

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Simulation multi-agent des opérations sur un réseau d'autopartage en libre-  
service intégral**

**NGONÉ ARAME NIANG**

Département de mathématiques et de génie industriel

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

Génie industriel

Décembre 2019

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

## **Simulation multi-agent des opérations sur un réseau d'autopartage en libre-service intégral**

présenté par **Ngoné Arame NIANG**

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

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

**Maha BEN ALI**, présidente

**Martin TRÉPANIÉ**, membre et directeur de recherche

**Jean-Marc FRAYRET**, membre et codirecteur de recherche

**Francesco CIARI**, membre

## REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur de recherche Martin Trépanier ainsi que mon codirecteur Jean-Marc Frayret, qui ont su m'aider tout au long de ce processus de recherche par leur expérience dans le domaine du transport et de la simulation.

Également, j'aimerais souligner l'apport de Communauto à cette étude, tant au niveau du partage des données que du soutien financier. J'aimerais remercier particulièrement Marco Viviani et Simon Rouleau-Mailloux pour leur disponibilité tout au long du projet.

Finalement, j'aimerais également remercier Pascaline Ngoko, Mehran Mehri, Suzanne Pirie et Benjamin Disson pour leur soutien technique et moral durant le projet.

## RÉSUMÉ

Avec l'accroissement constant de la population, les grandes agglomérations sont à la recherche de solutions durables afin de relever les défis de mobilité actuels. D'ailleurs, un objectif principal du gouvernement québécois est l'intégration des modes de transport alternatifs à l'offre de transport urbain actuelle (Transports Québec, 2019). Face à un besoin en mobilité temporellement et spatialement variable, l'autopartage en libre-service intégral se démarque par la flexibilité qu'elle offre à ses usagers. En effet, les compagnies d'autopartage proposant cette variante de service innovent en permettant à leur client de stationner leur véhicule dans n'importe quel stationnement public autorisé. Toutefois, une augmentation de la flexibilité pour l'utilisateur rime très souvent à une augmentation de la complexité organisationnelle pour les opérateurs. L'efficacité opérationnelle est ainsi obtenue en résolvant efficacement les problématiques liées par exemple au choix de la couverture de réseau optimale sur un territoire donné. Dans ce contexte, la simulation devient un outil d'analyse de prédilection.

Le sujet de cette étude est le service d'autopartage en libre-service intégral de Communauto à Montréal. Plutôt que d'estimer sa demande, cette étude vise à analyser sa performance opérationnelle relativement à différentes stratégies de configurations de réseau. Historiquement, lorsqu'il s'agit de systèmes hétérogènes tels que l'objet de cette étude, le mélange de paradigmes de simulation est privilégié pour modéliser les différentes composantes du système (Shaheen, 2009). Ainsi, il a été choisi d'adopter aussi bien une approche à base d'agent, pour représenter les entités évoluant sur le réseau, qu'une approche à événements discrets pour représenter les procédures récurrentes, à l'image du processus de recharge d'un véhicule.

Le modèle a été développé et implémenté sur Anylogic (The Anylogic Company, 2019c). Principalement, trois expérimentations visant à comprendre l'interaction dynamique entre la demande, le taux de service et les politiques d'utilisation du service ont été menées. Chaque expérimentation a été évaluée quand les clients sont restreints à terminer leur voyage dans la zone de service définie par l'opérateur (scénario 1) ou non (scénario 2). Globalement, l'utilisation moyenne du service est légèrement supérieure au scénario 2 qu'au scénario 1, ce dernier permettant néanmoins d'avoir une fréquence d'utilisation journalière des véhicules de la flotte plus uniforme.

Afin d'analyser la sensibilité du système aux variations de la demande et de la flotte, l'élasticité de la demande latente a été évaluée par rapport à ces changements stratégiques.

Cet indice de sensibilité mesure à quel point la demande latente change lorsque l'une de ces variables stratégiques change. Ainsi, en faisant varier le nombre de véhicules disponibles, les coefficients d'élasticité obtenus ont permis de conclure qu'une augmentation de la taille de la flotte entraîne une baisse de la demande latente, quel que soit le scénario étudié. L'inverse est vrai dans le cas où l'intensité de la demande est sujette à variation.

## ABSTRACT

With human population constantly growing, sustainable ways to meet current mobility challenges is quickly becoming a concern for highly urbanized cities. Indeed, one main objective of the Quebec government is to integrate alternative modes of transportation into the current urban transportation offer (Transports Québec, 2019). With a mobility demand that is both spatially and temporally variable, free-floating carsharing stands out for the flexibility it offers to its users. Indeed, carsharing companies offering this variant of service innovate by allowing their customers to park their vehicles in any authorized public parking space. However, an increase in flexibility for the user very often means an increase in organisational complexity for the carsharing company. Operational efficiency is thus achieved by effectively solving problems related, for instance, to the choice of optimal network coverage in a given territory. In this context, simulation becomes a preferred analytical tool.

The subject of this study is Communauto's free-floating carsharing service in Montreal. Rather than estimating its demand, this study aims to analyze its operational performance with respect to different network configuration strategies. Historically, when it comes to heterogeneous systems such as the subject of this study, the mixture of simulation paradigms is preferred to model the different components of the system (Shaheen, 2009). Thus, it was chosen to adopt both an agent-based approach to represent entities operating on the network, and a discrete event approach to represent recurrent and entity-specific procedures such as the charging process of a vehicle.

The model was developed and implemented on Anylogic (Anylogic, 2019). Mainly, three experiments were conducted directly aimed at understanding the dynamic interaction between demand, service rate and clients' usage policies. Each experimentation was evaluated when a policy restraining customers' trips ends in a service area defined by the operator was applied strictly (Scenario 1) and when customers were allowed to complete their travel outside that same area (scenario 2). Experimentation shows an overall increase in the vehicle utilization rate in scenario 2 compared to scenario 1, the latter making it possible to have more uniform daily vehicle utilization frequency.

In order to analyze the sensitivity of the system to variations in fleet demand and sizing, the latent demand's elasticity was assessed in relation to these strategic changes. This sensitivity index measures to which degree latent demand changes when one of those strategic variables changes.

By varying the number of vehicles available, the coefficients of elasticity obtained made it possible to conclude that an increase in the size of the fleet causes a fall in latent demand whatever the scenario under study is. The opposite is true when the intensity of demand is subject to variation.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES .....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	XIV
LISTE DES ANNEXES .....	XV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Objectifs .....	2
1.3 Structure du mémoire .....	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	3
2.1 Autopartage : définition et variantes .....	3
2.1.1 Définition de l'autopartage.....	3
2.1.2 Variantes d'offres de service.....	4
2.2 Libre-service intégral .....	5
2.2.1 Comportement des usagers.....	5
2.2.2 Politiques stratégiques des compagnies .....	7
2.2.3 Impacts environnementaux .....	7
2.3 Modélisation et simulation dans le domaine du transport urbain.....	8
2.3.1 Différentes approches de modélisation .....	8



2.3.2	Utilisation de la simulation dans le contexte de l'autopartage.....	9
2.4	Évolution de la recherche sur l'autopartage du point de vue de Communauto.....	11
CHAPITRE 3	CONTEXTE D'ÉTUDE ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	13
3.1	Contexte d'étude .....	13
3.1.1	Communauto et son offre LSI.....	13
3.1.2	Processus clés .....	14
3.2	Méthodologie générale.....	15
CHAPITRE 4	MODÉLISATION ET IMPLÉMENTATION .....	17
4.1	Description fonctionnelle du modèle .....	17
4.2	Collecte des données .....	19
4.2.1	Données transactionnelles.....	19
4.2.2	Données opérationnelles .....	22
4.2.3	Données géographiques.....	23
4.3	Implémentation du modèle.....	23
4.3.1	Présentation d'Anylogic.....	24
4.3.2	Couche multi-agent .....	25
4.3.3	Générateur de trajet .....	34
4.3.4	Couche SIG .....	39
4.4	Vérification du modèle.....	40
4.5	Calibration et validation du modèle .....	41
CHAPITRE 5	EXPÉRIMENTATION .....	47
5.1	Plan d'expérience .....	47
5.1.1	Description générale.....	47
5.1.2	Paramétrage de la phase d'expérimentation.....	48

5.2	Expérience 1 : Taille de la flotte et demande constante .....	50
5.3	Expérience 2 : Taille de la flotte variable et demande constante .....	56
5.4	Expérience 3 : Taille de la flotte constante et demande variable .....	59
5.5	Discussion générale et recommandations .....	62
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....		65
6.1	Contribution .....	65
6.2	Limites.....	66
6.3	Perspectives.....	66
BIBLIOGRAPHIE .....		67
ANNEXES .....		71

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Définitions des différentes variantes d'autopartage.....	4
Tableau 4.1 : Champs de la base de données transactionnelle.....	20
Tableau 4.2 : Description de la base de données transactionnelles.....	21
Tableau 4.3 : Données opérationnelles liées à la flotte.....	23
Tableau 4.4 : Fonctions principales de l'agent <i>Planification Center</i> .....	29
Tableau 4.5 : Stations de recharges des véhicules électriques.....	30
Tableau 4.6 : Discrétisation selon l'heure.....	35
Tableau 4.7 : Matrice de corrélation entre <i>Trip_Day</i> et <i>Trip_Hour</i> .....	37
Tableau 4.8 : Statistiques <i>Goodness of fit</i> et test du Chi-carré de Pearson.....	37
Tableau 4.9 : Exemple de matrice O/D en entrée du générateur de trajet.....	38
Tableau 4.10 : Exemple d'un test effectué lors de la phase de vérification.....	41
Tableau 5.1 : Profil des véhicules de la flotte selon la fréquence d'utilisation journalière.....	50
Tableau 5.2 : Profils ajustés des véhicules de la flotte selon la fréquence d'utilisation journalière .....	50
Tableau A.1 : Récapitulatif des travaux collaboratifs entre Communauto et Polytechnique de Montréal.....	71
Tableau B.1 : Aperçu de la base de données transactionnelles.....	72

## LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Offre d'autopartage de Communauto sur le marché montréalais (Wielinski et al., 2019) ( Traduction libre) .....	13
Figure 3.2 : Méthodologie générale .....	16
Figure 4.1: Processus clés du réseau LSI .....	18
Figure 4.2: Comparaison entre une réservation et une transaction .....	19
Figure 4.3: Aperçu du module <i>Process Library</i> .....	24
Figure 4.4: Diagramme d'état du type d'agent <i>Client</i> .....	27
Figure 4.5 : Zone de recharge des véhicules électriques.....	30
Figure 4.6 : Diagramme d'état de la population type <i>Staff</i> .....	31
Figure 4.7 : Diagramme d'état d'un agent de type <i>Vehicle</i> .....	33
Figure 4.8 : Moments d'utilisation du service LSI .....	36
Figure 4.9 : Carte interactive de l'affectation du territoire selon le Schéma d'aménagement et de développement (Ville de Montréal, 2015) .....	40
Figure 4.10 : Diagramme d'état du générateur de trajet .....	42
Figure 4.11 : Comparaison des tendances d'utilisation de service réelle et simulée.....	44
Figure 4.12 : Comparaison des dispersions relatives d'utilisation du service .....	45
Figure 4.13 : Carte de chaleur des déviations relatives.....	46
Figure 5.1 : Plan d'expérience .....	47
Figure 5.2 : Évolution de l'écart entre les nombres de transactions.....	49
Figure 5.3 : Comparaison des proportions de chaque profil de véhicule de chaque scénario expérimental .....	51
Figure 5.4 : Comparaison du nombre de jours actifs selon le profil de véhicule.....	52
Figure 5.5 : Répartition spatiale des véhicules selon les différents scénarios.....	53

Figure 5.6 : Profil d'utilisation des véhicules selon le type.....	54
Figure 5.7 : Nombre de jours actifs selon le type de véhicule utilisé .....	55
Figure 5.8 : Profil de fréquence d'utilisation des véhicules selon la taille de la flotte .....	56
Figure 5.9 : Variation de l'indice de sensibilité selon la variation de la taille de la flotte.....	58
Figure 5.10 : Profil de fréquence d'utilisation des véhicules selon la demande.....	59
Figure 5.11 : Variation de l'indice de sensibilité selon la variation de la demande .....	61
Figure 5.12 : Capture d'écran du troisième jour de simulation - Scénario 2 .....	63
Figure 5.13 : Évolution de la demande latente - Cas du Scénario 2 .....	64

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ABM Agent-based model

DES Discrete-event simulation

FLEX Acronyme du réseau d'autopartage en libre-service intégral de Communauto

LSI Libre-Service Intégral

N/A Non Applicable

OPUS Acronyme de la carte à puce utilisée par les sociétés de transport de la grande région montréalaise et dans la région de Québec pour la recharge des titres de transport

SD System dynamics

SIG Système d'information géographique

## LISTE DES ANNEXES

Annexe A Contributions à la recherche sur Communauto.....	71
Annexe B Base de données transactionnelles .....	72
Annexe C Instructions principales du modèle.....	73

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte

L'utilisation généralisée des téléphones intelligents et la disponibilité en temps réel des informations concernant l'état des différents réseaux de transport augmentent l'attrait des habitants des grandes agglomérations aux modes de transport alternatifs. Aujourd'hui, il est difficile de parler de ce type de mobilité sans faire référence à l'autopartage. En effet d'ici 2020, il est projeté que plus de 12 millions de personnes dans le monde utiliseront des services d'autopartage, ce qui représenterait un marché approximatif de 6,2 milliards de dollars (Degirmenci et al., 2014). Afin de répondre à la demande variée des consommateurs, différents systèmes d'autopartage sont proposés sur le marché, qui diffèrent en termes de système de tarification et de modes (Liao et al., 2018). En évolution constante, certaines compagnies d'autopartage telles que Communauto ont décidé d'étendre leur offre de service en proposant aux clients l'opportunité de ne pas forcément avoir à réserver un véhicule dans une certaine station et à le retourner à cette station précise, mais de pouvoir l'utiliser et le déposer à n'importe quel stationnement public autorisé dans une zone de couverture définie. Cette configuration de réseau est communément appelée le Libre-Service Intégral (LSI). La terminologie unidirectionnelle ou « one-way » est largement utilisée pour distinguer ces trajets aux trajets allers-retours.

En outre, les compagnies souhaitant diversifier leur offre de service et incorporer le LSI dans leur réseau rencontrent souvent certains défis logistiques. Quelles doivent être les limites géographiques de la zone de couverture ? Comment répartir les véhicules dans la zone de couverture pour maximiser leur utilisation ? Comment relocaliser les véhicules dans la zone de couverture ? Tous ces questionnements entraînent un besoin de se doter d'outils permettant un suivi de leur performance. Parmi ces outils, la simulation multi-agent peut faciliter la description et la prévision de l'utilisation d'un réseau d'autopartage. En simulant les interactions de nombreux utilisateurs entre eux et avec leur environnement, il est possible de mesurer l'effet de la variation de paramètres logistiques stratégiques d'une compagnie sur l'évolution du système dans son entièreté. Cet outil permet de mieux comprendre le fonctionnement de systèmes complexes. Dans de nombreux cas, les phénomènes émergents de l'évolution de ces systèmes - qu'il serait difficile de dériver analytiquement - deviennent explicites après l'utilisation d'un modèle de simulation.



## 1.2 Objectifs

Depuis 2007, plusieurs auteurs affiliés à l'École Polytechnique de Montréal ont préalablement utilisé des données d'enquêtes de type origine-destination ainsi que de données passives (transactionnelles, géolocalisées, GPS, capturées) fournies par Communauto afin de décrire l'écosystème du réseau d'autopartage et les comportements révélés de ses utilisateurs. C'est dans cette optique que s'inscrivent les travaux présentés dans ce mémoire, qui tente d'ajouter une dynamique spatio-temporelle en intégrant ces données dans un modèle de simulation multi-agent. Ainsi, les objectifs spécifiques de ce mémoire sont de :

- développer une approche d'estimation de la demande intégrant les données passives;
- développer un modèle de simulation permettant d'avoir une vision globale des opérations se produisant sur le réseau d'autopartage en LSI;
- comparer différentes stratégies opérationnelles liées à la variation de la politique d'utilisation imposée aux clients, de la demande en déplacement et de la taille de la flotte de véhicules;
- étudier le comportement du système par rapport à ces stratégies et formuler des recommandations à l'opérateur.

## 1.3 Structure du mémoire

Ce mémoire est composé de six chapitres incluant ce présent chapitre introductif. Il s'en suit au chapitre 2 une revue de la littérature sur l'autopartage, avec un accent mis sur le volet LSI. L'objectif principal dans cette section sera de s'informer sur l'état actuel des travaux liés à la simulation en lien avec l'autopartage et ainsi définir des pistes de solution pour la problématique à l'étude. Le troisième chapitre présente la méthodologie appliquée dans cette étude. Il sera introduit par une présentation du contexte de cette étude. Au chapitre 4 est présenté le modèle de simulation développé. Tous les modules le composant ainsi que les données utilisées lors de leur élaboration seront décrits. Le cadre expérimental sera ensuite posé et l'accent sera mis sur chaque scénario simulé au chapitre 5. Les résultats obtenus après simulation seront également présentés, validés et discutés entièrement dans ce chapitre. Finalement, au dernier chapitre seront formulées les contributions et les limitations de ce mémoire et ultimement les pistes de recherches futures.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, une revue de littérature s'organisant sous quatre sections est proposée. La première se concentre sur une définition de l'autopartage et de ses variantes, dont l'autopartage en LSI qui fera d'ailleurs l'objet d'une étude plus poussée dans la section suivante. La troisième section, quant à elle explore l'utilisation des outils de simulation dans la modélisation en transport urbain multimodal d'une part, et dans l'autopartage d'autre part. Finalement, un portrait des travaux liés à Communauto est dressé dans une dernière partie, le but principal étant de comprendre intrinsèquement le fonctionnement du réseau LSI afin de mieux le modéliser. Les informations synthétisées dans cette revue seront bénéfiques dans la compréhension de l'approche méthodologique proposée.

### 2.1 Autopartage : définition et variantes

#### 2.1.1 Définition de l'autopartage

Depuis son introduction, l'autopartage a été défini de plusieurs manières dans la littérature. Les premières esquisses de définition ont vu le jour à la fin des années 1950 en Europe et au début des années 1980 en Amérique du Nord (Shaheen et al., 1999). De manière générale, les auteurs s'entendent que l'autopartage est un service offert par une entreprise, permettant aux membres d'accéder à sa flotte de véhicules dispersés dans une zone de service ou regroupés à des emplacements centralisés en échange de frais (Di Febbraro et al., 2012). Ainsi, plutôt que de posséder un ou plusieurs véhicules, un ménage ou une entreprise en a accès à plusieurs, à usage partagé. Les véhicules sont accessibles au besoin et les membres paient généralement des frais chaque fois qu'ils utilisent le service. En outre, la plupart des systèmes d'autopartage sont souvent conçus pour des trajets de plus courtes distances en tant qu'extension du réseau de transport ou du véhicule personnel (Wenxiang et al., 2017), raison pour laquelle ils sont souvent désignés comme étant un mode de transport alternatif.

Par ailleurs, il est primordial de différencier l'autopartage du covoiturage. Là où le premier se rapproche de la location grande enseigne de véhicule, le second est communément défini comme « l'utilisation d'une même voiture particulière par plusieurs personnes effectuant le même trajet notamment afin d'alléger la congestion routière et de partager les frais de transport » (Larousse,

2019). Ainsi, certains auteurs l'identifient plus au prêt entre personnes, qui sera présenté à la section suivante.

## 2.1.2 Variantes d'offres de service

À ce jour existent plusieurs types d'autopartage qui seront présentés brièvement dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.1 : Définitions des différentes variantes d'autopartage

	<b>Autres appellations</b>	<b>Définitions</b>
Autopartage en station ou basé-station	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autopartage en boucle</li> <li>• Autopartage traditionnel</li> <li>• Autopartage unilatéral avec réservations</li> </ul>	Une compagnie privée offre à ses clients des véhicules positionnés à des stations déterminées, moyennant une compensation financière. Après utilisation, ses véhicules doivent être retournés à leur station d'origine (Münzel et al., 2019)
Autopartage entre particuliers	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prêt entre personnes</li> </ul>	Des particuliers louent leur véhicule à des automobilistes pour une courte durée et moyennant une compensation financière. Les modalités de restitution sont préalablement définies (Shaheen, Mallery, & Kingsley, 2012)
Autopartage en libre-service intégral	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autopartage en trace directe</li> <li>• Autopartage serviciel</li> </ul>	Une compagnie privée offre à ses clients des véhicules positionnés dans une zone prédéterminée. Après utilisation, ses véhicules peuvent être retournés à n'importe quelle place de stationnement autorisé dans cette même zone (Wielinski et al., 2015)

En outre, les deux principales configurations adoptées par les entreprises nord-américaines sont l'autopartage traditionnel et le libre-service intégral. La première, souvent nommée autopartage en station oblige l'utilisateur à effectuer une réservation d'un véhicule avant son déplacement, à aller chercher le véhicule à une station, puis après déplacement à le redéposer à cette même station. On parle ici de trajets en boucles (Barnhart et al., 2012). Cette offre de service est historiquement la plus populaire, avec un marché couvrant deux tiers de la population en Europe (Shaheen et al., 2018). Le libre-service intégral quant à lui supprime la logique de stations. En effet, il permet à l'utilisateur de prendre et de retourner le véhicule après utilisation dans n'importe quel stationnement public à l'intérieur d'une zone de service définie par l'entreprise (Schaefers, 2013). À part ces deux formes d'autopartage, nous retrouvons également le prêt entre personnes où des propriétaires d'automobiles privés peuvent louer leur véhicule, pour une courte durée, à d'autres en retour d'une compensation monétaire (Wielinski et al., 2015).

## **2.2 Libre-service intégral**

En 2016, l'autopartage en LSI était retrouvé dans 34 villes de densité moyenne à élevée dans plusieurs pays européens et nord-américains (Kortum et al., 2016). À ce jour, peu de travaux se concentrant seulement sur le LSI ont été recensés si on considère que Car2go, généralement connue comme étant la première compagnie ayant implémenté cette offre de service, a seulement démarré ses opérations à Ulm, en Allemagne, en octobre 2008 (Ciari et al., 2014). Cependant, il a été à ce jour étudié selon cinq axes principaux : la tarification, l'analyse du marché, le comportement des usagers, les politiques stratégiques des opérateurs et les impacts environnementaux (Giorgione et al., 2019). Les trois derniers axes cités seront explorés davantage dans les sous-sections suivantes :

### **2.2.1 Comportement des usagers**

De manière générale, le comportement des usagers a été étudié selon trois axes distincts dans la littérature: les motifs d'adoption du LSI, les attitudes et caractéristiques des membres du service et ultimement les habitudes de déplacement (Degirmenci et al., 2014).

Par rapport aux motifs d'adoption du LSI par des ménages, Schaefers (2013) a identifié quatre principales motivations à la suite d'une analyse dans un contexte nord-américain. Il s'agit de la recherche de convenance et de maximisation de la valeur, l'adéquation avec le mode de vie et

ultimement un intérêt vif pour les questions environnementales (Seign, 2014). Les mêmes conclusions ont été tirées en Allemagne, dans un contexte plus européen à la suite d'une enquête sur les facteurs de succès d'un réseau LSI 100% électrique (Seign et al., 2013).

En outre, les utilisateurs de cette variante d'autopartage sont généralement dans la trentaine voire la quarantaine, ont des revenus moyens à élevés, un niveau d'instruction élevé et proviennent de ménages de taille moyenne. D'un point de vue démographique et dans le cas précis de Communauto, Wielinski et al. (2019) note une augmentation du nombre de femmes ayant adopté le LSI, amenant une tendance vers l'équité homme / femme en 2018. Les membres deviennent également de plus en plus jeunes avec une moyenne d'âge variant de plus ou moins 40 ans en 2014 à 35 ans en 2019.

Quant à l'utilisation du service, il a été souligné que le LSI était plus populaire dans les régions moyennement à fortement urbanisées (Millard-Ball et al., 2005). Ainsi, Costain et al. (2012) ont remarqué que pour le cas de Toronto, les usagers utilisaient très fortement le service durant la pointe du matin, entre 6h et 11h, ce que l'on retrouve également à Montréal. Également, il a été noté par ces mêmes auteurs que l'utilisation du service augmentait au courant de la semaine, pour atteindre son maximum en fin de semaine. Kortum et al. (2012) ont également noté que les usagers LSI se différenciaient des utilisateurs en station en termes d'utilisation de service par le fait que ceux-ci privilégiaient les trajets de plus courtes durées et de plus courtes distances. Wielinski et al. (2019) ont quant à eux pu distinguer quatre catégories d'usager de service dans le contexte montréalais. En effet, sur une base de 90 jours, ils ont distingué les usagers à basse fréquence (4 jours actifs ou moins sur 90), à fréquence moyenne (10 jours actifs ou moins sur 90), à haute fréquence (26 jours actifs ou moins sur 90) et à ultra fréquence (plus de 26 jours actifs).

Pour les habitudes de déplacement, la flexibilité qu'offre le LSI fait en sorte que les trajets faits par un usager ne sont pas forcément à proximité de son lieu de vie. Cependant, une tendance vers l'utilisation des véhicules par les usagers pour le retour au domicile se discerne (Wielinski et al., 2019).

Étant donné que les clients du réseau LSI de Communauto seront pris en compte dans le modèle implémenté comme des agents, le portrait ainsi dressé des usagers usuels des réseaux d'autopartage dans le monde sera utile aussi bien dans la phase de conception de la dynamique des clients au chapitre 4 que dans la phase d'analyse de leur comportement au chapitre 5.

## **2.2.2 Politiques stratégiques des compagnies**

La performance stratégique des opérateurs de LSI est un autre aspect qui a été exploré dans la littérature. Il a été distingué cinq facteurs importants lors du déploiement d'un réseau au cours de la recherche sur les facteurs de succès de celui-ci dans une ville : la zone de service, la taille et composition de la flotte de véhicule, la politique de maintenance des véhicules et la tarification du service (Seign, 2014). Relativement à la zone de service, Costain et al. (2012) ont souligné que l'augmentation du nombre d'utilisateurs actifs dépendait plus de l'augmentation de la zone de service que de celle de la flotte de véhicule. Cependant, une analyse menée sur des données passives d'une compagnie d'autopartage basée à Toronto indique qu'une augmentation du nombre de membres actifs est davantage corrélée à l'augmentation de la couverture spatiale du service qu'à la simple augmentation de la taille de la flotte (Costain et al., 2012). Ceci a également été confirmé dans le cas du LSI à Montréal où il a été montré par analyse régressive que la disponibilité des véhicules était l'un des facteurs les plus prépondérants dans la décision d'utilisation (Wielinski et al., 2017).

## **2.2.3 Impacts environnementaux**

L'adoption de l'autopartage en général est souvent corrélée à une réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les villes où elle est adoptée. Cette diminution est d'une part induite de la diminution du taux de possession de véhicules personnels (Martin et al., 2010), d'une diminution de la congestion routière et d'une intégration réussie comme support au transport urbain multimodal (Millard-Ball et al., 2005). Pour le cas spécifique du LSI, il est plus difficile de cibler les impacts environnementaux (Wielinski et al., 2019). Cependant, une enquête effectuée en 2015 sur les usagers de la compagnie Car2go vivant à Calgary, San Diego, Seattle, Vancouver et Washington D.C a pu montrer que l'utilisation du LSI a induit une diminution de 4 à 18% des émissions de GES par voiture / ménage ayant souscrit à Car2go (Shaheen et al., 2016). En outre, pour certaines compagnies à l'image de Communauto, l'adoption de véhicules à faibles émissions (véhicules hybrides) et des véhicules 100% électriques contribue à la réduction de l'empreinte carbone (Liping et al., 2018). En revanche, il est argumenté qu'un facteur de biais peut s'installer dans la fiabilité de ces résultats lorsque des hypothèses sont posées sur la disponibilité des véhicules appartenant au volet basé stations (Ciari et al., 2014).

Par ailleurs, il a été noté préalablement que l'une des raisons pour lesquelles les personnes s'abonnaient au LSI était le fort impact environnemental que celui-ci renvoie. Cependant, pour Communauto, ce n'est pas pour autant que les véhicules électriques étaient privilégiés aux véhicules hybrides. En effet, il a été montré qu'il n'y avait pas de différences significatives dans l'utilisation faite des véhicules de la flotte. En effet, les clients, aussi bien du service LSI que du service traditionnel, ne discriminaient pas forcément un type de véhicule par rapport un autre lors de la réservation. Cependant, lorsqu'on dépassait les 24 km d'utilisation, il y'avait une légère préférence portée sur les véhicules hybrides , jugés plus fiables pour les trajets de longue distance (Wielinski et al., 2017) .

## **2.3 Modélisation et simulation dans le domaine du transport urbain**

Historiquement, des efforts de recherches considérables ont été menés afin d'avancer dans la compréhension de phénomènes urbains, tels que la cohabitation sur les réseaux de transport et la congestion induite par l'utilisation d'outils de modélisation.

### **2.3.1 Différentes approches de modélisation**

De manière générale, la modélisation se définit comme un outil de résolution de problèmes à complexité variable, souhaitant principalement donner une alternative à l'expérimentation de scénarios sur les objets réels étudiés (Borshchev, 2013).

Un modélisateur a plusieurs instruments en poche lors de la représentation d'un système complexe. Dépendamment de la qualité des informations qu'il a à sa disposition ainsi que de la caractéristique des données souhaitées en sortie du modèle, différentes approches de modélisation peuvent être utilisées. Globalement, les approches de modélisation peuvent se regrouper sous trois grands chapeaux : la modélisation mathématique ou analytique, la modélisation computationnelle et la modélisation physique (Borshev, 2013).

La modélisation physique est l'approche la plus ancienne, elle est communément référencée comme étant du prototypage ou un système est représenté physiquement, mais à plus petite échelle. Cette modélisation est très prisée en architecture et urbanisme pour la construction de plan d'aménagement de territoire, mais aussi en mécanique et structure lors des tests de prédiction de la résistance des matériaux (Balachowski, 2017). La modélisation mathématique est

quant à elle définie par Bender (2000) comme étant une construction abstraite et simplifiée liée à une partie de la réalité. Cette construction est un ensemble d'équations mathématiques qui peuvent être utilisées afin de résoudre un ensemble de questions reliées à un système physique (Bellomo et al., 1982); (Velten, 2009).

Dans les situations où un algorithme représentatif d'un système est dans un programme informatique, et que cet ensemble d'instructions est exécuté et implémenté par ordinateur, le terme modélisation computationnelle est utilisé. Dans ce contexte, l'implémentation et l'expérimentation de ces modèles sont référées comme étant la simulation (Chung, 2003). Les auteurs s'entendent sur l'efficacité de cette méthode lors de la modélisation des flux de transport. En effet, un avantage longtemps souligné est la possibilité d'obtenir une représentation à la fois d'un système dans son entièreté, mais aussi du processus décisionnel des entités le composant (Ciari et al., 2014). En fonction du secteur d'intérêt (estimation de la demande, planification de la performance opérationnelle...), différents paradigmes de modélisation ont été utilisés dans le domaine des transports :

- Modélisation par évènement discret (DES) : apparue dans les années 1960, la méthode DES est l'une d'elles. Basée sur l'exécution séquentielle d'opérations sur des entités, la DES est un moyen très courant de modéliser des systèmes orientés processus ou dont les entités interagissent de manière prévisible (Borshchev, 2013).
- Modélisation par dynamique de système (SD): Apparue dans les années 1950, la méthode SD permet de ne pas se focaliser sur une description spécifique des entités d'un système, mais sur la causalité des évènements dans lesquels ils sont impliqués (Borshchev, 2013).
- Modélisation à base d'agents (ABM) : apparue vers les années 2000, la méthode ABM se concentre sur les représentations individuelles du comportement d'un agent afin d'en déduire le comportement du système dans son entièreté. Il s'agit d'une approche plus désagrégée que la méthode DES (Homem de Almeida Correia, 2018).

### **2.3.2 Utilisation de la simulation dans le contexte de l'autopartage**

La simulation s'avère être un outil de prédilection dans la représentation des interactions entre un territoire, sa population et ses moyens de transport. Pour le cas précis de l'autopartage, on peut retrouver l'utilisation de la simulation dans la résolution de problématiques liées à l'estimation



de la demande ainsi que la performance opérationnelle (Jorge et al., 2013), aussi bien pour l'autopartage traditionnel que pour l'autopartage en LSI.

En ce qui a trait à l'estimation de la demande, la modélisation à base d'agent reste la méthode la plus utilisée à l'image de Mendes Lopez et al. (2015) qui ont estimé la demande en autopartage traditionnel dans leurs travaux en utilisant un modèle multi-agent représentant le choix modal dans la ville de Lisbonne (Viegas, 2010). Li (2017) a également mis au point un modèle de simulation d'un système hypothétique d'autopartage fondé sur les réservations, mais utilisant une approche par événement discret. Heilig et al (2018) ont étudié l'intégration de l'autopartage dans un modèle de demande de transport orienté agent simulant le comportement de la population de la région de Stuttgart pendant une semaine.

Cependant, pour mieux capter les interactions entre l'utilisation d'un territoire par ses habitants et ses modes de transport, les auteurs gravitent de plus en plus vers les modèles multiagents orientés activité. En effet, ces modèles permettent une estimation de la demande en autopartage en générant une liste séquentielle des activités pour chaque agent qui serait comparable, par exemple au programme journalier d'un individu (Ciari et al., 2008). Ainsi, la génération de la demande est intégrée dans un concept de demande d'activité quotidienne à partir de laquelle le besoin en transport est dérivé (Mokhtarian, 2009). Ciari et al (2014) ont utilisé MATSim, un logiciel de simulation basé activité pour évaluer la demande dans la ville de Berlin tout en considérant la disponibilité des différents modes de transport et l'acheminement dynamique des déplacements sur un réseau de transport. Le choix modal optimal est obtenu en minimisant le coût généralisé de transport jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de possibilités d'amélioration.

En ce qui concerne l'autopartage LSI, la recherche se concentre sur plusieurs aspects Barrios (2014). a développé un modèle de simulation basé sur les agents pour prédire le niveau de service de car2go à Austin, Texas et San Diego, Californie. Ciari et al. (2015) ont incorporé une option d'autopartage en libre-service dans MATSim pour en estimer la demande par rapport à différents systèmes de tarification. De plus, la flexibilité induite par la configuration de service entraîne un questionnement sur sa performance opérationnelle. Par exemple, Di Febbraro et al (2012) ont utilisé une approche DES, reposant sur une demande fixe agrégée par zone, pour étudier la taille optimale de la flotte de véhicules d'un opérateur turinois en Italie. Plus récemment, Balac et al. (2019) ont utilisé MATSim pour étudier l'interaction de deux opérateurs d'autopartage rivaux

dans la ville de Zurich, en Suisse, et analyser le choix modal d'un agent sur la base d'un modèle discret. Ceci a permis entre autres de mesurer la compétition potentielle entre ces opérateurs.

Pour le cas particulier de Communauto, un modèle à événement discret a déjà été développé pour mesurer l'impact de différentes stratégies d'expansion du réseau d'autopartage traditionnel (El Fassi et al., 2012). Plusieurs configurations ont été testées pour détecter celles qui permettront de maximiser le niveau de satisfaction de la clientèle tout en minimisant la taille du parc de véhicules. Le modèle susmentionné se concentre uniquement sur l'autopartage traditionnel. A notre connaissance et dans le cas de Montréal, le modèle présenté dans ce mémoire est l'un des premiers à proposer une approche multi-agent simulant les opérations sur un réseau LSI tout en incluant un réseau routier et une animation complète de chaque trajet, sans considérer aucun autre réseau de transport.

## **2.4 Évolution de la recherche sur l'autopartage du point de vue de Communauto**

Tel que mentionné dans le chapitre précédent, le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la lignée des travaux collaboratifs entre l'École Polytechnique de Montréal et l'entreprise privée canadienne Communauto. L'ensemble des initiatives de recherche peuvent plus ou moins être groupées sous cinq catégories, comme explicité à l'Annexe A.

Les premiers efforts de recherche sont liés à un besoin d'exploration de données pour la caractérisation des usagers et de leur comportement dans l'utilisation du volet traditionnel de Communauto (Morency et al., 2007, 2011). Dans cette lancée, plusieurs chercheurs ont eu accès à des données d'enquêtes de type origine-destination ainsi que de données passives (transactionnelles, géolocalisées, GPS, capturées...). La transformation et l'intégration de ces données ont permis une caractérisation des trajets effectués par les usagers. Celle-ci a contribué à une description des habitudes de déplacement, notamment avec les travaux de Leclerc et al. (2013) et Wielinski (2015-2018). Par ailleurs, les résultats du sondage sur les habitudes de déplacement fournies en 2013 ont également permis un approfondissement des recherches sur les comportements des clients. Il a été possible entre autres de classifier les utilisateurs en fonction de leur fréquence d'utilisation, aussi bien pour l'autopartage traditionnel (Kashani et al., 2018) que pour LSI (Wielinski et al., 2019).

La performance des différents volets a également été explorée. Tout d'abord, une étude de l'utilisation des véhicules dans ce volet a été menée afin de mesurer les émissions de GES induits (Braham et al., 2013). Cette étude a été suivie d'une analyse de la relation entre la possession d'une voiture et l'exposition à l'autopartage, qui a par ailleurs su démontré une réduction du nombre de voitures personnelles dans une région de l'Île de Montréal (Klincevicius et al., 2014). Finalement, l'extension de l'offre de service proposée par Communauto par l'ajout du LSI en 2013 a entraîné un besoin d'analyse sur d'abord l'adoption et l'intégration de ce volet à l'existant, et ensuite à l'analyse des usagers et de leurs comportements et finalement à un comportement de l'usage respectif de ces véhicules, ce qui s'est fait dès 2014 avec les travaux de Wielinski (2015).

Outre les travaux en collaboration avec l'École Polytechnique de Montréal, Communauto et plus particulièrement son volet traditionnel ont été les sujets d'autres travaux. En effet, de Lorimier et al. (2012) se sont interrogés sur les facteurs affectant l'utilisation du véhicule par un modèle de régression multiple et sur la disponibilité des véhicules à l'aide d'un modèle de régression logistique. A partir de cette modélisation, il a été montré l'importance de la densité de véhicule d'une station sur la décision d'utilisation du service par un client. El Fassi et al. (2012) se sont quant à eux questionné sur les stratégies d'expansions de zones à l'aide d'un modèle de simulation à évènements discrets, l'objectif étant de distinguer celles qui permettront de maximiser le niveau de satisfaction des membres.

## CHAPITRE 3 CONTEXTE D'ÉTUDE ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Cette section présente le sujet à l'étude, à savoir Communauto et son volet LSI. Il s'agira de décrire le fonctionnement du système afin d'en déduire son environnement, ses processus clés, ses acteurs principaux et leur dynamique d'interaction. En outre, l'approche méthodologique de résolution de la problématique sera présentée ultérieurement.

### 3.1 Contexte d'étude

#### 3.1.1 Communauto et son offre LSI

Le réseau d'autopartage sur lequel se base le modèle développé est celui de Communauto, le plus ancien exploitant d'autopartage au Canada. Avec environ 3,000 voitures en Amérique du Nord et en Europe, cette entreprise possède la plus grande part de véhicules électriques au Canada. La compagnie offre aussi bien un service d'autopartage basé station qu'un service d'autopartage en LSI.

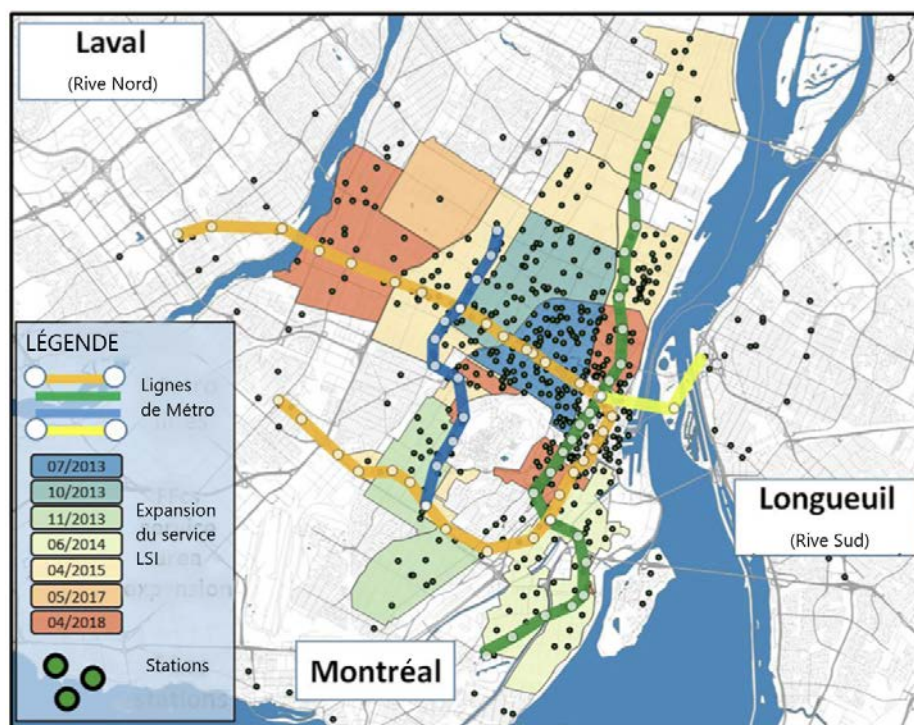


Figure 3.1 : Offre d'autopartage de Communauto sur le marché montréalais (Wielinski et al., 2019)  
(Traduction libre)

L'accent est mis sur leur réseau LSI appelé FLEX (anciennement Auto-mobile), qui fonctionne depuis 2013. Ce service fut lancé dans le quartier central du Plateau Mont-Royal pour s'étendre au fil du temps tout au long des lignes de métro comme illustré à la figure 3.1. En 2018, la zone de service couverte s'étendait sur environ 104 km<sup>2</sup>, en offrant autour de 600 véhicules hybrides et électriques à ses clients (Wielinski et al., 2019).

### 3.1.2 Processus clés

Comme introduit dans la section précédente, FLEX est le volet LSI de Communauto. De manière générale, la dynamique du réseau s'articule autour de deux processus majeurs : la réservation d'un véhicule par les usagers et le support logistique effectué par les employés.

L'opération principale se déroulant sur le réseau LSI est l'utilisation d'un véhicule par un client pour effectuer un déplacement. Une fois ayant souscrit au volet libre-service, un client peut réserver n'importe quel véhicule disponible. Le client voulant se déplacer devra :

- consulter l'état du réseau LSI à l'aide de l'application mobile ou la plateforme Web **Réservauto**;
- choisir un véhicule libre pour utilisation et le réserver;
- se déplacer vers ce véhicule en moins de 30 minutes, auquel cas la réservation sera annulée et le véhicule remis en service;
- en utilisant sa carte OPUS, débloquer le véhicule avant utilisation;
- se déplacer vers la destination désirée;
- libérer le véhicule dans un stationnement public autorisé.

En outre, le support logistique de Communauto est chargé de toutes les opérations de maintien en service des véhicules sur le réseau. Parmi ceux-ci, on retrouve les opérations de maintenance usuelles telles qu'un nettoyage sur une base mensuelle et une visite biannuelle chez un garagiste agréé. Dans l'éventualité d'un signalement d'un problème mécanique par un client, les véhicules seront mis hors service et remorqués pour réparation chez un garagiste agréé.

En outre, une attention particulière est offerte aux véhicules électriques pour lesquels la recharge se fait par des employés de Communauto. Dans ce cas précis, l'opérateur restreint

l'utilisation des véhicules dont le niveau de batterie est inférieur à 15 kms équivalents (Communauto, 2019). Ainsi, les employés affectés à la recharge des véhicules électriques doivent :

- consulter l'état du réseau à l'aide de l'application mobile **Réservauto**;
- se déplacer vers le véhicule déchargé le plus proche;
- se déplacer à bord de ce véhicule vers la borne de recharge la plus proche parmi ceux auxquelles Communauto a accès. Celles-ci seront présentées à la section 4.2;
- libérer le véhicule pour une recharge durant 3 heures;
- au cas où tous les véhicules ont un niveau de charge au-dessus du seuil de 15 kms, effectuer la recharge des véhicules à proximité dont le niveau de charge est à moins de 25% de leur autonomie.

Ces tâches seront répétées par les employés jusqu'au terme de leur quart de travail.

## 3.2 Méthodologie générale

Dans ce projet, une approche multiméthode a été privilégiée pour résoudre la problématique à l'étude. Les étapes de résolution sont illustrées à la figure 3.2. L'étude s'entame par une collecte et un traitement des données. En effet, l'analyse des processus du réseau LSI effectuée dans la section précédente permet de définir l'étendue des besoins informationnels du modèle à développer. Ainsi, à la section 4.2, les données utilisées ainsi que leur processus de traitement seront présentées. L'intégration de toutes ces informations a permis l'implémentation sur le logiciel Anylogic des trois sous-composantes du modèle : la couche multi-agent, le générateur de déplacement et l'environnement géocodé. Ceux-ci seront présentés à la section 4.3. A cette étape s'en suit la phase de calibration du modèle où les paramètres opérationnels clés seront ajustés pour obtenir les observations en sortie les plus précises possible (section 4.4). Des tests seront également effectués afin de valider le modèle. Trois expérimentations liées à la variation de la flotte, à la variation de la demande et à la variation de la configuration du service seront présentées au chapitre 5. Celui-ci sera conclu par une discussion générale sur les résultats obtenus.

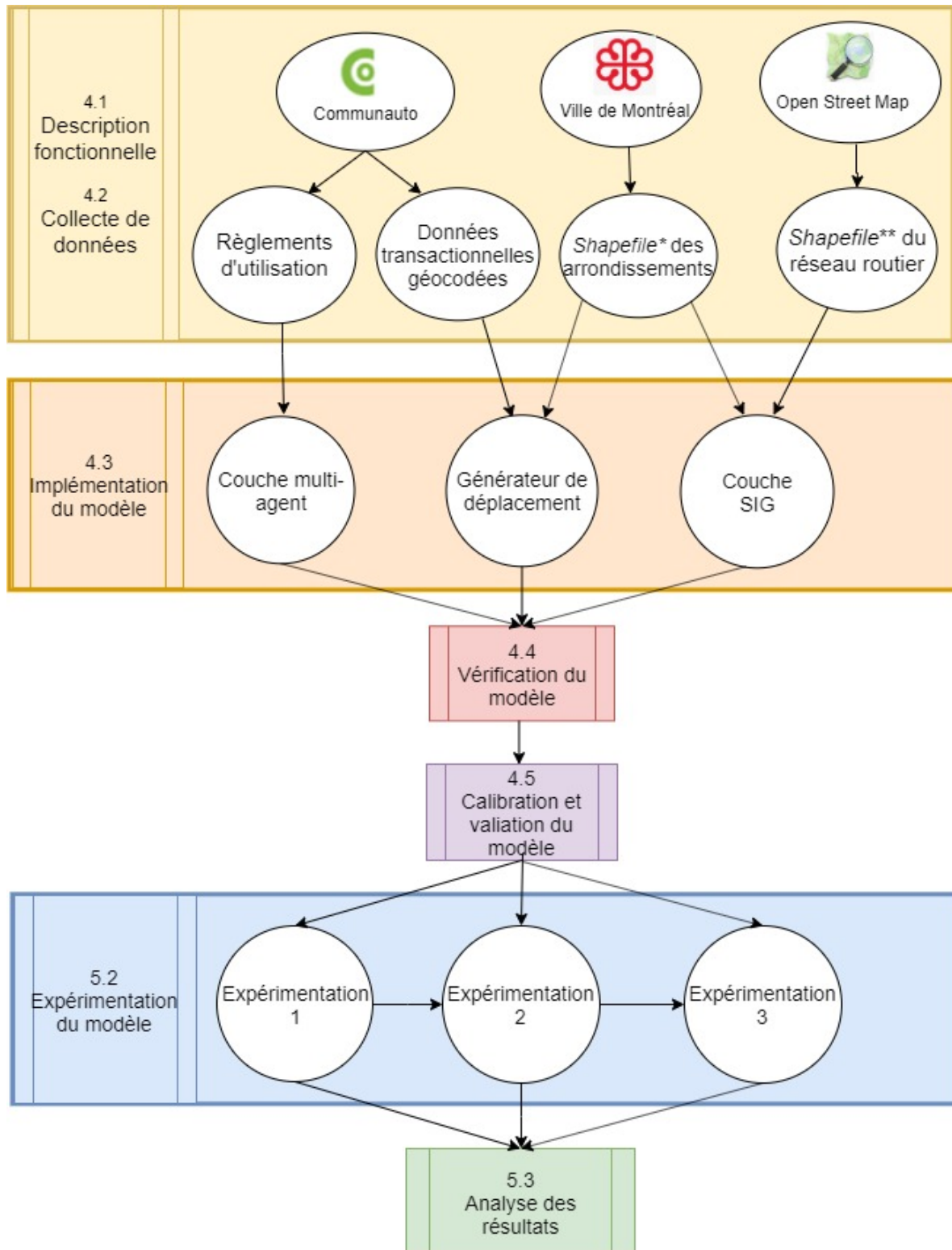


Figure 3.2 : Méthodologie générale

## CHAPITRE 4 MODÉLISATION ET IMPLÉMENTATION

Dans les sections suivantes, le cheminement suivi pour développer le modèle de simulation des opérations sur le réseau d'autopartage LSI sera exposé. Il s'agira ici de décrire sa composition générale en se basant sur la description effectuée au chapitre précédent. Il s'agira également d'analyser en profondeur la logique derrière les sous-composants du modèle.

### 4.1 Description fonctionnelle du modèle

Lors de la construction du modèle, il est primordial de garder à l'esprit les objectifs à atteindre avec ces travaux. Pour rappel, le but principal est de développer un outil d'analyse du volet LSI en simulant les interactions entre les différentes entités sur celui-ci lorsque différentes configurations opérationnelles sont adoptées, et ceci sur un mois synthétique. Étant donné la période d'étude, les opérations de maintenance usuelles citées au chapitre précédent ne seront pas considérées. Ainsi, les processus qui seront considérés lors de la modélisation sont présentés à la figure 4.1. Il est à noter que la représentation sous forme de logigrammes a été favorisée pour cartographier les processus. En effet, celle-ci permet de représenter aussi bien la logique de chaque entité du processus étudié que l'interaction qu'il y'a entre celles-ci.

En analysant ces logigrammes, il en ressort que chaque acteur du système évolue de manière indépendante et communique avec les autres par envoi d'informations. En effet, en prenant l'exemple du processus de réservation et de déplacement d'un client, Réservauto informe le client de la disponibilité des véhicules qui sont à sa proximité. Après avoir réservé un véhicule, le client s'étant déplacé vers celui-ci, l'informe de son arrivée en présentant sa carte OPUS sur le boîtier de déverrouillage. Ce transfert d'informations est historiquement facilement modélisable en utilisant une approche multi-agent (The Anylogic Company, 2019b). Ainsi, les acteurs du système seront référencés comme des agents. Quand bien même chaque entité évolue de manière indépendante, les interactions entre les agents forment indéniablement une suite d'actions logique, qui renvoie dans sa nature même à une approche de modélisation DES. Raison pour laquelle, le modèle développé combine les deux approches de modélisation.



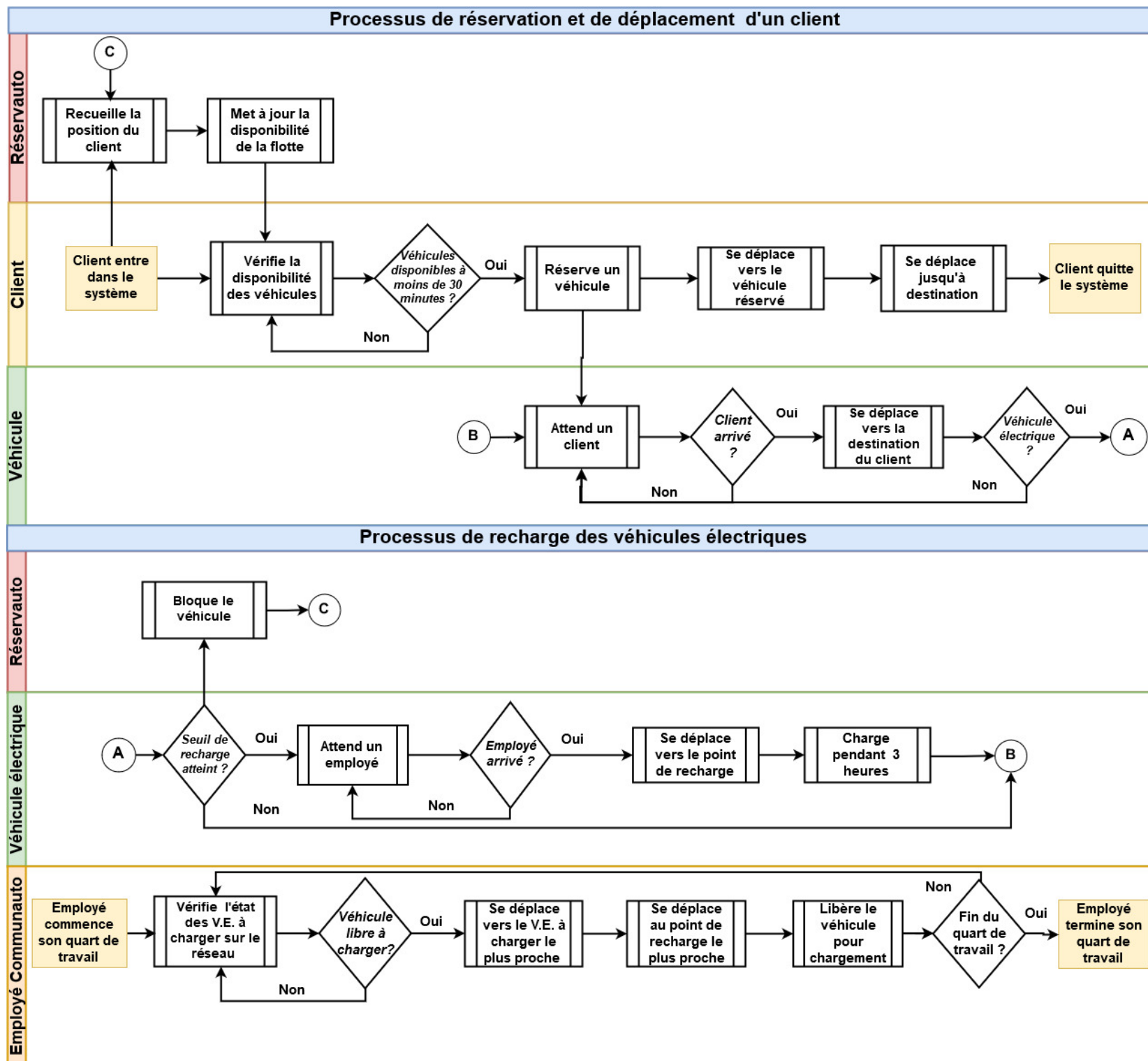


Figure 4.1: Processus clés du réseau LSI

## 4.2 Collecte des données

Une caractéristique propre aux modèles de simulation est la quantité de données considérable qu'elles requièrent pour construire un modèle exact (Longley, 2004). Nous pouvons catégoriser les données utilisées lors des phases d'implémentation et de calibration du modèle en trois catégories : les données transactionnelles, les données opérationnelles et les données géographiques.

### 4.2.1 Données transactionnelles

#### 4.2.1.1 Description générale

Communauto a mis à disposition un ensemble de données comprenant des transactions géocodées pour le mois de septembre 2017, considéré comme un mois moyen en termes d'intensité de voyage. Pour bien comprendre ces données agrégées et savoir comment les utiliser afin d'estimer la demande sur le réseau, il faut clarifier certains termes liés à l'utilisation du service LSI. Ainsi, en se basant sur la figure 4.2 on définit :

- une **réservation** ou blocage, comme débutant au moment où le client bloque un véhicule au point A et se terminant au moment où il arrive au véhicule (1);
- une **transaction** débutant au moment où le client bloque un véhicule au point A et se terminant soit lorsque le client libère le véhicule au point B (1+2), soit lorsque le système annule la transaction si le client n'a jamais pris possession du véhicule 30 minutes après le début de la réservation.

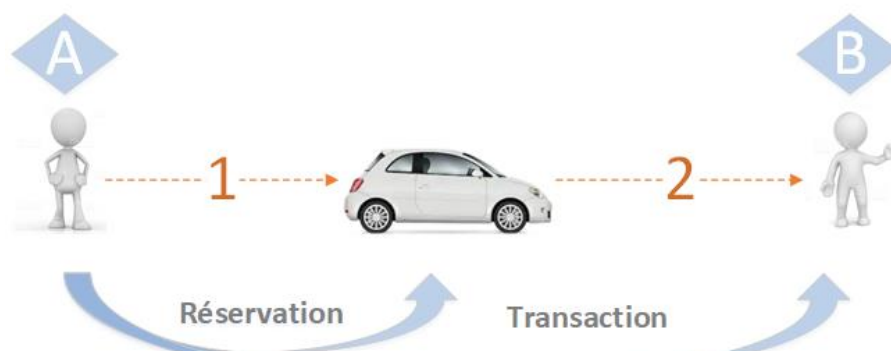


Figure 4.2: Comparaison entre une réservation et une transaction

Au tableau 4.1 est présenté les informations liées à une réservation enregistrée dans la base de données. Au total, pour chaque trajet, l'identification de l'utilisateur, l'identification du véhicule, les horodatages de début et de fin, la distance parcourue et le niveau de charge avant et après la transaction sont enregistrés.

Tableau 4.1 : Champs de la base de données transactionnelle

<b>Champs</b>	<b>Description</b>
ReservationID	Identification unique de la réservation
LSITripReportID	Identification unique de la table
TripDate	Date de début de la transaction
EventType	Identification de début ou fin de réservation (CHECK_IN or CHECK_OUT )
Vin	Identification unique du véhicule
CustomerID	Identification unique du membre
StartLatitude	Coordonnée latitudinale du point de départ du client
StartLongitude	Coordonnée longitudinale du point de départ du client
EndLatitude	Coordonnée latitudinale du point d'arrivée du client
EndLongitude	Coordonnée longitudinale du point d'arrivée du client
Duration	Durée totale de la transaction
BookDuration	Durée de la réservation (ou blocage) du véhicule
FirstDrive	Temps après <i>TripDate</i> où le véhicule a commencé à se déplacer
Distance	Distance en km parcourue par le véhicule pour la transaction
Start SOC	Niveau de de la batterie au début de la transaction
End SOC	Niveau de de la batterie à la fin de la transaction

#### 4.2.1.2 Préparation de la base de données

Le tableau 4.2 présente une description de la base de données.

Tableau 4.2 : Description de la base de données transactionnelles

Caractéristiques	Nombre d'entrées
Lignes	187 255
Colonnes	18
Cellules	3 370 590
Cellules sans Reservation_ID (1)	37 592
Cellules sans EndLongitude (2)	79 389
Cellules sans EndLatitude	79 389

Deux observations majeures ont été faites suite à l'étude des caractéristiques physiques de la base de données. Tout d'abord, il a été noté que quand EventType renvoie CHECK\_IN pour certaines lignes de la base de données, aucune donnée n'est entrée aux champs EndLongitude et EndLatitude. On observe par ailleurs que le stockage des coordonnées se fait une fois la transaction complétée donc lorsque la réservation du client a été acceptée et que le client s'est déplacé à destination, à savoir quand EventType renvoie CHECK\_OUT. On peut donc en déduire que l'ensemble des informations disponibles pour une réservation sont stockées en deux enregistrements consécutifs : un enregistrement est fait au début de la transaction (à savoir quand EventType= CHECK\_IN) et un autre à la fin (à savoir quand EventType = CHECK\_OUT). Par conséquent, tous les enregistrements où le champ EventType renvoie CHECK\_IN ont été supprimés, ce qui restreint la base de données à 75 473 enregistrements. En outre, il a été noté que certaines cellules ne contenaient pas de Reservation\_ID (1). Parmi celles-ci, 5 140 soit 13.7 % ne possédaient d'enregistrements des coordonnées d'arrivée (2). Il en a été déduit que ceux-ci pouvaient être considérés comme des réservations annulées par le client.

De plus, il est important de prendre en compte que la région d'intérêt est l'Île de Montréal à savoir les arrondissements et villes liées suivantes :

- Ahuntsic-Cartierville
- Anjou
- Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce
- Lachine
- LaSalle
- Le Plateau-Mont-Royal
- Le Sud-Ouest
- L'Île-Bizard–Sainte-Geneviève
- Mercier–Hochelaga-Maisonneuve
- Montréal
- Montréal-Nord
- Outremont
- Pierrefonds-Roxboro
- Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles
- Rosemont–La Petite-Patrie
- Saint-Laurent
- Saint-Léonard
- Verdun
- Ville-Marie
- Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension

Par conséquent, tous les enregistrements correspondant à des transactions effectuées hors de ces zones ont été supprimés.

Ainsi, la base de données utilisée pour développer le générateur du trajet du modèle se base sur 70 853 enregistrements complets de transactions. Il s'agira à la section 4.3.2 de présenter la méthode utilisée pour l'obtention de cette sous-composante.

#### **4.2.2 Données opérationnelles**

Il s'agit ici de toutes les informations liées à la gestion de la flotte de véhicules. Ceux-ci sont résumés au tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Données opérationnelles liées à la flotte

	<b>Toyota Prius C / V</b>	<b>Nissan LEAF</b>	<b>Références</b>
Type de véhicule	Hybride	Électrique	(Wielinski et al., 2017)
Pourcentage de la flotte	86%	14%	(Wielinski et al., 2017)
Consommation d'essence	Entre 4.9 et 5.5L/ 100km	N/A	(Toyota Canada, 2019)
Capacité du réservoir	36 L	N/A	
Autonomie batterie	N/A	Entre 120 et 250km	(Nissan Canada, 2019)
Temps de recharge	N/A	3 heures	
Seuil de ravitaillement énergétique	Seuil 1 à 25% d'autonomie	25% de la capacité du réservoir	(Communauto, 2019)
	Seuil 2 à 15% d'autonomie		(Communauto, 2019)

### 4.2.3 Données géographiques

Afin que les agents évoluent dans un environnement similaire à la réalité et pour utiliser à bon escient l'espace de développement SIG offert par le logiciel de simulation et présenté au chapitre suivant, trois fichiers shapefile ont été intégrés au modèle. D'une part, il s'agit d'un format de fichier contenant l'information liée aux polygones des arrondissements et villes liées constituant l'agglomération de Montréal obtenue en téléchargement libre sur le Portail de données de la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2019a) et d'autre part les formats de fichier contenant l'information liée aux lignes représentant le tracé des routes et autoroutes, des voies ferrées, piétonnes, et réservées et des pistes cyclables sur l'agglomération de Montréal téléchargé en temps réel d'OpenStreetMap dans l'espace SIG d'Anylogic (ArcGIS, 2019). En sus de cela, il a également fallu incorporer au modèle un format de fichier contenant les limites géographiques de la zone de couverture du réseau LSI.

## 4.3 Implémentation du modèle

La définition fonctionnelle effectuée à la section précédente s'attarde sur les fondements théoriques supportant le modèle développé. Il s'agira ici de se focaliser sur l'aspect technique derrière le modèle simulé. Ainsi, la création des agents et la programmation de leur comportement

individuel seront tout d'abord présentées dans une première partie. S'en suivra une explication du générateur de trajet simulant la demande sur le réseau d'autopartage. Ultimement, la couche SIG, primordiale à la création d'une représentation visuelle animée, sera présentée.

### 4.3.1 Présentation d'Anylogic

Anylogic Simulation Software a été utilisé pour modéliser et simuler le système à l'étude. Outre, le fait que ce logiciel soit l'un des rares logiciels de simulation industrielle permettant d'adopter une approche multiméthode, il a été principalement choisi pour l'espace de développement SIG. En effet, Anylogic offre des cartes sous forme de shapefile pouvant être utilisées lors de la modélisation de systèmes tels que les chaînes d'approvisionnement et autres réseaux logistiques, où des emplacements, des régions, des routes ou des itinéraires précis doivent être pris en compte (Borshchev, 2013). Ainsi, les agents évoluant dans ces systèmes peuvent être placés sur l'une des cartes et par conséquent, se déplacer le long des routes et itinéraires existants sur la base de données spatiales réelles (The Anylogic Company, 2019c).

En plus de cet espace, Anylogic offre un espace Process Modeling possédant des modules propres à la modélisation DES comme illustré à la figure 4.3.

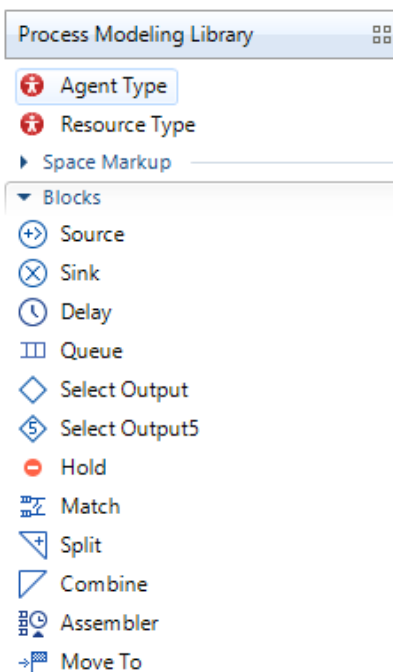


Figure 4.3: Aperçu du module *Process Library*

Anylogic supporte Java comme langage de programmation permettant d'adopter une approche orientée-objet qui est très souvent prisée pour la modélisation à base d'agent. Ce dernier terme est d'ailleurs défini de différentes manières dans la littérature. En effet, la plupart des auteurs s'entendent qu'un individu ou un composant évoluant de manière proactive et autonome, étant mobile et doté de capacité d'adaptation peut être caractérisé comme étant un agent (Bonabeau, 2002; Crooks et al., 2012). Généralement, les agents d'un même système vont communiquer entre eux et s'influencer, surtout lorsque les actions de l'un entraînent la réponse d'un autre. De plus, leur interaction avec l'environnement provoque l'animation de la simulation.

Anylogic donne la possibilité d'utiliser des diagrammes d'états ou Statechart qui permettent de définir le comportement d'un agent comme étant la succession des états par lesquels il est passé. Le passage d'un état à un autre est déterminé par des transitions déclenchées par des conditions définies par l'utilisateur (délais ou taux, messages provenant d'un autre agent ...) (Borshchev, 2013).

### **4.3.2 Couche multi-agent**

Chaque entité intervenant lors des différents processus clés est modélisée comme un agent. Il est bon à noter que pour représenter l'ensemble des clients, des employés et des véhicules de la flotte du réseau LSI, nous parlerons souvent de populations d'agent appartenant à un même type, donc suivant la même logique. Dans les sous-sections qui suivent seront présentées les caractéristiques, les logiques et les règles définissant le comportement de chaque population d'agent.

#### **4.3.2.1 Population Type Client**

Le type d'agent Client renvoie aux utilisateurs ayant souscrit à l'offre de service LSI. Les membres de cette population d'agents sont en réalité l'instigateur du processus de réservation d'un véhicule. Dans ce modèle, un agent Client est la représentation physique d'un déplacement généré. Par conséquent :

- il entrera dans le réseau avec un numéro d'identification, à une localisation déterminée et souhaitera se rendre à une certaine destination;



- il consultera la disponibilité des véhicules en demandant l'information au *Planification Center*;
- s'il en trouve un, il demandera à réserver le véhicule disponible le plus proche au *Planification Center* pour accomplir son voyage;
- si la réservation est acceptée, il se dirigera vers le véhicule, sinon il quittera le système ;
- une fois son voyage terminé, il quitte le système.

Quitter le système renvoie ici à terminer sa transaction et à libérer le véhicule s'il y'a lieu. À chaque fois qu'un agent Client quitte le système, que sa demande soit satisfaite ou non, ces informations de déplacement sont enregistrées. Un ensemble de règles devront toutefois être respectées selon les modalités convenues dans le règlement de Communauto (Communauto, 2019). Ainsi, les contraintes qui s'appliquent à ce type d'agent sont :

- la restriction de réserver un véhicule qui se trouve à plus de 30 minutes de sa position;
- l'interdiction de libérer un véhicule sans que son réservoir soit plein au moins au quart, en cas de l'utilisation d'une voiture hybride;
- la prise en charge du ravitaillement énergétique, en cas de pénurie de carburant du véhicule hybride;
- l'interdiction de libérer un véhicule avec moins de 15 kms d'équivalent de charge de batterie, en cas d'utilisation d'une voiture électrique.

Ultimement, l'agent *Client* est guidé par deux motivations principales :

- réserver le véhicule disponible le plus proche de sa position d'origine;
- minimiser la distance à parcourir afin d'atteindre sa destination.

En tenant compte des caractéristiques, des règles et des motivations présentées, nous obtenons le diagramme d'état suivant :

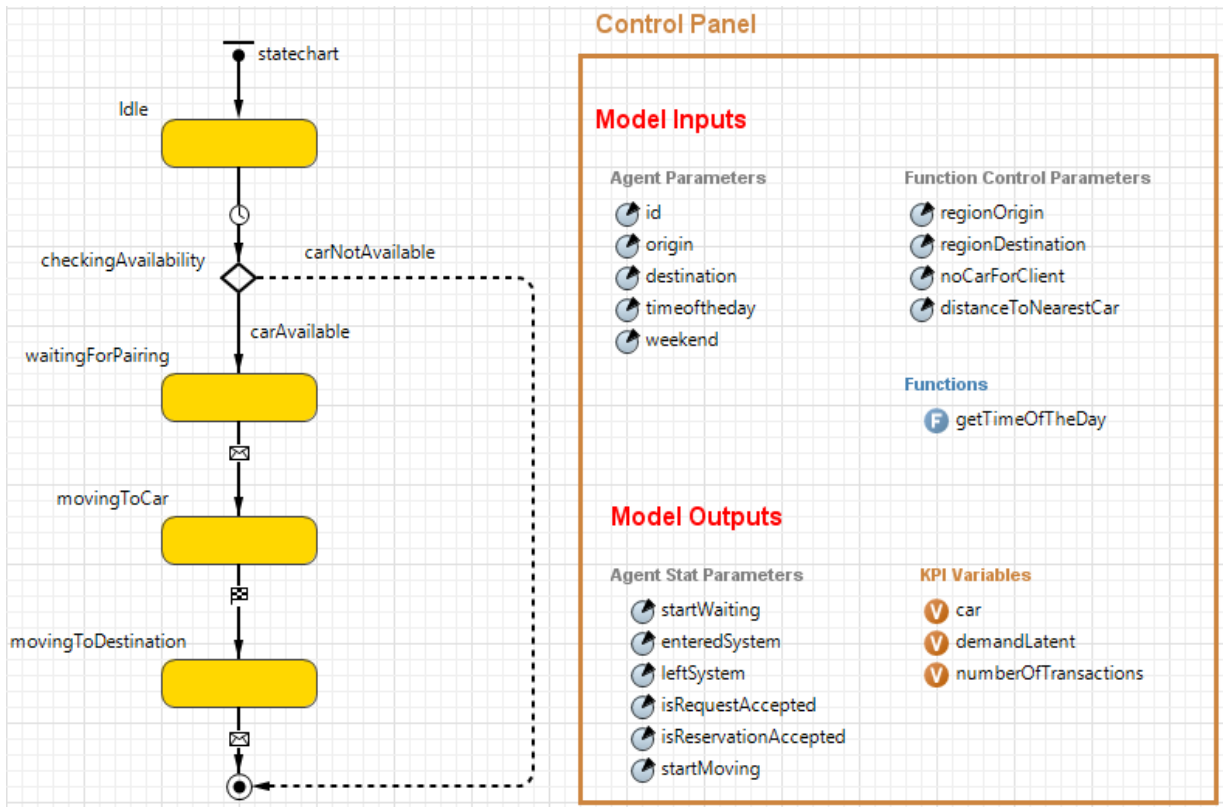


Figure 4.4: Diagramme d'état du type d'agent *Client*

#### 4.3.2.2 Agent *Planification Center*

Cet agent représente la plateforme de coordination des opérations sur le réseau, par conséquent **Réservauto**. Ses deux fonctions principales sont :

- le recueil des données sur l'emplacement et la disponibilité des véhicules, qui seront présentées aux clients;
- le recueil des données sur l'état du réservoir ou de la batterie des véhicules (respectivement pour les véhicules hybrides ou électriques) qui seront présentées au personnel;
- le recueil des données sur la disponibilité des points de recharge des véhicules électriques.

La présence de cet agent est essentielle au modèle, car il est en charge du transfert d'informations entre les différentes populations d'agent à savoir les clients, la flotte de véhicule et les employés. Par ailleurs, il est responsable de la coordination des activités liées à la réservation et au ravitaillement énergétique des véhicules. Pour cela, son rôle sera l'application d'un ensemble de règles telles que :

- la validation d'une réservation faite par un agent : celle-ci passe par une vérification de la disponibilité du véhicule (réservé par un client ou non), une vérification de la distance entre le véhicule et l'agent (véhicule à moins de 30 minutes ou non), une vérification de la distance à parcourir avec le véhicule (distance entre la position actuelle du véhicule et la destination du client pouvant être couverte par le niveau énergétique du véhicule ou non) (Règle #1);
- la remise en disponibilité d'un véhicule après plus de 30 minutes de réservations sans collecte (Règle #2);
- la mise hors disponibilité d'un véhicule électrique lorsqu'il a besoin d'être rechargé (Règle #3);
- la mise hors disponibilité d'une borne de recharge lorsque celui-ci est en train d'être utilisé par un agent (Règle #4).

De manière pratique, l'application de ces règles se passent par l'utilisation de fonctions qui sont en réalité un ensemble d'instructions invoquées à différents endroits. Le tableau 4.4 présente une description de ces fonctions. Par souci de concision, les instructions de chaque fonction peuvent être trouvées à l'Annexe C.

Tableau 4.4 : Fonctions principales de l'agent *Planification Center*

Fonctions	Règles	Entrées	Sorties
checkNetwork	Règle #1	Agent de type <i>Client</i>	Agent de type <i>Vehicle</i> réservé pour Agent <i>Client</i> ou Agent de type <i>Client</i> quitte le système
	Règle #2	Agent de type <i>Client</i>	Agent de type <i>Vehicle</i> mise dans la liste des véhicules disponibles et Agent de type <i>Client</i> quitte le système
sendChargingRequest	Règle #3	Agent de type <i>Vehicle</i>	Agent de type <i>Staff</i> alerté d'une nouvelle requête de recharge
checkChargingArea	Règle #4	Agent de type <i>Staff</i>	Agent de Type <i>Staff</i> saisi une borne de recharge disponible
freeChargingPoint	Règle #4	Agent de type <i>Vehicle</i>	Agent de type <i>Vehicle</i> libère une borne de recharge

#### 4.3.2.3 Population Type *Staff*

Le type d'agent *Staff* renvoie aux employés de Communauto qui sont déployés sur le réseau LSI. Les agents appartenant à cette population sont les acteurs principaux du processus de recharge des véhicules électriques. Dépendamment de la période de l'année, le nombre d'agents déployés varie. Ainsi, en concordance avec la période de référence à savoir le mois de septembre 2017, deux équipes de deux opérateurs sont réparties en secteur Nord et Sud conformément à la carte présentée à la figure 4.5. Chaque équipe assure un quart de travail de 8 heures, du lundi au samedi.

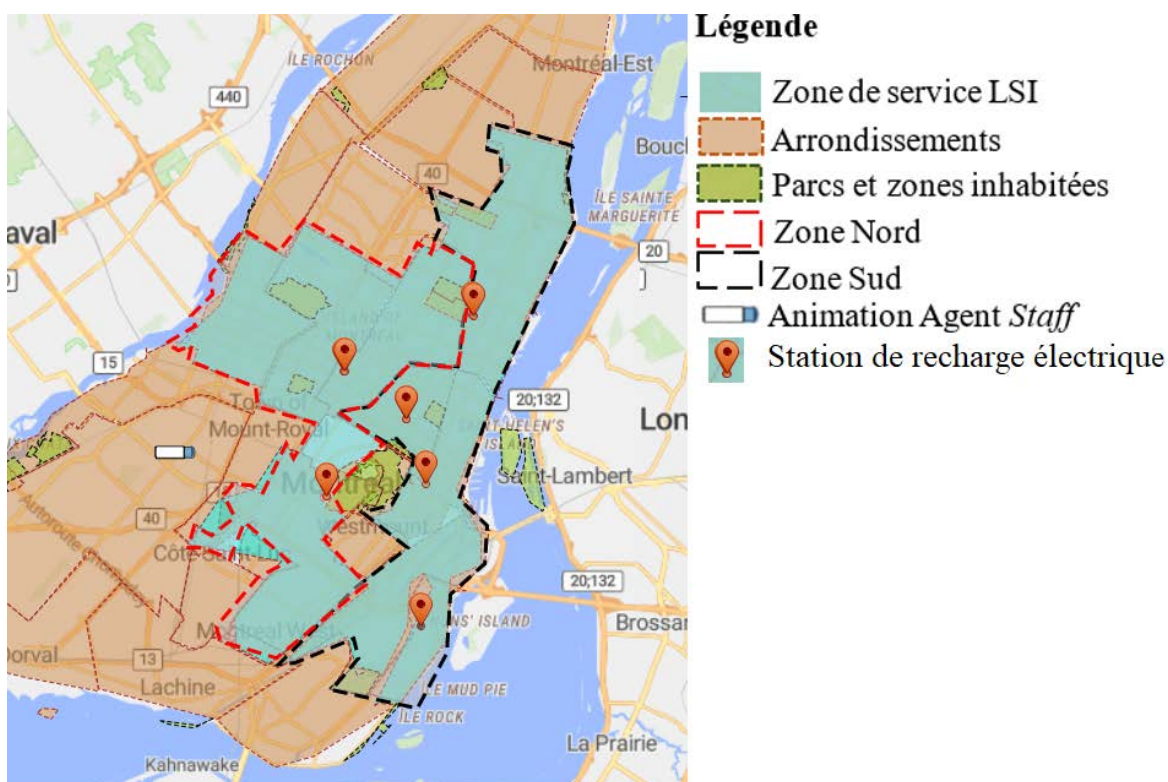


Figure 4.5 : Zone de recharge des véhicules électriques

En outre, les opérateurs ont accès à des stations de recharge, appartenant au Circuit électrique de la Ville de Montréal. La compagnie a décidé de limiter ses opérations de recharge à des stations situées à des endroits stratégiques de la zone de couverture. Ainsi, pour effectuer le ravitaillement énergétique des véhicules électriques, les opérateurs se dirigeront vers les stations présentées au tableau 4.5 et illustrées à la figure 4.5.

Tableau 4.5 : Stations de recharges des véhicules électriques

Stations	Nombre de bornes disponibles	Zonage
Stade Olympique	2	Sud
Métro Mont-Royal	2	Sud
Université McGill	1	Sud
Hotel de Ville de Verdun	1	Sud
Saint André et Bélanger	2	Nord
Université de Montréal	2	Nord

En tenant compte de ces informations, il est possible de déduire la logique des agents appartenant à cette population. Ultiment, l'objectif d'un agent *Staff* est de recharger les véhicules électriques dont le niveau de charge est inférieur au seuil. Ainsi, dès le début de son quart de travail, un agent *Staff* :

- vérifiera la disponibilité des bornes de recharges aux stations d'intérêt. Si toutes les bornes sont occupées, il attendra que l'une d'entre elles se libère;
- si oui, il consultera le réseau LSI à la recherche des véhicules électriques les plus proches ayant un niveau de charge inférieur au seuil toléré par le règlement (Communauto, 2019). Si aucun véhicule n'est à charger, il attendra que l'une d'entre elles aient besoin d'une recharge;
- il se déplacera vers le véhicule d'intérêt et l'amènera à la borne de recharge la plus proche.

Ce processus sera répété durant tout le quart de travail, et ce du lundi au samedi.

Ultiment, la logique présentée à la figure 4.6 est obtenue :

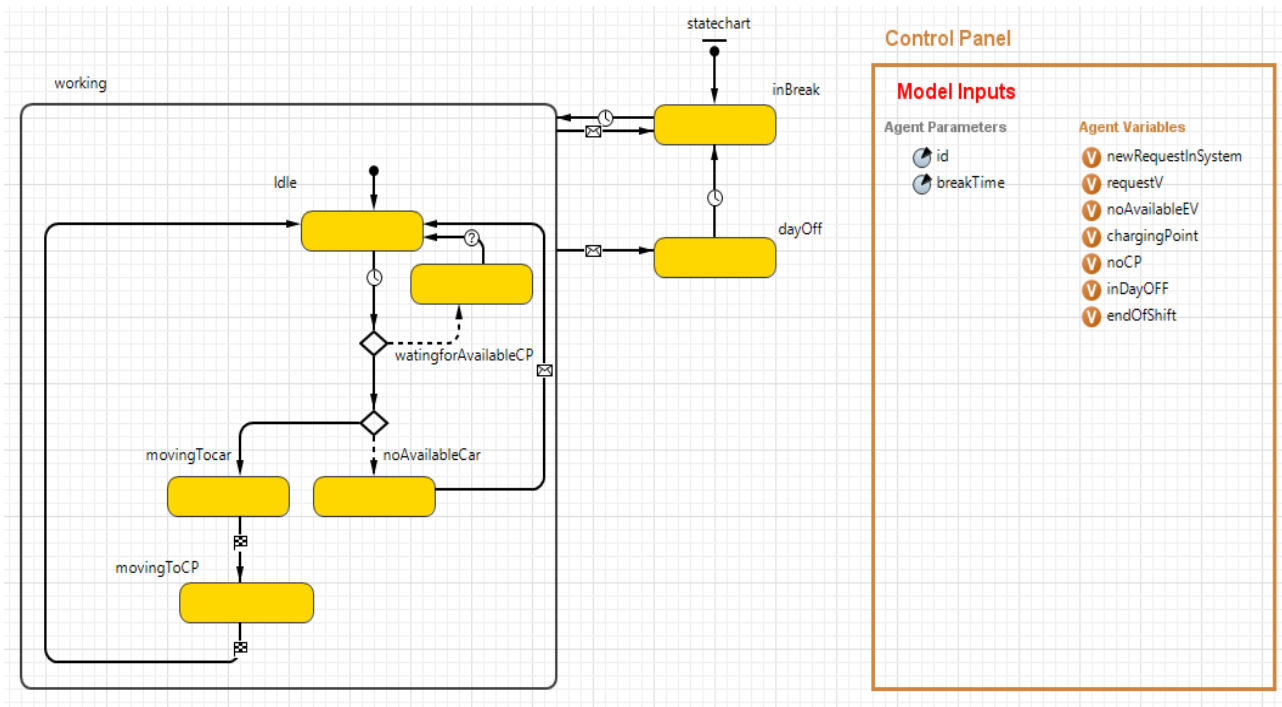


Figure 4.6 : Diagramme d'état de la population type Staff

#### 4.3.2.4 Population Type *Vehicle*

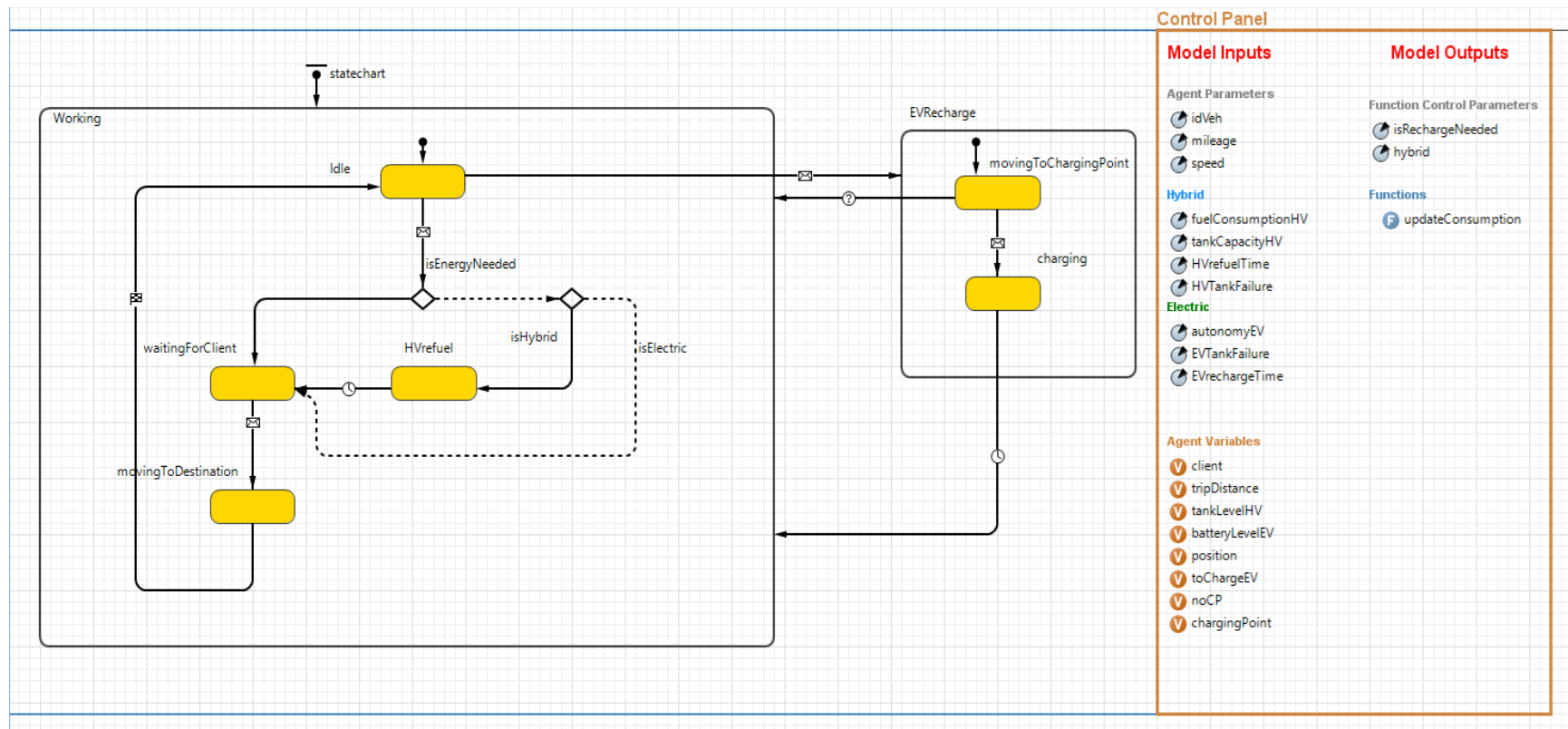
Cette population représente l'ensemble des véhicules de la flotte. Les agents provenant de cette population sont centraux à tous les processus modélisés, car ce sont eux qui assurent le déplacement des clients. Comme préalablement introduits, deux types de véhicules, hybrides et électriques, sont fournis dans le parc. Les attributs des véhicules selon leur type ont été fournis au tableau 4.3 où les données opérationnelles liées à la flotte ont été présentées. De manière générale, les agents de ces véhicules se comportent comme une ressource venant en support aux autres populations d'agent pour la complétion soit d'une transaction, soit d'une recharge. Ainsi un agent de type *Vehicle* sollicité pour conclure une transaction :

- attendra un message de réservation venant du *Planification Center*;
- attendra un message de confirmation d'arrivée d'un agent de type *Client* ;
- se déplacera avec cet agent jusqu'à la destination souhaitée;
- enverra son état énergétique au *Planification Center* à la fin de la transaction .

Dans le cas où cet agent est de type électrique, il :

- alertera le *Planification Center* dès que son niveau de charge sera inférieur à 25% (seuil 1) de son autonomie énergétique;
- devient indisponible lorsque son niveau de charge est inférieur à 15kms équivalent (seuil 2) ;
- attendra l'arrivée d'un agent de type *Staff* pour sa recharge;
- se dirigera avec cet agent à la borne de recharge disponible la plus proche afin d'y être branchée durant 3 heures.

La logique ainsi décrite est illustrée à la figure 4.7.

Figure 4.7 : Diagramme d'état d'un agent de type *Vehicle*



### 4.3.3 Générateur de trajet

La demande en déplacements pour un mode de transport est souvent basée sur des modèles comportementaux s'appuyant fortement sur les préférences révélées d'une population catégorisées selon différents paramètres sociodémographiques (Ciari et al., 2014). Ces dernières sont acquises très souvent par le biais de portraits de déplacements de différents profils de population qui sont dressés grâce au couplage d'enquêtes de mobilité, de sondages sur les habitudes de déplacement et de données de recensement pour le territoire d'intérêt. En tenant compte du manque de données exhaustives sur les préférences révélées de mobilité des usagers de Communauto et du fait que l'estimation de la demande de déplacements par un modèle de simulation n'est pas la motivation de cette étude, il est possible d'estimer la sollicitation du réseau LSI directement à partir de la demande révélée, à savoir l'ensemble de données transactionnelles fournies par la compagnie. Ceci est la raison pour laquelle un générateur de trajet, simulant la demande en déplacement du réseau LSI, a été développé.

Le développement de cette sous-composante peut être résumé en trois grandes parties;

- **Étape 1 : Cueillette et filtrage des données**

À la section 4.2.1, la base de données transactionnelles et les traitements préparatoires qui ont été faits sur elle ont été expliqués. Ces données, plus précisément les coordonnées de début et de fin de déplacements ont été croisées avec les limites géocodées des arrondissements et villes liées de Montréal sur QGIS, un logiciel de système d'information géographique (ArcGIS, 2019). Ainsi, les champs StartLatitude, StartLongitude, EndLatitude et EndLongitude ont été remplacé par ABREV-O et ABREV-D renvoyant aux arrondissements (que l'on appellera région) de départ et d'arrivée d'un déplacement.

- **Étape 2 : Identification des champs d'intérêt de la base de données**

L'objectif principal du simulateur de trajet est de générer une demande au bon moment et au bon endroit, étant donné que les déplacements induits influenceront sur la dispersion des véhicules sur le réseau. Comme introduit au début de la sous-section, il est difficile de déterminer le processus de décision derrière le choix d'un point de départ d'une transaction avec les données disponibles. Ainsi, il a été posé comme hypothèse que pour cette étude, le jour de la semaine et l'heure de la

journée suffisent à estimer le lieu de départ (Analyse #1) et d'arrivée (Analyse #2) d'une transaction. Il s'agira dans cette étape de vérifier l'hypothèse par une brève étude statistique

Pour l'analyse #1, la problématique peut se résumer à évaluer laquelle des deux hypothèses suivantes ne peut être rejetée :

**H0 : Le jour de la semaine et l'heure de la journée ont un effet significatif sur la région de départ d'une transaction**

**H1 : Le jour de la semaine et l'heure de la journée n'ont pas un effet significatif sur la région de départ**

La résolution s'est faite par régression logistique multinomiale. En effet, cette approche est favorisée lorsqu'on cherche à expliquer une variable de type qualitative (ABREV- O dans ce cas-ci) par plusieurs variables qui peuvent être à la fois quantitatives ou qualitatives (Bohnig, 1992). Pour cela, certaines transformations au niveau de la base de données transactionnelles (Tableau 4.1) ont dû être effectuées. Tout d'abord, LSITripReportID et ReservationID sont des clés permettant des liaisons avec d'autres bases de données de Communauto à des fins d'analyse, elles peuvent donc être retirées. TripDate est affichée sous le format « AAAA-MM-JJ HH:MM », les valeurs de ce champ ont été discrétisées selon deux paramètres: l'heure, conformément au tableau 4.6, et le jour de la semaine.

Tableau 4.6 : Discrétisation selon l'heure

<b>Tranche horaire</b>	<b>Valeur</b>
00 :00 - 6:00 AM	T1
6:00 AM - 8:59 AM	T2
9:00 AM - 11:59 AM	T3
12:00 PM- 2:59PM	T4
3:00 PM - 5:59 PM	T5
6 :00 PM - 11 :59PM	T6

Par ailleurs, Wielinski avait observé en 2015 une tendance d'utilisation du service LSI semblable les jours ouvrables (du lundi au vendredi) ainsi que les jours de fin de semaine (2015). En analysant les données transactionnelles, les mêmes conclusions ont été tirées.

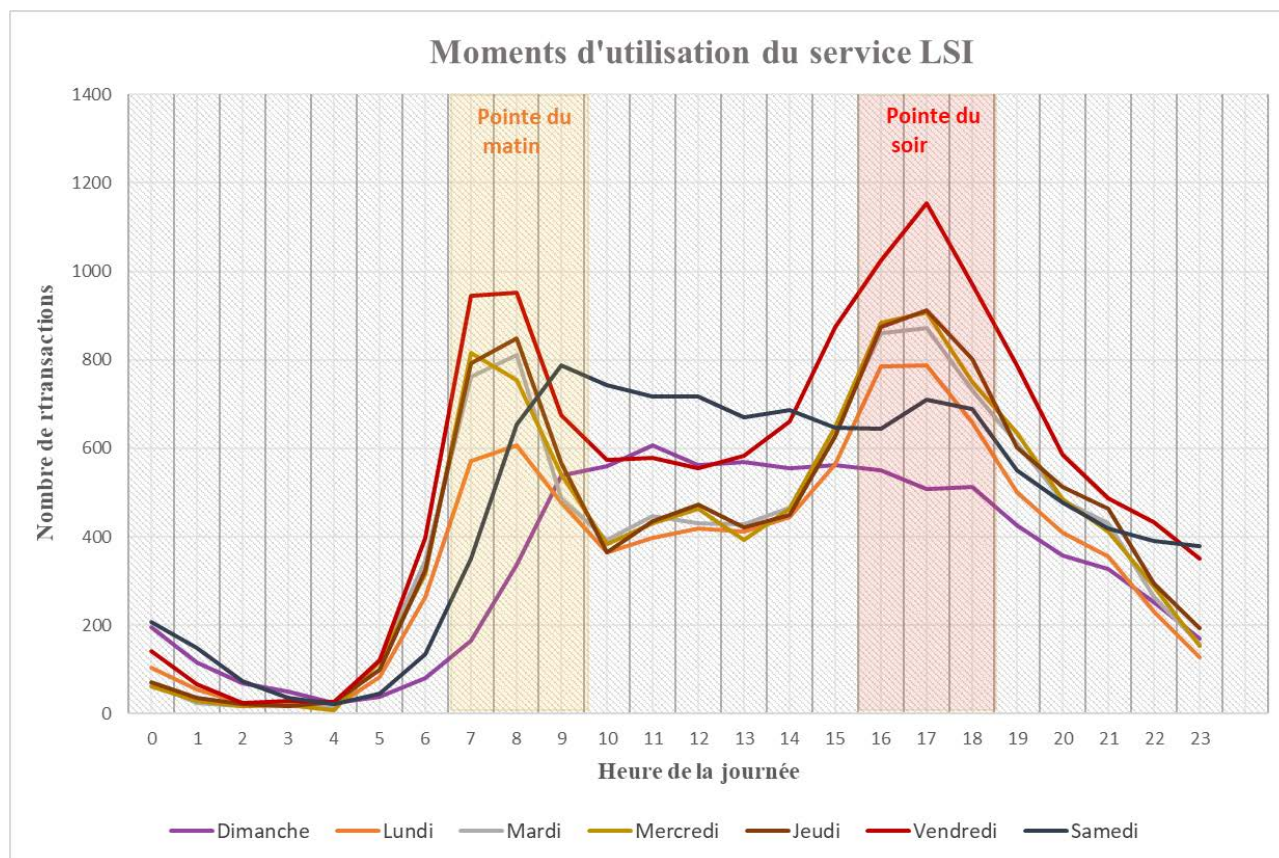


Figure 4.8 : Moments d'utilisation du service LSI

On remarque une forte demande entre 6h00 et 9h00, puis entre 15h00 et 19h00 pour l'ensemble des jours ouvrables. La fin de semaine, le pic d'utilisation se situe entre 8h et 11h et après 15h00.

En tenant compte de ces deux aspects, nous pouvons ainsi transformer le champ Trip\_Date en deux nouveaux champs Trip\_Day (qui prend WD pour les jours ouvrables et WE pour la fin de semaine) et Trip\_Hour prenant les valeurs du tableau 4.6. Les champs restants, à savoir EventType, Vin, CustomerID, Duration, BookDuration, FirstDrive, Distance, Start SOC, End SOC, ne sont pas pertinents à cette étude puisqu'ils n'apportent pas d'informations supplémentaires sur le choix du point de départ.

La validation de deux critères est primordiale avant de pouvoir effectuer la régression. Il s'agit de vérifier d'abord s'il n'y a pas plus de variables explicatives (champs) que d'observations (transactions) et ensuite qu'il n'y a pas de multicolinéarité entre les variables explicatives (Jobson, 1991). Pour l'Analyse #1, nous avons deux variables explicatives, Trip\_Day et Trip\_Hour, pour

70 853 transactions enregistrées, le premier critère est ainsi validé. En effectuant un test de multicollinéarité sur *XIStat*, un complément d'Excel pour l'analyse de données, et en imposant un intervalle de confiance supérieur à 95% , il a été confirmé qu'il n'existait pas de relation linéaire entre *Trip\_Day* et *Trip\_Hour* ( $R^2$  inférieur à 1 au tableau 4.7) , comme en atteste la matrice de corrélation présentée au tableau (Addinsoft, 2019b). Le deuxième critère étant validé, il est possible de procéder à la régression.

Tableau 4.7 : Matrice de corrélation entre *Trip\_Day* et *Trip\_Hour*

Variables	<i>Trip_Hour</i>	<i>Trip_Day</i>
<i>Trip_Hour</i>	<b>1</b>	0,000
<i>Trip_Day</i>	0,000	<b>1</b>

En imposant un intervalle de confiance supérieure à 95%, les résultats au tableau 4.8 ont été obtenus pour le modèle statistique choisi :

Tableau 4.8 : Statistiques *Goodness of fit* et test du Chi-carré de Pearson

Statistic	DF	Chi-square	Pr > Chi <sup>2</sup>
-2 Log(Likelihood)	119	1773,536	< 0.0001
Score	119	72592,206	< 0.0001
Wald	119	1625,898	< 0.0001

Le test du Chi-carré permet d'évaluer à quel point les variables explicatives choisies apportent de l'information significative en comparant notre modèle statistique à un autre, plus simple, à une constante (  $Pr > Chi^2$ ) (Rao, 2002). Étant donné que la probabilité obtenue est inférieure à 0,0001, on peut conclure que les variables choisies apportent de l'information significative. Nous pouvons ainsi conclure que l'heure et le jour de la semaine ont un effet sur le choix de la région de départ.

Les mêmes étapes ont été suivies à l'Analyse #2. Étant donné que l'heure et le jour ont un effet sur la région de départ du trajet, nous pouvons en déduire qu'il y'a une certaine corrélation entre *Trip\_Day*, *Trip\_Hour* et *ABREV\_O*. Ainsi, il est possible de directement étudier l'effet d'*ABREV\_O* sur *ABREV\_D* en effectuant toujours un test du Chi-Carré de Pearson.

Pour ce cas-ci également, la probabilité obtenue est inférieure à 0,0001. Ainsi, la variable choisie apporte de l'information significative. Nous pouvons ainsi conclure que la région de départ a un effet sur le choix de la région d'arrivée

- **Étape 3 : Détermination des matrices Origine-Destination et identification des lois de distributions de la demande.**

En tenant compte des liens précédemment établis entre le jour de la semaine, l'heure de la journée, la région de départ et la région d'arrivée, il est possible de déterminer en fonction de la base de données transactionnelles la proportion de trajet arrivant à une certaine région en fonction de la région de départ et du moment de départ. Pour chaque combinaison de *Trip\_Date* et *Trip\_Hour* correspondant à une période, cette proportion est calculée de la manière suivante :

$$P_D^O = \frac{n_d^O}{N} \times 100 \quad (1)$$

$P_D^O$  = proportion de départ entre une région d'origine *O* et une région de destination *D*

$n_d^O$  = nombre de transactions entre une région d'origine *O* et une région de destination *D*

$N$  = nombre total de transactions

Nous obtenons ainsi 12 Matrices (6 tranches horaires x 2 périodes de la semaine) dont une est présentée au tableau 4.9

Tableau 4.9: Exemple de matrice O/D en entrée du générateur de trajet

Région d'origine	Région de destination											Part des débuts de trajet		
	AJ	CN	LR	MH	OM	PM	RO	SO	VD	VM	VS			
AC	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
AJ	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
CL	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
CN	0,000%	4,155%	0,000%	0,431%	0,157%	1,490%	0,745%	0,627%	0,274%	0,157%	0,470%	0,000%	0,000%	8,506%
HS	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
LS	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
ME	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
MH	0,000%	0,235%	0,000%	5,018%	0,039%	3,842%	3,058%	0,314%	0,039%	0,823%	1,490%	0,000%	0,000%	14,857%
MR	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,039%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,039%
OM	0,000%	0,157%	0,000%	0,118%	0,274%	0,078%	0,196%	0,078%	0,039%	0,000%	0,118%	0,000%	0,000%	1,058%
PM	0,039%	2,862%	0,000%	2,705%	0,627%	10,192%	8,232%	1,921%	0,510%	0,549%	4,469%	0,000%	0,000%	32,105%
RO	0,000%	0,666%	0,000%	3,293%	0,196%	6,350%	5,135%	1,176%	0,157%	0,823%	1,960%	0,000%	0,000%	19,757%
SO	0,000%	1,372%	0,000%	0,353%	0,000%	1,254%	0,823%	1,176%	0,745%	0,039%	0,510%	0,000%	0,000%	6,272%
VD	0,000%	0,353%	0,000%	0,157%	0,000%	0,431%	0,235%	0,431%	0,823%	0,000%	0,118%	0,000%	0,000%	2,548%
VM	0,000%	0,392%	0,000%	0,314%	0,118%	0,823%	0,274%	0,235%	0,118%	0,118%	0,274%	0,000%	0,000%	2,666%
VS	0,000%	0,588%	0,039%	1,254%	0,078%	2,979%	2,117%	1,294%	0,470%	1,019%	2,352%	0,000%	0,000%	12,191%
WM	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
Part des fins de trajet	0,039%	10,780%	0,039%	13,642%	1,529%	27,440%	20,815%	7,252%	3,175%	3,528%	11,760%	0,000%	0,000%	100,000%

Pour ce qui est à trait à l'intensité de la demande, une dernière analyse statistique a été réalisée afin de déterminer les lois de distribution qui régissent la demande en fonction du temps. L'option CustomDistribution d'Anylogic a été utilisée, étant donné que certaines lois révélées par le test de Kolmogorov-Smirnov visant à déterminer si un échantillon provient d'une population avec une distribution spécifique ne sont pas supportées par Anylogic. CustomDistribution permet de déterminer une loi de distribution empirique appropriée selon le tableau de fréquence des transactions compilées pour une tranche horaire et une période de la semaine donnée (The Anylogic Company, 2019a).

Ultimement, c'est l'intégration des matrices et des distributions d'intensité de demande qui donnent naissance au générateur de trajet. Ce dernier produira, à chaque tranche horaire, des fins de déplacements discrétisés dans l'espace (au niveau de l'arrondissement) et dans le temps pour un mois synthétique.

#### **4.3.4 Couche SIG**

Les entités de la couche multi-agent interagissent sur une carte téléchargée en temps réel depuis Open Street Map, un service de cartes en ligne en collaboration avec Anylogic (ArcGIS, 2019). Cette carte est caractérisée par un réseau routier complet, qui est séparé par type de routes (incluant les voies piétonnes) et autoroutes, formant ainsi un ensemble de nœuds et d'arcs sur lesquels les agents peuvent se déplacer.

En outre, les grilles du réseau sont définies en utilisant les limites administratives des 19 arrondissements de l'île de Montréal. Afin de restreindre les endroits auxquelles les agents de type Client peuvent être générés, une ségrégation du territoire de chaque arrondissement a été effectuée afin de restreindre la génération d'agent dans des zones à faible densité démographique. Cette ségrégation se base sur la carte interactive du Schéma d'aménagement et de développement de l'agglomération de Montréal (Ville de Montréal, 2019b). Une attention particulière a été portée sur les grandes affectations du territoire montréalais illustrées à la figure 4.9. Ainsi, les zones à dominante résidentielle, les centres-villes d'agglomération ainsi que les zones d'activités diversifiées ont été priorisées pour la génération d'un agent Client. De plus, les zones agricoles, les zones de conservation et les grands espaces verts ou de récréation ont été indiqués comme zones inoccupées dans notre modèle de telle sorte qu'aucun agent de type Vehicle ne puisse s'y rendre.

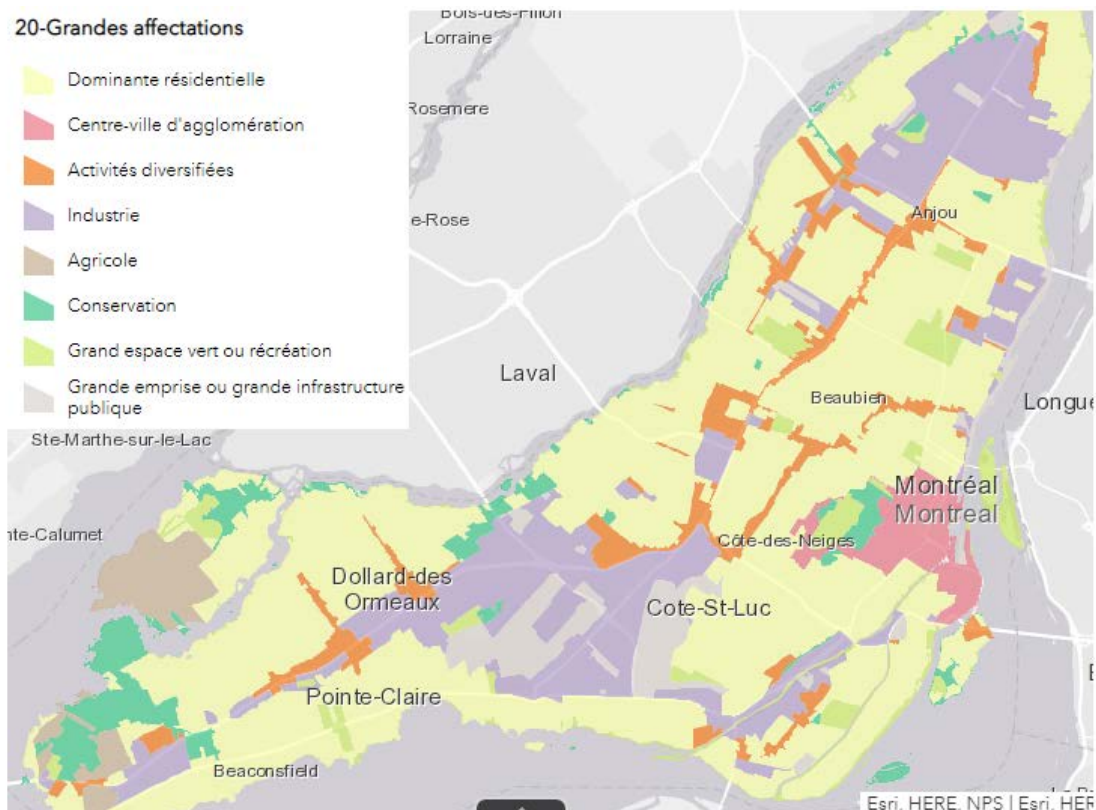


Figure 4.9 : Carte interactive de l'affectation du territoire selon le Schéma d'aménagement et de développement (Ville de Montréal, 2015)

Ultimement, la détermination du chemin optimal entre l'origine et la destination d'un déplacement est définie à l'aide de l'algorithme de plus court chemin à savoir l'algorithme de Dijkstra fournie directement par Anylogic.

#### 4.4 Vérification du modèle

Dans notre étude, l'exécution de cette étape a permis de vérifier que le modèle cartographié a bien été celui qui a été modélisé. Cette vérification se fait en deux étapes:

- un débogage du programme : La justesse des instructions saisies lors de l'implémentation du modèle a été vérifiée par le *Builder* de *Anylogic*, module vérifiant que les standards de programmation Java ont été respectés;
- une série de tests Input/Output : Il s'agit ici de reprendre les diagrammes d'états de chaque agent et de vérifier pour chaque branche si l'action désirée est accomplie en fonction de la donnée mise en entrée. Le tableau 4.10 présente le test effectué pour vérifier si, à choisir,



un agent *Client* réservé bien le véhicule le plus proche de sa position. Le détail du code de la fonction d'intérêt peut être retrouvé à l'Annexe C.

Tableau 4.10 : Exemple d'un test effectué lors de la phase de vérification

Tests	Fonction d'intérêt	Entrées	Sorties espérées	Sorties obtenues
Réservation du véhicule le plus proche	<i>checkNetwork</i>	Un agent #1 de type <i>Client</i>	Variable, <i>Car</i> de l'agent Client reçoit l'id de l'agent #1 de type Vehicle	Variable, Car de l'agent Client reçoit agent #1 de type Vehicle
		Un agent #1 de type <i>Vehicle</i> à 100 m de l'agent type Client		
		Un agent #2 de type <i>Vehicle</i> à 200 m de l'agent type Client	Affichage dans la console de " car matched => 1 "	Affichage dans la console de " car matched => 1 "
		Instruction de test dans <i>checkNetwork</i> : System.out.println (" car matched => " + v.idVeh)		

## 4.5 Calibration et validation du modèle

La validation constitue une étape méthodologique importante sur laquelle la fiabilité et la confiance aux résultats de simulation obtenus dépendent. En effet, c'est lors de cette étape où le comportement du système révélé par la simulation est comparé au comportement du système observé en réalité. Banks et al. (2013) proposent une approche en trois étapes pour la validation du modèle :

- **Étape 1 : Construire un modèle qui a une validité apparente élevée**
- **Étape 2 : Valider les données d'entrées et les hypothèses posées sur celles-ci**
- **Étape 3 : Comparer les sorties du modèle aux valeurs correspondantes pour le système réel**

Les étapes 1 et 2 ont été effectuées aux sous-sections précédentes. L'étape 3 renvoie à la calibration du modèle qui est la combinaison d'un processus itératif de comparaison des observations réalisées à la suite d'une simulation aux observations réelles, à un paramétrage et une révision des données jusqu'à obtention de résultats conformes à la réalité. Pour le modèle développé, l'étape 3 renvoie à une validation du générateur de trajet. Ceci se fait en vérifiant si les transactions obtenues à la fin de la simulation suivent les mêmes tendances que celles observées



en réalité et en ajustant le générateur si tel n'est pas le cas. Pour cela, une première calibration de la demande a été effectuée en tentant de déterminer laquelle des deux affirmations suivantes étaient la plus appropriée :

- il faut mettre à jour la demande à chaque heure, en restant conforme au jour de la semaine et à l'heure de la journée (Configuration C1);
- il n'est pas nécessaire de mettre à jour la demande chaque heure si elle est déjà modifiée à chaque début de tranche horaire, conformément au jour de la semaine et à l'heure de la journée (Configuration C2).

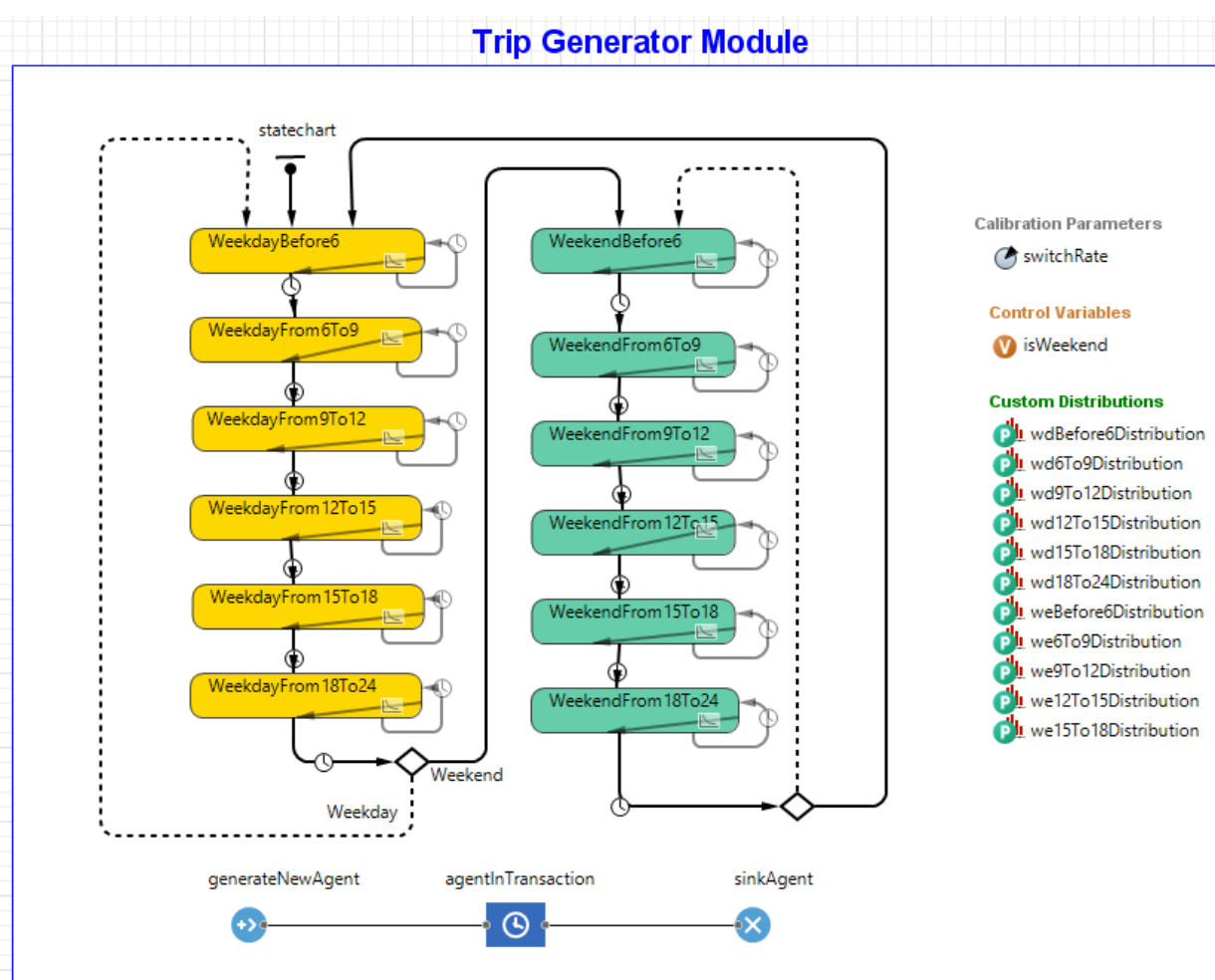


Figure 4.10 : Diagramme d'état du générateur de trajet

En se référant à la figure 4.10, un paramètre de calibration, switchCase, a été introduit. Ainsi, le modèle a été simulé deux fois en faisant varier le paramètre switchCase de 0 à 1. Lorsqu'il est égal à 1, une nouvelle intensité de demande est générée de manière aléatoire toutes les heures (C1).

Lorsqu'il est égal à 0, la demande sera modifiée à chaque changement de tranche horaire, elle est donc constante durant toute la période (C2). Par exemple, pour la tranche horaire T1 allant de 00h à 06h, C1 imposerait une modification de l'intensité de la demande par appel de la loi *wdBefore6Distribution()* en jours ouvrables ou *weBefore6Distribution()* en fin de semaine à 00h, 01h, 02h et ainsi de suite jusqu'à 06h00. C2 quant à elle imposerait une unique modification de l'intensité de la demande à 00h par appel de la loi *wdBefore6Distribution()* en jours ouvrables et *weBefore6Distribution()*, la même valeur sera alors réutilisée comme demande horaire jusqu'à 6h00. Les transactions obtenues après simulation de chacune des deux configurations ont été comparées aux transactions de la base de données originale d'abord de manière graphique, et ensuite en utilisant des outils statistiques.

Graphiquement, il semblerait que l'évolution du service dans le temps soit très similaire à celle révélée par les données transactionnelles (BD), autant lorsque la configuration C1 que la configuration C2 est adoptée. Toutefois, il semblerait que les pics de demande soient légèrement décalés de 8h à 10h. en jours ouvrables. Pour les transactions en fin de semaine par contre, il semblerait que la configuration C2 semble plus appropriée pour représenter la tendance générale illustrée à la figure 4.11.

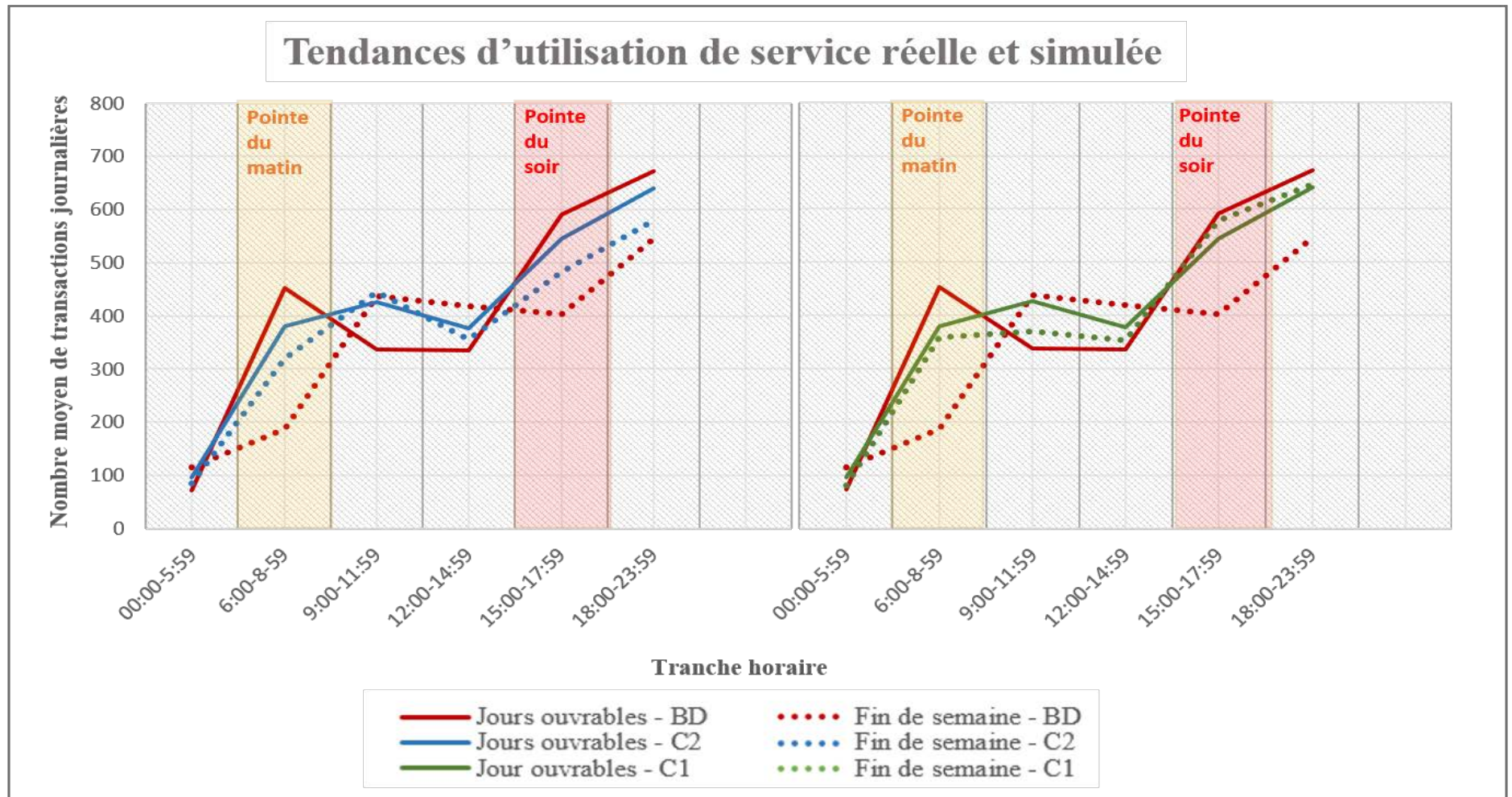


Figure 4.11 : Comparaison des tendances d'utilisation de service réelle et simulée

Statistiquement, effectuer un test t de Student sur les transactions réelles et les transactions issues des simulations permet de comparer les moyennes de ces trois séries de données faites sur la même base à savoir le nombre de transactions par tranche horaire d'une journée (Addinsoft, 2019a). Deux tests comparant les résultats obtenus lorsque chacune des deux configurations obtenues aux données transactionnelles sont ainsi effectués, elles se déclinent comme suit :

**H0 : La différence entre les nombres moyens de transactions générées est égale à 0**

**H1 : La différence entre les nombres moyens de transactions générées est différente de 0**

Ces tests réalisés à l'aide de XLStat renvoie des p-value supérieures au niveau de signification  $\alpha = 0.05$  aussi bien pour la configuration C1 que la configuration C2, comme on peut le voir à la figure 4.12. Ainsi, l'hypothèse H0 ne peut être rejetée et la configuration C2 présentant des p-values plus élevés peut être privilégié à la configuration C1.

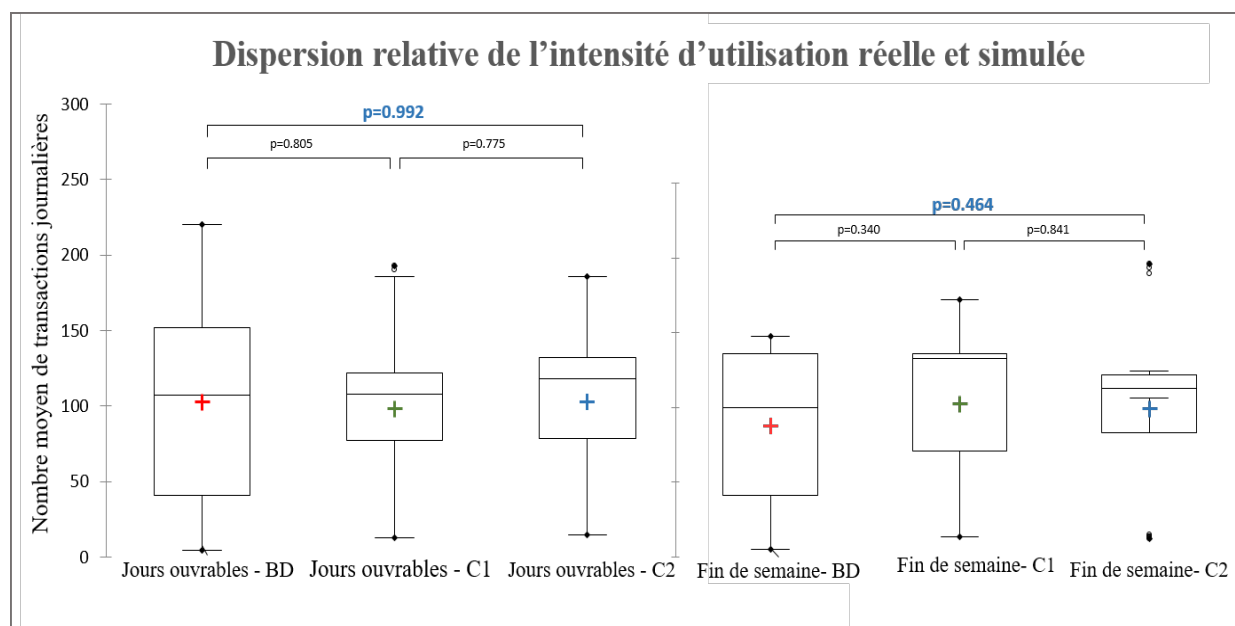


Figure 4.12 : Comparaison des dispersions relatives d'utilisation du service

En tenant compte de ces conclusions, la configuration C2 a été choisie lors de la dernière étape de calibration, où il s'agissait de vérifier que les transactions débutent et se terminent au bon endroit. Pour cela, un indicateur de déviation relative entre le nombre de transactions allant et venant d'une région observée et simulée a été calculé comme suit:

$$\text{déviation relative} = \frac{|valeur\ observée - valeur\ simulée|}{valeur\ observée} \times 100 \quad (2)$$

Avec l'option *Optimization* offerte par Anylogic, il est possible répéter une simulation tant et aussi longtemps qu'un critère d'arrêt fixé n'est pas atteint. Pour cette étude, le critère d'arrêt est :

$$\text{déviation relative maximale} < 5\%$$

Après 12 réplifications, la déviation relative la plus élevée obtenue est d'environ 2%. Les indices obtenus sont présentés à la figure 4.13.

Région d'origine	Région de destination										
	CN	LR	ME	MH	OM	PM	RO	SO	VD	VM	VS
CN	0,588%	0,000%	0,003%	0,051%	0,058%	0,686%	0,252%	0,228%	0,014%	0,006%	0,102%
MH	0,031%	0,000%	0,016%	1,058%	0,017%	0,464%	0,177%	0,153%	0,071%	0,031%	0,098%
MR	0,064%	0,000%	0,000%	0,000%	0,001%	0,001%	0,064%	0,000%	0,001%	0,000%	0,017%
OM	0,042%	0,000%	0,000%	0,017%	0,057%	0,052%	0,066%	0,038%	0,010%	0,004%	0,028%
PM	0,549%	0,000%	0,001%	0,602%	0,079%	1,989%	1,011%	0,337%	0,024%	0,092%	0,344%
RO	0,044%	0,000%	0,000%	0,317%	0,034%	0,672%	0,112%	0,004%	0,031%	0,011%	0,182%
SO	0,358%	0,000%	0,001%	0,055%	0,013%	0,478%	0,107%	0,433%	0,156%	0,066%	0,040%
VD	0,047%	0,000%	0,001%	0,017%	0,003%	0,031%	0,027%	0,021%	0,083%	0,008%	0,028%
VM	0,086%	0,000%	0,000%	0,090%	0,006%	0,189%	0,069%	0,086%	0,023%	0,098%	0,071%
VS	0,013%	0,007%	0,001%	0,044%	0,018%	0,161%	0,103%	0,028%	0,025%	0,007%	0,245%

Figure 4.13 : Carte de chaleur des déviations relatives

Ultimement, nous pouvons conclure que le processus de calibration permet de valider le modèle de manière confiante. Il est ainsi possible d'entamer la phase d'expérimentation du modèle.

## CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATION

### 5.1 Plan d'expérience

#### 5.1.1 Description générale

Un des objectifs majeurs de cette étude est d'analyser le réseau LSI en cas de variation de la politique d'utilisation des véhicules, de la demande en déplacement ou de la taille de la flotte de véhicules. L'accomplissement de cette tâche passe par la réalisation de la série d'expérimentation illustrée à la figure 5.2.

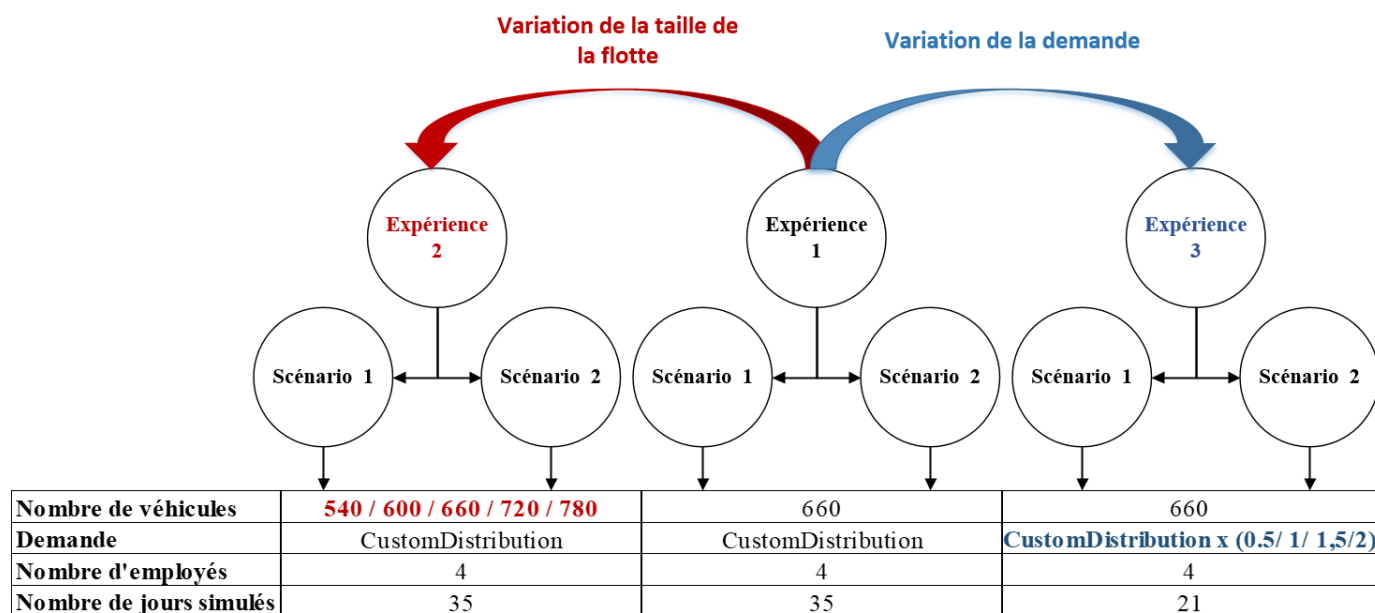


Figure 5.1 : Plan d'expérience

L'expérience 1 est directement en lien avec la politique d'utilisation des véhicules qu'impose Communauto aux usagers du volet LSI. En effet, il est spécifié dans le règlement de l'opérateur qu'il est interdit pour un client de terminer son trajet et de stationner un véhicule hors de la zone de service, sous peine de frais monétaires supplémentaires (Communauto, 2019). Cependant, en étudiant la base de données transactionnelles fournie, il a été remarqué que certains déplacements se terminaient bien hors de la zone LSI. D'ailleurs, la possibilité que certaines de ces transactions correspondent à des arrêts temporaires dans une chaîne de déplacement lors d'une même transaction a été extensivement étudiée par Wielinski et al pour la même base de données

(2019). Étant donné que chaque chaîne de déplacement est considérée dans notre modèle comme une succession de transactions distinctes, il a été choisi d'analyser le système aussi bien lorsque la politique de restriction des fins de trajets en zone LSI est appliquée de manière stricte (**Scénario 1**) que lorsqu'elle est appliquée avec possibilité de digression par les usagers (**Scénario 2**). Il sera ainsi possible d'analyser les différences et similarités majeures entre ces deux cas de figure et ce qui se passe en réalité.

Les expériences 2 et 3 se basent sur la première en faisant toutefois varier respectivement la taille de la flotte et la demande. L'objectif visé ici est d'effectuer une analyse de la sensibilité du système face à des changements configurationnels conséquents et ceci pour les deux scénarios introduits à l'expérience 1.

### **5.1.2 Paramétrage de la phase d'expérimentation**

Comme introduit précédemment, la première expérience vise la simulation de deux configurations directement tirées de la position actuelle de l'opérateur face aux conditions d'utilisation du véhicule.

Étant donné que les véhicules sont répartis uniformément dans la zone de service au début de la simulation, une période de réchauffement (*warm-up period*) est nécessaire. Cette dernière correspond à une période durant laquelle la simulation sera exécutée sans collecte de données pour permettre aux agents de type *Vehicle* de se positionner de manière similaire au moment où les données transactionnelles ont été recueillies dans la réalité. Ainsi, le modèle est simulé sur 35 jours au total, les 7 premiers jours servant de *warm-up period*.

Par ailleurs, il est important de valider le nombre de répétitions à effectuer pour chaque scénario simulé, le but étant d'affiner les résultats tout en maintenant un niveau élevé de précision. Pour ce faire, l'écart moyen entre le nombre de transactions simulées pour les deux scénarios et le nombre de transactions réelles a été suivi. Les résultats sont illustrés à la figure 5.2.



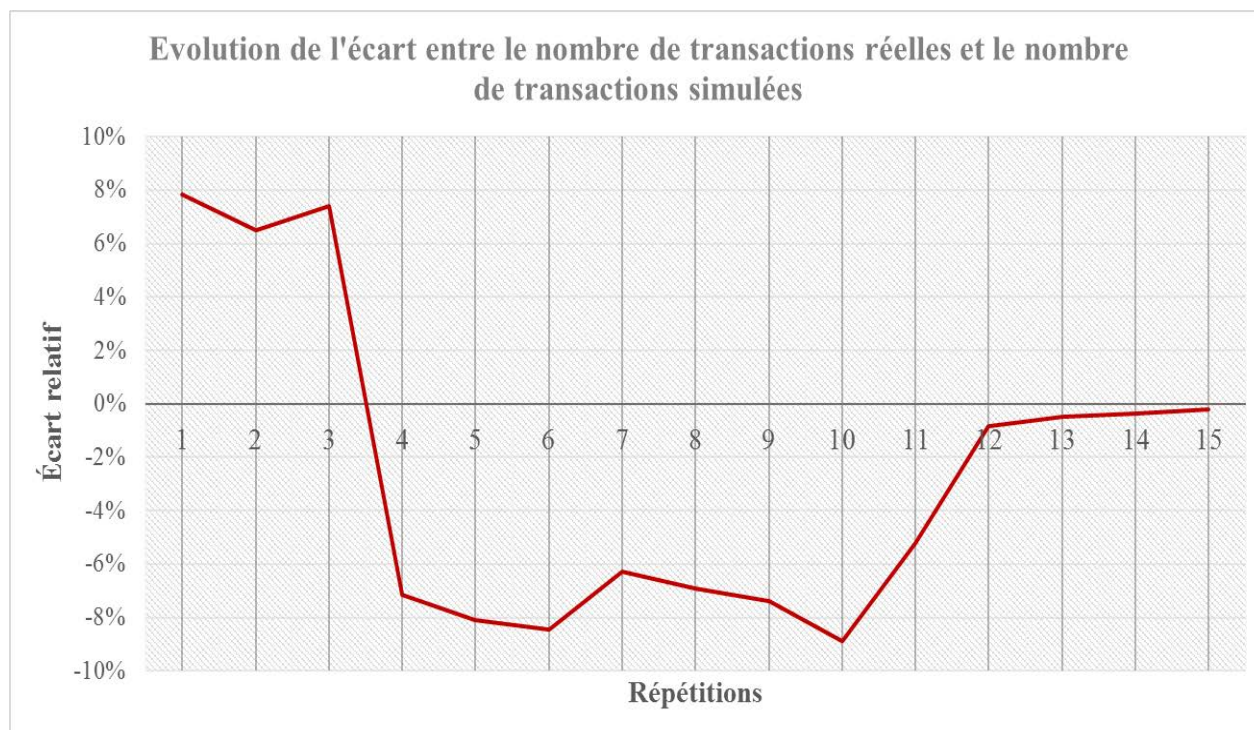


Figure 5.2 : Évolution de l'écart entre les nombres de transactions

De manière générale, l'écart relatif entre le nombre de transactions simulées et le nombre de transactions réelles est maintenu à  $\pm 10\%$  pour les deux scénarios sur les 15 premières répétitions, avec un minimum atteint à la quinzième répétition. Ainsi, l'analyse des résultats présentés tout au long de ce chapitre se basera sur les résultats collectés lors de cette répétition de la simulation.

Ultimement, pour uniformiser l'interprétation des résultats, une segmentation k-moyenne a été effectuée sur l'ensemble des données transactionnelles afin de déterminer des classes de véhicules ayant des tendances similaires en termes d'intensité d'utilisation. Pour les 660 véhicules apparaissant dans la base de données, le nombre moyen de transactions journalières faites a été étudié. Avec un niveau de confiance de 95%, il a été possible de déterminer trois classes de véhicules selon leur fréquence d'utilisation journalière. Celles-ci sont exposées au tableau 5.1.



Tableau 5.1 : Profil des véhicules de la flotte selon la fréquence d'utilisation journalière

Fréquence d'utilisation	Nombre moyen de transactions journalières	Pourcentage de la flotte
Basse	Entre 2 et 3	3%
Moyenne	Entre 3 et 5	85%
Haute	Entre 5 et 7	12%

Ces classes seront référencées comme des profils de véhicules tout au long de ce chapitre et serviront comme base de comparaison de l'intensité d'utilisation du réseau lors de chaque expérience de simulation.

## 5.2 Expérience 1 : Taille de la flotte et demande constante

L'accent sera mis sur trois aspects pour l'étude des résultats de cette expérience. En effet, il s'agira d'analyser pour chaque scénario l'intensité d'utilisation et la répartition géospatiale de la flotte de véhicules, ainsi que l'impact du type de véhicule sur son utilisation.

Dans le contexte de la simulation effectuée, l'analyse de l'utilisation de véhicules repose sur un suivi des comportements des véhicules (en référence aux agents de type Vehicle) afin d'identifier la possibilité de relever des grandes tendances en termes d'intensité d'utilisation. Pour cela, pour chaque véhicule, le nombre de transactions accomplies dans une journée ainsi que le nombre de jours actifs dans le mois ont été collectés au terme des deux scénarios. Afin de se conformer aux résultats obtenus aux termes de l'expérience, un nouveau profil de véhicule a été ajouté à ceux obtenus à la suite de la segmentation présentée à la section précédente. Il s'agit du profil relatif aux véhicules ayant de très hautes fréquences d'utilisation. Ceux-ci effectuent en moyenne entre 7 et 15 transactions par jour comme relevé au tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Profils ajustés des véhicules de la flotte selon la fréquence d'utilisation journalière

Fréquence d'utilisation	Nombre moyen de transactions journalières	Situation réelle	Scénario 1	Scénario 2
Basse	Entre 2 et 3	3%	1%	1%
Moyenne	Entre 3 et 5	85%	87%	81%
Haute	Entre 5 et 7	12%	8%	12%
Très haute	Entre 7 et 15	0%	4%	6%

Une analyse de la proportion de véhicules appartenant à chaque profil a été conduit pour détecter les différences et similitudes en termes d'intensité d'utilisation de la flotte entre les deux configurations expérimentales et les tendances révélées par les données transactionnelles. Celle -ci est représentée à la figure 5.3.

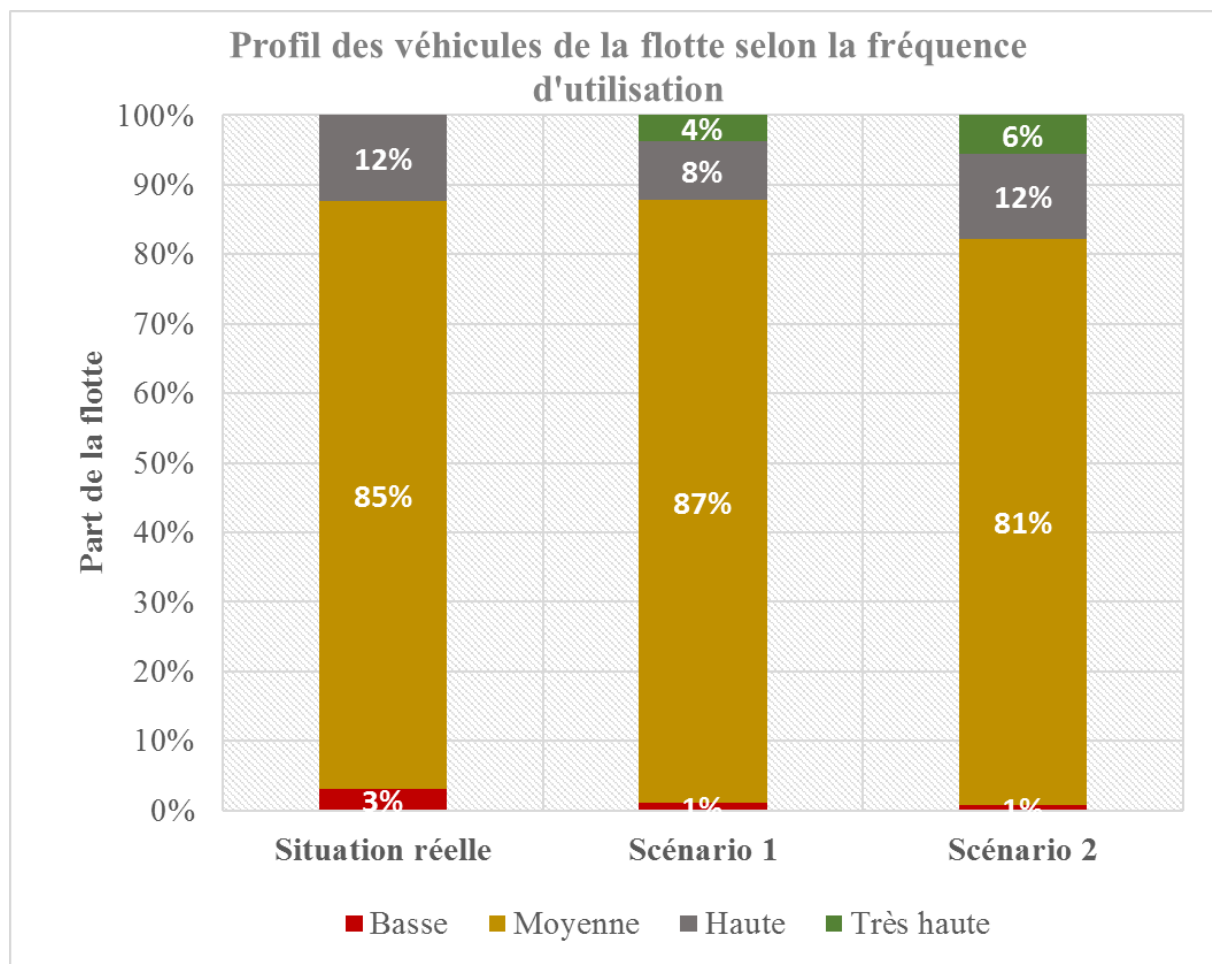


Figure 5.3 : Comparaison des proportions de chaque profil de véhicule de chaque scénario expérimental

On peut observer que la majorité de la flotte des véhicules effectue entre 3 et 5 transactions par jour et cela, quelle que soit la politique d'utilisation simulée et conformément à ce qui a été observé en réalité. Cependant, on note toutefois, aussi bien pour le scénario 1 que le scénario 2, que certains véhicules présentaient une fréquence d'utilisation journalière légèrement supérieure à la réalité. Ces derniers effectuent un nombre moyen de transactions journalières supérieur à 7 et allant jusqu'à 15 transactions par jour (représentant 4% et 6% de la flotte pour respectivement les scénarios 1 et 2). La différence pourrait être induite par le fait que des trajets beaucoup plus rapi-

des sont effectués lors de la simulation, dû entre autres au fait que la congestion n'est pas tenue en compte lors de la phase de modélisation. Ce point sera d'ailleurs discuté au chapitre suivant.

Par ailleurs, l'utilisation mensuelle de chaque véhicule a été révélée par le suivi du nombre de jours actifs à savoir le nombre de jours dans la période de simulation où il a effectué au moins une transaction. À la figure 5.4 est présentée l'activité de chaque profil de véhicule pour chaque scénario durant la période d'étude de 28 jours.

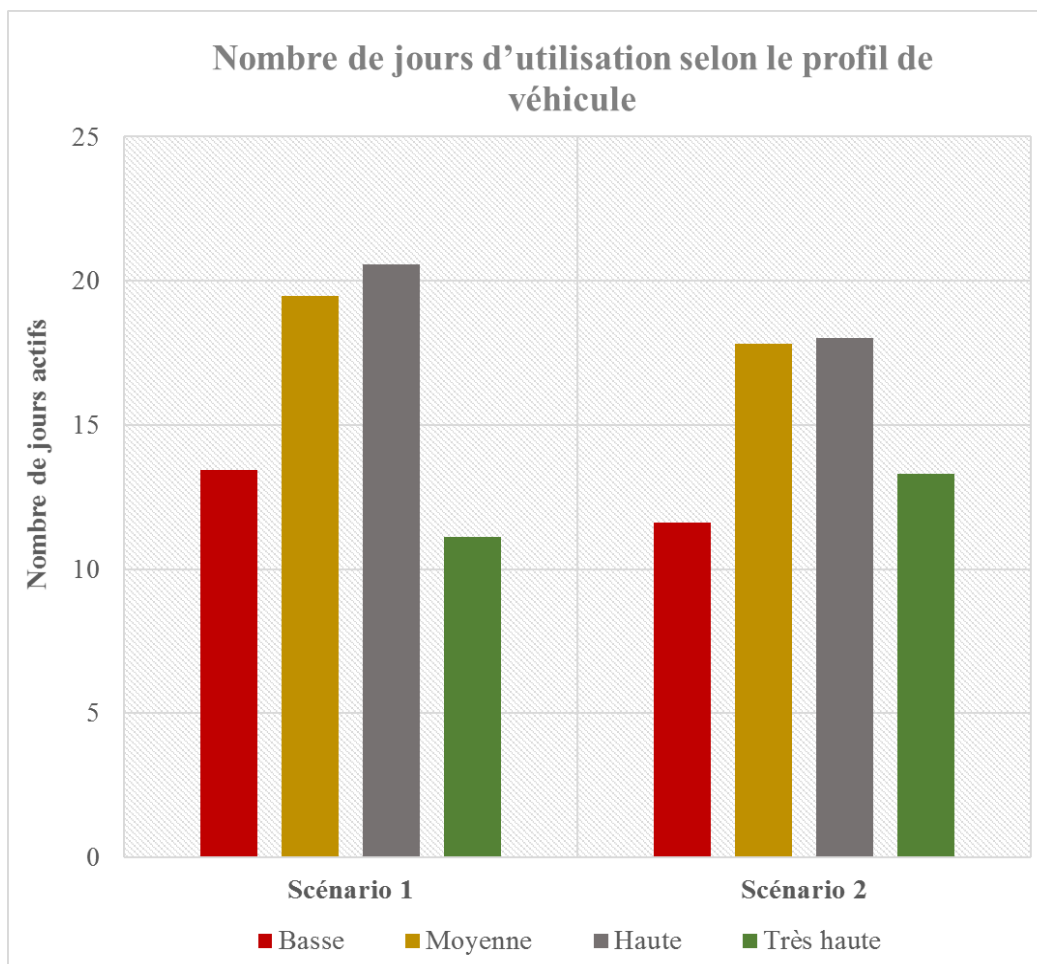
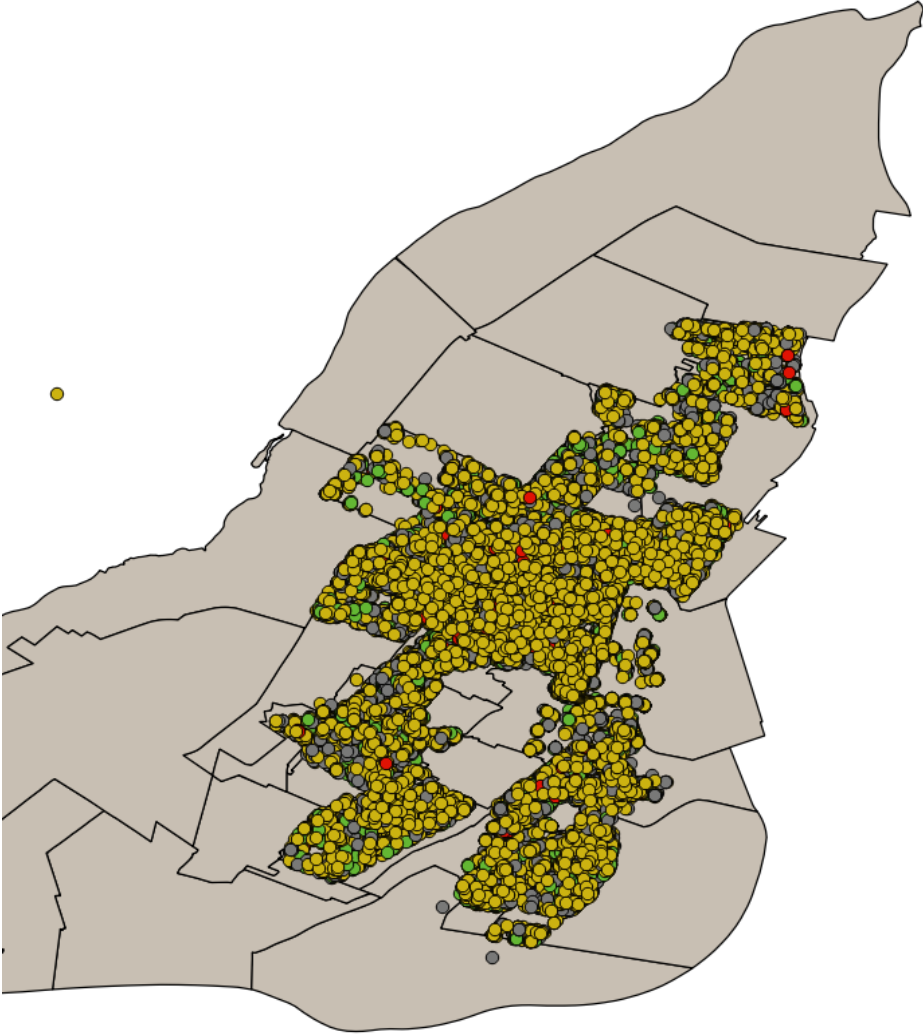
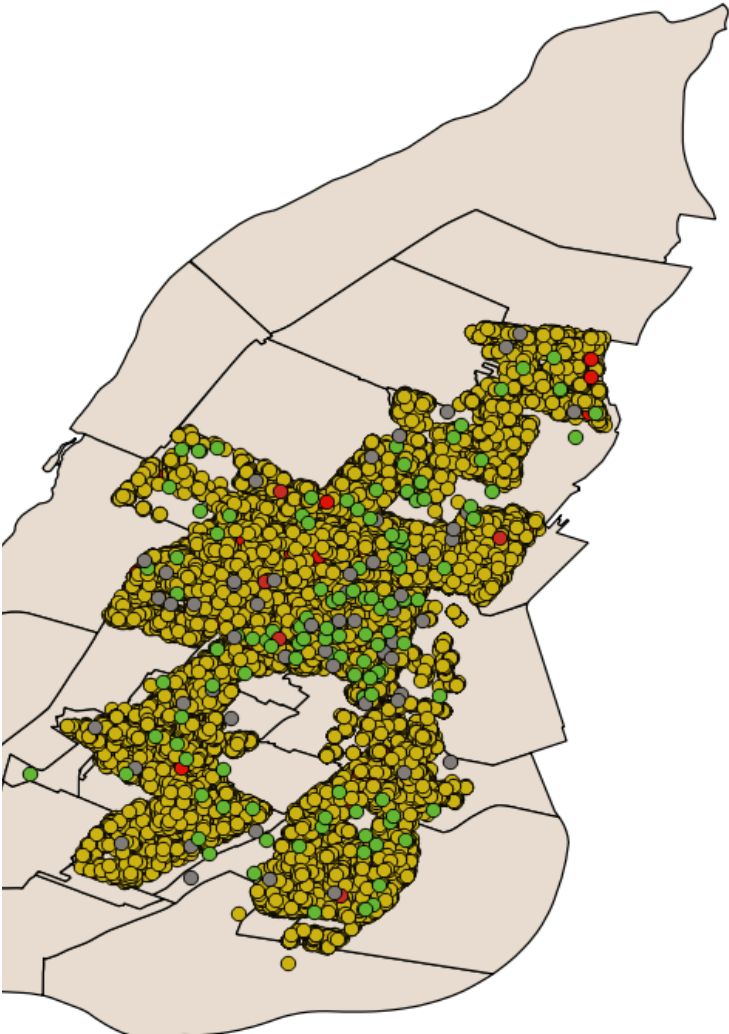


Figure 5.4 : Comparaison du nombre de jours actifs selon le profil de véhicule

Il semblerait que les véhicules accusant une fréquence d'utilisation basse à haute présentent en moyenne un nombre de jours actifs plus élevé pour le scénario 1 que pour le scénario 2, ce qui est l'inverse pour les véhicules notant une très haute fréquence d'utilisation. Un suivi du positionnement spatial de ces véhicules pourrait apporter plus d'informations quant aux observations faites sur les tendances d'utilisation de la flotte.



Scénario 1



Scénario 2

Figure 5.5 : Répartition spatiale des véhicules selon les différents scénarios

A l'aide du logiciel QGIS, la cartographie de la répartition spatiale des départs de transaction selon le profil d'utilisation des véhicules a été effectuée. Celle-ci est retrouvée à la figure 5.5. Il est ainsi possible d'observer que la majeure partie des départs de trajets se font dans la zone de service délimitée par l'opérateur aussi bien pour le scénario 1 que pour le scénario 2. Également, les véhicules à haute fréquence d'utilisation sont différemment répartis dans le réseau selon le scénario. Là où ils sont repartis de manière uniforme dans la zone de service pour le scénario 1, ils sont concentrés au centre de celle-ci pour le scénario 2. Il semblerait ainsi que la non-restriction des trajets entraîne sur le long terme une plus grande utilisation des véhicules dans les zones à plus forte concentration de clients. Cette observation sera discutée plus extensivement à la section 5.4.

En outre, il est intéressant d'analyser l'impact du type de véhicule sur l'utilisation faite de celle-ci.

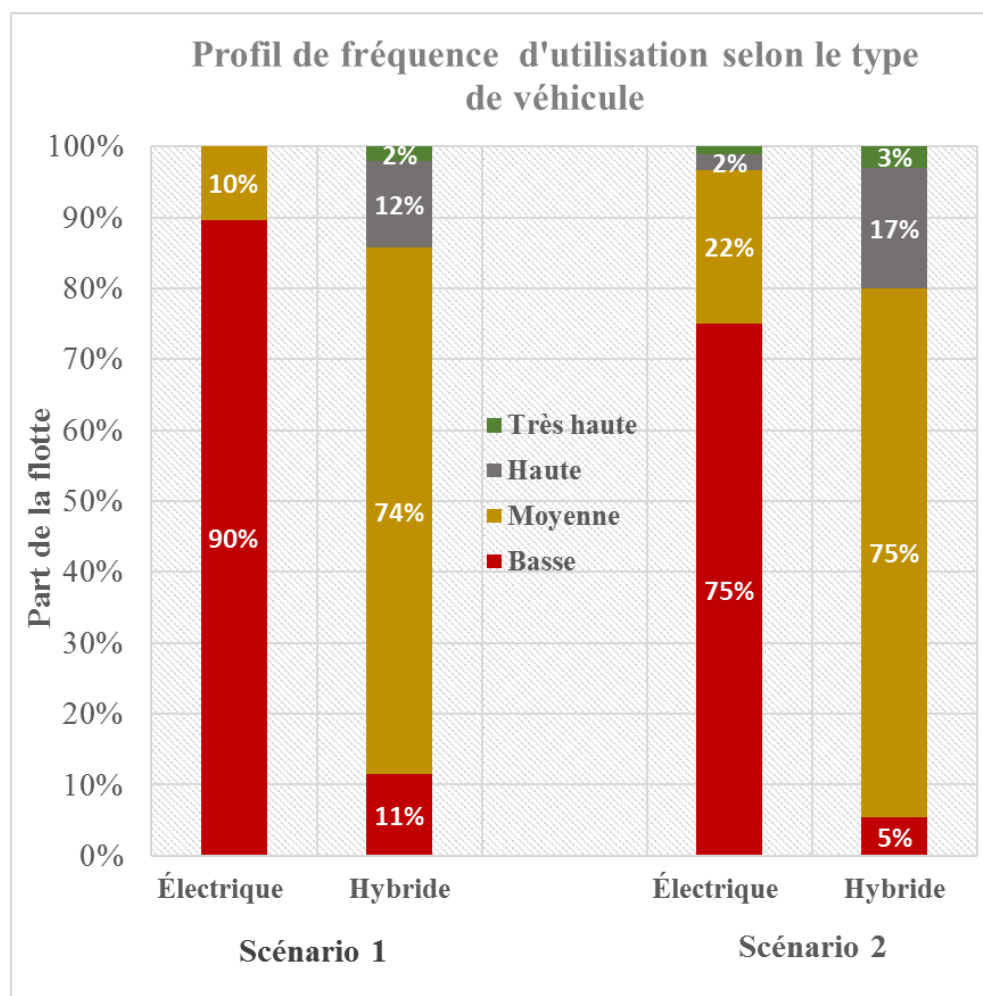


Figure 5.6 : Profil d'utilisation des véhicules selon le type

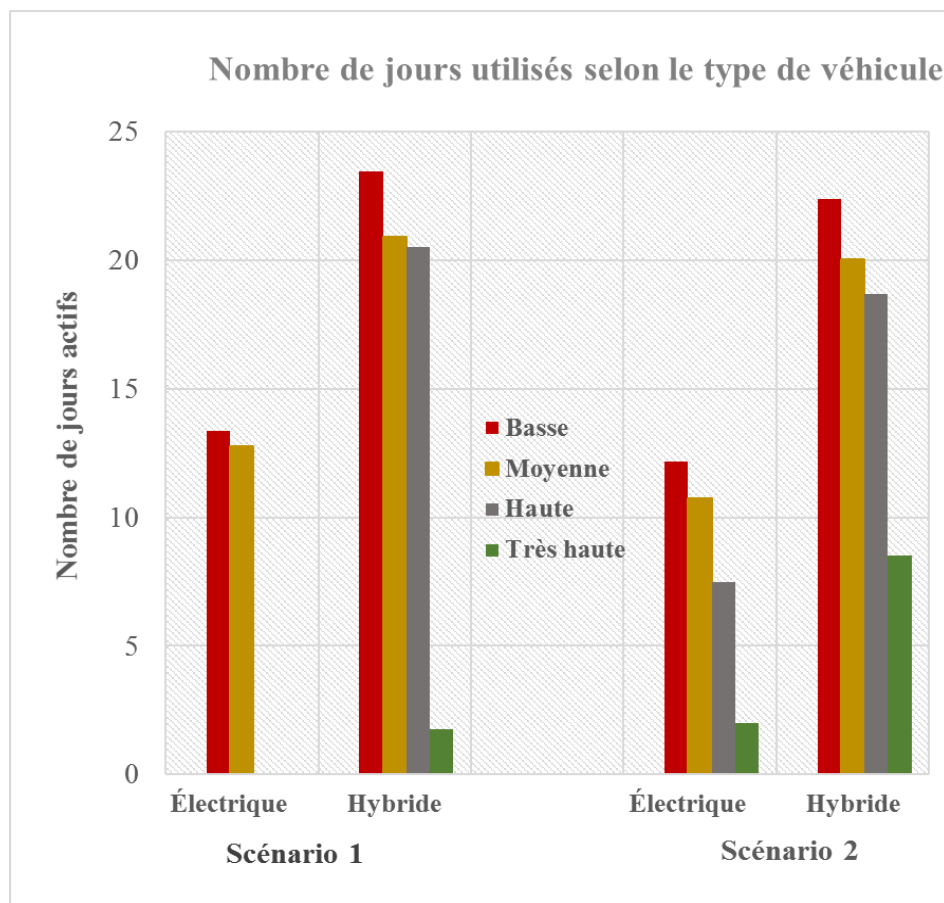


Figure 5.7 : Nombre de jours actifs selon le type de véhicule utilisé

Aux figures 5.6 et 5.7 est représenté le comportement en termes d'intensité d'utilisation de chaque profil de véhicule selon le type et le scénario à l'étude. Qu'importe la configuration choisie, il semblerait que les véhicules électriques sont moins actifs que les véhicules hybrides. Étant donné que pour le modèle développé le choix du véhicule n'est pas en lien avec une quelconque préférence du client, mais la disponibilité et la proximité de celui-ci au véhicule, il est possible de conclure que l'utilisation des véhicules électriques est considérablement lésée par leur proportion réduite dans la flotte de véhicule et les délais d'indisponibilité plus longs causés par leur besoin de recharge par les employés du réseau.



### 5.3 Expérience 2 : Taille de la flotte variable et demande constante

Pour cette expérience, la taille de la flotte est variée à  $\pm 20\%$  incrémentalement afin d'étudier la sensibilité du système à cette composante stratégique. En maintenant la même classification que celle présentée au tableau 5.2 de la section précédente de ce chapitre, il est possible d'analyser les différences en termes d'utilisation du véhicule selon la taille de la flotte et le scénario.

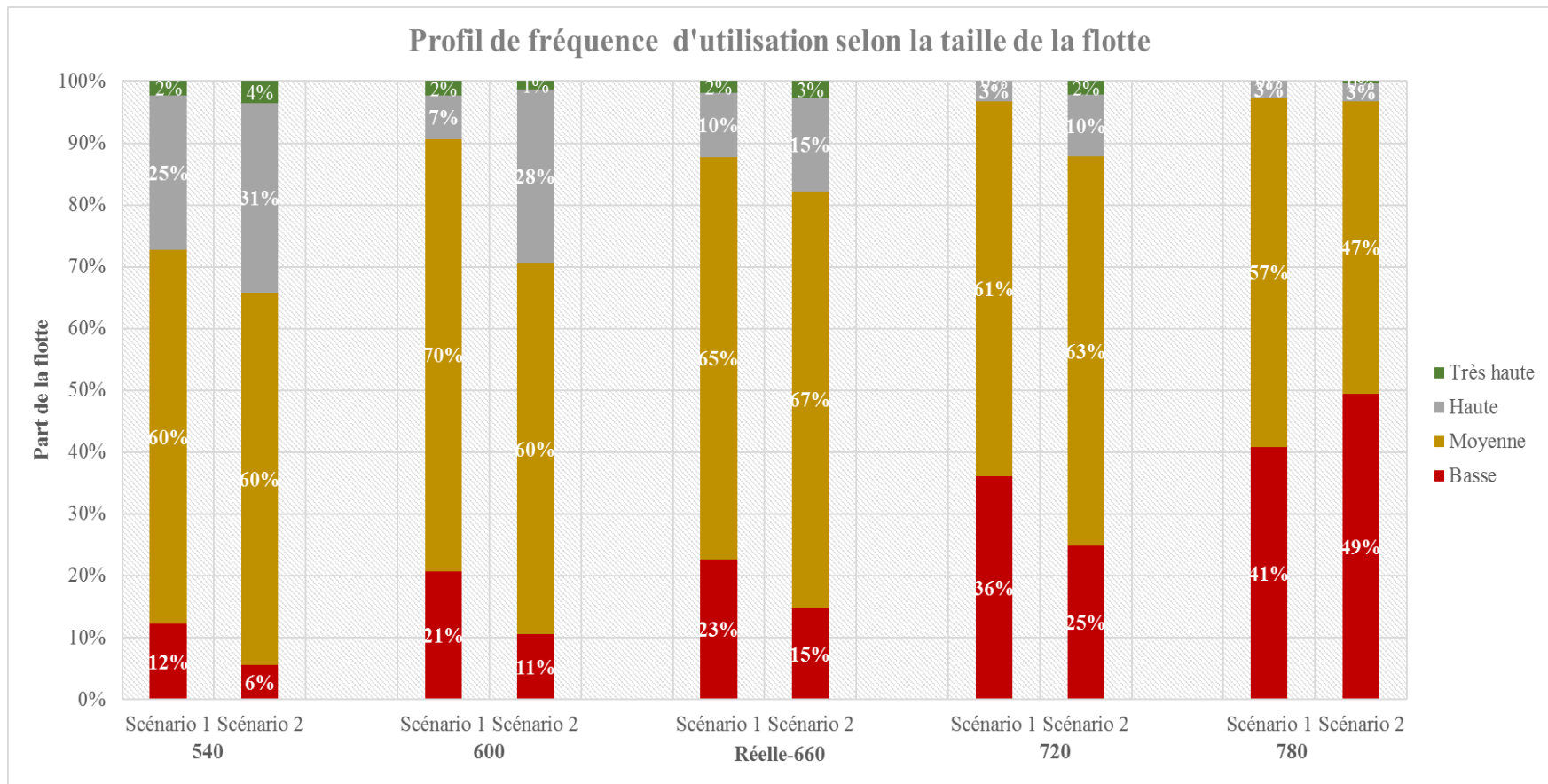


Figure 5.8 : Profil de fréquence d'utilisation des véhicules selon la taille de la flotte

La comparaison illustrée à la figure 5.8 permet de révéler que ni l'augmentation ni la diminution de la flotte n'influe de manière drastique sur la part de la flotte qui sera utilisée moyennement par les clients. La différence majeure se situe cependant aux profils extrêmes. En effet, il est observé que plus les véhicules sont nombreux, plus certains d'entre eux seront utilisés à basse fréquence.

Pour mesurer de manière plus précise l'impact de la taille de la flotte sur l'état du réseau, l'élasticité de la demande latente par rapport à celle-ci a été suivie. Cet indice de sensibilité permet d'évaluer le changement en pourcentage de la demande en déplacement non satisfaite par indisponibilité de véhicules qui résulte d'un changement en pourcentage de la taille de la flotte, lorsque les autres variables (la demande, la zone de couverture, etc.) restent stables. Cet indice a été calculé de la manière suivante pour les deux scénarios :

$$E_i = \frac{\frac{Ds_i - Ds_r}{Ds_r}}{\frac{T_i - T_r}{T_r}}$$

avec

$E_i$  = Élasticité de la demande latente pour une flotte de taille  $i$

$Ds_i$  = Demande latente pour une flotte de taille  $i$

$Ds_r$  = Demande latente pour la flotte de référence ( 660 véhicules)

$T_i$  = Taille de la flotte  $i$

$T_r$  = Taille de la flotte de référence ( 660 véhicules)

Cet indice est évalué à chaque incrémentation de la taille de la flotte. Les courbes de sensibilité obtenues selon le scénario sont présentées à la figure 5.9.



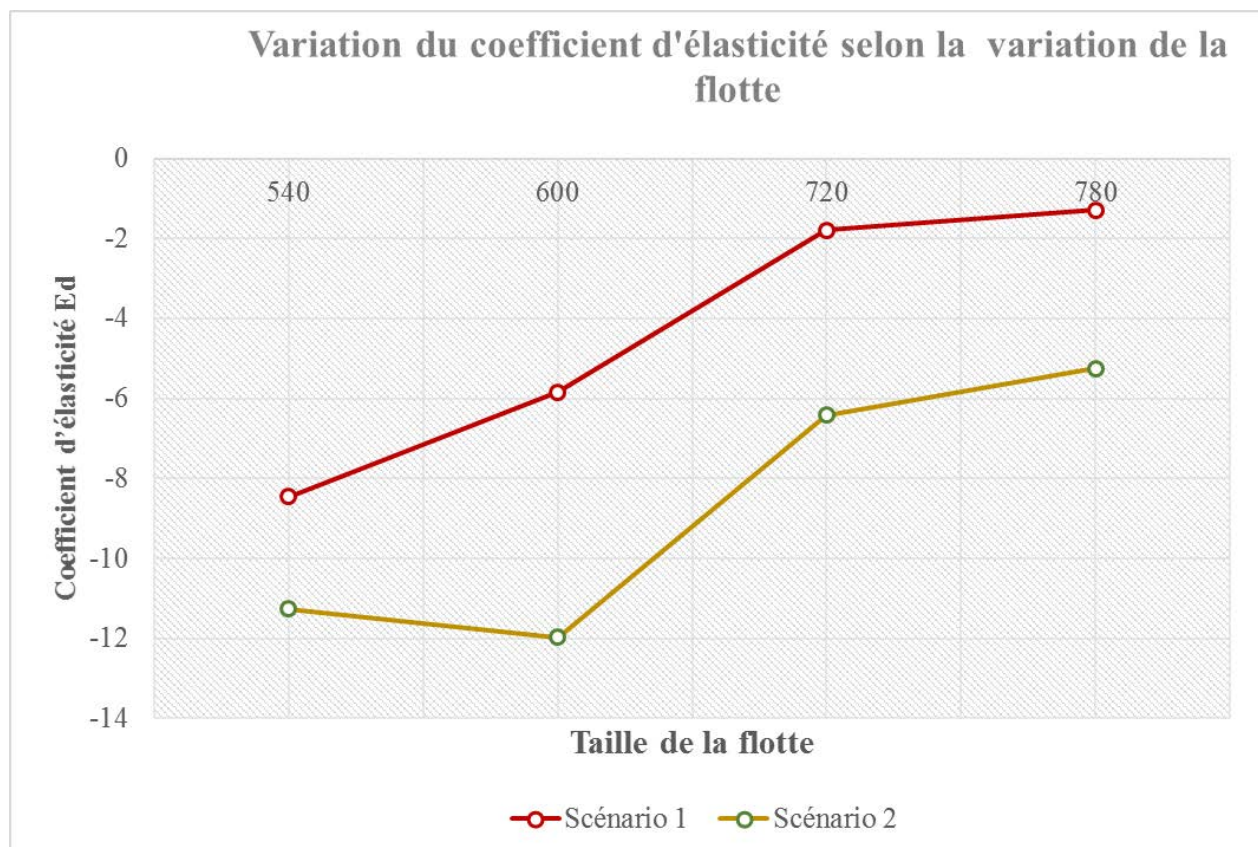


Figure 5.9 : Variation de l'indice de sensibilité selon la variation de la taille de la flotte

Il est à noter qu'étant donné que la valeur absolue du coefficient d'élasticité est supérieure à 1 pour toute variation du nombre de véhicules disponibles (Graham et al., 2004), la demande latente est élastique à la variation de la taille de la flotte aussi bien pour le scénario 1 que pour le scénario 2. Comme les coefficients d'élasticité obtenus sont négatifs, il est possible de conclure qu'une hausse de la taille de la flotte aura comme impact sur une certaine baisse de la demande latente et vice-versa.

### 5.4 Expérience 3 : Taille de la flotte constante de demande variable

Pour cette expérience, la demande en déplacement est variée de -50% à +100% de la demande réelle. L'objectif est d'étudier la sensibilité du système à cette composante stratégique selon les deux politiques d'utilisation à l'étude (scénario 1 et scénario 2). En maintenant la même classification que celle présentée au tableau 5.2 de la section précédente de ce chapitre, il est possible d'analyser les différences en termes d'utilisation du véhicule selon la demande et le scénario.

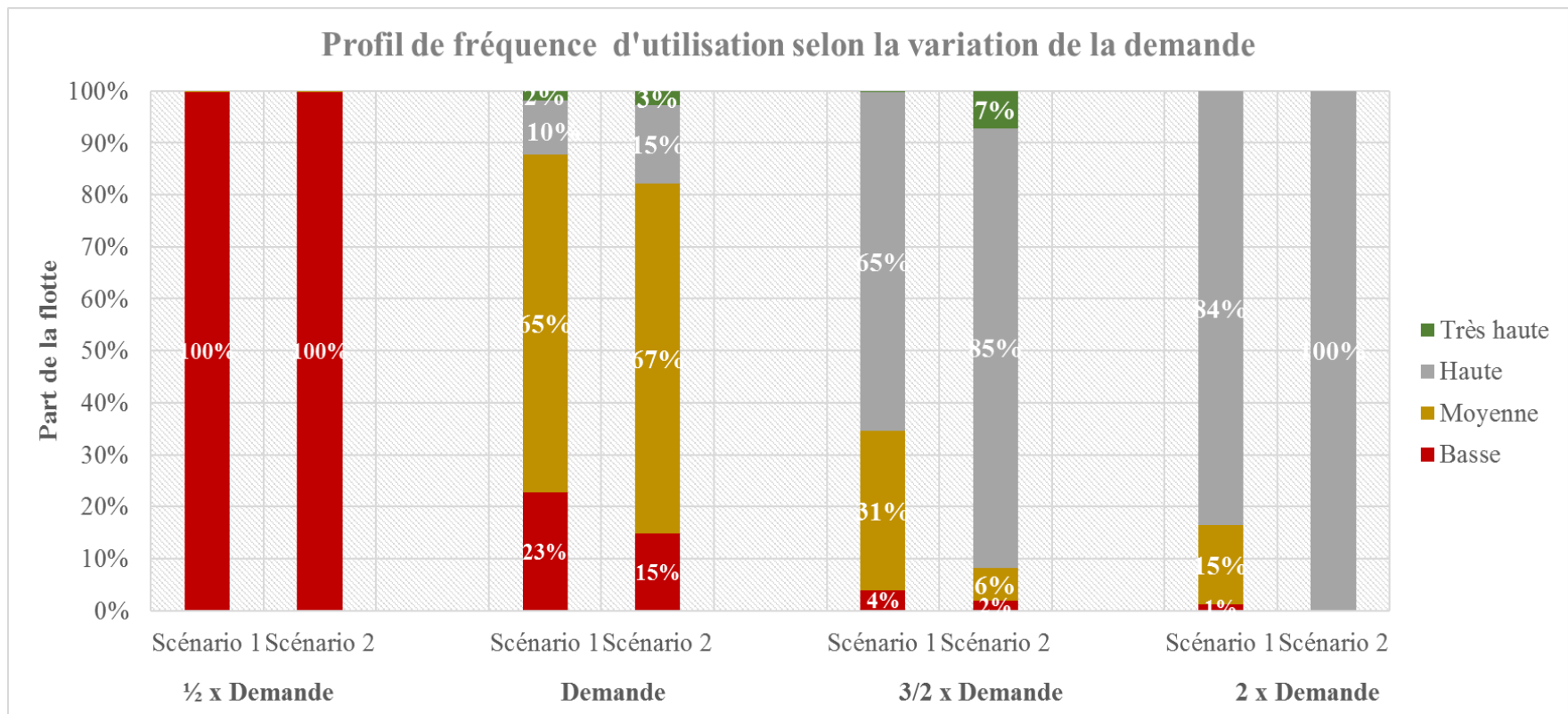


Figure 5.10 : Profil de fréquence d'utilisation des véhicules selon la demande

L'analyse illustrée à la figure 5.10 permet de révéler que l'augmentation et la diminution de la demande influent sur les fréquences d'utilisation des véhicules, quel que soit le scénario. En effet, il est observé que plus la demande diminue, plus certains véhicules seront utilisés à basse fréquence. Inversement, plus la demande est élevée, plus les fréquences d'utilisation des véhicules seront élevées.

Pour mesurer de manière plus précise l'impact de la demande sur l'état du réseau, l'élasticité de la demande latente par rapport à celle-ci a été suivie. Cet indice de sensibilité permet d'évaluer le changement en pourcentage de la demande en déplacement non satisfaite par indisponibilité de véhicules qui résulte d'un changement en pourcentage de la demande en déplacement lorsque les autres variables (la taille de la flotte, la zone de couverture, etc.) restent stables. Cet indice a été calculé de la manière suivante pour les deux scénarios :

$$E_i = \frac{\frac{Ds_i - Ds_r}{Ds_r}}{\frac{D_i - D_r}{D_r}}$$

avec

$E_i$  = Élasticité de la demande latente pour  $i$  x demande réelle

$Ds_i$  = Demande latente pour  $i$  x demande réelle

$Ds_r$  = Demande latente pour la situation de référence

$D_i$  = Demande correspondant à  $i$  x demande réelle

$T_r$  = Demande réelle

Cet indice est évalué à chaque incrémentation de la demande. Les courbes de sensibilité obtenues selon le scénario sont présentées à la figure 5.11.

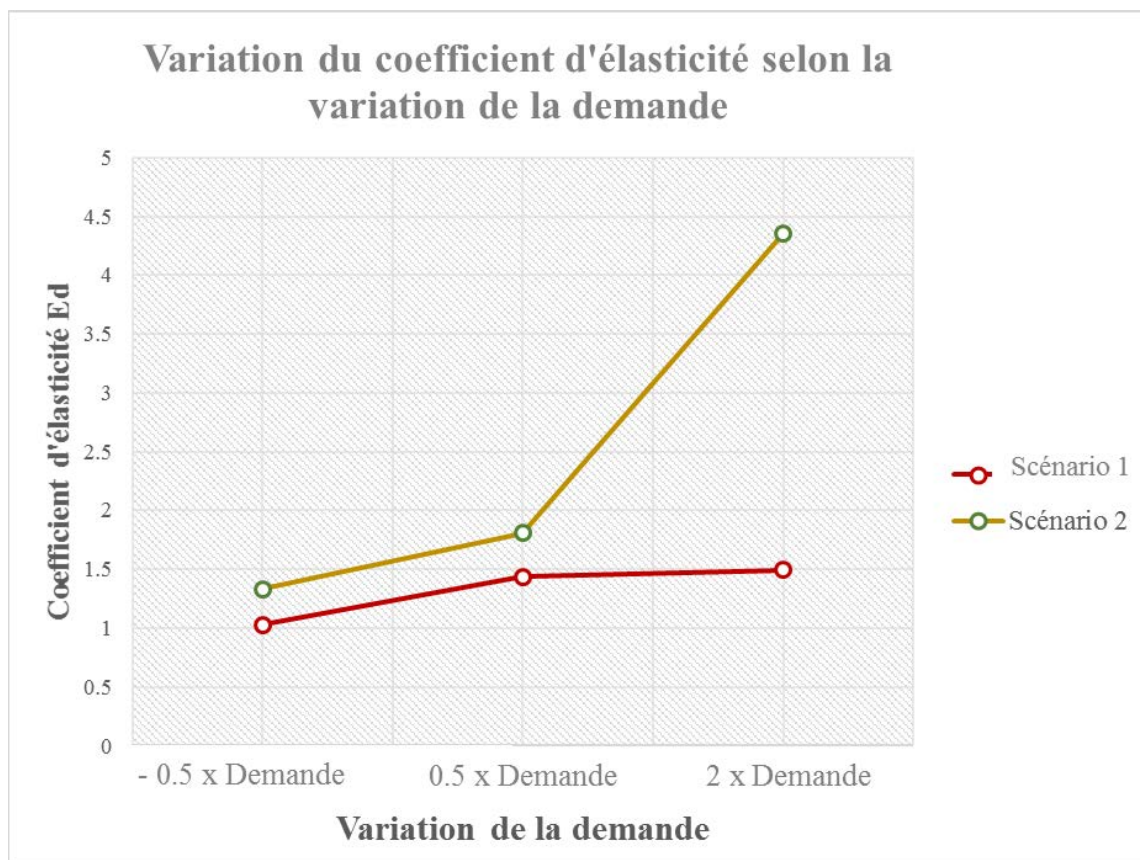


Figure 5.11 : Variation de l'indice de sensibilité selon la variation de la demande

Pour le scénario 2, étant donné que l'ensemble des coefficients d'élasticité sont supérieurs à 1, la demande latente est élastique à la variation de la demande en déplacement pour scénario 2. Ainsi, il est possible de conclure qu'une hausse de la demande en déplacement entraîne une augmentation importante de la demande latente dans ce cas de figure. Quand bien même la valeur absolue de l'ensemble des coefficients d'élasticité est supérieure à 1, la courbe de sensibilité du scénario 1 se présente de manière assez linéaire. Nous pouvons ainsi conclure que pour ce scénario la demande latente évolue de manière quasiment proportionnelle à la demande. Les explications présumées de ces phénomènes observés peuvent être retrouvées à la sous-section suivante.

## 5.5 Discussion générale et recommandations

Dans l'ensemble, le scénario 2 présente un taux d'utilisation moyen des véhicules plus élevé. Cependant, la flotte est utilisée plus uniformément dans le scénario 1. En effet, on observe que lorsque le stationnement hors zone LSI est restreint, près de 70 % du parc automobile effectue un nombre similaire de déplacements quotidiens. L'une des causes probables serait que la zone de service de l'opérateur a été déterminée de manière à couvrir plus de 80 % du lieu de résidence des clients (Wielinski et al., 2019), même si les clients ne commencent pas toujours leur voyage à proximité de leur domicile.

En outre, les disparités d'utilisation de la flotte sont d'autant plus remarquables dans les secteurs où le service LSI est le plus utilisé comme le Plateau Mont-Royal et Rosemont-La-Petite-Patrie. Les véhicules stationnés dans ces arrondissements présentent en général les taux d'utilisation les plus élevées de la flotte lorsque la politique de restriction des déplacements en zone LSI n'est pas appliquée de manière stricte. Ainsi, le taux d'utilisation plus élevé noté pour certains véhicules pourrait être causé par une diminution de la flotte disponible à l'intérieur de la zone. En effet, les déplacements qui étaient auparavant manqués en raison de la politique de réservation maximale de 30 minutes ou de la restriction de stationnement à l'intérieur de la zone de service, peuvent maintenant être effectués, surtout pour les clients situés aux extrémités de la zone. Certains véhicules seront donc stationnés à l'extérieur de celle-ci et ne seront pas déplacés au besoin à l'intérieur de la zone de service, comme visible à la figure 5.12. Si l'opérateur souhaite que ses véhicules soient utilisés à fréquence similaire, il aurait tout intérêt à limiter l'utilisation des véhicules à l'intérieur d'une zone de service spécifique. Les mêmes conclusions ont été tirées à la ville de Lisbonne, également grâce à une approche basée agents (Lopes et al., 2014).



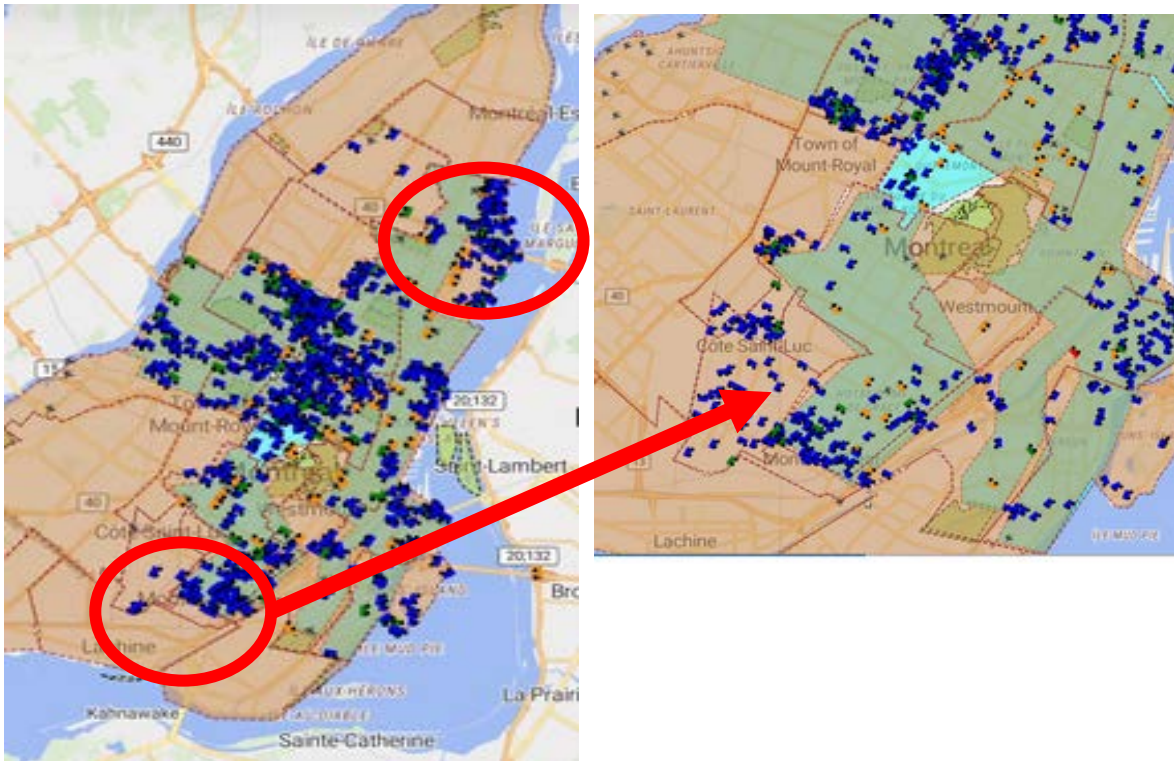


Figure 5.12 : Capture d'écran du troisième jour de simulation - Scénario 2

Un autre aspect important à considérer est la demande latente, définie comme étant le nombre de réservations de clients qui n'ont jamais été satisfaites en raison de l'indisponibilité des véhicules au moment où ils étaient requis. Celle-ci semble être sensible aussi bien aux variations de la taille de la flotte qu'aux variations du nombre de clients à satisfaire. Étant donné le lien intrinsèque qu'il y a entre la couverture de réseau offerte par l'opérateur et les réservations faites par les clients, la rareté ou l'abondance de véhicules dans certaines zones stratégiques de la zone de service aura une incidence certaine sur les performances du système. Par ailleurs, l'application stricte de la politique d'utilisation de service permet d'avoir un certain contrôle sur l'intensité de la demande non satisfaite quand la sollicitation du service augmente, dénoté par la variation quasi-linéaire du coefficient d'élasticité illustré à la figure 5.11.

Par ailleurs, une politique optimale de relocalisation des véhicules est primordiale en prévision de tout changement de l'offre ou de la demande. Généralement, certains auteurs soutiennent que l'une des façons les plus efficaces de régler le déséquilibre en termes d'intensité d'utilisation des véhicules dans les systèmes d'autopartage peut être d'impliquer directement le client dans le processus de relocalisation, par le biais d'incitatifs tarifaires par exemple (Kek et al., 2009).

Toutefois, cette stratégie semble être plus efficace avec les systèmes d'autopartage traditionnel. Lorsque l'on est en configuration de libre-service intégral, il faut tenir compte du fait que les usagers de ce volet accordent une grande importance au confort et à la commodité (Costain et al., 2012), il est donc recommandé d'attribuer cette tâche à un personnel compétent sur le long-terme (Kek et al., 2009). Le suivi de l'évolution de la demande latente hebdomadaire peut-être un bon indicateur des périodes les plus judicieuses pour effectuer la redistribution des véhicules dans la zone libre-service.

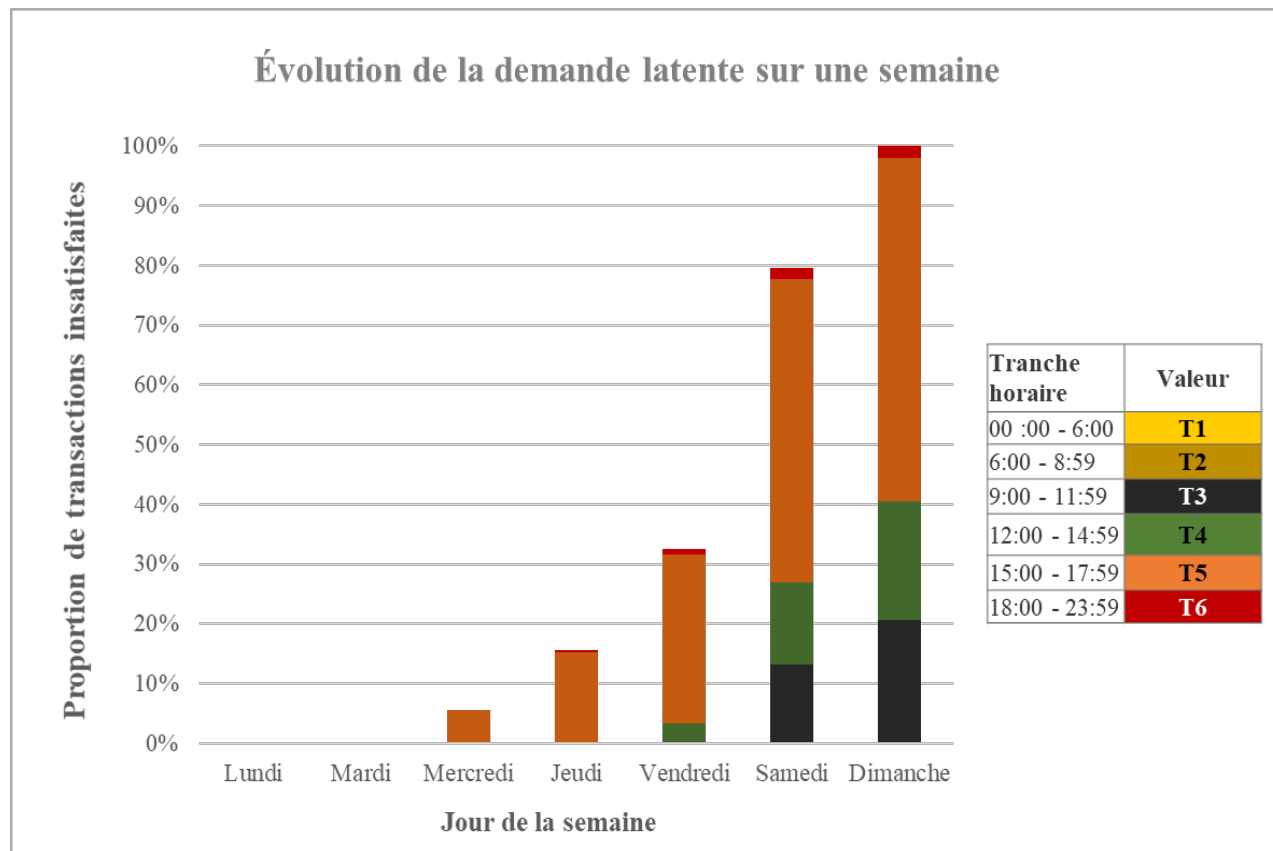


Figure 5.13 : Évolution de la demande latente - Cas du Scénario 2

En prenant pour exemple le scénario 2, où le besoin d'une politique de relocalisation est d'autant plus important dû au fait que certains véhicules se retrouvent hors de la zone de service, il est possible de suivre sur la première semaine simulée l'évolution de la demande latente dans le temps lorsqu'aucune relocalisation de véhicule n'est faite, comme illustrée à la figure 5.13. La demande latente semble augmenter avec le temps pour atteindre son maximum en fin de semaine, entre 15h et 18h correspondant à la pointe d'utilisation du soir. Cette tendance pourrait être contrecarrée en effectuant une relocalisation des véhicules avant les périodes de pointes journalièrement.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### 6.1 Contribution

S'inscrivant dans le cadre des travaux de recherche sur les réseaux d'autopartage, cet article vise à fournir une approche multi-agent pour l'étude des opérations se déroulant sur le volet libre-service intégral du plus ancien opérateur d'autopartage canadien. Comme énoncé dans la revue de littérature, une étude extensive a préalablement été effectuée pour caractériser le réseau et le comportement des utilisateurs l'empruntant à l'aide des données passives fournies par Communauto. Ce mémoire tente d'ajouter une dynamique spatio-temporelle en intégrant des flux de données transactionnelles dans un modèle de simulation multi-agent.

Plutôt que d'estimer la demande de déplacements, ce mémoire se concentre sur l'étude de la performance opérationnelle du réseau LSI. Un générateur de déplacements a donc été développé afin de simuler le plus précisément possible les sollicitations du réseau, qui étaient physiquement représentées par des agents Client. Une conclusion majeure de nos travaux est qu'en ne limitant pas les fins de trajet à une zone de service, il est possible d'augmenter les taux d'utilisation des véhicules à l'intérieur de celle-ci. Cependant, ceci pourrait également entraîner une répartition inégale de la flotte, qui, ultimement, peut avoir une incidence sur la satisfaction de la demande pendant les périodes de pointe. Pour contrer cette tendance, il serait avantageux de mettre en place une politique de relocalisation qui redistribuerait les véhicules à l'intérieur de la zone de service, dans les arrondissements spécifiques où la demande est la plus forte.

Outre sa grande puissance de visualisation, un atout majeur de notre approche est sa flexibilité au changement. En effet, le choix de mobilité d'un individu passe par un processus d'évaluation personnel du coût généralisé de chaque option de transport. La manière dont le modèle a été implémenté, en particulier la couche SIG, permet une intégration relativement aisée d'autres modes de transport tels que les véhicules personnels et les transports publics afin de mieux modéliser le choix modal et donc les situations où l'autopartage en LSI serait privilégiée



## 6.2 Limites

Bien que notre modèle aborde le problème de la performance de la flotte de véhicule sous différents aspects, l'estimation de la demande provient quand même de données transactionnelles, donc agrégées. Par conséquent, des données supplémentaires sur la composition sociodémographique des clients couplées à des informations sur leurs préférences en matière de mobilité pourraient aider à transformer le modèle d'une approche axée sur les déplacements en une approche axée sur les activités quotidiennes des agents (Ciari et al., 2008; Lopes et al., 2014). De plus, comme les tendances d'utilisation du réseau LSI suivent généralement assez fidèlement les portraits de mobilité en milieu urbain, des informations complémentaires sur les habitudes de déplacement des habitants associées aux données de recensement pourraient aider à analyser la complémentarité entre ces modes de transport et les transports en commun. Cette approche permettrait également d'intégrer naturellement la congestion dans le processus de décision du client, ce qui a été omis dans cette étude.

## 6.3 Perspectives

L'évolution de ce modèle pourrait migrer vers une intégration des places de stationnement publics géocodées, données qui n'étaient pas disponibles au moment de l'élaboration du modèle. Dans le cas de Communauto dont les véhicules ne peuvent stationner que dans un stationnement public autorisé, la prise en compte du processus de stationnement permettrait d'augmenter la précision de prédiction du comportement des agents.

De plus, la problématique de balancement de l'utilisation des véhicules sur le réseau pourrait faire l'objet d'une étude approfondie, un objectif pouvant être le développement d'un algorithme de relocalisation. Ce dernier peut être fondé sur une approche mixte où les clients pourraient bénéficier d'incitations tarifaires lorsqu'ils déplacent des véhicules à l'intérieur de la zone de service et où le personnel ne déplacerait les véhicules qu'en prévision des périodes de pointe de la demande.

Finalement, le générateur de trajet pourrait servir d'outil de calibration pour le volet en libre-service intégral d'un modèle plus complexe visant à étudier le réseau d'autopartage dans son entièreté donc en tenant compte de l'autopartage basé station.

## BIBLIOGRAPHIE

- Addinsoft. (2019a). Data analysis and Statistical Solution. Tiré de <https://www.xlstat.com/en/>
- Addinsoft. (2019b). Multicollinearity statistics. Tiré de <https://www.xlstat.com/en/solutions/features/multicollinearity-statistics>
- ArcGIS. (2019). Open Street Map. Tiré de <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=b834a68d7a484c5fb473d4ba90d35e71>
- Balac, M., Becker, H., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2019). Modeling competing free-floating carsharing operators – A case study for Zurich, Switzerland. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 98, 101-117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.11.011>
- Balachowski, L. (2017). Physical Modelling of Geotechnical Structures in Ports and Offshore. *Polish Maritime Research*, 24(s1), 4-9. doi:10.1515/pomr-2017-0014
- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2013). *Discrete-event system simulation: Pearson new international edition*: Pearson Higher Ed.
- Barnhart, C., Correia, G., & Jorge, D. (2012). Testing the validity of the MIIP approach for locating carsharing stations in one-way systems. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 138-148. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.733
- Barrios, J. A., & Godier, J. D. (2014). Fleet sizing for flexible carsharing systems: Simulation-based approach. *Transportation Research Record*, 2416(1), 1-9.
- Bellomo, N., Rizzi, G., & Cafaro, E. (1982). *On the mathematical modelling of physical systems by stochastic differential equations*. Communication présentée à 10th IMACS World Congress on System Simulation and Scientific Computation, New Brunswick, NJ, USA (p. 322-324).
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 Suppl 3(Suppl 3), 7280-7287. doi:10.1073/pnas.082080899
- Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling : Multimethod Modeling with Anylogic 6*.
- Chung, C. A. (2003). *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*: CRC Press, Inc.
- Ciari, F., Balac, M., & Balmer, M. (2015). Modelling the effect of different pricing schemes on free-floating carsharing travel demand: a test case for Zurich, Switzerland. *Transportation*, 42(3), 413-433.
- Ciari, F., Balmer, M., & Axhausen, K. W. (2008). Concepts for a large scale car-sharing system: Modelling and evaluation with an agent-based approach. *Working paper/IVT*, 517.
- Ciari, F., Bock, B., & Balmer, M. (2014). Modeling station-based and free-floating carsharing demand: Test case study for Berlin. *Transportation Research Record*, 2416, 37-47. doi:10.3141/2416-05

- Communauto. (2019). Contracts, rules and regulations. Tiré de <http://www.communauto.com/en/infos/contracts-rules.html>
- Costain, C., Ardron, C., & Habib, K. N. (2012). Synopsis of users' behaviour of a carsharing program: A case study in Toronto. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(3), 421-434. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.11.005>
- Crooks, A., & Heppenstall, A. J. (2012). Introduction to Agent-Based Modelling. Dans (p. 85-105).
- De Lorimier, A., & El-Geneidy, A. M. (2012). Understanding the Factors Affecting Vehicle and Availability in Carsharing Networks: A Case Study of Communauto Carsharing System from Montreal, Canada. *International Journal of Sustainable Transportation*, 7(1), 35-51. doi:10.1080/15568318.2012.660104
- Degirmenci, K., & Breitner, M. H. (2014). *Carsharing: A literature review and a perspective for information systems research*. Communication présentée à Multikonferenz Wirtschaftsinformatik, MKWI 2014 - Multi-Conference on Business Informatics, MKWI 2014, February 26, 2014 - February 28, 2014, Furstentallee 7, Paderborn, Germany (p. 962-979).
- Di Febraro, A., Sacco, N., & Saeednia, M. (2012). One-Way Carsharing: Solving the Relocation Problem. *Transportation Research Record*, 2319(1), 113-120. doi:10.3141/2319-13
- El Fassi, A., Awasthi, A., & Viviani, M. (2012). Evaluation of carsharing network's growth strategies through discrete event simulation. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6692-6705. doi:10.1016/j.eswa.2011.11.071
- Graham, D. J., & Glaister, S. (2004). Road Traffic Demand Elasticity Estimates: A Review. *Transport Reviews*, 24(3), 261-274. doi:10.1080/0144164032000101193
- Homem de Almeida Correia, G. (2018). *The Urban Dynamics Educational Simulator UDES tutorial for a tool to teach agent-based and Land Use and Transport LUT Interactions (model version 1.4)*.
- Jobson, J. D. (1991). Multiple Linear Regression. Dans J. D. Jobson (édit.), *Applied Multivariate Data Analysis: Regression and Experimental Design* (p. 219-398). New York, NY: Springer New York.
- Jorge, D., & Homem de Almeida Correia, G. (2013). *Carsharing systems demand estimation and defined operations: A literature review* (vol. 13).
- Kashani, H. B., & Trépanier, M. (2018). *A Typology of Carsharing Customers in Montreal Based on Large-Scale Behavioural Dataset*. CIRRELT-2018-16.
- Kek, A. G. H., Cheu, R. L., Meng, Q., & Fung, C. H. (2009). A decision support system for vehicle relocation operations in carsharing systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 149-158. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.02.008>
- Klincevicius, M. G. Y., Morency, C., & Trepanier, M. (2014). Assessing impact of carsharing on household car ownership in Montreal, Quebec, Canada. *Transportation Research Record*, 2416, 48-55. doi:10.3141/2416-06
- Kortum, K., Schönduwe, R., Stolte, B., & Bock, B. (2016). Free-Floating Carsharing: City-Specific Growth Rates and Success Factors. *Transportation Research Procedia*, 19, 328-340. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.092>

- Leclerc, B., Trepanier, M., & Morency, C. (2013). Unraveling the travel behavior of carsharing members from global positioning system traces. *Transportation Research Record*(2359), 59-67. doi:10.3141/2359-08
- Liao, F., Molin, E., Timmermans, H., & van Wee, B. (2018). Carsharing: the impact of system characteristics on its potential to replace private car trips and reduce car ownership. *Transportation*. doi:10.1007/s11116-018-9929-9
- Liping, L., & Petering, M. E. H. (2018). Discrete event simulation analysis of a reservation-based, one-way car-sharing system. *Journal of Simulation*, 12(1), 1-22. doi:10.1080/17477778.2017.1387332
- Longley, P. A. (2004). Geographical Information Systems: on modelling and representation. *Progress in Human Geography*, 28(1), 108-116. doi:10.1191/0309132504ph474pr
- Lopes, M. M., Martinez, L. M., & Correia, G. H. d. A. (2014). Simulating Carsharing Operations through Agent-based Modelling: An Application to the City of Lisbon, Portugal. *Transportation Research Procedia*, 3, 828-837. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.060>
- Martin, E., Shaheen, S. A., & Lidicker, J. (2010). Impact of Carsharing on Household Vehicle Holdings: Results from North American Shared-Use Vehicle Survey. *Transportation Research Record*, 2143(1), 150-158. doi:10.3141/2143-19
- Millard-Ball, A., Administration, U. S. F. T., Program, T. C. R., & Board, N. R. C. T. R. (2005). *Car-sharing: Where and how it Succeeds*: Transportation Research Board.
- Mokhtarian, P. L. (2009). What about People in Behavioral Modeling? Ryuichi Kitamura (1949 – 2009). *Journal of Choice Modelling*, 2(1), 1-7. doi:[https://doi.org/10.1016/S1755-5345\(13\)70001-0](https://doi.org/10.1016/S1755-5345(13)70001-0).
- Nissan Canada. (2019, October 2019). Specifications. *Nissan Leaf*. Tiré de <https://www.nissan.ca/en/electric-cars/leaf#!>
- Rao, C. R. (2002). Karl Pearson Chi-Square Test The Dawn of Statistical Inference. Dans C. Huber-CarolN. BalakrishnanM. S. Nikulin & M. Mesbah (édit.), *Goodness-of-Fit Tests and Model Validity* (p. 9-24). Boston, MA: Birkhäuser Boston.
- Schaefers, T. (2013). Exploring carsharing usage motives: A hierarchical means-end chain analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 47, 69-77. doi:10.1016/j.tra.2012.10.024
- Seign, R. (2014). *Model-Based Design of Free-Floating Carsharing Systems*. (Inst. für Verkehrswesen und Raumplanung).
- Seign, R., & Bogenberger, K. (2013). *Prescriptions for the successful diffusion of carsharing with electric vehicles*. Communication présentée à CoFAT.
- Shaheen, S., Cohen, A., & Jaffee, M. (2018). Innovative Mobility: Carsharing Outlook. Tiré de <https://escholarship.org/uc/item/1mw8n13h>
- Shaheen, S., & Martin, E. (2016). Impacts of car2go on Vehicle Ownership, Modal Shift, Vehicle Miles Traveled, and Greenhouse Gas Emissions: An Analysis of Five North American Cities. UC Berkeley.

- Shaheen, S., & Martin, E. (2016). *Impacts of car2go on Vehicle Ownership, Modal Shift, Vehicle Miles Traveled, and Greenhouse Gas Emissions: An Analysis of Five North American Cities*. UC Berkeley.
- The Anylogic Company. (2019a). Custom Distribution. Tiré de [https://help.anylogic.com/index.jsp?topic=%2Fcom.anylogic.help%2Fhtml%2Fstochastic%2FCustom\\_Distribution.html](https://help.anylogic.com/index.jsp?topic=%2Fcom.anylogic.help%2Fhtml%2Fstochastic%2FCustom_Distribution.html)
- The Anylogic Company. (2019b). *Multimethod simulation modeling for business applications*. Tiré de <https://www.anylogic.com/resources/white-papers/multimethod-simulation-modeling-for-business-applications/>
- The Anylogic Company. (2019c). Transportation Simulation Software. Tiré de <https://www.anylogic.com/transportation/>
- Toyota Canada. (2019, October 2019). Prius C Specifications. *Prius C*. Tiré de <https://www.toyota.ca/toyota/en/vehicles/prius-c/models-specifications>
- Transports Québec. (2019). Politique de mobilité durable - 2030. Tiré de [https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role\\_ministere/Pages/politique-mobilite-durable.aspx](https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/Pages/politique-mobilite-durable.aspx)
- Velten, K. (2009). Mathematical Modeling and Simulation: Introduction for Scientists and Engineers. *Mathematical Modeling and Simulation: Introduction for Scientists and Engineers*, 1-348. doi:10.1002/9783527627608
- Viegas, J. (2010). Activities, Transportation Networks and Land Prices as Key Factors of Location Choices: An Agent-Based Model for Lisbon Metropolitan Area (LMA).
- Ville de Montréal. (2019a, 2019-09-24 15:28). Limite administrative de l'agglomération de Montréal (Arrondissement et Ville liée). Tiré de <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/polygones-arrondissements>
- Ville de Montréal. (2019b, 2019-09-24 15:28). Schéma d'aménagement et de développement - Affectation du sol et densité d'occupation Tiré de <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/schema-affectation-densite>
- Wenxiang, L., Ye, L., Jing, F., & Haopeng, D. (2017). Siting of Carsharing Stations Based on Spatial Multi-Criteria Evaluation: A Case Study of Shanghai EVCARD. *Sustainability*, 9(1), 152 (116 pp.). doi:10.3390/su9010152
- Wielinski, G., Trepanier, M., & Morency, C. (2015). What about free-floating carsharing?: A look at the Montreal, Canada, case. *Transportation Research Record*, 2536, 28-36. doi:10.3141/2536-04
- Wielinski, G., Trepanier, M., & Morency, C. (2017). Electric and hybrid car use in a free-floating carsharing system. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(3), 161-169. doi:10.1080/15568318.2016.1220653
- Wielinski, G., Trepanier, M., & Morency, C. (2019). Exploring Service Usage and Activity Space Evolution in a Free-Floating Carsharing Service. *Transportation Research Record*. doi:10.1177/0361198118825465

## ANNEXE A CONTRIBUTIONS À LA RECHERCHE SUR COMMUNAUTO

Tableau A.1: Récapitulatif des travaux collaboratifs entre Communauto et Polytechnique de Montréal

Auteur(s) : Oeuvre	Configuration spatiale du service	Caractérisation des usagers	Comportement des usagers	Adoption du service	Impacts de l'utilisation du réseau	Focus sur le libre-service intégral	Étude de la dynamique Spatiale
C Morency, M Trépanier, B Agard, B Martin, J Quashie(2007) : Car sharing system: what transaction datasets reveal on users' behaviors		X	X				
Morency, Trépanier and Agard (2011): Typology of carsharing members		X	X				
C Morency, KMN Habib , V Grasset, Md T Islam ( 2012): Understanding members' carsharing (activity) persistency by using econometric model			X	X			
L Sioui, C Morency, M Trépanier (2013): How carsharing affects the travel behavior of households : A case study of Montréal, Canada		X	X				
B Leclerc, M Trépanier, C Morency (2013), Unraveling the travel behavior of carsharing members from global positioning system traces	X		X				
M, Trépanier, C Morency , P Nouri , A Braham (2013): Impacts of carsharing on urban mobility : environmental and behavioural evidences					X		
MGY Klincevicus, C Morency, M Trépanier (2014): Assessing impact of carsharing on household car ownership in Montreal, Quebec, Canada			X				
G Wielinski, M Trépanier, C Morency (2015): What about free-floating carsharing? A look at the Montreal, Canada, case	X	X	X			X	
G Wielinski, M Trépanier, C Morency (2016): Differences Between Electric and Hybrid Car Use in a Free Floating Carsharing System			X				
G Wielinski, M Trépanier, C Morency (2017): Carsharing Versus Bikeshaing: Comparing Mobility Behaviors		X	X				
G Wielinski, M Trépanier, C Morency (2018): Carsharing Service Adoption in a Dual-Mode Setting: A Station-Based and Free-Floating Case Study			X	X			
G Wielinski, M Trépanier, C Morency (2018): Comparing multiple data streams to assess free-floating carsharing use						X	
HB Kashani, M Trépanier (2018): A Typology of Carsharing Customers in Montreal Based on Large-Scale Behavioural Dataset		X					
G Wielinski, M Trépanier, C Morency (2019): Exploring Service Usage and Activity Space Evolution in a Free-Floating Carsharing Service	X		X			X	
<b>NA Niang, M Trépanier, JM Frayret (2019): A MULTI-AGENT SIMULATION APPROACH TO MODELLING A FREE-FLOATING CARSHARING NETWORK</b>	<b>X</b>		<b>X</b>			<b>X</b>	<b>X</b>

## ANNEXE B BASE DE DONNÉES TRANSACTIONNELLES

Tableau B.1 : Aperçu de la base de données transactionnelles

ReservationID	TripDate	EventType	EventDate	Vin	CustomerID	StartLatitude	StartLongitude	EndLatitude	EndLongitude	Duration	BookDuration	Distance	StartSOC	EndSOC
17045046	2017-09-01 9:45	CHECK_IN	2017-09-01 9:58	JTDKDTB36C1	66578	45.5595802	-73.589888	NA	NA	0	0	0	30	0
17045046	2017-09-01 9:45	CHECK_OUT	2017-09-01 14:26	JTDKDTB36C1	66578	45.5595802	-73.589888	45.5623545	-73.5904765	281.176617	12.8132833	47	30	92
17053367	2017-09-02 8:19	CHECK_IN	2017-09-02 8:24	JTDKDTB36C1	98498	45.5623545	-73.59047633	NA	NA	0	0	0	92	0
17053367	2017-09-02 8:19	CHECK_OUT	2017-09-02 8:37	JTDKDTB36C1	98498	45.5623545	-73.59047633	45.5647458	-73.5924445	18.5778833	4.46666667	2	92	92

## ANNEXE C INSTRUCTIONS PRINCIPALES DU MODÈLE

### Fonction checkNetwork – Agent Type Planification Center:

```
//System.out.println("Checking process started for client "+ customer.id);

// Recueil de la disponibilité des véhicules et stockage dans un liste
class ValurComparator implements Comparator<Integer> {
    Map<Integer, Double> base;
    public ValurComparator(Map<Integer, Double> base) {
        this.base = base;
    }

    public int compare(Integer a, Integer b) {
        if (base.get(a) >= base.get(b)) {
            return 1;
        } else {
            return -1;
        }
    }
}

// Classement de ces véhicules du plus proche au moins proche du client
Map<Integer, Double> stlist = new HashMap<Integer, Double>();

ValurComparator bvc = new ValurComparator(stlist);
TreeMap<Integer, Double> sorted_map = new TreeMap<>(bvc);

    for ( Vehicle v :freeVehicle){
        stlist.put(v.idVeh, v.distanceTo(customer,METER));
    }

sorted_map.putAll(stlist);
int i ;

i=1;
// Distance maximale tolérée (équivalente à 30 min de marche en ville) pouvant être
parcourue par le client pour atteindre le véhicule
double distanceToVehicle;
distanceToVehicle = uniform(2000,3000);

// Boucle de recherche du véhicule libre le plus proche
outerloop:
    for (Map.Entry<Integer, Double> entry : sorted_map.entrySet()) {
        i++;
        Integer key = entry.getKey();
        Double value = entry.getValue();

        for ( Vehicle v :freeVehicle){
            if (v.idVeh == key && value < distanceToVehicle ){
                // Si v.hicule est hybride, renvoie le véhicule au client
                if ( v.hybrid == true ){
                    send(v,customer);
                    send(customer,v);
                }
            }
        }
    }
}
```



```

        customer.noCarForClient = false;
        //System.out.println( " car matched => " + v.idVeh);
        break outerloop;
    } else {
        // Si véhicule est électrique, vérification du
niveau de charge
        if (v.batteryLevelEV -
v.distanceTo(customer.destination, KILOMETER)> 15) {
            send(v, customer);
            send(customer, v);
            customer.noCarForClient = false;
            //System.out.println( " car matched => "
+ v.idVeh);
            break outerloop;
        }
    }
}
//System.out.println(key + " => " + value);
}
//System.out.println("*****");
//System.out.println("Checking process finished for client "+customer.id);

```

### Fonction sendChargingRequest – Agent Type Planification Center:

```

if (EVRequests.contains(car)== false){
    EVRequests.add(car);
    //traceln("requête enregistrée pour véhicule "+, car.idVeh);
}

```

### Fonction checkChargingArea – Agent Type Planification Center:

```

if ( chargingPoints.isEmpty() == true) {
    staff.noCP=true;
    //traceln(staff.id+" receive message , there are no charging points" );
} else {

```

```

    staff.requestV = staff.getNearestAgent(filter(EVRequests, v ->
v.inState(Vehicle.Idle)));

```

```

    if( staff.requestV != null ) {
        staff.noCP= false;
        //staff.requestV=cr;
        staff.noAvailableEV = false;
        send("TO CHARGE", staff.requestV);

        // trouver le point de recharge le plus proche
        double distance= 100000;
        double distanceToCpoint;
    }
}

```

```

        for( GISPoint p : chargingPoints ) {
            distanceToCpoint=
staff.requestV.distanceTo(p.getLatitude(),p.getLongitude());
            if( distanceToCpoint < distance) {
                distance = distanceToCpoint;
                CP=p;
            }
        }
        //traceln("staff " +staff.id+" : point le plus proche pour "
+staff.requestV+ " est point de chargement "+CP);
        staff.chargingPoint = CP;
        chargingPoints.remove(CP);
    }
    else {
        staff.noAvailableEV = true;
        //traceln("staff " +staff.id+" : Aucun véhicule a charger");
    }
}
}
}

```

### Fonction freeChargingPoint – Agent Type Planification Center:

```

chargingPoints.add(car.chargingPoint);
    for(Staff n : staffs){
        if(n.inState(Staff.watingforAvailableCP)){
            n.noCP = false;
        }
    }
}

```

### Fonction randomGenerator –Fonction principale du générateur de trajet :

```

//On choisit la région dépendamment de l'heure de la journée et du jour de la semaine

//Sélection par rapport au jour
Random randomValue = new Random();
int randomInt1;
int randomInt2;

do{
    randomInt1 = randomValue.nextInt(100);
    randomInt2 = randomValue.nextInt(100);
}while(randomInt1==0 ||randomInt2==0 );

double r1 = (randomInt1)/100.0;
double cell0 = 0;
double cellD = 0;
double cell0first;

int cellColumn = 0;

```

```

int cellRowfirst=0;
int cellRow = 0;
boolean isUnhabited = false;
String sheetname = "Origin";

int LastRow = WeekendMatrices.getLastRowNum(sheetname);
int LastCol = WeekendMatrices.getLastCellNum(sheetname,1);
int timestamp= 0;
int position = 0;

//Sélection par rapport à l'heure
for(int i=0; i < LastCol ; i++){
    position = i+2 ;
    double time = WeekendMatrices.getCellNumericValue(sheetname, 1,
position);
    timestamp = (int)time;
    if( timeofday == timestamp )
        break;
};

cell0first = WeekendMatrices.getCellNumericValue (sheetname, 2, position);
cellRowfirst= 2;
label :
for(int i=0; i < LastRow ; i++){
    cell0 = WeekendMatrices.getCellNumericValue (sheetname, i+2, position);
    cellRow = i+2;
    if ( cell0first != cell0){
        cell0first = cell0;
        cellRowfirst= cellRow;
    };
    if ( cell0 > r1 ){
        break label ;
    };
};
//Assignation d'un point de départ à l'agent dans la région appropriée

customer.origin =
returnRegionWE(cellRowfirst,sheetname,1,customer).randomPointInside();

//Sélection d'un point d'arrivée dans la zone LSI
sheetname = String.valueOf(timestamp);

// Vérification que ce point se situe dans la Zone LSI et hors des zones
inhabitées
//int randomInt2 = randomValue.nextInt(100) ;
double r2 = (randomInt2)/100.0 ;
double cellDfirst = WeekendMatrices.getCellNumericValue (sheetname, 2,
position);
int cellColumnFirst= 2;
label0:
for(int i =0; i < WeekendMatrices.getLastCellNum(sheetname,1); i++){
    cellD = WeekendMatrices.getCellNumericValue(sheetname, cellRowfirst,
i+2);

```

```

        cellColumn = i+2;
        if(cellDfirst != cellD) {
            cellDfirst = cellD;
            cellColumnFirst= cellColumn;
        };
        if ( cellD >r2 ) {
            break label0;
        };
    };

    for( GISRegion reg : regions) {
        if(reg.getName().equals("ZoneLSI")){
            limite = reg;
            break;
        };
    };

    do {
        firstDestination =
returnRegionWE(cellRowfirst, sheetname, cellColumnFirst, customer).randomPointInside();
        isUnhabited = false;
        for( GISRegion zones : parks) {
            if(zones.contains(firstDestination.getLatitude(),
firstDestination.getLongitude())== true){
                isUnhabited = true;
                break ;
            };
        };
    } while (isUnhabited == true);
    // Différence majeure entre scénario 1 et scénario 2 : Vérification que la
    destination choisie se trouve dans la zone LSI
    if(inLSIZone == 1){
        if(limite.contains(firstDestination.getLatitude(),
firstDestination.getLongitude())){
            customer.isReservationAccepted = 1;
        }
        else{
            customer.isReservationAccepted = 0;
        }
    };
    customer.destination = firstDestination;

```

### Fonction returnRegion –Fonction annexe du générateur de trajet :

```

String name;
if (desregion == "Origin"){
    name = WeekdayMatrices.getCellStringValue(desregion, row, 1);
    customer.regionOrigin=name;
}else{
    name = WeekdayMatrices.getCellStringValue(desregion, 1, column);
    customer.regionDestination=name;
};

```

```
for( GISRegion gr : regions)
    if(gr.getName().equals(name) )
        return gr;
return null;
```