

**Titre:** Mesurer la performance des modes de transports innovants :  
**Title:** Ontologie des indicateurs et cas d'application avec des scénarios  
d'utilisation des véhicules autonomes pour la ville de Montréal

**Auteur:** Mathilde Moliner  
**Author:**

**Date:** 2022

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

**Référence:** Moliner, M. (2022). Mesurer la performance des modes de transports innovants :  
**Citation:** Ontologie des indicateurs et cas d'application avec des scénarios d'utilisation des  
véhicules autonomes pour la ville de Montréal [Master's thesis, Polytechnique  
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/10225/>

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

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/10225/>  
**PolyPublie URL:**

**Directeurs de  
recherche:** Francesco Ciari, & Nicolas Saunier  
**Advisors:**

**Programme:** Génie civil  
**Program:**

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Mesurer la performance des modes de transports innovants : Ontologie des indicateurs et cas d'application avec des scénarios d'utilisation des véhicules autonomes pour la ville de Montréal**

**MATHILDE MOLINER**

Département de Génie civil, géologique et des mines

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

Génie civil

Février 2022

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Mesurer la performance des modes de transports innovants : Ontologie des indicateurs et cas d'application avec des scénarios d'utilisation des véhicules autonomes pour la ville de Montréal**

présenté par **Mathilde MOLINER**

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

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

**Martin TRÉPANIÉRIER**, président

**Francesco CIARI**, membre et directeur de recherche

**Nicolas SAUNIER**, membre et codirecteur de recherche

**Antoine SAMBIN**, membre externe

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ma maîtrise et qui m'ont aidé tout au long de ce travail de 2 ans et demi.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Francesco Ciari. Je le remercie de m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette maîtrise et de m'avoir introduit au domaine de la recherche. Je le remercie notamment pour m'avoir offert l'opportunité d'intervenir dans les cours CIV1120 et CIV6704, ce qui a été un enrichissement de mes compétences. Je remercie également Nicolas Saunier, mon co-directeur, qui a su m'aider avec ses relectures lors de la rédaction d'articles, et apporter un regard un peu plus extérieur aux sujets abordés. À vous deux, votre encadrement, vos conseils et votre gentillesse m'auront permis l'aboutissement cette maîtrise.

La réalisation de cette maîtrise a été possible grâce au projet réalisé pour GeoTwin, start-up parisienne qui travaille sur un logiciel de transport multi-agent. Je remercie Goknur Sirin pour son encadrement et le financement de GeoTwin. La seconde partie de cette maîtrise a été possible grâce à Jalon, une organisation montréalaise sur les mobilités innovantes. Je remercie en particulier Antoine Sambin avec qui j'ai été en relation tout au long de ce projet. Je le remercie également pour ses contacts à la Ville de Montréal qui vont me permettre de continuer à travailler sur le projet des scénarios des véhicules autonomes à Montréal. Je remercie aussi l'organisme MITACS qui a permis la collaboration entre Jalon et Polytechnique.

Je remercie mon établissement d'origine les Arts et Métiers Paristech ainsi que Polytechnique Montréal pour leur entente qui m'a permis de réaliser ce double diplôme international.

Je voudrais remercier grandement Ouassim Manout, en post-doctorat à Polytechnique pendant un morceau de ma maîtrise. Tu m'as été d'une grande aide lors du démarrage du projet avec Jalon, que ce soit avec Java, avec MATSim mais aussi avec tes très bons conseils.

Je remercie également mes partenaires du local C616.3, Rena, Idriss, Arsham et Elnaz, étudiants au doctorat avec Francesco. Même si la pandémie n'a pas facilité les rencontres en présentiel, nos échanges ont su enrichir mon travail. Nos réunions de labo en extérieur et surtout les barbecues qui suivaient ont permis de relâcher la pression malgré toutes les restrictions.

Plus personnellement, je souhaite remercier les très belles rencontres faites au Québec. À Charlotte et sa gaieté, sans qui ces deux ans à Polytechnique n'auraient pas été les mêmes, et

bien plus difficiles. À nos longues séances d’encouragements mutuels pour réussir, agrémentés de moments joyeux pour découvrir Montréal et ses lieux insolites. Merci à Anthony et Raphaël, mes compatriotes du Sud de la France. À tous les quatre et avec le reste de la bande partie plus tôt, nous aurons bien exploré le Québec, toujours dans la bonne humeur. Je remercie chaleureusement ces belles amitiés inoubliables chargées de souvenirs grâce aux belles sorties randonnées et week-ends “chalet” qui permettaient de revenir plus motivés ensuite, tout comme le restaurant du mois qui est devenu les restaurants de la semaine.

Je remercie aussi mes colocataires pour leur soutien moral encourageant, en particulier Fanny et Éléa qui étaient là pour me dire de penser à faire des pauses.

Je tiens aussi à remercier mes amis, présents en France qui sont restés là malgré la distance et ont dû supporter mes baisses de moral. Merci à Laura pour son amitié inestimable. Merci à Wyssem avec qui nous nous sommes soutenues mutuellement dans les aléas de la recherche.

Et par-dessous tout, pour conclure, je remercie toute ma famille pour leur support et leurs encouragements. Merci à ma grand-mère avec son appel journalier à 9h00 pour vérifier que j’avançais bien dans mon travail. Merci à ma mère, d’avoir toujours été là pour moi, de m’avoir transmis ses valeurs, merci pour le soutien moral et les encouragements vers nos ambitions même si je sais que c’est difficile d’avoir ses enfants si loin.

## RÉSUMÉ

Dans les villes, on observe de plus en plus l'apparition de nouveaux modes de transports partagés. Ces modes existent grâce à l'essor de la technologie notamment en combinant l'utilisation des téléphones intelligents et ainsi en proposant un service de mobilité à la demande. On retrouve par exemple l'auto-partage, les services tels que Uber ou Lyft ou encore le vélo-partage, et dans quelques années des véhicules autonomes.

Au niveau de la planification urbaine, l'insertion de ces modes va avoir des impacts au niveau des mobilités mais aussi sur l'environnement, des impacts qui sont à anticiper. Aujourd'hui, des modèles et des outils de simulation permettent de les prévoir. La simulation permet aussi de tester plusieurs scénarios avant d'implanter les nouveaux modes dans une ville. C'est un atout pour les opérateurs qui gèrent ces services, car à moindre coût, ils peuvent essayer de nombreuses configurations de l'offre de leur service, et choisir celle qui est la plus rentable pour eux. Pour être capable de calculer ces impacts ou la performance offerte par le service en sortie des simulations réalisés, il faut de bons indicateurs, qui soient adaptés.

Afin de répondre à ce besoin, ce travail a pour objectif de présenter les indicateurs adaptés selon le cas d'étude réalisé sur les mobilités innovantes.

Le résultat sera présenté à l'aide une ontologie. Elle est réalisée à l'aide du logiciel d'ontologie Protégé, comme une carte mentale en contenant les informations propres à chaque indicateur, ainsi que les liens entre les éléments qui la constituent.

Pour ce faire, des articles sur des études de mobilités innovantes réalisées à l'aide de simulations ont été choisis dans la littérature. À partir de ces articles, les indicateurs utilisés pour mesurer les impacts ont été relevés en prenant note des caractéristiques des études, comme le type d'impacts ou les objectifs. Ces informations ont permis de savoir ce qu'il se fait dans la littérature, en mettant en place un vocabulaire commun et en recueillant le maximum d'information. L'ontologie regroupe les indicateurs en plusieurs catégories selon ce qui est mesuré. Par ailleurs, chaque indicateur possède une carte d'identité avec une définition, des informations sur son calcul, et ses relations avec d'autres indicateurs. On peut aussi savoir quels indicateurs choisir pour une étude sur les mobilités innovantes selon le mode analysé, selon le point de vue des parties prenantes (opérateur du service, autorité locale, chercheur) et la variable qui est étudiée dans l'étude (ex. : taille de la flotte, tarification, etc ...).

En plus de cette première tâche, un cas d'application de l'ontologie est exploré. L'objectif est de mesurer les impacts générés par l'insertion de véhicules autonomes à Montréal, en

proposant différents scénarios d'utilisation.

Les scénarios choisis correspondent aux différents cas d'utilisation qui peut être faite des véhicules autonomes. Le premier scénario remplace les voitures conventionnelles des ménages par un véhicule autonome qui est capable de se déplacer sans personne à bord. Ce type de scénario est très peu étudié dans la littérature, plutôt vu comme présentant trop d'externalités négatives. Il reste pourtant à prendre en considération comme possible utilisation future des véhicules autonomes. Les deux scénarios suivants rentrent dans le cadre des mobilités partagées. Dans le scénario 2, le mode prédominant est le taxi autonome, qui permet de transporter un client à la fois. Le scénario 3 permet, lui, de transporter plusieurs passagers en même temps. Dans tous ces scénarios, les voitures conventionnelles sont supprimées pour être remplacées par des véhicules autonomes, partagés ou pas.

Avant de mesurer les impacts pour chaque scénario, la tâche a été de modéliser les scénarios pour la ville de Montréal. Le logiciel de transport MATSim permet de réalisation des simulations multi-agent à large échelle qui permettent de modéliser les véhicules autonomes. À partir des données sur la population, des plans d'activités où les agents utilisent les véhicules autonomes ou les transports en commun, la marche et le vélo. Le code des extensions de MATSim en Java, a été modifié pour correspondre aux scénarios établis. Une fois les simulations effectués, MATSim renvoie en détail tout évènement qui s'est produit durant la journée simulée. À partir de ces informations détaillées, les indicateurs pertinents ont été calculés pour mesurer les impacts de chaque scénario à l'aide de Python.

Sachant que l'on s'intéresse aux impacts que la ville, équivalent du point de vue "autorités locales" de l'ontologie, les indicateurs choisis portent sur les comportements de mobilité, la congestion, l'environnement. Avec les hypothèses appliquées au modèle, basées sur la littérature, on observe un maintien des parts modales. Les distances individuelles des agents restent équivalentes. En revanche, du point de vue des véhicules, les distances parcourues augmentent de 71 % et 85 % pour les scénarios avec utilisation privée et les robotaxis individuels. À cause de cette augmentation des distances parcourues, les émissions de gaz à effet de serre aussi. Elles restent limitées dans le cas des taxis partagés en utilisant que des berlines où l'augmentation des distances est plus maîtrisée car les déplacements sont regroupés. Au-delà de la mesure des impacts, les simulations et les indicateurs produits, ont permis de constater que des hypothèses prises dans la littérature ne s'adaptait pas au cas de Montréal. En effet, la flotte de véhicules est sous-dimensionnée et les temps d'attente en sont allongés, en dépassant dans 55 % des cas le seuil des 15 minutes d'attente pour le scénario 2. Par ailleurs, ceci a permis de constater que la calibration n'était pas adaptée.

Au delà, du cas d'étude exploré, de la comparaison de scénarios d'utilisations de véhicules

autonomes, l'ontologie propose d'autres cas d'applications diverses et variés. En se basant sur des études qui ont été trouvées dans la littérature, selon le mode innovant et l'objectif de l'étude considérés, et en modulant ça selon les parties prenantes intéressées par les résultats de l'étude, une centaine de cas d'applications sont possibles. Ce travail a permis de trouver une soixantaine d'indicateurs, l'usage de l'ontologie permet de réduire ce nombre en indiquant les bons à considérer et comment les calculer selon les attentes. C'est un outil qui se révèle pertinent pour les opérateurs de mobilités innovantes qui cherchent à maximiser la performance du service qu'ils offrent et aussi pour les autorités de transport qui mettent en place les réglementations ou adaptent les villes pour ces mobilités.

Les résultats produits par les simulations sur les scénarios d'utilisation des véhicules autonomes sont fournis à la ville de Montréal pour permettre d'anticiper les externalités. L'étude a permis de montrer que la mise en place de réglementations, comme le type de véhicule autorisé permet de limiter les externalités telles que l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre dûs à l'augmentation des kilomètres parcourus par les voitures avec les retours à vide. Ce travail sur les scénarios de véhicules autonomes de Montréal sera approfondi afin d'être plus vraisemblable et calibré pour la ville.

## ABSTRACT

In cities, we are seeing the emergence of new modes of shared transportation. These modes exist thanks to the development of technology, notably by combining the use of smartphones and thus offering an on-demand mobility service. Examples include car-sharing, services such as Uber or Lyft or bike-sharing, and in a few years autonomous vehicles.

In terms of urban planning, the insertion of these modes will have impacts on mobility but also on the environment, impacts that must be anticipated. Today, models and simulation tools make it possible to predict these impacts. The simulation also makes it possible to test several scenarios before implementing new modes in a city. This is an asset for the operators who manage these services, because at a lower cost they can try many configurations of their service offer, and choose the one that is the most profitable for them. To be able to calculate these impacts or the performance offered by the service as a result of the simulations performed, good indicators are needed.

In order to meet this need, this work aims to present the indicators adapted according to the case study carried out on innovative mobilities.

The result will be presented using an ontology. It is realized with the help of the ontology software Protégé, like a mental map containing the information specific to each indicator, as well as the links between the elements that constitute it.

To do this, articles on innovative mobility studies carried out using simulations were selected from the literature. From these articles, the indicators used to measure the impacts were identified, noting the characteristics of the studies, such as the type of impacts or the objectives. This information allowed us to know what is being done in the literature, establish a common vocabulary and gather as much information as possible. The ontology groups the indicators into several categories according to what is being measured. In addition, each indicator has an identity card with a definition, information on its calculation, and its relationship with other indicators. It is also possible to know which indicators to choose for a study on innovative mobility depending on the mode analyzed, the point of view of the stakeholders (service operator, local authority, researcher) and the variable that is studied in the study (e.g., fleet size, pricing, etc.).

In addition to this first task, an application case of the ontology is explored. The objective is to measure the impacts generated by the insertion of autonomous vehicles in Montreal, by proposing different scenarios of use.

The chosen scenarios correspond to the different use cases that can be made of autonomous vehicles. The first scenario replaces conventional household cars with an autonomous vehicle that is able to move without a person on board. This type of scenario is little studied in the literature, and is seen as having too many negative externalities. However, it remains to be considered as a possible future use of autonomous vehicles. The following two scenarios are part of the shared mobility framework. In scenario 2, the predominant mode is the autonomous cab, which can transport one customer at a time. Scenario 3 allows the transport of several passengers at the same time. In all these scenarios, conventional cars are removed and replaced by autonomous vehicles.

Before measuring the impacts for each scenario, the task was to model the scenarios for the city of Montreal. The MATSim transportation software allows for large-scale multi-agent simulations that allow for the modeling of autonomous vehicles. Using population data, activity plans where agents use autonomous vehicles or public transportation, walking and biking. The code of the MATSim extensions in Java, was modified to match the established scenarios. Once the simulations are completed, MATSim returns details of any event that occurred during the simulated day. From this detailed information, the relevant indicators were calculated to measure the impacts of each scenario, using Python.

Since we are interested in the impacts that the city, equivalent to the "local authorities" point of view of the ontology, the chosen indicators concern mobility behavior, congestion, and the environment. With the assumptions applied to the model, based on the literature, we observe a maintenance of the modal shares. The individual distances of the agents remain equivalent. On the other hand, from the vehicle point of view, the distances travelled increase by 71 % and 85 % for the scenarios with private use and individual robotaxis. Because of this increase in travel distances, greenhouse gas emissions also increase. They remain limited in the case of shared cabs using only sedans where the increase in distances is more controlled because the trips are grouped together. Beyond the measurement of impacts, the simulations and indicators produced have shown that the hypotheses used in the literature do not fit the case of Montreal. Indeed, the vehicle fleet is undersized and waiting times are lengthened, exceeding in 55 % of cases the 15-minute waiting time threshold for scenario 2. Moreover, this allowed us to see that the calibration was not adapted.

Beyond the case study explored, the comparison of scenarios of use of autonomous vehicles, the ontology proposes other cases of diverse and varied applications. Based on studies found in the literature, according to the innovative mode and the objective of the study considered, and by modulating this according to the stakeholders interested in the results of the study, about a hundred cases of applications are possible. This work has allowed us to find about

sixty indicators, the use of the ontology allows us to reduce this number by indicating the good ones to consider and how to calculate them according to the expectations. It is a tool that proves to be relevant for innovative mobility operators who seek to maximize the performance of the service they offer, and also for transport authorities who implement regulations or adapt cities for these mobilities.

The results produced by the simulations on the scenarios of use of autonomous vehicles are provided to the city of Montreal to anticipate the externalities. The study has shown that the implementation of regulations, such as the type of vehicle authorized, can limit externalities such as the increase in greenhouse gas emissions due to the increase in kilometers traveled by cars with empty returns. This work on Montreal's autonomous vehicle scenarios will be deepened to be more plausible and calibrated for the city.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS . . . . .	iii
RÉSUMÉ . . . . .	v
ABSTRACT . . . . .	viii
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	xi
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	xiv
LISTE DES FIGURES . . . . .	xv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS . . . . .	xvii
LISTE DES ANNEXES . . . . .	xix
CHAPITRE 1 INTRODUCTION . . . . .	1
1.1 Éléments de la problématique . . . . .	2
1.2 Objectifs de recherche . . . . .	4
1.3 Plan du mémoire . . . . .	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE . . . . .	6
2.1 Les mobilités innovantes . . . . .	6
2.1.1 Modes partagés : l'auto-partage . . . . .	6
2.1.2 Le transport à la demande . . . . .	8
2.1.3 Les véhicules autonomes . . . . .	9
2.2 Indicateur de performance . . . . .	13
2.2.1 Définition . . . . .	13
2.2.2 Types . . . . .	14
2.2.3 Encadrement . . . . .	15
2.2.4 Critères de sélection . . . . .	16
2.3 Ontologie . . . . .	17
2.3.1 Définition . . . . .	18
2.3.2 Exemples d'ontologies . . . . .	18
CHAPITRE 3 ÉLÉMENTS DE L'ONTOLOGIE . . . . .	21

3.1	Les modèles . . . . .	21
3.2	Les scénarios . . . . .	23
3.2.1	La taille de la flotte . . . . .	24
3.2.2	La taille des véhicules . . . . .	25
3.2.3	Type de service . . . . .	26
3.2.4	Stratégies . . . . .	26
3.2.5	Électrification . . . . .	27
3.2.6	Tarifcation . . . . .	27
3.2.7	Capacité . . . . .	28
3.2.8	Paramètres de modélisation . . . . .	28
3.3	Les indicateurs . . . . .	29
3.3.1	Échelle de l'indicateur . . . . .	31
3.3.2	Unité de l'indicateur . . . . .	32
3.3.3	Classification des indicateurs . . . . .	34
CHAPITRE 4 CONSTRUCTION DE L'ONTOLOGIE . . . . .		49
4.1	Introduction . . . . .	49
4.2	Structure d'une ontologie . . . . .	49
4.2.1	Composants élémentaires . . . . .	49
4.2.2	Caractéristiques sur les propriétés . . . . .	50
4.2.3	Caractéristiques sur les classes . . . . .	54
4.2.4	Méthodologie de construction . . . . .	55
4.3	Les classes primitives de l'ontologie de KPI . . . . .	55
4.3.1	La classe KPI . . . . .	56
4.3.2	La classe InputData . . . . .	58
4.3.3	La classe Unit . . . . .	58
4.3.4	La classe Scale . . . . .	58
4.3.5	La classe Category . . . . .	59
4.3.6	La classe User . . . . .	59
4.3.7	La classe Study . . . . .	59
4.3.8	La classe Mode . . . . .	59
4.3.9	La classe Service . . . . .	60
4.4	Les propriétés de l'ontologie de KPI . . . . .	60
4.5	Exemples . . . . .	62
4.5.1	Exemple autour d'un KPI . . . . .	62
4.5.2	Exemple de navigation . . . . .	64

4.6	Conclusion . . . . .	67
CHAPITRE 5 SCÉNARIOS D'UTILISATION DES VÉHICULES AUTONOMES POUR		
	LA VILLE DE MONTRÉAL . . . . .	68
5.1	Introduction . . . . .	68
5.2	Dans la littérature . . . . .	69
5.3	Description du modèle . . . . .	72
	5.3.1 MATSim . . . . .	73
	5.3.2 Extensions . . . . .	75
	5.3.3 Données . . . . .	78
	5.3.4 Méthodes de calculs . . . . .	80
5.4	Présentation des scénarios pour Montréal . . . . .	81
	5.4.1 Scénario de référence . . . . .	81
	5.4.2 Scénario 1 : utilisation privée . . . . .	82
	5.4.3 Scénario 2 : utilisation partagée . . . . .	83
	5.4.4 Scénario 3 : utilisation partagée “groupée” . . . . .	83
	5.4.5 Résumé . . . . .	84
5.5	Résultats . . . . .	84
	5.5.1 Conséquences comportementales . . . . .	85
	5.5.2 Performance du service . . . . .	91
	5.5.3 Conséquences environnementales . . . . .	97
5.6	Discussion . . . . .	99
	5.6.1 Limite des hypothèses . . . . .	99
	5.6.2 Analyse de l'équité . . . . .	101
5.7	Conclusion . . . . .	102
5.8	Synthèse . . . . .	103
CHAPITRE 6 CONCLUSION . . . . .		
	6.1 Synthèse des travaux . . . . .	105
	6.2 Limitations . . . . .	107
	6.2.1 L'ontologie d'indicateurs . . . . .	107
	6.2.2 Simulations de l'utilisation des véhicules autonomes pour Montréal . . . . .	107
	6.3 Améliorations futures . . . . .	110
RÉFÉRENCES . . . . .		112
ANNEXES . . . . .		129

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Fréquence d'apparition des indicateurs dans la littérature sélectionnée	31
Tableau 4.1	Propriétés sur la classe KPI . . . . .	60
Tableau 4.2	Propriétés inverses . . . . .	61
Tableau 4.3	Caractéristiques des propriétés . . . . .	62
Tableau 5.1	Références d'études avec simulation multi-agent de véhicules autonomes	71
Tableau 5.2	Résumé des scénarios . . . . .	84
Tableau 5.3	Résultats sur les PKT et distances passager moyennes . . . . .	88
Tableau 5.4	Résultats sur les VKT et distances totales moyennes . . . . .	89
Tableau 5.5	Indicateurs de congestion . . . . .	90
Tableau 5.6	Calculs de l'occupation des véhicules . . . . .	97
Tableau 5.7	Coefficients utilisés dans le calculs des impacts environnementaux . .	97
Tableau 5.8	Consommation énergétique et émissions de GES . . . . .	98
Tableau A.1	Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante . . . . .	129

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Niveau d'automatisation SAE [15] . . . . .	11
Figure 2.2	Pénétration des innovations dans la population [23] . . . . .	12
Figure 2.3	Projection de la pénétration des voitures autonomes dans le marché, sur les routes et dans la flotte automobile [25] . . . . .	12
Figure 3.1	Distribution du nombre d'articles selon l'échelle des indicateurs . . . . .	32
Figure 3.2	Proportion des différentes échelles parmi les indicateurs relevés . . . . .	34
Figure 4.1	Schéma des composants d'une ontologie . . . . .	50
Figure 4.2	Schéma de deux propriétés inverses . . . . .	51
Figure 4.3	Schéma Domain/Range d'une propriété . . . . .	53
Figure 4.4	Schema of different classes of the ontology. . . . .	55
Figure 4.5	Sous-classes de KPI dans l'arborescence . . . . .	57
Figure 4.6	Sous-classes de Unit dans l'arborescence . . . . .	58
Figure 4.7	Sous-classes de Scale dans l'arborescence . . . . .	58
Figure 4.8	Sous-classes de Mode dans l'arborescence . . . . .	59
Figure 4.9	Aperçu réduit sur l'indicateur <i>GlobalOccupancyRate</i> . . . . .	63
Figure 4.10	Aperçu développé sur l'indicateur <i>GlobalOccupancyRate</i> . . . . .	63
Figure 4.11	Détail des informations pour <i>GlobalOccupancyRate</i> dans la fenêtre cou- rante de Protégé . . . . .	64
Figure 4.12	Instances de <i>Category</i> développées sur OntoGraf . . . . .	64
Figure 4.13	Développement autour de Environmental sur Ontograf . . . . .	65
Figure 4.14	Développement autour de Environmental sur Ontograf . . . . .	66
Figure 4.15	Arborescence de <i>SAVConcurrentSharingD2D</i> . . . . .	66
Figure 4.16	Développement autour de <i>SAVConcurrentSharingD2D</i> . . . . .	67
Figure 5.1	Algorithme co-évolutionnaire [129] . . . . .	75
Figure 5.2	Carte du réseau de l'aire étudiée de Montréal et de lieux de résidence des agents (point bleu) avec 5% de la population . . . . .	80
Figure 5.3	Parts modales pour les différents scénarios . . . . .	85
Figure 5.4	Transfert modal entre le scénario de référence et le scénario de véhicules autonomes . . . . .	87
Figure 5.5	Cartes de la congestion de Montréal pour les différents scénarios . . . . .	91
Figure 5.6	Temps moyen selon l'heure de déplacement . . . . .	93
Figure 5.7	Carte des temps d'attente moyens selon la position de l'origine du dé- placement . . . . .	94

Figure 5.8	Histogramme des PAV selon leur tâche en cours durant la simulation dans le scénario 1 . . . . .	95
Figure 5.9	Histogramme des SAV selon leur tâche en cours durant la simulation dans le scénario 2 . . . . .	95
Figure 5.10	Histogramme des PSAV selon leur tâche en cours durant la simulation dans le scénario 3 . . . . .	96
Figure 5.11	Relation entre le revenu et le score . . . . .	101
Figure 5.12	Carte d'agrégation des ménages selon leur revenu . . . . .	102
Figure 5.13	Carte d'agrégation des ménages selon leur score . . . . .	102
Figure 5.14	Tableau de synthèse des résultats des simulations par scénario . . . . .	104
Figure B.1	Classes de l'ontologie . . . . .	139
Figure B.2	Propriétés de l'ontologie . . . . .	139
Figure B.3	Classes, sous-classes et propriétés en lien avec la classe KPI . . . . .	140
Figure B.4	Relation mode et service . . . . .	141

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

4S	Segmented Stochastic Slice Simulation Model
ARTM	Autorité Régionale de Transport Métropolitain
AV	Autonomous Vehicles
BPR	Bureau des Routes Publiques
CSV	Comma-separated Values
D2D	Door-to-Door
DRT	Demand-Responsive Transport
DVRP	Dynamic Vehicle Routing Problem
GES	Gaz à Effet de Serre
HP	Heure de Pointe
KPI	Key Performance Indicator
LUTI	Land Use and Transport Integrated
MaaS	Mobility as a Service
MATSim	Multi-Agent Transport Simulation
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OSM	Open Street Map
OWL	Ontology Web Language
P2P	Peer-to-Peer
PAV	Private Autonomous Vehicles
PKT	Passenger-Kilometers Traveled
PSAV	Pooled Shared Autonomous Vehicles
RMR	Région Métropolitaine de Recensement
S2S	Stop-to-Stop
SAE	Society of Automotive Engineers
SAEV	Shared Autonomous Electrical Vehicle
SAV	Shared Autonomous Vehicles
STM	Société des Transport de Montréal
TAD	Transport À la Demande
TC	Transports en Commun
TNC	Transit Network Company
VKT	Vehicle-Kilometers Traveled
VHT	Vehicle-Hours Traveled

VOT	Value of Time
VTC	Voitures de Transport avec Chauffeur
XML	Extensible Markup Language

**LISTE DES ANNEXES**

Annexe A	Liste des articles utilisés pour la collecte d'indicateurs . . . . .	129
Annexe B	Détails sur l'ontologie . . . . .	139
Annexe C	Glossaire de l'ontologie . . . . .	142

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les dernières décennies ont vu l'introduction de nouveaux moyens de se déplacer dans les villes. Dès les années 1990, pour faire face à la prédominance des déplacements en auto-solo, alors que les véhicules restent 90 % de leur temps à l'arrêt, l'auto-partage a vu le jour. Le service permet de réduire les frais liés à la possession d'un véhicule et de ne l'utiliser que lorsque l'on en a besoin. En 2009, la start-up Uber modifie le transport à la demande en facilitant grandement l'accès à ce type de service. Depuis, les entreprises proposant des mobilités innovantes se sont étendues et diversifiées et l'on en retrouve dans presque toutes les villes, dernières en date, les trottinettes électriques. D'ici les prochaines années, les véhicules autonomes et leurs avantages sont amenés à révolutionner les façons de se déplacer en augmentant le confort des mobilités et en restant à moindre coût.

Aujourd'hui et depuis une quarantaine d'années, des logiciels de simulation permettent de prévoir l'utilisation des différents transports à partir des comportements de mobilité, selon des modèles qui évoluent. Basé sur des modèles mathématiques, le comportement des individus qui cherchent à se déplacer et l'offre de transport proposée est mis en œuvre dans un modèle. En fonction de ses caractéristiques, en fonction des offres de mobilités proposées à travers les scénarios, la population se verra utiliser un certain mode de transport, prendra un itinéraire et suivra un comportement. On peut ainsi prévoir l'utilisation future des réseaux et des modes. On peut se servir de ces résultats pour prendre des décisions, par exemple lorsque de nouveaux modes de transport seront introduits ou leur gestion modifiée.

Depuis leur première introduction dans les années 50' les modèles de transport ont été objet de beaucoup de recherche et plusieurs innovations ont été proposées. Historiquement, le modèle 4-étapes est utilisé pour la planification de transport dans les régions urbaines de Détroit et de Chicago. Les modèles basés sur les activités permettront ensuite d'améliorer les méthodes de planification avec une meilleure représentation du comportement en modélisant des individus et non plus un groupe représenté sous les mêmes caractéristiques. L'un des plus récents est l'utilisation des simulations multi-agent. Le plus populaire dans cette catégorie est probablement MATSim<sup>1</sup>, qui a été développé par des groupes de chercheurs des universités TU Berlin et de l'ETH Zurich. Il permet aujourd'hui de simuler à large échelle de villes à travers le monde (Paris, Singapour, Tel Aviv, Montréal, Rouen, la Suisse, ...). Au delà de la recherche, un tel outil peut être utilisé pour aider les villes à améliorer leur réseau en testant différentes stratégies, comme par exemple regarder l'influence de l'ajout d'une rocade

---

1. <https://matsim.org>

pour contourner le centre de Zurich ou évaluer un projet de mise en place de politique de tarification routière pour rentrer dans le centre de Zurich véhiculé [1]. En plus d'aider les villes à travers des évaluations sur des politiques sur les réseaux, MATSim a aussi été utilisé en coopération avec des sociétés de transport, comme avec Mobility<sup>2</sup>, société suisse d'auto-partage, en travaillant par exemple sur la question de la façon dont la tarification affecterait la demande pour un nouveau service d'auto-partage en libre-service [2]. La simulation numérique avec de tels modèles est alors un grand atout pour l'aide à la prise de décision. En dehors de MATSim qui est un logiciel open-source, il existe de nombreux autres modèles de transports et des entreprises peuvent développer leur propre plateforme de simulation de transport et ainsi vendre leurs conseils et expertises pour venir en aide aux collectivités ou sociétés de transport.

Pour que ces modèles et simulations deviennent un atout d'aide à la prise de décisions, c'est là que des indicateurs de performance rentrent en jeu afin de se baser sur des résultats numériques et des méthodes qui soient les plus objectives possibles. Les indicateurs vont être calculés à partir des données produites par la simulation pour mesurer la performance d'un mode ou service de transport.

## 1.1 Éléments de la problématique

Il est donc primordial de se baser sur des indicateurs en matière de planification des transports. Pour les modes de transport en circulation depuis plusieurs décennies, on retrouve des standards d'indicateurs à utiliser pour évaluer ces modes [3]. On retrouve par exemple parmi eux, dans les rapports de mobilité [4] ou les plans stratégiques, la part modale des différents modes ou bi-modaux, avec un objectif de limiter celle de l'auto, la possession automobile. Au niveau des transports en commun, la performance peut être évaluée par les sociétés de transport avec l'offre délivrée, en terme de kilomètre des lignes et du nombre de passage, le nombre de passagers, le respect des horaires ou de l'intervalle de service, etc... [5]. Bien que certains soient communs, les indicateurs de performance peuvent différer selon le mode concerné, en particulier pour les services de transport à la demande.

Au delà des indicateurs qui diffèrent, en comparaison des modes conventionnels comme l'auto et les transports en commun, il ne devient plus possible d'utiliser les mêmes modèles de transport plus anciens, étant agrégés, pour les nouveaux types de mobilités. Comme il sera présenté par la suite, les mobilités innovantes un service à la demande. Il est alors nécessaire de modéliser chaque individu, mais aussi chaque véhicule spatialement et temporellement, puisqu'il

---

2. <https://www.mobility.ch/fr/clients-prives>

s'agit de connaître par exemple la disponibilité de l'offre. Depuis une quinzaine d'années, des modèles basés sur les agents, comme MATSim introduit précédemment, simulent à un niveau désagrégé les individus (agents) et leurs véhicules. Ainsi avec ces nouveaux modèles totalement désagrégés et qui simulent tout ce qu'il se passe à échelle mésoscopique, le niveau de détail et d'information est atteint pour permettre de modéliser les transports à la demande et surtout évaluer leur performance, en ajoutant de nouvelles composantes au modèle qui tiennent compte des spécificités du mode innovant.

Comme son nom l'indique, la modélisation des modes *innovants* est "récente", "nouvelle". On observe donc une différence avec les modes traditionnels au niveau des études que l'on peut trouver dans la littérature par exemple. En effet, il n'existe pas de standardisation, de réglementation ou de norme définissant les indicateurs de mobilités propres aux modes de transport innovants. On trouve de nombreux indicateurs, divers et variés, presque propres à chaque auteur. On peut par exemple trouver le même terme pour deux indicateurs dont le calcul diffère, ou bien deux noms différents pour nommer le même indicateur.

Pourtant, il est primordial d'utiliser des indicateurs et les bons indicateurs. En terme de planification urbaine, chaque plan stratégique possède des cibles à atteindre qui sont évaluées via des indicateurs, autant au niveau des aires métropolitaines que pour les sociétés de transport.

En plus des rapports sur l'état de service ou des plans stratégiques, la modélisation permet aujourd'hui de tester des scénarios, des nouvelles politiques de mobilité, des modifications dans les systèmes de transport, numériquement. C'est un atout à moindre frais pour prévenir les conséquences possibles. Cela permet donc de comparer des choses à l'avance. Selon le modèle utilisé et le niveau d'agrégation, il devient alors possible de calculer de nombreux résultats de comparaison basés sur les résultats des simulations.

Au niveau des opérateurs qui gèrent ces mobilités innovantes, l'objectif est d'offrir le meilleur niveau de performance afin que le mode soit compétitif et utilisé. Les indicateurs utilisés pour mesurer cette performance sont différents de ceux qui peuvent être utilisés dans les plans d'urbanisme et de mobilités.

On se retrouve alors avec toute une variété étendue d'indicateurs, dont la pertinence diffère selon les parties prenantes qui sont concernées (opérateur d'un système de transport, autorité locale ou gouvernementale) car leurs intérêts peuvent être différents, mais aussi selon le mode de transport qui est concerné. Avec les avantages de la simulation numérique, selon les éléments qui sont comparés dans les différents scénarios, certains indicateurs vont permettre de juger au mieux quel scénario serait le plus propice à une implantation future, ou à une modification des réglementations. Tout ceci révèle un besoin général d'évaluer la performances

et les impacts de transport, en amont, qui va se faire avec des simulations, mais aussi le besoin de savoir quels indicateurs calculer selon les circonstances, car bien choisis, ils serviront de support pour la prise de décision.

## 1.2 Objectifs de recherche

Pour répondre à cette problématique assez large, les objectifs seront doubles. Le premier se focalise sur le manque de standardisation pour l'évaluation des mobilités innovantes et le besoin d'identifier de bons indicateurs à ces fins. L'objectif sera de créer une ontologie qui permette de savoir quel indicateur calculer et comment les calculer, en présentant pour chaque indicateur sa carte d'identité contenant les informations pertinentes. L'ontologie permettra aussi de comprendre les liens entre les différents indicateurs et leurs dépendances. Cet objectif sera réalisé en plusieurs étapes : premièrement définir le cadre des modes concernés par le terme "mobilité innovante", ensuite rechercher les indicateurs dans la littérature sur la performance et les impacts de ces modes de transport, en recueillant le maximum d'information, le sous-objectif suivant sera de construire l'ontologie dans le logiciel Protégé.

En plus de cette première tâche, pour répondre à la problématique générale de comment évaluer les modes innovants, l'objectif suivant sera d'illustrer, à travers un cas d'étude, un des moyens d'évaluer les nouvelles mobilités par la simulation. Il s'agira de présenter des résultats sur les impacts des différents scénarios d'utilisation des véhicules autonomes pour la ville de Montréal, en utilisant le logiciel de transport multi-agent MATSim. Cet objectif se décomposera en plusieurs sous-objectifs : le premier, sera de définir et d'établir les différents scénarios d'utilisation des véhicules autonomes, et ensuite adapter le modèle de simulation pour ces scénarios et les créer avec les données de Montréal. Le troisième sous-objectif sera de produire le code nécessaire au calcul des indicateurs d'impacts pour permettre ensuite l'analyse des résultats des simulations. Cette partie fera recours à l'ontologie précédemment établie pour le choix et les calculs des indicateurs appropriés.

## 1.3 Plan du mémoire

Comme abordé au niveau des objectifs, ce mémoire comprend deux parties assez distinctes, la première centrée sur les indicateurs des mobilités innovantes et la conception de l'ontologie, et la seconde qui présente des résultats de modélisations à grande échelle de véhicules autonomes. Ce mémoire est organisé de façon à présenter les différentes tâches effectuées et les résultats obtenus, à travers 7 chapitres.

Le chapitre suivant présente la revue de littérature sur les mobilités innovantes, sur les indicateurs de performances et les ontologies d'indicateurs. Cette revue permet d'explorer comment sont utilisés les indicateurs dans les différents articles présentant les impacts des mobilités innovantes ou évaluant leur performance.

Le chapitre 3 contient les informations collectées avec la revue de littérature. Le chapitre 4 explique la construction de cette ontologie et la lecture qui peut en être faite.

Le chapitre 5 se focalise sur la simulation qui a été faite pour réaliser une évaluation de la performance d'un mode innovant, les véhicules autonomes. Il reprendra une revue de littérature sur les études existantes des scénarios de véhicules autonomes, puis la présentation des scénarios qui sont étudiés, suivie d'une explication du modèle utilisé et adapté pour simuler ces scénarios. Les résultats obtenus seront ensuite analysés.

Le mémoire se conclura dans le chapitre 6 par une reprise des résultats obtenus sur l'ontologie et sur le cas d'étude des véhicules autonomes. Les limitations de chaque partie seront abordées ainsi qu'une ouverture vers des pistes d'amélioration et de continuation du travail effectué.

Des annexes permettront de voir des images de l'ontologie. Elle contient aussi le glossaire en anglais du vocabulaire défini utilisé dans l'ontologie, ainsi qu'un tableau contenant la liste des articles utilisés pour le recueil d'informations.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature permettra de répondre à l'un des premiers sous-objectifs, c'est-à-dire définir le cadre de l'étude en terme de "mobilités innovantes". Les modes de transport concernés par ce qualificatif y seront détaillés. Au-delà du domaine des transports, la revue de littérature s'intéressera (définition indicateur) et au Web sémantique pour mieux comprendre les attentes du travail à réaliser sur ce que doivent être de bons indicateurs et ce qu'est une ontologie et comment la construire.

### 2.1 Les mobilités innovantes

Toutes les villes, selon leur taille, sont équipées de systèmes de transports que nous connaissons tous tels que les bus, métros, tramways, trains de banlieue pour les transports en commun, les taxis. En dépit de ces offres et alternatives, la dépendance à l'auto reste toujours très importante grâce aux infrastructures routières et de stationnement. Cependant, tous ces véhicules sont sous-utilisés, en restant environ 90 % de leur temps stationnés. Depuis les années 90, on observe l'apparition de nouveaux modes de transport pour réduire le taux de motorisation chez les ménages en partageant les véhicules avec plusieurs utilisateurs comme pour les transport en commun mais en offrant plus de flexibilité et de confort, en offrant un service à la demande. On retrouve par exemple, l'auto-partage ou les voitures de transport avec chauffeur (VTC) sous leurs différentes formes. Ces mobilités s'accompagnent usuellement d'une application mobile pour accéder au service.

On considère ici les mobilités innovantes comme les mobilités partagées qui offrent un service de déplacement à la demande. La définition de ce cadre a été réalisée à l'aide des travaux de Susan Shaheen, experte en mobilités partagées qui a rédigé de nombreux rapports officiels pour définir les termes qui seront utilisés par la suite [6–11].

#### 2.1.1 Modes partagés : l'auto-partage

L'auto-partage a été introduit en Amérique du Nord par Communauto en 1994 au Québec. Il propose la location de voiture pour de courtes durées. Avec Car2Go le service se développa ensuite en mode "free-floating", où les véhicules peuvent être pris et laissés n'importe où dans la ville.

Au cours de son développement, l'auto-partage est proposé sous différentes caractéristiques qui s'adaptent aux besoins des utilisateurs. Le service peut être proposé pour une boucle,

c'est-à-dire une chaîne de déplacements où l'utilisateur va revenir à son point d'origine. Le véhicule est alors emprunté et remis dans la même station d'auto-partage. On parle d'auto-partage basé-station (station-based) et aller/retour (roundtrip). L'auto-partage peut être aussi utilisé pour des déplacements uniques, c'est-à-dire un aller simple (one-way). Le véhicule est emprunté et déposé dans des stations d'auto-partage différentes. Ce service en aller simple existe aussi sans la présence de station. On parle alors de libre-service (free-floating). Les véhicules sont mis à disposition dans la zone de service définie. Le véhicule peut être ensuite déposé n'importe où sur un stationnement dans la zone de service.

Il existe aussi un service de partage entre particuliers, l'auto-partage peer-to-peer (P2P), où des membres proposent la location de leur véhicule. Ce service possède les mêmes caractéristiques que l'auto-partage basé station aller/retour puisqu'il faut généralement prendre et rendre le véhicule au domicile du propriétaire.

La réservation (facultative selon les cas), l'emprunt, l'ouverture et la fermeture du véhicule se font, aujourd'hui, via l'application mobile de la compagnie.

Les services d'auto-partage reposent majoritairement sur un abonnement qui propose différents avantages de tarifications. Le tarif se base sur la durée de l'emprunt et la distance parcourue. Il inclut généralement un certain nombre de kilomètres offerts. Contrairement aux services de location de véhicules classiques, comme ceux que l'on trouve dans les aéroports, ce service est tout inclus : l'utilisateur n'a pas à payer l'essence ou l'assurance.

Des systèmes de mobilité partagée existent avec des vélos, le vélo-partage, notamment pour développer les modes de transports actifs. On trouve aussi des vélos électriques, et des trottinettes électriques aussi connues sous le nom de e-scooters. Pour le vélo-partage, il s'agit bien souvent d'un service basé station en aller simple, bien que les autres existent aussi. Pour les trottinettes électriques, il s'agit d'un service en libre-service.

Au cours des dernières années, la recherche s'est portée sur l'impact de ces modes partagés dans les villes, notamment pour répondre à l'intérêt des sociétés opératrices de ces services, mais aussi sur leur modélisation [2]. Des enquêtes ont prouvé que les utilisateurs de l'auto-partage avaient renoncé à l'achat d'un nouveau véhicule grâce aux avantages de ce service [12]. Quant aux micro-mobilités partagées (vélo, trottinettes) Reck et al. [13] et Wang et al. [14] ont montré que ces modes substituaient plus les modes durables tels que la marche ou les transports en commun plutôt que la voiture conventionnelle.

### 2.1.2 Le transport à la demande

Le principe de ce service repose sur la réservation (sans qu'elle ne soit nécessairement anticipée). Il faut faire la demande du déplacement : en absence de demande, aucun véhicule ne circule. Ce service a différentes caractéristiques opérationnelles, plus ou moins flexibles pour l'utilisateur. Le service door-to-door (D2D), littéralement porte-à-porte, ne nécessite aucun déplacement à pied pour l'utilisateur. Le véhicule vient le chercher où il se situe et le dépose à la destination souhaitée. L'itinéraire réalisé est dit virtuel, c'est-à-dire qu'il n'est pas fixe et tracé à l'avance, il dépend de l'origine et de la destination, il s'agit généralement du chemin le plus rapide. D'autres services proposent une liste d'arrêts possibles. L'utilisateur doit se rendre à l'un de ces arrêts et sera aussi déposé à un arrêt. Il s'agit du service stop-to-stop (S2S). Cas spécifique du stop-to-stop en plus flexible car offrant un grand choix d'arrêts, le service corner-to-corner requiert de se déplacer au coin de rue d'un axe principal. Ce cas de figure est plus usuel dans les villes nord-américaines où le réseau de rues suit une disposition en grille. Le fait que le point de prise en charge ou de dépôt se fasse au coin de rue d'un axe principal permet d'offrir une grande densité d'arrêts possibles et donc un temps de marche minimale tout en évitant les détours pour les véhicules. On peut aussi avoir affaire à des cas mixtes comme le door-to-stop. Ce cas-là est surtout utilisé pour des services de navettes qui conduisent à un lieu d'intérêt particulier comme un aéroport, une gare, une zone commerciale ou un centre-ville.

En ce qui concerne les itinéraires, ils peuvent être complètement virtuels, c'est-à-dire qu'ils sont définis par la demande, en fonction de l'origine et de la destination ou bien des lignes prédéfinies. Pour les lignes prédéfinies, le service le moins flexible se rapproche du transport en commun avec un itinéraire fixe qui comprend une liste d'arrêts où le véhicule va passer sans forcément s'y arrêter selon la demande. Le second type de service indique plutôt la direction vers une zone, par exemple d'une zone vers une zone ou un lieu d'intérêt et va faire le trajet en récupérant les personnes, que ce soit chez elles, à un coin de rue ou bien un arrêt défini pour se diriger vers une autre zone. La direction de la ligne est définie mais l'itinéraire exact n'est pas fixe, il dépend de la demande en fonction de l'origine et destination des usagers. Il existe un autre type de distinction pour ces modes. Bien entendu, il s'agit d'un mode de déplacement public et partagé puisqu'il est offert à tous les usagers et plusieurs peuvent le prendre ensemble. Toutefois, le partage peut se faire à différents niveaux. Les déplacements à la demande peuvent être individuels. On parle de "sequential sharing". Il s'agit toujours de partage car le même véhicule est partagé par différents utilisateurs au cours de la journée. Lorsque le déplacement est partagé par différents utilisateurs, on parle de "concurrent sharing". Dans ce cas, les déplacements sont regroupés dans le même véhicule

lorsque les origines et destinations sont proches dans un même laps de temps ou bien que les itinéraires sont semblables et n'engendrent pas trop de retard ou détour.

En dehors des différentes caractéristiques opérationnelles, le transport à la demande est réalisé par différentes organisations.

Depuis quelles années avec l'essor des Transportation Network Company (TNC) connus en français sous le nom VTC et la création d'Uber en 2009 pour subvenir aux difficultés de trouver un taxi, les services de "ride-hailing" sont de plus en plus utilisés [12]. Les TNC sont des compagnies qui proposent un service similaire aux taxis mais fonctionnant avec une application mobile. La demande du déplacement ainsi que le paiement se font via l'application. Les plus connues sont Uber et Lyft. Communément, il s'agit d'un mode individuel ou chaque requête est réalisée à tour de rôle par le chauffeur selon sa disponibilité. Cependant, ce service est aussi disponible en version partagée où les utilisateurs peuvent partager la même course. Ce service appelé "ride-sharing" permet de réduire les frais de déplacement notamment. La branche UberPool d'Uber réalise ce service. Les déplacements avec une origine et destination similaire et demandés dans un instant proche sont alors regroupés. Pour les TNCs, les déplacements sont réalisés en porte à porte.

Dans le cas précédent, les déplacements à la demande sont réalisés par des sociétés privées généralement avec des véhicules de petite taille. Cependant, il ne s'agit pas du seul service de transport à la demande. Les autorités locales qui s'occupent des transports en commun développent aussi des systèmes de transport à la demande. Le service peut être déployé dans les zones un peu moins denses pour les relier aux axes plus majeurs de transport en commun ou à des zones d'activités. Le service à la demande peut aussi remplacer le transport en commun pendant les heures creuses.

Des entreprises développent aussi leur propre service pour leurs employés. On retrouve les différentes configurations expliquées plus haut.

### **2.1.3 Les véhicules autonomes**

Avec l'arrivée promise de la voiture sans conducteur (dite 'autonome') dans le secteur des transports, le service de transport à la demande serait grandement amplifié. En effet, si des flottes de tels véhicules sont introduites dans les villes, les utilisateurs pourraient les commander pour qu'ils viennent les chercher et les amène où ils désirent tout comme un transport à la demande classique mais sans chauffeur. Ainsi, le coût d'opération serait bien plus faible notamment que les TNC. C'est le principe du aTaxis ou Shared Autonomous Vehicles (SAV). Tout comme les services à la demande vus précédemment, on retrouve les différents sous-

types de services comme le système de navettes sans conducteur, de déplacements partagés, d’emplacements prédéfinis ou non pour les prises en charge, etc.

Pour encadrer les compagnies qui développent des systèmes d’automatisation des véhicules et des véhicules sans conducteurs (complètement automatisés) dans les prochaines années, le NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) du ministère des transports des États-Unis définit avec la Society of Automotive Engineers (SAE) six niveaux d’automatisation pour les véhicules [15]. C’est une définition internationale applicable à tous les pays. Les niveaux sont numérotés de 0 à 5 allant de la conduite entièrement manuelle (absence de fonction automatisée) à un véhicule entièrement automatisé qui ne nécessite aucune intervention d’un chauffeur :

**Level 0** : Aucune automatisation

**Level 1** : Assistance à la conduite (un système d’aide à la conduite)

**Level 2** : Automatisation partielle (plusieurs systèmes d’aide à la conduite)

**Level 3** : Automatisation conditionnelle (conduite automatisée dans certaines conditions avec supervision du conducteur)

**Level 4** : Haut niveau d’automatisation (conduite automatisée dans certaines conditions)

**Level 5** : Automatisation totale

Aujourd’hui, la grande majorité des véhicules sur le marché est du niveau 1. Avec certaines fonctionnalités comme le “Park Assit” ou la combinaison du régulateur de vitesse intelligent et du maintien automatique dans la voie, des véhicules sont de niveau 2. Les constructeurs automobiles tels que BMW visent des véhicules de niveaux 3 sur le marché dès 2021 [16]. En plus des constructeurs automobiles, les sociétés de transports à la demande comme Uber et Lyft développent des pôles de recherches pour des systèmes autonomes afin d’utiliser les véhicules en tant que aTaxis. En partenariat avec Volvo, Uber propose un système autonome à placer sur le toit d’une Volvo pour la rendre autonome [17]. Ce projet est en phase de test à San Francisco [18]. Lyft réalise depuis 2017 des essais sur route avec des véhicules de niveau 4 [19]. Google propose aussi un projet de aTaxis à Phoenix avec son entreprise WAYMO qui réalise un service de taxis sans conducteur [20].

Les véhicules autonomes ne sont pas nécessairement des voitures particulières qui ont été rendues autonomes. Certains se rapprochent plus du transport en commun avec notamment des véhicules, appelés navettes, ayant la forme de mini-bus avec une vingtaine de places. Par exemple, la navette NAVYA dispose de 15 places (11 assises et 4 debout). C’est un véhicule de niveau 4 qui circule à faible vitesse. Ces véhicules sont déployés ou en phase de test sur



## SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION

	SAE LEVEL 0	SAE LEVEL 1	SAE LEVEL 2	SAE LEVEL 3	SAE LEVEL 4	SAE LEVEL 5
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are <b>not</b> driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver’s seat”		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
What do these features do?	These are driver support features			These are automated driving features		
	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering <b>OR</b> brake/acceleration support to the driver	These features provide steering <b>AND</b> brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met		This feature can drive the vehicle under all conditions
Example Features	<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatic emergency braking</li> <li>• blind spot warning</li> <li>• lane departure warning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lane centering <b>OR</b></li> <li>• adaptive cruise control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lane centering <b>AND</b></li> <li>• adaptive cruise control at the same time</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• traffic jam chauffeur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• local driverless taxi</li> <li>• pedals/steering wheel may or may not be installed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions</li> </ul>

Figure 2.1 Niveau d'automatisation SAE [15]

de nombreux sites fermés comme des campus, hôpitaux, sites industriels ou touristiques mais aussi ouverts comme la Défense (proche de Paris), Lyon [21] ou Montréal.

Bien que des véhicules autonomes rentrent en phase de test sur les routes, il reste de gros enjeux au niveau de la réglementation [22]. Bien que les accidents devraient être grandement réduits, il se pose la question de la responsabilité des accidents et les choix faits par les programmeurs qui pourraient résulter dans des blessures ou morts de personnes à bord ou l'extérieur du véhicule. Ces enjeux peuvent poser des problèmes d'acceptation de ces véhicules.

La pénétration d'une innovation au sein de la population prend un certain temps qui semble de plus en plus rapide avec le temps comme l'on peut le voir sur la figure 2.2 [23]. Tous les individus ne vont pas quitter leur véhicule personnel pour acheter un véhicule autonome ou utiliser des véhicules autonomes partagés. Une étude réalisée par Heinrichs et Cyganski montre que plus de la majorité des personnes sondées ne sont pas prêtes à substituer leur mode de transport favori pour un véhicule autonome, et encore moins (72%) un véhicule à la demande [24]. Un parc automobile entièrement autonome avec tous les bénéfices que l'on peut en tirer ne sera donc pas effectif avant de nombreuses années.

Sur la figure 2.3, Litman projette la proportion de véhicules autonomes dans le temps avec des estimations plus ou moins optimistes selon la part dans les ventes de nouveaux véhicules,

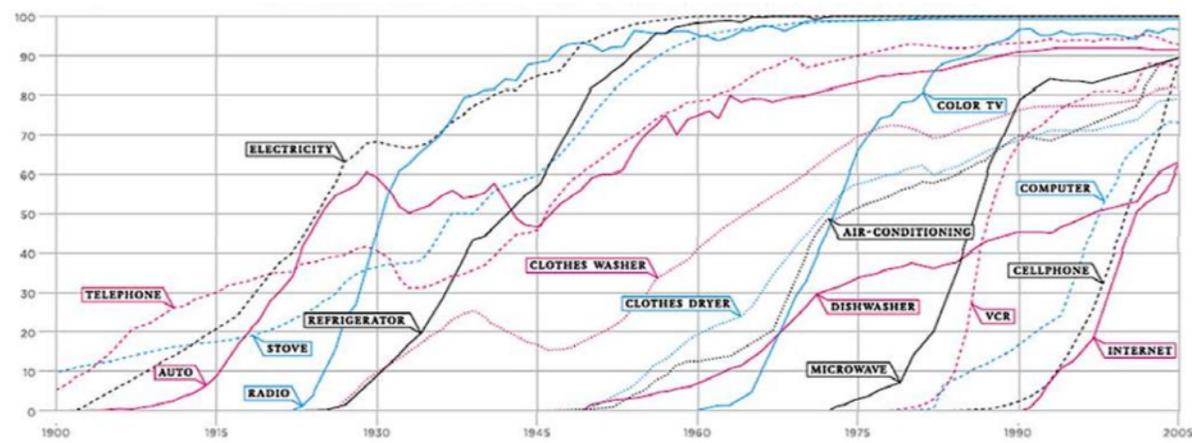


Figure 2.2 Pénétration des innovations dans la population [23]

des déplacements réalisés ou de l'entière flotte de véhicules possédés [25].

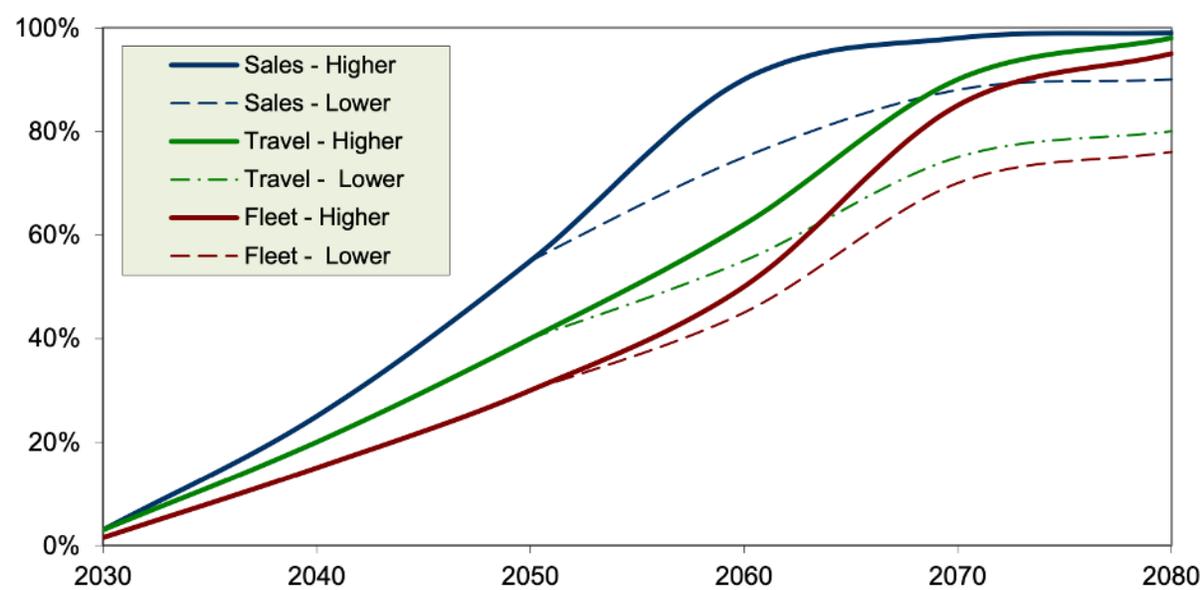


Figure 2.3 Projection de la pénétration des voitures autonomes dans le marché, sur les routes et dans la flotte automobile [25]

La recherche sur les voitures autonomes s'est concentrée sur les aspects de robotique, sur comment automatiser un véhicule avec capteurs et intelligence artificielle pour la perception (par exemple, distinguer un chien d'un enfant) et la navigation dans un environnement complexe (les différents usagers de la route). Aujourd'hui, on trouve de nombreux articles sur les impacts des véhicules autonomes [26], que ce soit sur les impacts à long terme avec les enjeux de durabilité (économique, environnemental et social), des études sur la modification

de la capacité des routes sachant que les véhicules autonomes pourront rouler plus proches les uns des autres [27], sur les scénarios d'implantations pour trouver les meilleurs et prévoir les impacts qui y sont liés, ou sur l'évolution de la demande des déplacements du fait de la demande induite qui pourrait en résulter. Les véhicules sans conducteur pourraient attirer en effet des personnes qui ne peuvent pas conduire [28] mais aussi entraîner un transfert modal à cause de changements dans la valeur du temps des utilisateurs (confort, temps disponible pour d'autres activités) [29]. Le tableau A présente des articles sur les impacts des véhicules autonomes ou la performance du service.

Les impacts attendus avec l'arrivée des véhicules autonomes comprennent l'amélioration de la sécurité avec une diminution des accidents de la route qui sont majoritairement dus aux erreurs humaines [30]. Par ailleurs, si les véhicules sont plus sécuritaires, ils ont besoin de moins d'équipement pour la sécurité, deviennent alors plus légers et donc consomment moins [31]. De même, le comportement des personnes pourrait changer et ils se tourneraient vers des véhicules plus petits au lieu de choisir des véhicules plus lourds pour se protéger lors d'un accident. Avec des services de SAV, la possession automobile devrait diminuer.

L'amélioration du confort [25] et la diminution du temps de déplacement due à la possible réduction de la congestion pourraient engendrer des déplacements supplémentaires, en particulier pour les non-conducteurs [22]. Si le coût de déplacement est moindre, les gens pourraient décider de vivre plus loin du centre-ville où le prix de l'immobilité est inférieur, ce qui engendrerait l'augmentation de l'étalement urbain. Autre modification urbaine, la demande de stationnement devrait diminuer, au moins pour le stationnement à proximité des résidences ou au centre-ville.

## 2.2 Indicateur de performance

Comme expliqué dans l'introduction 1, pour mesurer la performance d'un service de transport ou ses impacts, des indicateurs sont nécessaires. Cette section aborde les notions à connaître sur les indicateurs.

### 2.2.1 Définition

Pour comprendre l'utilité d'un indicateur et son importance, il faut savoir le définir. À travers les différentes définitions d'indicateur rencontrées dans la littérature, on retrouve toujours la notion de mesure. Il peut s'agir de mesurer la performance d'un phénomène, le progrès vers un objectif lors de l'application de mesures. Les indicateurs jouent un rôle important pour appuyer la prise de décision.

Journard fait une synthèse des définitions trouvées dans la littérature. Il constate que parmi toutes les définitions identifiées, on retrouve la notion suivante : “les indicateurs sont généralement compris comme un outil ou une méthode qui peut être utilisé pour refléter ou mesurer quelque chose de façon à représenter adéquatement ce qui est mesuré ” [32]. Il établit alors la définition synthétique suivante : “ Un indicateur est une variable, basée sur des mesures, représentant aussi précisément que possible et nécessaire un phénomène d’intérêt”. En regardant plus précisément les définitions d’indicateurs pour les mobilités durables, on retrouve la notion d’outil de mesure notamment dans l’objectif de permettre la prise de décision ou bien de mesurer les progrès pour atteindre des objectifs ciblés.

En adéquation avec cette utilité des indicateurs, Lee définit les indicateurs de transports durables de “mesures de performance qui aident les planificateurs et les gestionnaires de transport à prendre en compte l’ensemble des impacts économiques, sociaux et environnementaux de leurs décisions” [33]. On retrouve l’intérêt des indicateurs dans l’aide à la prise de décision notamment au niveau de la planification.

Dans un rapport de l’organisme des Nations Unis sur le SIDA qui définit des indicateurs, on trouve la définition suivante : “Dans un contexte de monitoring et d’évaluation, un indicateur est une mesure quantitative qui fournit de l’information afin de suivre la performance, l’atteinte d’objectifs et de déterminer l’imputabilité.” [34].

### 2.2.2 Types

Tous les indicateurs ne peuvent pas être utilisés pour mesurer les mêmes notions. Il existe différents types d’indicateurs selon ce que l’on représente et que l’on cherche à mesurer. Un indicateur peut être qualitatif ou bien quantitatif. Les indicateurs quantitatifs sont préférés car ils donnent des mesures plus précises mais certaines notions telles que les attitudes de comportement ne peuvent être décrites que par des valeurs qualitatives [32]. Stevens [35] affine ces catégories en distinguant les indicateurs nominaux, ordinaux, intervalles et ratios. Les indicateurs nominaux sont qualitatifs et prennent une valeur exclusive. Une catégorie particulière est une variable qui n’a que deux valeurs possibles : une telle variable (ex : H/F) est dite binaire (“dichotomous”, ou “dummy”). Les indicateurs ordinaux sont des indicateurs qualitatifs que l’on peut ordonner. En revanche, on ne peut pas mesurer l’écart entre les différentes valeurs possibles. Ils sont souvent utilisés pour mesurer la satisfaction. Les indicateurs quantitatifs sont ordonnables et l’écart entre la valeur est mesurable.

L’Agence Européenne de l’Environnement a défini une typologie pour les indicateurs quantitatifs selon leur calcul [36]. On retrouve :

**Descriptif** : description de la situation actuelle (x)

**Performance** : pourcentage de progression pour atteindre la cible fixée ( $x/x\_cible$ )

**Efficacité** : rapports entre deux indicateurs pour supprimer les effets de causalité si la relation est linéaire entre eux ( $x/y$ )

**Total** : somme de différents indicateurs ( $x+y$ )

Les indicateurs descriptifs peuvent présenter des biais comme l'effet d'échelle, plus il y aura d'habitants dans la zone d'étude, plus l'indicateur sera élevé. Les indicateurs normatifs sont sensibles à la cible choisie. Les ratios peuvent permettre de normaliser les phénomènes (ex : par individu) pour faciliter la comparaison. On normalise souvent par unité de temps (par jour, année), par distance (par km), par habitant, par déplacement, par ménage ou par somme des distances parcourues sur une population (par véh-km), mais l'indicateur résultant peut alors masquer certains aspects, par exemple si on calcule les accidents par véh-km, on ne voit plus l'effet du nombre de kilomètres parcourus sur le nombre d'accidents [37]. De plus, normaliser de cette façon repose sur l'hypothèse que l'indicateur au numérateur dépend linéairement de la variable de contrôle au dénominateur. Autrement dit, si la relation n'est pas linéaire, il n'y a pas d'effet de normalisation.

Dans le processus d'un projet ou plan, les indicateurs sont mesurables à différents niveaux, il existe une typologie qui définit ces différents niveaux [34] :

**Input** : ce sont les moyens mis en place ou les ressources dédiées

**Output** : ce sont les produits ou services réalisés

**Outcome** : impact intermédiaire

**Impact** : impact final recherché

Il existe encore deux types d'indicateurs au niveau de leur mesure : mesure directe ou mesure indirecte. Pour cette seconde catégorie, il n'est pas possible ou trop compliqué de mesurer le phénomène ou la grandeur par méthode directe. On utilise alors un proxy avec une autre variable qui est corrélée et peut représenter le phénomène à observer.

Dans ce rapport, on s'intéresse à des indicateurs issus d'un modèle. On distingue alors les inputs qui sont les données d'entrée du modèle et les outputs qui sont les résultats produits directement ou calculés. Selon le type de modèle, le même indicateur peut être un input pour l'un et un output pour l'autre.

### 2.2.3 Encadrement

Il existe des cadres (ou "framework") pour organiser les indicateurs et comprendre leur importance et leurs effets. Ils permettent notamment de faciliter la compréhension pour le public ou les "décideurs (decision-makers)" [32]. L'intérêt du cadre est de proposer le meilleur

moyen de communication pour présenter les indicateurs aux preneurs de décisions. Les tableaux de bord (“dashboards”) sont un bon moyen de présentation des résultats. Pour aider à la meilleure compréhension des enjeux, les données sont transformées en information et en connaissance en analysant ces informations. Le framework est utilisé pour comprendre au mieux les informations en les organisant pour qu’elles deviennent des connaissances [38].

On retrouve des cadres d’indicateurs notamment pour les projets de développement durable. Dans ces cas-là, c’est le cadre DPSIR qui est utilisé : “driving forces, pressures, states, impacts, réponses” [36]. Grâce à cela, on peut identifier les chaînes de causalité. Toujours dans la cadre du développement durable, une autre classification bien utilisée est celle correspondant aux trois axes de la durabilité :

- Économique
- Environnemental
- Social

Le framework peut aussi être simplement organisé en fonction des objectifs par thématique. Par exemple, pour les Nations Unies, leur plan Objectifs de Développement Durable est catégorisé selon les domaines : pauvreté, sécurité alimentaire, santé, éducation, équité des genres, l’eau, l’énergie, l’emploi, l’industrie et innovation, les inégalités, les villes, la consommation, le climat, les océans, la nature, justice et paix [39]. On retrouve généralement l’organisation suivante :

- Thématique (ex : Transports)
- Enjeux
- Indicateurs qui permettent de mesurer l’enjeu

Pour reprendre les typologies expliquées dans la partie précédente, Marsden et Snell présentent un framework qui relie les objectifs aux impacts, outcomes et outputs pour aider à la prise de décision [40]. On peut ainsi identifier toutes les mesures qui rentrent en compte pour atteindre un objectif général. Par exemple, construire des voies cyclables (output) entraîne généralement l’augmentation de déplacements en vélo (outcome), qui diminue les émissions de CO<sub>2</sub> (impacts) ce qui satisfait à l’objectif de ralentir le réchauffement climatique. La chaîne de causalité est reconstruite avec les indicateurs d’output, outcome et impact.

#### 2.2.4 Critères de sélection

Toutes sortes d’indicateurs peuvent se calculer et il en existe énormément. C’est pourquoi, certains critères de sélection doivent s’appliquer afin d’identifier les indicateurs appropriés. Dans la littérature, on trouve des auteurs qui proposent une trentaine de critères que l’on peut regrouper sous trois catégories [32] :

- Gestion
- Contrôle
- Mesure

Journard parcourt la littérature pour proposer une liste des critères les plus fréquents selon leur importance [32] :

**validité** : mesurer ce qu'il doit mesurer

**fiabilité** : notion de répétabilité, stable

**sensibilité** : permettre de voir les évolutions/changements

**représentativité** : corrélation entre l'indicateur et l'enjeu mesuré

**transparence** : comprendre comment l'indicateur est calculé pour que d'autres puissent le calculer indépendamment

**cible pertinente**

**données disponibles**

**interprétabilité** : comprendre l'intérêt de cette mesure

Parmi les différents critères que l'on peut trouver, l'UNAIDS insiste sur trois primordiaux [34] :

- la validité
- la fiabilité
- le biais

Pour être complètement défini, il faut que l'indicateur possède un titre, une définition, un but, une méthode de mesure, une méthode de calcul, une méthode d'acquisition des données, un choix de fréquence, un choix d'agrégation spatiale, un guide d'interprétation des résultats, des avantages et inconvénients. Il s'agit d'un bon indicateur s'il est clair, avec un unique enjeu et pertinent.

### 2.3 Ontologie

La section précédente présentait les indicateurs. Dans ce travail, l'un des objectifs est de savoir quels indicateurs utiliser et connaître toutes les informations à propos. Pour ce faire, une ontologie va être utilisée car elle permet de contenir de l'information pour un domaine défini. Son usage provient du web sémantique, pour faciliter les recherches. Ici, en s'inspirant de son utilisation plus fréquente, on devrait contenir les informations sur les indicateurs de mobilités innovantes.

### 2.3.1 Définition

C'est un terme issu de la philosophie qui est aussi utilisé en informatique. En philosophie, il s'agit d'un mouvement de pensée qui "a pour objet l'étude des propriétés les plus générales de l'être, telles que l'existence, la possibilité, la durée, le devenir" [41].

L'ontologie a été adoptée dans le domaine informatique, plus particulièrement utilisée avec le Web Sémantique (Web 3.0), en ingénierie des connaissances [42]. L'ontologie est alors principalement utilisée pour structurer un programme, mais ne s'y limite pas. En ingénierie de la connaissance, l'ontologie est utilisée pour représenter la connaissance dans un domaine. C'est en particulier un outil de représentation, qui facilite la recherche d'information. L'objectif se rapproche de son utilisation en philosophie : on cherche à définir les concepts. Elle permet de définir l'ensemble des éléments d'un domaine en utilisant un vocabulaire commun, chaque concept étant défini et les relations entre les éléments représentées.

Il existe différents niveaux d'ontologie. Guarino [43] définit 4 types d'ontologies :

“**high level ontology**” pour définir des grands concepts larges

“**domain ontology**” pour définir le vocabulaire d'un domaine spécifique

“**task ontology**” pour définir du vocabulaire pour des activités spécifiques

“**application ontology**” qui est la combinaison des deux ontologies précédentes

Au-delà de l'aspect philosophique et de son utilisation orientée vers l'informatique pour le Web sémantique, les ontologies sont utilisées dans différents domaines comme la médecine, la biologie, l'ingénierie, la traduction, etc. L'université de Buffalo a développé un pôle de recherche sur les ontologies et en recense quelques-unes sur son site [44]. Beaucoup de littérature se développe sur des méthodologies de construction d'ontologie dans le milieu des sciences de l'information.

L'objectif de ce travail est de réaliser une ontologie des indicateurs de performance pour les transports innovants, c'est-à-dire les nouveaux modes de transport qui viennent concurrencer les modes de transport plus classiques tel que le véhicule particulier ou compléter l'offre des transports en commun. Il faudra alors définir l'ensemble des indicateurs utilisés pour mesurer la performance des mobilités innovantes et établir les relations qu'il existe entre ces indicateurs notamment au niveau de leur calcul, de leur thématique, et de leurs destinataires.

### 2.3.2 Exemples d'ontologies

Cette section présente des ontologies liées au domaine du transport ainsi que des ontologies de Key Performance Indicator (KPI) mais pas dans le transport. Dans le domaine des transports,

on retrouve des ontologies créées pour définir les éléments d'un domaine particulier, comme les transports en commun (TC) ou les infrastructures de transport, mais aussi des ontologies qui sont utilisées pour représenter la demande en transport et les informations qui s'y rapportent. Le troisième type d'ontologie trouvée est celui composé de KPI qui permet d'évaluer la performance des moyens de transport. Au-delà du domaine des transports, les ontologies de KPI existent généralement dans le milieu industriel puisque les KPI sont très répandus dans les entreprises de production mais aussi pour tout type d'indicateurs comme les indicateurs sur les villes.

Au niveau de la définition des éléments qui composent un domaine, Tian et Ma proposent une ontologie pour les systèmes de transport en ville en classifiant toutes les infrastructures routières et immobilières mais aussi les moyens de transport et les relations entre tous ces éléments (Reachable, Has\_station, Located, Is\_a, Part\_of, NearBy) [45]. Wang définit une ontologie sur les transports en commun pour résoudre les problèmes sémantiques et grâce à cette ontologie propose un algorithme d'attribution des requêtes pour les transports en commun [46]. Ces types d'ontologie permettent de comprendre la construction d'une ontologie et des éléments qui la composent. On retrouve les classes qui sont les différents éléments et les propriétés qui sont les liens entre ces éléments.

Saad utilise des ontologies pour modéliser la demande des utilisateurs dans son modèle multi-agent [47]. Dans ce cas, l'ontologie est utilisée pour faciliter la recherche d'information dans des bases de données afin de trouver plus facilement les correspondances entre la demande des agents et l'offre de transport proposée. L'utilisateur fait une requête avec son lieu de départ, lieu d'arrivée et date, ce qui crée des nouvelles instances dans l'ontologie de déplacements. À partir de ces instances, le système cherche les différentes possibilités de déplacement dans les serveurs. Une fois trouvées, les informations sur le déplacement (mode, arrêt, perturbations) sont complétées dans l'ontologie et une proposition est renvoyée à l'utilisateur.

Diamantini propose une ontologie pour représenter les KPI d'une entreprise concernant la performance des chaînes de production [48]. Les KPI sont représentés sous forme d'un modèle logique avec leur formule de calcul. Ainsi, les relations entre les KPI sont établies à partir des relations algébriques entre ces indicateurs. Ainsi, ceci permet d'identifier des correspondances entre certains KPI. Bien qu'il ne s'agisse pas de KPI liés au transport, cette ontologie permet d'identifier les classes et les propriétés nécessaires à la conception d'une ontologie de KPI, comme par exemple la classe qui définit les unités de mesure, les utilisateurs des KPI, etc.

Fox conçoit une ontologie, the Global City Indicator Ontology pour représenter les indicateurs imposés par la norme ISO 37120. Il s'agit d'une norme qui regroupe des indicateurs pour évaluer et comparer les villes dans différents domaines tels que l'éducation ou les transports.

Il cherche la meilleure représentation de l'indicateur et de sa définition ainsi que les données requises pour qu'il y ait la meilleure interprétation. Un exemple est proposé avec la ville de Toronto pour l'année 2013 [49].

Mnir et al. ont développé une ontologie pour aider à la prise de décision par les autorités de transport et des gouvernements pour les systèmes de transport en commun [50]. L'ontologie est construite de KPI qui permettent d'évaluer la performance des transports en commun. Les indicateurs sont choisis à partir de standards existant sur la performance des transports en commun et regroupés selon 4 thèmes qui prennent alors les valeurs high/medium/low selon la valeur des indicateurs de leur catégorie. Ce type de représentation s'éloigne de l'ontologie que nous cherchons à représenter sur la performance des mobilités innovantes sachant que l'on se limite à des valeurs qualitatives sur des thématiques pour évaluer la performance. De plus, les informations propres aux indicateurs et leurs relations ne sont pas très développées.

Les ontologies révisées ci-dessus ont permis de comprendre la structure et la construction d'une ontologie et ses éléments essentiels. L'ensemble des éléments et relations d'une ontologie sont définis à partir des objets suivants : instance, propriété et classe. Les instances sont objets qui constituent l'ontologie. Les propriétés permettent de définir les relations qu'il existe entre les instances. Les classes correspondent aux ensembles d'instances qui sont regroupés car appartenant au même type d'objet. À l'intérieur des classes, on peut créer des sous-classes. Les classes et propriétés apportent des informations sur les instances.

L'ontologie que l'on souhaite construire se rapproche le plus du type d'ontologie proposée par Diamantini [48]. En effet, comme on souhaite le faire, différentes caractéristiques par KPI sont décrites, ce qui permet notamment d'établir des relations entre les éléments qui composeront l'ontologie. Les éléments essentiels pour une telle ontologie sont alors les classes contenant les KPI, les différents utilisateurs, les formules de calcul, les modes de transport, et les propriétés qui permettent ensuite de relier les instances des classes sus-citées aux KPI correspondants.

## CHAPITRE 3 ÉLÉMENTS DE L'ONTOLOGIE

La revue de littérature a permis d'identifier les modes inclus dans le cadre du travail, ainsi que de définir les caractéristiques d'un bon indicateur. À partir de ces informations, ce chapitre collecte les indicateurs recueillis dans la littérature sur la modélisation des modes innovants.

Le prochain chapitre utilisera la partie de la revue sur l'ontologie et les résultats sur les indicateurs présentés dans ce chapitre.

Ces dernières années, l'intérêt pour la prévision des impacts des mobilités innovantes est grandissant, en particulier pour les véhicules autonomes qui s'avèrerait être une technologie disruptive pour la mobilité des individus. Le nombre d'études ne cesse de croître. Parmi ces études, on retrouve des sondages, des hypothèses technologiques, l'avis d'experts, mais ce qui nous intéresse ici, c'est la simulation à large échelle en milieu urbain de ces modes, grâce à des modèles numériques. C'est à travers ce genre d'étude avec des modèles de simulation à large échelle de modes innovants que nous chercheront les indicateurs pour mesurer leurs impacts et leur performance.

### 3.1 Les modèles

Il existe différents modèles de transport en partant du modèle le plus ancien, utilisant la méthode séquentielle classique, à la simulation multi-agent. Les différences se font en particulier au niveau d'agrégation. La simulation multi-agent est entièrement désagrégée et on peut donc obtenir des résultats sur chaque individu ou véhicule qui a été simulé et non pas seulement une moyenne agrégée, ce qui est devenu très intéressant au moment de simuler des modes de transport partagés et à la demande [51].

La plus ancienne méthode est la méthode séquentielle classique ("four step model"). L'aire étudiée est découpée en zones. Comme son nom l'indique, cette méthode suit quatre étapes. Premièrement, la génération des déplacements. À partir de données relatives à la population telles que les caractéristiques socio-démographiques et l'utilisation du sol qui sont moyennées pour la zone, un nombre de déplacements produits par chaque zone est généré ainsi qu'un nombre de déplacements attirés par chacune des zones. Ensuite, c'est l'étape de distribution des déplacements. Il faut alors distribuer les déplacements issus de l'étape précédente aux zones d'origine et de destination, c'est-à-dire, faire coïncider un déplacement produit d'une zone d'origine à un déplacement attiré par une autre de destination. À la fin de cette étape, on a des paires origine-destination pour les déplacements. Ensuite, pour la troisième étape,

il faut affecter un mode de transport pour le déplacement. Le mode est choisi à l'aide de la fonction d'utilité. La dernière étape consiste à attribuer un itinéraire entre l'origine et la destination. À la première itération, le chemin avec le coût généralisé le plus faible est attribué selon l'algorithme de Dijkstra. Ensuite, d'autres itérations sont réalisées jusqu'à trouver un équilibre entre les coûts de déplacement et les choix d'itinéraires selon le principe de Wardrop. Il s'agit d'un modèle agrégé. Les déplacements sont définis d'une zone vers une autre en partant généralement du centroïde de la zone. Les déplacements faits au sein de la même zone n'encombrent pas le réseau et ne sont pas pris en compte. La taille des zones va donc influencer sur la fiabilité et validité du modèle.

À partir de la méthode précédente, certaines étapes, comme l'étape de génération, ont été ajustées. Pour la modélisation basée sur les activités, la génération ne se fait pas pour un déplacement mais pour une activité, le déplacement correspond au besoin de se rendre à une activité. Le modèle *Segmented Stochastic Slice Simulation Model (4S)* est un modèle basé sur les activités.

On trouve aussi d'autres modèles comme les modèles d'intégration de l'environnement bâti et des transports *Land Use and Transport Integrated (LUTI)*. Ce modèle permet de prendre en compte les liens étroits entre l'aménagement du territoire et les transports. Usuellement dans les modèles de transport, on tient en compte de l'utilisation des sols pour définir la demande. Grâce au modèle LUTI, on peut voir la rétroaction des nouveaux modes de transport sur l'utilisation des sols avec notamment l'étalement urbain, la position des ménages et des activités [52].

Appartenant au domaine de l'Intelligence Artificielle, la modélisation basée sur les agents est utilisée en transport. C'est d'ailleurs cette méthode qui est la plus utilisée pour évaluer les impacts des SAV, avec dans la plupart des cas le logiciel MATSim.

Dans une simulation multi-agent, chaque habitant, appelé agent, de la zone simulée est modélisé avec ses caractéristiques. Tous les réseaux de transport sont représentés, ainsi que l'utilisation du sol pour connaître les lieux d'intérêt. En fonction de ses caractéristiques, chaque agent dispose d'un plan quotidien d'activités. Ces activités traduisent un besoin de déplacement qui va être affecté dans le réseau et à un mode de transport à l'aide d'une fonction d'utilité. À l'aide d'un algorithme co-évolutionnaire, le comportement des individus va évoluer jusqu'à atteindre un équilibre des utilités des déplacements des agents dans le réseau. Le logiciel a donc besoin de données entrantes sur la population, l'offre de transport, l'occupation du sol. Il doit aussi être calibré afin qu'il modélise au mieux le comportement des habitants de cette zone. À la fin de la simulation, il est possible de connaître la position de chaque individu au cours de la journée ainsi que ses activités et les transports qu'il a utilisés.

De même pour les véhicules, toutes les données de localisation et sur le nombre de personnes à bord sont disponibles. C'est à partir de ces données que les indicateurs de performance vont pouvoir être calculés. Ces simulations multi-agents permettent de modéliser tout système ou service de transport. Par exemple, on peut intégrer de nouveaux modes de transport, appliquer de nouvelles politiques ou réglementation, modifier le comportement des individus. Ceci permet de prévoir des impacts de ces scénarios si les modèles sont bien calibrés. La section 5.3 du chapitre 5 expliquera plus en détail le fonctionnement de MATSim.

Pour étudier certains impacts des transports innovant comme les impacts sur la congestion des véhicules autonomes par rapport aux véhicules conventionnels, il est aussi possible d'utiliser des modèles microscopiques de la circulation. Il s'agit aussi de modèles basés sur les agents puisque chaque individu est représenté. Cependant, l'étude se limite généralement à des réseaux plus petits étant donné le niveau de détail du réseau et des déplacements des usagers et véhicules. Dans ces modèles, la demande en termes des origines et destinations des déplacements est déjà établie et on étudie plutôt les interactions microscopiques des véhicules et des usagers. De nombreux paramètres sont à calibrer pour la justesse du modèle.

### 3.2 Les scénarios

Les modèles vus précédemment permettent de simuler l'utilisation des modes de transport innovants pour connaître leurs impacts. On peut facilement faire varier les paramètres du modèle tels que des variables qui rentrent en jeu dans l'attribution de la demande ainsi que les paramètres des scénarios, c'est-à-dire les différents choix d'implantation des services de transport évalués pour identifier les conséquences. Ces moyens permettent alors d'établir des corrélations entre les données d'entrée et de sortie, mais aussi de choisir les paramètres d'implantation des services de transport optimaux qui seront les plus adaptés pour le déploiement du service sur le terrain. On étudie alors plusieurs scénarios qui correspondent à des paramètres d'entrée différents et on compare les résultats à travers les KPI afin de comparer les performances.

Dans la littérature concernant le transport à la demande et en particulier les SAV, les principaux paramètres d'entrée testés à différentes valeurs sont les suivants :

- nombre de véhicules de la flotte de véhicule
- nombre de places dans le véhicule
- tarif appliqué
- déplacement partagé ou client unique
- déplacement porte à porte ou nécessitant de marcher jusqu'à un arrêt
- stratégies d'attribution des requêtes

- stratégies de relocalisation du véhicule
- stratégies du choix de l’itinéraire pour les déplacements partagés

Dans ces études, l’objectif est généralement de comprendre comment obtenir la plus grande part de marché, ceci passe par l’offre du service le plus performant possible, c’est-à-dire dans la plupart des cas le plus rapide possible, en minimisant le temps d’attente pour éviter que l’agent n’utilise un autre mode de transport s’il doit attendre trop longtemps le véhicule à la demande et en minimisant le temps du trajet en choisissant le meilleur itinéraire, mais aussi le plus avantageux économiquement.

On retrouve aussi différents scénarios où ce sont les paramètres du modèle qui varient. En effet, comme il s’agit de modes de transport innovants et que l’on réalise ces modèles avant que ces modes ne circulent ou ne soient complètement aboutis, il demeure des incertitudes au niveau de la modélisation. Différentes valeurs de paramètres sont alors testées pour regarder la sensibilité. On retrouve par exemple des scénarios avec différentes parts des véhicules autonomes qui traduisent différents stades de l’introduction des véhicules autonomes et de l’acceptation des usagers, des niveaux de demandes différents qui peuvent modéliser la demande induite, l’évolution de la capacité des routes qui risque d’être différente avec les véhicules connectés, c’est-à-dire qui peuvent communiquer, et automatisés et aussi différentes valeurs du Value of Time (VOT) puisque la perception et possiblement la productivité du temps seront différents à bord d’un véhicule autonome que d’une voiture conduite manuellement. On retrouve aussi différents scénarios avec des spéculations sur le coût opérationnel des SAV et des autres modes.

### 3.2.1 La taille de la flotte

La plupart des articles présentent leurs résultats en fonction du nombre de véhicules de la flotte. L’objectif de certains articles est de déterminer le nombre de véhicules requis. Burns détermine le nombre de véhicules autonomes partagés requis dans les villes de Ann Arbor (Michigan), Babcock Ranch (Floride) et à Manhattan (New York) afin d’assurer un service avec un temps d’attente inférieur à un seuil fixé sur une certaine zone pendant l’heure de pointe [53]. À partir de ce nombre, il compare alors les coûts de ce service face à l’utilisation de la voiture personnelle. Merlin détermine le nombre de SAV afin que le temps d’attente soit inférieur à celui du bus [54]. Il compare alors les bus, SAV avec passager unique ou SAV partagé avec une flotte de la taille déterminée précédemment.

La taille de la flotte est un paramètre important pour la prise de décision des futures compagnies. En effet, l’investissement financier va se faire en grande partie au niveau de l’achat des véhicules. Une grosse flotte demande un gros investissement. Elle demande aussi un entretien

qui est à prendre en compte. En contrepartie, une petite flotte peut engendrer une mauvaise performance du service, c'est-à-dire des temps d'attente importants entre la requête de l'utilisateur et l'arrivée du véhicule [55]. À cause de ceci, le manque d'attractivité du service diminue le nombre de requêtes et ainsi le revenu. Cependant, pour atteindre la rentabilité maximale, il ne suffit pas d'investir dans le plus grand nombre de véhicules. Il y a une limite à la demande. Augmenter la taille de la flotte ne génère pas des requêtes de façon linéaire [56]. La performance mesurée en termes de temps d'attente sera meilleure mais en revanche l'utilisation des véhicules ne sera pas très bonne car de nombreux véhicules resteront inutilisés en dehors des heures de pointe [57]. En effet, la plupart des véhicules resteront inutilisés en dehors des heures de pointe et le taux d'utilisation n'atteindra jamais 100% [58]. Par ailleurs, pour compenser l'inutilisation de ces véhicules, le tarif pourrait être plus élevé et donc le service pourrait être moins attractif [59].

### 3.2.2 La taille des véhicules

Il s'agit là aussi d'un paramètre important pour l'implantation des véhicules.

De prime abord, le nombre de places sera différent selon le type de service proposé. S'il s'agit de véhicules qui seront utilisés en "pooling" ou en remplacement des transports en commun, la taille des véhicules peut être grande, jusqu'à 50 places [60]. Toutefois des véhicules plus petits peuvent aussi être utilisés pour des déplacements partagés, les mêmes que les déplacements non-partagés, comme c'est le cas par exemple pour les véhicules du service UberPool. Pour un service de type "single-rider" qui s'apparente le plus au cas d'utilisation classique des taxis, dans le cas où le véhicule ne s'occupe que d'une seule requête à la fois, le véhicule sera plus petit, allant par exemple de 1 à 6 places [61]. En effet, bien qu'il s'agisse d'une unique requête, il peut y avoir plusieurs passagers pour cette demande et donc il ne faut pas se limiter à des véhicules à une seule place passager.

Là aussi, il peut s'agir d'un compromis. Avoir un véhicule trop petit peut faire perdre des requêtes dans le cas de déplacements de plusieurs personnes mais le coût opérationnel sera inférieur [62]. Dans la plupart des études, les SAV sont (plus au moins explicitement) de la même taille que les voitures passager ou les taxis. En effet, la répartition du taux d'occupation (nombre de passagers par véhicule) au cours de la journée est distribuée de 1 à 4 passagers par véhicule [63].

### 3.2.3 Type de service

Au niveau du type de service proposé, on retrouve deux classifications pour les SAV. Il y a l’opposition single-rider et ride-sharing qui concerne le partage du déplacement puis l’opposition porte à porte (“door-to-door”) et arrêts prédéfinis (stations fixes ou virtuelles et variables) qui concerne les lieux de prise en charge (“pick-up”) et dépôt (“drop-off”) des passagers.

Le service en déplacement non-partagé concorde généralement avec un service porte à porte et les services pooling avec un service où le client se déplace à pied à un lieu de prise en charge [64]. Mais ce n’est pas toujours le cas, les ride-sharing peuvent se faire en porte à porte [65]. On peut suivre l’état du véhicule et le nombre de passagers à bord.

Pour les simulations avec ride-sharing, on peut ajouter le paramètre volonté de partager son déplacement (“willingness to share ride”) qui traduit l’acceptation des usagers à partager le déplacement avec d’autres passagers. La valeur de ce paramètre peut être calibrée à partir de sondages ou testée pour différentes valeurs.

### 3.2.4 Stratégies

Que ce soit pour les déplacements partagés, ou pour le ride-sharing, il faut un algorithme d’attribution des requêtes aux véhicules. L’objectif est de minimiser le temps d’attente. Pour le service de pooling, il faut aussi limiter le détour effectué par le véhicule imposé au client A en allant chercher le client B [66]. Globalement, il faut que le temps de déplacement, qui contient le temps d’attente et le temps en véhicule, incluant lui-même le temps de détour, soit minimisé [67].

Pour minimiser le temps d’attente, on peut introduire dans le modèle la relocalisation du véhicule. Une fois le client déposé, le véhicule se redirige vers une zone où la demande est généralement élevée. Ainsi, si une requête apparaît dans cette zone, il sera déjà sur place et le temps d’attente du client sera moindre. Il existe différents modèles de relocalisation avec des algorithmes différents selon les auteurs. Hörl et al. en comparent quatre [55]. Pour évaluer ces stratégies, on peut connaître au cours de la simulation multi-agent la proportion de véhicules qui sont occupés ou vides, à l’arrêt dans l’attente d’une requête, qui vont chercher un client ou se relocalisent [57]. Pour les systèmes partagés, on peut suivre aussi l’occupation du véhicule en nombre de passagers à bord.

Bien que le temps d’attente soit réduit, ces stratégies génèrent des déplacements à vide. Qu’il s’agisse des stratégies de relocalisation ou d’attribution, il faut minimiser le temps d’attente mais aussi limiter les distances à vide. En effet, le client paie pour le temps ou la distance

passée dans le véhicule et non pas la distance totale effectuée par ce véhicule pour cette requête. Or ces kilomètres ont un coût opérationnel qui pourrait être compensé dans le coût du déplacement pour le client et faire baisser l'attractivité. Le service ride-sharing offre un coût de déplacement inférieur au single-rider puisque le prix du déplacement est partagé par les différents utilisateurs [67].

De plus, d'un point de vue écologique, sachant que la consommation énergétique et les émissions polluantes sont calculées à partir des kilomètres parcourus totaux, il faut chercher à les minimiser.

On retrouve aussi différentes stratégies pour le stationnement. Les voitures autonomes n'ont pas besoin de chauffeur et donc peuvent rouler seules pour aller se garer dans une zone où le coût de stationnement est moins élevé mais aussi continuer de rouler pendant toute la durée de l'activité. Bischoff et al. regardent ces différentes stratégies de stationnement pour des véhicules autonomes privés [68]. Les flottes partagées peuvent aussi avoir besoin de stationnement, que ce soit sur rue, dans des garages prévus pour ces véhicules [69]. Il est aussi possible de ne pas stationner les véhicules avec le mode croisière qui consiste à rouler dans l'attente d'une requête. Wang et al. regardent les différentes infrastructures possibles pour les lieux de prise en charge et de dépôt afin de gérer au mieux les files d'attente et limiter au maximum la diminution de la capacité du réseau à cause de la présence de véhicules sur le bord des voies [70].

### **3.2.5 Électrification**

Certains modèles examinent la consommation énergétique des véhicules des modes innovants. Si électriques, leurs émissions sont différentes d'une flotte thermique. Il faut aussi prendre en compte la charge des véhicules électriques. Des indicateurs spécifiques sont attribués pour essayer d'adopter les meilleures stratégies de gestion de la charge et des infrastructures à mettre en place [71]. Différents véhicules peuvent être modélisés pour choisir l'autonomie la plus adaptée [72]. Il faut aussi réfléchir au nombre, au type et à l'emplacement des bornes de recharge [73].

### **3.2.6 Tarification**

C'est de la tarification du service que provient le revenu de la compagnie. De manière générale, la tarification est fixée à partir du coût opérationnel plus une marge afin de générer du profit pour que le système soit viable [74, 75].

Toutefois, on trouve des articles qui testent la sensibilité du service à la tarification [59, 76].

En effet, le choix du mode se fait à partir de la fonction de désutilité qui prend en compte le coût du déplacement : plus celui-ci est faible, plus ce mode a de chance d'être choisi.

Dans d'autres exemples, une taxe liée à la congestion est ajoutée à la tarification des usagers mais aussi pour l'opérateur dans les déplacements à vide pour refléter leur impact environnemental [74, 75]. Gurumurthy applique une tarification de la forme :  $\text{cout fixe} + \text{distance} \times \text{cout distance} + \text{durée} \times \text{cout durée}$  [77]. Pour son scénario de base, les tarifs sont fixés pour un service single-rider avec un taux de pénétration des SAV de 10%. Il teste alors différentes réductions (50% et 75%) de ces tarifs-là pour les appliquer à un système ride-sharing.

Sachant qu'une diminution du coût de déplacement peut entraîner l'étalement urbain, Zhang et Guhathakurta étudient la distance des ménages au centre-ville ou à leur travail selon différents tarifs kilométriques [78].

Le coût de stationnement doit aussi être pris en compte. Dans certains cas, il peut être identique au coût des voitures conventionnelles, réduit puisque la demande est moindre et que les véhicules autonomes peuvent se diriger seuls vers des zones à tarif plus faible ou totalement nul si les véhicules autonomes roulent sans se garer. Les résultats sont alors sensibles à la stratégie de stationnement choisie [79].

### 3.2.7 Capacité

Il s'agit ici d'un paramètre du réseau. Il est prévu que les véhicules autonomes augmentent la capacité des routes [80]. En effet, en étant automatisés, les véhicules peuvent rouler plus proches les uns des autres, tout en augmentant la sécurité puisque le temps de perception et réaction est réduit. Pour ce paramètre-là, on trouve différents types d'articles. Des modèles plus de circulation [81], qui étudient l'impact sur la vitesse et la congestion. On est plus à l'échelle micro. Puis des modèles, comme la simulation multi-agent qui paramètrent différents niveaux de capacité et regarde l'impact qui en découle sur le service, comme le retard [82].

Des modèles proposent aussi de réserver des voies aux véhicules autonomes. Il y a des études sur l'effet de peloton qui permet de réduire la consommation énergétique face à la force aérodynamique ainsi que la disparition des ralentissements et accélérations sur les voies réservées [83].

### 3.2.8 Paramètres de modélisation

Différents scénarios sont établis pour les paramètres du modèle et non pas uniquement des paramètres du service. En effet, afin de modéliser au mieux les impacts des modes innovants, il faut que le modèle soit valide. Cependant, sachant qu'il s'agit d'un mode de transport

du futur, la calibration des paramètres de modélisation peut être difficile. Des sondages permettent notamment de prévoir l'acceptation de ces modes et services par le public [24,84]. Pour les véhicules autonomes, le grand changement à prévoir est la perception du temps à bord du véhicule et le confort. En effet, en comparaison avec l'utilisation d'une voiture conventionnelle, le passager n'a pas besoin de conduire. Il peut donc travailler, se détendre, dormir, s'amuser pendant le déplacement, il n'a pas besoin de porter son attention sur la route. Le confort est amélioré et donc la valeur du temps diminue.

Zhao et Kockleman [78] ou Levin et Boyles [85] modélisent alors différentes valeurs du temps (VOT) pour observer les impacts. Sachant que la VOT rentre en compte dans le calcul du coût de déplacement, elle va influencer le choix modal. Plus la valeur du temps est faible, plus il y a de chance que ce mode soit choisi, plus les déplacements avec ce mode augmenteront. On parle alors de demande induite. Sachant que le mode est attractif, il va permettre de nouveaux déplacements. Pour les véhicules autonomes, il peut s'agir des nouveaux déplacements réalisés par des personnes ne possédant pas de permis de conduire ou de véhicule personnel [30] qui par exemple souhaitaient réaliser des activités mais ne possédaient pas de moyens pour s'y rendre ou bien des personnes qui décident de faire plus d'activités car le coût de déplacement est moindre.

Il y a des scénarios avec différents niveaux de demande prenant en compte cette demande induite [86].

### 3.3 Les indicateurs

Les indicateurs utilisés pour représenter les résultats de la simulation de différents modèles et scénarios ont été recensés.

Pour ce faire, la méthodologie suivante a été mise en place. En premier lieu, il a fallu constituer la base de données d'articles. Pour ce faire, des recherches par mots-clés ont été faites dans des moteurs de recherches d'articles scientifiques comme Compendex ou Google Scholar. À partir de ces articles, de nouveaux ont été trouvés dans les références bibliographiques. À ce stade, le nombre d'articles a permis d'identifier les universités et centres de recherches spécialisés dans ce domaine. Le portail de ces universités et leur bibliothèque ont permis de venir compléter la collection d'articles dans le domaine. L'ajout d'articles s'est fait de manière progressive au cours des lectures en découvrant de nouvelles références intéressantes.

La première lecture a permis de classer les articles selon leur modèle lorsque celui-ci était identifiable et selon les scénarios simulés. Tous les indicateurs utilisés pour représenter les résultats des simulations ont été relevés afin de créer une base de données. Cependant, il

n'existe pas de vocabulaire commun établi et les auteurs utilisent parfois des mots différents pour désigner le même indicateur et parfois un même terme pour deux mesures différentes. Il a donc fallu classer les indicateurs répertoriés avant de les analyser. Une fois les indicateurs équivalents regroupés par la même dénomination, des analyses ont pu être faites.

La recherche par mots-clés a été faite autour des termes : “impacts”, “autonomous vehicles”, “innovative mobility”, “performance”, “evaluation”.

Les principales universités et institut de recherches publiant des articles sur les impacts des nouvelles mobilités dont en particulier les SAV et aussi la modélisation multi-agent sont l'ETH Zürich (Suisse), l'Université du Texas à Austin (É.-U.), l'Université Technique de Berlin (Allemagne), le Massachusetts Institute of Technology (É.-U.), l'Institut de Recherche Technologique SystemX (France), le Georgia Institute of Technology (É.-U.), le Future Cities Laboratory à Singapour et l'Université Stanford (É.-U.).

L'annexe A est un tableau qui contient la liste des articles qui ont été utilisés pour relever les informations relatives aux indicateurs des véhicules autonomes. On y retrouve les indicateurs utilisés, le type d'étude réalisée (c'est-à-dire les scénarios qui sont comparés), le modèle utilisé ainsi que l'aire urbaine simulée.

79 articles présentant les impacts des SAV ont été analysés.

Un total de 449 indicateurs a été relevé. Après la classification pour trouver un terme commun aux indicateurs similaires, il reste 60 indicateurs. Bien qu'ils mesurent le même phénomène, certains indicateurs sont différents au niveau du calcul. Par exemple, la moyenne calculée peut être pondérée à partir de grandeur différentes (distance, temps, nombre de déplacements). La même grandeur peut être représentée à différentes échelles physique (résultats totaux, moyenne ramenée au véhicule ou au déplacement) mais aussi échelle temporelle (moyenne sur la journée ou une frise pour le suivi horaire). Des annotations particulières ont été ajoutées dans ces cas-là. En tenant compte de ces caractéristiques spécifiques, on décompte 146 indicateurs.

Le tableau A présente 65 articles scientifiques sur la modélisation des SAV. Pour chaque article, on a identifié la zone simulée (ville, région ou zone fictive) ainsi que le modèle utilisé, les scénarios simulés et les indicateurs qui ont permis de mesurer la performance des SAV.

Les KPI les plus fréquents sur les 79 articles sont présentés dans le tableau 3.1.

En analysant les indicateurs selon les scénarios ou modèles, on remarque que certains indicateurs sont spécifiques à certains scénarios.

Par exemple, le temps d'accès n'est mesuré que pour les simulations modélisant des services porte à porte [70, 87] ou avec stationnement [68, 69]. Dans ces cas-là, on va tenir compte du

Tableau 3.1 Fréquence d'apparition des indicateurs dans la littérature sélectionnée

Indicateur	Fréquence d'apparition
Temps d'attente	63%
vehicule-kilometers traveled (VKT) (véhicules-kilomètres parcourus)	47%
Temps de parcours	32%
Déplacement à vide	30%
Coût	27%
Part modale	24%
Taux d'occupation	22%
Émissions de gaz à effet de serre	20%
Vitesse	16%
Taux d'utilisation	16%

temps de marche auquel on donne normalement une valeur différente du temps d'attente à l'arrêt ou du temps en véhicule.

Lors de simulation avec des Shared Autonomous Electrical Vehicles (SAEV), on trouve alors des indicateurs relatifs à la charge des véhicules comme le temps passé en charge (en unités de temps ou en pourcentage), le nombre d'arrêts pour recharger le véhicule, la distance à vide (unités de distance ou en pourcentage) effectuée pour se rendre aux bornes de recharges, le nombre optimal de stations [63, 71–73, 88–91].

À contrario, certains indicateurs ne sont jamais calculés pour certains modèles. Par exemple, pour les simulations concernant la circulation, le temps d'attente n'est jamais déterminé. En effet, dans ce type de modèles, on regarde en particulier la vitesse des véhicules et le retard global engendré ou non par la congestion. Le retard est calculé uniquement sur le temps en véhicule [80, 81, 83, 92–94].

### 3.3.1 Échelle de l'indicateur

Des indicateurs qui mesurent le même phénomène peuvent être calculés à différentes échelles. L'interprétation pourra alors être différente.

Prenons en exemple la distance parcourue. On a trois échelles différentes :

- les VKT (“Vehicle Kilometers Traveled”), qui correspondent à la distance totale parcourue par l'ensemble des véhicules de la flotte, sert notamment à calculer la consommation et les émissions de gaz à effet de serre (GES) ;
- la distance par véhicule, qui correspond à la distance parcourue par un véhicule, peut permettre entre-autres de connaître l'utilisation des véhicules ;

- la distance d'un déplacement permet d'identifier par exemple les impacts sur le comportement des usagers.

Comme la distance, le temps de déplacement peut être déterminé à ces trois échelles (vehicle-hours traveled (VHT) ("Vehicle Hours Traveled"), durée d'utilisation par véhicule, temps de déplacement).

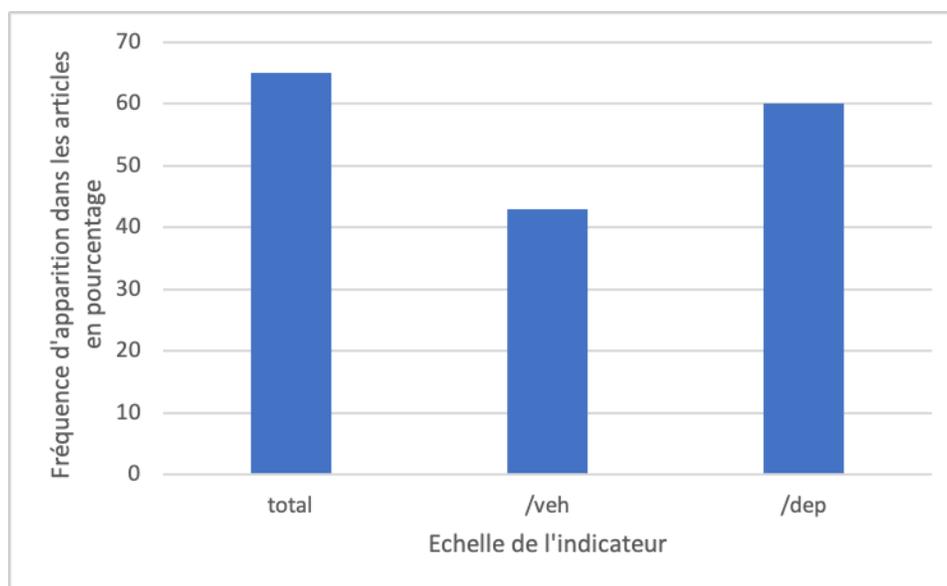


Figure 3.1 Distribution du nombre d'articles selon l'échelle des indicateurs

D'autres indicateurs peuvent être aussi calculés pour différentes échelles comme le nombre de passagers par mode ou par véhicule, ou le nombre de déplacements.

### 3.3.2 Unité de l'indicateur

Il existe différents moyens de calculer les indicateurs qui représentent des taux ou des proportions, donc sans dimension. Par exemple, la part modale est généralement calculée en nombre de déplacements. C'est le nombre de déplacements réalisés avec ce mode divisé par le nombre total de déplacements. Mais on peut aussi calculer la part modale avec la distance, en divisant les VKT effectués par mode par les VKT totaux [59].

Pour décrire l'état du véhicule, on peut calculer la part en distance ou bien en temps. Lorsqu'il s'agit des déplacements à vide, les calculs sont généralement faits à partir de la distance puisque l'on cherche à la minimiser, minimiser le temps à vide a moins d'incidence car le véhicule peut être arrêté et le coût opérationnel est alors différent.

En revanche, quand on suit l'utilisation des véhicules, les taux entre l'arrêt en attente, la

prise en charge, le client à bord, et la relocalisation se calculent à partir du temps. Sinon l'état à l'arrêt, qui signifie la non-utilisation, ne serait pas pris en compte.

Malheureusement, bien souvent, la méthode de calcul de chaque indicateur n'est pas explicitée dans les articles.

Pour les services avec un chauffeur comme Uber ou les taxis, le temps est souvent plus important que la distance car il correspond à une grande partie du coût opérationnel.

Pour un même enjeu ou objet mesuré, plusieurs indicateurs sont calculés avec des unités différentes. En plus des grandeurs de mesure directe telles que la distance ou le temps, on calcule aussi des indicateurs en ratios, rapport entre deux grandeurs de même unité qui donnent un résultat en pourcentage. Par exemple, pour les différents états des véhicules, les mesures sont déclinées à travers un indicateur exprimé en minutes, un autre en kilomètre et aussi d'autres en pourcentage calculé à partir du rapport entre durées ou entre distances.

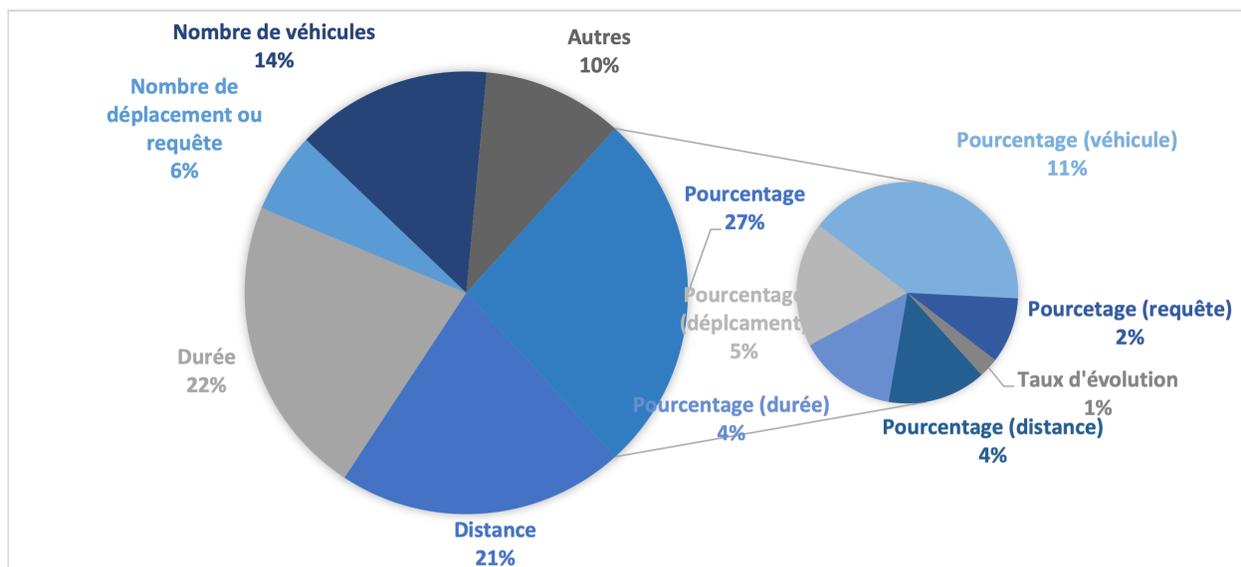
À titre d'exemple, concernant les déplacements à vide, sans passager, pour calculer le ratio à partir des distances, on divise les VKT à vide par les VKT totaux. De même, pour les mesures en temps, on divise usuellement la durée de l'état étudié par la durée de la simulation. Calculer ces proportions est plus parlant pour la prise de décision car les résultats sont normalisés ce qui permet de comparer les différents impacts selon les scénarios.

Ensuite lors de la comparaison de scénario avec le modèle de référence, dit "de base", on peut calculer la différence ( $valeur_{finale} - valeur_{initiale}$ ) pour tous les indicateurs ainsi que la différence relative (en pourcentage) ( $\frac{valeur_{finale} - valeur_{initiale}}{valeur_{initiale}}$ ).

Lorsqu'il s'agit d'indicateur individuel relatif au déplacement ou au véhicule, l'indicateur du scénario est dans la majorité des cas la moyenne sur tous les déplacements ou véhicules. Pour certains indicateurs, il est intéressant de connaître d'autres statistiques comme la valeur maximale comme pour le temps d'attente ou le temps de parcours ou la densité. Il est peut-être préférable de présenter alors le 95<sup>ème</sup> centile afin d'éliminer le cas extrême, peut être erroné, tout en gardant une idée du maximum [54, 66]. En plus de la moyenne, l'écart-type peut être intéressant pour avoir une idée de la variabilité de l'indicateur individuel au sein de l'ensemble des déplacements ou des véhicules [67].

Puisqu'on dispose de toutes les informations sur tous les agents au cours de la simulation, les indicateurs individuels peuvent aussi être étudiés dans le temps (ou sur le réseau). On peut aussi suivre l'état et l'occupation des véhicules au cours de la journée. On trace alors sur un graphique avec abscisse l'heure dans la simulation, le nombre de véhicules ou pourcentage de la flotte dans chaque état pendant la période [57, 58, 74], de même avec le nombre de véhicules selon le nombre de passagers [56].

Figure 3.2 Proportion des différentes échelles parmi les indicateurs relevés



### 3.3.3 Classification des indicateurs

Avant de définir chaque indicateur et son calcul, les indicateurs vont être regroupés par thématique, ce qui permet de mesurer différents aspects de la performance du service.

Zhang distingue deux catégories d'indicateurs de sortie de sa simulation [67]. D'un côté, les indicateurs qui mesurent la performance du système de SAV et de l'autre, les impacts bénéfiques potentiels apportés par le système. Pour la performance du système, on retrouve le temps d'attente moyen, le retard moyen, le coût de déplacement et l'utilisation des véhicules. Les bénéfices potentiels sont calculés au niveau de la possession automobile, de la demande de stationnement urbain, des émissions de GES et des gaz polluants.

Merlin compare deux services de SAV, l'un single-rider et l'autre ride-sharing avec le service de bus d'Ann Arbor au Michigan, et classe ses indicateurs de comparaison de performances en quatre catégories [54] :

**Service** : temps d'attente, nombre de véhicules, temps de déplacement

**Coût** : coût du système/jour, coût/passager-km

**VKT** : VKT, % différence bus, % différence single-rider

**GES** (Gas à effet de serre) : émissions de carbone en kg, % différence bus

Pour cette ontologie, nous proposons différentes catégories qui peuvent se chevaucher. En effet, certains indicateurs, tels que définis, peuvent appartenir à plusieurs catégories. Les catégories proposées sont :

- Économie, finance
- Environnement
- Circulation
- Performance du service
- Utilisation du service
- Urbanisme
- Électriques
- Autre

Les notions de performance et d'utilisation sont étroitement liées. En effet, plus le service est performant, plus il va être utilisé. L'utilisation permet entre-autre de refléter la performance. Par ailleurs, la plupart de ces indicateurs mesurent la performance du phénomène qu'ils mesurent. La classe performance correspond aux indicateurs ainsi nommés dans la littérature pour ce mode de transport. Nous verrons que le niveau de performance du service en lui-même est établi à partir du temps d'attente. Cependant, pour représenter la performance globale et ses impacts, il faut aussi s'intéresser aux autres indicateurs.

L'indicateur sur le temps de déplacement, "travel time" appartient aux deux catégories. En effet, le temps de déplacement reflète la performance du système car mode plus "rapide", avec un temps de déplacement plus faible est plus attractif pour les usagers. Il est alors considéré plus performant. De plus, il inclut le temps d'attente qui cherche à être à minimiser par les services de transport à la demande. Toutefois, avec l'évolution de la valeur du temps engendrée par le confort, les déplacements peuvent devenir plus longs, le temps de déplacement peut augmenter sans que la performance ne diminue. Dans ce cas-là, il ne traduit que l'utilisation du service et aussi l'évolution du comportement des usagers. Pour cette bivalence, l'indicateur a été mis dans les deux catégories. Selon Bösch et al. le temps de déplacement représente la performance du système en donnant accès aux activités [76].

## **Circulation**

Dans cette catégorie, il s'agit d'indicateurs relatifs au trafic routier. Ces indicateurs ne sont pas au centre des intérêts de la planification de transport. Cependant, les véhicules autonomes ont des impacts à ce niveau-là qui joueront sur leur performance.

**Vitesse** La vitesse peut être calculée de façons différentes. Pour les modèles basés sur les agents, que ce soit à l'échelle d'une ville comme sur MATSim ou d'un plus petit réseau comme dans un logiciel microscopique tel que SUMO ou VISSIM, la vitesse du véhicule en temps réel peut être connue. Pour présenter en tant qu'indicateur, on calcule une moyenne. Fagnant

et al. calculent la vitesse moyenne par deux méthodes [89] :

**moyenne spatiale** la moyenne des vitesses instantanées pondérée sur la distance parcourue

**moyenne temporelle** VKT/VHT

Dans le reste de la littérature, la méthode n'est pas explicitée. Pour ces modèles, il semble plus significatif de calculer la vitesse moyenne spatiale car la performance repose plus sur le temps de déplacement et l'impact des temps d'attente ou de marche est plus important.

Kaddoura et al. utilise la vitesse à vol d'oiseau [74]. Elle est calculée en divisant la distance à vol d'oiseau entre l'origine et la destination divisée par le temps de déplacement.

**Débit, capacité et densité** Pour voir l'impact sur la capacité des véhicules autonomes par rapport aux véhicules conventionnels [80, 81], il est pertinent de tracer le diagramme fondamental (DF) qui représente le débit de véhicules en fonction de la densité. Le débit correspond au nombre de véhicules passant sur un lien par voie par unité de temps. La densité, à un instant donné, correspond au nombre de véhicules présents sur une section donnée d'une voie de circulation. La capacité correspond alors au nombre maximal moyen de véhicules ayant une chance de s'écouler sur la voie. À partir du DF, il s'agit du débit maximum moyen que l'on observe, et non pas du débit maximum observable car le débit peut être un peu supérieur à la capacité. Pour les véhicules autonomes, la capacité ainsi que l'allure du DF dépend du temps de réaction du véhicule [95]. Kim et al. utilisent la formule suivante pour déterminer la capacité en fonction de la proportion  $d$  de véhicules autonomes et les temps inter véhiculaire moyens  $h_{AV}$  pour les véhicules autonomes et  $h_{CC}$  pour les véhicules conventionnels [96] :

$$q_{max} = \frac{1}{dh_{AV} + (1-d)h_{CC}} \quad (3.1)$$

Sans véhicule autonome et avec un temps inter véhiculaire moyen de 2 secondes, on retrouve bien une capacité de 1800 veh/h.

**Congestion, retard** En améliorant la capacité, il est attendu que les véhicules autonomes réduisent la congestion. La congestion est usuellement définie à partir du retard. On compare le temps de déplacement réel face au temps de déplacement en écoulement libre. Selon la formule du Bureau des Routes Publiques (BPR) du gouvernement américain, le retard est fonction est du volume [97] :

$$t = t_0 \left( 1 + \alpha \left( \frac{q}{q_{max}} \right)^\beta \right) \quad (3.2)$$

avec  $t_0$  est le temps de déplacement en écoulement libre,  $q$  le débit et  $q_{max}$  la capacité.  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres dépendant du type de route. Cette formule n'est pas applicable pour une circulation mixte avec des voitures conventionnelles et des véhicules autonomes car le  $q_{max}$  est différent.

Maciejewski et Bischoff définissent le taux de retard comme l'évolution du temps de déplacement [27].

$$\text{delay ratio} = \frac{\text{actual travel time} - \text{free flow travel time}}{\text{free flow travel time}} \quad (3.3)$$

Sachant qu'il s'agit d'un modèle multi-agent, temps de déplacement utilisé est celui produit par la simulation entre l'origine et la destination au lieu d'utiliser la formule du BPR qui calcule le temps moyen sur une route.

Le taux de congestion peut se définir comme le ratio  $\frac{q}{q_{max}}$ . Il peut être supérieur à 1. Dans d'autres cas, on définit un cas de congestion lorsque la vitesse d'un axe devient inférieure à un certain pourcentage de la vitesse en écoulement libre (60% le Ministère des Transports du Québec (MTQ) (Canada) [98]).

## Économique

Il s'agit ici de tous les indicateurs relatifs au coût du service. Les coûts sont étudiés selon différents points de vue. Pour les usagers, on regarde le coût de déplacement. Pour l'opérateur, il s'agit des coûts opérationnels, qui se décomposent en plusieurs aspects. En regard du coût de déplacement pour l'utilisateur, on retrouve les recettes de l'opérateur. Dans certains modèles avec des politiques de taxations, il est intéressant de regarder les revenus perçus par les administrations locales qui taxent l'utilisation des modes et peuvent se servir de ce gain pour réinvestir dans d'autres mesures.

Selon Bösch, les trois dimensions pour évaluer la compétitivité entre différents services sont [62] :

- le coût de production par rapport au prix, qui compare le coût pour l'opérateur face au prix payé qui va influencer le client dans son choix modal ;
- les véhicule-kilomètres par rapport aux passager-kilomètres, informations sur l'utilisation du service comme le taux d'occupation et kilomètres à vide
- le coût total d'un déplacement par rapport au coût direct, où le coût direct est celui où le client est à bord du véhicule mais ce déplacement a pu engendrer des km à vide qui ont aussi un coût.

Le coût se décompose en coût fixe et en coût variable selon la distance parcourue. Dans le coût fixe, on retrouve les investissements, c'est-à-dire l'achat du véhicule et ses intérêts mais

aussi l'assurance, les taxes, et charges et les frais de stationnement. Au niveau des coûts variables, on retrouve la dépréciation du véhicule et les frais de maintenance, le nettoyage, les pneus et le carburant. Pour les véhicules électriques, il faut ajouter le coût des batteries et leur dépréciation.

Le coût opérationnel correspond au coût de production pour l'opérateur du service.

Le coût kilométrique est calculé à partir des coûts définis précédemment et de la flotte de véhicule, de l'utilisation attendue et du modèle opérationnel (ride-sharing par exemple).

Le coût moyen journalier  $C_{vd}$  par véhicule se calcule selon la formule suivante :

$$C_{vd} = \text{coûts fixes}_{vd} + \text{coût variable}_{vkm} \cdot vkm \quad (3.4)$$

Les  $vkm$  correspondent aux kilomètres parcourus par jour par un véhicule en service et à vide. Dans les cas d'un mode de transport avec chauffeur, il faut ajouter le coût horaire du chauffeur multiplié par le nombre d'heures de service par jour.

Pour obtenir le coût moyen en passagers-kilomètres, on divise le coût moyen par véhicule par jour par le nombre de passagers-kilomètres par véhicule par jour. De-même, pour avoir le coût par véhicule-kilomètre, on divise par la distance moyenne d'un véhicule en une journée.

Le prix lui est ce qui est payé par le client et prend donc en charge ces coûts opérationnels majorés d'une marge de profit et des taxes de l'État et des frais de paiement. Le prix par passager-kilomètre est défini par :

$$P_{pkm} = \frac{C_{pkm}}{(1-r)(1-p)} \cdot (1+t) \quad (3.5)$$

Où  $C_{pkm}$  est le coût par passager-kilomètre ;

$r$  la marge de profit ;

$p$  les frais de transaction du paiement ;

$t$  les taxes gouvernementales appliquées.

De la même manière que vue précédemment, Burns calcule le coût en dissociant le coût de possession qui contient l'achat du véhicule et l'assurance et les coûts d'opération comme le carburant et la maintenance [53]. Le coût est évalué par jour puis par véhicule-kilomètre.

Litman établit aussi une liste des coûts liés à la possession d'une flotte de SAV et ceux liés à l'utilisation [25].

Zhang modélise la tarification selon le temps passé en véhicule pour la ville d'Atlanta [99]. Le taux horaire est de 0,5 US\$/min pour un déplacement en SAV classique et 0,3 US\$/min

lorsqu’il s’agit de ride-sharing.

Fagnant et Kockleman modélisent des tarifs kilométriques. Ils calculent alors les recettes réalisées avec les kilomètres parcourus avec les clients à bord et comparent au coût opérationnel pour regarder le profit par déplacement moyen [65].

Kaddoura s’intéresse plus au “bien-être” du système qu’au profit de l’opérateur [74]. En effet, il faut trouver un juste milieu parce que seulement maximiser le profit peut engendrer un tarif trop élevé, ce qui rend le mode moins accessible financièrement et utilisé par un nombre de personnes plus restreint. Le bien-être du système est un équilibre calculé à partir des revenus de l’opérateur, des bénéfices du client (l’utilité de son activité, le coût de son déplacement) et des taxes récoltées par l’État.

## Électrique

Dans cette catégorie sont classés les indicateurs uniquement utilisés pour les véhicules électriques qui nécessitent d’être chargés. En effet, pour maximiser l’utilisation des véhicules, les stratégies de recharge sont un enjeu, car la recharge implique une certaine période où le véhicule est à l’arrêt.

**Temps de charge** Dans la partie scénario, il a été vu que des modèles simulent différents niveaux d’autonomie pour les véhicules électriques [72], mais aussi différents types de batteries [73] et bornes de recharge [71]. L’avantage recherché par les différents types de batteries ou de stations “supercharger” (pour les véhicules du fabricant Tesla) est de minimiser le temps de charge, afin de limiter le temps à l’arrêt du véhicule. Il faut toutefois choisir le compromis juste entre le coût de ces batteries et stations et le temps gagné.

Le temps de charge correspond à un état du véhicule. C’est la durée entre le moment où le véhicule commence et finit sa charge. Des stratégies sont mises en place pour éviter que le temps de charge soit pendant la demande en déplacement la plus haute, comme pendant les heures de pointe, pour qu’un maximum de véhicules soit disponible quand les utilisateurs en ont le plus besoin. Zhang et al. différencient dans leurs résultats le temps de charge de jour et de nuit [67].

**Nombre d’arrêt pour charge** La charge des véhicules ne se fait pas forcément de façon complète. Le véhicule peut profiter du temps qu’il dispose entre deux requêtes pour se recharger quelques minutes. On peut calculer alors le nombre de fois que le véhicule se rend dans une borne de recharge. C’est un indicateur qui permet de comparer les différentes stratégies.

**Distance pour aller recharger** Un autre indicateur qui intervient dans les stratégies de recharges est la distance parcourue pour se rendre à une station de recharge. Il faut chercher à minimiser cette distance car elle fait perdre de l'autonomie au véhicule et une distance plus importante engendre un temps de déplacement plus important qui fait baisser la disponibilité de la flotte et engendre des coûts supplémentaires.

Cette distance peut être calculée en VKT pour représenter les kilomètres totaux réalisés à vide pour se rendre aux bornes de recharge, en pourcentage par rapport aux VKT totaux, mais aussi la distance moyenne des déplacements pour recharger ou la distance moyenne réalisée pour un véhicule. Pour diminuer cette distance, les solutions peuvent être d'avoir un nombre important de bornes, de sorte que la probabilité de trouver une borne proche est plus grande, mais ceci présente un important coût d'investissement. Une solution alternative est de faire des micros-arrêts de recharge lorsque le véhicule se trouve proche d'une borne.

## **Environnemental**

Les transports sont responsables de 33% de la consommation énergétique et de 39% des émissions de gaz à effet de serre en France [100]. Un des enjeux majeurs de planification de transport est donc de diminuer la consommation énergétique et la pollution. L'environnement est un des volets du développement durable, des indicateurs sont nécessaires pour mesurer la durabilité environnementale des services de mobilité. Dans plusieurs modèles, en plus des véhicules en eux-mêmes, les infrastructures sont aussi prises en compte dans les indicateurs environnementaux.

**Consommation énergétique** La consommation des véhicules est déterminée à travers un proxy. La simulation produit les VKT, c'est-à-dire la distance totale parcourue par l'ensemble des véhicules, et c'est à partir de ce résultat que l'on calcule la consommation énergétique. Il suffit de multiplier les VKT par la consommation moyenne au kilomètre. Il faut alors connaître la consommation kilométrique moyenne pour chaque type de véhicule.

Sachant que l'on connaît l'état du véhicule, comme la vitesse, tout au long de la simulation avec des modèles multi-agents, des modèles plus raffinés peuvent être développés où la consommation dépend de la vitesse du véhicule et des autres conditions extérieures qui influent sur la consommation. Des essais sont réalisés pour connaître la consommation des véhicules en fonctions des conditions de la route [101].

Un des avantages des véhicules autonomes est qu'ils peuvent rouler très proches les uns des autres, y compris en pelotons s'ils sont connectés. Ceci présente des avantages au niveau de la consommation puisque la résistance aérodynamique est réduite pour les véhicules suiveurs

[31]. La diminution de cette force entraîne une diminution de la consommation énergétique. De manière générale, grâce à une conduite automatisée, plus fluide, avec moins d'accélération, il est attendu que la consommation des véhicules autonomes soit améliorée. Pour autant, si la demande et donc les VKT augmentent beaucoup, la consommation totale pourrait augmenter.

**Pollution dans l'air** Les émissions atmosphériques sont calculées à plusieurs échelles dans les articles scientifiques. Certains mesurent les tonnes de GESémis. D'autres ne regardent que le tonnage de CO<sub>2</sub>. Et enfin, certains présentent les résultats pour chaque gaz polluant (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, VOC et les particules fines PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>).

Tout comme la consommation, cet indicateur est calculé à partir d'autres variables. Il peut s'agir des VKT, si l'on multiplie par les émissions moyennes au kilomètre du véhicule, mais aussi à partir de la consommation, en multipliant par les émissions moyennes au litre, connues avec la réaction chimique. Comme pour la consommation, un modèle peut être intégré dans la simulation.

Zhang et al. utilisent le nombre de démarrages et de démarrages à froid pour compléter le calcul des émissions [67]. Pour la ville de Munich, une simulation a été réalisée où les émissions sont calculées en temps réel pour tous les véhicules en fonction des caractéristiques du véhicule (moteur, âge) et des conditions du réseau (vitesse, stop and go) [102].

Kaddoura mesure les émissions de NO<sub>x</sub> en tenant compte des caractéristiques du véhicule (le type, l'âge, la cylindrée, le carburant) et des paramètres du déplacement (distance, vitesse, état du trafic, durée de stationnement) ainsi que le type de route en se rapportant au Manuel des facteurs d'émission pour le transport routier (HBEFA) [74].

## Performance

Pour les SAV, comme pour tous les services de transport, la performance du service proposé au client est évaluée avec le temps de déplacement et en particulier le temps d'attente client pour les transport à la demande ainsi que d'autres indicateurs qui découlent du temps d'attente.

**Temps d'attente client** Le temps d'attente client correspond à la durée entre l'instant de la requête d'un véhicule et l'instant où le véhicule prend en charge le client et débute le déplacement avec le passager à bord. Pour être le plus performant, il faut que le temps d'attente soit le plus faible possible. Pour être attractif, certains considèrent que ce temps doit être inférieur au temps nécessaire pour se garer et récupérer son véhicule s'il avait pris

une voiture conventionnelle [103]. Ce résultat est sensible au nombre de véhicules dans la flotte.

Le temps d'attente est généralement moyenné sur tous les usagers. Sachant que la demande est accrue dans les périodes de pointe, il est intéressant de considérer le temps d'attente moyen sur cette période-là, et même son évolution au cours de la journée. Le maximum ou 95<sup>ème</sup> centile peuvent être utilisés pour comparer les situations critiques. Au niveau des stratégies d'implantation, des cartes d'intensités selon le temps d'attente moyen de la zone sont présentées. Elles permettent d'identifier rapidement les zones avec le meilleur service [103].

**Niveau de service** Cet indicateur est calculé à partir du temps d'attente [89]. Il correspond au pourcentage des déplacements dont le temps d'attente client a été inférieur à un certain délai. Au-delà de ce délai, la requête est considérée en retard [59]. Dans la littérature scientifique, le délai seuil est souvent choisi à 5 minutes. Cet indicateur peut aussi être représenté graphiquement avec le nombre de déplacements dit “à l'heure”, c'est-à-dire avec un temps d'attente inférieur à 5 minutes, le nombre de déplacements en retard, et le nombre de déplacements non-réalisés car l'attente était trop longue.

**Taux de rejet** Pour Liu et al., le temps d'attente maximal admissible est de 10 minutes. Au-delà, les requêtes ne sont pas réalisées. On décompte alors le nombre ou pourcentage de requêtes non-servies. Le pourcentage est le taux de rejet [66]. Plus le taux de rejet est important, moins le service est performant. Dans certains modèles, il n'y a pas de valeur seuil au-delà de laquelle la requête est annulée [88]. Le seuil de temps d'attente maximal est différent selon les auteurs. Cela dépend du niveau de service recherché. Merlin utilise le temps d'attente maximal équivalent à celui des services de bus de la ville [54].

**Taille de la flotte requise** Cet indicateur ne révèle pas la performance du service mais il est déterminé pour viser un certain niveau de service. Il existe différents moyens de déterminer le nombre de véhicules requis.

Des auteurs simulent une flotte très importante et regardent le nombre maximal de véhicules utilisés en même temps [60, 104]. C'est notamment ce que font Brownell et Kornhauser [105]. Ils regardent sur une période de 30 minutes le nombre maximal de véhicules “en route”. Cette méthode est appliquée pour deux cas : l'un où l'on suppose la relocalisation du véhicule instantanée et l'autre où le véhicule ne peut être réutilisé qu'une heure après sa dernière course. La taille de la flotte réelle requise est alors comprise entre ces deux cas. Hörl fait

plusieurs simulations avec des nombres de véhicules différents et étudie le temps d'attente moyen en fonction du nombre de véhicules : il choisit ensuite la taille de la flotte correspondant au niveau de service recherché, ici 5 min [55]. Zhang et al. déterminent le nombre de véhicules comme optimal lorsque l'ajout de 50 véhicules supplémentaires n'a plus d'impacts sur le temps d'attente [106].

**Temps de détour** Le temps de détour n'est considéré que dans les scénarios avec un modèle dynamique des déplacements partagés, c'est-à-dire que le véhicule peut répondre à de nouvelles requêtes en temps réel même s'il réalise déjà une course [65, 67, 107]. Il correspond au temps perdu du point de vue du client A en allant chercher le client B par rapport à l'itinéraire direct qu'il aurait suivi s'il n'y avait qu'un déplacement direct. On peut aussi calculer la distance de détour.

**Temps de recherche de stationnement** Ce temps est considéré seulement dans les modèles simulant la recherche d'un stationnement. Il correspond à la durée où le véhicule recherche un emplacement libre pour s'y arrêter. Les stratégies sont les plus performantes lorsque ce temps est le plus faible. On peut aussi mesurer la distance.

## Urbanisme

Il s'agit ici d'indicateurs uniquement calculés dans les modèles qui simulent les impacts sur l'aménagement urbain. Il s'agit d'indicateurs à long terme car ils découlent de l'évolution des comportements de mobilité comme le choix de résidence.

Comme variable d'utilisation des sols, on retrouve la densité, le nombre d'habitants et le nombre d'emplois par zone. Les résultats sont présentés sur des cartes de chaleur montrant les densités selon les zones. Plus les zones sont petites, plus la valeur moyenne de la densité calculée pour la zone sera sensible aux variations. Zhang et Guhathakurta calculent aussi la distribution des distances entre lieux de domicile et centre-ville pour mesurer l'étalement urbain [78].

**Stationnement** Dans des articles consacrés, des auteurs recherchent les impacts sur la demande en place de stationnement. En effet, l'introduction d'une flotte de SAV fait diminuer l'utilisation de la voiture particulière et donc le besoin des conducteurs de garer leurs véhicules. Par ailleurs, les véhicules étant autonomes, ils peuvent se conduire dans des zones où les stationnements sont moins chers que dans le centre où la demande diminuerait donc. Zhang et al. regardent l'impact sur la demande de stationnement selon de nombreux paramètres :

taille de la flotte, stratégie de relocalisation, la volonté de partager un déplacement [106]. Les résultats sur la distribution spatiale de la demande de stationnement sont aussi présentés sur une carte de chaleur selon le découpage de la ville artificielle simulée.

Dans le modèle de Zhang et Guhathakurta, lorsqu'un véhicule vient de déposer ses clients et qu'il n'a pas besoin de se relocaliser dans une zone où la demande et le nombre de véhicules sont déséquilibrés, il recherche une place de stationnement [99]. Ils calculent alors combien de fois un véhicule se gare et le nombre d'emplacements requis pour satisfaire cette demande. Le nombre d'emplacements par zone est calculé comme le nombre maximal de véhicules garés à un instant de la journée par zone.

**Accessibilité** L'accessibilité se définit comme le "potentiel d'interaction entre les aménagements d'un territoire et les individus" [108]. Elle mesure la capacité, ou facilité d'atteindre des lieux d'activités. Dans le type d'étude qui nous concerne, l'accessibilité gravitaire est intéressante. Depuis une zone spécifique, elle va calculer les coûts de déplacements vers les autres activités accessibles depuis cette zone. L'indicateur est calculé avec la formule suivante :

$$A_i = \sum_j O_j F(c_{ij}) \quad (3.6)$$

Où  $A_i$  est l'accessibilité de la zone  $i$  ;

$O_j$  est le volume d'activités présentes dans la zone  $j$  ;  $c_{ij}$  est le coût de déplacement pour se rendre à la zone  $j$  depuis la zone  $i$ .  $d_{ij}$  peut s'exprimer en distance, temps ou coût généralisé. La fonction  $F$  va dépendre du mode de transport. Meyer et al. utilisent une forme Logit pour la fonction de résistance [97] :

$$F(c_{ij}) = e^{-\alpha t_{ij}} \quad (3.7)$$

Où  $t_{ij}$  correspond au temps de déplacement et  $\alpha$  est un paramètre qui dépend du mode de transport. Meyer et al. choisissent le même  $\alpha$  pour les véhicules autonomes que pour les véhicules conventionnels ( $\alpha = 0.2613$ ). Toutefois, le temps de déplacement pouvant être amélioré grâce à la réduction de congestion, l'accessibilité s'améliore.

L'indicateur calculé tel quel à partir de la formule n'a pas de réelles significations physiques. C'est un indicateur qu'il faut interpréter selon son évolution lorsque l'on modifie un scénario.

## Utilisation

Les indicateurs d'utilisation traduisent comment les véhicules du service sont utilisés. Il y a des indicateurs qui caractérisent les déplacements et d'autres qui décomposent l'utilisation

du véhicule selon ses états.

**État des véhicules** Grâce aux modèles multi-agents, l'état du véhicule est connu tout au long de la simulation. On peut donc calculer des indicateurs pour savoir comment il est utilisé. Semblables aux taxis, les SAV, comme d'autres véhicules utilisés pour le transport à la demande, ont différents états :

**client à bord** : le véhicule réalise le déplacement avec son client à bord

**prise en charge** : le véhicule se déplace à vide pour aller récupérer son client

**relocalisation** : le véhicule se déplace à vide après avoir déposé son client pour se rendre dans une zone où la demande est plus importante

**à l'arrêt** : le véhicule est à l'arrêt dans l'attente de recevoir une requête

Selon les scénarios, on peut trouver les états de recherche de stationnement [68] ou en charge [73].

Pour le ride-sharing, on considère aussi l'état partagé qui correspond à la distance où le véhicule est partagé entre des passagers de différentes requêtes [65]. Le service est facturé au client pour l'état client à bord. C'est donc à l'opérateur d'optimiser ses stratégies pour minimiser les distances à vide afin de diminuer son coût opérationnel.

Afin d'augmenter la performance pour minimiser le temps d'attente, il faut que le temps de prise en charge soit faible. C'est pour cela que les opérateurs mettent en place des positions de relocalisation. Ainsi, dans l'attente d'une nouvelle requête, ils se rapprochent des zones à forte demande pour que dès qu'une requête apparaît, ils soient plus proches et donc que le temps d'attente soit réduit.

Pour caractériser les différents états, le calcul peut se faire en pourcentage de la durée sur les 24 h de la simulation, en kilomètre ou en pourcentage de la distance de chaque état sur les VKT totaux, avec le nombre de véhicules dans cet état présenté sur une frise au cours de la journée. Certains articles ne présentent que deux états : occupé et à vide. L'état à vide inclut alors la prise en charge et la relocalisation. Dans ce cas-là, les résultats sont calculés selon la distance.

**Caractéristiques des déplacements** Il s'agit ici d'indicateurs qui donnent des informations sur les déplacements réalisés par le service. Ils permettent notamment de voir l'impact sur les comportements des usagers du service.

Comme caractéristique de déplacement, on retrouve la distance parcourue, le temps, et l'occupation dans le véhicule. Grâce aux modèles multi-agents, la distance parcourue par chaque

individu dans un véhicule ou la distance de chaque véhicule est connue. Comme expliqué précédemment, pour ce type de mesure, on calcule plusieurs indicateurs avec des échelles différentes (moyenne par déplacement, moyenne sur un véhicule pendant une journée et total sur la simulation).

Le temps de déplacement est aussi calculé. Appelé “travel-time”, il correspond à la durée entre l’instant de la requête d’un déplacement et l’arrivée à la destination. Pour les véhicules avec service porte à porte, il se compose du temps d’attente plus le temps passé en véhicule. Pour les services avec arrêt défini, il faut compter le temps d’accès depuis l’origine à la zone de prise en charge et de la zone de dépôt à la destination. Généralement, pour les différents scénarios, on compare les temps d’attente entre eux et les temps de déplacements ou les temps en véhicule.

En calculant le temps de déplacement pour un véhicule, on détermine le taux d’utilisation ou d’opération qui correspond à la période où le véhicule est actif pendant la simulation [61], ou au contraire de non-utilisation [109]. C’est généralement à partir du temps de déplacement que va se baser le coût de déplacement dans le modèle pour faire le choix modal. Pour des valeurs du temps équivalentes, le mode avec le temps de déplacement le plus faible a plus de chance d’être choisi. Cependant, le temps de déplacement est plus délicat à interpréter que la distance parcourue pour caractériser l’évolution des comportements. En effet, le temps de déplacement peut diminuer même si les déplacements sont plus nombreux et plus longs en distance si le nouveau mode permet de se déplacer beaucoup plus rapidement. À contrario, au niveau de la performance, le mode peut être beaucoup plus rapide et donc plus attrayant mais l’amélioration du confort peut aussi augmenter le nombre de déplacements et leur longueur et ainsi augmenter les VHT.

Un autre indicateur qui caractérise les déplacements est le taux d’occupation. Il correspond au nombre de passagers présents dans le véhicule. Il se calcule en divisant le nombre de passagers-kilomètres par les véhicules-kilomètres. Dans tous les articles, le taux d’occupation n’est regardé que lorsque le véhicule est occupé, on exclut donc les VKT à vide.

Un autre moyen de s’intéresser à l’occupation des véhicules est de suivre l’état des véhicules au cours de la journée. On trace en fonction de l’heure, le nombre de véhicules non utilisés, le nombre de véhicules avec 1 passager, 2 passagers, 3 passagers ... [56].

En plus des informations sur les déplacements, il est important d’avoir des informations sur le service en termes de déplacement comme le nombre de déplacements réalisés dans ce mode ou le nombre de requêtes réalisées par un véhicule. Pour les services avec déplacement partagé, on parle en nombre de personnes-déplacements (“person-trip”) et pas simplement en nombre de déplacements car le déplacement d’un véhicule peut répondre à plusieurs requêtes.

Pour comparer l'utilisation entre les modes, on regarde la part modale. Pour chacun des modes, il s'agit de la proportion de déplacements réalisés dans ce mode par rapport à tous les déplacements effectués. Communément, la part modale est calculée en nombre de déplacements.

Lors de l'introduction d'un nouveau mode de transport, il est pertinent de savoir les modifications engendrées par ce mode sur les autres. On calcule alors le transfert modal. Il s'agit de la proportion de déplacements d'un mode qui ont basculé pour le nouveau.

Le VKT est un indicateur très important dans les simulations, car ils permettent ensuite de calculer de multiples variables à partir de taux au kilomètre connus comme par exemple le coût relatif à l'essence, les accidents, les émissions ou le bruit [76].

### Autres indicateurs

D'autres indicateurs mesurent des impacts à prévoir sur les infrastructures des villes ou les habitudes des individus.

**Nombre de véhicules économisés** Des auteurs recherchent les impacts des SAV sur la possession automobile des individus. En effet, qui dit système partagé implique un nombre de véhicules requis inférieur puisque chaque individu n'a pas besoin de sa voiture particulière mais peut profiter du service partagé en utilisant un véhicule qui sera aussi utilisé par d'autres personnes.

Fagnant et al. déterminent le futur taux de motorisation avec le nombre de déplacements réalisés par un SAV par jour, 28,5 person-trip/SAV [65,89]. Ils prennent comme hypothèse que chaque individu motorisé réalise 3,02 déplacements par jour. Sachant qu'il y a 0,99 personne pour une voiture. Ils en déduisent qu'une SAV économise 9,34 véhicules conventionnels. Ce calcul est fait en prenant l'hypothèse que la demande ne change pas. Plus explicitement, le calcul suivant est réalisé :

$$\frac{\text{person-trip par SAV}}{\text{taux de déplacement par personne}} \cdot \frac{\text{nb personne pouvant conduire/foyer}}{\text{nb de véhicule/foyer}} \quad (3.8)$$

Il s'agit d'un indicateur de prévision optimiste. Il est probable qu'il ne reflète pas le comportement des individus. En effet, ce n'est pas parce que les individus vont utiliser les services de véhicules partagés autonomes qu'ils vont se séparer de leur véhicule personnel. Des sondages comme ceux réalisés pour l'autopartage permettent plus d'avoir une idée sur le taux de motorisation futur.

**Bruit** Kaddoura mesure les impacts des véhicules autonomes sur le bruit en utilisant l'indicateur  $L_{den}$  basé sur l'approche allemande RLS-90 qui tient compte du débit du trafic, de la vitesse et des types des véhicules [74]. Pour les véhicules électriques, l'auteur considère qu'au-dessus de 30 km/h le bruit engendré est le même qu'un véhicule thermique. L'index  $L_{den}$  mesure le bruit pour la journée, la soirée et la nuit [110]. Le bruit fait partie des phénomènes dont des impacts sont attendus mais qu'il est difficile à évaluer et à modéliser. Pour calculer cet indicateur, il faut intégrer un modèle spécifique dans la simulation. De nombreux auteurs parlent de ces impacts-là en introduction des véhicules autonomes mais ne proposent aucun résultat à ce propos.

**Accidents** Encore plus que le bruit, la réduction du nombre d'accidents fait partie des impacts anticipés pour les véhicules autonomes. Des études qualitatives prévoient la diminution du nombre d'accidents. Aucune simulation multi-agent qui calculait le nombre d'accidents n'a été trouvée. À partir d'un modèle multi-agent, il doit être possible de calculer ce nombre en fonction des VKT, des conditions routières et d'autres facteurs. Cependant, les informations qui permettraient de calibrer cette évaluation du nombre d'accidents ne sont pas mesurables pour les véhicules autonomes comme pour les autres modes de transport où elles sont mesurées statistiquement avec le nombre d'accidents sachant que les véhicules sont en circulation.

Des hypothèses permettent de prédire la réduction d'accidents. Sachant qu'environ 80 à 90% des accidents sont dus à une erreur humaine [111], en supposant que les véhicules autonomes supprimeraient tous les accidents de ce type, le nombre d'accident devrait chuter d'au moins 80%. Cette hypothèse est seulement applicable dans les situations où 100% des véhicules sont autonomes.

Le coût des accidents peut être utilisé pour mesurer leur impact. Il y a les coûts associés directement aux accidents, en termes de dommages matériels et médicaux mais aussi les coûts qui en découlent comme le temps perdu dans la congestion due à un accident et le prix des assurances : ces coûts pourraient chuter entre 60 et 80% [31]. Kim et al. estiment les économies réalisées au niveau des coûts engendrés par les accidents [96]. Les coûts totaux sont calculés à partir des VKT annuels par type de route multipliés par le nombre d'accidents prévus selon leur gravité, les types de route et le coût d'un accident selon sa gravité.

## CHAPITRE 4 CONSTRUCTION DE L'ONTOLOGIE

### 4.1 Introduction

Comme vu dans la revue de littérature, l'ontologie est un moyen de représentation utilisé dans le web sémantique pour faciliter la compréhension de tous les éléments qui composent un domaine et les liens qui les unissent. L'ontologie est à voir comme une base de connaissances. L'université de Stanford a développé un logiciel pour construire des ontologies : Protégé<sup>1</sup>. Ce logiciel permet de générer un fichier Extensible Markup Language (XML) qui contient l'ontologie en langage Ontology Web Language (OWL). C'est ce logiciel qui sera utilisé pour construire l'ontologie de KPI sur les mobilités innovantes.

L'objectif ici est d'adapter les informations et connaissances récoltées précédemment dans les chapitres précédents au formalisme et la structure de l'une ontologie et du langage OWL, ce qui est facilité par l'emploi de Protégé.

Dans un premier temps, ce chapitre présente une approche théorique de la construction d'une ontologie par la définition des objets structurels ainsi que la méthodologie à suivre. Les sections suivantes abordent les éléments qui composent l'ontologie ici-crée ainsi que les relations existantes entre ces éléments. Ceci sera illustré avec des aperçus de l'ontologie faite sur le logiciel Protégé avec l'utilisation du plug-in de visualisation OntoGraph ou OWLViz.

### 4.2 Structure d'une ontologie

L'ontologie permet de structurer et de représenter des connaissances dans une base. Ces éléments de connaissance sont formalisés dans des composants spécifiques qui ont chacun leur rôle et leurs caractéristiques.

#### 4.2.1 Composants élémentaires

Une ontologie possède trois types de composants qui vont permettre d'ajouter toutes les informations : les classes, les instances et les propriétés. Les éléments qui la constituent sont définis en tant qu'instance appartenant à des classes d'objets. Une classe peut elle aussi contenir plusieurs sous-classes. Les instances et classes sont alors reliées par des propriétés [112].

---

1. <https://protege.stanford.edu>

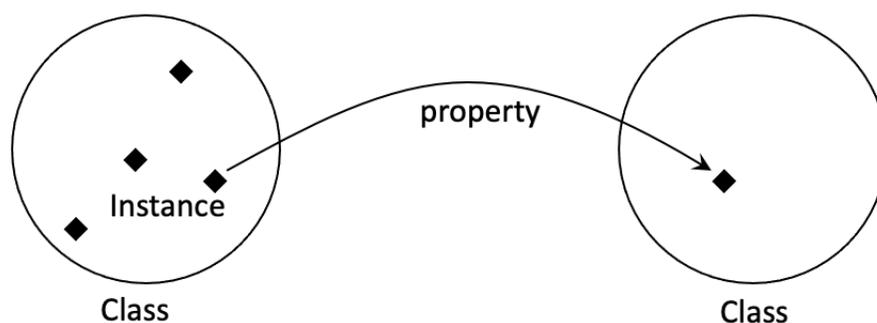


Figure 4.1 Schéma des composants d'une ontologie

Les classes sont des groupes qui contiennent des instances avec des points communs. On peut construire des classes qui définissent le type d'objet, ou bien d'autres caractéristiques communes. Les propriétés sont des fonctions définies, relations binaires qui permettent relier des éléments de l'ontologie tels que des classes ou des instances entre elles. Les instances sont les objets définis dans l'ontologie. On leur apporte de l'information en les définissant comme appartenant à une ou plusieurs classes et en les reliant à d'autres instances via des propriétés contenant de l'information. Dans la suite du rapport, les instances reliées apportant de l'information avec la propriété (celles à destination de la flèche) seront appelées attributs.

Tout au long de cette partie, nous illustrerons les définitions et concepts d'une ontologie à travers un exemple simple. Prenons les membres d'une famille. Chaque membre de la famille (Pierre, Marie, Simon, etc ?) est une instance de la classe Personne. Les relations entre les membres de la famille, comme "est le parent de" sont des propriétés. Pour l'axiome Pierre est le fils de Marie, Marie est l'attribut de la propriété "est le fils de".

Les classes sont organisées hiérarchiquement ce qui permet de créer des sous-classes (enfant), des super-classes (parents) ou des classes sœurs, c'est-à-dire avec le même parent. Une sous-classe hérite des caractéristiques de sa classe parent. De même, les propriétés peuvent être définies en arborescence pour hériter des caractéristiques communes. Pour éviter les redondances, il faut ajouter les caractéristiques sur la classe la plus haute de la hiérarchie.

#### 4.2.2 Caractéristiques sur les propriétés

Il est possible d'ajouter des informations sur les propriétés afin qu'elles soient mieux décrites et aussi pour faciliter la construction de l'ontologie puisqu'en fonction des caractéristiques de ces propriétés, le logiciel Protégé ajoutera automatiquement des informations aux éléments

concernés.

### Inverse d'une propriété

Soient  $P$  et  $Q$  deux propriétés inverses, soient  $x$  et  $y$  deux instances,

$$P(x, y) \iff Q(x, y) \quad (4.1)$$

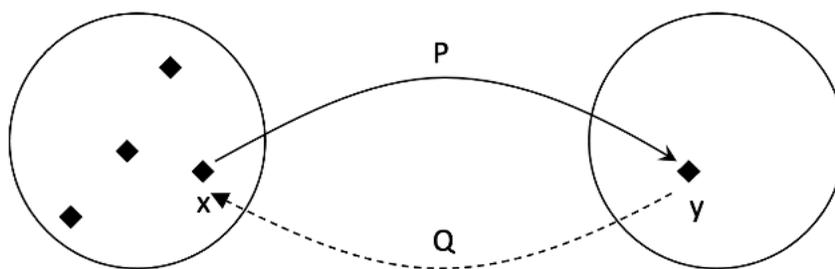


Figure 4.2 Schéma de deux propriétés inverses

Pour illustrer ceci, prenons l'exemple avec les membres d'une famille (dans ce cas, les instances sont de la même classe *Personne*). Soient Marie et Pierre, Marie est un parent de Pierre et Pierre est un fils de Marie. Les relations "est un parent de" et "est un fils de" sont inverses.

### Caractéristiques d'une propriété

Tout comme l'on peut ajouter des informations caractéristiques aux classes, les propriétés possèdent elles aussi des caractéristiques.

**Fonctionnelle** Soient  $P$  une propriété fonctionnelle et  $x, y, z$  trois instances,

$$P(x, y) \text{ et } P(x, z) \Rightarrow y = z \quad (4.2)$$

Ce type de propriété ne permet qu'une seule valeur reliée à instance. Le logiciel Protégé considère alors que les deux instances en attributs sont égales ou signale un message d'erreur si ceci est contradictoire.

Soient Marie la mère biologique de Pierre et Jeanne la mère biologique de Pierre, sachant que Pierre ne peut avoir qu'une seule mère biologique, Marie et Jeanne sont la même personne. La relation "est la mère biologique de" est une relation fonctionnelle.

**Inversement fonctionnelle** Soient  $P$  une propriété inversement fonctionnelle et  $x, y, z$  trois instances,

$$P(x, y) \text{ et } P(z, y) \Rightarrow x = z \quad (4.3)$$

Ce type de propriété permet de relier un attribut à une seule instance via cette propriété. Le logiciel Protégé considère alors que les deux instances d'origine sont égales ou signale un message d'erreur si ceci est contradictoire. Si une propriété est fonctionnelle alors son inverse est inversement fonctionnel et réciproquement.

Reprenons notre exemple, la relation inverse de "est la mère biologique de" est "a pour mère biologique". Les axiomes "Pierre a pour mère biologique Marie" et "Pierre a pour mère biologique Jeanne" impliquent que Marie et Jeanne sont la même personne.

**Transitive** Soient  $P$  une propriété transitive et  $x, y, z$  trois instances,

$$P(x, y) \text{ et } P(y, z) \Rightarrow P(x, z) \quad (4.4)$$

Ce type de propriété permet de relier entre eux toutes les instances d'une propriété en chaîne.

Soient Bernard, Pierre et Simon, et les axiomes "Bernard est le frère de Pierre" et "Pierre est le frère de Simon". Ceci implique que Bernard est aussi le frère de Simon.

**Symétrique** Soient  $P$  une propriété symétrique et  $x, y$  deux instances,

$$P(x, y) \iff P(y, x) \quad (4.5)$$

Ce type de propriété signifie qu'elle n'a pas de sens de lecture car la propriété est égale à son inverse. Au contraire, lorsqu'une propriété ne peut jamais relier deux instances dans des sens opposés, on dit qu'elle est antisymétrique.

Si Julie est le frère ou la sœur de Simon, Simon est le frère ou la sœur de Julie et réciproquement.

**Réflexive** Soient  $P$  une propriété réflexive et  $x$  une instance,

$$P(x, x) \quad (4.6)$$

Ce type de propriété relie une instance à elle-même.

Au contraire, lorsque que ceci n'est jamais possible, on dit que cette propriété est anti-réflexive.

La relation d'égalité en mathématiques est réflexive puisque tout nombre est égal à lui-même. La relation "est enfant de" est anti-réflexive car on ne peut pas être son propre enfant.

D'après ces définitions, certaines des caractéristiques de ces propriétés sont incompatibles. Une propriété transitive ne peut pas être fonctionnelle et réciproquement.

### Domain et Range d'une propriété

En dehors du cas particulier des propriétés symétriques, les propriétés sont des relations binaires "qui possèdent un sens", représentées par une flèche sur les schémas. La classe de l'instance d'origine se nomme *Domain*. La classe de l'instance correspondant à l'attribut se nomme *Range*. Lorsque que ce que l'on renseigne définit plusieurs classes en tant que *Domain* ou *Range*, il faut noter que l'on ne retient que l'intersection de ces classes et non leur union.

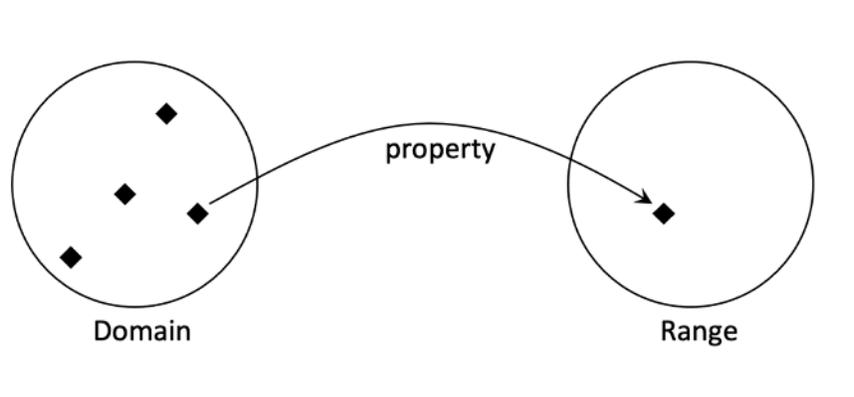


Figure 4.3 Schéma Domain/Range d'une propriété

Pour une propriété inverse, le *Domain* est alors le *Range* de son inverse et vice-versa.

### Les propriétés DataType

Les propriétés qui relient deux instances sont nommées des *ObjectProperties*. Il existe un autre type de propriétés avec des attributs qui ne sont pas définis en tant qu'instance d'une classe

dans l'ontologie. Il s'agit des *DataTypeProperties*. Elles relient une instance à une valeur qui peut être une chaîne de caractères, un booléen ou une valeur numérique.

Les caractéristiques définies précédemment existent également pour les propriétés de type *DataType*, à l'exception de propriétés ayant un inverse car l'attribut n'est pas défini.

Par exemple, dans une ontologie présentant les plats disponibles à la carte d'un restaurant, pour relier un plat à ses ingrédients, on utilise une propriété de type objet puisque les ingrédients sont déjà définis. En revanche, si l'on veut renseigner le prix de chaque plat, on va utiliser une propriété de type donnée en spécifiant à chaque fois le prix en valeur numérique sans en sélectionner un déjà existant.

### 4.2.3 Caractéristiques sur les classes

Les classes peuvent aussi être caractérisées. Ceci se fait déjà lorsque d'une classe est une sous-classe d'une autre. De plus, des axiomes peuvent être définis à partir des propriétés. Ceci implique alors que toutes les instances de cette classe possèdent les caractéristiques précisées avec cette propriété. Il s'agit d'une restriction. Une propriété peut être utilisée pour relier une classe à une instance mais aussi à une autre classe.

La restriction peut être de deux types : existentielle ou universelle. Une restriction existentielle signifie qu'au moins un des attributs reliés par cette propriété doit appartenir à l'ensemble des instances mentionné. En langage OWL, ceci est traduit par l'ajout du terme *some* entre le nom de la propriété et l'attribut (ou classe).

Une restriction existentielle signifie que les seuls attributs qui peuvent être reliés par cette propriété sont ceux mentionnés. En langage OWL, ceci est traduit par l'ajout du terme *only* entre le nom de la propriété et l'attribut (ou classe).

Ces caractéristiques peuvent être ajoutées de deux façons. Si la restriction est nécessaire, on parle de classe primitive. Sur Protégé, les informations sont entrées dans le champ *SuperClass*. Si la restriction est nécessaire et suffisante, on parle de classe définie. Ce sont des classes qui se complètent automatiquement. Dès qu'une instance ou classe possède tel attribut via telle propriété, elle est ajoutée dans la classe. Sur Protégé, les informations sont entrées dans le champ *Equivalent To*.

#### 4.2.4 Méthodologie de construction

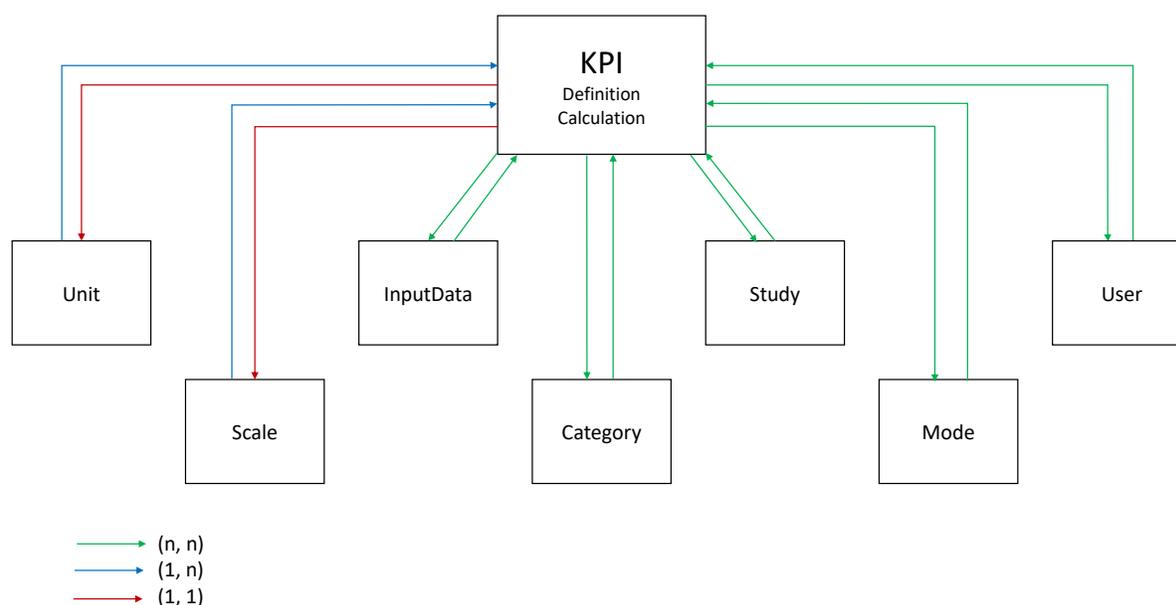
La méthodologie suivie va être celle expliquée par le Guide Ontology Development 101 faite pour Protégé-2000 [113]. Dans un premier temps, il faut définir les classes qui composent l'ontologie et les organiser hiérarchiquement. On ajoute ensuite les instances dans les classes auxquelles elles appartiennent. La troisième étape est de définir les propriétés. Pour terminer, la dernière étape consiste à ajouter les propriétés et attributs aux instances.

D'après le guide, il faut se poser des questions sur l'utilisation et les besoins de l'ontologie afin d'identifier les classes et propriétés nécessaires afin que l'ontologie soit bien complète.

À partir de la liste de questions identifiées, on sait quelles informations sont nécessaires dans l'ontologie qui puissent par la suite permettre de répondre à ces questions-là.

La figure 4.4 reprend les différentes composantes de l'ontologie.

Figure 4.4 Schema of different classes of the ontology.



#### 4.3 Les classes primitives de l'ontologie de KPI

Sachant que l'objectif est de construire une ontologie de KPI, la classe principale est évidemment celle des indicateurs mais l'ontologie ne se limite pas là. D'autres classes sont créées pour ajouter des informations aux instances de la classe d'indicateurs. Dans l'état de l'art nous avons vu que nous cherchions à renseigner les éléments suivant pour chaque indicateur :

- une définition
- la formule de calcul
- les données nécessaires pour le calcul
- l'unité
- l'échelle
- la ou les catégories correspondantes à la thématique
- les utilisateurs intéressés
- les modes transports applicables
- les études concernées

Les définitions sont ajoutées pour chaque instance en tant que commentaire, dans le champs annotation sur Protégé. Nous verrons dans la section suivante que les formules sont ajoutées en tant que chaîne de caractère, elles ne sont pas créées dans l'ontologie en tant qu'instance appartenant à une classe.

#### 4.3.1 La classe KPI

Il s'agit de la classe qui contient tous les indicateurs. Des sous-classes, présentées dans la figure 4.5, ont été créées pour regrouper les indicateurs dont la mesure porte sur le même objet. Les indicateurs sont des instances de sous-classes de la classe KPI.



Figure 4.5 Sous-classes de KPI dans l'arborescence

L'annexe B.3 représente visuellement toutes les sous-classes de la classe KPI, mais aussi les autres classes qui sont liées à cette dernière. Elles vont être explicitées dans les sections suivantes.

### 4.3.2 La classe InputData

Cette classe contient toutes les données nécessaires au calcul des indicateurs qui ne sont pas produites par la simulation. On retrouve principalement de types de données :

**Rate** : taux à multiplier à un output de la simulation pour obtenir l'indicateur

**InitialValue** : valeurs des indicateurs en situation initiale pour calculer des différences relatives

### 4.3.3 La classe Unit

Cette classe contient toutes les unités de grandeur des indicateurs de l'ontologie. En effet, dans l'état de l'art, nous avons vu que pour mesurer un phénomène ou un objet le calcul peut être fait selon différentes grandeurs (temps, distance, nombre) et donc unités. Il s'agit alors de grandeurs différentes que nous distinguons par leur unité.

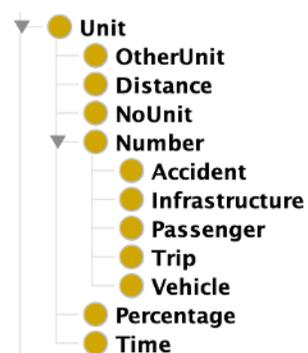


Figure 4.6 Sous-classes de Unit dans l'arborescence

### 4.3.4 La classe Scale

Cette classe permet de définir l'échelle ou le niveau de résolution de l'indicateur. En effet, dans l'état de l'art nous avons que la présentation d'une mesure peut se faire à différentes échelles : il peut s'agir d'un résultat total pour toute la simulation, une moyenne par véhicule ou bien le résultat pour un déplacement moyen. Les indicateurs sont alors distingués par leur échelle.

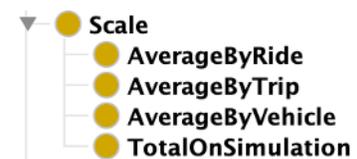


Figure 4.7 Sous-classes de Scale dans l'arborescence

*Ride* correspond à un déplacement partagé (une course) réalisé par un service où les utilisateurs partagent simultanément le véhicule. Par exemple, si deux clients partagent un véhicule pour réaliser chacun un déplacement, du point de vue du véhicule, il fait un déplacement que l'on définit en tant que *Ride* alors que ceci correspond à deux déplacements d'individu, soient deux *Trips*.

#### 4.3.5 La classe Category

Cette classe contient les thématiques des indicateurs en fonction des impacts qu'ils mesurent

#### 4.3.6 La classe User

Cette classe définit les utilisateurs de l'ontologie. C'est-à-dire les différentes parties prenantes qui sont intéressées par ces KPI.

#### 4.3.7 La classe Study

Cette classe définit les différents types d'études qui sont usuellement faites grâce à la simulation des modes innovants. Ces études se décomposent en trois catégories :

**DualComparison** : il s'agit d'études qui comparent deux scénarios entre eux

**Parameter** : il s'agit d'études de sensibilité dans lesquelles on fait varier la valeur d'un paramètre et l'on regarde l'influence sur les indicateurs

**Strategy** : il s'agit d'une catégorie semblable à la catégorie Parameter sauf que ce n'est pas la valeur d'un paramètre qui est modifié mais l'algorithme choisi pour simuler différentes stratégies

#### 4.3.8 La classe Mode

Cette classe définit les différents modes de transport innovants considérés dans cette ontologie.



Figure 4.8 Sous-classes de Mode dans l'arborescence

### 4.3.9 La classe Service

Cette classe vient apporter des informations sur la classe Mode en caractérisant le service proposé par le mode de transport. Les caractéristiques du service concernent deux spécificités sont définies dans l'ontologie en tant que sous-classe de Service :

**Share** : description du partage du véhicule, simultané ou non

**Infra** : description du lieu de prise en charge et de dépôt du client

## 4.4 Les propriétés de l'ontologie de KPI

Les propriétés sont créées pour relier les instances des autres classes aux KPI afin d'apporter des informations.

Tableau 4.1 Propriétés sur la classe KPI

Property	Class Range
hasUnity	Unit
hasScale	Scale
needsInputData	InputData
needsOutputData	KPI
isUsedForCalculationOf	KPI
isRelatedByDefinition	KPI
belongsTo	Category
isUsefulFor	User
isCalculatedForMode	Mode
isCalculatedForStudy	Study

Dans le tableau 4.1, les propriétés *needsOutputData* et *isUsedForCalculationOf* sont inverses avec comme classe de *Domain* et *Range* : *KPI*.

Sachant que les formules de calculs ont une forme plus complexe, elles ne sont pas définies en tant qu'instance dans une classe. On ne va pas utiliser une propriété de type objet. Il faut une propriété *DataType* qui relie une instance de *KPI* à une chaîne de caractères où sera écrite la formule pour calculer l'indicateur.

Par ailleurs, comme les définitions sont indiquées en annotations, elles sont directement associées à l'instance et aucune propriété n'est nécessaire pour cet attribut.

Toutes ces propriétés et les classes correspondantes permettent de répondre à l'ensemble des questions auxquelles cette ontologie doit permettre de répondre :

- que signifie cet indicateur ?
- comment le calcule-t-on ?
- de quelles données a-t-on besoin ?
- quels autres indicateurs interviennent dans son calcul ?
- quelle grandeur mesure-t-il ?
- pour quelle échelle donne-t-il le résultat ?
- à quels autres indicateurs est-il lié par définition ?
- à quelle thématique appartient-il ?
- qui sont les parties prenantes qui ont besoin de cet indicateur ?
- pour quels modes de transport faut-il le calculer ?
- quelles sont les études qui nécessitent ces indicateurs ?

Les propriétés ci-dessus relient les KPI aux autres classes mais il est utile d'avoir aussi les liens dans l'autre sens pour répondre aux questions suivantes :

- quels indicateurs utiliser pour telle étude ?
- quels indicateurs utiliser pour tel mode ?
- quels indicateurs sont intéressants pour tel utilisateur ?
- quels sont les indicateurs de cette thématique ?
- quels sont les indicateurs qui mesurent cette grandeur ?
- pour quel autre indicateur ce résultat ou cette donnée sont-ils nécessaires afin de le calculer ?

Les propriétés inverses suivantes sont ajoutées (4.2).

Tableau 4.2 Propriétés inverses

Property	Domain	Range	Inverse
isScaleOf	Scale	KPI	hasScale
isCategoryOf	Category	KPI	belongsTo
studyIsEvaluatedBy	Study	KPI	isCalculatedForStudy
modeIsEvaluatedBy	ModeKPI		isCalculatedForMode
isInterestedIn	User	KPI	isUsefulFor

À ce stade, l'ontologie ne répond pas à tous les besoins énoncés. En plus des propriétés sur les KPI, il faut ajouter des propriétés entre les diverses classes. La propriété *hasService* permet

de spécifier les caractéristiques de service (classe *service*) à un mode de transport (classe *mode*). Sa propriété inverse est *isServiceOf*. (voir Annexe B.4)

Les annexes B.1 et B.2 permettent de visualiser les différentes classes de l'ontologie et comment elles sont reliées entre-elles par les propriétés.

Les propriétés précédemment définies possèdent les caractéristiques suivantes (voir 4.2.2) :

Tableau 4.3 Caractéristiques des propriétés

Properties	Fonctional	Inverse Fonctional	Transitive	Symetric	Antisymmetric	Reflexive	Irreflexive
needsInputData							
needsOutputData		X					
isUsedForCalculationOf							
hasUnit	X						
hasScale	X						
isScaleOf		X					
belongsTo							
isCategoryOf							
isCalculatedForStudy							
studyIsEvaluatedBy							
isCalculatedForMode							
modeIsEvaluatedBy							
isUsefulFor							
isInterestedIn							
isRelatedByDefinition							
hasService							
isServiceOf				X			

## 4.5 Exemples

### 4.5.1 Exemple autour d'un KPI

Dans cette section, nous présentons une visualisation de l'ontologie développée autour du KPI *GlobalOccupancyRate* à l'aide du plug-in *OntoGraph*.

La figure 4.9 décrit l'instance *GlobalOccupancyRate* qui appartient à la classe *Occupancy*, sous-classe de *KPI*. On identifie visuellement grâce aux propriétés représentées par des flèches de couleurs ses attributs :

- son échelle est *Total*
- son unité est en *PassengersPerVehicle*
- les données requises sont *VehicleKilometersTraveled* et *PassengerKilometersTraveled*

Les propriétés *DataType* ne sont pas représentées avec l'outil de visualisation mais cette information est traduite dans le fichier XML sous le code suivant ou en survolant avec la souris.

```
hasFormula PassengerKilometersTraveled / VehicleKilometersTraveled
```

Avec la figure 4.10 qui représente toutes les propriétés de l'instance *GlobalOccupancyRate*, en plus des propriétés liées à la définition de l'indicateur, on peut voir pour quelles études, quel mode ou quel utilisateur cet indicateur-là est pertinent. Il est aisé de se déplacer d'un élément à l'autre pour obtenir ses informations.

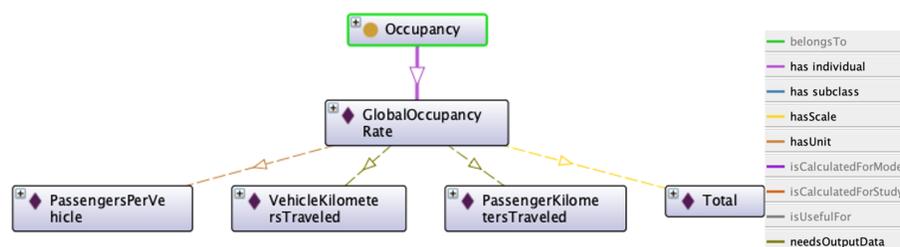


Figure 4.9 Aperçu réduit sur l'indicateur *GlobalOccupancyRate*

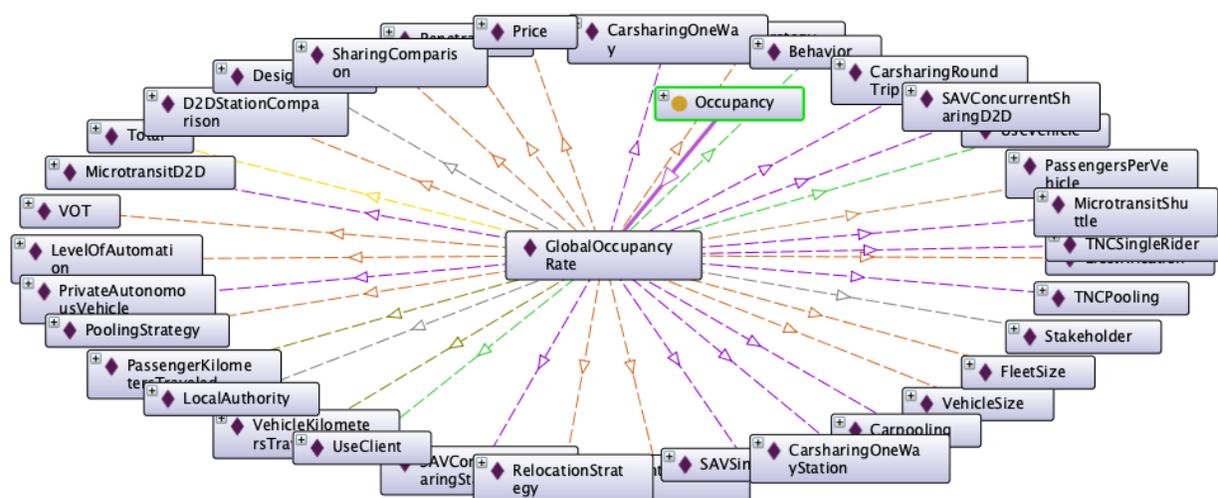


Figure 4.10 Aperçu développé sur l'indicateur *GlobalOccupancyRate*

Ces figures sont présentées à l'aide de l'outil de visualisation OntoGraf. En survolant chaque élément avec la souris, on peut voir un aperçu des informations sur l'instance, la classe ou la propriété. La figure 4.11 montre la fenêtre courante du logiciel Protégé où l'on retrouve les classes dans la partie en haut à gauche, les instances en bas en gauche pour la classe sélectionnée et dans la partie de droite les informations relatives à l'instance sélectionnée comme la classe à laquelle elle appartient au centre, les commentaires en haut et les propriétés et attributs à droite. Cette figure permet d'illustrer comment sont ajoutées les formules de calcul des indicateurs en tant que *DataProperty*.

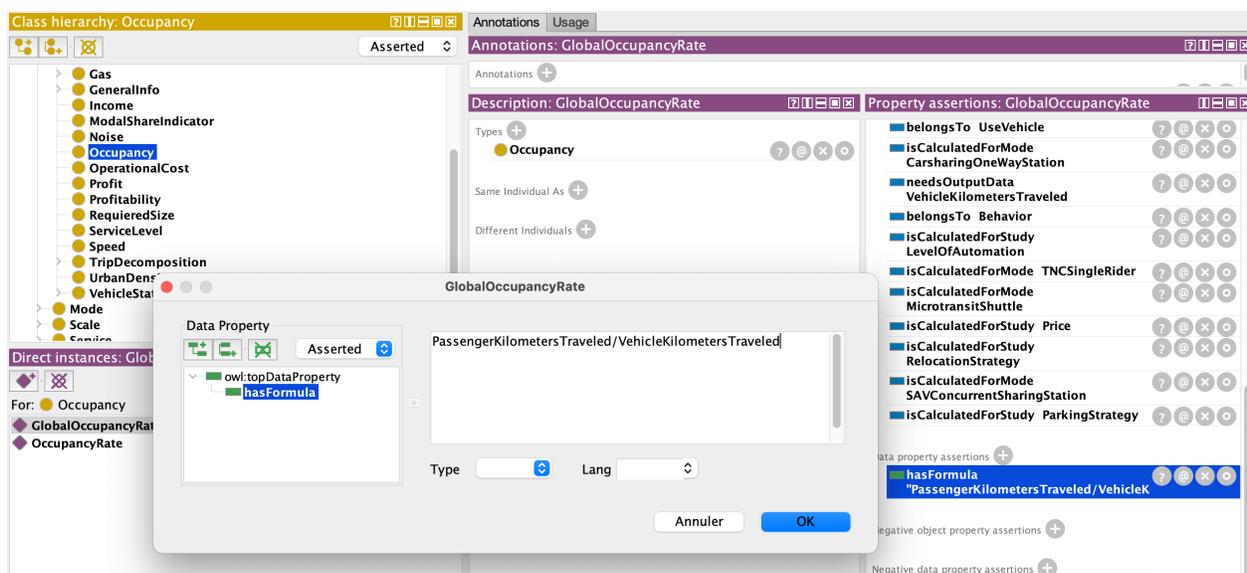


Figure 4.11 Détail des informations pour *GlobalOccupancyRate* dans la fenêtre courante de Protégé

#### 4.5.2 Exemple de navigation

Ici nous expliquons comment on peut utiliser l'ontologie en naviguant entre ses éléments. Par exemple, si nous nous intéressons aux différentes catégories des indicateurs. À l'aide d'OntoGraf, on sélectionne Category. À l'aide d'un clic droit, on développe ses instances en choisissant "Expand On" > "has Individuals".

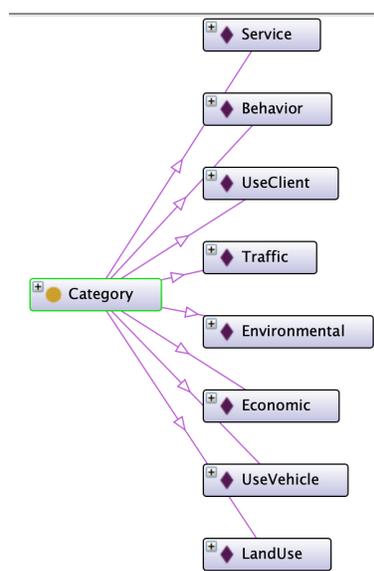


Figure 4.12 Instances de *Category* développées sur OntoGraf

Si l'on veut connaître les indicateurs de la catégorie *Environmental*, pareillement on développe selon *belongsTo*.

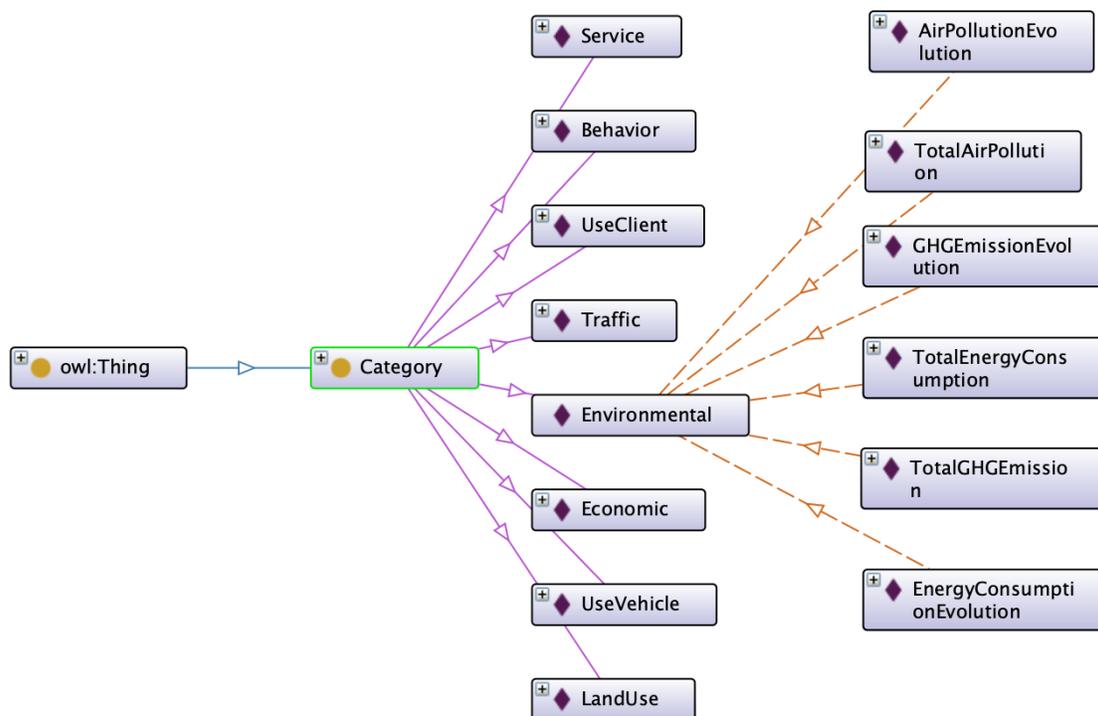


Figure 4.13 Développement autour de *Environmental* sur Ontograp

On peut aussi développer selon *isCategoryOf* pour obtenir la flèche dans l'autre sens avec le même résultat : on a bien la liste des KPI qui appartiennent à la catégorie *Environmental*.

Cette petite lacune vient du fait que les assertions inverses sont ajoutées automatiquement à l'aide du Reasoner dans Protégé. Elles sont bien existantes (voir en jaune sur la figure 4.14) mais Ontotgraf ne les prend pas en compte.

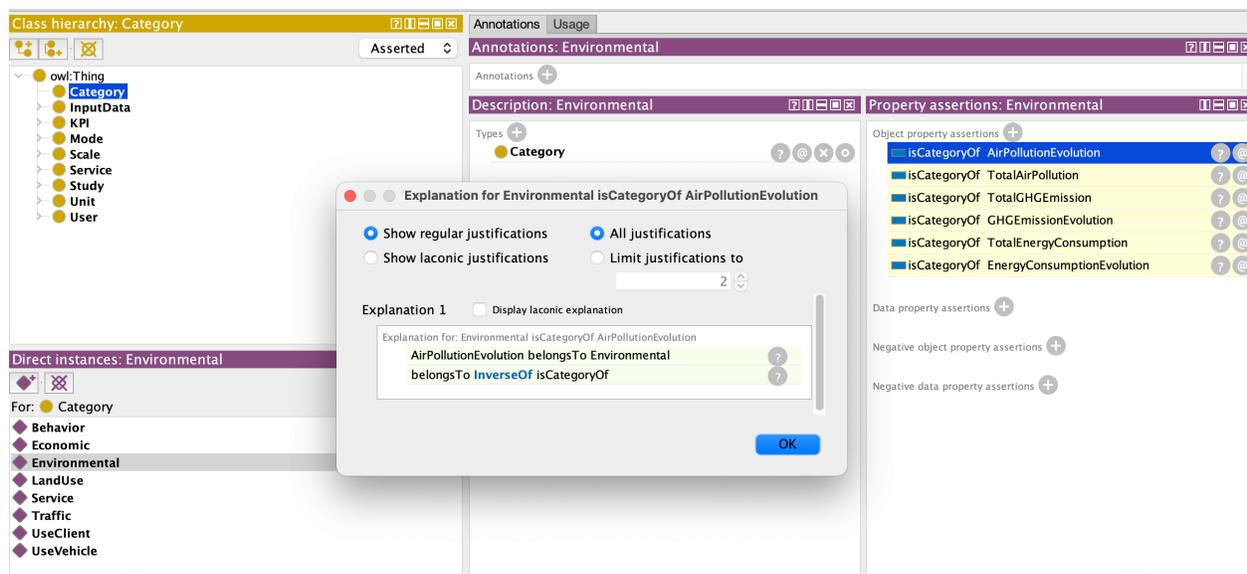


Figure 4.14 Développement autour de Environmental sur Ontograf

Le choix de regarder une catégorie était un exemple relativement simple car chaque catégorie contient un nombre assez restreint d'indicateurs. Mais ce n'est pas forcément le cas pour les autres classes, par exemple si l'on choisit de regarder un mode. De même, comme le montre la figure 4.15, on peut observer l'arborescence pour aller de la classe Mode jusqu'à *SAVConcurrentSharingD2D* (qui correspond aux véhicules autonomes partagés qui peuvent être utilisés simultanément par différents utilisateurs qui n'ont pas besoin de se déplacer pour accéder au lieu de prise en charge). En survolant avec la souris, on dévoile plus d'informations sur l'élément.

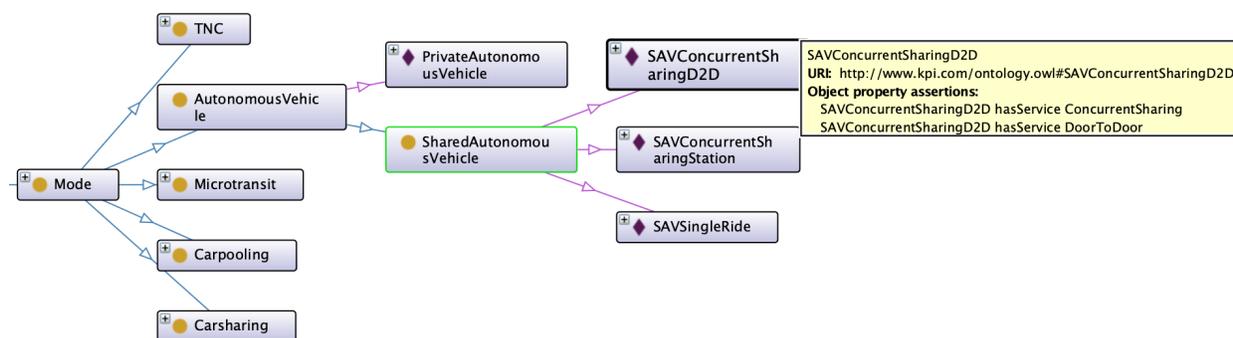


Figure 4.15 Arborescence de *SAVConcurrentSharingD2D*

Si on développe pour savoir quels indicateurs sont utilisés pour ce mode cela devient diffi-



## CHAPITRE 5 SCÉNARIOS D'UTILISATION DES VÉHICULES AUTONOMES POUR LA VILLE DE MONTRÉAL

Ce chapitre présente le deuxième projet de ce mémoire. Il correspond à l'objectif numéro deux, qui est de créer un cas d'étude où l'ontologie pourrait être utilisée. Au delà de cette fonction d'exemple où l'utilisation de l'ontologie est un atout, le travail se porte particulièrement sur l'évaluation d'un mode de transport innovant à travers la simulation. Ce cas d'étude se focalise sur les impacts des véhicules autonomes. Le chapitre présente tout le travail effectué pour concevoir des différents scénarios des véhicules autonomes, dont les modalités d'utilisation diffèrent, en partant des hypothèses considérées, du modèle utilisé pour la simulation jusqu'à la présentation des résultats obtenus et leurs limites.

### 5.1 Introduction

Dès la commercialisation de masse de l'automobile, les voitures ont modifié les comportements de déplacement des populations. Grâce à sa flexibilité, l'auto est devenue le mode de transport privilégié, face aux transports collectifs ou aux modes actifs. Aujourd'hui en plein développement technologique, de la même façon, les véhicules autonomes pourraient, eux aussi, transformer la mobilité. En effet, comme la possession d'un véhicule privé a permis d'offrir une grande flexibilité spatiale et temporelle de déplacement, les véhicules autonomes permettront de diminuer la pénibilité de déplacement en permettant de faire autre chose en même temps au lieu de conduire, tout en gardant les avantages d'un véhicule privé, et ce, sans les frais d'un chauffeur. Ces avantages pourraient faire apparaître une demande induite. Ce mode apparaissant attractif, vient poser la question de la concurrence avec les transports en commun ainsi que les enjeux environnementaux. Tout comme l'automobile a eu de gros impacts sur la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre, les véhicules autonomes devraient eux aussi avoir leurs effets. Ces impacts sont aujourd'hui au cœur des enjeux environnementaux pour tenter de les réduire, avec des politiques adaptées.

Certains impacts des véhicules autonomes sont déjà attendus, expliqués par l'automatisation de la conduite. On retrouve une amélioration de la sécurité en supprimant le facteur humain [30], mais aussi amélioration du confort en se déplaçant [25], le mode devient plus attractif [29]. Il est donc à vérifier que ceci n'entraîne pas trop d'externalités qui iraient à sens contraire des politiques de transition écologique [114].

Ces dernières années, pour justement essayer de diminuer la possession automobile, de nou-

veaux modes de transport partagés et à la demande ont vu le jour, profitant notamment des applications mobiles. On retrouve parmi ces modes Mobility as a Service (MaaS) l'auto-partage ou les VTC. Les fonctionnalités des véhicules autonomes pourront correspondre à ce marché-là. L'auto-partage sans la nécessité de conduire soit moi-même deviendrait équivalent à un service de transport à la demande sans payer un chauffeur. Ce qui équivaut à un robot-taxi. Tout comme les modes VTC proposent le co-voiturage afin d'être plus attractif au niveau du coût en divisant les frais, les robots-taxi pourraient faire de même, en répondant aux requêtes de plusieurs utilisateurs en même temps. On peut donc considérer que les véhicules autonomes pourraient être introduits sous la forme de robots-taxis, partagés ou non, en plus d'une utilisation semblable aux voitures de nos jours.

Dans ce rapport, nous chercherons à mesurer les impacts générés par l'insertion de véhicules autonomes dans la ville de Montréal selon différents scénarios d'utilisation. Ces impacts seront mesurés à l'aide d'un modèle multi-agent, avec le logiciel MATSim. Afin d'aborder plusieurs hypothèses possibles, trois scénarios d'utilisation des véhicules autonomes seront étudiés. Bien que dans le futur, un cas mixte de ces différents modes existera probablement, dans ce travail, pour aborder les impacts de chaque mode, des scénarios extrêmes sont produits.

Dans le premier scénario, les véhicules autonomes sont des véhicules particuliers possédés par les ménages.

Dans le deuxième scénario, les véhicules autonomes sont partagés et équivalents à des taxis sans chauffeur.

Dans le troisième scénario, les véhicules autonomes sont partagés et autorisent le co-voiturage pour regrouper des passagers.

Dans un premier temps, une mise en contexte d'études semblables sera faite à partir des informations trouvées dans la littérature, le cas d'étude pour la ville de Montréal et les scénarios d'utilisation de véhicules autonomes et leurs hypothèses suivront. La troisième partie présentera le modèle de simulation utilisé pour produire les résultats. Les résultats seront analysés et commentés dans les parties suivantes. Le rapport se conclura par une discussion sur le travail effectué ainsi que ses limites.

## 5.2 Dans la littérature

L'arrivée des véhicules autonomes devenant de plus en plus concrète avec les améliorations des technologies, le nombre d'études portant sur les impacts des véhicules autonomes a augmenté au cours de ces dernières années, en particulier pour les modes partagés.

Différents types d'études se distinguent, certaines plus générales portant sur des hypothèses

sur le comportement des individus, d'autres plus basées sur les efficacités technologiques. On retrouve des études qualitatives, mais aussi des études quantitatives qui peuvent être approchées à l'aide de simulations de transport pour de la planification.

Le premier bénéfice annoncé des véhicules autonomes est l'amélioration de la sécurité en diminuant les accidents dûs au facteur humain. Ces avantages auraient un bénéfice économique qui permettrait notamment de réduire le coût des assurances et ainsi de faire baisser le coût de déplacement [30].

En plus de l'amélioration de la sécurité, la suppression du facteur humain rendrait la conduite plus fluide et donc moins énergivore [30, 115–117]. La communication entre les véhicules leur permettrait aussi d'être plus proches les uns des autres et ainsi d'améliorer la capacité des routes, sans toucher aux infrastructures [27, 95].

Ces aspects rendent le mode plus attractif, mais le plus gros atout des véhicules autonomes reste qu'il ne nécessite pas l'intervention d'un chauffeur et donc le besoin d'un permis de conduire. En comparaison de l'auto conventionnelle, il s'ouvre donc à un marché plus large [28]. Le fait que l'attention puisse être portée sur une autre activité que conduire en se déplaçant, tout en conservant un niveau de confort élevé va améliorer la valeur du temps perçue en déplacement. Cet effet aurait alors de grosses conséquences sur la mobilité [25].

En dehors des impacts sus-cités plus qualitatifs, si l'on s'intéresse plus à l'utilisation des véhicules autonomes par la population d'une zone urbaine, les véhicules autonomes en tant que service à la demande sont plus documentés sous un intérêt de planification [26]. En effet, le véhicule particulier est sous-exploité et passe son temps à l'arrêt en dehors des heures de pointe. L'apparition des modes partagés permet de supprimer ça tout en gardant ses avantages comme la flexibilité (porte à porte et sans horaire fixe), le confort, et durée de déplacement concurrentielle. Ces modes permettent une mobilité plus durable, car ils réduisent alors le nombre de véhicules dans la population.

La modélisation numérique est un atout qui permet de tester différents scénarios pour en prévoir les impacts avant implantation et ainsi essayer d'adapter ses politiques au mieux.

Cependant il devient alors complexe d'utiliser les modèles de transport plus classiques qui sont agrégés comme la méthode séquentielle classique pour modéliser ces modes. En revanche, les modèles multi-agents, basés sur les activités et désagrégés permettent de gérer l'utilisation des nouveaux modes MaaS en modélisant l'interaction des agents et du mode [51].

La plupart des objectifs de la recherche dans ce domaine cherchent les impacts que peuvent avoir l'implantation des véhicules autonomes partagés ainsi que leur performance selon des paramètres ou politiques d'implantation. L'un des objectifs récurrent est aussi de trouver la flotte de la bonne taille, qui soit un bon compromis entre un bon niveau de service, c'est-à-

dire des temps d'attente réduits, et un coût attractif. Ceci peut ensuite permettre de prévoir le taux de remplacement des véhicules autonomes partagés pour les véhicules conventionnels, basé sur certaines hypothèses de calcul [58, 59, 65, 86, 103, 118, 119]

Le tableau 5.1 présente quelques exemples d'études déjà effectuées en utilisant un modèle multi-agent pour mesurer les impacts des véhicules autonomes.

En plus de ces quelques exemples, de nombreux articles ont été publiés spécifiquement pour la performance des services de véhicules autonomes partagés sans les inclure dans un scénario avec d'autres modes [55, 58, 68, 87, 103, 120].

Tableau 5.1 Références d'études avec simulation multi-agent de véhicules autonomes

Auteurs	Ville	Objectifs
Hörl [121] Hörl et al. [55]	La Défense, Paris Zurich	Intégration des véhicules autonomes partagés Trouver le meilleur algorithme de gestion des requêtes pour les véhicules autonomes partagés
Hörl et al. [122]	Zurich	Adapter l'offre de véhicules autonomes partagés à la demande
Vosooghi [123]	Rouen	Inclure les préférences des utilisateurs dans le choix du mode pour l'utilisation des véhicules autonomes partagés
Balac et al. [124]	Zurich	Dimensionner la flotte pour des véhicules autonomes partagés avec co-voiturage
Wang et al. [104]	Sioux-Falls	Intégration d'un service de transport à la demande
Simoni et al. [125]	Austin	Ajout d'une taxe sur la congestion dans un scénario de véhicules autonomes partagés
Bösch et al. [118]	Zurich	Déterminer la taille de la flotte de véhicules autonomes partagés selon le niveau de service
Liu et al. [59]	Austin	Mesurer les impacts véhicules autonomes partagés
Fagnant et Kockelman [65] Kaddoura et al. [74]	Austin	Mesurer les impacts véhicules autonomes partagés avec co-voiturage Influence de la tarification pour un service de véhicules autonomes partagés
Bischoff et al. [87]	Berlin	Mesurer les impacts véhicules autonomes partagés avec co-voiturage
Maciejewski et Bischoff [27]	Berlin	Effet des véhicules autonomes partagés sur la congestion

Toutes ces études font référence à des véhicules autonomes, mais partagés, utilisés comme des robots taxis. L'usage des véhicules autonomes privés pour ce genre d'étude reste moins

documenté.

Des études spécifiques existent pour l'usage privé mais particulièrement pour observer les impacts liés au stationnement [68]. Schlenker et al. s'intéressent au potentiel des véhicules autonomes privés pour effectuer de la livraison de marchandise. En effet, combiner ces deux utilisations dans un même véhicule, sachant que les véhicules privés passent la plupart du temps à l'arrêt, permet de réduire le nombre de véhicules nécessaires. L'étude est faite pour observer les avantages opérationnels pour le service de livraison de marchandise entre posséder sa propre flotte de véhicules autonomes ou bien louer des véhicules privés [126].

En étudiant les données du U.S. National Household Travel Survey de 2009, Schoettle et Sivak montrent que grâce aux véhicules autonomes, le taux de possession automobile pourrait passer de 2,1 à 1,2 véhicules par ménage. Ce calcul a été basé sur les heures de départ des déplacements pour les différents membres d'un même ménage, et il est expliqué par le constat que les cas de chevauchement étaient plutôt rares. En revenant seul au domicile, le véhicule autonome peut alors presque à lui seul répondre aux besoins de déplacement de tout le ménage [119].

Zhang et al. mènent la même étude pour Atlanta, mais en ayant des données sur les lieux d'origines et destinations ce qui permet en particulier de pouvoir mesurer aussi l'impact sur les kilomètres en plus réalisés dû au retour à vide au domicile pour s'occuper d'un autre membre du ménage. Pour Atlanta, beaucoup de déplacements au sein d'un ménage se chevauchent et la diminution de la possession automobile est alors de 9,5%. Ils mesurent par contre une augmentation des VKT de 59,5% sans considérer de changement dans le comportement [127].

Les études sont souvent faites pour comparer certains paramètres de service pour un même mode, ici, il convient de comparer trois utilisations des véhicules autonomes (Autonomous Vehicles (AV)), considérés comme des modes différents :

**Private Autonomous Vehicles (PAV)** : véhicules autonomes privés (*PAV*)

**SAV** : véhicules autonomes partagés (*SAV*)

**Pooled Shared Autonomous Vehicles (PSAV)** : véhicules autonomes partagés groupés (*PSAV*)

### 5.3 Description du modèle

Dans le cadre de cette étude, les scénarios d'utilisation des véhicules autonomes vont être simulés à l'aide du modèle multi-agent MATSim, enrichi d'extensions permettant de simuler les véhicules autonomes.

### 5.3.1 MATSim

MATSim est un logiciel open-source écrit en Java. Il a été développé par les groupes de recherche en transport de TU Berlin et l'ETH Zurich. Il s'agit aujourd'hui d'un des modèles multi-agents les plus utilisés dans la recherche en transport.

Il permet de simuler à grande échelle et de façon désagrégée la mobilité de la population en affectant les individus sur le réseau selon les modes de transport choisis. C'est une combinaison d'une modélisation microscopique du trafic et d'une modélisation mésoscopique de la demande et du comportement basée sur les individus d'une population (alors appelés agents), tout en étant basé sur un principe itératif co-évolutionnaire qui permet d'optimiser les décisions des agents.

La figure 5.1 présente le principe du fonctionnement de MATSim.

En entrée, le logiciel reçoit une population qui correspond à la demande initiale. À l'intérieur de cette population synthétique, chaque agent possède un plan d'activités, c'est-à-dire une succession d'activités horodatées/planifiées comme le travail, l'école, les loisirs, le magasinage, etc. où il doit se rendre. En plus du plan, les agents possèdent des caractéristiques descriptives qui vont leur permettre d'adopter certains comportements, comme le fait de posséder ou non un permis de conduire.

À chaque itération, une journée-type est simulée dans l'étape *mobsim*. Chaque agent va chercher à réaliser son plan en se rendant à ces lieux d'activités. Il va suivre ce qui est indiqué dans son plan tel que l'heure à laquelle partir, le mode qu'il va prendre et il est affecté sur le réseau en conséquence.

Après avoir été simulé, le plan est évalué par un calcul semblable aux fonctions d'utilité économétrique. La formule du calcul du score du plan  $S_{plan}$  a été établie par Charypar and Nagel [128] :

$$S_{plan} = \sum_{q=0}^{N-1} S_{act,q} + \sum_{q=0}^{N-1} S_{trav,mode(q)} \quad (5.1)$$

avec  $N$  le nombre d'activités.

Elle va donc dépendre des activités réalisées. Le score des activités,  $S_{act,q}$ , dépend en particulier de la durée pendant laquelle l'agent réalise son activité, mais des pénalités peuvent aussi être affectées si certaines conditions ne sont pas respectées comme l'heure d'arrivée, de départ ou une durée minimale. En plus des activités, il dépend aussi des déplacements. La partie du score pour les déplacements,  $S_{trav,mode(q)}$ , dépend de la distance, de la durée et du coût monétaire et diffère selon les modes de transport emprunté (voir équation 5.2).

$$S_{trav,q} = C_{mode(q)} + \beta_{trav,mode(q)} \cdot t_{trav,q} + \beta_m \cdot \Delta m_q + (\beta_{d,mode(q)} + \beta_m \cdot \gamma_{d,mode(q)}) \cdot d_{trav,q} + \beta_{transfer} \cdot x_{transfer,q} \quad (5.2)$$

avec  $t_{trav,q}$  le temps de déplacement entre l'activité  $q$  et  $q + 1$ ,

$d_{trav,q}$  la distance parcourue lors du déplacement entre l'activité  $q$  et  $q + 1$ ,

$\Delta m_q$  et  $\gamma_{d,mode(q)}$  le coût monétaire du déplacement  $q$ ,

$x_{transfer,q}$  le nombre de correspondance à prendre s'il y a lieu,

$\beta_m$  convertit la valeur monétaire en utilité,

les constantes  $C_{mode(q)}$  et les  $(\beta_k)$  sont sensibles au mode emprunté et permettent de calibrer le modèle à partir des données des enquêtes de déplacements et des comptages routiers.

Usuellement, performer une activité apporte une utilité positive alors qu'un déplacement lui est plus une *désutilité* (négatif).

Lors d'une nouvelle itération, selon les comportements autorisés, les agents vont pouvoir essayer de nouvelles choses pour se rendre à leur activité comme emprunter un autre chemin basé sur les temps de déplacement actualisés par l'itération précédente, choisir un nouveau mode de transport, ou bien partir un peu plus tard ou plus tôt.

Ainsi, au fur et à mesure des itérations, les agents testent différents moyens de réaliser leur plan d'activités. Les meilleurs sont retenus en mémoire et peuvent être choisis à nouveau. En gardant en mémoire ses meilleurs plans, c'est comme si l'agent apprenait. Au bout d'un grand nombre d'itérations, tous les agents tendent à avoir le meilleur plan et l'on se rapproche d'un équilibre stable où le maximum d'agents aurait trouvé le meilleur moyen de répondre à leur plan d'activités.

Un des atouts de ce modèle désagrégé est que les interactions entre les agents et véhicules sont modélisées. Les limites de capacité sont prises en compte pour les transports en commun par exemple ou pour le transport à la demande. Le trafic est lui aussi représenté, en tenant compte de la capacité et la vitesse en écoulement libre des routes. La gestion du trafic repose sur le principe de file d'attente (queue-based approach) : lorsqu'un véhicule entre dans un lien du réseau, il est ajouté à la fin de la file d'attente, jusqu'à ce que le temps pour parcourir le lien en flux libre soit écoulé, qu'il se retrouve en tête de la file d'attente et que le lien suivant permette d'entrer. On observe donc les situations de congestion qui ont alors un impact sur les temps de déplacement qui sont allongés. Ainsi, d'une itération sur l'autre, le choix des autres agents impacte celui d'un individu, comme c'est le cas dans la réalité.

Afin que l'équilibre atteint colle avec la réalité, le modèle est calibré à l'aide des paramètres de la fonction du score, les  $(\beta_k)$ . Les modes sont rendus plus ou moins attractifs en modifiant

la valeur de leur utilité.

En sortie, on récupère les plans qui ont été actualisés, mais aussi des informations sur tout ce qui s'est passé durant une simulation. En effet, dans MATSim, chaque action réalisée au cours du mobsim génère un évènement qui est écrit dans un fichier pour être ensuite analysé, et ce, que ce soit pour les véhicules sur le réseau (changement de lien) ou les agents (interaction avec les véhicules, début ou fin des activités). Ceci permet d'analyser tout ce qu'il s'est passé au cours d'une simulation à tous les niveaux, aussi bien comportementaux et que du trafic et à différents niveaux d'agrégation.

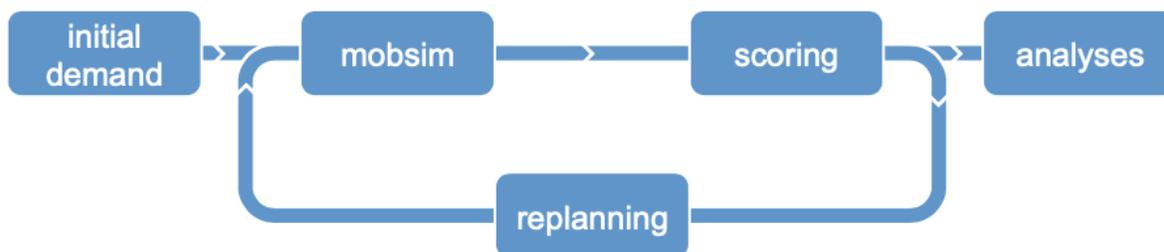


Figure 5.1 Algorithme co-évolutionnaire [129]

### 5.3.2 Extensions

Le corps principal du logiciel MATSim, expliqué précédemment, permet de modéliser les modes les plus conventionnels comme l'auto, les transports en commun et les modes actifs. Cependant, au cours des années, des contributions ont été faites permettant de rajouter des fonctionnalités. C'est le cas par exemple pour les taxis ou les véhicules autonomes qui ne peuvent pas être gérés comme des véhicules conventionnels puisqu'ils peuvent se déplacer sur le réseau sans que l'agent ne soit à l'intérieur.

#### Contribution DVRP et taxi pour les SAV

Développée initialement pour les taxis et les différents services de VTC, l'extension dynamic vehicle routing problem (DVRP) répond au besoin des déplacements adaptés à la demande (demand-responsive) [130].

Elle permet, alors, à chaque fois qu'un agent souhaite utiliser ce mode, qu'il lance une requête qui sera ensuite gérée en temps réel par un système central de répartition pour qu'un véhicule se charge de lui.

Dans notre cas pour les taxis autonomes (SAV), le répartiteur de la flotte reçoit les requêtes de la part des agents et les attribue à un véhicule selon l’algorithme d’affectation suivant [58] :

- dans une situation où l’offre est supérieure à la demande (over-supply), c’est-à-dire qu’il y a plus de véhicules disponibles que de requêtes d’agents, on suit la règle du premier arrivé, premier servi, et on attribue à une requête entrante le véhicule le plus proche autour d’elle.
- dans la situation inverse où la demande est plus forte que l’offre (under-supply), une liste d’attente se crée alors pour les requêtes. Dès qu’un véhicule se libère, il est assigné à la requête la plus proche.

Ainsi, les véhicules reçoivent un programme actualisé “en temps réel” de la part de l’*optimizer* (répartiteur) qui comprend la liste de leurs tâches, comme se rendre à un endroit pour chercher quelqu’un, le déposer à son origine, attendre qu’une nouvelle arrive.

Ce fonctionnement est différent de l’apprentissage “au jour le jour” conventionnel des agents dans MATSim, car, ici, les véhicules sont considérés comme des agents dynamiques, car ils peuvent décider activement de ce qu’ils font à chaque étape de la simulation au lieu d’utiliser un plan pré-calculé.

En lien avec le cœur de MATSim, ce mode possède une désutilité qui peut être modélisée à travers le coût monétaire à payer par l’agent pour utiliser ce service, qui est souvent fonction de la distance ou du temps. En plus, le temps d’attente est pénalisé. C’est pour cela qu’afin d’être compétitif, l’objectif de l’optimizer est de répondre aux requêtes en minimisant leur temps d’attente. Il existe d’autres algorithmes de gestion de la flotte, mais celui choisi ici est décrit comme le plus efficace [131].

Il est à noter que nous utilisons la contribution MATSim des taxis pour modéliser les taxis autonomes, car le fonctionnement est le même. La seule différence se situe au niveau du chauffeur et cette composante intervient dans le coût de déplacement qui a été réduit en conséquence.

### **Contribution DRT pour les PSAV**

Cette section présente la contribution utilisée pour simuler les taxis autonomes partagés, PSAV.

Dans la contribution précédente, une seule requête est prise en charge à la fois par un véhicule. À partir de l’extension DVRP, l’extension demand-responsive transport (DRT) a été développée pour permettre une utilisation partagée en simultanée des taxis, dans notre cas autonomes.

L'algorithme d'attribution des requêtes est alors différent [132]. Les véhicules ne reçoivent plus qu'une requête, mais une liste d'arrêts intercalés où se rendre pour récupérer ou déposer un agent, toujours mis à jour en temps réel. Pour mettre à jour ce programme, le système de répartition est basé sur un algorithme heuristique d'insertion. Lorsqu'une requête apparaît, l'algorithme recherche les itinéraires de tous les véhicules pour trouver les insertions optimales. Il va faire des tentatives d'insertion des lieux d'origine et de destination, et calculer les nouveaux temps de déplacement. La fonction objectif de l'heuristique est de minimiser la charge de travail totale des taxis, mesurée comme le temps total passé à traiter les demandes. Donc les insertions de nouvelles requêtes sont évaluées en calculant l'augmentation du temps de "travail" sur les véhicules. L'insertion qui offre la plus petite augmentation est sélectionnée et le véhicule retenu. Le programme de ce véhicule sera mis à jour pour qu'il se charge de la requête.

Avant de rechercher l'insertion la moins pénalisante, des conditions sont à respecter pour savoir si elle peut être prise en compte. Il faut que le temps global du déplacement (attente incluse) ne dépasse pas  $t_r = \alpha \cdot t_{direct} + \beta$ , où  $t_{direct}$  est le temps de déplacement passé dans le véhicule s'il n'y a pas de détour entre l'origine et la destination de la requête dans le cas d'un déplacement non-partagé. Les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$ , respectivement supérieur à 1 et positif, sont paramétrables et sont là pour fixer un seuil de tolérance pour l'attente du véhicule ainsi que les détours pour se rendre à d'autres destinations de dépôt ou prise en charge. Il ne faut pas non plus que l'insertion fasse que ce critère n'est plus respecté pour les requêtes déjà planifiées. La capacité du véhicule doit aussi être respectée, car il ne pourra se charger de plus de requêtes à la fois qu'il ne dispose de sièges.

Cette extension aurait pu être utilisée pour le cas des taxis non partagés en implémentant une capacité d'un seul agent par véhicule. Cependant, elle demande des temps de calcul entre 3 et 4 fois supérieur à la contribution *taxi*, présentée dans la section précédente.

### **Adaptation de la contribution taxi pour les PAV**

À ce jour, des articles scientifiques modélisant les véhicules autonomes privés ont déjà été publiés en faisant référence à MATSim, mais il n'existe pas de contribution publique sur le code open-source du logiciel pour cela.

Afin de modéliser une utilisation privée des véhicules autonomes, le code existant pour la contribution taxi (section 5.3.2) a été adapté. Auparavant, le véhicule était choisi en utilisant un algorithme de plus court chemin afin de trouver le véhicule le plus proche. Dans ce cas, il est souhaité que l'agent ne puisse utiliser que le véhicule de son ménage. Le fonctionnement global du gestionnaire de requêtes qui envoie des tâches aux véhicules reste inchangé, mais

au lieu de rechercher le véhicule le plus proche de la requête, on vient affecter le véhicule qui appartient au ménage de l'agent. Ceci a été fait en récupérant l'identifiant du ménage de l'agent qui fait la requête et en la faisant correspondre à l'identifiant du véhicule autonome. En plus de modifier le modèle, les données d'entrée, qui seront présentées dans la section suivante, ont été adaptées pour que la flotte de véhicules autonomes corresponde avec la population, à travers une identification des véhicules correspondante avec à l'identification des ménages motorisés.

Contrairement aux deux abordés précédemment, il s'agit d'un mode qui n'est pas accessible à tout le monde. En effet, seuls les agents dont le ménage est véhiculé peuvent utiliser leur voiture autonome privée. Pour gérer ceci, des sous-populations ont été implémentées au niveau des attributs des agents. Les agents dont le ménage dispose d'un véhicule autonome privé appartiennent à la sous-population *private* et peuvent choisir parmi tous les modes existants, ceux *no\_private* sont limités aux autres disponibles sauf les PAV.

### 5.3.3 Données

En entrée du modèle, MATSim nécessite différents types de fichiers qui vont décrire les scénarios. Parmi eux, on retrouve :

- la population qui contient tous les agents avec leur plan d'activités ainsi que des caractéristiques socio-économiques
- l'ensemble du réseau routier de la ville
- les horaires des transports en commun et les véhicules du service
- l'environnement bâti qui correspond aux lieux des activités (logements, bureaux, magasins ...)
- la flotte de véhicules autonomes

Cette étude est réalisée pour la région de Montréal.

La population a été générée en se basant sur la Région Métropolitaine de Recensement (RMR) de Montréal. À partir des données du recensement de 2016 [133], une population synthétique a été créée. Ces données-là sont combinées avec les données du sondage sur le déplacement des ménages, l'Enquête Origine-Destination de 2018 [134]. Les données de la possession automobile [135] ont permis de compléter la description des agents. La combinaison de l'enquête des déplacements et les données immobilières [136] ont permis d'établir les plans d'activités des agents pour une journée-type grâce au pipeline EQASIM [137]. Les agents qui ne réalisent pas d'activités ou âgés de moins de 5 ans sont retirés de la population synthétique.

Pour le réseau, les données ouvertes de Open Street Map (OSM) sont transformées pour créer

le réseau constitué de nœuds et de lien. Chaque lien, correspondant à un tronçon de route, possède des caractéristiques telles que sa capacité, sa vitesse en écoulement libre, le nombre de voies et les modes autorisés à y circuler. Lorsque l'on travaille sur un échantillon réduit de la population, comme cela va être le cas ici, la capacité des liens est elle aussi réduite avec le même facteur pour tenir compte de la réduction.

Pour l'immobilier, les données ne sont pas suffisantes pour que les fonctions de ce fichier soient utilisées dans la simulation, comme par exemple les heures d'ouverture et de fermeture des commerces ou bureaux.

Les données GTFS [138] permettent de créer les deux fichiers propres aux transports en commun. Seuls le métro et les bus sont modélisés.

Pour les extensions utilisées, il est nécessaire de définir la flotte de véhicules autonomes. Pour les véhicules autonomes privés, l'attribution a été faite à partir des données sur la population. La méthode utilisée sera expliquée plus en détail dans la présentation des hypothèses faites pour les scénarios dans la section suivante.

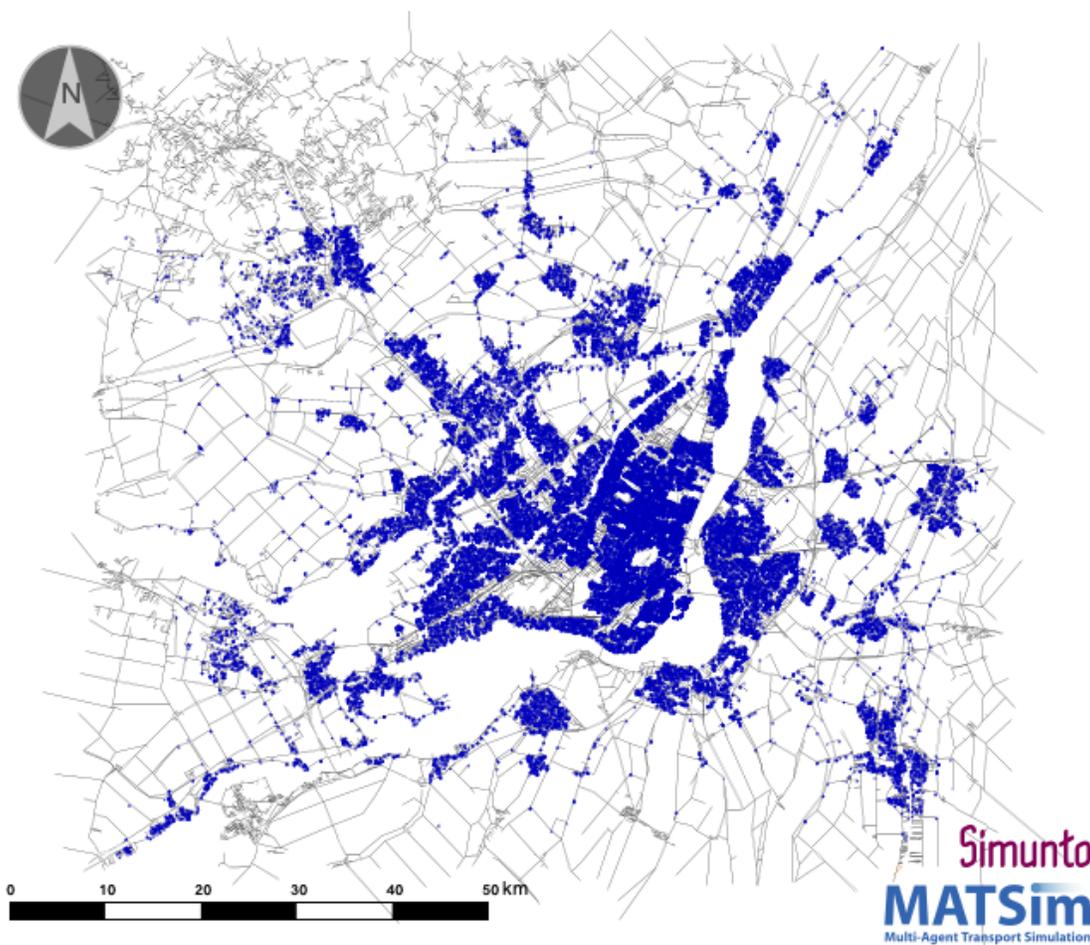


Figure 5.2 Carte du réseau de l'aire étudiée de Montréal et de lieux de résidence des agents (point bleu) avec 5% de la population

### 5.3.4 Méthodes de calculs

En plus de la création des scénarios, de l'adaptation du modèle suivi des simulations, ce travail a nécessité l'écriture de scripts pour des calculs post-processing des indicateurs d'impacts et de performance. MATSim produit différents fichiers en sortie de simulation, certains contenant des résultats utiles mais qui ne sont pas suffisant pour mesurer tous les impacts.

À partir du fichier au format *xml* sur les évènements ou du fichier au format *csv* qui recensent chaque déplacement, des résultats plus complets ont été calculés pour réaliser les analyses qui seront présentées section 5.5.

Des scripts écrits en Python ont permis de parcourir et d'analyser ces fichiers de taille très importantes. La bibliothèque ElementTree<sup>1</sup> a aidé à lire les informations contenues dans les

1. <https://docs.python.org/3/library/xml.etree.elementtree.html>

fichiers *xml*, afin de pouvoir les traiter dans Python. La majorité des calculs ont été faits en ayant recours aux DataFrames<sup>2</sup> pour faciliter la manipulation des données.

L'ontologie établie dans le projet précédent a permis de connaître quels indicateurs calculer, mais aussi elle a servi d'aide lors de la rédaction du script Python pour savoir comment calculer ces indicateurs.

## 5.4 Présentation des scénarios pour Montréal

Dans cette section, nous allons présenter les scénarios qui vont être modélisés et expliquer en détail les différentes hypothèses qui ont été prises.

Afin d'explorer plusieurs pistes d'utilisation future des véhicules autonomes, le choix a été fait de comparer trois scénarios différents face à une situation de base, actuelle, sans véhicule autonome.

Pour les trois scénarios, peu importe la forme du service, les véhicules sont considérés 100 % autonomes. Il s'agit du niveau 5 d'autonomie défini par la SAE :

*“Un système de conduite automatisée [...] installé sur le véhicule peut se charger de la conduite en toutes circonstances. Les occupants humains ne sont que des passagers et ne doivent jamais être impliqués dans la conduite.”* [15]

C'est-à-dire que la présence d'une personne à bord n'est pas requise pour que le véhicule puisse circuler, s'il y a une personne à bord, elle n'a pas besoin d'intervenir dans la conduite et donc elle peut faire autre chose. De plus, il est à noter que l'hypothèse que les véhicules autonomes soient électriques n'a pas été faite.

Par rapport aux données qui ont été présentées dans la section précédente, la population synthétique qui sera simulée dans cette étude a été réduite à 5 % des 4 millions d'habitants de la RMR de Montréal pour des enjeux de temps de calcul. Une adaptation de la capacité du réseau permet de tenir compte de cette réduction et de proposer des résultats valides [139].

### 5.4.1 Scénario de référence

Le scénario que l'on nommera *base* dans les analyses va servir de point de comparaison avec les différents scénarios imaginés pour l'utilisation des véhicules autonomes. Ce scénario cherche à représenter la situation actuelle de Montréal, c'est-à-dire sans véhicules autonomes. Il a été calibré à partir des données présentées dans la section 5.3.3.

---

2. <https://pandas.pydata.org/docs/index.html>

En échantillonnant 5 % de la RMR de Montréal, la population synthétique est alors composée de 150 072 agents appartenant à 75 216 ménages. Parmi eux, 79 % des ménages sont motorisés et 64,5 % des agents ont accès à un véhicule et possèdent un permis de conduire.

Pour ce scénario, les agents ont accès aux modes suivants :

- TC
- vélo
- marche
- voiture conventionnelle, si l'agent possède un permis de conduire et son ménage dispose d'un véhicule
- auto passager

#### 5.4.2 Scénario 1 : utilisation privée

Le premier scénario introduit les véhicules autonomes privés (PAV). Les véhicules conventionnels sont totalement supprimés donc les modes auto et auto-passager disparaissent.

Pour modéliser ce mode, la contribution détaillée en 5.3.2 est utilisée.

Ici, on fait l'hypothèse que les véhicules conventionnels sont remplacés par des véhicules autonomes. Si un ménage possédait un ou plusieurs véhicules conventionnels, maintenant, il possède un véhicule autonome. En revanche, auparavant, le mode *car* ne pouvait être utilisé que par les personnes en possession d'un permis de conduire. Ici, avec l'hypothèse de véhicule autonome de niveau 5, tous les agents dont le ménage dispose d'un véhicule autonome privé peuvent l'utiliser.

En attribuant alors un véhicule autonome privé à chaque ménage motorisé dans le scénario de référence, on obtient 59 502 PAV, accessibles par 127 233 agents.

En comparaison des études de la revue de littérature 5.2, dont l'objectif est de quantifier la diminution de la possession automobile due à l'insertion des véhicules autonomes, ici, on conservera cette hypothèse d'un véhicule par ménage. On pourra observer le comportement qui en découle, les résultats sur la performance du service pourraient être moins bons, si l'hypothèse est trop radicale.

Dans les hypothèses, on ne considère pas la demande induite due à l'attractivité du mode de transport. En revanche, on considère le transfert modal possible des individus qui, avant, n'était pas en capacité de conduire (mineur, personnes âgées ou avec handicap) mais qui peuvent alors utiliser un véhicule autonome.

Au niveau de la modélisation dans MATSim, la tarification du service n'est pas appliquée, car le véhicule est possédé par le ménage. En revanche, au niveau du calcul du score (cf

équation 5.2), on applique le même coût kilométrique que pour le mode *car* dans le scénario de référence [62]. Pour la valeur du temps passé à bord, on reprend l’hypothèse de [82, 140] en mettant 75 % de la valeur pour le transport en commun, puisque les agents ne doivent pas conduire et que le confort est supérieur.

### 5.4.3 Scénario 2 : utilisation partagée

Le second scénario introduit un service de partage pour les véhicules autonomes (SAV), équivalent à des robot-taxis.

Pour ce scénario, les véhicules autonomes appartiennent à une compagnie de transport opératrice du service. Seuls quelques ménages (10 %) possèdent un PAV. Ces ménages ont été choisis comme étant ceux avec le revenu le plus élevé. Pour le reste, ils ne possèdent plus de PAV et ne peuvent pas utiliser ce mode. On retrouve alors 129 231 agents dans ce cas. Plusieurs études dans la littérature [58, 65, 103, 118] ont montré qu’en milieu urbain (Berlin, Zurich, Austin), la taille de la flotte pouvait être fixée sur 10 % de la demande. C’est-à-dire, un véhicule autonome suffit à 10 agents.

Avec ces hypothèses, on obtient une flotte de 8 019 PAV et 12 923 SAV.

La contribution taxi 5.3.2 propose des caractéristiques opérationnelles différentes pour ce service. Ici, comme pour le cas des PAV, il s’agit d’un service de porte-à-porte où le véhicule vient chercher l’agent où il se trouve et le dépose devant sa destination. La relocalisation des véhicules une fois une requête achevée n’a pas été mise en place, le véhicule reste où il est jusqu’à ce qu’il reçoive une nouvelle requête.

Comme ici, il s’agit d’un service proposé par un opérateur, une tarification est appliquée. On considère alors qu’une marge de 30 % est appliquée sur le prix kilométrique [141]. Un minimum forfaitaire est aussi appliqué correspondant au tarif kilométrique multiplié au premier quartile des distances de déplacement. La valeur du temps est laissée identique à celle des PAV.

### 5.4.4 Scénario 3 : utilisation partagée “groupée”

Le troisième scénario vient compléter les types d’utilisation des véhicules autonomes.

Dans le scénario 2, il s’agit d’un service partagé, car des agents différents (de ménages différents) peuvent utiliser les véhicules autonomes partagés. Mais comme un service de taxi classique, un seul client est pris en charge par le véhicule. Pour ce scénario, le partage du véhicule peut être simultané, comme expliqué dans la section 5.3.2.

Dans notre cas, on conserve des véhicules à 4 places, qui opèrent toujours avec un service de porte-à-porte, le but n'étant pas de se rapprocher d'un service de transport en commun.

Les hypothèses sur la taille de la flotte restent les mêmes que celles du scénario précédent.

Au niveau de la tarification, partager le véhicule permet de réduire les frais. Les tarifs appliqués sont alors ceux du scénario précédent divisés par l'occupation moyenne des véhicules partagés. Du fait du partage du déplacement, la valeur du temps a été augmentée pour être comprise entre celle des taxis autonomes du scénario 2 et celle des transports en commun.

#### 5.4.5 Résumé

Tableau 5.2 Résumé des scénarios

	base	sce1	sce2	sce3
Agents motorisés	96 805	127 233	20 841	20 841
Agents non-motorisés	53 267	22 839	129 231	129 231
Véhicules autonomes privés	0	59 502	8 019	8 019
Véhicules autonomes partagés	0	0	12 923	12 923
$\beta_{trav,car(q)}$ (\$/h)	-4,8	nd	nd	nd
$\beta_{trav,pav(q)}$ (\$/h)	nd	-1	-1	-1
$\beta_{trav,(p)sav(q)}$ (\$/h)	nd	nd	-1	-1,1
$\beta_{d,car(q)}$ (\$/m)	-0,0002	nd	nd	nd
$\beta_{d,pav(q)}$ (\$/m)	nd	-0,0002	-0,0002	-0,0002
$\beta_{d,(p)sav(q)}$ (\$/m)	nd	nd	-0,00026	-0,00023
Tarif minimal (\$)	nd	nd	0,53	0,48

Le tableau 5.2 résume les caractéristiques des différents scénarios. Il est à noter que la réservation à l'avance n'est possible pour aucun des modes.

### 5.5 Résultats

Après simulation, les fichiers de sortie de MATSim, correspondant aux évènements qui ont lieu pendant l'étape *mobsim* (5.1), sont analysés afin de produire des résultats.

Ces résultats vont être présentés sous différentes catégories, déterminés à l'aide de l'ontologie.

Si l'on suit, la navigation de l'ontologie expliquée dans le chapitre précédent, pour ce cas d'application :

- l'utilisateur, identifié comme la ville de Montréal, est alors *Local Authority*
- le mode est *Autonomous Vehicle*

— l'étude est *Share Comparision*

On retrouve donc premièrement des résultats qui traduisent du comportement des agents et des véhicules dû à l'introduction d'un mode autonome, suivi de résultats sur la performance des modes MaaS et enfin les impacts sur l'environnement.

### 5.5.1 Conséquences comportementales

#### Changement de modes

L'une des questions soulevée par l'insertion future des véhicules autonomes est : vont-ils remplacer les transports en commun ? Dans cette section, on s'intéresse alors aux changements de mode des agents entre le scénario de référence et les scénarios avec mode autonomes.

La figure 5.3 montre une stabilité de la part modale des modes motorisés (respectivement *car* (auto) et *car\_passenger* (auto-passager) pour le scénario de base et PAV, PAV+SAV et PAV+PSAV pour les scénarios 1, 2 et 3). On passe d'une part modale de 63,3 % à 60,0 %, 63,9 % ou 59,0 %. Les modes actifs, et les TC gagnent même un peu de part, qui peut s'expliquer par une oscillation des résultats au cours des itérations vers une valeur d'équilibre n'est peut-être pas encore atteinte.

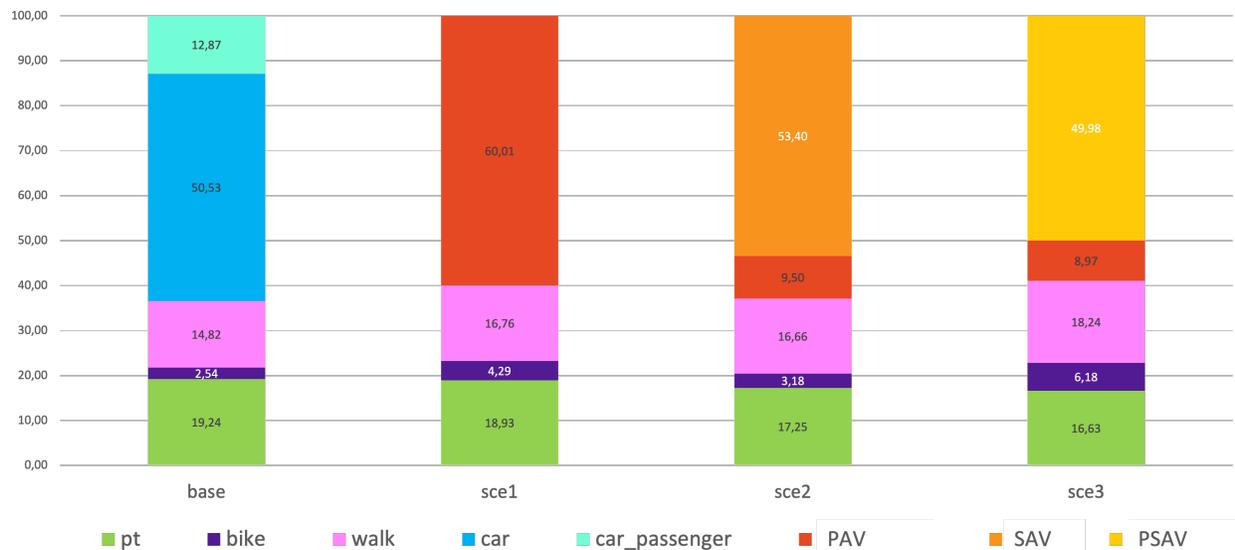
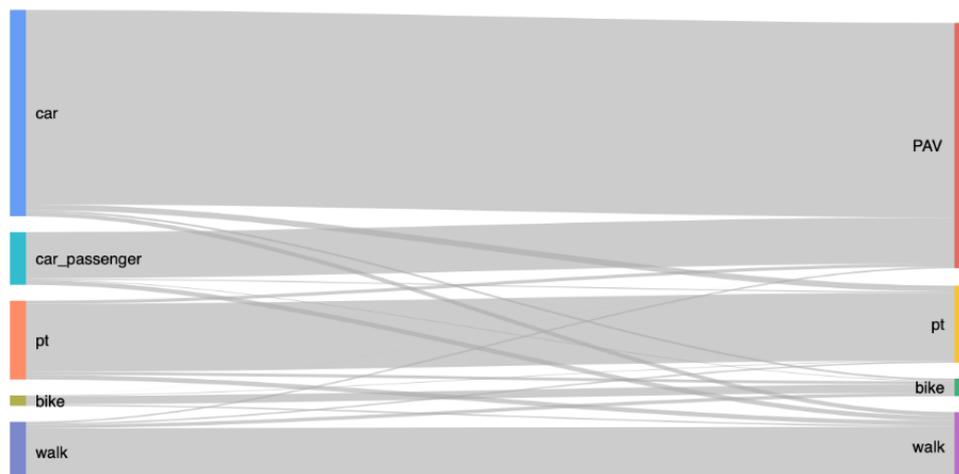


Figure 5.3 Parts modales pour les différents scénarios

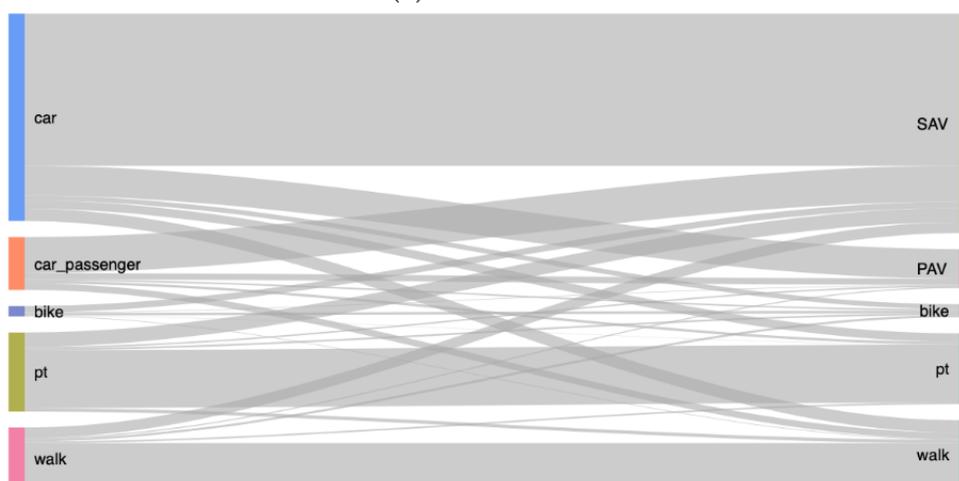
Pour savoir ce qu'il se passe plus précisément au niveau du comportement des agents, les diagrammes de Sankey 5.4 montrent comment chaque agent, selon le mode utilisé dans le

scénario de base, change de mode dans les nouveaux scénarios. Dans le scénario 1, seuls 2% des utilisateurs de PAV utilisaient les TC, la marche ou le vélo dans le scénario de base. En effet, seuls les agents qui disposaient d'un véhicule peuvent utiliser les PAV. Et parmi ces agents-là, la plupart utilisaient déjà la voiture et ils continuent, ou pour le reste, la meilleure option reste d'utiliser les TC, la marche ou le vélo comme mode de déplacement, par exemple dans le cas des déplacements courts pour les modes actifs. Sachant que seuls 7 % des agents motorisés se tournent vers les modes plus durables (TC, marche, vélo) et 1 % des agents déjà motorisés, mais n'utilisant pas leur auto se tournent vers les PAV, on peut en conclure que pour les paramètres de simulations, les PAV ne provoquent pas un changement modal important par rapport à la situation actuelle.

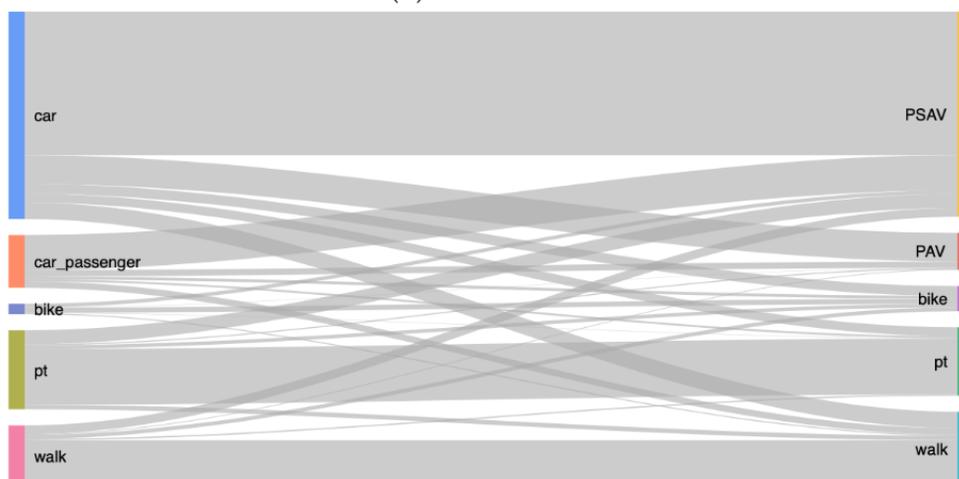
Lorsque l'on regarde le scénario 2 (5.4b) et 3 (5.4c), sachant que les modes partagés (resp. SAV et PSAV) sont accessibles à tout le monde, la part d'utilisation de ces modes pour les agents utilisant auparavant les modes durables est plus importante (resp. 15 % et 13 %).



(a) base -&gt; sce1



(b) base -&gt; sce3



(c) base -&gt; sce3

Figure 5.4 Transfert modal entre le scénario de référence et le scénario de véhicules autonomes

## Distances parcourues

Nous nous intéressons maintenant aux impacts sur les distances parcourues.

Premièrement, ce sont les distances passagers qui sont analysées pour s'intéresser au comportement des agents. Le tableau 5.3 présente les kilomètres totaux (passenger-kilometers traveled (PKT)) et moyens par déplacement parcourus par les agents.

Tableau 5.3 Résultats sur les PKT et distances passager moyennes

Modes	Tous	car	car_passenger	TC	marche	vélo	PAV	SAV	PSAV
<b>PKT (<math>10^6</math> km)</b>									
Base	4,54	2,99	0,35	0,78	0,12	0,13			
Sce1	4,70			0,78	0,18	0,19	3,55		
Sce2	4,76			0,68	0,15	0,12	0,64	3,18	
Sce3	5,09			0,67	0,24	0,27	0,58		3,33
<b>Distances moyennes (km)</b>									
Base	11,14	14,55	10,17	9,97	1,99	12,77			
Sce1	11,52			10,15	2,65	10,96	14,57		
Sce2	11,70			9,68	2,25	9,32	16,53	14,69	
Sce3	12,48			9,88	3,23	10,79	16,06		16,41

Pour les scénarios 1 et 2, on observe respectivement une augmentation de 3,5 % et 5 % par rapport au scénario de base au niveau des kilomètres parcourus. Ceci s'explique par le transfert modal des *car\_passenger* qui étaient téléportés (distance à vol d'oiseau) dans le scénario de base, une des limites de MATSim et qui utilisent maintenant un mode autonome avec une distance sur le réseau.

La distance moyenne pour le mode PAV dans le scénario 1 reste stable par rapport à la distance des voitures dans le scénario de base, de même pour les SAV dans le scénario 2. Les valeurs de PAV pour le scénario 2 et 3 sont, elles, plus élevées, mais c'est dû aux déplacements des agents sélectionnés pour avoir un PAV qui font initialement des déplacements plus longs. En revanche, pour les PSAV dans le scénario 3, on observe une augmentation de 12 % qui s'explique par les détours réalisés lors du déplacement pour récupérer différents passagers dans le même véhicule.

Les évolutions importantes s'observent au niveau des distances parcourues par les véhicules. Le tableau 5.4 présente les VKT et distances moyennes par déplacement ou par véhicule totales sur le réseau routier. Les scénarios 1 et 2 présentent une très grande augmentation des VKT (resp. 71 % et 85 %). Pour le scénario 1, dans les  $2,13 \cdot 10^6$  km produits en plus par rapport au scénario de base,  $0,52 \cdot 10^6$  km (24 %) proviennent de la demande induite du

transfert modal et  $1,61 \cdot 10^6$  km à cause des déplacements à vide qui sont générés entre les requêtes pour aller chercher différents agents. Pour le scénario 3, l'augmentation est moins importante, car en comparaison des deux premiers scénarios, celui-ci permet à plusieurs agents d'être dans le même véhicule. De plus, le répartiteur des requêtes minimise mieux les distances parcourues par les véhicules. En comparaison du scénario 2, il tient compte d'où se rendra un véhicule occupé, alors que dans le scénario 2, il enverra automatiquement un nouveau véhicule, même si entre temps, un se libère plus proche. La part de kilomètres à vide est d'ailleurs plus faible pour les PSAV. Au niveau des distances moyennes par déplacement, on observe l'effet des déplacements réalisés à vide, sachant que d'après le tableau 5.3, les distances avec passagers pour les modes autonomes sont sensiblement égales à celle de *car* dans le scénario de base. En revanche, pour les PSAV du scénario 3, la distance moyenne des véhicules est inférieure à celle des passagers, car les passagers peuvent être regroupés. Avec la distance moyenne par véhicule, on observe que les véhicules partagés sont beaucoup plus utilisés.

Tableau 5.4 Résultats sur les VKT et distances totales moyennes

Scénario Modes	Base car	Sce1 PAV	AV*	Sce2 PAV	SAV	AV**	Sce3 PAV	PSAV
VKT ( $10^6$ km)	2,98	5,11	5,12	0,97	4,55	4,14	0,87	3,27
Extra VKT ( $10^6$ km)		2,13	2,54			1,16		
Évolution VKT		+71 %	+85 %			+39 %		
Distance moy/véh. (km)	30,8	85,8		120,4	352,3		108,9	252,8
Distance moy/dép. (km)	14,55	20,96		25,11	21,06		24	16,12
Proportion km à vide		31 %		35 %	31 %		34 %	21 %

\*AV=PAV+SAV

\*\*AV=PAV+PSAV

## Congestion

Avec l'augmentation des kilomètres parcourus, se pose alors la question de la congestion ? Si les véhicules se déplacent plus, le réseau arrive peut-être à saturation.

La congestion a été calculée pour tous les liens du réseau comme le rapport entre le débit de véhicules entre 7 et 8 h et la capacité (en tenant compte du facteur de réduction de la population). La carte 5.5 représente le ratio calculé sur chaque lien. Une valeur proche de 1 (en rouge) signifie que la capacité est atteinte, une valeur proche de 0 (en jaune clair) signifie que la circulation se fait en écoulement libre. Pour une meilleure comparaison que visuelle, un ratio moyen a été calculé pour tout le réseau en faisant la moyenne pondérée avec la longueur

des liens. Les valeurs sont très faibles car tous les types de voirie sont inclus, comme les routes de desserte ou résidentielles. De plus d'après le MTQ [98], la circulation est considérée congestionnée dès que le ratio dépasse 0,7. La somme de la longueur des liens dans ce cas-là a été calculée. Le tableau 5.5 présente ces résultats. Au niveau de la capacité, la valeur actuelle pour des véhicules non automatisés a été laissée, l'hypothèse d'une amélioration de la capacité, car les véhicules autonomes peuvent conduire les uns plus proches des autres, n'a pas été considérée.

Tous les scénarios connaissent une augmentation de la congestion. Elle est plus forte dans les scénarios 1 et 2. Ce sont les deux scénarios qui connaissent la plus grosse augmentation des VKT. En effet, le fait que les véhicules ne puissent pas prendre plusieurs passagers à la fois, augmente le nombre de véhicules en circulation sur le réseau. Mais ce sont surtout les déplacements à vide induits pour aller chercher une nouvelle personne qui génèrent plus de trafic.

Tableau 5.5 Indicateurs de congestion

Scénario	base	sce1	sce2	sce3
$r_{moyen}$	0,070	0,090	0,086	0,076
$km_{r>0,7}$	639	1073	1066	682

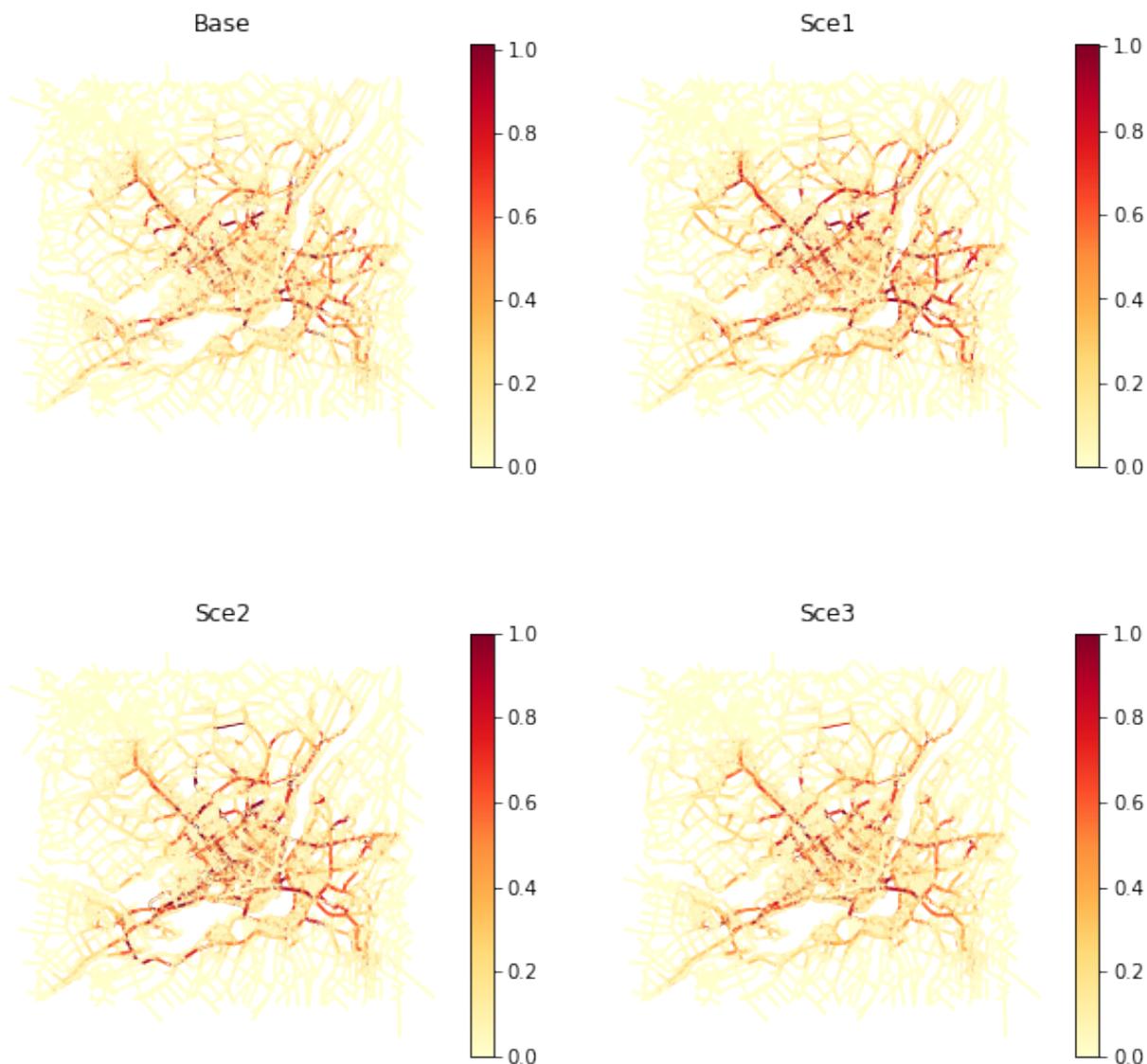


Figure 5.5 Cartes de la congestion de Montréal pour les différents scénarios

### 5.5.2 Performance du service

Les mobilités partagées autonomes correspondent à de modes offerts sous la forme de service. On peut alors mesurer la performance du service offert. Pour les opérateurs de ce type de service, il s'agit bien souvent de trouver un compromis entre offrir un bon niveau de service qui soit attractif, mais aussi de maximiser l'utilisation de leur véhicule, afin que ce soit rentable. Pour les transports à la demande (TAD), le niveau de service se mesure usuellement à travers le temps d'attente. Un opérateur offre un bon niveau de service lorsque le temps d'attente

est faible.

### **Temps de déplacement et temps d'attente**

La compétitivité entre les modes de transport peut s'évaluer au niveau de leur utilité, souvent fonction du temps de déplacement, mais aussi du coût monétaire.

En regardant les temps de déplacement (fig. 5.6a), on observe une forte augmentation pour les AV en comparaison de l'auto dans le scénario de base. Pour les modes autonomes, comme c'est le cas pour les TC, le temps de déplacement se décompose comme la somme entre le temps d'attente et le temps en déplacement (c'est-à-dire dans le véhicule). Nous avons vu précédemment que les distances de déplacement restent semblables (sauf pour le scénario 3). En revanche, une augmentation du temps en véhicule est visible (fig. 5.6b). Elle est due à la congestion, qui est plus importante dans les scénarios 1 et 2 et les détours générés dans le scénario 3, mais aussi elle tient compte aussi du fait que les agents vont souvent d'abord marcher entre leur lieu d'activité et un lien pour les AV, alors que pour le mode auto conventionnel, ils sont directement dans le véhicule sur le réseau.

En dehors des temps en déplacement qui connaissent une augmentation, le facteur principal dans l'augmentation des temps de déplacement est l'attente du AV (fig. 5.6c).

Il est à ne pas oublier que la réservation à l'avance n'est pas possible et que dans tous les cas, l'agent ne commande un véhicule que lorsqu'il termine son activité, il faut donc attendre qu'un véhicule fasse le trajet pour venir le chercher (s'il n'est pas déjà sur place) et en cas de sur-demande, qu'un véhicule soit disponible.

Si l'on regarde sur la figure 5.7, on distingue bien que les temps d'attente sont bien plus avantageux au centre de l'île dans les zones denses. Sur la figure 5.7a, on distingue clairement en rouge sur l'extérieur, les agents qui se trouvent bloqués en périphérie sans véhicule pour venir les chercher. En effet, pendant l'heure de pointe, l'offre est inférieure à la demande et les requêtes ne sont plus traitées dans leur ordre d'apparition, mais dès qu'un véhicule se libère, il répond à la requête la plus proche. On distingue aussi en plus sur les périphéries des agents qui ont eu la chance d'attraper des véhicules rapidement. Initialement, les véhicules autonomes partagés, ont été mis aléatoirement sur les routes résidentielles de l'île.

Par ailleurs, les valeurs médianes (fig.5.6d) présentent de meilleurs résultats, car il y a des valeurs extrêmes qui font augmenter la moyenne. Dans le scénario 2 pour les SAV, il peut s'agir des personnes bloquées en périphérie lorsque la demande est supérieure à l'offre. C'est pour cela qu'on observe un temps d'attente très important pendant l'heure de pointe (HP) du matin, quand les agents quittent leur domicile qui peut être éloigné du centre, mais le pic est bien plus bas dans la pointe de l'après-midi, car ils sont déjà dans le centre, proches de

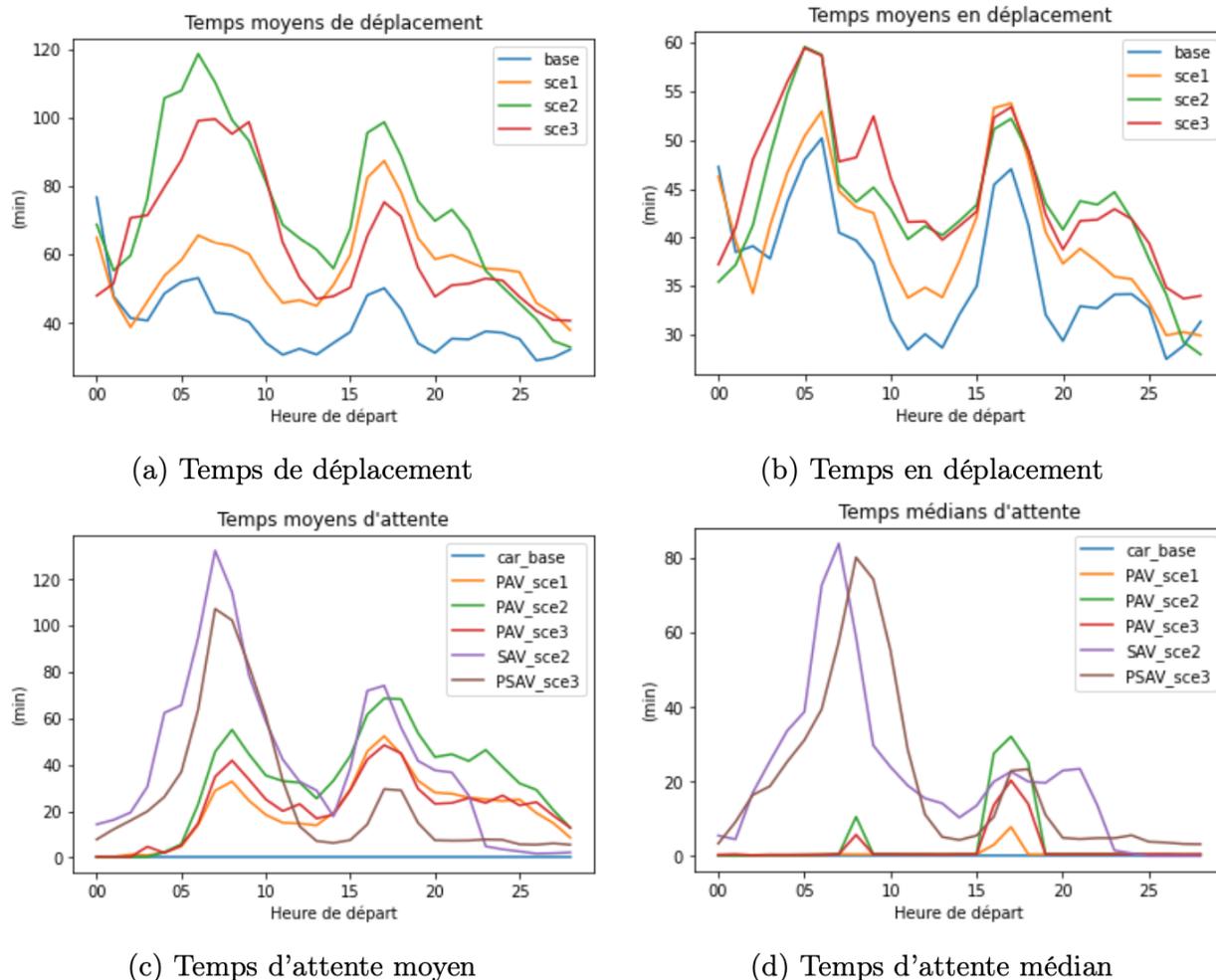


Figure 5.6 Temps moyen selon l'heure de déplacement

véhicules en service. Il s'agit plutôt de l'inverse pour les PAV, en effet le matin, le véhicule est déjà à leur domicile. On a une valeur élevée pour la moyenne (faible pour la médiane) pour les ménages où il y a plusieurs agents qui ont besoin du véhicule en même temps. Le pic de la pointe de l'après-midi est plus important parce qu'il peut arriver que les distances entre les lieux d'activité de deux agents du même ménage soient plus élevées que quand il s'agissait de faire le retour à vide entre le lieu d'activité et la maison.

Les temps d'attente dépassent respectivement le seuil des 15 minutes d'attente dans 32 %, 55 % et 51 % des cas pour les PAV dans le scénario 1, pour les SAV dans le scénario 2 et PSAV dans le scénario 3. L'option de rejeter la requête si le seuil était atteint n'a pas été activée. Le service arrive alors à s'occuper de toutes les requêtes de déplacement, il ne reste pas d'agents à la fin de la journée qui n'ont pas pu se rendre à leurs activités.

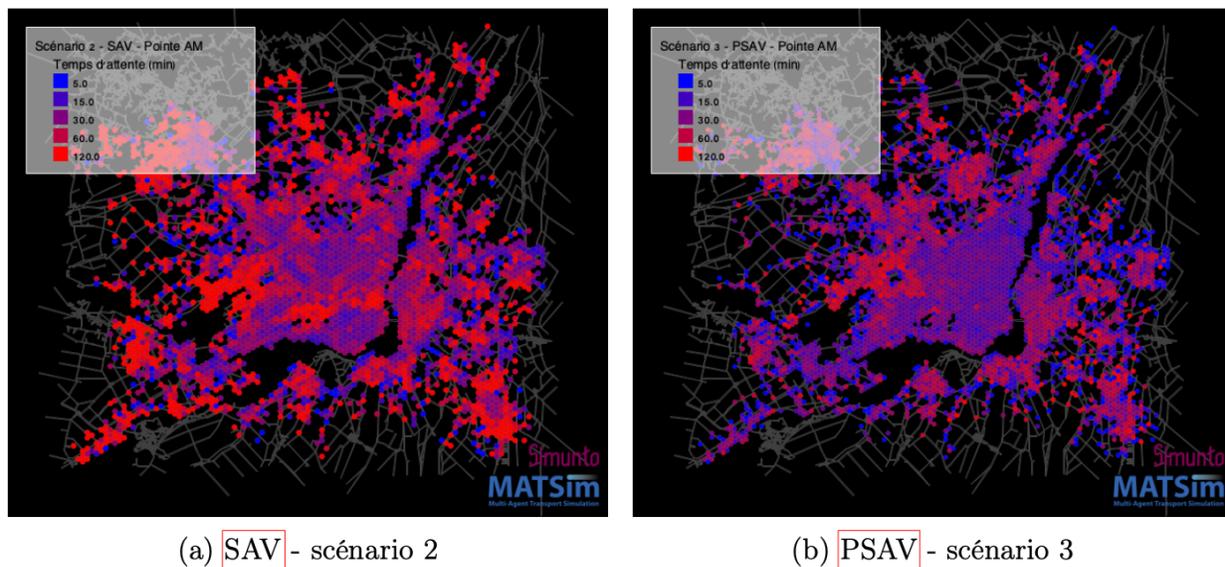


Figure 5.7 Carte des temps d'attente moyens selon la position de l'origine du déplacement

### Utilisation des véhicules

Observer l'utilisation des véhicules va permettre de justifier les temps d'attente importants dans les scénarios 2 et 3. En effet, dès 7h du matin, la totalité des véhicules des flottes partagées (fig. 5.9 : SAV et fig. 5.10 : PSAV) est utilisée. On observe l'absence de gris correspond à l'état *STAY* où les véhicules sont à l'arrêt et disponibles. L'utilisation totale de la flotte de véhicules correspond au pic du temps d'attente. Au fur et à mesure, les demandes sont traitées et le temps d'attente diminue même si la flotte reste totalement utilisée pour les SAV.

Dans la pointe de l'après-midi, les agents sont déjà mieux positionnés par rapport aux véhicules donc il y a moins de déplacements à vide pour les SAV et PSAV (*EMPTY\_DRIVE* ou *0pax* (0 passagers) en bleu sur les figures 5.9 et 5.10). Nous avons vu que l'attente était aussi moins importante.

Comme expliqué dans la partie sur l'attente, pour les PAV, les déplacements à vide sont plus importants dans l'après-midi entre les lieux d'activités des agents. On remarque que la flotte, lors d'une possession privée, reste sous-utilisée. 88 % des véhicules sont en attente en moyenne pendant une simulation. Cependant, cela n'empêche pas d'avoir des temps d'attente importants lorsque deux agents du même ménage veulent utiliser un véhicule en même temps. Pour les modes partagés, durant une journée active (entre 6h30 et minuit), l'utilisation des véhicules est plus rentabilisée avec seulement 2,6 % des SAV qui ne sont pas utilisés et 31 %

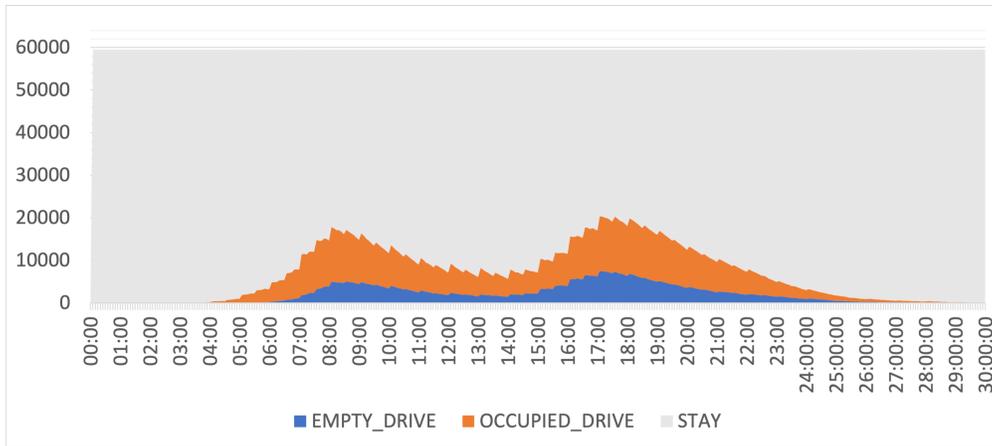


Figure 5.8 Histogramme des PAV selon leur tâche en cours durant la simulation dans le scénario 1

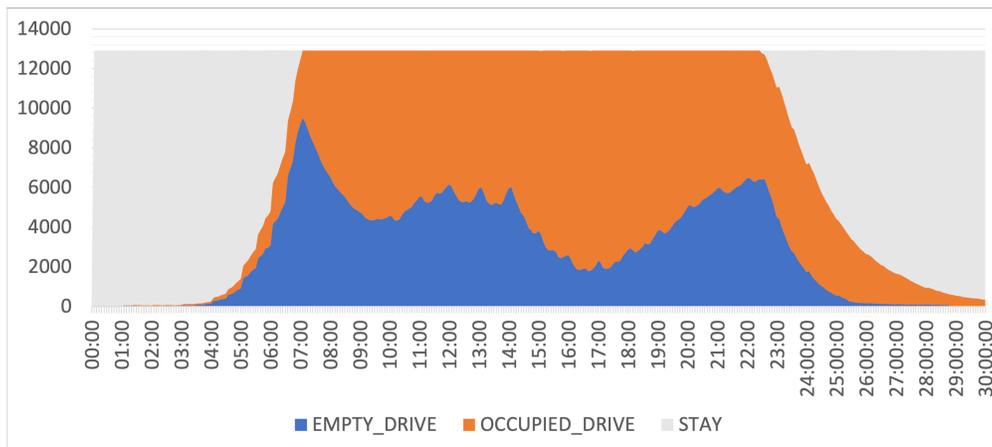


Figure 5.9 Histogramme des SAV selon leur tâche en cours durant la simulation dans le scénario 2

pour les PSAV.

Il est à noter qu'ici les déplacements à vide (en bleu foncé) se font entre le moment où un agent fait une requête et le véhicule qui part le chercher. Il n'y a pas de relocalisation anticipée qui se fait lorsqu'un véhicule a terminé une requête. Il attend (en gris) où il se trouve jusqu'à ce qu'on le rappelle à nouveau.

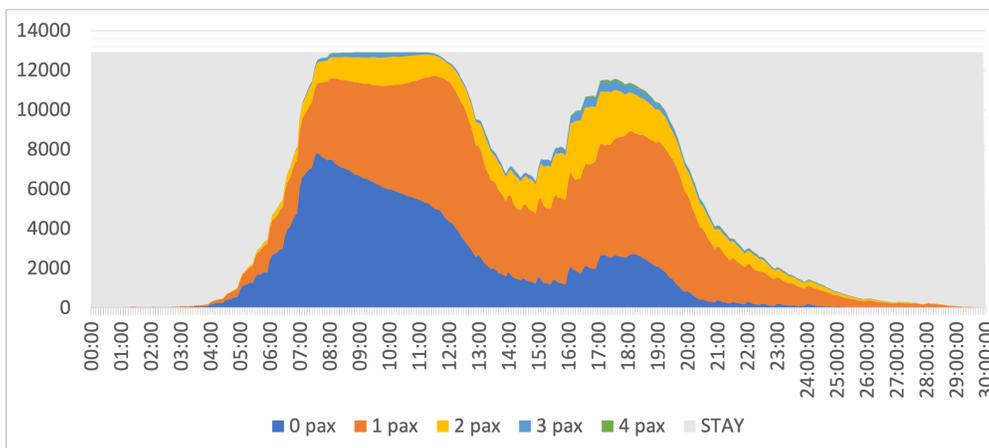


Figure 5.10 Histogramme des PSAV selon leur tâche en cours durant la simulation dans le scénario 3

### Occupation des véhicules

Du point de vue des opérateurs, l'objectif est d'offrir le meilleur niveau de service pour être attractif, mais aussi de rentabiliser l'utilisation des véhicules, car seuls les kilomètres réalisés avec un passager à l'intérieur apportent un revenu, alors que ceux à vide, en font perdre.

L'occupation des véhicules correspond au nombre de passagers par véhicule lors d'un déplacement. On calcule deux types d'occupation, l'occupation dite "nette" (éq. 5.3) qui ne tient compte que des kilomètres parcourus lorsque le véhicule prend en charge un agent, et l'occupation dite "brute" (éq. 5.4) qui calcule le ratio en incluant tous les kilomètres parcourus et tient compte du surplus de kilomètres à vide. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.6. Pour l'occupation brute, la valeur varie selon la période calculée. En effet, selon le moment de la journée, la part de kilomètres à vide est plus ou moins importante. On considère alors, la moyenne sur toute la simulation (00:00 – 30:00), sur une journée active (06:30 – 24:00) et pendant l'HP du matin (07:00 – 08:00).

$$occupation_{nette} = \frac{PKT}{VKT_{occupied}} \quad (5.3)$$

$$occupation_{brute} = \frac{PKT}{VKT} \quad (5.4)$$

Avec les PSAV, on obtient une occupation (nette) qui est supérieure au scénario de base. Toutefois, sachant que les véhicules ont une capacité de 4 passagers à la fois, cette occupation n'est pas maximisée.

Au niveau de l'HP, l'occupation brute est supérieure à celle sur la simulation pour le cas des PAV car le matin, les véhicules sont déjà présents au domicile. En revanche, pour les SAV, PSAV, l'occupation est beaucoup plus faible, car les véhicules initialement au centre, partent à vide chercher les agents.

La diminution de l'occupation permet aussi d'expliquer l'augmentation de la congestion, car il faut plus de véhicules pour déplacer autant de personnes.

Tableau 5.6 Calculs de l'occupation des véhicules

Scénario	Base	Sce1	Sce2		Sce3	
Modes	car	PAV	PAV	SAV	PAV	PSAV
Occupation nette	1,17	1	1	1	1	1,29
Occupation brute :						
00:00 – 30:00	1,17	0,70	0,66	0,70	0,67	1,02
06:30 – 24:00		0,70	0,66	0,63	0,66	0,88
07:00 – 08:00		0,78	0,74	0,38	0,75	0,49

### 5.5.3 Conséquences environnementales

Les données des ventes des véhicules au Canada [142, 143] ont permis de calculer les proportions de chaque classe de voiture. En couplant ces proportions aux VKT du scénario de base, on obtient alors les kilomètres parcourus pour chaque classe de véhicule.

En multipliant ces valeurs, aux taux kilométriques des émissions de GES et des consommations énergétiques pour chaque type de véhicule lorsqu'il est en opération [144], on obtient la consommation énergétique totale et les émissions de GES.

Tableau 5.7 Coefficients utilisés dans le calculs des impacts environnementaux

	Part du parc auto. (%)	Conso. éner. (MJ/km)	émission GES (g GEG/km)
Berline	16	7,68	592
VUS	61	12,48	768
Pick-Up	23	13,28	992

D'après la littérature [59, 116, 117], grâce à l'automatisation de la conduite et la communication entre les véhicules, la conduite des véhicules autonomes devraient être plus souple et ainsi consommer moins d'énergie. La réduction de la consommation énergétique et émission de GES est évaluée autour de 10 %. Nous appliquons cette hypothèse sur les taux kilométriques de Chester et al. [144] pour le calcul dans les scénarios avec véhicules autonomes.

Pour la constitution de la parc de véhicules autonomes, nous considérons que les véhicules des modes partagés dans le scénario 2 et 3, respectivement SAV et PSAV, sont à 100 % des berlines. Pour les véhicules privés, nous proposons deux scénarios :

**Hypothèse A** : proportion du type de véhicule égale aux ventes actuelles

**Hypothèse B** : 100 % des véhicules sont des berlines

Le tableau 5.8 présente les résultats obtenus.

Tableau 5.8 Consommation énergétique et émissions de GES

	base	hyp.A			hyp.B		
		sce1	sce2	sce3	sce1	sce2	sce3
Consommation énerg. ( $10^6$ MJ)	35,5	54,7	41,8	31,9	35,3	38,1	28,6
évolution conso.		+54 %	+18 %	-10 %	0 %	+8 %	-19 %
émission GES ( $10^9$ g GEG)	2,36	3,64	3,11	2,36	2,72	2,94	2,21
évolution émission		+54 %	+32 %	0 %	+15 %	+25 %	-6 %

Comme attendu par une si grande augmentation des VKT, on observe une augmentation de l'énergie totale consommée et des GES émis.

Le seul scénario répondant à l'objectif d'une réduction de la pollution est le scénario 3. De par la limitation des kilomètres parcourus à vide pour le mode PSAV, la conduite automatisée plus fluide et le changement de modèle de véhicule, on observe une diminution de la consommation énergétique.

La composition du parc de véhicules privés peut cependant limiter l'augmentation, en passant d'une augmentation de 54 % à 15 % pour les émissions de GES dans le scénario d'une utilisation 100 % privés des véhicules autonomes. Cet effet est plus limité dans le scénario 2 car le nombre de véhicules privés est déjà plus réduit. On observe toutefois une augmentation de 25 % des GES.

Les améliorations de la conduite par son automatisation ne permettent pas de compenser les kilomètres roulés à vide au niveau des impacts énergétiques.

Les calculs ont été réalisés pour des véhicules à essence, les véhicules autonomes seront probablement hybrides, hybrides rechargeables ou entièrement électriques. Ces véhicules ne sont pas considérés ici, car la gestion de la charge pour des véhicules électriques complexifiait le modèle et allongeait les temps de simulation.

De plus, il est à noter que les taux kilométriques considérés sont seulement basés sur l'utilisation du véhicule, ils ne tiennent pas compte de tous les composants du cycle de vie.

## 5.6 Discussion

### 5.6.1 Limite des hypothèses

Dans la section précédente, nous avons vu les différents résultats issus des simulations des AV. MATSim permet de calculer de nombreux indicateurs sur ce qu'il se passe au cours de la simulation et à différents degrés d'agrégation. Dans cette partie, nous allons discuter des résultats obtenus, en faisant notamment référence aux hypothèses faites dont ils dépendent fortement.

#### Taille de la flotte

L'analyse des temps d'attente (fig. 5.6c) et de l'utilisation des véhicules (fig. 5.9, 5.10) permettent de se rendre compte que la taille de la flotte n'est pas suffisante pour offrir un bon niveau de service. L'hypothèse de départ (1 véhicule pour 10 agents) avait été faite basée sur la littérature. Les résultats étaient présentés avec les mêmes algorithmes de répartition pour la ville de Berlin, en Europe. Le résultat ne semble pas être transférable pour une ville d'Amérique du Nord comme Montréal. Pour les résultats présentés en Amérique du Nord, le modèle utilisé n'était pas le même et le degré de résolution du réseau différent. Il faudrait donc revoir cette hypothèse et augmenter la taille de la flotte pour offrir un meilleur niveau de service.

#### Calibration

En regardant les temps d'attente, on constate un problème de calibration pour les modes autonomes. En effet, les agents, en subissant une attente si longue, choisiraient un autre mode de transport, ce qui n'est pas le cas ici. La pénalité affectée au fait d'attendre est plus intéressante que de marcher pendant une durée inférieure par exemple. La calibration n'a pas pu être faite dans la durée du projet, mais c'est un des points à améliorer. En calibrant ce paramètre, le coût perçu de déplacement avec ce niveau d'attente serait alors bien plus élevé et on observerait un gros changement modal vers les autres modes tels que la marche, le vélo ou les TC. Pour rattraper ce transfert modal, il faut adapter la taille de la flotte comme cela a été souligné dans le point précédent.

De plus, avec les paramètres de calibration actuels pour le scénario de Montréal, le coût monétaire ne possède pas de gros impact en comparaison de la durée de déplacement. L'écart effectué au niveau du prix kilométriques entre les scénarios n'est pas visible.

## Co-voiturage

Pour les PAV, le temps d'attente est important non pas à cause de la taille de la flotte, mais du fait qu'il n'y ait qu'un seul véhicule par ménage avec parfois différents agents qui veulent l'utiliser en même temps, et que le co-voiturage n'est pas permis. Permettre une seule personne à la fois dans le véhicule particulier est équivalent au pire cas pour l'augmentation des distances à vide, car si l'on réussit à gérer l'ajout de plusieurs passagers dans le véhicule privé, les aller-retour à vide entre départs assez proches temporellement devraient disparaître.

## Échantillonnage

Pour la réalisation de ce projet, les travaux ont d'abord été réalisés pour un échantillon de 1 % de la population. C'était un échantillon trop faible pour être fiable, mais permettait de voir si tout fonctionnait [139]. Dans la limite des temps de calculs nécessaire, l'échantillon a été augmenté à 5 %. En augmentant la taille de l'échantillon, la densité de déplacements augmentera, ce qui ne peut être que bénéfique pour augmenter la probabilité qu'un véhicule finisse sa course à proximité d'une requête ou bien pour regrouper les déplacements [145]. Pour des résultats encore plus fiables, l'objectif serait d'atteindre 10 ou même 25 % de la population.

## Les effets ?

Une des pistes d'amélioration, en plus d'une meilleure calibration, est d'augmenter la taille de la flotte. Mais on peut se demander quels seront les impacts au niveau des résultats obtenus. Sachant qu'ici les gens utilisent le mode malgré l'attente, c'est un peu comme si on avait le pire cas où l'utilisation est maximale. Mais qu'en est-il d'augmenter le nombre de véhicules ? Avoir un nombre de véhicules plus importants, permet d'avoir plus de véhicules disponibles, l'utilisation par véhicule est réduite. Si l'on n'arrive pas à saturation, il y aura des véhicules disponibles pour répondre à la requête. En augmentant le nombre de véhicules dans la ville, on augmente aussi la probabilité qu'un véhicule se trouve plus proche d'un agent qui fait une requête. Ainsi, le nombre de véhicules en circulation augmente, mais les distances parcourues à vide peut-être pas. C'est l'équilibre que cherche à trouver l'opérateur qui doit rentabiliser son achat de véhicules.

On retrouve aussi cette notion d'équilibre au niveau de l'analyse de cycle de vie, avoir plus de véhicules signifie peut-être moins de kilomètres en extra roulant à vide et donc moins d'émissions issues de la circulation, mais implique aussi de plus grosses émissions au niveau de la construction des voitures et des infrastructures si le nombre de véhicules dans la flotte

est plus grand.

### 5.6.2 Analyse de l'équité

Avec les avantages du score calculé pour chaque agent, on peut faire des analyses d'équité au sein de la population. Dans les données fournies, les agents possédaient une classe de revenu du ménage. Comme expliqué, ceux avec un revenu plus élevé et motorisés possédaient un PAV dans les scénarios 2 et 3. L'utilité reste identique pour tous les agents, ils ont donc la même perception des déplacements, mais selon leurs déplacements et la performance du service dont ils profitent, leurs scores seront différents.

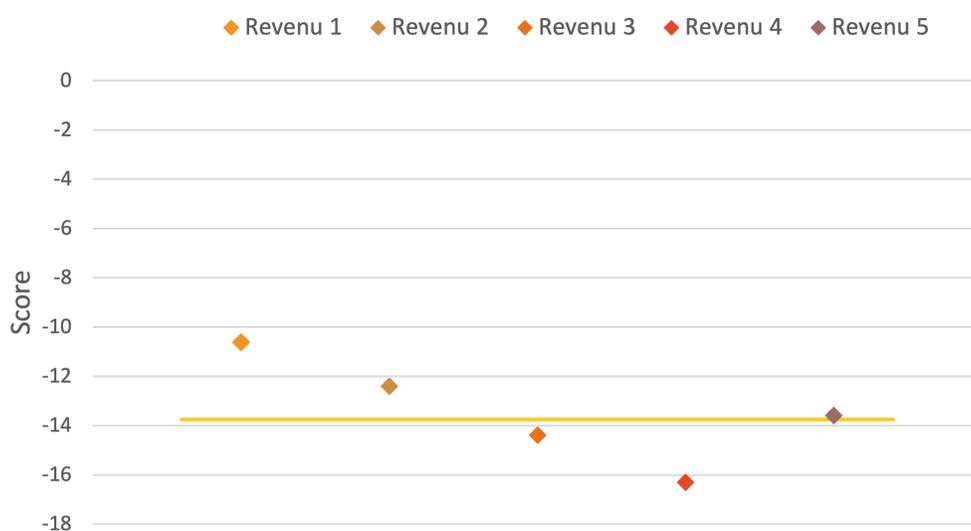


Figure 5.11 Relation entre le revenu et le score

La figure 5.11 présente les scores moyens selon les différentes classes de revenu pour le scénario 2. Le revenu 5 est à prendre à part, car ce sont des utilisateurs de PAV en majorité alors que les 4 premiers utilisent surtout les SAV. On constate une diminution de la valeur du score lorsque le revenu augmente. Les figures 5.12 et 5.13 expliquent ceci. Nous avons vu précédemment que les temps d'attente étaient bien plus faibles dans les zones denses. On retrouve la même forme au niveau du score qui est meilleur dans ces zones centrales 5.13. En revanche, si l'on regarde la localisation des ménages selon leur revenu, les ménages les plus aisés vivent plus en en-dehors de la ville, où le service est moins bon.

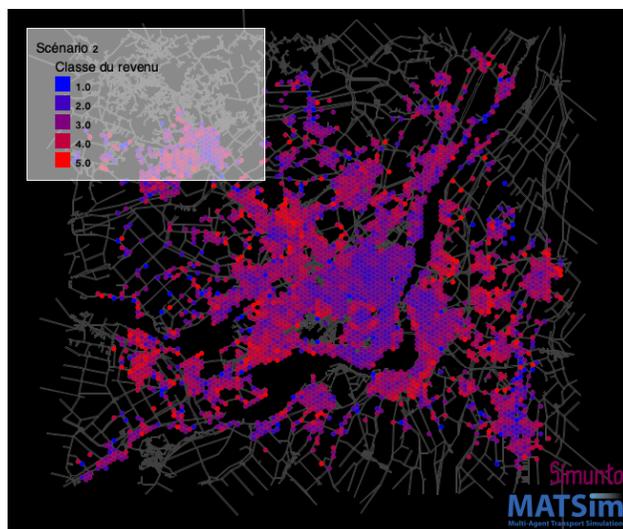


Figure 5.12 Carte d'agrégation des ménages selon leur revenu

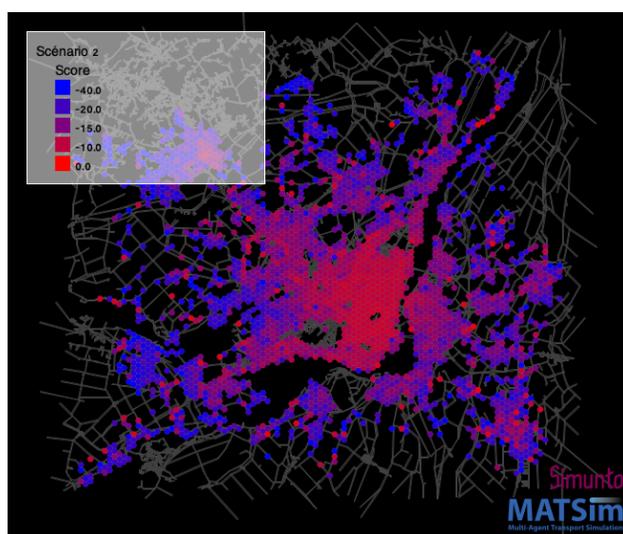


Figure 5.13 Carte d'agrégation des ménages selon leur score

## 5.7 Conclusion

Ce travail a permis d'explorer et de comparer les impacts de trois scénarios d'utilisations possibles pour les véhicules autonomes. Les scénarios ont montré qu'avec une utilisation individuelle, et des véhicules à essence, ce type d'utilisation ne se dirige pas vers une réduction des gaz à effet de serre. Pour tous les scénarios, on constate une augmentation de la congestion et des temps de déplacements. Compensés par l'augmentation du confort en déplacement, ces externalités n'engendrent pas de transfert modal important.

L'outil MATSim utilisé est logiciel de simulation et non pas un modèle de prévision. Les résultats présentés sont sensibles aux hypothèses qui ont été appliquées.

La demande totale de déplacements simulée était la même entre le scénario de référence et les scénarios avec les véhicules autonomes. La demande induite qui pourrait créer de nouveaux déplacements non-existant grâce à l'attractivité du mode, ou des déplacements plus longs en changeant de lieux d'activité ou en habitant plus loin n'a pas été considérée. Dans cette étude, les stationnements n'ont pas été étudiés. Cependant, la littérature soulève des impacts importants de ce côté-là. Des économies au niveau des infrastructures pour stationner les véhicules pourraient être faites, car les véhicules pourraient trouver eux-mêmes une place de stationnement plus éloignée du centre après avoir déposé le passager, mais ceci augmenterait les distances parcourues par les véhicules [30], et ainsi la congestion et les émissions des GES.

## 5.8 Synthèse

Le tableau 5.14 synthétise les résultats obtenus pour chaque utilisation des véhicules autonomes.

	PAV	SAV	PSAV
Utilisation des transports en commun et modes actifs	☹️	☹️	☹️
Distances individuelles	☹️	☹️	☹️
Distances parcourues	☹️ ☹️	☹️ ☹️	☹️
Congestion	☹️	☹️	☹️
Consommation énergétique	☹️ ☹️	☹️	😊
Émissions GES	☹️ ☹️	☹️	😊
Maximisation de l'utilisation des véhicules	☹️	😊	😊
Déplacements à vide	☹️ ☹️	☹️ ☹️	☹️
Temps d'attente	☹️	☹️ ☹️	☹️ ☹️

Figure 5.14 Tableau de synthèse des résultats des simulations par scénario

## CHAPITRE 6 CONCLUSION

Ce dernier chapitre clôture ce mémoire constitué de deux projets de recherches autour des mobilités innovantes. Le premier consistait en la création d'une ontologie permettant d'identifier les bons indicateurs pour mesurer les impacts et la performance des modes de transport innovants. Le second, lui, se focalisait sur un cas d'application possible de mesure d'impacts et de performances des modes de transport innovants à travers des scénarios d'utilisation de véhicules autonomes. Il ne s'agissait pas simplement de calculer ces indicateurs, mais aussi de modéliser ces scénarios et produire des simulations.

Cette conclusion se découpe en trois sections, avec la première qui rappelle une synthèse des travaux qui ont été effectués pour les deux projets. La seconde section présente les limitations de ce qui a été présenté dans ce mémoire. La dernière section propose des voies d'amélioration pour répondre à ces limitations, mais aussi pour explorer de nouvelles pistes de continuation de ces projets.

### 6.1 Synthèse des travaux

Le premier objectif était de réaliser, à l'aide d'une ontologie, un support qui permettrait d'identifier des indicateurs sur les mobilités innovantes. Selon les intérêts des utilisateurs, son rôle, les modes modélisés, le type d'étude réalisée, l'outil présenterait les indicateurs, mais aussi comment les calculer, leur unité et toutes les informations importantes comme leurs liens avec les autres indicateurs.

Ceci a été fait à travers une recherche bibliographique des indicateurs dans les articles sur les modèles de simulation des mobilités innovantes qui étudiaient leurs impacts et/ou leur performance. Les informations relatives à la façon dont ces indicateurs étaient utilisés et le type d'étude faite ont permis de collecter les données nécessaires pour réaliser des "fiches identité". Chaque fiche identité contient pour chaque indicateur une définition, une formule de calcul, son unité et l'échelle du résultat, rentre dans une catégorie selon l'élément mesuré mais aussi met en lien avec les cas où cet indicateur est utile. À partir de ces fiches, l'ontologie a été construite à l'aide d'axiomes en OWL sur le logiciel Protégé. Ainsi, on peut à travers les différentes classes et sous-classes naviguer à l'intérieur de l'ontologie à l'aide des propriétés pour connaître les indicateurs dont on a besoin et leurs informations.

L'étude a été faite en se focalisant sur les indicateurs calculés à l'aide de la simulation car le but de cette ontologie est d'aider à choisir des indicateurs et les calculer, lorsque l'on se

sert de simulations numériques pour aider à la prise de décision. Les indicateurs sont aussi applicables pour mesurer les systèmes réels.

Le second objectif était de réaliser une étude où l'emploi de l'ontologie pourrait être utile pour connaître les indicateurs à calculer et comment les calculer. Il s'agissait d'une étude sur les scénarios d'utilisations des véhicules autonomes pour la ville de Montréal. Si l'on reprend la navigation de l'ontologie, l'utilisateur est la ville de Montréal (local authority), le mode innovant les véhicules autonomes privés et partagés, le type d'étude une comparaison entre le niveau de partage des véhicules. Au-delà d'identifier les indicateurs à calculer, l'objectif était de créer ces différents scénarios d'un futur réalisable et de déterminer leurs impacts.

Trois scénarios ont été choisis, correspondant à des utilisations différentes des véhicules autonomes, l'un avec des véhicules privés, l'autre avec une flotte partagée et passager unique et le dernier avec une flotte partagée et plusieurs passagers autorisés. Ils sont comparés à un scénario de référence représentant Montréal en 2018. La modélisation de ces scénarios a nécessité l'adaptation de MATSim pour intégrer les véhicules autonomes privés. À partir des fichiers de sortie des simulations et des connaissances sur les indicateurs, les résultats sur les impacts et la performance de chaque scénario ont été calculés.

Les résultats se sont concentrés sur plusieurs volets : les impacts sur les comportements de mobilité, les impacts environnementaux et la congestion, mais aussi des questions d'équité. Pour mieux comprendre comment les nouveaux modes étaient utilisés, des résultats présentent la performance du mode. Au niveau des impacts sur les comportements de mobilités, les autres modes de transport ne sont pas beaucoup impactés par l'introduction des véhicules autonomes quel que soit le scénario. On n'observe pas de transfert modal important. Les grosses différences au niveau des scénarios avec celui de référence se font au niveau des distances parcourues et ce qui en découle. En se déplaçant à vide pour répondre à un besoin de déplacement, les véhicules autonomes font beaucoup de kilomètres, jusqu'à 85 % d'augmentation. Ceci a des incidences non négligeables sur la consommation énergétique totale au cours d'une journée de simulation et des émissions de gaz à effet de serre. Bien que les véhicules autonomes consomment moins, cela ne permet pas de combler cet écart. Cependant, nous avons montré que des réglementations sur le type de véhicule pouvaient engendrer des résultats plus encourageant dans un soucis de durabilité environnementale. De manière générale, l'ensemble des résultats permettent d'aboutir à la conclusion que le scénario des véhicules autonomes partagés avec covoiturage permis est celui qui permet d'engendrer les moindres externalités négatives pour la ville. Bien que les déplacements au niveau individuel puissent être plus longs à cause des détours pour partager son déplacement, les impacts au niveau global sont meilleurs.

## 6.2 Limitations

Les limitations seront présentées pour chacun des deux projets qui constituent ce mémoire. La section suivante proposera des voies d'amélioration et des propositions de continuation.

### 6.2.1 L'ontologie d'indicateurs

À partir d'un modèle multi-agent à large échelle comme MATSim, les indicateurs qui peuvent être calculés sont très nombreux. L'ontologie qui regroupe l'information devient donc complexe. Un des défis de ce projet a été de présenter ou de représenter de façon visuellement compréhensible, car il y a beaucoup trop d'éléments pour les voir tous en même temps. Il s'agit plus d'un outil avec lequel il faut naviguer.

Pour quelque chose de cette ampleur, avec autant d'indicateurs et leurs informations mais aussi de nombreuses dimensions, comme l'utilisateur, le mode, le type d'étude réalisée, on aboutit à plus de 4000 axiomes (c'est-à-dire relation entre deux éléments de l'ontologie), qui ont du être rentrés manuellement. Ceci la rend difficile à modifier pour la mettre à jour.

### 6.2.2 Simulations de l'utilisation des véhicules autonomes pour Montréal

Les scénarios proposent trois pistes d'utilisations des véhicules autonomes, mais ils peuvent paraître assez extrêmes. Il a été considéré qu'aucun véhicule conventionnel n'était en circulation. Ceci prendra probablement plusieurs décennies avant que cela n'arrive, mais d'ici là, les villes et les comportements de mobilité pourraient avoir changé. Par exemple, il est attendu que l'augmentation du confort à bord d'un véhicule autonome engendre de l'étalement urbain. C'est une des hypothèses qui n'a pas été modélisée dans ce travail, et que l'on ne peut pas simuler pour mesurer son étendue avec MATSim. En revanche, il est possible de conclure que pour un score équivalent, les agents peuvent parcourir de plus grandes distances et pourraient habiter plus loin et avoir un cadre de vie plus attractif sans être pénalisé au niveau de leurs déplacements. Les trois scénarios sont donc plutôt hypothétiques. Ils prennent la ville de Montréal actuellement et regardent ce qui se passerait avec des véhicules autonomes, sans connaître toutes les modifications qu'il pourrait y avoir d'ici-là. Par exemple, la capacité des réseaux ou la vitesse a été laissée identique, alors que les véhicules pourraient circuler plus vite et plus proches les uns des autres. Le futur sera probablement un mélange des trois scénarios présentés mais des informations supplémentaires sont requises pour savoir quels seront les ménages concernées par le fait de toujours posséder un véhicule privé.

L'analyse des résultats des différents scénarios a permis de remarquer des problèmes du modèle, mais surtout à propos des hypothèses effectuées. Les paragraphes et la section suivante

montreront que les résultats obtenus restent valables et ne remettent pas cause tout le travail effectué.

Premièrement, pour les scénarios avec les véhicules autonomes partagés, le temps d'attente et les courbes d'utilisation des véhicules ont permis de voir que la flotte n'était pas adaptée à la demande pour y répondre avec niveau de performance acceptable.

Toutefois, les résultats démontraient que malgré ce niveau de service très mauvais, les agents préféraient toujours utiliser ce mode de transport. Ceci a révélé un problème dans la calibration des paramètres du score du mode. Par exemple, un agent préférerait attendre deux heures un véhicule autonome plutôt que de marcher 40 minutes.

Au niveau du dimensionnement de la flotte, l'hypothèse appliquée de 1 véhicule pour 10 agents provenait de résultats publiés pour la ville de Berlin, ou d'Austin. Pour Berlin, le même modèle avec l'extension DVRP de MATSim avait été utilisé, mais sans considérer toute l'aire métropolitaine mais seulement la ville de Berlin, les agents à l'extérieur étaient supprimés. À cause d'une organisation urbaine et une densité de population différentes, le résultat valable pour Berlin ne s'applique pas à Montréal, ville nord-américaine. Pour Austin, le résultat obtenu était le même, mais le modèle était différent avec un niveau de détail différent et simplifié. Même s'il s'agit d'une ville nord-américaine, le résultat ne s'applique pas pour un modèle avec MATSim.

Pour le scénario des véhicules autonomes privés, il a été laissé un seul véhicule aux ménages anciennement motorisés, même s'ils en possédaient plusieurs. C'est une hypothèse qui a été prise pour modéliser la réduction de la motorisation, puisque sachant que le véhicule peut se rendre seul d'un lieu à l'autre, on peut mutualiser son utilisation. En laissant le même nombre de véhicules, les résultats de ce scénario auraient été semblables au résultat du scénario de base avec le fonctionnement de MATSim, puisqu'ils seraient restés à l'arrêt pendant la durée de l'activité et donc pas d'extra VKT. Cependant, les temps d'attente importants ont montré que cette hypothèse n'était pas acceptable, si le covoiturage n'était pas permis, ce qui sera possible en réalité.

Pour le problème de calibration, les valeurs des paramètres du score des nouveaux modes ont été choisies à partir de la littérature. Cependant, selon chaque population ou région simulée, les valeurs affectées peuvent-être différentes. L'objectif était de trouver une relation entre les paramètres des modes autonomes avec ceux des modes déjà calibrés pour le scénario de base de Montréal. Selon les cas, il s'agit d'une relation avec le temps perçu en tant qu'auto-passager ou bien dans les transports en commun. Or pour Montréal, le mode auto-passager n'est pas calibré. Le mode est affecté à certains agents sans qu'ils ne puissent trouver d'autres alternatives de transport d'une itération à l'autre. Pour Montréal, les paramètres de l'utilité

du temps de déplacement des modes autonomes dépendent alors de l'utilité du temps de déplacement en transport en commun. Un problème de modélisation se présente alors. Pour les transports en commun, l'utilité (le score dans MATSim) est fonction du temps à bord, du temps d'attente et des correspondances. C'est le cumul de ces trois composantes qui rend les transports en commun moins attractif que la voiture au niveau du calcul du score total. Pour cette dernière, tout comme pour les véhicules autonomes, l'utilité est fonction du temps de déplacement (attente et véhicule avec la même valeur pour le coefficient multiplicatif) et des distances parcourues. Une fois le score calculé avec ces hypothèses, on se retrouve avec un mode qui est alors beaucoup trop attractif en comparaison des autres, car l'attente est perçue comme le temps en véhicule avec une valeur qui n'est pas assez pénalisante, d'où les problèmes de calibration et le fait que les agents continuent d'attendre au lieu de choisir une autre alternative de transport.

Il est normal dès le premier essai d'obtenir ce genre de problèmes et cela permet de conclure que les hypothèses issues de la littérature ne sont pas adaptées pour notre cas. Normalement la rétro-action entre les résultats et les hypothèses permettent d'affiner le modèle. À cause des temps de calcul très importants et de la courte durée du projet, ceci n'a pas pu être fait.

En lien avec les enjeux de temps de calcul, les simulations ont été réalisées avec un échantillonnage de 5 %. C'est une valeur qui est assez faible. 10 % auraient été préférables voire même encore mieux 25 %. Cependant, sachant que le passage de 1 % à 5 % a multiplié par 8 les temps de calcul. Il n'était pas envisageable de passer sur du 10 % sachant qu'il faut 3h pour une itération de 5 % de Montréal sur les scénarios 1 et 2 et 9h pour le scénario 3, et que la convergence s'atteint au delà de 300 itérations.

Les limites énoncées peuvent questionner la fiabilité de ces résultats. Cependant, s'agit presque de deux effets qui se compensent. Par exemple, au niveau des parts modales, si l'on ajuste la calibration en pénalisant l'attente, il devrait y avoir moins d'utilisateurs, mais en augmentant la flotte et ainsi offrant un service avec des temps d'attente raisonnables, le mode peut rester toujours attractif. Au niveau des distances supplémentaires et des impacts qui y sont liés, augmenter la taille de la flotte va certes augmenter le nombre de véhicules qui circulent, mais en densifiant l'offre, les véhicules auront peut-être besoin de parcourir moins de distance sans passagers pour répondre à une requête. Et ainsi, même avec plus de déplacement, les distances totales ne seraient pas nécessairement augmentées. Bien entendu, ceci reste à vérifier par la simulation.

### 6.3 Améliorations futures

L'ontologie pourrait être améliorée pour mieux servir d'outil d'aide à la prise de décision. Par exemple, à travers un site internet, l'utilisateur pourrait, en étant guidé, choisir les différents volets qui le concernent (qui est-il, quels sont les modes, ...) et on lui proposerait les différents indicateurs avec tout ce qu'il y a savoir dessus. C'est assez similaire à ce qui a été réalisé avec le logiciel Protégé, mais l'utilisation d'une page Web pourrait rendre la navigation plus aisée pour l'utilisateur.

Pour compléter la fonctionnalité de l'ontologie, une amélioration serait de combiner la simulation et l'ontologie en intégrant les résultats obtenus du calcul des indicateurs directement. Comme dans le paragraphe précédent, l'utilisateur aurait à choisir le type d'étude réalisée, le point de vue et les modes, ajouter les fichiers de sortie de la simulation et il obtiendrait en sortie, les différents indicateurs pertinents avec leur valeur calculée. Il s'agirait de combiner les travaux qui ont été réalisés. L'ontologie qui permet le choix des indicateurs existe, le code qui permet de calculer ces indicateurs à partir des fichiers de sortie de MATSim existent aussi.

Pour répondre aux limitations citées plus hauts, le projet sur les véhicules autonomes possède de nombreuses pistes d'amélioration. De manière similaire à ce qui a été fait pour Berlin [58, 103], afin de solutionner le problème de la flotte sous-dimensionnée des hypothèses actuelles, il s'agirait de déterminer la taille de la flotte nécessaire pour offrir un niveau de service acceptable, pour une ville américaine telle que Montréal au lieu d'utiliser la littérature sur la question. La stratégie serait de réaliser plusieurs simulations avec un nombre de véhicules croissant. La flotte nécessaire serait, par exemple, celle qui permet de répondre à 95 % des requêtes en moins de 15 minutes.

Lors de la définition des hypothèses du projet, la question de savoir quelle aire urbaine modéliser a été de nombreuses fois soulevée. Généralement, les services de mobilités partagés sont présents dans des zones de service délimitées, usuellement à densité de population élevée [146], comme c'est le cas pour Communauto qui possède une aire de service délimitée sur l'île de Montréal. Dans les résultats sur les temps d'attente, nous avons vu que le service offert est meilleur dans les zones de hautes densités et que des agents présents en banlieues se retrouve avec des temps d'attente très allongés. Pour éviter des mauvaises performances en périphérie, on pourrait réduire l'aire de service. Avec la méthodologie appliquée dans ce travail, ceci n'est possible que si les usagers en dehors de l'aire de service possèdent une alternative de transport, ce qui n'est souvent pas le cas dans les milieux non dense. Pour pallier à ce problème, dans la plupart des études, les agents en dehors de la zone de service et

les modes de transport ne sont pas modélisés. Sachant que l'un des objectifs ici est d'avoir une simulation multi-modale pour tenir compte de la compétitivité entre les modes, il faudrait revoir l'hypothèse selon laquelle seuls 10 % des ménages possèdent un véhicule autonome privé mais plutôt l'appliquer pour les ménages qui vivent ou se travaillent en dehors de l'aire de service.

L'une des limites majeures du projet tel que présenté reste la calibration du modèle. Pour ceci, il faudrait réaliser des enquêtes, sous forme de sondage ou de *focus-groups* pour recueillir la perception de la population quant à l'utilisation des véhicules autonomes. Il pourrait s'agir de les confronter à différentes situations pour savoir quel mode ils utiliseraient et comment ils évalueraient leur perception de déplacement selon le mode utilisé et de les questionner sur leur acceptation des véhicules autonomes.

Au niveau des scénarios, il est possible d'intégrer de nouveaux volets. Les véhicules autonomes suscitent beaucoup de questions au niveau des stationnements. Ils peuvent se garer plus loin du lieu d'activité à moindre coût par exemple. Ceci peut être ajouté dans MATSim mais comme toute extension, elle engendre des temps de calculs allongés au niveau de la simulation mais aussi cela nécessite plus d'itérations pour atteindre un équilibre. Dans le futur, la proportion de véhicules électriques sera plus importante voire de 100 %, on peut aussi intégrer l'extension des véhicules électriques et la gestion de leur charge. Au niveau de la demande, il est possible aussi d'intégrer des nouveaux motifs de déplacement, comme par exemple des véhicules qui se rendent seuls récupérer les courses dans les services au volant des magasins. Mais en augmentant la demande, le nombre de requêtes et le nombre de véhicules nécessaires sont plus importants et le répartiteur des requêtes a besoin de beaucoup plus de temps pour gérer ces requêtes. Ainsi, ces éléments d'addition aboutissent sur des temps de calcul très importants pour obtenir des résultats et ils limitent la rétro-action entre les résultats obtenus et le modèle afin d'adapter ce dernier.

Le projet sur les scénarios des véhicules autonomes sera poursuivi pour établir des scénarios réalistes dans un horizon 2050, en tenant compte de l'analyse de l'espace urbain et son utilisation (l'utilisation voie de rive, le cadre bâti et les différents milieux urbains), des variables de mobilité (ex. compositions des ménages, habitudes de mobilité, type de déplacement) et des différentes modalités de service de véhicules autonomes potentiels. L'objectif sera afin d'éclaircir les possibles situations futures pour prendre en compte ces résultats pour le plan d'urbanisme et de mobilité 2050 de Montréal (PUM 2050) qui devra être adopté d'ici 2023 [147].

## RÉFÉRENCES

- [1] M. Balmer, “Simulation des verkehers,” 2007.
- [2] F. Ciari, M. Balac et M. Balmer, “Modelling the effect of different pricing schemes on free-floating carsharing travel demand : a test case for zurich, switzerland,” *Transportation*, vol. 42, n°. 3, p. 413–433, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://link.springer.com/10.1007/s11116-015-9608-z>
- [3] IGD, Institut de la Gestion Déléguée, AMF et GART, “Charte des services publics locaux - Indicateurs de performance des services de transport public,” 2008.
- [4] ARTM, Autorité régionale de transport métropolitain. (2018) Faits saillants de l’état de la mobilité des personnes dans la région métropolitaine de montréal. [En ligne]. Disponible : <https://www.artm.quebec/faits-saillants-eod-2018/>
- [5] STM, Société de transport de Montréal. (2021) Indicateurs du conseil d’administration. [En ligne]. Disponible : [https://www.stm.info/fr/a-propos/informations-entreprise-et-financieres/indicateurs-de-performance#id\\_deuxieme](https://www.stm.info/fr/a-propos/informations-entreprise-et-financieres/indicateurs-de-performance#id_deuxieme)
- [6] M. Barth et S. A. Shaheen, “Shared-use vehicle systems : Framework for classifying carsharing, station cars, and combined approaches,” *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1791, n°. 1, p. 105–112, 2002. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1791-16>
- [7] S. Shaheen *et al.*, “Shared Mobility : A Sustainability & Technologies Workshop - Definitions, Industry Developments and Early Understanding,” Transportation Sustainability Research Center, University of California Berkeley, White paper, 2015.
- [8] A. Cohen et S. Shaheen, “Planning for Shared Mobility,” American Planning Association, Rapport technique 583, 2016.
- [9] S. Shaheen, A. Cohen et I. Zohdy, “Shared Mobility Current Practices and Guiding Principles,” U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Technical FHWA-HOP-16-022, 2016.
- [10] S. Shaheen *et al.*, “Mobility on Demand Operational Concept Report,” U.S. Department of Transportation, Operational Concept Rapport FHWA-JPO-18-611, 2017.
- [11] S. Shaheen et A. Cohen, “Mobility on Demand in the United States : From Operational Concepts and Definitions to Early Pilot Projects and Future Automation,” dans *Analytics for the Sharing Economy : Mathematics, Engineering and Business Perspectives*, E. Crisostomi *et al.*, édit. Cham : Springer

- International Publishing, 2020, p. 227–254. [En ligne]. Disponible : [http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-35032-1\\_14](http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-35032-1_14)
- [12] E. Martin, S. A. Shaheen et J. Lidicker, “Impact of Carsharing on Household Vehicle Holdings : Results from North American Shared-Use Vehicle Survey,” *Transportation Research Record*, vol. 2143, n<sup>o</sup>. 1, p. 150–158, 2010. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2143-19>
- [13] D. J. Reck, H. Martin et K. W. Axhausen, “Mode choice, substitution patterns and environmental impacts of shared and personal micro-mobility,” *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, vol. 102, p. 103134, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920921004296>
- [14] K. Wang *et al.*, “What travel modes do shared e-scooters displace? a review of recent research findings,” *Transport Reviews*, p. 1–27, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.2015639>
- [15] NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration. Automated Vehicles for Safety. [En ligne]. Disponible : <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles-safety>
- [16] BMW. Autonomous Driving. [En ligne]. Disponible : <https://www.bmw.com/en/automotive-life/autonomous-driving.html>
- [17] Volvo. Volvo Cars and Uber present production vehicle ready for self-driving. [En ligne]. Disponible : <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/254697/volvo-cars-and-uber-present-production-vehicle-ready-for-self-driving>
- [18] C. Martin, “Uber resumes self-driving car trials,” *MediaPost*, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.mediapost.com/publications/article/348354/uber-resumes-self-driving-car-trials.html>
- [19] Lyft. Self-Driving at Lyft. [En ligne]. Disponible : <https://level5.lyft.com>
- [20] Waymo. Waymo. [En ligne]. Disponible : <https://waymo.com>
- [21] NAVYA. Autonom Shuttle Evo. [En ligne]. Disponible : <https://navya.tech/wp-content/uploads/documents/Brochure-Autonom-Shuttle-Evo-FR.pdf>
- [22] D. J. Fagnant, “The future of fully automated vehicles : opportunities for vehicle- and ride-sharing, with cost and emission saving,” Doctoral Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, 2014.
- [23] P. Davidson et A. Spinoulas, “Autonomous Vehicles - What Could This Mean For The Future Of Transport ?” dans *AITPM 2015 National Conference*, Brisbane, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://transposition.com.au/papers/AutonomousVehicles.pdf>

- [24] D. Heinrichs et R. Cyganski, “Automated Driving : How It Could Enter Our Cities and How This Might Affect Our Mobility Decisions,” *disP - The Planning Review*, vol. 51, n<sup>o</sup>. 2, p. 74–79, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1080/02513625.2015.1064650>
- [25] T. Litman, “Autonomous Vehicle Implementation Predictions : Implications for Transport Planning,” Victoria Transport Policy Institute, Rapport technique, 2020.
- [26] P. Jing *et al.*, “Agent-Based Simulation of Autonomous Vehicles : A Systematic Literature Review,” *IEEE Access*, vol. 8, p. 79 089–79 103, 2020.
- [27] M. Maciejewski et J. Bischoff, “Congestion effects of autonomous taxi fleets,” *Transport*, vol. 33, n<sup>o</sup>. 4, p. 971–980, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1347827>
- [28] C. D. Harper *et al.*, “Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 72, p. 1–9, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X16301590>
- [29] S. Hörl, F. Ciari et K. W. Axhausen, “Recent perspectives on the impact of autonomous vehicles,” Institute for Transport Planning and Systems (IVT), ETH Zurich, Zurich, Working paper, 2016. [En ligne]. Disponible : <http://hdl.handle.net/20.500.11850/121359>
- [30] D. J. Fagnant et K. Kockelman, “Preparing a nation for autonomous vehicles : opportunities, barriers and policy recommendations,” *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 77, p. 167–181, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856415000804>
- [31] Z. Wadud, D. MacKenzie et P. Leiby, “Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles,” *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 86, p. 1–18, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.001>
- [32] R. Joumard, *Indicators of environmental sustainability in transport : an interdisciplinary approach to methods*. Bron : INRETS Institut national de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, 2010.
- [33] R. W. Lee, P. Wack et E. Jud, “Toward Sustainable Transportation Indicators for California,” Mineta Transportation Institute, Final Report FHWA/CA/OR2002/30, 2003. [En ligne]. Disponible : <https://transweb.sjsu.edu/sites/default/files/02-05.pdf>

- [34] UNAIDS. (2010) An Introduction to Indicators. [En ligne]. Disponible : [https://www.unaids.org/sites/default/files/sub\\_landing/files/8\\_2-Intro-to-IndicatorsFMEF.pdf](https://www.unaids.org/sites/default/files/sub_landing/files/8_2-Intro-to-IndicatorsFMEF.pdf)
- [35] M. R. Guy. Types of Data & Measurement Scales : Nominal, Ordinal, Interval and Ratio. [En ligne]. Disponible : <https://www.mymarketresearchmethods.com/types-of-data-nominal-ordinal-interval-ratio/>
- [36] E. Smeets et R. Weterings, “Environmental indicators : Typology and overview,” European Environment Agency, Technical 25, 1999. [En ligne]. Disponible : <https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25>
- [37] T. Litman, “Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning,” Victoria Transport Policy Institute, Rapport technique, 2019.
- [38] J. Lyytimäki et U. Rosenström, “Skeletons out of the closet : effectiveness of conceptual frameworks for communicating sustainable development indicators,” *Sust. Dev.*, vol. 16, n°. 5, p. 301–313, 2008. [En ligne]. Disponible : <http://doi.wiley.com/10.1002/sd.330>
- [39] UNSD, “Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development,” United Nations, Rapport technique A/RES/71/313 E/CN.3/2018/2, juill. 2017. [En ligne]. Disponible : [https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202020%20review\\_Eng.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202020%20review_Eng.pdf)
- [40] G. Marsden et C. Snell, “The Role of Indicators, Targets and Monitoring in Decision-Support for Transport,” *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, vol. 9, n°. 3, 2009. [En ligne]. Disponible : <https://journals.open.tudelft.nl/index.php/ejtir/article/view/3308>
- [41] CNRTL, “Ontologie,” dans *Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales*, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.cnrtl.fr/lexicographie/ontologie>
- [42] W3C. Ontologies. [En ligne]. Disponible : <https://www.w3.org/standards/semanticweb/ontology>
- [43] N. Guarino, édit., *Formal ontology in information systems : proceedings of the first international conference (FOIS'98), June 6-8, Trento, Italy*, ser. Frontiers in artificial intelligence and applications. Amsterdam ; Washington, DC ; Tokyo : IOS Press ; Omsha, 1998, meeting Name : International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning.
- [44] NCOR. National Center for ontological research. [En ligne]. Disponible : [http://ncorwiki.buffalo.edu/index.php/Main\\_Page](http://ncorwiki.buffalo.edu/index.php/Main_Page)
- [45] H. Tian et P. Ma, “A Reasoning and Query Approach for Urban Transportation Based on Ontology by Jena,” dans *2010 International Conference on Intelligent*

- System Design and Engineering Application*, vol. 1. Changsha, China : IEEE, 2010, p. 155–158. [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/document/5743151>
- [46] J. Wang, Z. Ding et C. Jiang, “An Ontology-based Public Transport Query System,” dans *2005 First International Conference on Semantics, Knowledge and Grid*. Beijing, China : IEEE, 2005, p. 62–62. [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/document/4125850>
- [47] S. Saad, “Design and Optimization of Distributed Information Systems of Services to Aid Urban Mobility Based on a Flexible Ontology in the Transport Domain,” Doctoral Thesis, Ecole Centrale de Lille, Ecole Centrale de Lille, 2010.
- [48] C. Diamantini *et al.*, “Collaborative Building of an Ontology of Key Performance Indicators,” dans *On the Move to Meaningful Internet Systems : OTM 2014 Conferences*, R. Meersman *et al.*, édit. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014, vol. 8841, p. 148–165. [En ligne]. Disponible : [http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-45563-0\\_9](http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-45563-0_9)
- [49] M. S. Fox, “The role of ontologies in publishing and analyzing city indicators,” *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 54, p. 266–279, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019897151530020X>
- [50] S. Mnif *et al.*, “Ontology based performance evaluation of public transport systems,” dans *2015 4th International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*. Valenciennes, France : IEEE, mai 2015, p. 205–210. [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7136622>
- [51] G. O. Kagho, M. Balac et K. W. Axhausen, “Agent-Based Models in Transport Planning : Current State, Issues, and Expectations,” *Procedia Computer Science*, vol. 170, p. 726–732, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187705092030627X>
- [52] P. Coppola et F. Silvestri, “Future mobility and land use scenarios : impact assessment with an urban case study,” *Transportation Research Procedia*, vol. 42, p. 53–63, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146519305733>
- [53] L. D. Burns, W. C. Jordan et B. A. Scarborough, “Transforming Personal Mobility,” The Earth Institute - Columbia University, Rapport technique, 2012. [En ligne]. Disponible : <http://wordpress.ei.columbia.edu/mobility/files/2012/12/Transforming-Personal-Mobility-Aug-10-2012.pdf>
- [54] D. L. A. Merlin, “Comparing Automated Shared Taxis and Conventional Bus Transit for a Small City,” *Journal of Public Transportation*, vol. 20, n<sup>o</sup>. 2, p. 19–39, 2017.

- [55] S. Hörl *et al.*, “Fleet operational policies for automated mobility : A simulation assessment for Zurich,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 102, p. 20–31, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X18304248>
- [56] S. Hörl, “Agent-based simulation of autonomous taxi services with dynamic demand responses,” *Procedia Computer Science*, vol. 109, p. 899–904, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050917310943>
- [57] F. de Souza *et al.*, “An Optimization-based Strategy for Shared Autonomous Vehicle Fleet Repositioning :,” dans *Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*. Prague, Czech Republic : SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2020, p. 370–376. [En ligne]. Disponible : <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0009421603700376>
- [58] J. Bischoff et M. Maciejewski, “Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin,” *Procedia Computer Science*, vol. 83, p. 237–244, 2016, the 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2016) / The 6th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2016) / Affiliated Workshops, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.121>. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916301442>
- [59] J. Liu *et al.*, “Tracking a system of shared autonomous vehicles across the Austin, Texas network using agent-based simulation,” *Transportation*, vol. 44, n<sup>o</sup>. 6, p. 1261–1278, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1007/s11116-017-9811-1>
- [60] S. Zhu et A. L. Kornhauser, “The interplay between fleet size, level-of-service and empty vehicle repositioning strategies in large-scale, shared-ride autonomous taxi mobility-on-demand scenarios,” 2017.
- [61] R. Vosooghi *et al.*, “Shared autonomous vehicle simulation and service design,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 107, p. 15–33, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X19304449>
- [62] P. M. Bösch *et al.*, “Cost-based analysis of autonomous mobility services,” *Transport Policy*, vol. 64, p. 76–91, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X17300811>
- [63] K. Nagel *et al.*, “Simulation-based analysis of the impacts of eets of autonomous vehicles on urban trafic,” TU Berlin, Working paper, 2019.
- [64] L. M. Martinez et J. M. Viegas, “Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system : An agent-based model applied to the city of Lisbon,

- Portugal,” *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 6, n<sup>o</sup>. 1, p. 13–27, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.005>
- [65] D. J. Fagnant et K. M. Kockelman, “Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in austin, texas,” *Transportation*, vol. 45, n<sup>o</sup>. 1, p. 143–158, 2018. [En ligne]. Disponible : [10.1007/s11116-016-9729-z](https://doi.org/10.1007/s11116-016-9729-z)
- [66] G. Leich et J. Bischoff, “Should autonomous shared taxis replace buses? A simulation study,” *Transportation Research Procedia*, vol. 41, p. 450–460, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146519304934>
- [67] W. Zhang *et al.*, “The performance and benefits of a shared autonomous vehicles based dynamic ridesharing system : An agent-based simulation approach,” *TRB 94th Annual Meeting Compendium of Papers*, 2015.
- [68] J. Bischoff *et al.*, “Autonomous Vehicles and their Impact on Parking Search,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 11, n<sup>o</sup>. 4, p. 19–27, 2019.
- [69] B. Wang, S. A. Ordonez Medina et P. J. Fourie, “Comparing Parking Strategies of Autonomous Transit On Demand with Varying Transport Demand,” *Procedia Computer Science*, vol. 151, p. 814–819, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050919305757>
- [70] —, “Operator and user perspectives on parking strategy and pick-up drop-off infrastructure for autonomous transit on demand,” dans *TRB Annual Meeting Online*, Washington, D.C., 2019. [En ligne]. Disponible : <http://hdl.handle.net/20.500.11850/299600>
- [71] R. Vosooghi *et al.*, “Shared autonomous electric vehicle service performance : Assessing the impact of charging infrastructure,” *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, vol. 81, p. 102283, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920919307114>
- [72] B. Loeb, K. M. Kockelman et J. Liu, “Shared autonomous electric vehicle (SAEV) operations across the Austin, Texas network with charging infrastructure decisions,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 89, p. 222–233, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X18300627>
- [73] T. D. Chen, K. M. Kockelman et J. P. Hanna, “Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet : Implications of vehicle & charging infrastructure decisions,” *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 94, p. 243–254, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096585641630756X>
- [74] I. Kaddoura, J. Bischoff et K. Nagel, “Towards welfare optimal operation of innovative mobility concepts : External cost pricing in a world of shared autonomous

- vehicles,” *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 136, p. 48–63, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856419310456>
- [75] J. Lee et K. M. Kockelman, “Development of Traffic-Based Congestion Pricing and Its Application to Automated Vehicles,” *Transportation Research Record*, vol. 2673, n° 6, p. 536–547, 2019. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198119839981>
- [76] P. M. Bösch, F. Ciari et K. W. Axhausen, “Transport Policy Optimization with Autonomous Vehicles,” *Transportation Research Record*, vol. 2672, n° 8, p. 698–707, 2018. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198118791391>
- [77] K. M. Gurumurthy, K. M. Kockelman et M. D. Simoni, “Benefits and Costs of Ride-Sharing in Shared Automated Vehicles across Austin, Texas : Opportunities for Congestion Pricing,” *Transportation Research Record*, vol. 2673, n° 6, p. 548–556, 2019. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198119850785>
- [78] W. Zhang et S. Guhathakurta, “Residential Location Choice in the Era of Shared Autonomous Vehicles,” *Journal of Planning Education and Research*, 2018. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0739456X18776062>
- [79] Y. Zhao et K. M. Kockelman, “Anticipating the Regional Impacts of Connected and Automated Vehicle Travel in Austin, Texas,” *J. Urban Plann. Dev.*, vol. 144, n° 4, 2018. [En ligne]. Disponible : <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29UP.1943-5444.0000463>
- [80] H. Becker, A. Loder et K. W. Axhausen, “Will automated vehicles help to reduce congestion?” IVT, ETH Zurich, Zurich, Switzerland, Arbeitsberichte 1472, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000379742>
- [81] L. Ambühl, F. Ciari et M. Menendez, “What about space? A simulation based assessment of AVs impact on road space in urban areas,” dans *16th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, Switzerland, 2016.
- [82] S. Childress *et al.*, “Using an Activity-Based Model to Explore the Potential Impacts of Automated Vehicles,” *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2493, p. 99–106, 01 2015.
- [83] P. Fernandes et U. Nunes, “Platooning of autonomous vehicles with intervehicle communications in SUMO traffic simulator,” dans *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Funchal, Madeira Island, Portugal : IEEE, 2010, p. 1313–1318. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5625277/>

- [84] R. Cyganski, E. Fraedrich et B. Lenz, “Travel-time valuation for automated driving : a use-case-driven study,” dans *Proceedings of the 94th Annual Meeting of the TRB*, 2015.
- [85] M. W. Levin et S. D. Boyles, “Effects of Autonomous Vehicle Ownership on Trip, Mode, and Route Choice,” *Transportation Research Record*, vol. 2493, n<sup>o</sup>. 1, p. 29–38, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2493-04>
- [86] D. J. Fagnant et K. M. Kockelman, “The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 40, p. 1–13, 2014. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X13002581>
- [87] J. Bischoff, K. Führer et M. Maciejewski, “Impact assessment of autonomous DRT systems,” *Transportation Research Procedia*, vol. 41, p. 440–446, 2019, urban Mobility - Shaping the Future Together mobil.TUM 2018 - International Scientific Conference on Mobility and Transport Conference Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.09.074>. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146519304910>
- [88] A. Scheltes, “Exploring the use of automated vehicles as last mile connection of train trips through an agent-based simulation model : An application to Delft, Netherlands,” *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 6, n<sup>o</sup>. 1, p. 28–41, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.004>
- [89] D. J. Fagnant, K. M. Kockelman et P. Bansal, “Operations of Shared Autonomous Vehicle Fleet for Austin, Texas, Market,” *Transportation Research Record*, vol. 2563, n<sup>o</sup>. 1, p. 98–106, janv. 2016. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.3141/2536-12>
- [90] R. Iglesias *et al.*, “A BCMP network approach to modeling and controlling autonomous mobility-on-demand systems,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 38, n<sup>o</sup>. 2-3, p. 357–374, 2019. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0278364918780335>
- [91] R. Zhang, F. Rossi et M. Pavone, “Model predictive control of autonomous mobility-on-demand systems,” dans *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, 2016, p. 1382–1389. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7487272/>
- [92] Z. Vander Laan et K. F. Sadabadi, “Operational performance of a congested corridor with lanes dedicated to autonomous vehicle traffic,” *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 6, n<sup>o</sup>. 1, p. 42–52, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.006>

- [93] E. Aria, J. Olstam et C. Schwietering, “Investigation of Automated Vehicle Effects on Driver’s Behavior and Traffic Performance,” *Transportation Research Procedia*, vol. 15, p. 761–770, janv. 2016. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.063>
- [94] R. Lamotte, A. de Palma et N. Geroliminis, “Sharing the road : the economics of autonomous vehicles,” Urban Transport Systems Laboratory, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland, Rapport technique hal-01281425, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01281425/document>
- [95] M. W. Levin et S. D. Boyles, “A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 62, p. 103–116, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X1500354X>
- [96] K.-H. Kim *et al.*, “An analysis of expected effects of autonomous vehicles on transport and land use in Korea,” Marron Institute of Urban Management, NYU, Working paper, 2015. [En ligne]. Disponible : [https://marroninstitute.nyu.edu/uploads/content/Kim\\_YookDevelopment\\_of\\_Autonomous\\_Driving\\_SystemMarron.pdf](https://marroninstitute.nyu.edu/uploads/content/Kim_YookDevelopment_of_Autonomous_Driving_SystemMarron.pdf)
- [97] J. Meyer *et al.*, “Autonomous vehicles : The next jump in accessibilities?” *Research in Transportation Economics*, vol. 62, p. 80–91, juin 2017. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.03.005>
- [98] L. Gourvil et F. Joubert, “Évaluation de la Congestion Routière dans la Région de Montréal,” MTQ, Ministère des Transports du Québec, Rapport technique, 2004.
- [99] W. Zhang et S. Guhathakurta, “Parking Spaces in the Age of Shared Autonomous Vehicles : How Much Parking Will We Need and Where?” *Transportation Research Record*, vol. 2651, n°. 1, p. 80–91, 2017. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2651-09>
- [100] A. de la transition écologique. ADEME. [En ligne]. Disponible : <https://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transports/chiffres-cles-observations/chiffres-cles>
- [101] A. C. Mersky et C. Samaras, “Fuel Economy Testing of Autonomous Vehicles,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 65, p. 31–48, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.001>
- [102] MATSim. Emissions-modelling in Munich, Germany. [En ligne]. Disponible : <https://www.matsim.org/gallery/munich>
- [103] J. Bischoff et M. Maciejewski, “Autonomous Taxicabs in Berlin - A Spatiotemporal Analysis of Service Performance,” *Transportation Research Procedia*, vol. 19, p.

- 176–186, 2016, transforming Urban Mobility. mobil.TUM 2016. International Scientific Conference on Mobility and Transport. Conference Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.078>. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214651630864X>
- [104] B. Wang, S. A. Ordonez Medina et P. Fourie, “Simulation of autonomous transit on demand for fleet size and deployment strategy optimization,” *Procedia Computer Science*, vol. 130, p. 797–802, 2018, the 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2018) / The 8th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2018) / Affiliated Workshops, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.138>. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918305003>
- [105] C. Brownell et A. Kornhauser, “A Driverless Alternative : Fleet Size and Cost Requirements for a Statewide Autonomous Taxi Network in New Jersey,” *Transportation Research Record*, vol. 2416, n<sup>o</sup>. 1, p. 73–81, 2014. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2416-09>
- [106] W. Zhang *et al.*, “Exploring the Impact of Shared Autonomous Vehicles on Urban Parking Demand : An Agent- based Simulation Approach,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 19, p. 34–45, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.006>
- [107] M. W. Levin *et al.*, “A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application,” *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 64, p. 373–383, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019897151630237X>
- [108] Cerema, *Mesurer l’accessibilité multimodale des territoires - État des lieux et analyse des pratiques*. Certu, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1173266.pdf>
- [109] ITF, “Urban Mobility System Upgrade : How shared self-driving cars could change city traffic,” International Transport Forum, Rapport technique, 2015. [En ligne]. Disponible : [https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb\\_self-drivingcars.pdf](https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb_self-drivingcars.pdf)
- [110] I. Kaddoura, L. Kröger et K. Nagel, “An activity-based and dynamic approach to calculate road traffic noise damages,” *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, vol. 54, p. 335–347, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920917304686>

- [111] NHTSA, “National Motor Vehicle Crash Causation Survey : Report to Congress,” U.S. Department of Transportation, Report to Congress DOT HS 811 059, 2008.
- [112] M. Horridge, *A Practical Guide to Building OWL Ontologies Using The Protégé-OWL Plugin and CO-ODE Tools*, v1.3 éd. The University of Manchester : The University Of Manchester, 2011.
- [113] N. F. Noy et D. L. McGuinness, “Ontology Development 101 : A Guide to Creating Your First Ontology,” 2001.
- [114] La Fabrique Écologique, “Le véhicule autonome : quel rôle dans la transition écologique des mobilités?” Forum Vies Mobiles, Rapport technique, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://fr.forumviesmobiles.org/projet/2020/02/07/vehicule-autonome-quel-role-dans-transition-mobilitaire-13211>
- [115] H. Iglinski et M. Babiak, “Analysis of the Potential of Autonomous Vehicles in Reducing the Emissions of Greenhouse Gases in Road Transport,” *Procedia Engineering*, vol. 192, p. 353–358, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817326073>
- [116] M. Massar *et al.*, “Impacts of Autonomous Vehicles on Greenhouse Gas Emissions-Positive or Negative?” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, n°. 11, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/11/5567>
- [117] J. Liu, K. Kockelman et A. Nichols, “Anticipating the emissions impacts of smoother driving by connected and autonomous vehicles, using the moves model,” dans *Smart Transport for Cities & Nations : The Rise of Self-Driving & Connected Vehicles (2018)*, 2017, présenté au 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- [118] P. M. Boesch, F. Ciari et K. W. Axhausen, “Autonomous Vehicle Fleet Sizes Required to Serve Different Levels of Demand,” *Transportation Research Record*, vol. 2542, n°. 1, p. 111–119, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.3141/2542-13>
- [119] M. S. Brandon Schoettle, “Potential impact of self-driving vehicles on household vehicle demand and usage,” University of Michigan, Ann Arbor, Transportation Research Institute, Rapport technique, 2015.
- [120] C. Ruch, S. Hörl et E. Frazzoli, “Amodeus, a simulation-based testbed for autonomous mobility-on-demand systems,” dans *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, p. 3639–3644.
- [121] S. Hörl, “A MATSim scenario for autonomous vehicles in La Défense and Île-de-France,” 2017. [En ligne]. Disponible : <http://hdl.handle.net/20.500.11850/128143>

- [122] S. Hörl, F. Becker et K. W. Axhausen, “Simulation of price, customer behaviour and system impact for a cost-covering automated taxi system in Zurich,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 123, p. 102974, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X21000115>
- [123] R. Vosooghi *et al.*, “Robo-Taxi service fleet sizing : assessing the impact of user trust and willingness-to-use,” *Transportation*, vol. 46, n°. 6, p. 1997–2015, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1007/s11116-019-10013-x>
- [124] M. Balac, S. Hörl et K. W. Axhausen, “Fleet Sizing for Pooled (Automated) Vehicle Fleets,” *Transportation Research Record*, vol. 2674, n°. 9, p. 168–176, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1177/0361198120927388>
- [125] M. D. Simoni *et al.*, “Congestion pricing in a world of self-driving vehicles : An analysis of different strategies in alternative future scenarios,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 98, p. 167–185, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.11.002>
- [126] T. Schlenther *et al.*, “Potential of Private Autonomous Vehicles for Parcel Delivery,” *Transportation Research Record*, vol. 2674, n°. 11, p. 520–531, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1177/0361198120949878>
- [127] W. Zhang, S. Guhathakurta et E. B. Khalil, “The impact of private autonomous vehicles on vehicle ownership and unoccupied VMT generation,” *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 90, p. 156–165, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X18303188>
- [128] D. Charypar et K. Nagel, “Generating complete all-day activity plans with genetic algorithms,” *Transportation*, vol. 32, p. 369–397, 2005. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X18303188>
- [129] A. Horni, K. Nagel et K. Axhausen, édit., *The Multi-Agent Transport Simulation MAT-Sim*. London : Ubiquity Press, Aug 2016.
- [130] M. Maciejewski, “Dynamic Transport Services,” dans *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Axhausen, Kay W. and Horni, Andreas and Nagel, Kai, 2016, p. 145–152.
- [131] M. Maciejewski, J. Bischoff et K. Nagel, “An Assignment-Based Approach to Efficient Real-Time City-Scale Taxi Dispatching,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 31, n°. 1, p. 68–77, 2016.
- [132] J. Bischoff, M. Maciejewski et K. Nagel, “City-wide shared taxis : A simulation study in Berlin,” dans *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2017, p. 275–280.

- [133] Statistique Canada, “Montréal [Région métropolitaine de recensement], Québec et Québec [Province]. Profil du recensement, Recensement de 2016, produit n° 98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada,” Ottawa, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>
- [134] MTQ, Ministère des Transports du Québec, “Enquête Origine-Destination,” 2018.
- [135] SAAQ, Société de l’Assurance Automobile du Québec, “Données d’immatriculation et de Détenion de Permis à Conduire,” 2016.
- [136] MAMO, Ministère des aires municipales et de l’occupation du territoire, “Le Rôle d’évaluation Foncière et son Contenu : Document à l’intention des Citoyens,” 2014.
- [137] S. Hörl et B. Milos, “Open Data Travel Demand Synthesis for Agent-Based Transport Simulation : A Case Study of Paris and Île-de-France,” *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, vol. 1499, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000412979>
- [138] STM, Société des transport de Montréal, “Horaires planifiés et trajets des bus et du métro,” 2018, <https://www.stm.info/fr/a-propos/developpeurs>.
- [139] C. Llorca et R. Moeckel, “Effects of scaling down the population for agent-based traffic simulations,” *Procedia Computer Science*, vol. 151, p. 782–787, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050919305691>
- [140] I. Kaddoura, J. Bischoff et K. Nagel, “Towards welfare optimal operation of innovative mobility concepts : External cost pricing in a world of shared autonomous vehicles,” *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 136, p. 48–63, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856419310456>
- [141] B. Johnson, “Disruptive mobility,” 2015, research Report, Barclays.
- [142] Equiterre. (2021) Comprendre la hausse des camions légers au Canada afin de renverser la tendance. [En ligne]. Disponible : <https://www.equiterre.org/actualite/comprendre-la-hausse-des-camions-legers-au-canada-afin-de-renverser-la-tendance>
- [143] Statistique Canada. (2021) Immatriculations des véhicules neufs. Consulté le 2021/12/01. [En ligne]. Disponible : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/71-607-x/71-607-x2021019-eng.htm>
- [144] M. Chester et A. Horvath, “Life-cycle Energy and Emissions Inventories for Motorcycles, Diesel Automobiles, School Buses, Electric Buses, Chicago Rail, and New York City Rail,” Working paper, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, p. 109, 2009.

- [145] I. Kaddoura et T. Schlenther, “The impact of trip density on the fleet size and pooling rate of ride-hailing services : A simulation study,” *Procedia Computer Science*, vol. 184, p. 674–679, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050921007213>
- [146] L. Rotaris et R. Danielis, “The role for carsharing in medium to small-sized towns and in less-densely populated rural areas,” *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 115, p. 49–62, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856417308091>
- [147] Ville de Montréal. (2021) Créer ensemble le plan d’urbanisme et de mobilité 2050. [En ligne]. Disponible : <https://montreal.ca/articles/creer-ensemble-le-plan-durbanisme-et-de-mobilite-2050-15575>
- [148] R. Zhang *et al.*, “Models, Algorithms, and Evaluation for Autonomous Mobility-On-Demand Systems,” dans *2015 American Control Conference (ACC)*, 2015, p. 2573–2587.
- [149] J. Kamel *et al.*, “Exploring the Impact of User Preferences on Shared Autonomous Vehicle Modal Split : A Multi-Agent Simulation Approach,” *Transportation Research Procedia*, vol. 37, p. 115–122, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235214651830588X>
- [150] B. Wang, S. A. Ordonez Medina et P. J. Fourie, “Operator and user perspectives on fleet mix, parking strategy and drop-off bay size for autonomous transit on demand,” dans *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, 2018. [En ligne]. Disponible : <http://hdl.handle.net/20.500.11850/283489>
- [151] S. Hörl, A. Erath et K. W. Axhausen, “Simulation of autonomous taxis in a multi-modal traffic scenario with dynamic demand,” dans *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, 2016. [En ligne]. Disponible : <http://hdl.handle.net/20.500.11850/118794>
- [152] M. Balac, R. L. Rothfeld et S. Horl, “The Prospects of on-demand Urban Air Mobility in Zurich, Switzerland,” dans *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. Auckland, New Zealand : IEEE, 2019, p. 906–913. [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8916972/>
- [153] S. Hörl, M. Balac et K. W. Axhausen, “Dynamic demand estimation for an AMoD system in Paris,” dans *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Paris, France : IEEE, 2019, p. 260–266. [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8814051/>

- [154] L. Sieber *et al.*, “Autonomous mobility-on-demand providing superior public transportation in rural areas,” dans *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, 2018. [En ligne]. Disponible : <http://hdl.handle.net/20.500.11850/279530>
- [155] K. A. Marczuk *et al.*, “Autonomous mobility on demand in SimMobility : Case study of the central business district in Singapore,” dans *2015 IEEE 7th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*. Siem Reap, Cambodia : IEEE, 2015, p. 167–172. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7274567/>
- [156] S. Samaranyake *et al.*, “Ridepooling with trip-chaining in a shared-vehicle mobility-on-demand system,” dans *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Yokohama : IEEE, 2017, p. 1–7. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/8317603/>
- [157] K. Spieser *et al.*, “Shared-Vehicle Mobility-on-Demand Systems : A Fleet Operator’s Guide to Rebalancing Empty Vehicles,” 2016.
- [158] —, “Toward a Systematic Approach to the Design and Evaluation of Automated Mobility-on-Demand Systems : A Case Study in Singapore,” dans *Road Vehicle Automation*, G. Meyer et S. Beiker, édit. Cham : Springer International Publishing, 2014, p. 229–245. [En ligne]. Disponible : [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-05990-7\\_20](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-05990-7_20)
- [159] M. Tsao *et al.*, “Model Predictive Control of Ride-sharing Autonomous Mobility-on-Demand Systems,” dans *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Montreal, QC, Canada : IEEE, 2019, p. 6665–6671. [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8794194/>
- [160] Cambridge, “Trip,” dans *Cambridge Dictionary*, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://dictionary.cambridge.org/fr/dictionnaire/anglais/trip>
- [161] S. International, “Taxonomy and Definitions for Terms Related to Shared Mobility and Enabling Technologies,” SAE International, Rapport technique J3163, 2018. [En ligne]. Disponible : [https://www.sae.org/content/j3163\\_201809](https://www.sae.org/content/j3163_201809)
- [162] Committee for Review of Innovative Urban Mobility Services et Transportation Research Board, *Between Public and Private Mobility : Examining the Rise of Technology-Enabled Transportation Services*. Washington, D.C. : Transportation Research Board, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://www.nap.edu/catalog/21875>
- [163] Collins, “Local Authority,” dans *Collins Dictionary*, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/local-authority>

- [164] Cambridge, “Stakeholder,” dans *Cambridge Dictionary*. [En ligne]. Disponible : <https://dictionary.cambridge.org/fr/dictionnaire/anglais/stakeholder>
- [165] Wikipedia, “Ontology (information science),” dans *Wikipedia*. [En ligne]. Disponible : [https://en.wikipedia.org/wiki/Ontology\\_\(information\\_science\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ontology_(information_science))

## ANNEXE A LISTE DES ARTICLES UTILISÉS POUR LA COLLECTE D'INDICATEURS

Tableau A.1 Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante

Aire	Auteurs	Modèle	Scénario	Indicateurs
Zug (Suisse)	Bösch et al. (2018) [76]	Modèle agent-based via MATSim	Sans SAV, SAV single-ride, SAV ride-sharing, mixe Politique tarifaire	VKT VHT Profitabilité
Ville artificielle	Fagnant et Kockelman (2014) [86]	Modèle agent-based	Taux de génération et distribution des déplacements Etendue de l'aire du service Taille de la flotte Stratégie de relocalisation	VKT Demande # dép. SAV Temps d'attente Emissions GES Consommation énergie # véh. économisés Déplacement à vide
Lisbonne (Portugal)	ITF (2015) [109]	Modèle agent-based	SAV single ride, SAV ride-sharing	VKT Temps d'attente Temps de déplacement Taux d'utilisation Parking requis
Rome (Italie)	Coppola et Silvestri (2020) [52]	Modèle LUTI	Politique de réglementation accès (Limited Traffic Zone, Car Free Area)	Répartition population (revenu) et emplois (type), densité Part modale VKT Energie consommée Emissions CO2
Rouen (France)	Vosooghi et al. (2019) [61]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV Taille des véhicules en nombre de place	Part modale VKT Taux d'occupation Taux d'utilisation Taux utilisée à vide Temps d'attente Temps dans le véhicule # dép/véh.

Continued on next page

**Tableau A.1 – Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante (suite)**

Aire	Auteurs	Modèle	Scénario	Indicateurs
Berlin (Allemagne)	Bischoff (2016) [58]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV	Temps d'attente Repartition du temps : - vide - prise en charge - occupé - relocalisation - à l'arrêt en attente
Berlin (Allemagne)	Bischoff et Maciejewski (2016) [103]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV	Distance totale par véhicule Distance client à bord par véhicule % distance à vide Temps d'attente Repartition du temps : à l'arrêt, occupé, vide
Brisbane (Australie)	Davidson et Spinoulas (2015) [23]	Modèle 4S via TransPosition	Proportion AV Coût opérationnel	Part modale # dép. VKT Distance moyenne VHT Vitesse
Berlin (Allemagne)	Maciejewski et Bischoff (2018) [27]	Modèle agent-based via MATSim avec DVRP	Proportion AV Variation de la capacité	Temps de parcours Retard Temps d'attente Taux des déplacements à vide
Lisbonne (Portugal)	Martinez (2017) [64]	Modèle agent-based	Service door-to-door, walk to/from stop	# passagers temps d'attente # véh. remplacés # places de parking économisées Emissions GES Taux d'occupation
Ann Arbor, Floride (USA)	Merlin (2017) [54]	Modèle agent-based via Netlogo	Bus, SAV single-rider, SAV shared-riding	Temps d'attente Temps de déplacement Cout VKT Emissions CO2

Continued on next page

**Tableau A.1 – Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante (suite)**

Aire	Auteurs	Modèle	Scénario	Indicateurs
Delft (Pays-Bas)	Scheltes (2017) [88]	Modèle agent-based	Modification du réseau routier Stratégies de relocalisation Réservation à l'avance Stratégies de recharge	Distance moyenne VKT Consommation énergie VHT Taux d'occupation Temps moyen d'utilisation par véhicule Temps d'attente Durée de déplacement
New York (USA) Singapour	Zhang et al. (2015) [148]	Modèle spatial-queueing	Taille de la flotte de SAV	Temps d'attente Disponibilité
Austin, Texas (USA)	Fagnant et al. (2015) [89]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV	Niveau de service Taux d'occupation Aire de service # dép. SAV Distance moyenne par déplacement Distance par véhicule (distribution) Part à vide Energie consommée Emissions GES Emissions gaz polluants
Etats-Unis	Schoettle et Sivak (2015) [119]	Pas de simulation Calcul algorithmique	Taille de la flotte de SAV	# véh. par ménage Kilométrage annuel par véhicule
Zug (Suisse)	Meyer et al. (2017) [97]	Swiss National transport model	Véhicules autonomes privés, SAV Etendue et localisation de l'aire de service	Part modale Accessibilité Volume
Zurich (Suisse)	Bösch et al. (2016) [118]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV	% requêtes réalisées Part modale Distance moyenne # dép./véh Performance

Continued on next page

**Tableau A.1 – Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante (suite)**

Aire	Auteurs	Modèle	Scénario	Indicateurs
Ville artificielle	Chen et al. (2016) [73]	Modèle agent-based via MATSim	Nombre de stations de recharge	Distance par véhicule # dép./véh % déplacements non réalisés Distance par déplacement Temps d'attente % distance véhicule non-occupé % temps en charge % en relocalisation
Seattle, Washington (USA)	Childress et al. (2015) [82]	Modèle Soundcat (activity-based) via Daysim	Evolution de la capacité Evolution VOT Evolution cout auto	VKT VHT # dép./personne Distance moyenne Retard Vitesse Part modale
Austin, Texas (USA)	Liu et al. (2017) [59]	Modèle agent-based via MATSim	Politique tarifaire	Part modale Distance moyenne Taux de remplacement HV Extra VMT (%) Temps d'attente Temps de déplacement % dep à l'heure % dep en retard
Ville artificielle	Zhang et al. (2015) [106]	Modèle agent-based	Taille de la flotte de SAV Proportion AV Stratégie de relocalisation	Parking requis (total et par SAV) Temps d'attente
Berlin (Allemagne)	Bischoff et al. (2019) [68]	Modèle agent-based via MATSim	Type de parking (free spot, garage, cruising)	Durée de recherche d'une place Durée de marche ou attente VKT
Berlin (Allemagne)	Kaddoura et al. (2020) [74]	Modèle agent-based via MATSim	Politique tarifaire	Part modal Transfert modal Vitesse Volume System welfare Emissions Bruit Etat des véhicules

Continued on next page

Tableau A.1 – Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante (suite)

Aire	Auteurs	Modèle	Scénario	Indicateurs
Berlin (Allemagne)	Leich et Bischoof (2019) [66]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV Taille des véhicules en nombre de place	Temps d'attente Requêtes servies Distance directe, détour VKT Taux de rejet Taux d'occupation du véhicule au cours de la journée Profit
Berlin (Allemagne)	Nagel et al. (2019) [63]	Modèle agent-based via MATSim	Stratégie de repositionnement Evolution de la capacité	Temps d'attente Temps de déplacement Etat et taux d'occupation des véhicules au cours de la journée
Berlin (Allemagne)	Schlenter et al (2020) [126]	Modèle agent-based via MATSim	Gestion marchandise et individus	Temps d'attente Kilomètres parcourus Coût opérateur
Cottbus (Allemagne)	Bischoff et al. (2019) [87]	Modèle agent-based via MATSim	Taille flotte de SAV Service door-to-door, stop-based	Durée déplacement : temps d'attente, temps de marche, temps en véhicule Utilisation de la flotte : VKT, PKT, taux d'occupation, déplacements servis, distance à vide Coûts opérationnels
La Défense, Paris (France)	Hörl (2017) [121]	Modèle agent-based via MATSim		Part modale
Rouen (France)	Vosooghi et al. (2020) [71]	Modèle agent-based via MATSim	Infrastructure de recharge	Part modale SAV Temps d'attente, en véhicule, détour Taux d'utilisation de la flotte Part de km à vide PKT VKT Ratio des taux d'occupation Distance moyenne
Rouen (France)	Vosooghi et al. (2019) [123]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV	Part modale Temps d'attente Distance Taux d'utilisation horaire

Continued on next page

**Tableau A.1 – Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante (suite)**

Aire	Auteurs	Modèle	Scénario	Indicateurs
Paris (France)	Kamel et al. (2019) [149]	Modèle agent-based via MATSim		Part modale
Singapour	Wang et al. (2019) [70]	Modèle agent-based via MATSim	Type de parking et taille des places Taille des véhicules en nombre de places	Durée de déplacement Temps de marche Taux d'occupation VKT Demandes rejetées Coûts opérationnels = Coûts fixes (infra) et Coûts variables (énergie, VKT)
Singapour	Wang et al. (2019) [69]	Modèle agent-based via MATSim	Type de parking	Part modale Taux d'occupation VKT VKT à vide Temps de déplacement Distance de marche
Sioux Falls (USA)	Wang et al. (2018) [150]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV Stratégie de relocalisation	Nombre de véhicules utilisés selon l'heure Taux d'occupation
Sioux Falls (USA)	Hörl et al. (2016) [151]	Modèle agent-based via MATSim	Modèle demande variable	Part modale et transfert modal Temps d'attente Taux d'utilisation VKT Distance à vide
Zurich (Suisse)	Hörl et al. (2017) [55]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV Stratégie de relocalisation	Temps d'attente Disponibilité Distance selon l'état (à vide pick-up, à vide rebalancing, client à bord) Taux d'utilisation
Zurich (Suisse)	Hörl et al. (2019) [55]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV Stratégie de relocalisation	Temps d'attente Durée "active" des véhicules Distances à vide Coût par veh-km

Continued on next page

**Tableau A.1 – Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante (suite)**

Aire	Auteurs	Modèle	Scénario	Indicateurs
Zurich (Suisse)	Balac et al. (2019) [152]	Modèle agent-based via MATSim + mixed integer linear programming (MILP)	Taille de la flotte de SAV Position des pick-up et drop-off prédéfinis	Nombre de véhicules VKT
Zurich (Suisse)	Becker et al. (2019) [80]	Diagramme fondamentaux	Variation de la capacité Part du réseau attribuée aux AV Part de la demande	Vitesse Débit Densité
Sioux Falls (USA)	Hörl (2017) [56]	Modèle agent-based via MATSim	SAV single ride, SAV ride-sharing	Part modale # véh. actifs Taux d'occupation Temps de déplacement Temps d'attente Temps en véhicule Part km à vide Distance moyenne passager Taux d'utilisation (moyen, max)
Paris (France)	Hörl et al. (2019) [153]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV	Nombre de déplacements Coût opérationnel
Suisse	Sieber et al. (2018) [154]	Modèle agent-based via MATSim	Taille de la flotte de SAV Stratégie de relocalisation	Coût d'opération annuel Coût moyen par veh-km Niveau de service : temps de parcours, temps d'attente VKT selon état (client, pick-up, repositionnement) Vitesse
New Jersey (USA)	Zhu et Kornhauser (2017) [60]	?	Stratégies de repositionnement Taille du véhicule en nombre de place	Nombre minimal de véhicules nécessaires VKT VKT à vide # dép. effectués
Ann Arbor, Floride (USA) Babcock Ranch, Floride (USA) Manhattan, New York (USA)	Burns et al. (2012) [53]	?	Taille de la flotte de SAV	Temps d'attente Ratio de la distance à vide par dép Coût

Continued on next page

**Tableau A.1 – Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante (suite)**

Aire	Auteurs	Modèle	Scénario	Indicateurs
Manhattan, New York (USA)	Iglesias et al. (2019) [90]	BCMP network	Taille de la flotte de SAV	Taux de congestion Volume Disponibilité de la flotte Etat des véhicules (client, relocalisation, attente)
Singapour	Marczuk et al. (2015) [155]	Modèle agent-based via SimMobility	Taille de la flotte de SAV Nombre de stations Station-based, free-floating	Nombre de passagers servis Temps d'attente
San Francisco, Californie (USA)	Ruch et al. (2018) [120]	Modèle agent-based via MATSim avec AMoDeus	Taille de la flotte de SAV Stratégie de repositionnement	Temps d'attente Distance vide
New York (USA)	Samaranayake et al. (2017) [156]	? + Integer linear programming	Stratégies du choix de l'itinéraire pour ridepooling	Demande Taux d'occupation VKT VKT en relocalisation Durée de déplacement
Seattle, Washington (USA) Calgary (Canada) Vancouver (Canada) Washington (USA)	Spieser et al. (2016) [157]	?	Taille de la flotte de SAV Stratégie de repositionnement	Taux d'utilisation # dép. non effectués (temps d'attente >6min) Distance à vide Coût opérationnel
Singapour	Spieser et al. (2014) [158]	?	Taille de la flotte de SAV	Disponibilité Temps d'attente Analyse financière
San Francisco, Californie (USA)	Tsao et al. (2019) [159]	Modèle agent-based via MATSim avec AMoDeus + model predictive control (MPC)	Stratégies du choix de l'itinéraire pour ridepooling	VKT Temps d'attente Temps de parcours
Ville artificielle	Zhang et al. (2016) [91]	? + model predictive control (MPC) + mixed integer linear programming (MILP) program	Stratégies de repositionnement Paramètres de charge	Temps d'attente
New Jersey (USA)	Brownell et Kornhauser (2014) [105]	?	Service door-to-door ou pooled avec station Taille véhicule en nombre de place Seuil d'attente	Nombre de véhicules Coût opérationnel Nombre de déplacements Taux d'occupation Distance moyenne VKT

Continued on next page

**Tableau A.1 – Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante (suite)**

Aire	Auteurs	Modèle	Scénario	Indicateurs
Bloomington, Illinois (USA)	de Souza et al. (2020) [57]	Modèle agent-based via POLARIS	Stratégie de repositionnement Taille flotte de SAV	Taux des requêtes non-servies Part km à vide Frise de l'état des véhicules (pick-up, drop-off, iddle, re-locating) Temps d'attente
Austin, (USA)	Texas Fagnant et Kockelman (2018) [65]	Modèle agent-based via MATSim	SAV single ride, SAV dynamic ride-sharing	Temps d'attente VKT VKT à vide Véhicules économisés Temps de parcours Taille de la flotte requise Part des déplacements partagés
Austin, (USA)	Texas Gurumurthy et al (2019) [77]	Modèle agent-based via MATSim	SAV single ride, SAV dynamic ride-sharing Politique tarifaire	VKT VKT à vide Taux d'occupation Part modale
Austin, (USA)	Texas Levin et Boyles (2015) [85]	Modèle four-step	Evolution du VOT	Demande pour AV Vitesse
Austin, (USA)	Texas Levin et Boyles (2016) [95]	Cell Transmission Model	Proportion AV	Temps de déplacement
Austin, (USA)	Texas Levin et al. (2017) [107]	Cell Transmission Model	SAV single ride, SAV dynamic ride-sharing Taille de la flotte de SAV	Temps de déplacement Temps d'attente Temps en véhicule VKT VKT vide
Austin, (USA)	Texas Loeb et al. (2018) [72]	Modèle agent-based via MATSim	Autonomie des SAEV	Nombre de stations de recharge Temps d'attente (% dep dans intervalle) # dép./veh Distance/veh Déplacement à vide Déplacement pour charge
Austin, (USA)	Texas Zhao et Kockelman (2018) [79]	Modèle CAMPO via TransCAD	Cout opérationnel VOT Cout parking	VKT totaux et par mode Vitesse

Continued on next page

**Tableau A.1 – Liste des indicateurs utilisés dans les articles de simulation de mobilité innovante (suite)**

Aire	Auteurs	Modèle	Scénario	Indicateurs
Atlanta, (USA)	Georgie Zhang et Guhathakurta (2017) [99]	Discrete event simulation (DES)	Cout parking	Parking requis Temps d'attente selon l'heure VKT selon l'état du véhicule (client, pick-up, relocalisation, parking)
Atlanta, (USA)	Georgie Zhang et Guhathakurta (2018) [78]	Modèle based	agent- Avant/après SAV Evolution VOT Politique tarifaire	Temps d'attente Distance ménage au CBD Distance ménage travail
Ville artificielle	Zhang et Guhathakurta (2015) [67]	Modèle based	agent- SAV single ride, SAV dynamic ride-sharing	Temps d'attente, détour, retard (heure de pointe et journée) VKT VKT à vide VKT partagés Distance/véh. VKT selon l'état du véhicule (pick-up, relocalisation) # dép./véh. Flotte requise Nombre d'arrets et durée de charge j/nuit Consommation énergétique Emissions de gaz
Atlanta, (USA)	Georgie Zhang et al. (2018) [127]	Mixed integer programming	Avant/après private AV Seuil d'attente	VKT VKT à vide # dép. Taux de motorisation



## B.2 Autour de la classe KPI

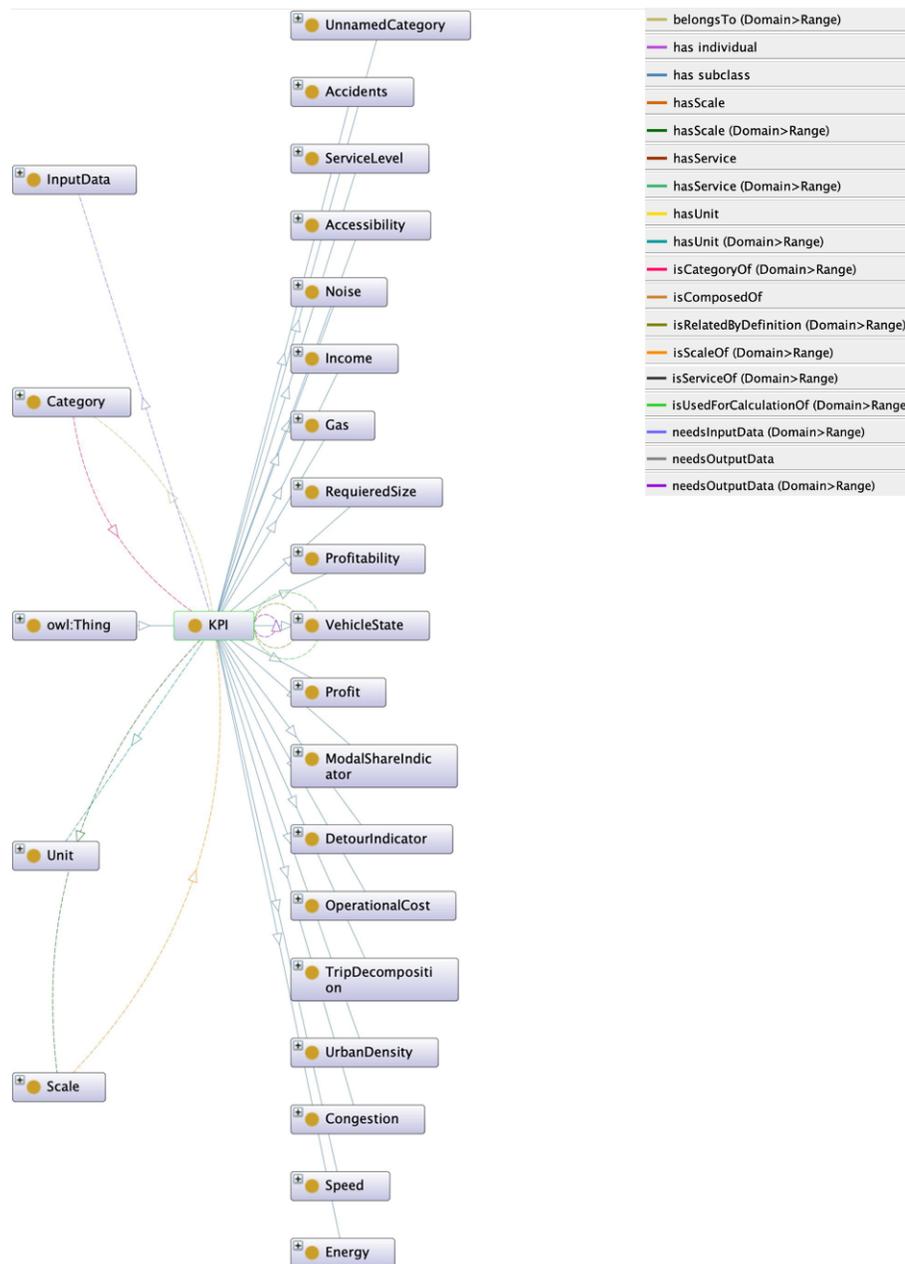


Figure B.3 Classes, sous-classes et propriétés en lien avec la classe KPI

### B.3 Relation mode et service

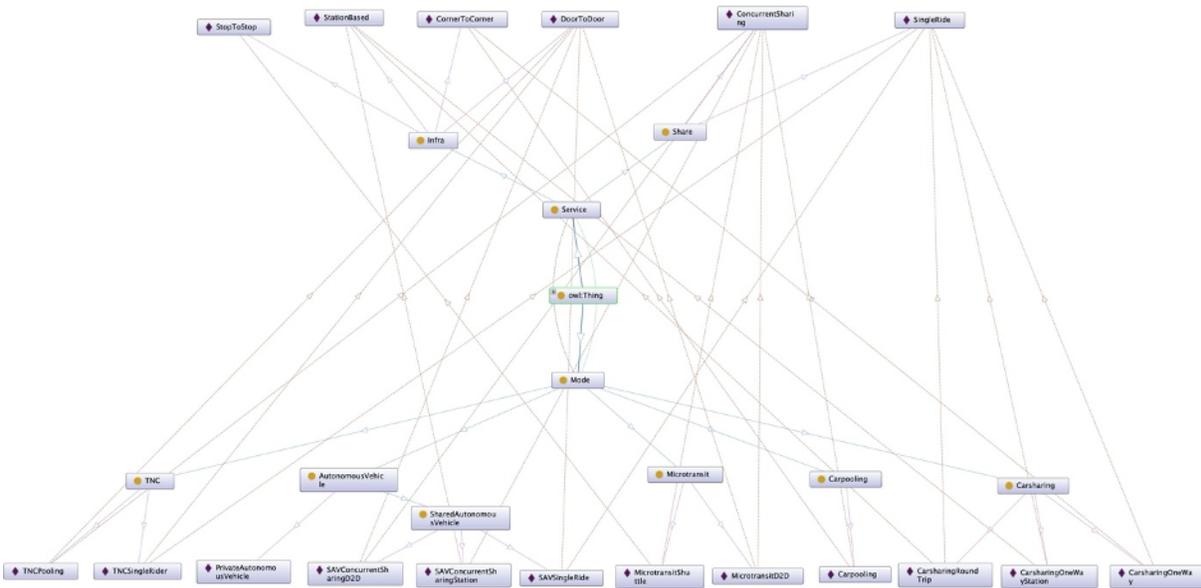


Figure B.4 Relation mode et service

## ANNEXE C GLOSSAIRE DE L'ONTOLOGIE

### C.1 Generality

**Key Performance Indicator:** measure to assess the performance of a phenomenon.

**Trip:** (person-trip) journey of a person to go to an activity [160].  
It begins with the end of the previous activity at the origin place and it ends with the arrival at the destination place.

**Ride:** (vehicle-trip) journey of a vehicle to realized person-trips.  
With concurrent sharing service, the same ride matches with several person-trips.

**Request:** a demand of trip by a customer for an on-demand service of transportation.

### C.2 Mode and service

**AV:** (Autonomous Vehicle) automated and connected vehicle that is capable of moving without a human driver.

**PAV:** (Private/Personal Autonomous Vehicle) autonomous vehicle owned by a single household and not shared.

**SAV:** (Shared Autonomous Vehicle) autonomous vehicle owned by a transportation organization to respond to trip request such as TNCs without driver.

**TNC:** mode of transportation which provides prearranged and on-demand transportation services for compensation, which connect drivers of personal vehicles with passengers. Smartphone applications are used for booking, ratings (for both drivers and passengers), and electronic payment [8].  
*Ridesourcing, ride-hailing*

**Carsharing:** service which offer to its member the access to a fleet of shared vehicles on an as-needed basis rather than rather than owning one or more vehicles [7].

**Carpooling:** mode of transportation which involves the sharing of rides between drivers and passengers with similar origin-destination pairings [11].  
*Ridesharing*

**Microtransit:** Microtransit is defined as a privately or publicly operated, technology- enabled transit service that typically uses multi-passenger/pooled shuttles or vans to provide on-demand or fixed-schedule services with either dynamic or fixed routing [11].

**Shuttle:** Shuttles can include classic first-and-last-mile connections between public transit and employment centers as well as high-tech company shuttles [9].

**One-way:** the vehicle is returned to a different location than its origin [161].

**Roundtrip:** the vehicle is returned to its origin [161].

**Concurrent sharing:** customers can choose to split a ride and fare and share the vehicle with strangers [10,161,162].  
*Ride-pooling, ridesplitting*

**Single rider:** each user have an exclusive use of vehicle during their trip [161,162]. *Sequential sharing*

**Free-floating:** travel mode can be returned anywhere within a geographic area [161].

**Station-based:** vehicle is borrowed and returned to a station location [161], customers? pick-up and drop-off take place in a station location.

**Door-to-door:** customers? pick-up and drop-off take place where the customer wants.

**Corner-to-corner:** customers? pick-up and drop-off take place on principal network axes.

### C.3 Users

**Local authority:** institutional and administrative organization of a geographical area, it is officially responsible for public services and facilities [163] (environmental, social).

**Operator:** company responsible of the service operation and management.

**Stakeholder** : a person who is involved with an organization, society and therefore has responsibilities towards it and an interest in its success [164].

**DesignOffice (pb nom!!):** people working to find the best functioning of the service (maximization of clients, requests, and profit; optimization of the vehicle use).

### C.4 Categories

**Behavior:** KPIs which measure the impacts of the service on mobility behavior of people (understand how people move).

**Economic:** KPIs relative to financial impacts such as investment and money earn.

**Environmental:** KPIs which measure the impacts on the environment, about Earth pollution.

**LandUse:** KPIs which measure the impacts on the built environment and land use.

**Service:** KPIs which assess the level of the service.

**Social:** KPIs which measure the impacts on social stakes.

**Traffic:** KPIs which measure the impacts on traffic conditions on networks.

**UseClient:** KPIs which reveal how customer use the service.

**UseVehicle:** KPIs which reveal how vehicle are used.

### C.5 Studies

**D2DStationComparison:** comparative study to understand the advantages and disadvantages of each service between a door-to-door service and a station-based service, and know which one is the most interesting to implement in the current situation.

**SharingComparison:** comparative study to understand the advantages and disadvantages of each service between single-rider or concurrent sharing with dynamic demand service, and know which one is the most interesting to implement in the current situation.

**FleetSize:** study of several simulations with different number of vehicles to identify their impacts and find the optimum, or best vehicle number to implement.

**LevelOfAutomation:** study of several simulations of vehicles at different level of automation (see [15]) to know impacts depending on technological advances.

**Penetration:** study of several simulations with different level of service penetration and people acceptance.

**Price:** study of several simulation with different pricing model or rate to identify the impacts of the price and find the optimum or best value.

**VehicleSize:** study of several simulations of with different number of seats to know the impacts, and know which model is the most interesting to implement in the current situation.

**VOT:** study of several simulation with different value of time to know the impacts depending on the scenario.

**Electrification:** study with several simulation with different electrical autonomy performance of vehicle and station and also different number of charging stations to know the impact and find the best implantation of charging stations.

**ImplantationStrategy:** study with several simulation with different places to implement vehicle stations or the extent of the service area to know the impact and find the best implantation choice.

**ParkingStrategy:** study with several simulation with different strategy for park vehicles (it can be on-street parking places, in garage, or cruising -i.e. vehicle keeps moving without passenger) to know their impacts.

**PoolingStrategy:** (maybe recall SplittingStrategy or DynamicDemand) study with several simulation with different strategy of regrouping of requests with close origin and destination or close route to find the best algorithm.

**RelocationStrategy:** study with several simulation with different strategy of vehicle repositioning after a ride to find the best algorithm.

## C.6 Indicators

**Accessibility:** Potential for interaction between the amenities of a territory and individuals.

**AccessRatio:** Share of access time during the entire trip.

**AccessTime:** Duration to get to the pick-up place from its origin or to the destination from the drop-off place.

**Accident:** Number of road accidents.

**AirPollutionEvolution:** Evolution rate of air pollution with initial situation.

**AutoModalLost:** Percentage of travelers who abandon their car for the new mode.

**Availability:** Probability to find a vehicle available, average number of vehicles available, i.e. no customer on board or pick-up.

**AvailableTimeByVehicle:** Average time when the vehicle is available to answer a trip request.

**AvailableTimeRatio:** Percentage of time when the vehicle is available.

**AvailableTotalTime:** Total time when vehicles are available to answer a trip request.

**ChargingStops:** Average number of stops for charging the vehicle.

**ChargingTimeByVehicle:** Average time during the simulation when electrical vehicle is in charge for each electrical vehicle.

**ChargingTimeRatio:** Average percentage of time when the vehicle is charging.

**ChargingTotalTime:** Total time when the vehicle is charging.

**CustomerOnBoardDistanceByTrip:** Average distance traveled by trip when there are passengers in the vehicle.

**CustomerOnBoardDistanceByVehicle:** Average distance traveled per vehicle when there are passengers in the vehicle.

**CustomerOnBoardDistanceRatioByTrip:** Percentage of distance traveled when there are passengers in the vehicle on total distance of a trip.

**CustomerOnBoardTimeByTrip:** Average duration of a trip when there are passengers in the vehicle.

**CustomerOnBoardTimeByVehicle:** Average time per vehicle when there are passengers in the vehicle.

**CustomerOnBoardTimeRatioByTrip:** Percentage of time when there are passengers in the vehicle on total trip duration.

**CustomerOnBoardTotalTime:** Total time for all vehicles when there are passengers in the vehicle.

**CustomerOnBoardTotalTimeRatio:** Percentage of time when there are passengers in the vehicle during the simulation.

**CustomerOnBoardVKT:** Total distance traveled for all vehicles when there are passengers in the vehicle.

**CustomerOnBoardVKTRatio:** Percentage of time when there are passengers in the vehicle during the simulation.

**DeltaTravelTime:** Relative difference of average travel time with initial situation.

**DetourDistanceByTrip:** Average distance added per trip when it is shared relative to a direct route between the passenger's origin and destination.

**DetourDistanceRatio:** Percentage of distance added when it is shared relative to a direct route between the passenger's origin and destination.

**DetourTimeByTrip:** Average time added per trip when it is shared relative to a direct route between the passenger's origin and destination.

**DetourTimeRatio:** Percentage of time added when it is shared relative to a direct route between the passenger's origin and destination.

**DetourTotalTime:** Total time added for all trips when it is shared relative to a direct route between the passenger's origin and destination.

**DetourVKT:** Total distance added for all trips when it is shared relative to a direct route between the passenger's origin and destination.

**DistanceByVehicle:** Average distance traveled by a vehicle during the simulation.

**DurationByVehicle:** Average duration by a vehicle when vehicle is moving during the simulation.

**EmptyDistanceByVehicle:** Average distance traveled per vehicle without passenger in the vehicle during the simulation.

**EmptyTimeByVehicle:** Average time traveled per vehicle without passenger in the vehicle during the simulation.

**EmptyTimeRatio:** Percentage of time when there is no passenger in the vehicle during the simulation.

**EmptyTotalTime:** Total time without passenger in the vehicle during the simulation.

**EmptyVKT:** Total distance traveled without passenger in the vehicle during the simulation.

**EmptyVKTRatio:** Percentage of distance traveled without passenger in the vehicle during the simulation.

**EnergyConsumptionEvolution:** Evolution rate of energy consumption with initial situation.

**GHGEmissionEvolution:** Evolution rate of greenhouse gases with initial situation.

**GlobalOccupancyRate:** Average number of passengers per vehicle.

**GoChargeDistanceByVehicle:** Average distance traveled per vehicle to reach a charging station.

**GoChargeTimeByVehicle:** Average duration per vehicle to reach a charging station.

**GoChargeTimeRatio:** Percentage of time to reach a charging station during the simulation.

**GoChargeTotalTime:** Total time to reach a charging station during the simulation.

**GoChargeVKT:** Total distance traveled to reach a charging station during the simulation.

**GoChargeVKTRatio:** Percentage of distance traveled to reach a charging station during the simulation.

**IdleTimeByVehicle:** Average time per vehicle when the vehicle is empty and stationary.

**IdleTimeRatio:** Percentage of time when the vehicle is empty and stationary during the simulation.

**IdleTotalTime:** Total time when the vehicle is empty and stationary during the simulation.

**IncomeByTrip:** Average revenue earned for a trip.

**IncomeByVehicle:** Average revenue earned by a vehicle.

**InVehicleRatio:** Percentage of time when the passenger is in the vehicle during the entire trip duration.

**InVehicleTime:** Duration when the passenger is in the vehicle during their trip.

**JobsDensity:** Number of jobs per unit area.

**LateTrips:** Ratio of trips which the vehicle arrives after the "late" threshold.

**ModalShare:** Percentage of person-trips realized in this mode.

**ModalShift:** Percentage of person-trips which mode has changed from initial situation.

**Multimodality:** Percentage of person-trips which use several modes.

**NoiseEvolution:** Evolution rate of noise with initial situation.

**NumberOfChargingStationMin:** Minimal number of charging stations required.

**NumberOfParkingMin:** Minimal number of parking places required.

**NumberOfVehiclesMin:** Minimal fleet size required for a specific level of service.

**OccupancyRate:** Average number of passengers per vehicle during a trip.

**OccupiedDistanceByVehicle:** Average distance traveled per vehicle when the vehicle is occupied responding a trip request during the simulation.

**OccupiedTimeByVehicle:** Average time per vehicle when the vehicle is occupied responding a trip request during the simulation.

**OccupiedTimeRatio (Utilization rate):** Percentage of time when vehicles are occupied responding a trip request during the simulation.

**OccupiedTotalTime:** Total time when vehicles are occupied responding a trip request during the simulation.

**OccupiedVKT:** Total distance traveled when vehicles are occupied responding a trip request during the simulation.

**OccupiedVKTRatio:** Percentage of distance traveled when vehicles are occupied responding a trip request during the simulation.

**OnTimeTrips:** Ratio of trips which the vehicle arrives before the "late" threshold.

**OperationalCostByTrip:** Cost for an average trip.

**OperationalCostByVehicle:** Average cost for a vehicle during an operating day.

**PassengerKilometerTraveled:** Total distance traveled by all travelers.

**PickUpDistanceByTrip:** Average distance traveled per trip to pick a customer up.

**PickUpDistanceByVehicle:** Average distance traveled per vehicle to pick a customer up during the simulation.

**PickUpDistanceRatioByTrip:** Percentage of distance traveled per trip to pick a customer up.

**PickUpTimeByTrip:** Average time per trip to pick a customer up.

**PickUpTimeByVehicle:** Average time per vehicle to pick a customer up during the simulation.

**PickUpTimeRatioByTrip:** Percentage of time per trip to pick a customer up.

**PickUpTotalTime:** Total time to pick a customer up during the simulation.

**PickUpTotalTimeRatio:** Percentage of time to pick a customer up during the simulation.

**PickUpVKT:** Total distance traveled to pick a customer up during the simulation.

**PickUpVKTRatio:** Percentage of distance traveled to pick a customer up during the simulation.

**PopulationDensity:** Number of inhabitants per unit area.

**Profit:** Amount of money earned by the company after subtracting charges and costs.

**Profitability:** Quality of being profitable.

**RejectionRate:** Ratio of trip requests which are cancelled because any vehicle can respond to the request in time.

**RelocationDistanceByVehicle:** Average distance traveled per vehicle when it goes to another location after a trip request done.

**RelocationTimeByVehicle:** Average time per vehicle when it goes to another location after a trip request done.

**RelocationTimeRatio:** Percentage of time when vehicles go to another location after a trip request done during the simulation.

**RelocationTotalTime:** Total time when vehicles go to another location after a trip request done during the simulation.

**RelocationVKT:** Total distance traveled when vehicles go to another location after a trip request done during the simulation.

**RelocationVKTRatio:** Percentage of distance traveled when vehicles go to another location after a trip request done during the simulation.

**RideDuration:** Average duration of a ride.

**RideLengh:** Average distance of a ride.

**RideNumber:** Total number of rides realized in this mode.

**RidesByVehicle:** Average number of rides realized by a vehicle.

**RoadwayCongestionIndex:** The Roadway Congestion Index (RCI) is a measure of vehicle travel density on major roadways in an urban area.

**SharedDistanceRatio:** Percentage of distance traveled when the vehicle is shared between different passengers.

**SharedDurationRatio:** Percentage of time when the vehicle is shared between different passengers.

**SharedTripRatio:** Percentage of trips which are shared between different passengers.

**Speed:** Average speed of vehicles during the simulation.

**TechnicalTimeByVehicle:** Average time per vehicle when it is no available because of technical reasons.

**TechnicalTimeRatio:** Percentage of time when vehicles are not available because of technical reasons during the simulation.

**TechnicalTotalTime:** Total time when vehicles are not available because of technical reasons during the simulation.

**TotalAirPollution:** Air quality after the simulation based on the calculation of polluting gases.

**TotalEnergyConsumption:** Total of energy consumed at the end of simulation.

**TotalGHGmission:** Total of greenhouse gases emitted during the simulation.

**TotalIncome:** Total of money earn from the service during the simulation.

**TotalNoise:** Average ambient noise.

**TotalOperationalCost:** Total cost for operators during an operating day simulated.

**TransfertRatio:** Percentage of time when the passenger is waiting between their connections during the entire trip duration.

**TransfertTime:** Duration when the passenger is waiting between their connections.

**TravelRateIndex:** Ratio of the travel time during the peak period to the time required to make the same trip at free-flow speeds.

**TravelTime:** Average duration of a trip.

**TripLengh:** Average distance of a trip.

**TripNumber:** Total number of person-trips realized in this mode.

**TripsByVehicle:** Average person-trips realized per vehicle.

**VehicleHourTraveled:** Total of time when vehicles circulate during the simulation.

**VehicleKilometersTraveled:** Total of distance traveled during the simulation.

**WaitRatio:** Percentage of time when the passenger is waiting the vehicle during the entire trip duration.

**WaitTime:** Average duration when the passenger is waiting the vehicle, between the request of a trip and the departure of the vehicle.

**WaitTimeMax:** Maximum value of wait time.

## C.7 Ontology structure

**Ontology:** structured set of terms and concepts representing the meaning of an information field [165].

**Class:** set of instance which present common characteristics necessary for the membership of the class [112].

**Instance:** objects in the domain in which we are interested [112].

*Individuals*

**Properties:** relation between instances [112].

*Slots*

**Attribute:** instance value through a property.

**Object property:** relation which links two instances [112].

**Datatype property:** relation which links an instance to a literal expression [112].

**Domain:** class of the instance described by the property [112].

**Range:** class of the value through the property [112].

**Restriction:** describes a class of individuals based on the relationships that members of the class participate in.

**Existential restriction:** describe classes of individuals that participate in at least one relationship along a specified property to individuals that are members of a specified class [112].

**Universal restriction:** describe classes of individuals that for a given property only have relationships along this property to individuals that are members of a specified class [112].

**Defined class:** a class that has at least one set of necessary and sufficient conditions [112].

**Primitive class:** a class that only has necessary conditions [112].

**Inverse:** property which is the inverse of another property [112].

**Functional:** the property involves that instance can have only one value through this property, otherwise attributes are equals [112].

**Inverse Functional:** the property involves that attribute linked to the instance through this property can be linked to only one instance through this property, otherwise instances are equals [112].

**Symmetric:** the property links the instance to an attribute but automatically the attribute to the instance. The property P relates individual a to individual b then individual b is also related to individual a via property P [112].

**Asymmetric:** the property cannot be symmetric [112].

**Transitive:** the property involves that if the property P relates individual a to individual b, and also individual b to individual c, then we can infer that individual a is related to individual c via property P [112].

**Reflexive:** the property links the instance to itself [112].

**Irreflexive:** the property cannot be reflexive [112].