.37	0.37	0.57	0.57	0.85	0.85	0.92	0.92
15-19 ans	0.34	0.34	0.36	0.36	0.57	0.55	0.84	0.84	0.91	0.91
20-24 ans	0.35	0.35	0.33	0.35	0.55	0.55	0.74	0.75	0.84	0.85
25-34 ans	0.35	0.35	0.31	0.31	0.52	0.51	0.73	0.70	0.82	0.79
35-44 ans	0.34	0.34	0.34	0.33	0.55	0.54	0.81	0.79	0.89	0.86
45-54 ans	0.34	0.34	0.35	0.35	0.54	0.54	0.82	0.80	0.89	0.88
55-64 ans	0.34	0.34	0.34	0.35	0.55	0.54	0.82	0.82	0.90	0.89
64-74 ans	0.35	0.34	0.33	0.34	0.55	0.56	0.83	0.83	0.91	0.91
75 ans et +	0.33	0.34	0.31	0.33	0.55	0.56	0.81	0.84	0.90	0.91

**Tableau G-2 : Ratio des indices de Gini femmes / hommes pour les intensités de service, selon l'âge (Gris : Femmes moins également distribuées que les hommes; Gras : Hommes moins également distribuées que les femmes)**

Cohorte d'âge	Ratio des indices Gini Femmes / Hommes pour les intensités de service				
	Transport en				
	Routes	commun	Cyclable	Autopartage	Vélopartage
0-4 ans	1.00	<b>0.96</b>	1.00	1.00	1.00
5-9 ans	<b>0.95</b>	1.01	<b>0.98</b>	1.00	1.00
10-14 ans	<b>0.97</b>	1.01	1.01	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>
15-19 ans	1.01	1.00	1.03	<b>0.99</b>	1.00
20-24 ans	<b>0.99</b>	<b>0.96</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>
25-34 ans	1.00	1.00	1.02	1.04	1.03
35-44 ans	<b>0.99</b>	1.03	1.03	1.03	1.03
45-54 ans	<b>0.99</b>	1.00	1.00	1.03	1.02
55-64 ans	<b>0.99</b>	<b>0.96</b>	1.01	1.00	1.01
64-74 ans	1.02	<b>0.97</b>	<b>0.99</b>	1.00	1.00
75 ans et +	<b>0.97</b>	<b>0.95</b>	<b>0.98</b>	<b>0.97</b>	<b>0.99</b>

### *Segments de population vulnérables*

Le Tableau G-3 présente les valeurs de l'indice de Gini pour chaque segment de population et chaque réseau de transport. Le Tableau G-4 compile les valeurs du Tableau G-3 sous forme de ratio des indices de Gini (population vulnérable sur population autre). Les valeurs montrent que :

- [Femmes/Hommes] Les femmes sont légèrement moins également distribuées autour de l'offre d'autopartage (0,81 contre 0,80) et de vélopartage (0,89 contre 0,88).
- [Enfants/Adultes et Adolescents/Autres] En raison de ratios supérieurs à 1 (1,04 à 1,18), les jeunes ont un accès inférieur aux adultes pour les réseaux autres que les routes.
- [Personnes âgées, Personnes âgées seules] Les personnes âgées sont moins également distribuées autour des modes partagés (ratios d'environ 1,04). Par contre, elles sont mieux distribuées autour du transport en commun (ratios de 0,97).
- [Ménages monoparentaux/Autres] Les ménages monoparentaux sont mieux distribués autour du transport collectif avec un ratio de 0,91. Ce résultat est étonnant vu que ces deux groupes ne sont pas statistiquement différents (test statistique).

- [Personnes Sans / Avec permis de conduire, Ménages Non motorisés / motorisés] Les ménages non motorisés, et dans une moindre mesure les personnes sans permis de conduire, sont mieux distribués autour de l'offre alternative à l'automobile (ratios < 1). La seule exception est pour le réseau cyclable, pour lequel les personnes sans permis de conduire sont moins également distribuées.

**Tableau G-3 : Indice de Gini pour les intensités de service, par groupe de population vulnérable**

<i>(Population vulnérable en italique)</i> <b>PERSONNES</b>	<b>Routes</b>	<b>TC</b>	<b>Cyclable</b>	<b>Autopartage</b>	<b>Vélopartage</b>
<i>Femmes</i>	0.34	0.34	0.55	0.81	0.89
<i>Hommes</i>	0.34	0.34	0.55	0.80	0.88
<i>Enfants de 17 ans ou moins</i>	0.34	0.36	0.58	0.84	0.91
<i>Adultes de 18 ans ou plus</i>	0.34	0.34	0.54	0.79	0.87
<i>Adolescents entre 12 et 15 ans</i>	0.34	0.37	0.57	0.85	0.92
<i>Autres personnes</i>	0.34	0.34	0.55	0.80	0.78
<i>Adultes de 65 ans ou plus</i>	0.34	0.33	0.55	0.83	0.91
<i>Autres personnes</i>	0.34	0.34	0.55	0.80	0.88
<i>Sans permis de conduire</i>	0.34	0.30	0.56	0.76	0.86
<i>Avec permis de conduire</i>	0.34	0.35	0.54	0.81	0.88
<b>MÉNAGES</b>					
<i>Personnes âgées seules</i>	0.34	0.32	0.54	0.80	0.88
<i>Autres ménages</i>	0.34	0.33	0.53	0.77	0.85
<i>Monoparentaux</i>	0.35	0.30	0.54	0.77	0.86
<i>Autres ménages</i>	0.34	0.33	0.53	0.77	0.86
<i>Non motorisés</i>	0.34	0.27	0.52	0.67	0.77
<i>Motorisés</i>	0.34	0.34	0.54	0.82	0.89

**Tableau G-4 : Ratio des indices de Gini population vulnérable / autre pour les intensités de service (Gris : Vulnérables moins également distribués que les autres; Gras : Inverse)**

		Ratio des indices Gini population Vulnérable / Autre Pour les intensités de service				
Groupe vulnérable	Groupe de référence	Routes	Transport en commun	Cyclable	Autopartage	Vélopartage
<b>PERSONNES</b>						
Femmes	Hommes	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01
Enfants	Adultes	1.00	1.06	1.07	1.06	1.05
Adolescents	Autres	1.00	1.09	1.04	1.06	1.18
65 ans et +	Autres	1.00	<b>0.97</b>	1.00	1.04	1.03
Sans permis	Avec permis	1.00	<b>0.86</b>	1.04	<b>0.94</b>	<b>0.98</b>
<b>MÉNAGES</b>						
Âgées seules	Autres	1.00	<b>0.97</b>	1.02	1.04	1.04
Monoparentaux	Autres	1.03	<b>0.91</b>	1.02	1.00	1.00
Non motorisés	Motorisés	1.00	<b>0.79</b>	<b>0.96</b>	<b>0.82</b>	<b>0.87</b>

## G.2.2 Indice du nombre d'options de transport

L'indice de Gini a également été calculé pour l'indice du nombre d'options de transport. Le Tableau G-5 regroupe les indices de Gini pour chaque segment de population, ainsi que les ratios de ces indices (population vulnérable G1 sur population autre G2). Les valeurs de l'indice de Gini varient autour de 0,135. Cette valeur est très près de zéro, ce qui approche l'égalité de distribution. Cela reflète le fait qu'il est basé sur l'indicateur de présence du réseau qui est très peu sensible, avec seulement deux valeurs possibles (0 ou 1).

Les variations de l'indice de Gini sont très faibles; le ratio des indices Gini est proche de 1 dans la plupart des cas. Seuls quelques groupes de population ont un ratio absolu supérieur à 0,05 (valeur choisie arbitrairement) :

- [Enfants et adolescents] Les enfants de 17 ans ou moins et les adolescents semblent moins également distribués autour des réseaux de transport avec un indice de Gini supérieur (0,144 contre 0,136).
- [Non-motorisés] Les ménages non motorisés sont plus également distribués autour des réseaux de transport que les autres, car leur indice de Gini est plus faible (0,101 contre 0,137).

### G.2.3 Indice d'intensité des options de transport

Le Tableau G-5 montre également les indices de Gini pour l'indice d'intensité des options de transport. Les valeurs de l'indice de Gini sont d'environ 0,23. Plus grand que l'indice du nombre d'options de transport ( $\pm 0,135$ ), cela indique qu'il est basé sur des indicateurs d'accès plus sensibles aux variations de l'offre sur le territoire. Avec cet indice s'éloignant de l'égalité, les variations de distribution de la population paraissent plus.

Comme dans le cas de l'indice du nombre d'options de transport, les variations de l'indice de Gini sont très faibles. Les groupes de population qui ont un ratio absolu supérieur à 0,05 (valeur choisie arbitrairement) sont :

- [Non-motorisés, sans permis de conduire] Les ménages non motorisés et les personnes sans permis de conduire sont plus également distribués autour des réseaux de transport.
- [Personnes âgées] Les personnes âgées sont plus également distribuées autour de l'offre.
- [Monoparentaux] Bien que contraire à toutes les autres analyses jusqu'à présent, les ménages monoparentaux apparaissent plus également distribués autour de l'offre.

Tableau G-5 : Indice de Gini pour les indices d'options de transport

PERSONNES			Comparaison Gini			
Groupe 1 (Vulnérable)	Groupe 2 (Autre)	Indice d'options de transport	G1	G2	G1 / G2	Ratio-1  > 0,02
Femmes	Hommes	Présence	0.138	0.137	1.01	(<)
		Intensité	0.239	0.243	0.98	(>)
Enfants (17 ans ou -)	Adultes (18 ans ou +)	Présence	0.144	0.136	<b>1.06</b>	<
		Intensité	0.239	0.241	0.99	(>)
Adolescents (12-15 ans)	Autres	Présence	0.141	0.137	<b>1.03</b>	<
		Intensité	0.241	0.241	1.00	-
Personnes âgées (65 ans ou +)	Autres	Présence	0.138	0.137	1.01	(<)
		Intensité	0.235	0.242	<b>0.97</b>	>
Sans permis de conduire	Avec permis de conduire	Présence	0.138	0.137	1.01	(<)
		Intensité	0.224	0.246	<b>0.91</b>	>
<b>MÉNAGES</b>						
Âgés seuls	Autres	Présence	0.133	0.130	1.02	(<)
		Intensité	0.234	0.238	0.98	(>)
Monoparentaux	Autres	Présence	0.132	0.131	1.01	(<)
		Intensité	0.227	0.238	<b>0.95</b>	>
Non motorisés	Motorisés	Présence	0.101	0.137	<b>0.74</b>	>>
		Intensité	0.214	0.24	<b>0.89</b>	>>