UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

# OPTIMISATION DE LA LOCALISATION ET LA CONFIGURATION D'INFRASTRUCTURES DE RECHARGE POUR UNE FLOTTE DE TAXIS ÉLECTRIQUES

ELI MORESO

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

AOÛT 2017

© Eli Moreso, 2017.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

OPTIMISATION DE LA LOCALISATION ET LA CONFIGURATION D'INFRASTRUCTURES DE RECHARGE POUR UNE FLOTTE DE TAXIS ÉLECTRIQUES

présenté par : MORESO Eli

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

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

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph. D., président

M. TRÉPANIER Martin, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. LANGEVIN André, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

Mme MORENCY Catherine, Ph. D., membre

# REMERCIEMENTS

Je tiens, en premier lieu, à exprimer mes sincères remerciements à mes Directeur et co-Directeur de recherche, M. Martin Trépanier et M. André Langevin, pour la confiance qu'ils ont su m'accorder au lancement de ce projet, ainsi que pour le soutien et les idées qu'ils m'ont apporté aux cours de nos travaux.

J'adresse également mes remerciements à Mme Catherine Morency, avec qui nous avons collaboré sur le projet et qui a accepté de juger mon travail.

Je souhaite aussi remercier M. Jean-Marc Frayret, qui a accepté d'examiner et juger mon travail et de présider le jury d'examen.

Mes remerciements vont, également, à l'équipe de Téo Taxi pour leur collaboration, les échanges qui ont jalonné ce projet, ainsi que pour leur disponibilité.

Par ailleurs, je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les autres personnes qui m'ont apporté leur soutien, leur aide ou leur motivation au cours de ce projet.

Finalement, je souhaite adresser un remerciement particulier à ma famille et à Léna, pour leur soutien moral malgré la distance.

# RÉSUMÉ

Les enjeux actuels autour de l'écologie et du développement de nouveaux modes de transport moins polluants nous amènent à aborder de nouvelles problématiques. Celles traitées dans ce mémoire ont été initiées par le lancement du projet pilote de l'entreprise Taxelco : Téo Taxi, qui a introduit une flotte de taxis électriques à Montréal en novembre 2015. La mise en place et le fonctionnement d'une telle flotte conduit à diverses interrogations, dont notamment celle de la localisation des infrastructures de recharge.

Nous proposons de traiter cette problématique en trois étapes : la localisation des infrastructures de recharge, l'attribution des courses aux véhicules et la configuration des stations. Ces trois problèmes sont formulés en programmes linéaires, dont les objectifs sont de minimiser les distances d'accès aux sites de recharge, pour les modèles de localisation et de configuration et de minimiser le nombre de véhicules en service, pour le modèle d'attribution des courses. Les modèles de localisation et de configuration prennent en compte en entrée un ensemble de données de courses représenté par une matrice de déplacements interzones. L'objectif de ces modèles est de localiser les sites de recharge à proximité des zones les plus visitées (zones accueillant le plus d'extrémités de courses). Chacune des zones est alors associée à un et un seul site de recharge. La configuration vise à répartir un nombre de bornes donné sur les différents sites localisés, en tenant compte alors du nombre de déplacements associés à chaque site. Le modèle d'attribution des courses consiste en un modèle de flux dans un réseau, pour lequel on souhaite satisfaire la totalité des courses en entrée avec un minimum de véhicules, nous prenons également en compte le problème de la recharge des taxis et la localisation des stations déterminée préalablement. Les modèles mathématiques mentionnés sont développés sous AIMMS ou AMPL et résolus par le solveur CPLEX.

Les différentes expériences présentées dans ce mémoire sont appliquées au projet Téo Taxi et traitent donc de cas spécifiques rencontrés sur le développement de cette flotte de taxis électriques. Nous prenons en compte l'état actuel de leur réseau de recharge, ainsi que des diverses améliorations et modifications envisagées. Ces expériences sont possibles et pertinentes grâce à l'ensemble des données fournies par Téo Taxi. Nous élaborons donc une série d'expériences, compte tenu de l'état du réseau de recharge de Téo Taxi en mars 2017 : trois sites répartis sur l'île de Montréal et un quatrième site envisagé. Ces expériences ont pour but de localiser optimalement

trois sites de recharge puis quatre sites sur le territoire d'étude et enfin de considérer les trois sites de recharge de Téo Taxi afin de localiser optimalement uniquement un quatrième site. Nous utilisons alors le modèle d'attribution comme outil de simulation pour évaluer les différentes localisations et déterminer la sollicitation des différentes stations, sur le cas d'une journée de service. Enfin, pour l'étape de configuration des stations, nous répartissons, tout d'abord, 50 bornes entre les stations de recharge pour tous les cas de localisation, puis nous nous appuyons sur les résultats précédents concernant la sollicitation des stations pour établir des comparaisons. Une seconde série d'expériences est ensuite réalisée selon la même approche, en tenant compte des évolutions du réseau de recharge de Téo Taxi en avril 2017 : quatre sites Téo et deux sites supplémentaires envisagés.

Les résultats mis en évidence par la résolution du modèle de localisation révèlent les gains potentiels des localisations optimisées des stations. En effet, sur la première série d'expériences, les gains sur le temps total d'accès aux stations de recharge sont évalués entre 20 et 30%, pour les localisations optimisées par rapport aux localisations de Téo Taxi. L'importance d'une répartition optimale de bornes de recharge aux stations est, quant à elle, prouvée par le modèle de configuration. Les résultats présentés démontrent que toutes les stations ne sont pas sollicitées de la même manière et que certaines se doivent de proposer plus de bornes de recharge, car elles sont susceptibles d'accueillir plus de véhicules. Les simulations réalisées sur le seul exemple du 10 octobre 2016 ne permettent pas de conforter ces résultats car l'échantillon est trop restreint. Cependant, le modèle d'attribution, en tant qu'outil de simulation, devrait permettre une validation de ces résultats avec un plan d'expérience plus étendu.

# ABSTRACT

The current challenges concerning ecology and the development of less polluting transportation, lead us to address new issues. With this master thesis in collaboration with Taxelco, we discuss some of them. Indeed, Taxelco launched, in November 2015, an electric taxis fleet in Montreal, named Teo Taxi. This project brings new questions, nonetheless our work focuses mainly on charging station location.

We address this problem in a three-step approach: charging facilities location, trip allocation to vehicles and stations configuration. These three problems are formulated using linear programming. With the location and configuration models, we seek to minimize the access distance to charging stations, while with the allocation model, we seek to minimize the number of taxis working. The location and configuration models use as input the trip data, represented by a from-to matrix, to locate the charging facilities close to the most visited areas. Then each area is linked with only one charging station. Looking at the trips matrix, the configuration model is used to allocate chargers to stations. The allocation model is formulated as a flow network and aims at satisfying the entire demand with a minimum of taxis. This model includes the locations determined by the charging problem. These three models are developed under AIMMS or AMPL and solved by the solver CPLEX.

We use the Teo Taxi case and the specificities of this electric taxis fleet to make different experiments. With those experiments we considered Teo Taxi strategic decisions and development. Thanks to the data provided by Teo Taxi, we present relevant tests. So, we planned experiments based on the existing charging network in March 2017: three Teo stations and a fourth potential one. With those experiments we looked at optimal locations: three optimal stations, four optimal stations and a fourth optimal station with the three current ones. Then with the allocation model, used as a simulation tool, we evaluated the different locations and showed the demand at each station. Finally, we allocated 50 chargers to the stations, with the configuration model, and used the previous results on stations use for comparisons. Then, we repeated the same approach on the charging network updated in April 2017: four Teo stations and two other potential stations.

The results provided by the location model show potential gains with the optimized stations locations. Indeed, on the first experiment, we show gains on total access time of around 20 and 30%, with an optimal location against Teo’s one. The configuration model results show how the

optimal distribution of chargers at stations is significant. In fact, the charging demand is different at each station, so some has to provide more chargers than others. Finally, we use the case of one day (10 October 2016) to simulate different locations, but with this single day we were not able to confirm previous results, because of the restricted sample. However, we can use the allocation model as a simulation tool to validate those results with more elaborate tests.

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... III

RÉSUMÉ ..... IV

ABSTRACT ..... VI

TABLE DES MATIÈRES ..... VIII

LISTE DES TABLEAUX ..... X

LISTE DES FIGURES ..... XII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS ..... XIV

LISTE DES ANNEXES ..... XV

CHAPITRE 1 INTRODUCTION ..... 1

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE ..... 5

2.1 Introduction ..... 5

2.2 Localisation d'infrastructures ..... 5

2.2.1 Localisation générale d'infrastructures ..... 5

2.2.2 Localisation d'usines ..... 9

2.2.3 Localisation de centres de distribution ..... 10

2.2.4 Localisation d'infrastructures médicales ..... 14

2.2.5 Conclusion ..... 16

2.3 Localisation de sites de recharge pour véhicules électriques ..... 16

2.4 Localisation de sites de recharge pour flottes de taxis électriques ..... 22

2.5 Routage de véhicules électriques avec recharge ..... 25

2.6 Conclusion ..... 29

CHAPITRE 3 DÉMARCHE ET MODÈLES ..... 30

3.1 Introduction ..... 30

3.2 Démarche .....30
3.3 Détail des données utilisées.....34
3.3.1 Territoire d'étude.....34
3.3.2 Matrices de temps et distances de parcours interzones .....35
3.3.3 Enregistrements des courses.....37
3.3.4 Véhicules et caractéristiques .....40
3.4 Modèles mathématiques.....41
3.4.1 Modèle 1 : Localisation de sites de recharge .....41
3.4.2 Modèle 1Bis : Localisation et configuration de sites de recharge.....43
3.4.3 Modèle 2 : Attribution de courses a priori et simulation.....45
CHAPITRE 4 RÉSOLUTION ET RÉSULTATS ..... 50
4.1 Résolution Modèle 1 .....50
4.1.1 Réseau de recharge optimal.....50
4.1.2 Localisation de trois sites .....52
4.1.3 Localisation de quatre sites .....56
4.2 Résultats Modèle 2 .....62
4.3 Résultats Modèle 1Bis.....65
4.4 Résultats supplémentaires .....68
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS ..... 76
5.1 Synthèse des travaux .....76
5.2 Contributions.....77
5.3 Limites.....78
5.4 Perspectives.....80
BIBLIOGRAPHIE ..... 82

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation généraux .....8

Tableau 2.2 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation d'usines .....12

Tableau 2.3 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation de centres de distribution .....13

Tableau 2.4 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation d'infrastructures médicales .....15

Tableau 2.5 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation de stations de recharge pour véhicules personnels (1) .....20

Tableau 2.6 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation de stations de recharge pour véhicules personnels (2) .....21

Tableau 2.7 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation de stations de recharge pour taxis électriques .....24

Tableau 2.8 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de routage de véhicules électriques (1) .....27

Tableau 2.9 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de routage de véhicules électriques (2) .....28

Tableau 3.1 : Extrait de matrice de temps de parcours (en secondes) dans le cas de l'écoulement libre .....36

Tableau 3.2 : Extrait de matrice de temps de parcours (en secondes) dans le cas de la pointe du matin .....36

Tableau 3.3 : Extrait de matrice de distance de parcours (en mètres) dans le cas de la pointe du matin .....37

Tableau 3.4 : Extrait de matrice de course (semaine 1 année 2017) .....38

Tableau 3.5 : Extrait du tableau des déplacements par zone (semaine 1 année 2017) .....38

Tableau 3.6 : Extrait de tableau de courses (semaine 1 année 2017).....39

Tableau 3.7 : Véhicules de la flotte Téo Taxi et caractéristiques .....40

Tableau 3.8 : Tableau de définition des arcs.....46

Tableau 4.1 : Détails de l'expérience du 10 octobre 2016.....63

Tableau 4.2 : Valeurs de l'objectif sur les cas du 10 octobre 2016.....64

Tableau 4.3 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h pour 50 bornes (modèle 1Bis) .....65

Tableau 4.4 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h (modèle 2).....66

Tableau 4.5 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h (modèle 1Bis) .....66

Tableau 4.6 : Résultats du cas 18 novembre 2016 entre 0h et 6h pour 50 bornes (modèle 1Bis) .66

Tableau 4.7 : Résultats sur toute la période d'étude pour 50 bornes (modèle 1Bis).....67

Tableau 4.8 : Comparaison des proportions de bornes aux sites (modèle 1Bis).....67

Tableau 4.9 : Valeurs de l'objectif sur les cas du 10 octobre 2016.....73

Tableau 4.10 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h (modèle 2).....73

Tableau 4.11 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h (modèle 1Bis) .....74

Tableau 4.12 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h pour 50 bornes (modèle 1Bis) ...74

Tableau 4.13 : Résultats sur toute la période d'étude pour 50 bornes (modèle 1Bis).....74

Tableau 4.14 : Comparaison des proportions de bornes aux sites (modèle 1Bis).....75

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Véhicules de la flotte de Téo Taxi (Eco-Energie à Montréal, 2015) ..... 2

Figure 1.2 : Aperçus de l'interface de l'application Téo Taxi (Téo Taxi, 2017a) ..... 2

Figure 2.1 : Schéma du système de distribution étudié par Erlebacher et Meller (2000) ..... 10

Figure 3.1 : Démarche mise en œuvre pour le projet ..... 32

Figure 3.2 : Processus de développement des modèles mathématiques ..... 33

Figure 4.1 : Territoire d'étude ..... 34

Figure 4.2 : Limites du territoire de desserte de Téo Taxi et évolutions ..... 35

Figure 3.3 : Carte de répartition du nombre de déplacements selon les SR (semaine 1 année 2017) ..... 39

Figure 3.3 : Illustration d'un cas simple (avant résolution) ..... 49

Figure 3.4 : Illustration d'un cas simple (après résolution) ..... 49

Figure 4.1 : Évolution du temps total d'accès avec le nombre de sites localisés ..... 50

Figure 4.2 : Gains de localisation d'un site supplémentaire selon le nombre de sites localisés ..... 51

Figure 4.3 : Localisation des trois sites de recharge Téo Taxi ..... 52

Figure 4.4 : Localisation optimale de trois sites de recharge en condition d'écoulement libre ..... 53

Figure 4.5 : Localisation optimale de trois sites de recharge en condition de pointe du matin ..... 54

Figure 4.6 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations et les conditions de circulation ..... 55

Figure 4.7 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en écoulement libre, semaine par semaine ..... 55

Figure 4.8 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en pointe du matin, semaine par semaine ..... 56

Figure 4.9 : Localisation des quatre sites de recharge Téo Taxi ..... 57

Figure 4.10 : Localisation optimale de quatre sites de recharge (période complète) ..... 58

Figure 4.11 : Localisation optimale de quatre sites de recharge (fréquemment rencontrée) .....59

Figure 4.12 : Localisation d'un quatrième site optimal dans les conditions de pointe du matin ...60

Figure 4.13 : Localisation d'un quatrième site optimal dans les conditions d'écoulement libre ...60

Figure 4.14 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations et les conditions de circulation .....61

Figure 4.15 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en pointe du matin, semaine par semaine .....62

Figure 4.16 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en écoulement libre, semaine par semaine.....62

Figure 4.17 : Paramètres CPLEX pour la résolution du cas du 10 octobre 2016.....64

Figure 4.18 : Localisation des six sites de recharge Téo Taxi .....68

Figure 4.19 : Localisation optimale de six sites de recharge .....69

Figure 4.20 : Localisation des cinquième et sixième sites optimaux .....70

Figure 4.21 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations et les conditions de circulation .....71

Figure 4.22 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en pointe du matin, semaine par semaine .....72

Figure 4.23 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en écoulement libre, semaine par semaine.....72

# LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

| | |
|---|---|
| CD | Centre de distribution |
| EL | Écoulement libre |
| PAM | Pointe du matin (Pointe AM) |
| SR | Secteur de recensement |
| VE | Véhicule électrique |
| VMCI | Véhicule à moteur à combustion interne |

# LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – PROGRAMME AMPL MODÈLE 1 ..... 87

ANNEXE B – PROGRAMME AMPL MODÈLE 1BIS ..... 88

ANNEXE C - PROGRAMME AMPL MODÈLE 2 ..... 90

# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les enjeux autour du développement des moyens de transport « verts » demeurent dans les discussions depuis maintenant plusieurs années. Ils accompagnent les interrogations et les intérêts concernant, notamment, la réduction des émissions de polluants, l'amélioration des conditions de vie et de santé de la population mondiale, ainsi que la préservation de notre planète. Ces enjeux sont discutés par les États ainsi qu'au sein de différents gouvernements. Les villes les abordent également dans leurs plans de développement. Ces préoccupations reviennent d'ailleurs dans le plan de transport de la ville de Montréal publié en 2008 (Ville de Montréal, 2008). Le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) ouvre la voie en novembre 2015 pour deux projets pilotes liés à l'industrie du taxi (Commission des transports Québec, 2015). Ces deux volets touchent au développement du taxi électrique ainsi qu'aux services de demande de taxis par application mobile.

C'est dans ce cadre-là qu'a été lancé le projet Téo Taxi, par l'entreprise Taxelco et son fondateur Alexandre Taillefer. Ce dispositif propose un modèle d'affaires tout à fait inédit dans le secteur du transport par taxi. En effet, l'entreprise Taxelco est autorisée légalement à louer jusqu'à un certain nombre de permis de taxis (110 réguliers et 22 spéciaux), qu'elle met ensuite à disposition de ses conducteurs qui ont le statut de chauffeurs salariés. De plus, l'entreprise possède une flotte de taxis composée de plusieurs modèles de véhicules : Nissan Leaf, Kia Soul, Tesla (Figure 1.1). Taxelco propose donc un service de taxis électriques disponible via une application mobile seulement, au lancement du projet (Figure 1.2), puis par la suite (à partir de décembre 2016) il est également possible de héler les véhicules afin de débuter une course. Un système de signalisation visuelle a d'ailleurs été mis en place sur toute leur flotte de véhicules pour avertir les potentiels clients de la disponibilité (ou non) des taxis en circulation.

1 - Kia Soul 2 - Nissan Leaf 3 - Tesla

Figure 1.1 : Véhicules de la flotte de Téo Taxi (Eco-Energie à Montréal, 2015)

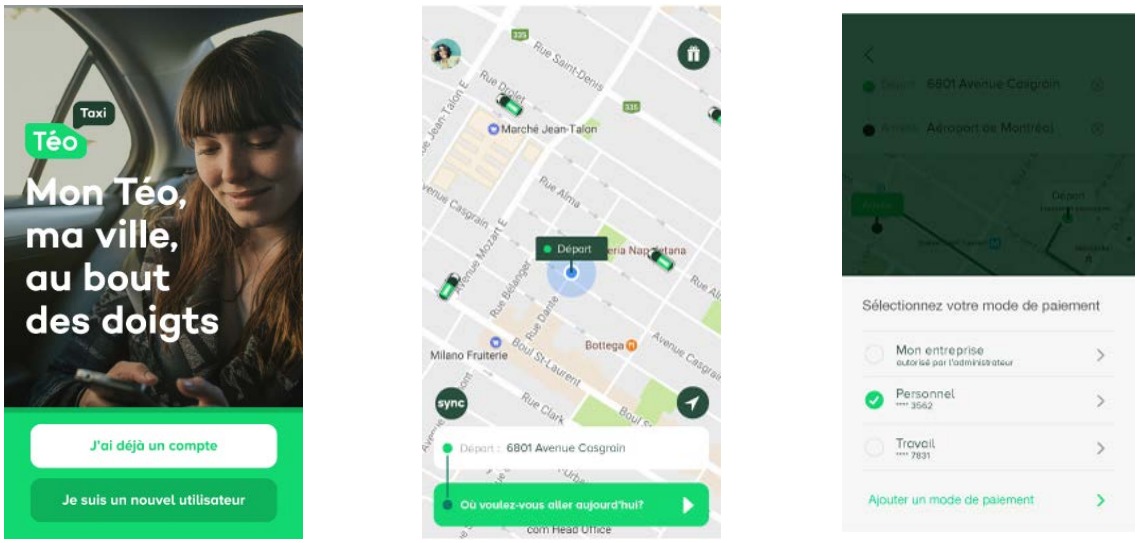


Figure 1.2 : Aperçus de l'interface de l'application Téo Taxi (Téo Taxi, 2017a)

Entreprendre un tel projet de développement d'une flotte de véhicules électriques (VEs) mène à devoir étudier de multiples aspects. Pelletier, Jabali et Laporte (2016) proposent, à travers leurs travaux, une revue scientifique de ces différents points appliqués aux VEs pour la distribution de biens. Il est assez simple d'admettre que ces problématiques seront similaires ou analogues au cas des flottes de taxis électriques. Leur étude est donc structurée en trois parties, dans la première ils abordent les questions technologiques en évoquant les différents types de VEs (véhicules à batteries électriques, véhicules hybrides et véhicules à pile à combustible) et également les différents types de batteries en évaluant les caractéristiques principales de ces technologies. Dans la deuxième partie, ils traitent du marché des véhicules électriques et plus particulièrement de la pénétration de cette catégorie d'automobiles sur le marché. Ils abordent donc les questions de compétitivité, de

parts de marché, ainsi que des mesures incitatives à l'achat ou l'utilisation de ceux-ci, qui sont en vigueur à travers le monde. Enfin, le dernier point mentionné est celui de l'opérationnalité des véhicules électriques, pour cela trois aspects sont décryptés : le dimensionnement de flottes, le routage des véhicules et le calcul de trajets optimaux. Cette revue rend finalement bien compte de l'étendue des éléments à apprécier dans le développement de flottes de VEs et il s'agit évidemment d'aspects auxquels le projet Téo Taxi se confronte dans son cheminement.

À cela peut aussi s'ajouter la problématique de rechargement des véhicules. En effet, dans la flotte de taxi Téo, les véhicules électriques viennent remplacer les véhicules à moteur à combustion interne (VMCIs) classiques et se pose alors le problème de l'autonomie. Kameda et Mukai (2011) mentionnent d'ailleurs qu'un véhicule électrique est capable de parcourir jusqu'à environ moins de cinq fois la distance que peut parcourir un VMCI, pour une recharge. La question des stations de recharge et notamment leur localisation, s'avère donc essentielle, car avec une autonomie réduite des véhicules les besoins en rechargement se trouvent plus importants. C'est dans ce contexte qu'intervient notre projet avec Téo Taxi. Nous nous intéressons ainsi à la localisation d'infrastructures de recharge pour les véhicules électriques. Nos travaux se concentreront sur les infrastructures dédiées aux taxis électriques et plus particulièrement à la flotte de taxis Téo. Nous nous appuierons sur une série de caractéristiques et de données principalement liées à ce cas d'étude.

Nous avons pour objectif principal de localiser optimalement des infrastructures de recharge adaptées à la flotte de taxis électriques Téo. Nous nous intéressons également à la configuration de ces stations de recharge, en termes de nombre de bornes à y intégrer. Pour traiter cela, nous élaborons un ensemble de modèles mathématiques, formulés en programmes linéaires en nombres entiers avec pour objectif de minimiser globalement l'accès aux infrastructures de recharge. Nous proposons aussi un outil pour évaluer nos solutions, rédigé sous la forme d'un modèle de flux dans un réseau, où l'on vient simuler des journées de service de taxis dans le but de minimiser le nombre de véhicules à mettre en service.

Afin de rendre compte de l'ensemble de nos travaux, nous structurons ce mémoire en quatre chapitres que nous présentons dans les lignes qui suivent.

Ce premier chapitre nous permet d'introduire notre travail, en présentant différents aspects de son contexte.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une revue structurée de la littérature scientifique que nous avons abordée pour mener à bien nos études. Dans celle-ci, nous offrons un aperçu des travaux antérieurs traitant de la localisation d'infrastructures de manière générale, puis des infrastructures de recharge pour les véhicules électriques et enfin celles réservées aux taxis électriques. Pour finir, nous évoquons quelques travaux qui abordent les problématiques de tournées de véhicules électriques.

Le troisième chapitre est consacré, dans un premier temps, à la présentation de la démarche que nous avons entreprise pour poursuivre ce projet. Dans la suite, nous présentons les formulations mathématiques des trois modèles que nous avons élaborés pour la localisation et la configuration des sites de recharge et pour l'attribution de courses.

Dans le quatrième chapitre, nous exposons les résultats que nous obtenons à l'issue de nos travaux, nous illustrons et comparons pour la résolution de chaque modèle différents cas que nous avons été amenés à traiter.

Enfin, le cinquième chapitre est dédié à la conclusion de notre projet. Dans celui-ci nous récapitulons l'ensemble de nos travaux et proposons notre vision sur nos contributions à la recherche à travers ceux-ci, sur les limites liées à notre étude, ainsi que les diverses perspectives de poursuites de ces travaux.

# CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

## 2.1 Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous abordons la littérature scientifique en lien avec notre étude. Dans un premier temps, nous présentons un ensemble de travaux qui traite de la localisation d'infrastructures dans différents domaines afin de mettre en évidence l'omniprésence de cette problématique. Dans la partie suivante, nous discutons des travaux de recherche qui abordent plus précisément la localisation de stations de recharge dédiées aux véhicules électriques. Enfin, nous abordons le point qui nous intéresse tout particulièrement : la localisation de sites de recharge pour les flottes de taxis électriques.

## 2.2 Localisation d'infrastructures

Depuis le début du XX$^{e}$ siècle, les problèmes de localisation d'infrastructures ont fait l'objet de très nombreuses études comme en attestent les travaux recensés par Owen et Daskin (1998) et ReVelle, Eiselt et Daskin (2008). Ainsi nous sommes en mesure de constater que divers contextes peuvent amener à étudier ces problématiques de localisation. Dans la suite, nous présentons donc un ensemble de travaux, qui ont été menés sur des problèmes de localisation, cette section est structurée selon les domaines d'application de ces études.

### 2.2.1 Localisation générale d'infrastructures

Dans un premier temps, nous pouvons remarquer que plusieurs travaux ont été menés sur les problèmes de localisation de manière globale, sans contexte prédéfini. Quatre exemples de ces études sont résumés dans le Tableau 2.1 et développés ci-dessous.

Al-Sultan et Al-Fawzan (1999) ont développé un algorithme de résolution par recherche tabou afin de résoudre des problèmes de localisation d'infrastructures sans capacité. Lorsque l'on évoque la capacité d'une infrastructure, ici, on parle du niveau de stock qu'elle peut offrir pour la distribution à ses clients. Cet article traite donc du problème de localisation d'infrastructures sans capacité, on considère alors que l'établissement possède un stock infini et que l'on ne prend pas en compte de contraintes liées aux stocks. Cette heuristique a été testée sur des problèmes prélevés dans d'autres travaux dont on connaît les résultats optimaux.

Pour leur part, Averbakh, Berman, Drezner et Wesolowsky (2007) proposent de généraliser ce problème de localisation d'infrastructures sans capacité, à travers un algorithme de programmation polynomial. Dans leur travail, ils traitent ce problème en tenant compte de plusieurs facteurs, dont la demande des clients, les coûts d'installation et de service. Les coûts d'installation évoqués sont des coûts engendrés par l'établissement une infrastructure à un point donné de la zone considérée. Ces coûts varient en fonction du point en question, de la taille de l'infrastructure (nombre de clients qui y sont associés). Les coûts de service sont quant à eux liés principalement au transport entre les infrastructures et les clients. Le modèle proposé demeure néanmoins général et se veut adaptable à différents contextes.

Baldacci, Hadjiconstantinou, Maniezzo et Mingozzi (2002) proposent, dans leurs travaux, une nouvelle formulation du problème de localisation d'infrastructures. Dans leur cas, contrairement aux études présentées précédemment, la capacité des infrastructures est prise en compte. Ainsi la modélisation proposée est un programme linéaire (*p-median problem*) s'appuyant sur un partitionnement de l'ensemble des clients en *p* sous-ensembles regroupant des clients similaires. Ces sous-ensembles sont alors représentés par des clients-médian pondérés de manière à représenter l'ensemble de tous les clients initiaux. De plus, une heuristique a été développée afin de fournir une solution au problème dual associé et une borne supérieure au primal, dans le but de supporter la résolution du problème de localisation initial. De la même manière que dans les travaux de Al-Sultan et Al-Fawzan (1999), leur modèle est testé sur la base de plusieurs problèmes traités dans la littérature.

Berman, Drezner et Wesolowsky (2005) explorent, quant à eux, le problème de localisation d'une infrastructure centrale et de plusieurs points de transfert. Les points de transfert sont considérés comme des dépôts (ou points de collecte) intermédiaires entre l'infrastructure centrale et les clients finaux. Ces points de transfert peuvent avoir des rôles différents en fonction des contextes étudiés, centres de dépôt en contexte industriel ou plateformes de transfert en contexte d'intervention d'urgence, par exemples. Afin de résoudre ce problème, plusieurs heuristiques ont été développées dans ces travaux : approche de descente, recuit simulé ou encore recherche tabou. Sur la base d'un problème relevé dans la littérature, la performance des trois heuristiques est évaluée et comparée. Ainsi, les trois algorithmes présentés semblent fournir des résultats plus ou moins satisfaisants selon le critère de performance souhaité : temps de calcul court, meilleure solution moyenne, ou l'occurrence de meilleure solution trouvée.

Les travaux présentés jusque-là traitent des problèmes de localisation d'infrastructures selon différentes approches et à travers ces travaux, les auteurs ont proposé de nouveaux modèles de résolution pour étudier ces problèmes. Leurs approches restent néanmoins assez générales, dans le sens où aucun contexte apparent n'est donné dans ces cas-là, mais seulement un type de problème est traité. Ces différents travaux nous ont malgré tout permis de cerner ce qu'est un problème de localisation. Lors du traitement d'un tel problème, on souhaite donc généralement positionner sur un espace donné, un ensemble d'infrastructures à un coût minimum, tout en s'assurant de satisfaire toutes les demandes. Dans le cadre de notre projet, nous nous intéressons à localiser des stations de recharge pour des taxis électriques. Il s'agit bien d'un problème de localisation dans la mesure où nous localisons des stations de recharge en minimisant un certain coût, formulé par le temps d'accès aux stations et nous considérons un ensemble de courses de taxis qui représente notre demande.

Dans les sections suivantes, nous présentons des travaux qui abordent de nouveaux problèmes de localisation selon trois catégories : usines, centres de distribution et infrastructures médicales.

Tableau 2.1 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation généraux

| **Référence** | **Problème traité** | **Méthode de résolution** | **Fonction objectif** | **Contraintes principales** |
|---|---|---|---|---|
| (Al-Sultan & Al-Fawzan, 1999) | Localisation d'infrastructures sans capacité | Formulation : Programme linéaire<br>Heuristique : Recherche tabou | Minimiser les coûts | Satisfaction de la demande |
| (Averbakh et al., 2007) | Localisation d'infrastructures sans capacité, avec prise en compte de la fréquentation des sites et des coûts d'accès | Algorithme polynomial | Minimiser les coûts<br>ou<br>Maximiser le profit | Satisfaction de la demande |
| (Baldacci et al., 2002) | Localisation d'infrastructures sans capacité par une approche de regroupement | Formulation : Programme linéaire<br>Heuristique : HDSP | Minimiser les coûts | Satisfaction de la demande |
| (Berman et al., 2005) | Localisation d'un point de transfert (point central connu)<br>Localisation de points de transfert (point central connu)<br>Localisation de points de transfert & point central | Formulation : Programme linéaire en nombres entiers<br>Heuristique : Approche de descente, Recuit simulé, Recherche tabou | Minimiser les coûts | Satisfaction de la demande |

### 2.2.2 Localisation d'usines

Dans cette partie, nous abordons donc la localisation d'usines. Afin d'illustrer la manière dont est traitée cette problématique, nous présentons trois travaux réalisés à ce propos.

Les travaux présentés dans cette section sont résumés dans le Tableau 2.2.

Agar et Salhi (1998) proposent une heuristique lagrangienne pour la résolution d'un problème de localisation d'usines formulé par un programme linéaire. Le problème étudié dans leurs travaux vise à situer des usines à partir d'un ensemble de sites donné avec la possibilité du choix de la capacité de production de ces usines. Ainsi l'heuristique développée s'appuie sur un algorithme lagrangien adapté à la formulation de ce problème.

Barahona et Jensen (1998) traitent également le problème de la localisation d'usines. Leur objectif est de localiser un ensemble d'entrepôts de façon à minimiser les coûts de stockage tout en satisfaisant les besoins des clients assignés à chacun des entrepôts. Ils proposent ainsi une modélisation en programmation linéaire résolue par décomposition de Dantzig-Wolfe afin de résoudre ce problème pratiquement optimalement, mais dans un temps raisonnable.

Goldengorin, Ghosh et Sierksma (2003) présentent une nouvelle formulation de l'algorithme de Branch and Bound : Branch and Peg, destiné à accélérer la résolution du problème simple de localisation d'usines (sans capacité). Le problème est, encore une fois, formulé comme un programme linéaire. Cet algorithme de Branch and Peg consiste en l'introduction de nouvelles règles comme étapes de prétraitement afin de réduire les temps de calcul et ainsi améliorer la performance lors de la résolution.

A travers les travaux sur la localisation d'usines présentés dans cette section, on observe que les objectifs généralement rencontrés sont de nature économique. A savoir que le but recherché est de minimiser les coûts de manière générale, sous ses différents volets, coûts de stockage, coûts de distribution, etc. De plus, on prête attention à satisfaire la demande des clients à distribuer. Ces problèmes reprennent les principes du problème de localisation, adaptés au cas spécifique des usines.

### 2.2.3 Localisation de centres de distribution

Dans cette nouvelle partie, nous passons en revue quelques problèmes de localisation de centres de distribution (CDs). Ces problèmes demeurent relativement similaires aux précédents compte tenu du contexte industriel qui les lie. Le Tableau 2.3 résume les travaux présentés dans la suite de cette section.

Erlebacher et Meller (2000) se sont intéressés à la configuration de systèmes de distribution, composés d'usines, de centres de distribution et de clients (Figure 2.1). Dans leurs travaux, ils proposent un modèle analytique (programme non linéaire) pour déterminer la localisation de ces centres de distribution. À travers cette formulation du problème, ils cherchent à minimiser les coûts en quatre parties : coûts fixes d'exploitation des CDs, coûts de stockage, coûts de transport usines-CDs et coûts de transport CDs-clients. De plus, ils proposent leur propre heuristique pour la résolution du modèle.

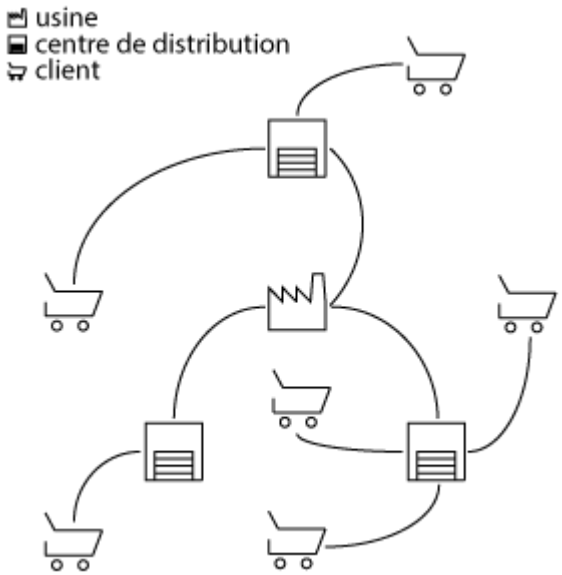


Figure 2.1 : Schéma du système de distribution étudié par Erlebacher et Meller (2000)

Nozick et Turnquist (2001) traitent également le problème de la localisation de CDs avec comme objectif de minimiser les coûts qui y sont relatifs, mais ils font aussi le choix de prendre en compte la réponse à la demande des clients. C'est dans ce sens-là qu'ils proposent de modéliser le problème

sous la forme d'un programme linéaire. Le modèle est ensuite illustré sur un exemple dans le secteur de l'industrie automobile.

Teo, Ou et Goh (2001) envisagent le problème de localisation de CDs d'une manière assez différente des deux travaux précédents, en effet, ils abordent le sujet de la centralisation des CDs. Cette démarche vise donc à réduire le nombre de centres et ainsi le montant des coûts relatifs à la possession de ces CDs (coûts fixes et coûts de stockage). D'autre part, l'efficacité du système de distribution quant à la couverture de la demande cliente est également intégrée. Afin de traiter ce problème, les auteurs ont donc formulé un modèle non linéaire.

A travers ces problèmes de localisation de centres de distribution, nous pouvons identifier des problématiques similaires à celles mises en évidence lors du traitement de la localisation d'usines. Nous pouvons justifier cela par le contexte industriel qui lie justement ces deux problèmes. Ainsi, les enjeux sont du même ordre, à savoir la minimisation des coûts, quels qu'ils soient, tout en satisfaisant la demande des clients. Il faut cependant remarquer à quel stade de la chaîne de distribution interviennent les différentes infrastructures que l'on souhaite localiser. Les CDs pourraient donc être considérés comme les clients des usines, faisant l'intermédiaire avec leurs propres clients. C'est à ce niveau-là que ce fait la distinction entre ces problèmes.

Tableau 2.2 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation d'usines

| **Référence** | **Problème traité** | **Méthode de résolution** | **Fonction objectif** | **Contraintes principales** |
|---|---|---|---|---|
| (Agar & Salhi, 1998) | Problème de localisation d'usine avec capacité (multicapacité) | Formulation : Programme linéaire<br>Heuristique : heuristique lagrangienne | Minimiser les coûts (coûts fixes et coûts de transport) | - Satisfaction de la demande<br>- Respect des capacités des usines |
| (Barahona & Jensen, 1998) | Problème de la localisation d'usine et entrepôts<br>Localisation d'entrepôts et assignation des clients | Exacte : Programmation linéaire (Décomposition Dantzig-Wolfe) | Minimiser des coûts de stockage | - Satisfaction de la demande<br>- Assignation des clients aux usines |
| (Goldengorin et al., 2003) | Localisation d'usine | Algorithme de Branch and Peg (variante du Branch and Bound) | Minimiser les coûts de distribution aux clients | Satisfaction de la demande |

Tableau 2.3 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation de centres de distribution

| **Référence** | **Problème traité** | **Méthode de résolution** | **Fonction objectif** | **Contraintes principales** |
|---|---|---|---|---|
| (Erlebacher & Meller, 2000) | Localisation de centres de distribution (usine → CD → clients) | Formulation : Programme non linéaire<br>Heuristique | Minimiser les coûts (stockage, possession, transport) | - Satisfaction de la demande<br>- Assignation des clients aux CDs |
| (Nozick & Turnquist, 2001) | Localisation de centres de distribution (industrie automobile) | Formulation : Programme linéaire<br>Exacte | Minimiser les coûts et les demandes non-satisfaites | - Assignation des clients |
| (Teo et al., 2001) | Consolidation et centralisation de centres de distribution<br>Étude des apports de la centralisation des centres de distribution vs plusieurs centres de distribution : sur les coûts d'investissement, de stockages et la qualité de service | Approche de modélisation analytique (non linéaire) | Minimiser les coûts (fixes, stockage, transport) | - Assignation des clients |

### 2.2.4 Localisation d'infrastructures médicales

Nous présentons, dans cette section, plusieurs travaux traitant la localisation d'infrastructures médicales.

Adenso-Díaz et Rodríguez (1997) abordent le problème de la localisation de bases dédiées aux ambulances qui doivent effectuer des interventions d'assistance médicale. L'étude est menée dans le cadre d'un environnement rural et plus particulièrement dans la province de Leòn en Espagne. Les deux enjeux majeurs de ce type de problèmes sont présentés par les auteurs : enjeux sociaux (rendre possible une intervention rapide et efficace pour la population) et les enjeux économiques (limiter les coûts engendrés par le déploiement d'un tel réseau d'intervention d'urgence). Ainsi, ils formulent un algorithme de recherche tabou adapté à la modélisation proposée en programmation linéaire.

Harewood (2002) propose également de traiter un problème de déploiement d'un réseau d'intervention d'urgence, cette fois-ci à la Barbade. Il modélise ainsi le problème sous la forme d'un programme linéaire avec une fonction multiobjectif intégrant, comme dans les travaux présentés précédemment, les aspects sociaux et économiques.

Rahman et Smith (1999) s'intéressent au déploiement d'un réseau d'établissements de santé en zone rurale, sur l'exemple du Bangladesh. Dans leurs travaux, ils mettent en évidence le fait de proposer une méthode de localisation optimale, en opposition avec les décisions prises localement par les autorités désignées. En effet, les choix faits par ces dernières sont la plupart du temps loin de satisfaire les critères intégrés dans une formulation mathématique. Ils formulent donc le problème par un programme linéaire en nombres entiers dont l'objectif est la couverture de la demande de la population. Le modèle est alors résolu via une heuristique. La méthode proposée ici tient compte seulement des enjeux sociaux dans la localisation d'infrastructures médicales.

Un résumé de ces travaux est fourni au Tableau 2.4.

Nous abordons à travers ces travaux un nouveau contexte d'application du problème de localisation, où les aspects économiques sont à nouveau bien présents. Cependant, nous constatons que l'accent est mis sur les enjeux sociaux, avec le souci de la couverture des besoins médicaux des populations étudiées. C'est en cela que ces problèmes se distinguent des deux cas précédents.

Tableau 2.4 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation d'infrastructures médicales

| **Référence** | **Problème traité** | **Méthode de résolution** | **Fonction objectif** | **Contraintes principales** |
|---|---|---|---|---|
| (Adenso-Díaz & Rodríguez, 1997) | Localisation de bases d'ambulances pour assistance médicale<br>objectifs sociaux (qualité de service de secours) vs objectifs économiques (limitation/réduction des coûts) | Formulation :<br>Programme linéaire<br>Heuristique :<br>Recherche tabou | Maximiser le nombre de patients pris en charge | Couvrir les villages désignés |
| (Harewood, 2002) | Déploiement de services d'urgence | Formulation :<br>Programme linéaire multi-objectif<br>Exacte | - Maximiser la population prise en charge<br>- Minimiser les coûts de couverture de ces besoins | Assignation des postes d'urgence aux différentes zones |
| (Rahman & Smith, 1999) | Localisation d'infrastructures médicales au Bangladesh (pays en développement)<br>Comme aide à la décision pour les « décideurs finaux » (gouvernements, politiques) | Formulation :<br>Programme linéaire en nombres entiers<br>Heuristique | Maximiser la couverture de la population | Assignations des infrastructures médicales |

### 2.2.5 Conclusion

Comme nous avons pu le constater à travers les divers travaux présentés précédemment, la localisation d'infrastructures a fait l'objet de nombreuses recherches, que ce soit pour traiter de nouveaux problèmes, proposer de nouvelles modélisations ou contribuer à la formulation de nouveaux algorithmes de résolution. De plus, la problématique de localisation se révèle intéressante dans plusieurs secteurs d'activité, mais dans la plupart des cas, l'aspect économique ou budgétaire doit être pris en compte : les coûts, quels qu'ils soient, sont évalués et surtout l'on cherche à les minimiser.

Dans la suite de cette revue, nous recentrons notre étude sur le contexte des véhicules électriques et notamment les problèmes de localisation des sites de recharge qui nous intéressent tout particulièrement.

## 2.3 Localisation de sites de recharge pour véhicules électriques

Cette section nous permet de passer en revue plusieurs travaux consacrés à la localisation de stations de recharge pour les véhicules électriques. Avant d'aborder les études dédiées aux infrastructures de recharge pour les flottes de taxis électriques, nous nous intéressons aux travaux qui se sont penchés sur les flottes de véhicules personnels. Les travaux présentés ci-dessous sont repris et résumés dans les tableaux 2.5 et 2.6.

Chen, Kockelman et Khan (2013) formulent un programme linéaire mixte afin de traiter le problème de localisation d'infrastructures de recharge dans la région de Seattle. Le modèle proposé a pour objectif de localiser ces stations de telle sorte que leur coût d'accès soit minimal. Ce coût d'accès est fortement lié à la distance qui sépare la station de recharge à la destination visée, sachant que la station fait office de stationnement pour véhicule. De plus, les contraintes sont rédigées de sorte à répartir les stations sur le territoire en prenant en compte leur espacement. Côté pratique, le territoire d'étude est divisé en zones pouvant potentiellement accueillir des sites de recharge et les coûts d'accès sont définis pour chaque paire station-destination. L'étude est menée sur la base de données de déplacements recueillies auprès des ménages.

Xi, Sioshansi et Marano (2013) proposent une étude un peu plus complète dans laquelle ils cherchent non seulement à localiser les stations de recharge, mais aussi à déterminer le nombre de

chargeurs à y intégrer. Des aspects plus techniques sont également pris en considération, sur la configuration du réseau électrique avec l'installation de transformateurs adaptés aux chargeurs. Dans le cadre de nos travaux, nous prendrons en compte cet aspect intéressant de répartition du nombre de chargeurs aux stations, cependant nous ne prendrons pas en considération les questions liées à la configuration du réseau électrique. Le cas présenté dans leurs travaux est celui de la région centre de l'Ohio, pour lequel ils ont pu recueillir des données de recensement intégrant des informations sociodémographiques et des enregistrements de trajets. Ils formulent donc un programme linéaire en nombres entiers afin de résoudre ce problème optimalement. La fonction objectif définie dans ce modèle est toutefois différente de celle de l'étude précédente, ils cherchent ici à maximiser le nombre de véhicules rechargés.

Dans le cadre de leurs travaux, Li, Huang et Mason (2016) étudient le cas de la localisation et relocalisation de stations de recharge pour véhicules électriques en Caroline du Sud, sur un horizon de temps fini. La vision adoptée ici est plus économique que les précédentes, ils cherchent en effet à minimiser les coûts d'installation et de relocalisation des stations sur l'horizon défini. Afin de traiter ce problème, ils proposent donc un modèle d'optimisation multipériode sous la forme d'un programme linéaire mixte en nombres entiers, résolu par une heuristique basée sur un algorithme génétique. Ce modèle multipériode tient donc compte d'une discrétisation de l'horizon étudié et permet l'évolution du réseau optimisé de recharge au cours des différents instants cet horizon. Parmi les contraintes intégrées au modèle, on retrouve celles liées au suivi du niveau de charge des véhicules. Pour pouvoir exécuter ce modèle, il est indispensable d'avoir connaissance de la répartition des trajets sur le territoire d'étude, ces informations pouvant être collectées via des dispositifs de sondages détaillés auprès de la population sur leurs déplacements.

He, Kuo et Wu (2016) proposent un travail assez différent des précédents. En effet, il s'agit ici d'une étude comparative de la performance de trois modèles d'optimisation classiques. De plus, ils appuient leurs travaux sur des données de recensement de la capitale chinoise, à partir desquelles ils établissent une estimation de la demande en véhicules électriques. Pour ce faire, ils ont mis en œuvre une « méthode experts », la méthode Delphi qui est appliquée sur un ensemble de six variables sociodémographiques pour déterminer leur influence sur l'adoption d'un véhicule électrique. Une fois la demande estimée, les trois modèles (*set covering model*, *maximum covering location model* et *p-median model*) de localisations sont exécutés. Le modèle de *set* covering a pour but de minimiser le nombre de stations localisées afin de satisfaire toute la demande. Le modèle de

*maximum covering*, quant lui, est formulé de manière à maximiser le nombre de demandes satisfaites en localisant optimalement un nombre donné de stations. A travers le modèle *p-median*, l'objectif est de minimiser les distances d'accès aux stations pour la majorité de la population. Il s'avère finalement que selon le critère de performance que l'on souhaite optimiser un modèle sera préférable aux autres et inversement pour un autre critère.

Shahraki, Cai, Turkay et Xu (2015) s'intéressent au déploiement de stations de recharge pour véhicules électriques dans la ville de Beijing. Cette étude est principalement dédiée à la recharge des véhicules hybrides. En effet, ils proposent un modèle de programmation linéaire mixte dont l'objectif est de minimiser les distances « non-électrifiées » parcourues, c'est-à-dire faire en sorte que les véhicules hybrides utilisent le moins possible leur moteur à combustion. L'étude orientée sur les véhicules hybrides constitue une particularité de ces travaux, un autre aspect intéressant est l'utilisation de données GPS de taxis. La mise à contribution de ce type de données est tout à fait pertinente dans l'étude de ces problèmes et notamment dans le cadre de notre projet avec Téo Taxi. D'autre part, ils réalisent une analyse de l'impact du nombre de stations localisées, ainsi que du type de borne choisi (recharge lente ou recharge rapide) sur différents aspects, dont notamment la zone de couverture du réseau et les distances « électrifiées » parcourues.

À travers cette section, nous avons pu prendre connaissance de plusieurs travaux relatifs à la localisation d'infrastructures de recharge dédiées aux véhicules électriques. Cependant nous pouvons aisément constater que les approches peuvent être assez différentes que ce soit dans les objectifs envisagés, la méthode (comparaison de plusieurs modèles) ou même les éléments pris en considération (localisation et/ou relocalisation, configuration des sites). Le point commun de ces études est le fait qu'elles traitent de ce problème de localisation pour les véhicules personnels. Dans le cadre de nos travaux, nous cherchons à déployer un réseau de recharge pour des taxis électriques. Notre étude peut, en effet, se distinguer de ces problèmes de localisation de stations de recharge pour les véhicules électriques personnels dans la mesure où le contexte est différent. Premièrement, au niveau des données, ces travaux mettent en œuvre principalement des données de recensement ou d'enquêtes pour évaluer une demande potentielle, dans notre cas nous bénéficions de données de courses de Téo Taxi pour cela. De plus, nous n'exploitons pas des territoires aussi étendus que ceux des travaux présentés, où ils visent à satisfaire les besoins sur des régions dont la superficie est nettement supérieure à notre cas. Compte tenu de cela, nous n'envisageons pas de la même manière le problème de localisation, effectivement les besoins en recharge des véhicules diffèrent

lorsque les potentielles distances de trajet considérées. Cependant, les modèles développés demeurent très intéressants et adaptés à notre problématique, notamment celui proposé par He et al. (2016) et son objectif de minimisation des distances d'accès qui se rapproche de ce que nous proposons dans la suite. Nous proposons donc dans la suite de nous pencher sur un ensemble de travaux traitant de ce cas.

Tableau 2.5 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation de stations de recharge pour véhicules personnels (1)

| **Référence** | **Problème traité** | **Méthode de résolution** | **Fonction objectif** | **Contraintes principales** | **Données** |
|---|---|---|---|---|---|
| (Chen et al., 2013) | Localisation de stations de recharge pour véhicules électriques personnels dans la région de Seattle (WA, États-Unis) | Exacte : Programme linéaire mixte | Minimiser les coûts d'accès aux infrastructures de recharge | - Répartition des stations<br>- Assignation des stations | Enquête ménage |
| (Xi et al., 2013) | Localisation et configuration (type de borne et nombre de chargeurs) de stations de recharge pour véhicules électriques personnels dans la région centre de l'Ohio (États-Unis) | Exacte : Programme linéaire en nombres entiers | Maximiser le nombre de véhicules rechargés | - Adaptation des installations électriques aux besoins de recharge<br>- Limitation du budget | - Recensement<br>- Enquête déplacements |
| (Li et al., 2016) | Déploiement d'un réseau de recharge dédié aux véhicules électriques avec localisation et/ou relocalisation de stations de recharge en Caroline du Sud (États-Unis), sur plusieurs périodes | Formulation : Programme linéaire mixte<br>Heuristique : Algorithme génétique | Minimiser le coût total de localisation et relocalisation des stations sur un horizon de planification fini | - Suivi du niveau de charge des véhicules<br>- Suivi du statut des stations | - Enquête déplacements |

Tableau 2.6 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation de stations de recharge pour véhicules personnels (2)

| **Référence** | **Problème traité** | **Méthode de résolution** | **Fonction objectif** | **Contraintes principales** | **Données** |
|---|---|---|---|---|---|
| (He et al., 2016) | Étude comparative de méthodes mathématiques exactes (*set covering model*, *maximum covering location model* et *p-median model*) pour la localisation de stations de recharge pour véhicules électriques personnels, sur l'exemple de Beijing (Chine) | Exactes : (SCM, MCLM, PMM) | SCM : minimiser le nombre de stations<br>MCLM : maximiser la couverture de la demande<br>PMM : minimiser les distances d'accès | - Satisfaction de la demande (SCM)<br>- Assignation des stations (MCLM et PMM)<br>- Choix du nombre de stations à localiser (MCLM et PMM) | - Recensement<br>- Sites potentiels identifiés |
| (Shahraki et al., 2015) | Déploiement d'un réseau de stations de recharge pour véhicules hybrides.<br>Optimisation appliquée au cas de Beijing (Chine), sur la base de données GPS de Taxis | Exacte : Programme linéaire mixte | Minimiser la distance de parcours « non électrifiée » | - Limitation du budget<br>- Choix du nombre maximal de stations à localiser<br>- Suivi du niveau de charge des véhicules | - Données GPS des Taxis de Beijing<br>- Localisation des stations-service (sites potentiels) |

## 2.4 Localisation de sites de recharge pour flottes de taxis électriques

Après avoir étudié quelques problèmes de localisation pour des véhicules personnels, nous voyons des travaux particulièrement dédiés à la localisation d'infrastructures de recharge pour les flottes de taxis électriques. Ces travaux sont discutés ci-dessous et résumés au Tableau 2.7.

Afin de traiter ce problème de localisation de stations de recharge pour les taxis électriques, Tu et al. (2015) proposent une approche spatio-temporelle de couverture de la demande. Cela consiste en un modèle de programmation linéaire, résolu par une heuristique basée sur un algorithme génétique. Le cas étudié précisément ici est celui de la ville de Shenzhen (Chine), pour lequel ils disposent d'un ensemble de données GPS de taxis. Le modèle mathématique ainsi présenté formule une fonction objectif double : maximiser le niveau de service des taxis (c'est-à-dire permettre de réaliser un maximum de courses) et maximiser le niveau de service de recharge des stations. Ainsi, les contraintes définies dans ce modèle prennent en compte le suivi du niveau de charge des véhicules.

Asamer, Reinthaler, Ruthmair, Straub et Puchinger (2016) proposent également un programme linéaire de couverture maximale de la demande pour traiter un problème de localisation de sites de recharge pour taxis électriques, cette fois dans la capitale autrichienne. Pour pouvoir exécuter leur modèle, ils ont à leur disposition des données de courses de taxis fournies par un répartiteur de taxis de Vienne. Une analyse intéressante est proposée dans leurs travaux concernant l'impact du nombre de stations localisées, ainsi que d'autres paramètres, sur la couverture de la demande. Le modèle proposé vise à maximiser le nombre de trajets de taxis qui sont couverts par l'accessibilité à une station de recharge. Grâce à ce modèle, on souhaite localiser des stations, dont le nombre doit être inférieur à une limite donnée, tout en garantissant la couverture des zones voisines à celles-ci.

Les travaux présentés dans ces deux dernières sections proposent des approches de traitement des problèmes de localisation tout à fait intéressantes, que ce soit dans les objectifs d'optimisation, les contraintes et critères pris en compte, ou encore la qualité des données à disposition pour leurs études. Ces aspects sont donc identifiés et seront utilisés dans la suite de nos travaux afin de développer nos propres modèles. Ces modèles diffèrent de ceux présentés à la section 2.3, dans la mesure où les objectifs formulés sont orientés sur des aspects plus opérationnels liés au service de

taxis : maximiser le niveau de service de taxis et maximiser le nombre de trajets de taxis avec accès à la recharge. De plus, les données utilisées dans les expériences présentées sont obtenues par l'intermédiaire d'entreprises de taxis et constituent donc une demande effective en courses. Ceci est à mettre en contraste avec les données rencontrées à la section précédente, qui sont principalement des données de recensement ou d'enquêtes utilisées pour évaluer une demande potentielle.

Tableau 2.7 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de localisation de stations de recharge pour taxis électriques

| **Référence** | **Problème traité** | **Méthode de résolution** | **Fonction objectif** | **Contraintes principales** | **Données** |
|---|---|---|---|---|---|
| (Tu et al., 2015) | Localisation de stations de recharge pour flotte de taxis électriques à Shenzhen (Chine), par une approche spatio-temporelle de couverture de la demande | Formulation : Programme linéaire<br>Heuristique : Algorithme génétique | Maximiser le niveau de service des taxis et des stations de recharge | - Choix du nombre de stations à localiser<br>- Suivi du niveau de charge des véhicules<br>- Assignation de courses aux taxis | Données GPS des Taxis de Shenzhen |
| (Asamer et al., 2016) | Localisation de stations de recharge pour taxis électriques à Vienne (Autriche), par une approche de couverture maximale de la demande | Exacte : Programme linéaire mixte | Maximiser le nombre de trajets de taxis couverts par l'accessibilité à une borne de recharge | - Choix du nombre maximal de nouvelles stations à localiser<br>- Assignation des stations aux régions voisines | Données de courses de Taxis (répartiteurs de taxis de Vienne) |

## 2.5 Routage de véhicules électriques avec recharge

Après nous être intéressés au problème de la localisation des stations de recharge pour les véhicules électriques, nous décidons d'étudier, à travers la littérature scientifique, comment sont intégrées les considérations de recharge des véhicules dans un contexte de tournées. Nous présentons donc ci-dessous plusieurs travaux traitant cette question. Les tableaux 2.8 et 2.9 résument les informations principales à en retenir.

Schneider, Stenger et Goeke (2014) formulent un modèle de programmation linéaire ainsi qu'une heuristique hybride basée sur les algorithmes de recherche de voisinage et de recherche tabou, afin de traiter un problème de routage de véhicules électriques pour des tournées de livraison. Dans ce problème est prise en compte la nécessité de recharge de ces véhicules. L'intérêt de ce type d'étude est de voir comment est intégrée la contrainte de recharge aux modèles d'optimisation de tournées de véhicules. L'heuristique développée et présentée dans cet article révèle des résultats très satisfaisants comparativement à une résolution exacte. En effet, pour la plupart des cas présentés la résolution via l'heuristique permet d'atteindre l'optimalité dans des temps de calcul fortement réduits par rapport à une résolution via CPLEX.

Keskin et Çatay (2016) étudient également un problème de tournées de véhicules électriques. Leurs travaux ont la particularité d'admettre une flexibilité au niveau de la recharge, à savoir qu'ils autorisent la recharge partielle des véhicules. Ceci offre la possibilité aux véhicules de ne pas effectuer une recharge complète et donc réduit le temps passé aux sites de recharge selon les besoins. Le problème est aussi formulé par un programme linéaire mixte et résolu par une heuristique basée sur une recherche adaptative à large voisinage. Les auteurs s'appuient d'ailleurs sur les travaux de Schneider et al. (2014) présentés plus haut, pour lesquels ils valident certains résultats et proposent de meilleures solutions à plusieurs problèmes. Ces deux premiers travaux ont donc en commun un même objectif d'optimisation : minimiser les distances de parcours.

Ceci n'est pas le cas pour le travail de Hiermann, Puchinger, Ropke et Hartl (2016). En effet, les auteurs traitent également un problème de tournées de véhicules électriques, mais pour lequel ils observent plutôt les enjeux économiques : minimisation globale des coûts. Le problème est abordé avec un angle différent des précédents, on a là un déploiement d'une flotte de véhicules électriques de différents modèles. Ainsi les coûts envisagés concernent les coûts d'acquisition des véhicules

et les coûts des parcours effectués. Afin de traiter ce problème, les auteurs formulent un programme linéaire mixte et proposent une heuristique basée sur un algorithme de recherche adaptative à large voisinage. Comme dans les précédentes études, les résultats de leurs travaux mettent l'accent sur la performance de l'heuristique proposée à travers la résolution de différents cas.

Liao, Lu et Shen (2016) proposent une structure différente pour leur étude. Ils traitent dans un premier temps le calcul de plus court chemin pour véhicules électriques en prenant en compte les besoins de recharge. Ensuite, ce sont plusieurs formulations du problème de tournées de véhicules électriques qui sont étudiées. L'ensemble de ces modèles sont formulés en programmes linéaires en nombres entiers et résolus par des algorithmes polynomiaux. Les auteurs proposent donc une démarche de formulation de problèmes de tournées de véhicules électriques, dont les poursuites envisagées sont le développement d'algorithmes plus performants (amélioration de la vitesse de résolution).

Les études présentées dans cette section sont relativement récentes et proposent différentes formulations pour modéliser les problèmes de tournées de véhicules électriques ainsi que plusieurs algorithmes de résolution. Elles ont néanmoins en commun un ensemble de paramètres et de contraintes qui viennent s'ajouter aux formulations classiques des problèmes de tournées de véhicules (véhicules à moteur thermique). En effet, un élément supplémentaire essentiel à prendre à compte est le suivi de la charge des véhicules, qui représente un aspect critique dans le déploiement d'une flotte de véhicules électriques. Par ailleurs, tous ces problèmes tiennent compte d'une demande qui doit être satisfaite dans sa totalité. À travers ces différents travaux, nous avons aussi pu prendre connaissance des problématiques de routage de véhicules et notamment de leurs principales caractéristiques. Ainsi dans ces problèmes de routage, une flotte de véhicules est mise à disposition dans le but de satisfaire différentes demandes localisées à plusieurs points d'un territoire donné. Généralement, ces demandes doivent être satisfaites à une certaine heure de l'horizon de temps considéré. Le but du routage est alors d'attribuer à chaque véhicule de la flotte, une tournée ordonnée afin de satisfaire toutes les demandes dans les temps. La prise en compte des besoins de recharge des véhicules électriques consiste à inclure dans ces tournées des trajets pour se rendre aux stations.

Tableau 2.8 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de routage de véhicules électriques (1)

| **Référence** | **Problème traité** | **Méthode de résolution** | **Fonction objectif** | **Contraintes principales** |
|---|---|---|---|---|
| (Schneider et al., 2014) | Routage de véhicules électriques pour des tournées de livraison avec fenêtre de temps et prise en compte de la recharge | Formulation : Programme linéaire mixte<br>Heuristique hybride : Recherche locale à large voisinage & Recherche tabou | Minimiser la distance de trajet | - Limitation de capacité des véhicules<br>- Satisfaction de la demande<br>- Suivi du niveau de charge des véhicules |
| (Keskin & Çatay, 2016) | Routage de véhicules électriques avec fenêtre de temps et prise en compte de la recharge partielle des batteries | Formulation : Programme linéaire mixte<br>Heuristique : Recherche locale à large voisinage | Minimiser les distances totales parcourues | - Satisfaction de la demande<br>- Suivi du niveau de charge des véhicules |
| (Hiermann et al., 2016) | Routage d'une flotte de véhicules électriques (différents modèles disponibles) avec fenêtre de temps et stations de recharge | Formulation : Programme linéaire mixte<br>Heuristique : Recherche locale à large voisinage | Minimiser les coûts (coûts d'acquisition des véhicules + coûts de parcours) | - Satisfaction de la demande<br>- Suivi du niveau de charge des véhicules |

Tableau 2.9 : Récapitulatif des travaux de recherche relatifs aux problèmes de routage de véhicules électriques (2)

| **Référence** | **Problème traité** | **Méthode de résolution** | **Fonction objectif** | **Contraintes principales** |
|---|---|---|---|---|
| (Liao et al., 2016) | Étude de différents problèmes de trajet de véhicules électriques avec station de recharge ou d'échange de batterie<br>- Problème de plus court chemin<br>- Problème de tournées de véhicule | Formulation :<br>Programmes linéaires en nombres entiers<br>Résolution :<br>Algorithme polynomial & algorithme d'approximation à facteur constant | Minimiser le temps de parcours :<br>- du trajet<br>- de la tournée | - Suivi du niveau de charge des véhicules<br>- Suivi du niveau de charge des véhicules |

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre bibliographique nous a permis de prendre connaissance des avancées scientifiques relatives à notre projet de localisation d'infrastructures de recharge pour les taxis électriques de Téo Taxi. Nous avons identifié de nombreux travaux traitant l'optimisation de la localisation d'infrastructures diverses, mais aussi de stations de recharge pour véhicules électriques, ainsi que des études focalisées sur les tournées de véhicules électriques. À travers, cette démarche nous avons passé en revue différentes modélisations de ces problèmes. Ainsi dans les prochaines sections, nous présentons la démarche que nous entreprenons dans le cadre de notre projet et les modèles que nous élaborons.

# CHAPITRE 3 DÉMARCHE ET MODÈLES

## 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de la démarche que nous avons entreprise pour réaliser ce projet, des données utilisées ainsi que des différents modèles que nous avons développés.

## 3.2 Démarche

À la lumière des nombreux travaux qui ont été menés et présentés au chapitre précédent, nous sommes désormais en mesure de proposer notre démarche pour traiter le problème de localisation des sites de recharge pour la flotte de Téo Taxi (Figure 3.1).

Ainsi, nous élaborons dans un premier temps notre propre programme linéaire modélisant notre problème de localisation. Le but de cette approche est de disposer les sites de recharge sur le territoire compte tenu de la demande satisfaite par Téo Taxi (données mises à disposition par l'entreprise Taxelco). Nous abordons donc une approche dans laquelle nous disposons d'un territoire divisé en plusieurs zones. Ces zones sont susceptibles, ou non, d'accueillir un site de recharge. Nous considérons donc que la localisation des sites doit être déterminée par le fait qu'une zone doive, ou pas, accueillir un site. Un choix d'optimisation plus précis n'est pas pertinent puisque des données d'utilisation du sol, notamment, doivent entrer en jeu dans le processus de décision de localisation. Les données de courses sont alors réparties sur le territoire selon les zones : c'est-à-dire que les extrémités des courses (origines et destinations) sont associées à leurs zones. En effet, nous assumons ici que les extrémités des courses sont les points les plus favorables à une liaison avec une station de recharge, les recharges ne pouvant pas être effectuées avec un client à bord du véhicule. Nous envisageons donc de localiser les sites au plus près des extrémités de courses. En d'autres termes, nous souhaitons localiser les sites de recharge dans les zones à proximité de celles accueillant le plus de débuts et fins de courses.

Une fois les sites localisés, nous proposons un modèle d'attribution de courses, formulé par un programme linéaire. Le but de cette seconde étape est d'évaluer différentes configurations de localisation de stations de recharge en rejouant des journées de service de Téo Taxi. Nous développons donc un modèle de flux dans un réseau, dans lequel nous prenons en considération les résultats de l'étape précédente (emplacements des sites), des données de courses et les profils de

décharge et recharge des véhicules électriques. Le but ici est de déterminer le nombre minimum de taxis à mettre en service afin de satisfaire toutes les courses selon différentes configurations. À l'issue de cette étape de simulation, nous sommes également en mesure d'évaluer la contribution de chaque site à la recharge des taxis. Ces résultats sont essentiels pour la suite.

La troisième étape consiste en la configuration des sites de recharge, c'est-à-dire déterminer le nombre de bornes à activer à chaque station. Pour ce faire, nous proposons une version améliorée du premier modèle qui prend donc en compte la capacité (en nombre de bornes) des sites de recharge. Comme pour le premier modèle, chaque zone (et les extrémités de courses qui y sont associées) est liée à un site de recharge, nous souhaitons donc répartir les bornes selon les affluences aux zones. Plus une station a d'extrémités de courses associées, plus l'offre en bornes doit être importante. Par la suite, nous confrontons les résultats obtenus par la résolution de ce modèle à ceux de la simulation, afin d'identifier les similitudes de configuration.

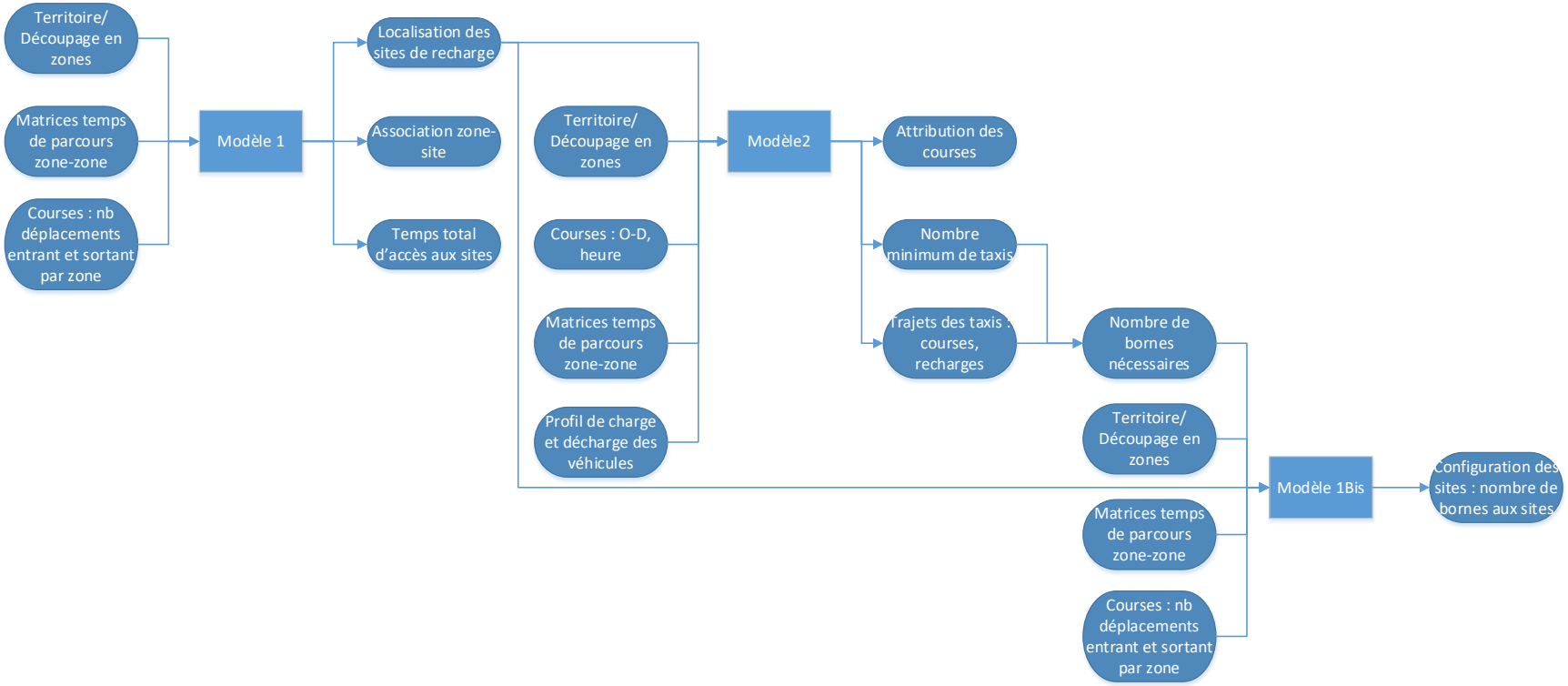


Figure 3.1 : Démarche mise en œuvre pour le projet

À travers nos travaux, nous avons donc été amenés à développer trois programmes linéaires en nombres entiers. Le processus d'élaboration est présenté en Figure 3.2.

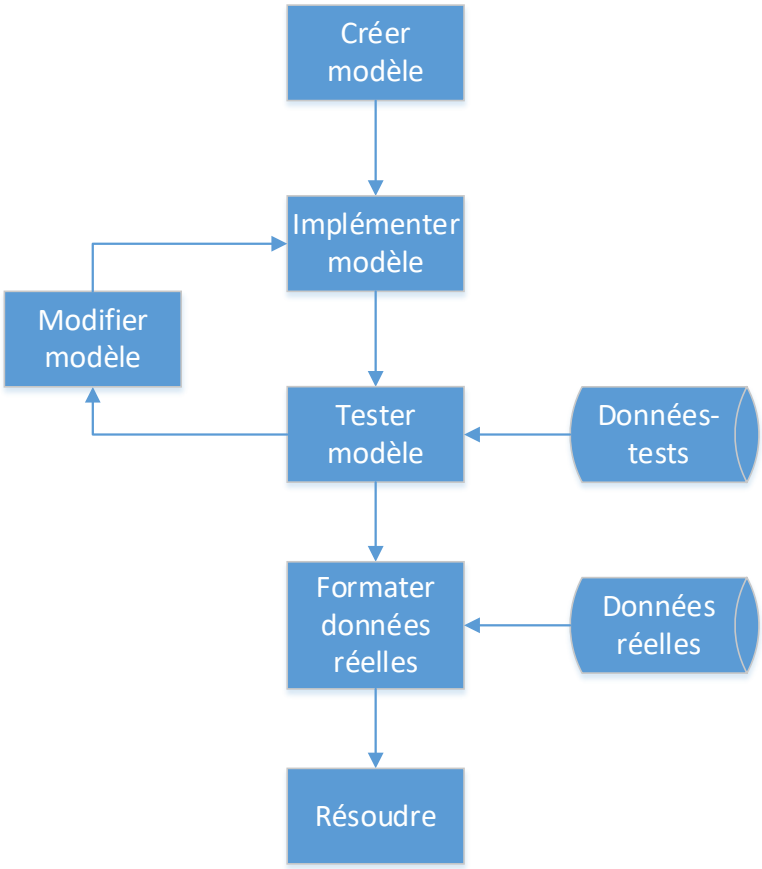


Figure 3.2 : Processus de développement des modèles mathématiques

Comme évoqué plus tôt, nous nous sommes appuyés sur une revue de la littérature scientifique afin de prendre connaissance des diverses approches et méthodes de modélisation pour les cas qui nous intéressent ici. Nous avons donc identifié plusieurs modèles et nous sommes inspirés de ces travaux pour proposer nos propres modèles mathématiques. Une fois les modèles élaborés, nous les avons implémentés. Pour ce faire, nous avons utilisé dans un premier temps le logiciel AIMMS (Modèles 1 et 1Bis) et plus tard AMPL (Modèle 2). Le choix d'AIMMS en premier lieu a été fait, car il propose une interface conviviale et très simple d'appréhension, avec des fonctions clairement définies et accessibles, pour une implémentation rapide des modèles ainsi qu'une intégration aisée des données. Malgré tout, dans un second temps, nous avons fait le choix d'AMPL qui offre une meilleure flexibilité pour l'implémentation de modèles plus complexe comme le Modèle 2, qui nécessite la définition de réseaux, d'ensembles imbriqués et donc une indexation multiple. S'en

suit alors une étape de test du modèle. Pour cela un ensemble de données-test est élaboré afin de déceler les différents biais que pourrait contenir le modèle tel que défini. Nous apportons ensuite les modifications nécessaires, que ce soit sur la définition des variables ou des contraintes. Cette phase peut être itérative, c'est-à-dire que plusieurs étapes de test et modification peuvent s'enchaîner jusqu'à la validation du modèle. Nous passons ensuite à la préparation des données réelles à partir des données Téo Taxi notamment. Enfin vient la dernière étape, où nous procédons à la résolution du modèle.

## 3.3 Détail des données utilisées

### 3.3.1 Territoire d'étude

Dans un premier temps, nous définissons le territoire d'étude. Celui-ci est délimité par les villes de Montréal, Laval et Longueuil, comme visible sur la Figure 4.1. De plus, nous avons fait le choix du découpage du territoire selon les secteurs de recensement (SR) tels que définis par Statistique Canada en 2011 (Statistique Canada, 2016). Le territoire présenté ici est divisé en 699 SR.

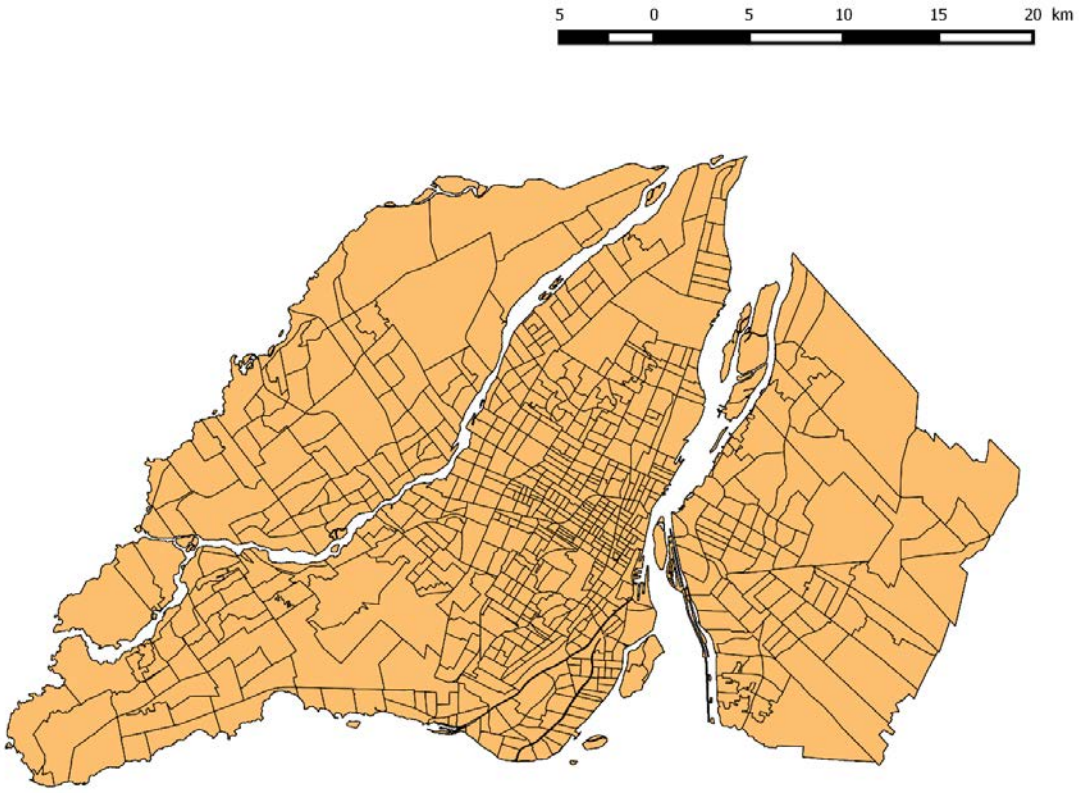


Figure 4.3 : Territoire d'étude

Cependant, le territoire desservi par les véhicules de Téo Taxi se limite seulement à une portion de celui présenté ci-dessus. Mais conserver un territoire plus étendu permet d'offrir un espace de solution plus approprié. Par ailleurs, la zone de desserte de Téo Taxi a évolué depuis la mise en service des taxis électriques (Figure 4.2). Dans les différentes expériences qui seront présentées, nous prendrons en compte seulement la zone de desserte la plus entendue correspondant à l'état actuel du service de Téo Taxi (Téo Taxi, 2017b).

Il est important ici de faire la distinction entre les deux territoires présentés. En effet, la zone de desserte définit la zone d'activité des véhicules électriques, mais dans le cadre de notre étude nous n'excluons pas les secteurs périphériques pour accueillir des infrastructures.

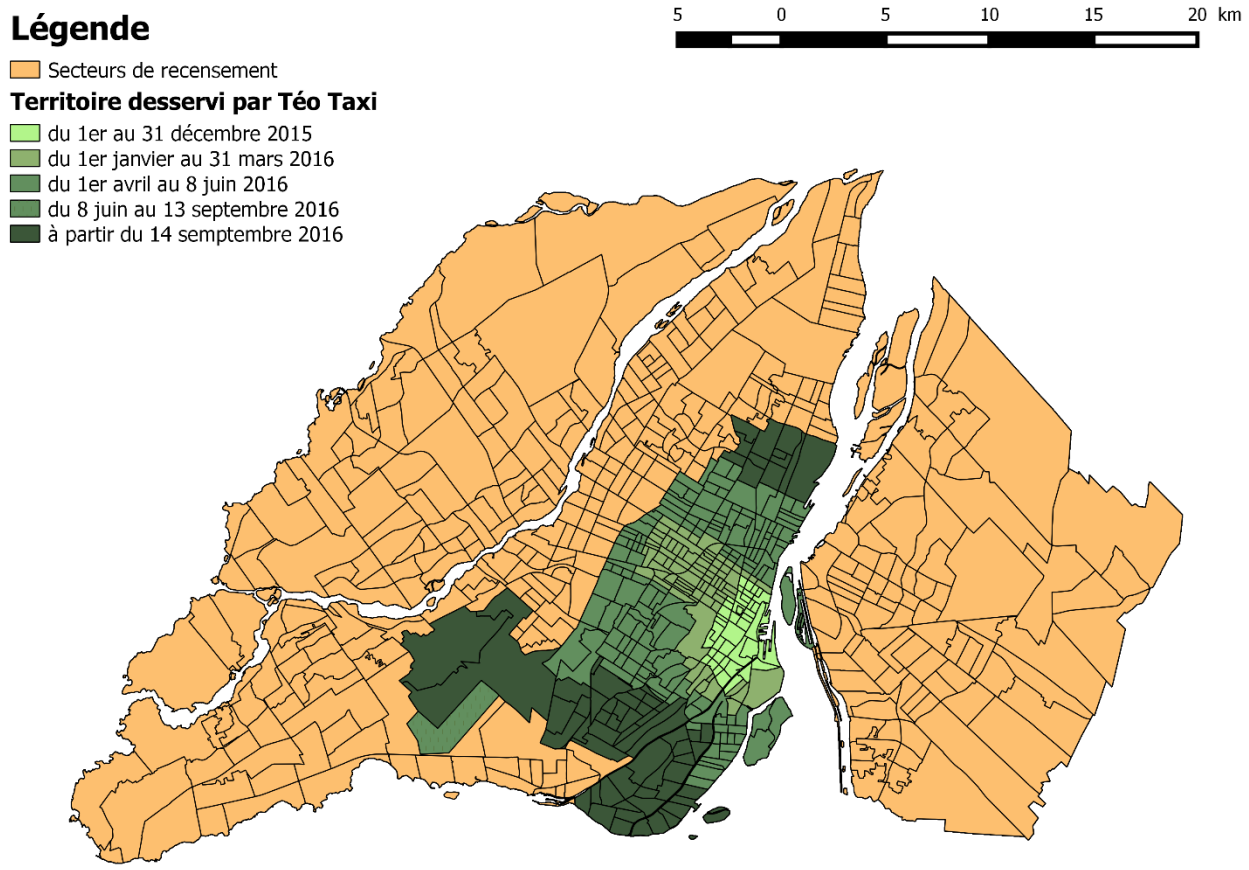


Figure 4.4 : Limites du territoire de desserte de Téo Taxi et évolutions

### 3.3.2 Matrices de temps et distances de parcours interzones

Un deuxième élément nécessaire pour nos études est l'ensemble des distances qui séparent les secteurs de recensement. En effet, nous avons décidé, pour réaliser nos expériences, de nous

appuyer sur les SR et notamment sur les temps de parcours qui séparent leur centroïde. Ainsi, ceux-ci ont été calculés sur le parcours du réseau routier et ce pour deux cas distincts : en écoulement libre, c'est-à-dire sans congestion sur le réseau (cas équivalent aux conditions de parcours en pleine nuit) et en pointe du matin, là où les circonstances sont les plus défavorables (Tableaux 3.1 et 3.2).

Tableau 3.1 : Extrait de matrice de temps de parcours (en secondes) dans le cas de l'écoulement libre

| | **Zone 1** | **Zone 2** | **Zone 3** | **Zone 4** | **Zone 5** | **Zone 6** | **Zone 7** | **Zone 8** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Zone 1** | 0 | 102 | 181 | 193 | 87 | 147 | 240 | 194 |
| **Zone 2** | 113 | 0 | 80 | 100 | 120 | 198 | 148 | 217 |
| **Zone 3** | 182 | 88 | 0 | 118 | 190 | 268 | 218 | 287 |
| **Zone 4** | 197 | 106 | 118 | 0 | 133 | 205 | 115 | 206 |
| **Zone 5** | 87 | 125 | 191 | 133 | 0 | 88 | 178 | 135 |
| **Zone 6** | 147 | 204 | 270 | 205 | 89 | 0 | 166 | 77 |
| **Zone 7** | 246 | 154 | 218 | 116 | 178 | 167 | 0 | 155 |
| **Zone 8** | 242 | 220 | 286 | 203 | 184 | 110 | 152 | 0 |

Tableau 3.2 : Extrait de matrice de temps de parcours (en secondes) dans le cas de la pointe du matin

| | **Zone 1** | **Zone 2** | **Zone 3** | **Zone 4** | **Zone 5** | **Zone 6** | **Zone 7** | **Zone 8** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Zone 1** | 0 | 134 | 228 | 234 | 122 | 209 | 307 | 264 |
| **Zone 2** | 150 | 0 | 94 | 131 | 153 | 263 | 203 | 297 |
| **Zone 3** | 228 | 104 | 0 | 136 | 234 | 344 | 273 | 377 |
| **Zone 4** | 233 | 139 | 136 | 0 | 152 | 235 | 137 | 265 |
| **Zone 5** | 122 | 160 | 235 | 152 | 0 | 119 | 215 | 174 |
| **Zone 6** | 210 | 271 | 345 | 235 | 120 | 0 | 197 | 88 |
| **Zone 7** | 307 | 211 | 273 | 137 | 215 | 198 | 0 | 187 |
| **Zone 8** | 311 | 299 | 374 | 260 | 221 | 126 | 181 | 0 |

De la même manière que pour les matrices de temps de parcours, nous disposons des matrices de distances entre les différents SR, un exemple est fourni au Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Extrait de matrice de distance de parcours (en mètres) dans le cas de la pointe du matin

| | **Zone 1** | **Zone 2** | **Zone 3** | **Zone 4** | **Zone 5** | **Zone 6** | **Zone 7** | **Zone 8** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Zone 1** | 0 | 1154 | 1785 | 1736 | 1102 | 1940 | 2438 | 2333 |
| **Zone 2** | 1293 | 0 | 631 | 1131 | 1284 | 2176 | 1833 | 2840 |
| **Zone 3** | 1628 | 688 | 0 | 928 | 1778 | 2669 | 1975 | 3333 |
| **Zone 4** | 1736 | 1178 | 928 | 0 | 1117 | 1740 | 1047 | 2405 |
| **Zone 5** | 1102 | 1331 | 1792 | 1117 | 0 | 1062 | 1670 | 1455 |
| **Zone 6** | 1940 | 2223 | 2683 | 1740 | 1062 | 0 | 1676 | 648 |
| **Zone 7** | 2438 | 1880 | 1975 | 1047 | 1670 | 1676 | 0 | 1679 |
| **Zone 8** | 2602 | 2773 | 3234 | 2292 | 1724 | 928 | 1565 | 0 |

Les matrices présentées ci-dessus ont été calculées sur le réseau routier d'OpenStreetMap à l'aide données GPS d'une autre compagnie de taxi montréalaise, Taxi Diamond. Ces données GPS ont permis de fournir une correction des vitesses et de déterminer les matrices de temps de parcours.

### 3.3.3 Enregistrements des courses

D'autres données sont nécessaires à nos expériences, il s'agit des courses réalisées par Téo Taxi sur la période étudiée : du 14 septembre 2016 au 13 janvier 2017, correspondant à la dernière extension du territoire de desserte. Ainsi, dans le reste du mémoire, notamment lors de la présentation des résultats, lorsque que nous évoquerons « la période complète d'étude », nous ferons référence à la période qui s'étend du 14 septembre 2016 au 13 janvier 2017.

Nous utilisons ces données de courses de deux façons différentes au cours de nos expérimentations. Dans un premier temps, pour les modèles de localisation et de configuration des stations de recharge (Modèle 1 et Modèle 1Bis), nous utilisons une matrice zone-zone dans laquelle nous précisons le nombre de courses entre chaque zone (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 : Extrait de matrice de course (semaine 1 année 2017)

| | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 | Zone 6 | Zone 7 | Zone 8 | Zone 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Zone 1** | | | | | | | | | 1 |
| **Zone 2** | 2 | | | 1 | 2 | | 1 | 1 | 1 |
| **Zone 3** | | | | | | | | | |
| **Zone 4** | | | | 1 | | | | 1 | |
| **Zone 5** | | | | | | | | | |
| **Zone 6** | | | | | | | | | |
| **Zone 7** | 1 | | | | | | | | 1 |
| **Zone 8** | | | 1 | | | | | | |
| **Zone 9** | 1 | 1 | | | | | 1 | | |

Pour chacune des courses enregistrées, nous détenons donc les SR qu'elles relient (origines et destinations), ainsi que leur date. Cela nous a permis d'établir pour chaque période étudiée l'ensemble des déplacements entrants et sortants des secteurs de recensement (Tableau 3.5).

Tableau 3.5 : Extrait du tableau des déplacements par zone (semaine 1 année 2017)

| Zones | Déplacements Sortants | Déplacements Entrants | Total des Déplacements |
|---|---|---|---|
| **4620010** | 0 | 0 | 0 |
| **4620011** | 2 | 5 | 7 |
| **4620012.01** | 0 | 1 | 1 |
| **4620012.02** | 2 | 1 | 3 |
| **4620013** | 5 | 6 | 11 |
| **4620014.01** | 12 | 34 | 46 |
| **4620014.02** | 4 | 8 | 12 |
| **4620015** | 8 | 11 | 19 |

La répartition des déplacements sur le territoire d'étude est illustrée à la Figure 3.3 sur l'exemple de la semaine 1 de l'année 2017.

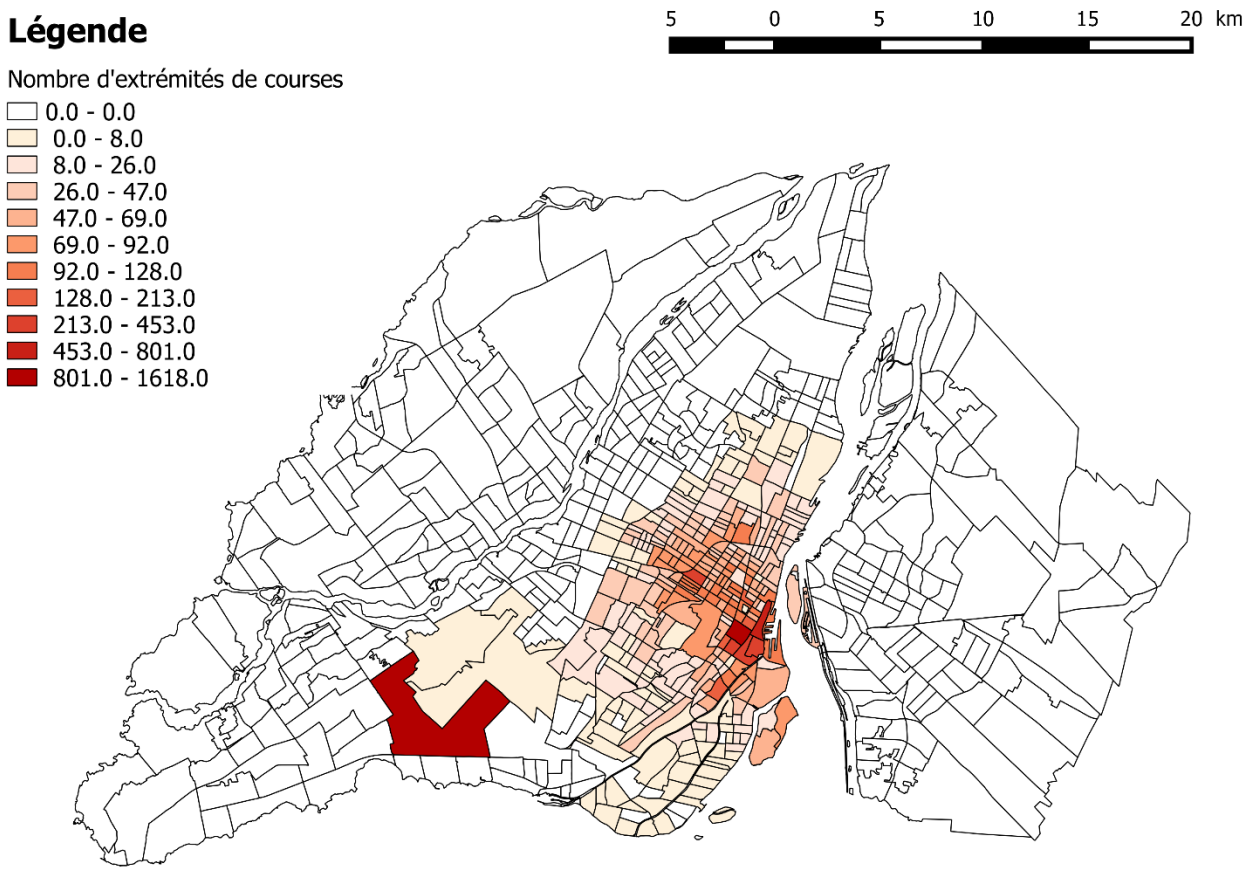


Figure 3.5 : Carte de répartition du nombre de déplacements selon les SR (semaine 1 année 2017)

Dans un deuxième temps, pour le modèle d'attribution de courses (Modèle 2), nous utilisons les données de courses sous la forme d'un tableau de courses (Tableau 3.6). Dans ce dernier, nous visualisons les zones et dates des débuts et fins de courses.

Tableau 3.6 : Extrait de tableau de courses (semaine 1 année 2017)

| Zone_Origine | Jour_ Origine | Heure_ Origine | Zone_Destination | Jour_Destination | Heure_ Destination |
|---|---|---|---|---|---|
| 4620362 | 02/01/2017 | 00:04:48 | 4620044 | 02/01/2017 | 00:17:24 |
| 4620190.02 | 02/01/2017 | 00:10:14 | 4620217 | 02/01/2017 | 00:27:59 |
| 4620237 | 02/01/2017 | 00:11:27 | 4620232 | 02/01/2017 | 00:16:40 |
| 4620026 | 02/01/2017 | 00:18:26 | 4620149 | 02/01/2017 | 00:26:45 |
| 4620214 | 02/01/2017 | 00:19:02 | 4620062 | 02/01/2017 | 00:29:23 |
| 4620208 | 02/01/2017 | 00:19:46 | 4620187.03 | 02/01/2017 | 00:28:55 |
| 4620317.04 | 02/01/2017 | 00:23:54 | 4620061 | 02/01/2017 | 00:40:13 |
| 4620055.01 | 02/01/2017 | 00:13:25 | 4620317.04 | 02/01/2017 | 00:24:17 |

### 3.3.4 Véhicules et caractéristiques

Afin de réaliser nos expériences de simulation de journées de services de taxis, nous devons intégrer un modèle de consommation énergétique des véhicules électriques. Nous identifions donc dans cette section les différents modèles de taxis qui composent la flotte de Téo Taxi. Les caractéristiques présentées au Tableau 3.7 sont issues des travaux de l'Institut du véhicule innovant (2017).

Tableau 3.7 : Véhicules de la flotte Téo Taxi et caractéristiques

| Véhicule | Modèle | Capacité de batterie | Consommation | Capacité kilométrique calculée |
|---|---|---|---|---|
| (Eco-Energie à Montréal, 2015) | Kia Soul (2016) | 27 kWh | 185 Wh/km | 146 km |
| (Eco-Energie à Montréal, 2015) | Nissan Leaf (2016) | 30 kWh | 195 Wh/km | 154 km |
| (Eco-Energie à Montréal, 2015) | Tesla S70D (2016) | 70 kWh | 240 Wh/km | 292 km |
| (Eco-Energie à Montréal, 2015) | Tesla S90D (2015) | 90 kWh | 245 Wh/km | 367 km |

Nous utilisons, comme modèle de consommation énergétique des véhicules électriques, un modèle simple de consommation kilométrique dont les paramètres sont définis ci-dessus.

## 3.4 Modèles mathématiques

### 3.4.1 Modèle 1 : Localisation de sites de recharge

Pour la modélisation de ce problème de localisation de sites de recharge pour taxis électriques, nous considérons un territoire divisé en zones (les secteurs de recensement dans notre cas), ainsi qu'un ensemble de sites potentiels (sous-ensemble des zones). Nous considérons également un ensemble de courses réalisées. Dans notre modélisation, ces courses sont représentées par leurs extrémités (origines et destinations) qui sont associées aux zones les contenant. Nous cherchons alors à localiser *p* sites de recharge, parmi les sites potentiels désignés, en associant chacune des zones à un site de recharge. Nous assumons que les véhicules peuvent se rendre à une station de recharge seulement lorsqu'aucun client n'est à bord. Nous considérons donc les extrémités de courses comme les points potentiels à partir desquels les taxis peuvent se rendre à une station. De plus, nous accordons à chacune des extrémités évoquées le même potentiel de recharge, sans distinction de longueur de course. L'objectif est alors de minimiser la somme des temps entre les extrémités des courses et les sites associés.

Le modèle est donc formulé comme suit :

- Ensembles :

$Z : zones, i, j \in Z$

$K : sites\ de\ recharge\ potentiels, K \subset Z, k \in K$

- Variables :

$$x_{kj} = \begin{cases} 1, si\ la\ zone\ j\ est\ desservie\ \text{à}\ partir\ du\ site\ k \\ 0, sinon \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1, si\ le\ site\ k\ est\ activé \\ 0, sinon \end{cases}$$

- Paramètres :

$n_{ij}$ : $nombre\ de\ courses\ de\ i$ à $j$

$t_{kj}$ : $temps\ de\ parcours\ du\ site\ k$ à $la\ zone\ j$

$p$ : $nombre\ de\ sites$ à $localiser$

- Fonction objectif :

$$Min \sum_{k \in K} \sum_{j \in Z} \frac{\sum_{i \in Z}(n_{ij} + n_{ji})}{2} * t_{kj} * x_{kj} \tag{1}$$

Sujet à :

$$\sum_{k \in K} y_k = p \tag{2}$$

$$x_{kj} \leq y_k, \forall k \in K, \forall j \in Z \tag{3}$$

$$\sum_{k \in K} x_{kj} = 1, \forall j \in Z \tag{4}$$

$$x_{kj} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall j \in Z \tag{5}$$

$$y_k \in \{0, 1\}, \forall k \in K \tag{6}$$

À travers la fonction objectif (1), nous cherchons à minimiser le temps total d'accès aux sites de recharge. Cet objectif est donc calculé comme la somme des temps de trajet entre les zones et leur site attitré, pondérés par le nombre d'extrémités de courses associées à chaque zone.

La contrainte (2) permet de fixer à *p* le nombre de sites que l'on souhaite localiser. Les contraintes (3) et (4) garantissent que chaque zone du territoire est associée à un et un seul site de recharge localisé. Les contraintes (5) et (6) définissent les variables binaires.

Le programme AMPL est disponible en Annexe A.

### 3.4.2 Modèle 1Bis : Localisation et configuration de sites de recharge

Ce second modèle est une variante plus élaborée du précédent. En plus d'optimiser la localisation des $p_1$ sites de recharge, il permet une répartition optimale de $p_2$ bornes, que l'on souhaite localiser, sur l'ensemble des sites localisés. La distribution des bornes aux sites doit se faire en fonction du nombre d'extrémités de courses associées à chacun des sites. L'objectif reste le même que dans le modèle précédent, à savoir minimiser la somme des temps entre les extrémités des courses et les sites associés.

Ce deuxième modèle est alors formulé comme suit :

- Ensembles :

$Z : zones, i, j \in Z$

$K : sites\ de\ recharge\ potentiels, K \subset Z, k \in K$

$B = \{1..m_k\} : bornes\ de\ recharge\ au\ site\ k\ , b \in \{1..m_k\}$

- Variables :

$$x_{kj} = \begin{cases} 1, si\ la\ zone\ j\ est\ desservie\ \text{à}\ partir\ du\ site\ k \\ 0, sinon \end{cases}$$

$$y_{kb} = \begin{cases} 1, si\ la\ borne\ b\ du\ site\ k\ est\ activée \\ 0, sinon \end{cases}$$

$$z_k = \begin{cases} 1, si\ le\ site\ k\ est\ activé \\ 0, sinon \end{cases}$$

- Paramètres :

$n_{ij} : nombre\ de\ courses\ de\ i\ \text{à}\ j$

$t_{kj} : temps\ de\ parcours\ du\ site\ k\ \text{à}\ la\ zone\ j$

$p_1 : nombre\ de\ sites\ \text{à}\ localiser$

$p_2 : nombre\ de\ bornes\ \text{à}\ localiser$

$m_k : nombre\ maximal\ de\ bornes\ au\ site\ k$

- Fonction objectif :

$$Min \sum_{k \in K} \sum_{j \in Z} \frac{\sum_{i \in Z}(n_{ij} + n_{ji})}{2} * d_{kj} * x_{kj} \tag{7}$$

Sujet à :

$$\sum_{k \in K} z_k = p_1 \tag{8}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{b \in \{1..m_k\}} y_{kb} = p_2 \tag{9}$$

$$\frac{\sum_{b \in \{1..m_k\}} y_{kb}}{m_k} \leq z_k, \forall k \in K \tag{10}$$

$$\sum_{j \in Z} \left( x_{kj} * \frac{\sum_{i \in Z}(n_{ij} + n_{ji})}{2} \right) \leq \left\lceil \frac{\sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z} n_{ij}}{p_2} \right\rceil * \sum_{b \in \{1..m_k\}} y_{kb}, \quad \forall k \in K \tag{11}$$

$$y_{kb} \geq y_{kb+1}, \forall k \in K, \forall b \in \{1..m_k - 1\} \tag{12}$$

$$\sum_{k \in K} x_{kj} = 1, \forall j \in Z \tag{13}$$

$$x_{kj} \leq z_k, \forall k \in K, \forall j \in Z \tag{14}$$

$$x_{kj} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall j \in Z \tag{15}$$

$$y_{kb} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall b \in \{1..m_k\} \tag{16}$$

$$z_k \in \{0, 1\}, \forall k \in K \tag{17}$$

La fonction objectif (7) vise à minimiser la distance totale d'accès aux sites de recharge.

Les contraintes (8) et (9) permettent de fixer les nombres de sites et de bornes, respectivement, à localiser sur le territoire. La contrainte (10) fixe la capacité, en termes de nombre de bornes aux

sites, tandis que la contrainte (11) fixe la capacité, en termes de déplacements associés à chaque site. La contrainte (12) permet d'activer les bornes dans l'ordre, afin de lever les problèmes de symétrie lors de la résolution. Les contraintes (13) et (14) garantissent l'association de chaque zone à un et un seul site de recharge. Enfin, les contraintes (15) à (17) définissent les variables binaires.

Le programme AMPL est disponible en Annexe B.

### 3.4.3 Modèle 2 : Attribution de courses a priori et simulation

La seconde étape que nous définissons dans notre démarche de modélisation est l'élaboration d'un modèle mathématique pour la simulation de journées de service de taxis électriques. Nous pouvons représenter ce modèle sous la forme d'un graphique espace-temps (Figure 3.3 et Figure 3.4) pour lequel les axes sont gradués par les zones et les heures, respectivement. Le modèle tient donc compte d'un territoire divisé en différentes zones (ensemble Z) ainsi que du temps discrétisé (ensemble H). Sur ce graphique, sont placés les courses de taxis à réaliser (nœuds d'origine et de destination et arcs), ainsi que les sites de recharge localisés grâce au modèle 1. A l'instant initial, les véhicules sont envoyés dans le réseau depuis le nœud-source $\alpha$ vers les sites de recharge et parcourent alors le réseau sur les différents arcs (course, recharge, attente, etc.) et peuvent atteindre tous les nœuds du réseau (définis par l'ensemble des points correspondant aux zones aux différents instants de l'horizon). Les taxis mis en service doivent satisfaire toutes les courses définies en entrée. De plus, les véhicules ont la possibilité, au besoin, de se rendre à un nœud-site afin d'effectuer une recharge. Pour sortir du réseau un taxi doit se rendre à un nœud-site, puis atteindre le nœud-destination $\beta$. Tout au long des trajets de chaque taxi, leur niveau de charge est suivi. Pour suivre le niveau de charge des taxis ($C_i^v$ capacité du véhicule v au point i), nous prenons en leur capacité énergétique maximale ($C_{max}$ en kWh) et les taux de décharge (R en kWh/km) et de recharge (R' en kWh/arc de recharge). L'objectif de ce modèle est de minimiser le nombre de taxis mis en service tout en satisfaisant l'ensemble de la demande.

Pour cela nous définissons donc le modèle de flux dans un réseau suivant :

- Ensembles :

$Z : zones, a, b \in Z$

$H : heures, g, h \in H$

$P : points\ (zones, heures), P \subset Z \times H \cup \{\alpha, \beta\}, i, j, k \in P$

$O : origines\ des\ courses, O \subset P$

$D : destinations\ des\ courses, D \subset P$

$C : courses, C \subset O \times D$

$S : sites\ de\ recharge, S \subset P$

$V : véhicules, v \in V$

Définition des arcs :

Tableau 3.8 : Tableau de définition des arcs

| | | |
|---|---|---|
| Course | i ∈ O ——— j ∈ D | $(i, j) \in C$ |
| ToCourse | i ∈ P ——— j ∈ O | $i = (a, h), j = (b, g), g - h = pt, a \neq b$ |
| FromCourse | i ∈ D ——— j ∈ P | $i = (a, h), j = (b, g), g - h = pt, a \neq b$ |
| Recharge | i ∈ S ——— j ∈ S | $i = (a, h), j = (b, g), g - h = pt, a = b$ |
| ToRecharge | i ∈ D ——— j ∈ S | $i = (a, h), j = (b, g), g - h = pt, a \neq b$ |
| FromRecharge | i ∈ S ——— j ∈ P | $i = (a, h), j = (b, g), g - h = pt, a \neq b$ |
| Attente | i ∈ P ——— j ∈ P | $i = (a, h), j = (b, g), g - h = pt, a = b$ |
| Départ | i = α ——— j ∈ S | |
| Arrivée | i ∈ S ——— j = β | |

- Variables :

$$x_{ij}^{v} = \begin{cases} 1, si\ le\ véhicule\ v\ parcourt\ l'arc\ (i, j) \\ 0, sinon \end{cases}$$

$C_i^v : capacité\ du\ véhicule\ v\ au\ point\ i$

- Paramètres :

$t_{ab}$ : $temps\ de\ parcours\ entre\ les\ zones\ a\ et\ b$

$d_{ab}$ : $distance\ de\ parcours\ entre\ les\ zones\ a\ et\ b$

$pt$ : $pas\ de\ temps$

$R$ : $Taux\ de\ décharge$

$R'$: $Taux\ de\ recharge$

$C_{max}$ : $Capacité\ maximale$

- Fonction objectif :

$$Min \sum_{j \in P} \sum_{v \in V} x_{\alpha j}^{v} \tag{18}$$

Sujet à :

$$\sum_{v \in V} x_{ij}^{v} = 1, \forall (i,j) \in C \tag{19}$$

$$\sum_{i \in P-\{\beta\}} x_{ij}^{v} = \sum_{k \in P-\{\alpha\}} x_{jk}^{v}, \forall v \in V, \forall j \in P \tag{20}$$

$$C_j^v \leq C_i^v - R * d_{ab} * x_{ij}^v + C_{max} * \left(1 - x_{ij}^v\right), \forall v \in V, \forall i,j \in P, (i,j) \notin Recharge \tag{21}$$

$$C_j^v \leq C_i^v + R' * x_{ij}^v + C_{max} * \left(1 - x_{ij}^v\right), \forall v \in V, \forall (i,j) \in Recharge \tag{22}$$

$$C_j^v \leq C_i^v + C_{max} * \left(1 - x_{ij}^v\right), \forall v \in V, \forall (i,j) \in Attente \tag{23}$$

$$\sum_{i=\alpha, j \in P} x_{ij}^{v} \geq \sum_{i=\alpha, j \in P} x_{ij}^{v+1}, \forall v \in V \tag{24}$$

$$\sum_{i=\alpha, j \in S} x_{ij}^{v} \leq 1, \forall v \in V \tag{25}$$

$$0 \leq C_i^v \leq C_{max}, \forall i \in P, \forall v \in V \tag{26}$$

$$x_{ij}^v \in \{0,1\}, \forall i,j \in P, \forall v \in V \tag{27}$$

Tel que défini, ce modèle vise à minimiser le nombre de véhicules mis en service (18) afin de satisfaire toutes les courses (19).

Par la contrainte (20), nous imposons la conservation du flux sur l'ensemble du réseau. Les contraintes (21) à (23) définissent le suivi du niveau de charge des véhicules : décharge, recharge, attente, respectivement. Avec la contrainte (21), nous définissons le niveau de charge (hors recharge et attente) du véhicule v au point j, à partir des points précédents. Si effectivement le véhicule v est arrivé au point j à partir du point i ($x_{ij}^v = 1$), alors sa capacité au point j est égale à celle au point i réduite de la distance parcouru ($d_{ab}$, sachant que a est la zone du point i et b la zone du point j) ajustée par le taux de décharge. Si le véhicule v n'est pas arrivé au point j depuis le point i ($x_{ij}^v = 0$), sa capacité est inférieure à sa capacité maximale ($C_{max}$). Ainsi, le niveau de charge d'un véhicule à sa destination est défini seulement à partir de son niveau à son origine. De la même manière, la contrainte (22) nous permet de faire le suivi du niveau de charge des véhicules sur les arcs de recharge. Si le véhicule v parcourt effectivement un arc (i,j) de recharge ($x_{ij}^v = 1$), sa capacité se voit augmenter du taux de recharge R'. Sinon, elle est laissée inférieure à la capacité maximale. La contrainte (23), concernant les arcs d'attente, fait en sorte que si le véhicule v parcourt effectivement un arc d'attente (i,j), son niveau de charge au point j ne soit pas supérieur à celui du point i. La contrainte (24) permet d'éviter des problèmes de symétrie en définissant un ordre sur les taxis. À travers la contrainte (25), nous définissons l'unicité de parcours de chaque véhicule, c'est-à-dire qu'un taxi ne peut parcourir qu'un arc à partir du nœud de départ $\alpha$, sur le reste du réseau ; cela est garanti grâce à la contrainte (20). La contrainte (26) définit l'intervalle de définition de la variable de capacité. La contrainte (27) définit les variables binaires.

Le programme AMPL est disponible en Annexe C.

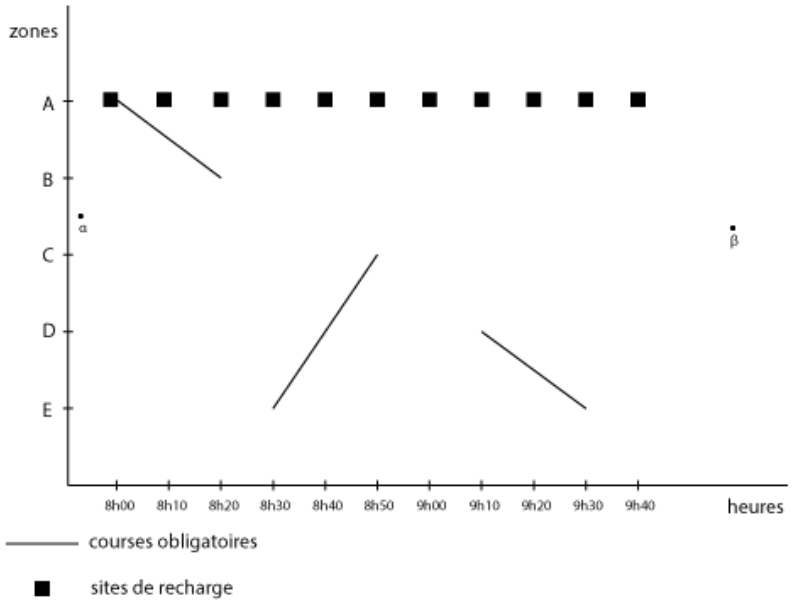


Figure 3.6 : Illustration d'un cas simple (avant résolution)

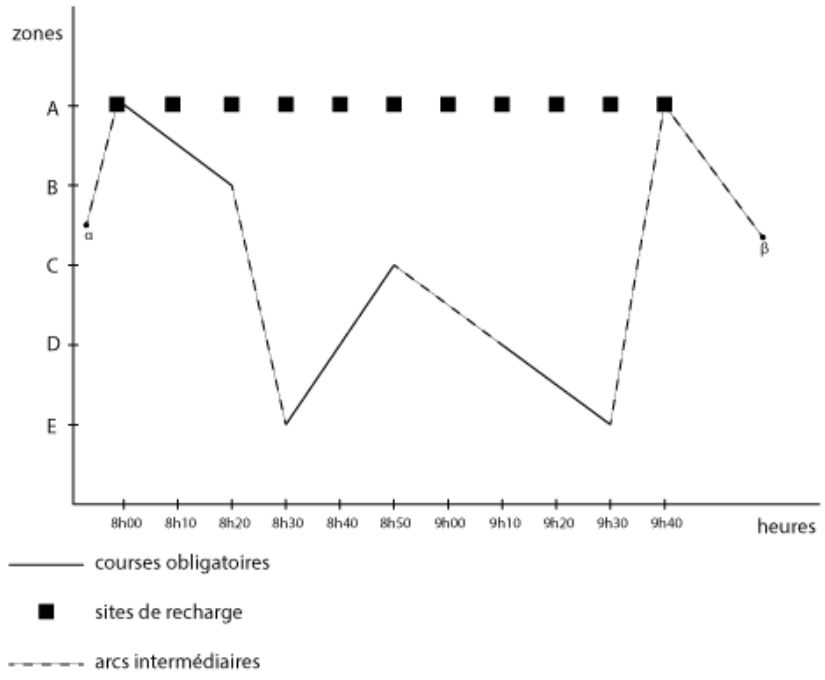


Figure 3.7 : Illustration d'un cas simple (après résolution)

# CHAPITRE 4 RÉSOLUTION ET RÉSULTATS

Ce chapitre vise à mettre en évidence les différentes expériences et tests réalisés grâce aux modèles mathématiques présentés précédemment. Ainsi, nous présentons successivement les résolutions effectuées de même que les multiples résultats obtenus tous basés sur un ensemble de données relatives à Téo Taxi, collectées depuis le lancement du projet et ce jusqu'au 13 janvier 2017. Dans un premier temps, nous évaluons les résultats obtenus après résolution des modèles 1, 2 et 1Bis. Enfin nous proposons une série de résultats supplémentaires appliqués aux circonstances plus récentes de Téo Taxi.

## 4.1 Résolution Modèle 1

### 4.1.1 Réseau de recharge optimal

La première expérience réalisée consiste en la recherche du nombre de sites de recharge optimal sur le territoire défini précédemment. Pour cela nous avons considéré l'ensemble des courses réalisées depuis la dernière extension du territoire de desserte, soit du 14 septembre 2016 au 13 janvier 2017 (disponibles à la réalisation de ce projet). Les calculs ont été effectués pour les deux conditions extrêmes de circulation : écoulement libre (EL) et pointe du matin (PAM).

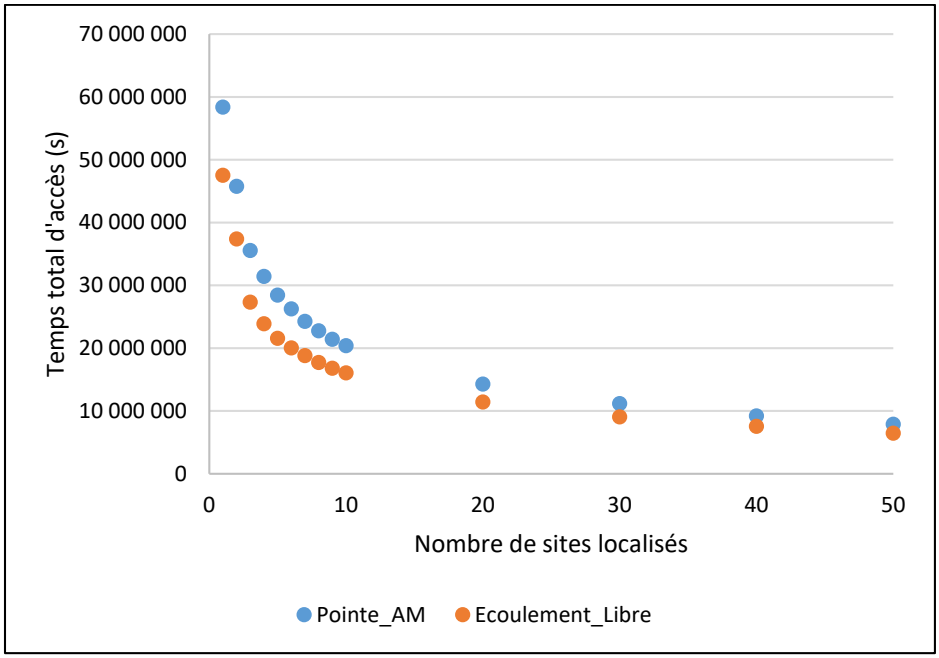


Figure 4.1 : Évolution du temps total d'accès avec le nombre de sites localisés

Avec cette étude, nous mettons en évidence l'impact du nombre de sites de recharge implantés sur l'accessibilité à la recharge (Figure 4.1). En effet, le temps total d'accès diminue avec l'augmentation du nombre de sites localisés optimalement. Ainsi, implanter un nombre plus important de sites offre une meilleure proximité aux véhicules pour aller se recharger. Cependant, on peut se rendre compte que les gains ne sont pas aussi conséquents selon le nombre de sites que l'on souhaite localiser.

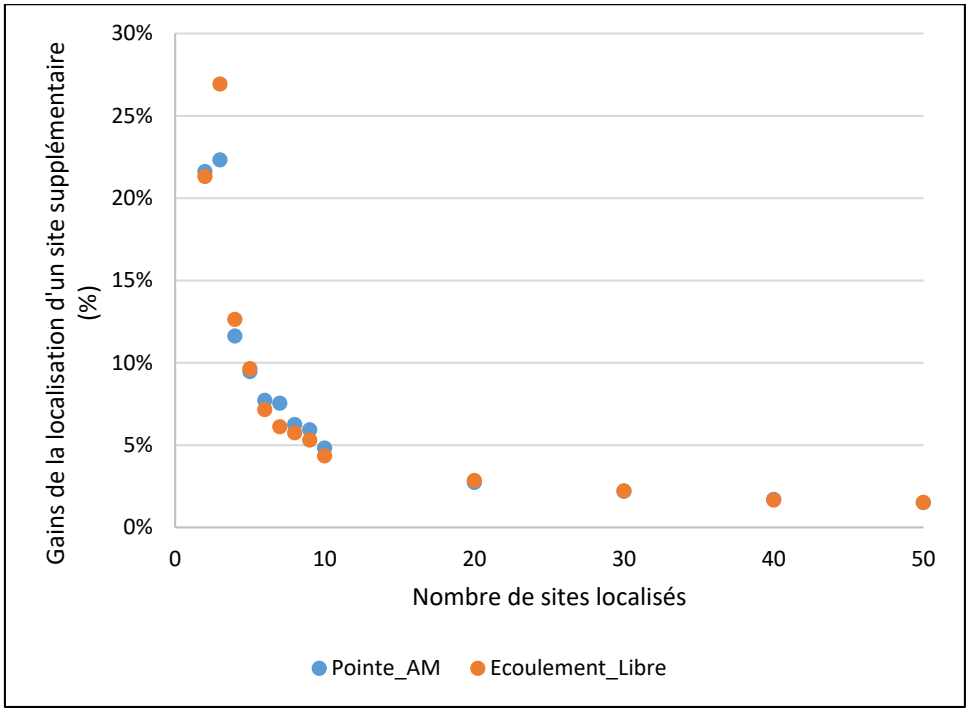


Figure 4.2 : Gains de localisation d'un site supplémentaire selon le nombre de sites localisés

La Figure 4.2 met en évidence la réduction des gains par l'ajout d'un site supplémentaire avec l'augmentation du nombre de stations de recharge implantées. On constate donc là qu'à partir d'une dizaine de sites localisés, le gain sur le temps d'accès total est inférieur à 5% par rapport à une configuration avec un site en moins. Ces résultats sont valables sur la période et le territoire défini à la section 3.3.1. Par ailleurs, en plus de cet aspect purement opérationnel sur le gain de temps d'accès, des considérations économiques devraient être prises en compte dans le choix du nombre maximal de sites à localiser. Ces décisions devant être prises à un niveau stratégique, en s'appuyant sur des données de valeur financière des terrains et locaux sur le territoire d'étude.

Par la suite, nous nous appuyons donc sur les choix et configurations actuels de Téo Taxi pour présenter différents résultats d'optimisation.

### 4.1.2 Localisation de trois sites

En date du mois de mars 2017, Téo Taxi est en possession de trois sites de recharge pour sa flotte de véhicules électriques. Tous les trois sont situés sur l'île de Montréal et dans le territoire de desserte : le premier est localisé au niveau de l'Aéroport international Pierre-Elliott-Trudeau (SR : 4620433), le deuxième rue St-Patrick le long du canal Lachine (SR : 4620076) et le troisième est au centre-ville au niveau de la Caisse de dépôt (SR : 4620062). Afin de permettre cette deuxième étude et des comparaisons valables pour la suite, nous avons fait le choix de relocaliser ces trois sites aux centroïdes de leur SR (Figure 4.3).

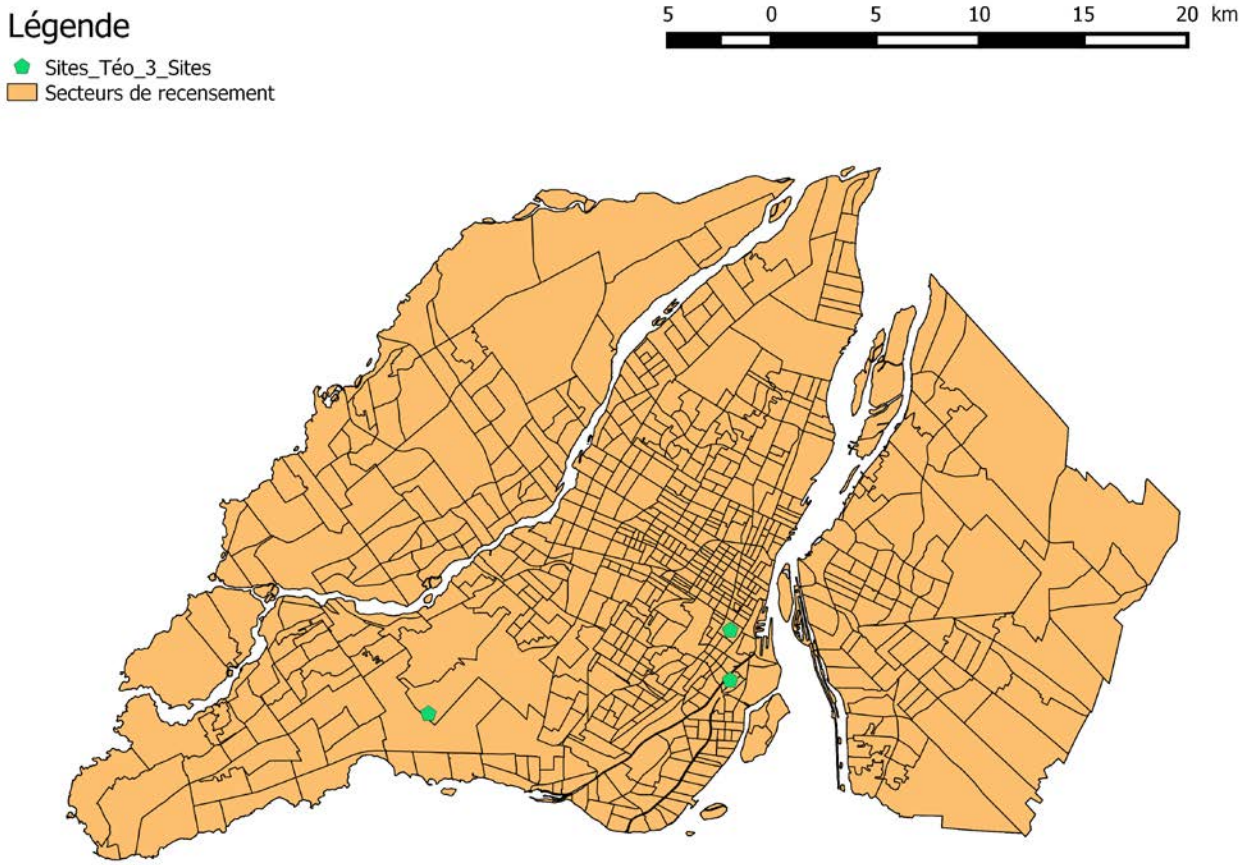


Figure 4.3 : Localisation des trois sites de recharge Téo Taxi

Le but de cette deuxième expérience est de confronter la localisation actuelle des trois sites de recharge Téo Taxi avec une localisation optimale de trois sites sur le territoire d'étude. Nous avons

considéré, ici encore, les enregistrements de courses réalisées depuis la dernière extension du territoire de desserte dans leurs ensembles et semaine par semaine. Cette période s'étend de la semaine 37 de l'année 2016 à la semaine 1 de l'année 2017.

Sur l'ensemble de la période, nous obtenons les configurations présentées aux figures 4.4 et 4.5, pour les conditions d'écoulement libre et de pointe du matin, respectivement. Dans le premier cas, les sites sont localisés aux SR 4620062, 4620210 et 4620433, dont deux sont identiques aux sites Téo Taxi. Dans le second cas, ils sont situés aux SR 4620069, 4620172 et 4620433 et seul le site de l'aéroport est identique.

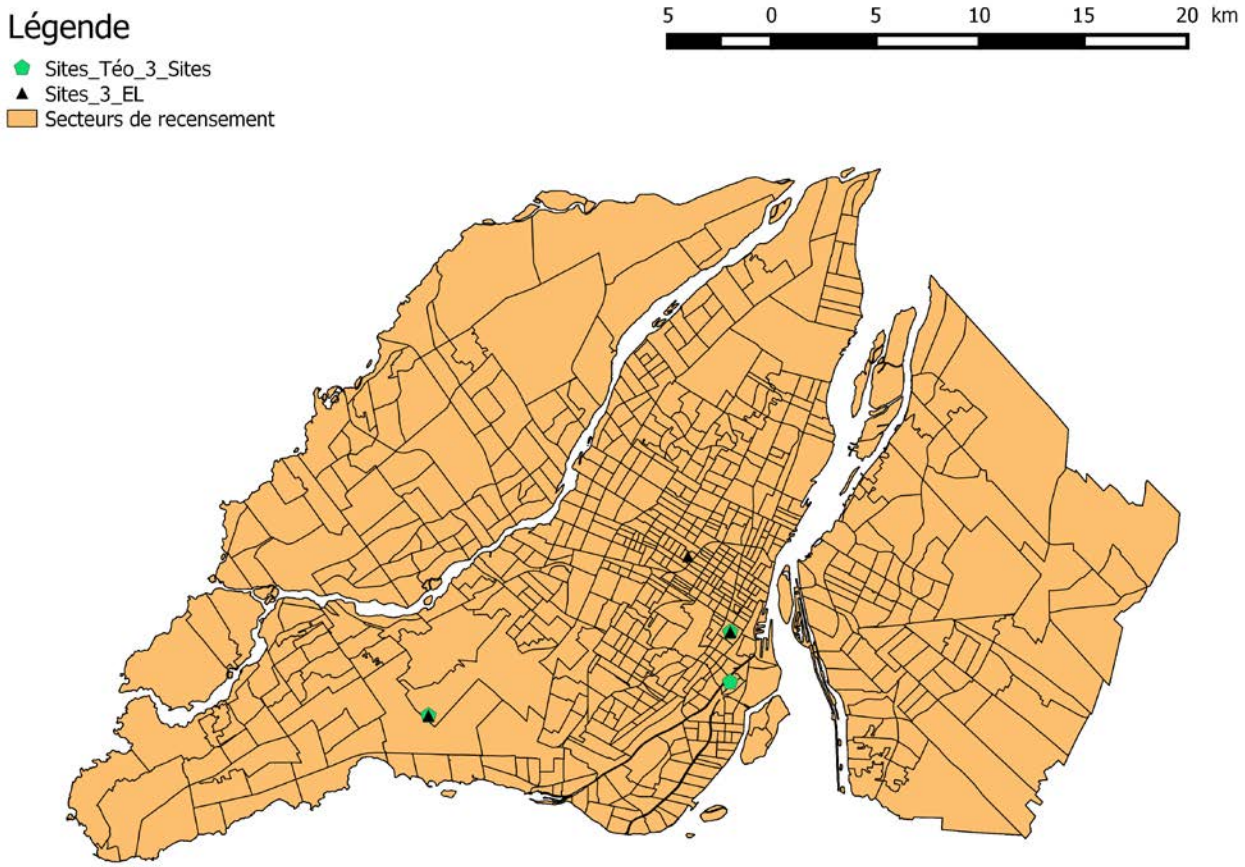


Figure 4.4 : Localisation optimale de trois sites de recharge en condition d'écoulement libre

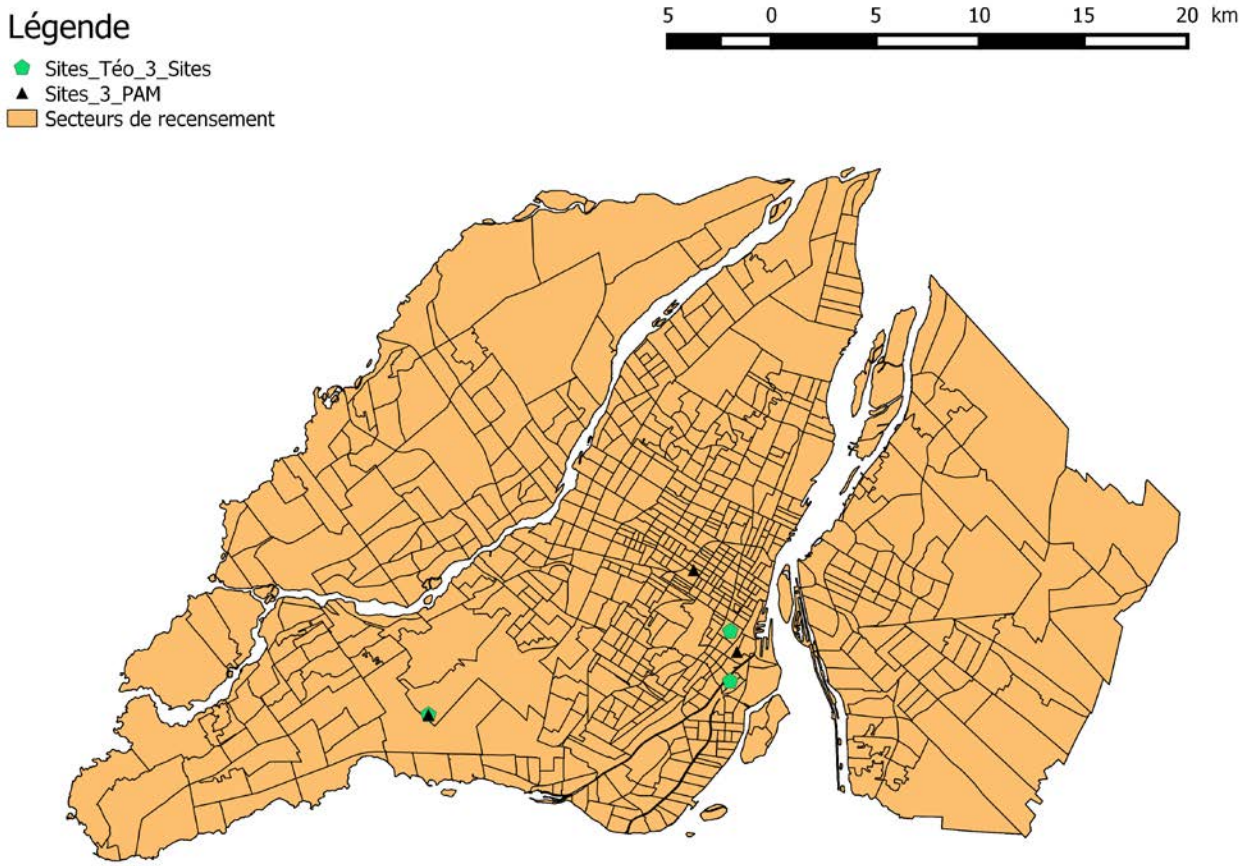


Figure 4.5 : Localisation optimale de trois sites de recharge en condition de pointe du matin

La localisation de ces trois sites étant différente de la configuration actuelle du réseau de recharge de Téo Taxi, il est à présent intéressant de constater ce qu'apporterait une telle configuration. Ainsi, on peut relever le temps total d'accès au réseau de recharge (valeur de la fonction objectif). Si l'on étudie le cas de la période complète (qui s'étend du 14 septembre 2016 au 13 janvier 2017), dans les conditions de pointe du matin, on constate un gain de près de 21% sur le temps total d'accès pour le cas optimal par rapport au cas actuel de Téo Taxi. De la même manière, pour le cas de l'écoulement libre, le gain est de 23%.

Parallèlement à cela, force est de constater que malgré des configurations différentes pour les deux conditions de circulation, elles restent relativement proches. En effet, les SR 4620062 et 4620069 sont voisins et il en est de même pour les SR 4620210 et 4620172.

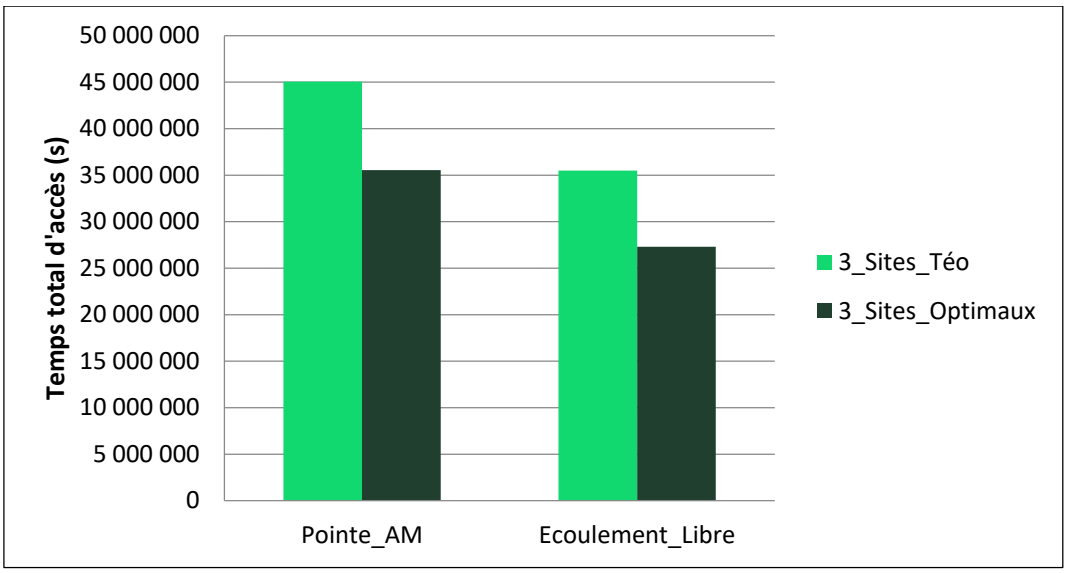


Figure 4.6 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations et les conditions de circulation

Nous avons décidé de ne pas seulement nous limiter à cette période étendue de quatre mois et dans la suite, nous avons pris les semaines qui constituent cette période une à une afin d'observer quelles localisations des sites cela engendrerait.

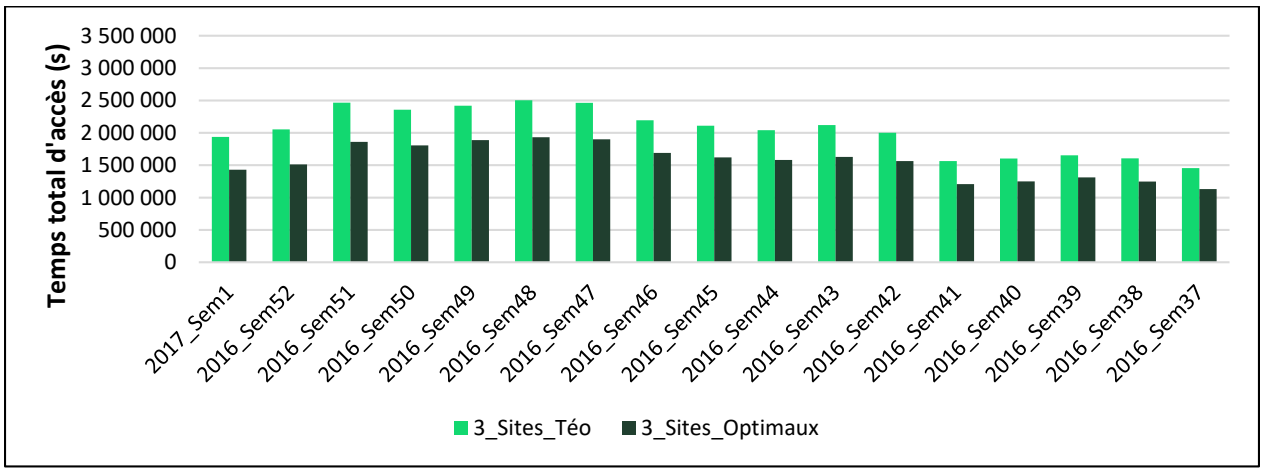


Figure 4.7 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en écoulement libre, semaine par semaine

Dans les conditions de l'écoulement libre, aucun changement n'a été observé, pour chaque semaine étudiée, les localisations optimales des sites de recharge sont celles des SR 4620062, 4620210 et 4620433.

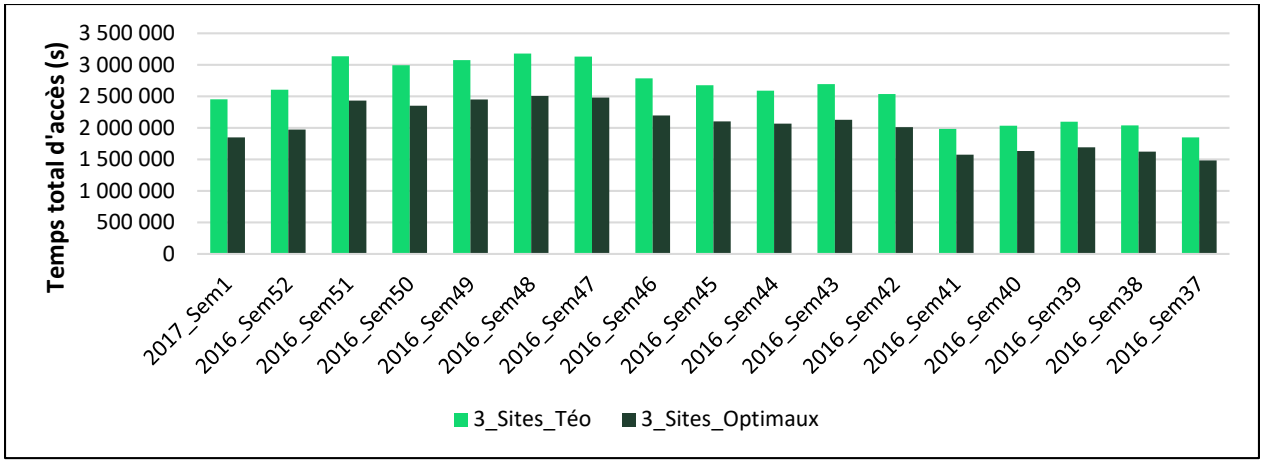


Figure 4.8 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en pointe du matin, semaine par semaine

Dans le cas de la pointe du matin, on observe peu de changement. Pour la plupart des semaines les SR de localisation restent les suivants : 4620069, 4620172 et 4620433, hormis pour les semaines 39, 40, 42 et 44, où l'on remarque la configuration suivante : 4620069, 4620161 et 4620433. Cependant, il faut noter que les SR 4620161 et 4620172 sont voisins, donc les deux configurations évoquées restent proches.

### 4.1.3 Localisation de quatre sites

Dans un second temps, nous évaluons des configurations du réseau de recharge à quatre sites. Comme évoqué précédemment, trois sites sont en service (au mois de mars 2017) et on peut ajouter à cela un quatrième site envisagé par l'entreprise Taxelco. Celui-ci se situerait au croisement des autoroutes 15 et 40 (SR : 4620402). La configuration des sites de recharge Téo Taxi est ainsi présentée à la Figure 4.9, lorsque les sites sont situés au centre du SR qui leur est associé.

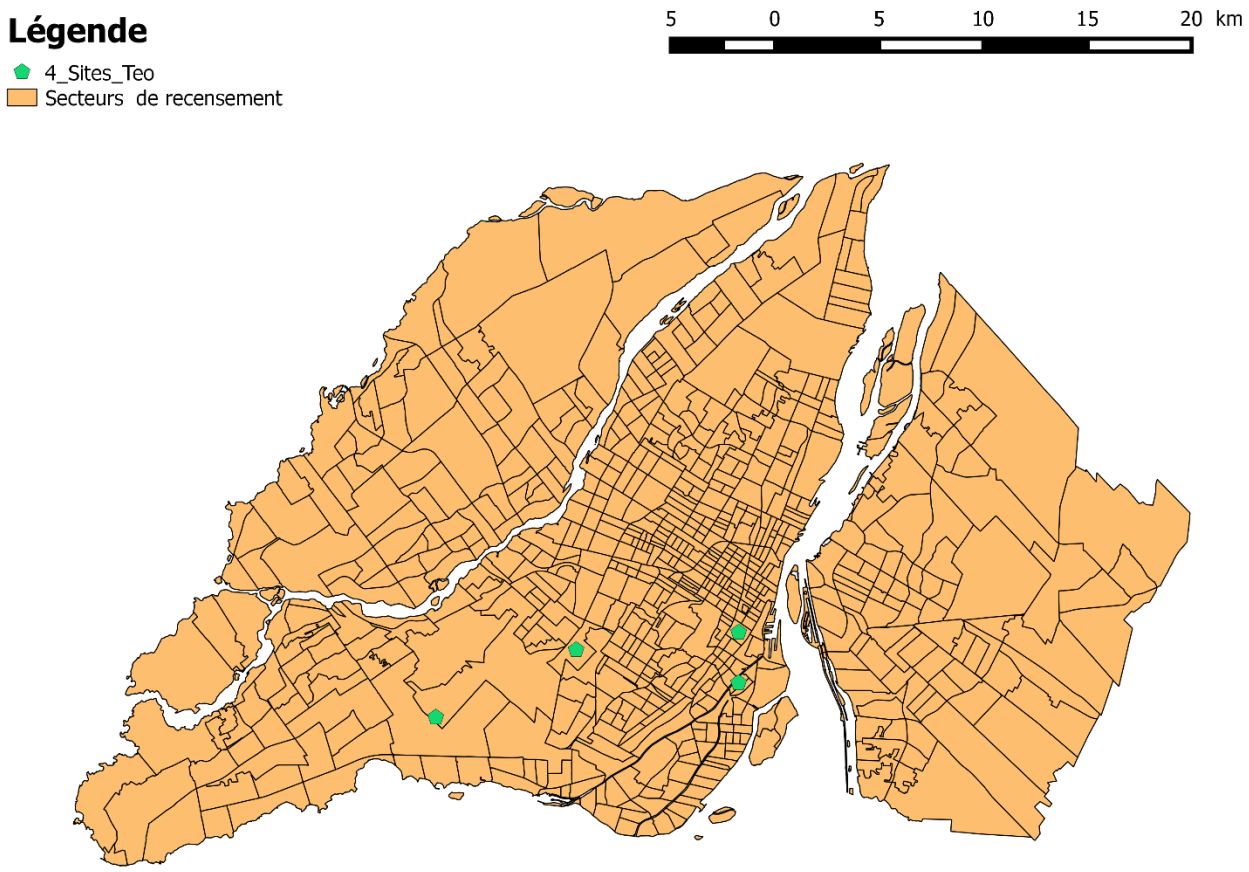


Figure 4.9 : Localisation des quatre sites de recharge Téo Taxi

Dans la suite de cette section, nous présentons deux choix d'optimisation que nous comparons au cas de configuration présenté ci-dessus. Le premier cas est la localisation optimale de quatre sites. Pour le second cas, nous considérons les trois sites de Téo Taxi effectivement en service (comme présentés à la partie 4.1.2) et localisons optimalement le quatrième site. Ces études sont effectuées sur les mêmes périodes que pour le cas de trois sites, à savoir de la semaine 37 de l'année 2016 à la semaine 1 de l'année 2017.

Les résultats de l'optimisation de localisation des quatre sites sont présentés aux figures 4.10 et 4.11. La Figure 4.10 représente la configuration optimale pour l'ensemble de la période étudiée, que ce soit dans les conditions de circulation en écoulement libre ou en pointe du matin. Les SR sélectionnés pour accueillir les sites sont alors : 4620069, 4620148, 4620364, 4620433. Si l'on compare ces résultats aux sites Téo Taxi, nous pouvons constater qu'un seul site est commun, celui de l'aéroport (SR 4620433), les autres proposent des emplacements différents. Nous remarquons cependant que le site du SR 4620069, situé au centre-ville, est localisé à mi-chemin des deux sites

Téo Taxi des SR 4620062 et 4620076. Les deux derniers sites sont localisés plus au nord à Outremont à proximité de la voie de chemin de fer et sur le Plateau-Mont-Royal à proximité du parc La Fontaine.

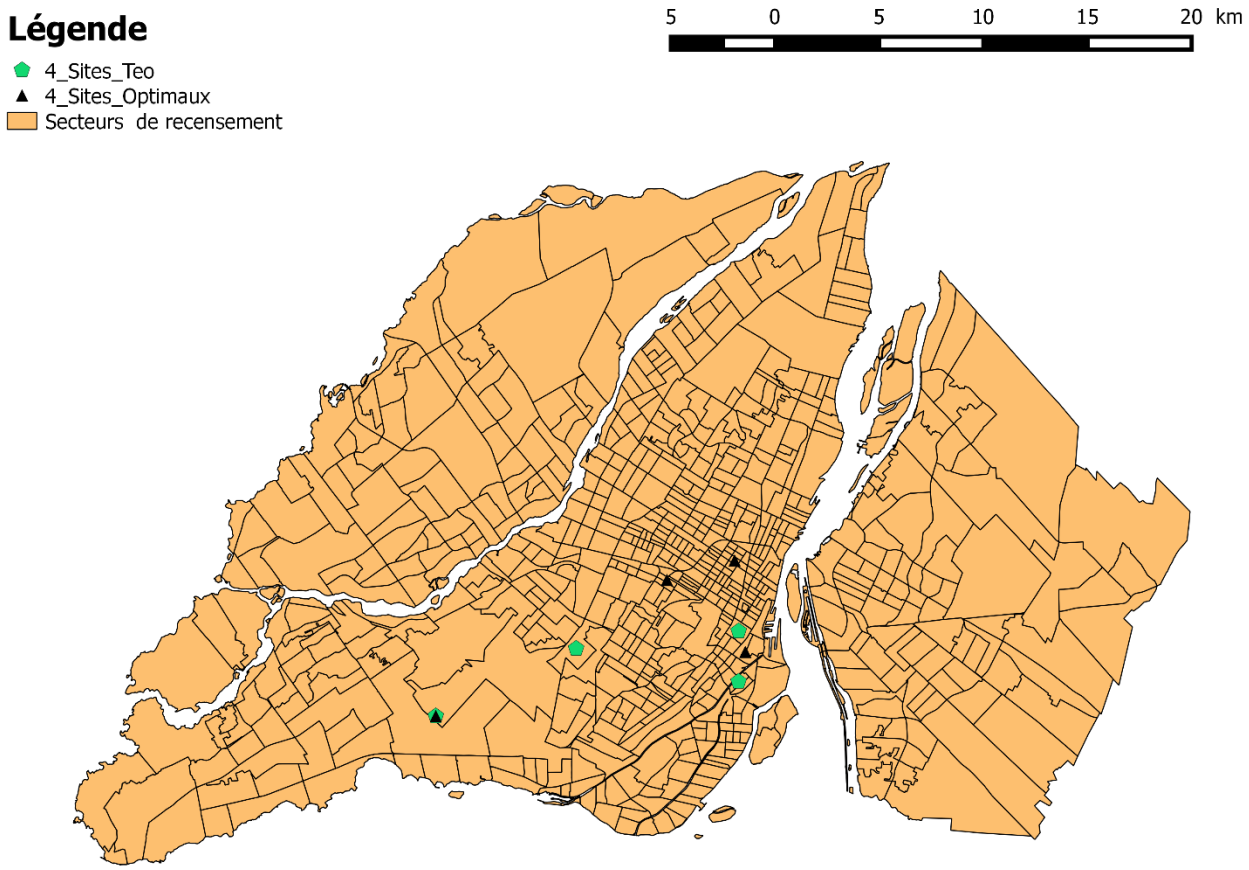


Figure 4.10 : Localisation optimale de quatre sites de recharge (période complète)

Lorsque nous effectuons l'optimisation semaine par semaine (sur la même période d'étude), la configuration majoritaire obtenue est celle représentée ci-dessus. Mais dans le cas des conditions de circulation en écoulement libre, la configuration présentée en Figure 4.11 revient à plusieurs reprises (7/17 semaines, soit plus de 40% des cas). Cette seconde configuration diffère peu de la précédente, avec un seul site relocalisé dans un SR voisin : le SR 4620062 est sélectionné au lieu du SR 4620069. Le site se trouve alors sur le site actuel de Téo Taxi, à la Caisse de dépôt. Le reste demeure inchangé.

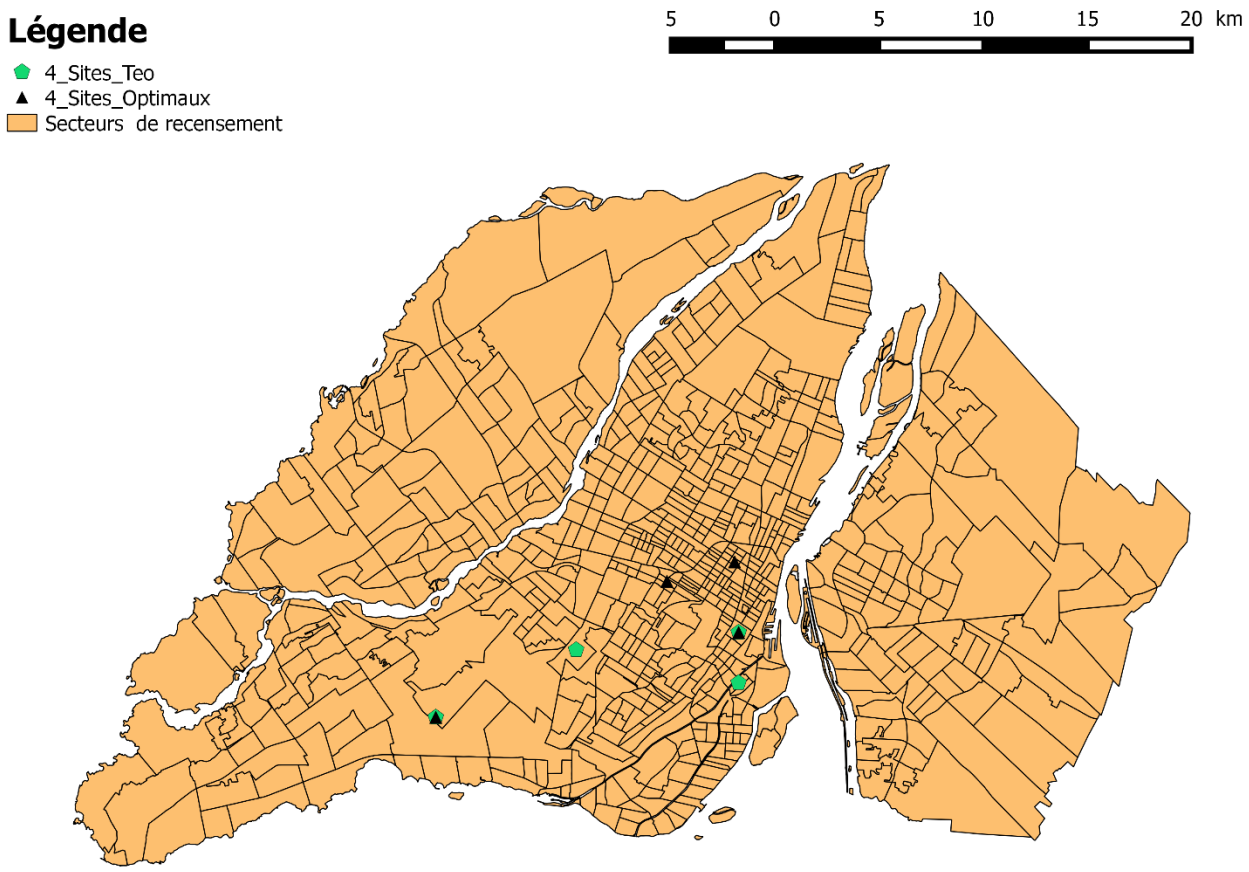


Figure 4.11 : Localisation optimale de quatre sites de recharge (fréquemment rencontrée)

La deuxième étape de cette série d'études est la localisation d'un quatrième site optimal, sur la base des trois sites détenus actuellement par Téo Taxi. Comme précédemment, nous effectuons les résolutions pour les deux conditions de circulation (en pointe du matin et en écoulement libre). Les configurations obtenues sont représentées aux figures 4.12 et 4.13. Dans les deux cas, le site au croisement des autoroutes 15 et 40 n'est pas conservé et est relocalisé plus au Nord-Est le long de la voie de chemin de fer. Pour le cas de la pointe du matin, le SR sélectionné est le 4620172, à proximité des stations de métro Rosemont et Laurier. Pour le cas de l'écoulement libre, c'est le SR 4620210 qui est sélectionné, au nord des stations de métro Beaubien et Rosemont. Les résultats pour les optimisations semaine par semaine sont similaires, à l'exception d'une semaine (la semaine 52 de l'année 2016) pour le cas de la pointe du matin où le quatrième site se localiserait au SR 4620210, comme en cas d'écoulement libre. Nous constatons, une fois encore, que les résultats présentés diffèrent peu selon les conditions de circulation, car les SR sélectionnés sont voisins.

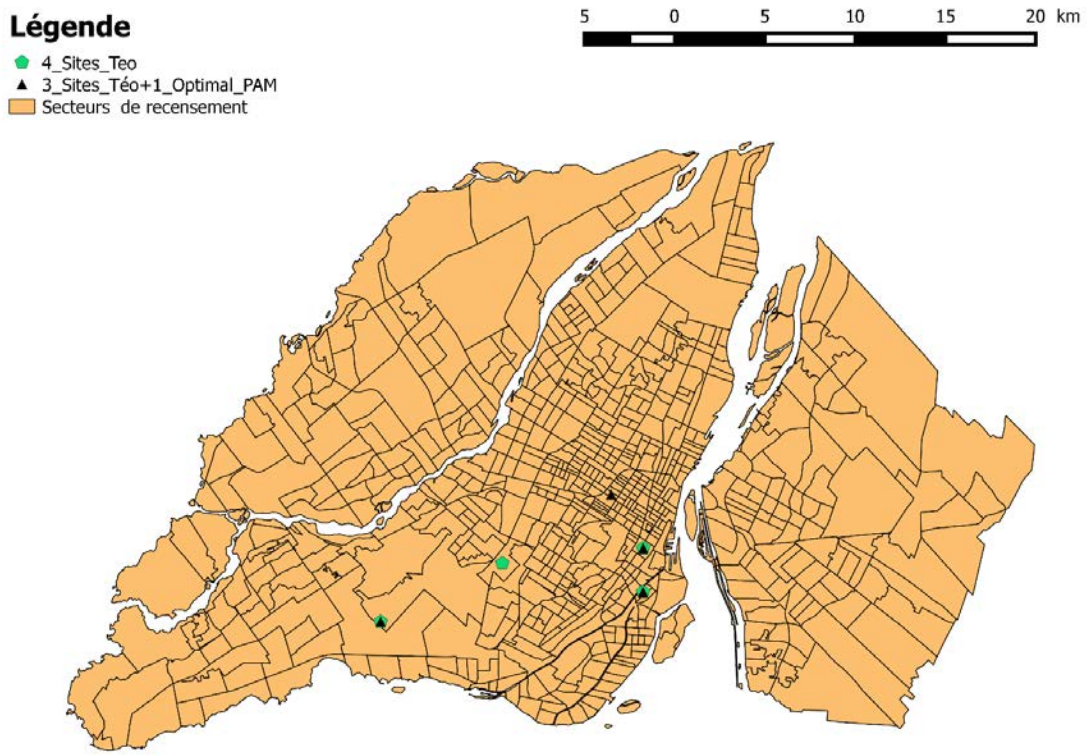


Figure 4.12 : Localisation d'un quatrième site optimal dans les conditions de pointe du matin

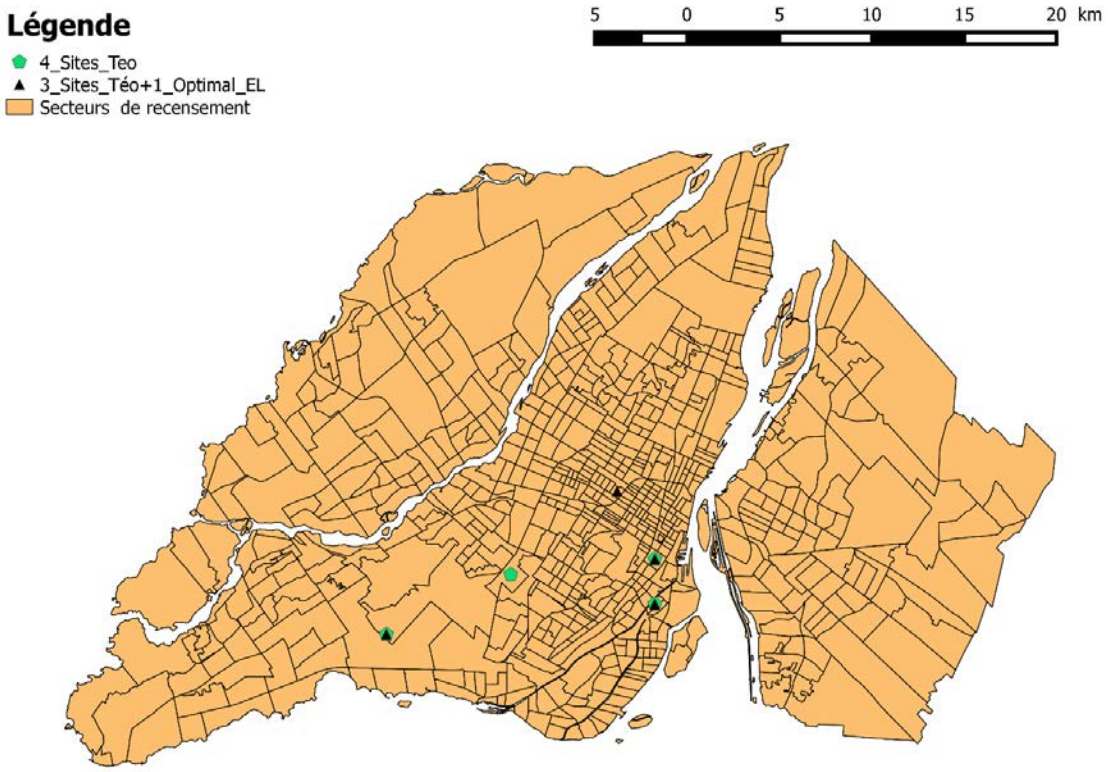


Figure 4.13 : Localisation d'un quatrième site optimal dans les conditions d'écoulement libre

Afin de comparer les différents cas de configuration du réseau de recharge, nous présentons les résultats d'optimisation dans les trois graphiques ci-dessous (Figures 4.14, 4.15 et 4.16). Comme dans la section précédente, nous appuyons nos comparaisons sur les valeurs de la fonction objectif, à savoir, le temps total d'accès aux sites de recharge. Nous observons donc, comme à la section précédente que la configuration le plus favorable est celle où la localisation des quatre sites est optimisée. À l'inverse le cas le plus défavorable est celui de la configuration de Téo Taxi. Enfin, la configuration avec les trois sites Téo Taxi et le quatrième localisé optimalement constitue une solution intermédiaire. La localisation optimale des quatre sites de recharge, sur la période d'étude complète, offre un gain de plus de 27% en termes de temps total d'accès par rapport au cas des quatre sites Téo Taxi, en pointe du matin et un gain de plus de 30%, en écoulement libre. Avec la localisation optimale du quatrième site, on constate un gain de plus de 23%, en pointe du matin et un gain de 26%, en écoulement libre. Ainsi, nous pouvons remarquer que les gains apportés par la localisation optimale d'un quatrième site sont tout à fait importants relativement à la configuration avec quatre sites optimalement situés. Il semble donc réellement intéressant d'étudier la localisation des sites futurs de manière à maximiser la proximité aux SR visités.

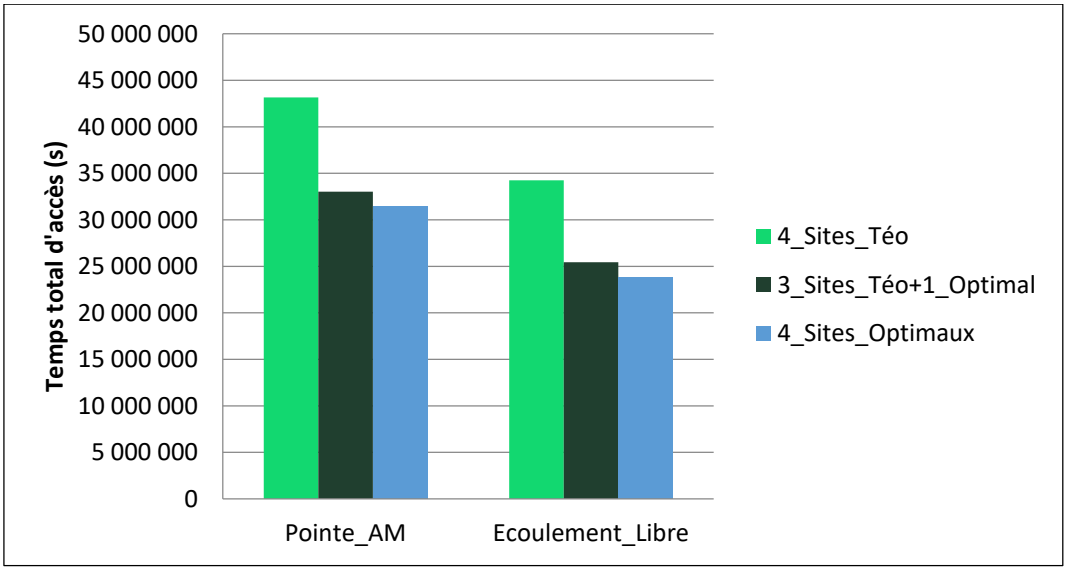


Figure 4.14 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations et les conditions de circulation

Nous pouvons effectuer les mêmes constatations sur les résultats obtenus semaine par semaine, dans les deux conditions de circulation : en pointe du matin (Figure 4.15) et en écoulement libre (Figure 4.16).

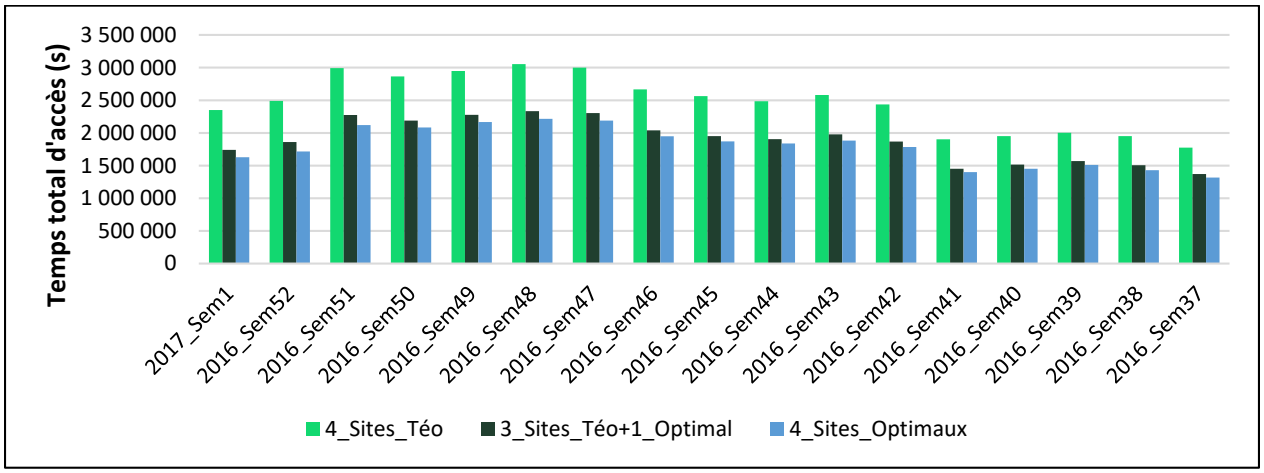


Figure 4.15 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en pointe du matin, semaine par semaine

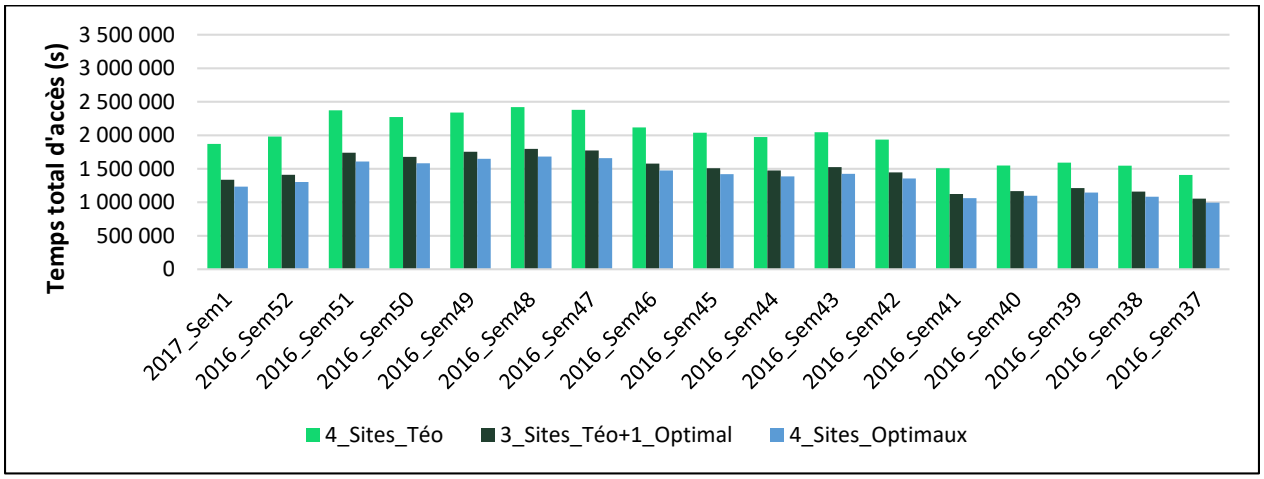


Figure 4.16 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en écoulement libre, semaine par semaine

## 4.2 Résultats Modèle 2

Dans cette nouvelle section, nous présentons les résultats obtenus suite à l'exécution du modèle 2. Pour rappel, il s'agit du modèle dédié à l'attribution des courses à une flotte de taxis dans le but de minimiser le nombre de véhicules en service. Lors de ces expériences, nous prenons en compte les

différentes configurations de localisation présentées à la partie précédente. Comme pour le modèle 1, nous réalisons nos études sur le territoire d'étude désigné, divisé en 699 SR. De plus, nous choisissons de discrétiser le temps avec un pas de 5 min. Ce choix de pas est fait afin d'avoir une vision suffisamment fine, sachant qu'en moyenne les courses de taxis ont une durée comprise entre 10 et 15 minutes, mais sans que ce pas ne soit trop faible, auquel cas la taille du problème exploserait et de la même manière le temps de traitement et les temps de calcul.

Il est important de préciser également que concernant la recharge des véhicules, nous considérons l'échange de véhicules aux sites. Cela se traduit par une recharge totale sur les arcs de recharge. Nous faisons ce choix, car il s'agit de la politique de recharge déployée par Téo Taxi, au moment de nos études.

Pour illustrer nos expériences, nous présentons les résultats obtenus pour la journée de service du 10 octobre 2016 (lundi). Pour des considérations techniques de capacité et temps de calcul, nous faisons le choix de simuler seulement une période de 6h et non une journée complète de 24h. Cela permet, par ailleurs, de limiter le territoire d'étude aux SR concernés par les courses (origines et destinations) et les SR accueillant les stations de recharge.

De plus, à propos des choix de paramètres, nous avons réalisé les études suivantes en ne prenant en compte qu'un seul modèle de véhicules : la Nissan Leaf (détails à la partie 3.3.4).

Le premier cas que nous exposons est celui du 10 octobre 2016, entre minuit et 6h, dont les détails sont présentés ci-dessous.

Tableau 4.1 : Détails de l'expérience du 10 octobre 2016

| Date | Période | Nombre de courses | Nombre de SR en jeu |
|---|---|---|---|
| 10/10/2016 | 0h – 6h | 45 | 82 |

Il s'agit ici, d'un exemple relativement restreint en termes de nombre de courses à satisfaire et donc d'étendue du territoire à considérer pour entreprendre les résolutions. La résolution de ce cas est réalisée avec les paramètres CPLEX définis ci-dessous.

```
option solver amplcplex;
option cplex_options 'mipgap=0.1 mipemphasis=1 mipalgorithm=3
startalgorithm=3';
```

Figure 4.17 : Paramètres CPLEX pour la résolution du cas du 10 octobre 2016

Les paramètres présentés permettent d'orienter le solveur dans la résolution, à savoir que les paramètres *startalgorithm* et *mipalgorithm*, définissent l'algorithme de résolution pour la relaxation initiale et les sous-problèmes de l'arbre de résolution, respectivement. Le paramètre *mipemphasis* permet de définir la stratégie de résolution à mettre en œuvre. Enfin, le paramètre *mipgap* définit le niveau de précision de la solution que l'on souhaite obtenir.

Pour traiter ce cas, nous avons choisi de confronter les différentes configurations de localisation mises en évidence à la section précédente : 3 sites Téo, 3 sites optimaux, 4 sites Téo, 4 sites optimaux, et 3 sites Téo et 1 optimal.

Nous pouvons constater que sur cet exemple, les différentes configurations n'influent pas sur le nombre de taxis en service pour satisfaire les courses. Pour ce cas, huit taxis sont nécessaires afin de répondre à la demande en entrée.

Tableau 4.2 : Valeurs de l'objectif sur les cas du 10 octobre 2016

| Configuration des stations | Nombre de taxis mis en services |
|---|---|
| 3 sites Téo | 8 |
| 3 sites optimaux | 8 |
| 4 sites Téo | 8 |
| 4 sites optimaux | 8 |
| 3 sites Téo et 1 site optimal | 8 |

Les résultats présentés au Tableau 4.2 ne permettent effectivement pas de faire prévaloir une configuration par rapport aux autres. Sur cet exemple, le modèle 2 ne permet pas de valider les

gains démontrés au paragraphe précédent, au niveau du nombre de taxis à mettre en service pour satisfaire toute la demande. Pour cela, il serait nécessaire de réaliser d'autres simulations : sélectionner d'autres journées et choisir une période plus longue (supérieure à six heures).

## 4.3 Résultats Modèle 1Bis

Dans cette nouvelle partie, nous mettons en avant les résultats obtenus avec le modèle 1Bis. Comme il a été mentionné au paragraphe 3.4.2, nous traitons le problème de la configuration des stations de recharge, c'est-à-dire que nous déterminons le nombre de bornes à installer à chacune des stations. Par ailleurs, le modèle précédent offre parmi ses résultats une vision sur la sollicitation des sites de recharge de taxis, nous proposons donc d'établir une comparaison entre les différents résultats.

Nous prenons donc en premier lieu, l'exemple du 10 octobre 2016 entre 0h et 6h. Pour cette première expérience, nous avons décidé de répartir 50 bornes de recharge, ce qui correspond environ à 50% des permis de taxis de Téo.

Tableau 4.3 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h pour 50 bornes (modèle 1Bis)

| 3 sites optimaux | | | 4 sites optimaux | | | 3 sites Téo + 1 site optimal | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % |
| 4620069 | 23 | 46% | 4620069 | 16 | 32% | 4620062 | 16 | 32% |
| 4620172 | 23 | 46% | 4620148 | 19 | 38% | 4620076 | 8 | 16% |
| 4620433 | 4 | 8% | 4620364 | 11 | 22% | 4620172 | 22 | 44% |
| | | | 4620433 | 4 | 8% | 4620433 | 4 | 8% |
| total | 50 | 100% | total | 50 | 100% | total | 50 | 100% |

Le Tableau 4.3 présente les résultats obtenus pour les trois cas optimisés présentés précédemment. Il est alors possible d'envisager la répartition des bornes aux sites sélectionnés.

Cependant, comme le modèle 2 nous permet de connaître dans quelle mesure chacune des stations de recharge est sollicitée nous proposons, grâce aux tableaux 4.4 et 4.5, une comparaison de ces résultats. Pour ce cas, nous considérons le nombre de recharges de taxis mis en évidence par la résolution du modèle 2 et définissons le nombre de bornes à répartir avec le modèle 1Bis grâce à cela. Nous pouvons alors nous intéresser à la répartition de ces bornes, proposée par le modèle 1Bis. Sur ce cas, nous constatons que les proportions ne sont pas conservées, cependant il est

important de rappeler que le cas étudié ici est assez réduit : 45 courses et une vingtaine de recharges. De plus, sur la période étudiée, les stations sont assez peu sollicitées. Cet exemple n'est sans aucun doute pas représentatif.

Tableau 4.4 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h (modèle 2)

| 3 sites optimaux | | | 4 sites optimaux | | | 3 sites Téo + 1 site optimal | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sites | NB recharges | % | Sites | NB recharges | % | Sites | NB recharges | % |
| 4620069 | 7 | 64% | 4620069 | 2 | 9% | 4620062 | 7 | 41% |
| 4620172 | 3 | 27% | 4620148 | 7 | 32% | 4620076 | 5 | 29% |
| 4620433 | 1 | 9% | 4620364 | 10 | 45% | 4620172 | 3 | 18% |
| | | | 4620433 | 3 | 14% | 4620433 | 2 | 12% |
| total | 11 | 100% | total | 22 | 100% | total | 17 | 100% |

Tableau 4.5 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h (modèle 1Bis)

| 3 sites optimaux | | | 4 sites optimaux | | | 3 sites Téo + 1 site optimal | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % |
| 4620069 | 5 | 45% | 4620069 | 6 | 27% | 4620062 | 5 | 29% |
| 4620172 | 5 | 45% | 4620148 | 7 | 32% | 4620076 | 3 | 18% |
| 4620433 | 1 | 9% | 4620364 | 7 | 32% | 4620172 | 7 | 41% |
| | | | 4620433 | 2 | 9% | 4620433 | 2 | 12% |
| total | 11 | 100% | total | 22 | 100% | total | 17 | 100% |

Nous reprenons alors le cas de la répartition de 50 bornes, cette fois-ci sur le cas d'une autre journée : 18 novembre 2016, dont les résultats sont repris dans le Tableau 4.6. Le choix de la répartition de 50 bornes, fait ici, est tout à fait arbitraire et correspond à environ 50% de la taille de la flotte de véhicules de Téo Taxi.

Tableau 4.6 : Résultats du cas 18 novembre 2016 entre 0h et 6h pour 50 bornes (modèle 1Bis)

| 3 sites optimaux | | | 4 sites optimaux | | | 3 sites Téo + 1 site optimal | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % |
| 4620069 | 23 | 46% | 4620069 | 20 | 40% | 4620062 | 19 | 38% |
| 4620172 | 25 | 50% | 4620148 | 15 | 30% | 4620076 | 8 | 16% |
| 4620433 | 2 | 4% | 4620364 | 13 | 26% | 4620172 | 21 | 42% |
| | | | 4620433 | 2 | 4% | 4620433 | 2 | 4% |
| total | 50 | 100% | total | 50 | 100% | total | 50 | 100% |

Pour finir, nous portons notre attention sur l'ensemble des courses réalisées sur toute la période d'étude. Après résolution de cas, nous obtenons les résultats présentés au Tableau 4.7. La répartition des 50 bornes se fait donc ainsi, pour les trois cas optimisés. Il semble que les proportions obtenues pour ce cas global suivent les tendances des cas particuliers du 10 octobre et du 18 novembre (Tableau 4.8).

Tableau 4.7 : Résultats sur toute la période d'étude pour 50 bornes (modèle 1Bis)

| 3 sites optimaux | | | 4 sites optimaux | | | 3 sites Téo + 1 site optimal | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % |
| 4620069 | 26 | 52% | 4620069 | 22 | 44% | 4620062 | 21 | 42% |
| 4620172 | 21 | 42% | 4620148 | 15 | 30% | 4620076 | 6 | 12% |
| 4620433 | 3 | 6% | 4620364 | 10 | 20% | 4620172 | 20 | 40% |
| | | | 4620433 | 3 | 6% | 4620433 | 3 | 6% |
| total | 50 | 100% | total | 50 | 100% | total | 50 | 100% |

Nous observons, par exemple, que dans tous les cas le site localisé à l'aéroport est le moins sollicité.

Tableau 4.8 : Comparaison des proportions de bornes aux sites (modèle 1Bis)

| 3 sites optimaux | | | | 4 sites optimaux | | | | 3 sites Téo + 1 site optimal | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sites | Période | 10/10 | 18/11 | Sites | Période | 10/10 | 18/11 | Sites | Période | 10/10 | 18/11 |
| 4620069 | 52% | 46% | 46% | 4620069 | 44% | 32% | 40% | 4620062 | 42% | 32% | 38% |
| 4620172 | 42% | 46% | 50% | 4620148 | 30% | 38% | 30% | 4620076 | 12% | 16% | 16% |
| 4620433 | 6% | 8% | 4% | 4620364 | 20% | 22% | 26% | 4620172 | 40% | 44% | 42% |
| | | | | 4620433 | 6% | 8% | 4% | 4620433 | 6% | 8% | 4% |

Afin de compléter cette analyse, il aurait été intéressant de pouvoir simuler de plus longues périodes de services de taxis avec le modèle 2, ou de simuler un échantillon de journées représentatif de la période au complet.

De plus pour définir le nombre total de bornes à localiser une analyse stricte des données Téo Taxi serait pertinente. Cela permettrait, en effet, d'évaluer les besoins globaux en recharge sur une journée.

## 4.4 Résultats supplémentaires

Comme nous avons pu en discuter précédemment dans ce mémoire, Téo Taxi évolue au fil du temps et durant nos travaux. En avril 2017 le quatrième site de recharge, au croisement des autoroutes 15 et 40 (SR 4620402) est mis en service et deux nouveaux sites sont envisagés : le premier aux alentours de la station de métro De Castelnau (SR 4620232), le second au niveau du quartier Angus (SR 4620187.01). Nous décidons donc dans cette section de réinitier notre démarche de localisation. Pour cela, nous utiliserons à nouveau les données de courses de Téo Taxi pour la période définie précédemment : mi-septembre 2016 à mi-janvier 2017, car il s'agit de nos dernières données à jour.

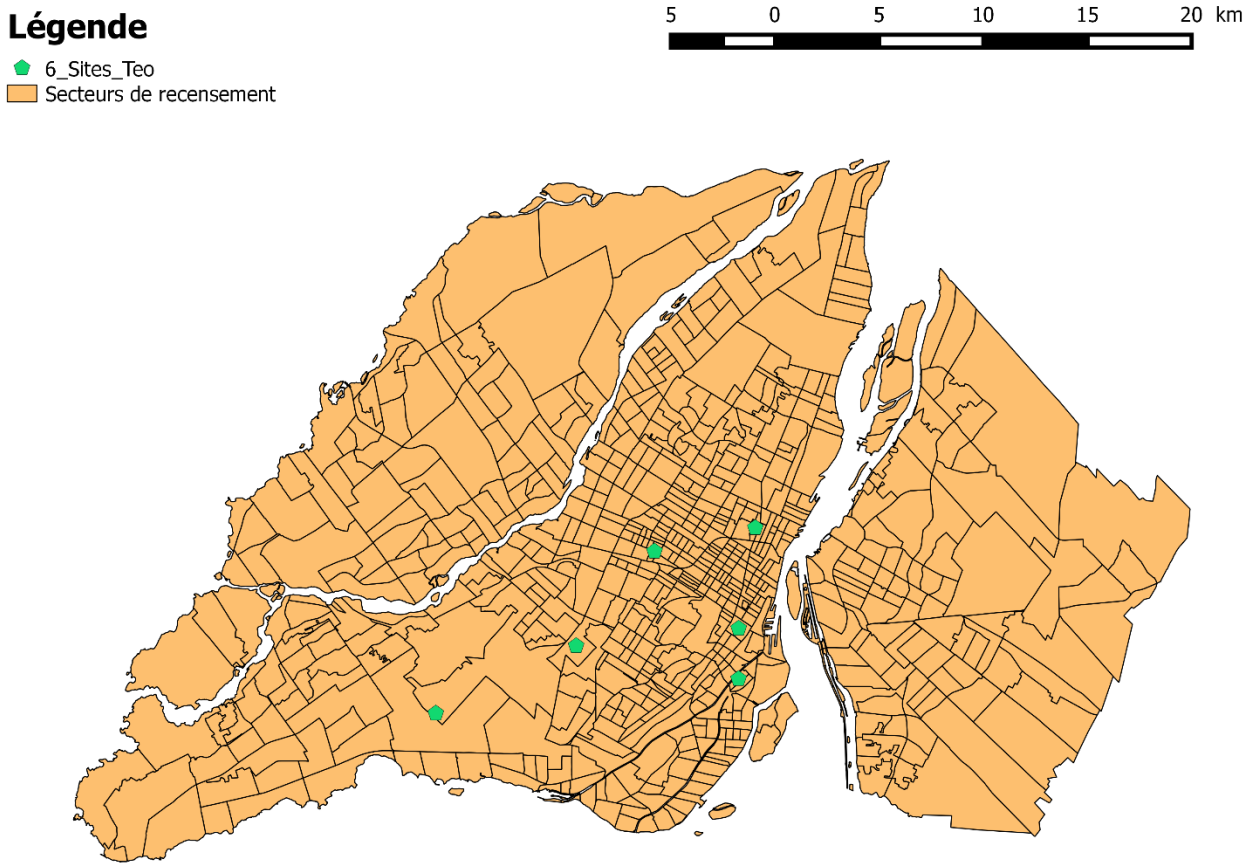


Figure 4.18 : Localisation des six sites de recharge Téo Taxi

Nous appuyons donc la suite de notre expérience sur la base des six sites Téo Taxi localisés sur la carte en Figure 4.18. Les six SR accueillant les sites sont : 4620062, 4620076, 4620187.01, 4620232, 4620402 et 4620433.

Le premier choix d'optimisation que nous faisons pour cet exemple est la localisation de six sites optimaux sur le territoire. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 4.19.

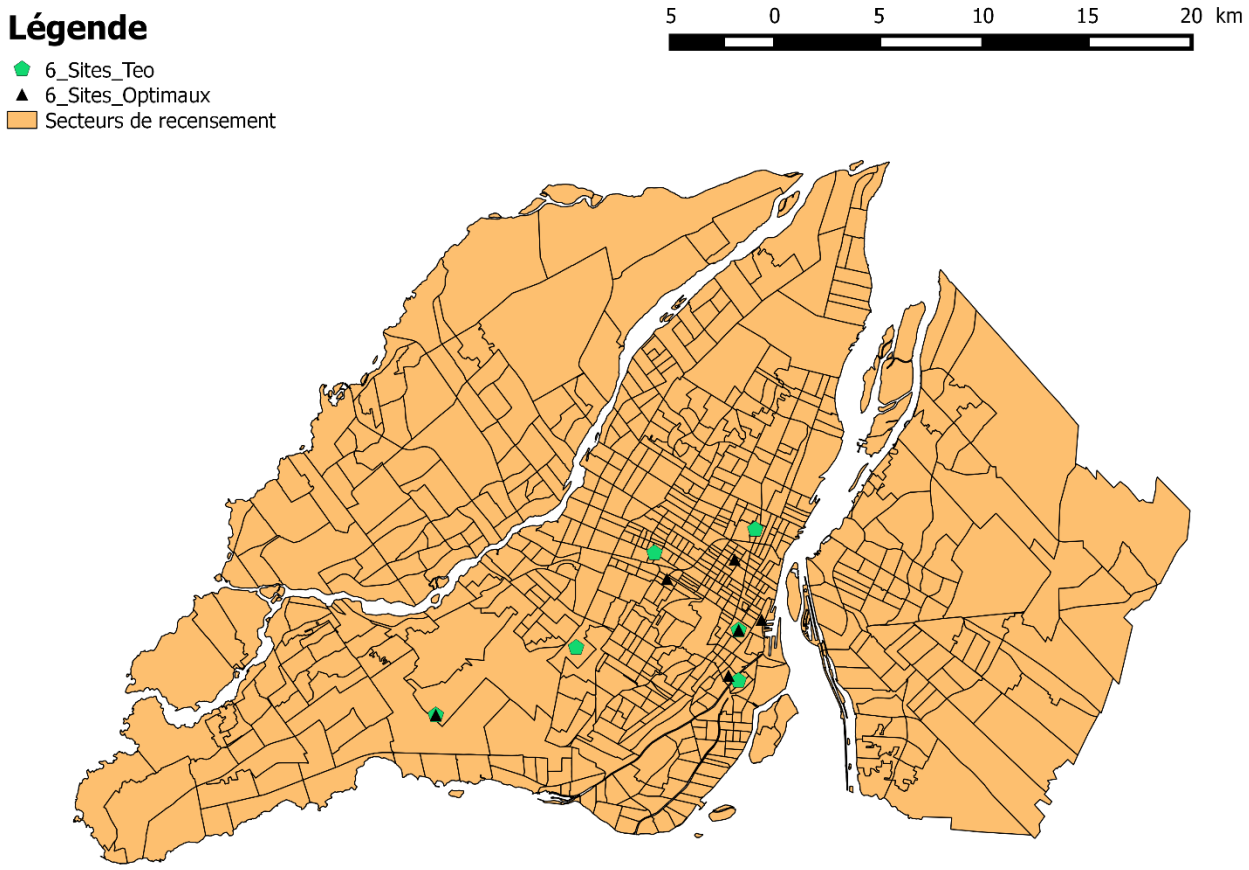


Figure 4.19 : Localisation optimale de six sites de recharge

Les SR déterminés après optimisation sont donc les suivants : 4620055.01, 4620062, 4620078, 4620148, 4620364 et 4620433. Ces résultats sont valables pour les calculs sur l'ensemble de la période, que ce soit dans les conditions de circulation en écoulement libre ou en pointe du matin. Comme pour les études présentées au paragraphe 4.1, nous avons effectué ces calculs semaine par semaine pour les deux conditions de circulation. Pour le cas de l'écoulement libre, ce résultat est valide pour 15 semaines sur 17 (soit plus de 88% des cas), pour le cas de la pointe du matin il est valide pour 14 semaines sur 17 (soit plus de 82% des cas). Pour les cinq semaines restantes, la localisation des sites de recharge reste voisine de celle-ci.

Pour la seconde partie de l'expérience, nous avons fait le choix de conserver les quatre sites Téo Taxi mentionnés pour envisager la localisation optimale des deux sites supplémentaires. Les résultats obtenus sont représentés en Figure 4.20.

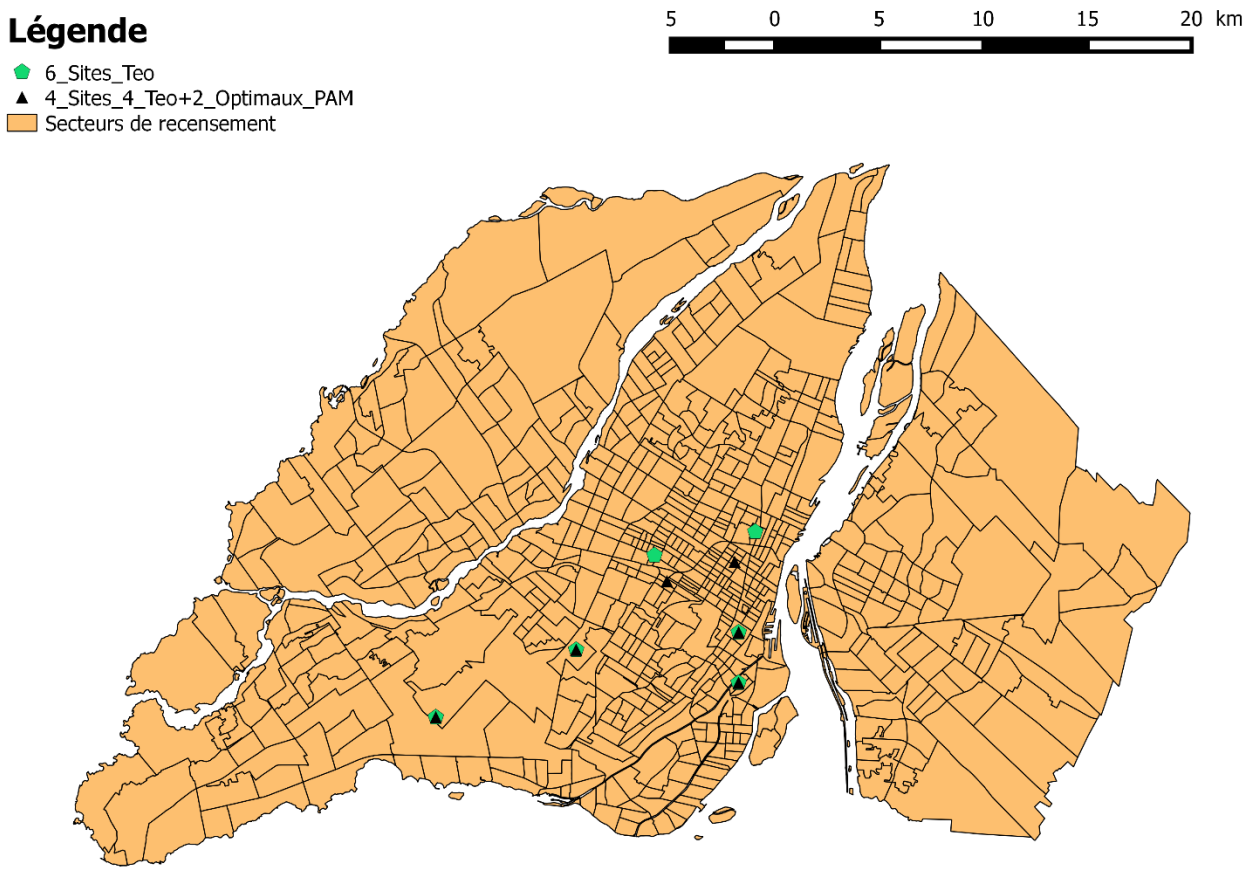


Figure 4.20 : Localisation des cinquième et sixième sites optimaux

À la suite de la résolution de ce cas, les deux SR sélectionnés pour accueillir les deux sites supplémentaires sont 4620148 et 4620364. Le résultat présenté est à nouveau valable pour les études sur la période dans son intégralité, que ce soit en écoulement libre ou en pointe du matin. Pour ce qui est du cas semaine par semaine, cela est valide en écoulement libre 16 semaines sur 17 (soit plus de 94% des cas), en pointe du matin les résultats sont plus nuancés, car cela ne représente que 9 semaines sur 17 (soit plus de 52% des cas). Cependant nous pouvons constater que les localisations proposées pour les semaines restantes demeurent voisines de celle-ci.

Nous utilisons alors la même méthode qu'auparavant pour comparer ces trois configurations de localisation, nous nous appuyons sur la valeur de la fonction objectif. Les résultats sont présentés aux figures 4.21, 4.22 et 4.23.

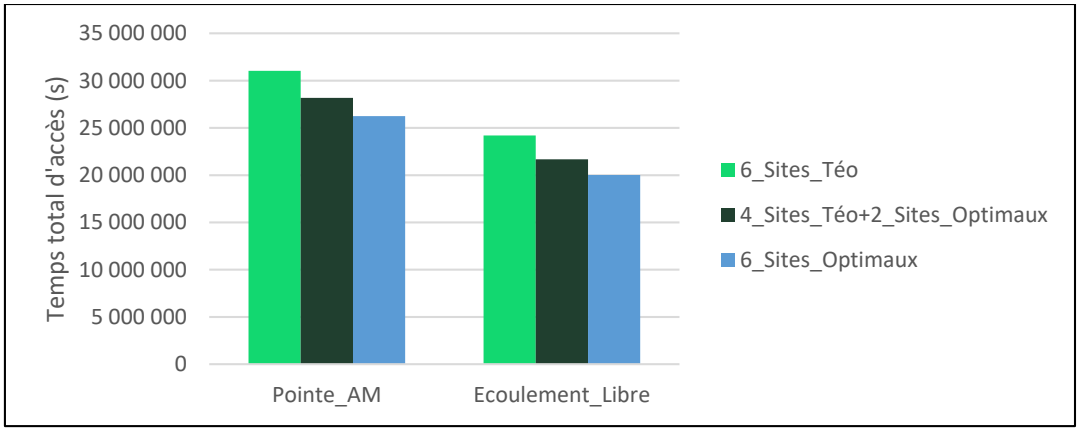


Figure 4.21 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations et les conditions de circulation

Les résultats sont semblables à ceux obtenus pour le cas des quatre sites. La configuration des six sites Téo Taxi est la plus défavorable en termes de proximité aux extrémités des courses considérées, tandis que la localisation de six sites optimaux est la plus favorable. Le cas où nous considérons quatre sites Téo et deux sites optimaux offre un résultat intermédiaire entre les deux. Il est toutefois intéressant de constater que les gains du point de vue de la valeur de l'objectif sont plus mesurés que pour les cas étudiés précédemment. En effet, la localisation optimale des six sites offre un gain de 15% sur le temps total d'accès par rapport à la configuration des six sites de Téo Taxi, en pointe du matin et de 17% en écoulement libre. Pour le cas de la localisation optimale de seulement deux sites supplémentaires, les gains sont de 9% en pointe du matin et de 8% en écoulement libre.

Les tendances sont similaires lorsque que nous étudions les résultats semaine par semaine.

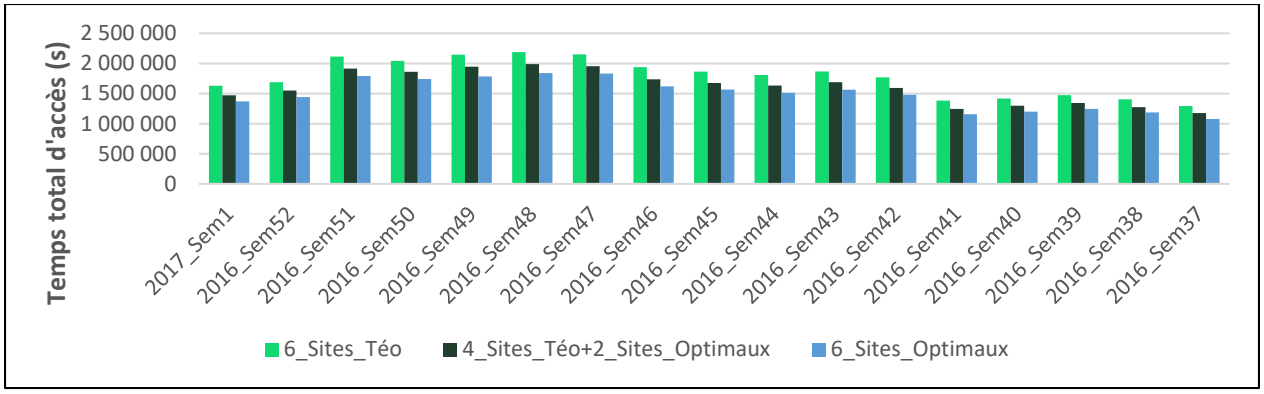


Figure 4.22 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en pointe du matin, semaine par semaine

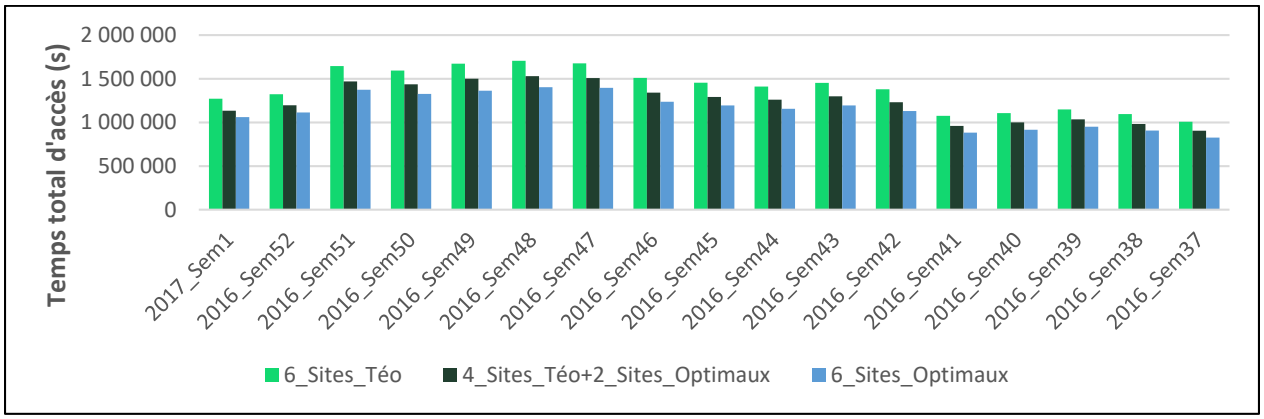


Figure 4.23 : Temps total d'accès aux sites de recharge selon les différentes configurations, en écoulement libre, semaine par semaine

Nous exploitons, dans un deuxième temps, le modèle 2 sur le cas du 10 octobre 2016 (Tableau 4.1) pour simuler les différentes configurations. Nous avons choisi ce cas, car il permet de démontrer encore une fois sur un cas très simple le fonctionnement de ce modèle.

Nous utilisons le même paramétrage CPLEX qu'au paragraphe 4.2 (Figure 4.17).

Tableau 4.9 : Valeurs de l'objectif sur les cas du 10 octobre 2016

| Configuration des stations | Nombre de taxis mis en services |
|---|---|
| 6 sites Téo | 8 |
| 6 sites optimaux | 8 |
| 4 sites Téo et 2 sites optimaux | 8 |

Néanmoins, les résultats mis en avant à ce stade ne permettent pas de faire prévaloir une configuration parmi les autres, en termes de nombre de taxis minimal en service. Ainsi, comme nous avons pu l'évoquer au paragraphe 4.2, la mise en œuvre de ce modèle d'attribution ne nous permet pas de confirmer les gains avancés par la résolution du modèle 1. Il serait donc intéressant de proposer d'autres choix de périodes pour effectuer de nouvelles expériences.

Enfin, nous mettons en œuvre le modèle 1Bis pour discuter de la répartition des bornes de recharge aux stations. Nous mettons en application la même démarche qu'au paragraphe 4.3. Nous évaluons et comparons les proportions proposées par la résolution des modèles 2 et 1Bis (Tableaux 4.10 et 4.11). Sur ces cas, peu de conclusions sont à retirer, globalement les stations sont trop peu sollicitées et les besoins répartis sur l'ensemble des six bornes.

Tableau 4.10 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h (modèle 2)

| 6 sites optimaux | | | 4 sites Téo + 2 sites optimaux | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sites | NB recharges | % | Sites | NB recharges | % |
| 4620055.01 | 5 | 36% | 4620062 | 7 | 32% |
| 4620062 | 1 | 7% | 4620076 | 3 | 14% |
| 4620078 | 3 | 21% | 4620148 | 4 | 18% |
| 4620148 | 2 | 14% | 4620364 | 3 | 14% |
| 4620364 | 1 | 7% | 4620402 | 2 | 9% |
| 4620433 | 2 | 14% | 4620433 | 3 | 14% |
| total | 14 | 100% | total | 22 | 100% |

Tableau 4.11 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h (modèle 1Bis)

| 6 sites optimaux | | | 4 sites Téo + 2 sites optimaux | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % |
| 4620055.01 | 2 | 14% | 4620062 | 3 | 14% |
| 4620062 | 2 | 14% | 4620076 | 3 | 14% |
| 4620078 | 2 | 14% | 4620148 | 7 | 32% |
| 4620148 | 4 | 29% | 4620364 | 4 | 18% |
| 4620364 | 3 | 21% | 4620402 | 1 | 5% |
| 4620433 | 1 | 7% | 4620433 | 4 | 18% |
| total | 14 | 100% | total | 22 | 100% |

Nous mettons alors en œuvre les calculs pour la répartition de 50 bornes, pour le cas du 10 octobre (Tableau 4.12), ainsi que l'ensemble de la période (Tableau 4.13).

Tableau 4.12 : Résultats du cas 10 octobre 2016 entre 0h et 6h pour 50 bornes (modèle 1Bis)

| 6 sites optimaux | | | 4 sites Téo + 2 sites optimaux | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % |
| 4620055.01 | 6 | 12% | 4620062 | 9 | 18% |
| 4620062 | 5 | 10% | 4620076 | 7 | 14% |
| 4620078 | 9 | 18% | 4620148 | 19 | 38% |
| 4620148 | 16 | 32% | 4620364 | 10 | 20% |
| 4620364 | 10 | 20% | 4620402 | 1 | 2% |
| 4620433 | 4 | 8% | 4620433 | 4 | 8% |
| total | 50 | 100% | total | 50 | 100% |

Tableau 4.13 : Résultats sur toute la période d'étude pour 50 bornes (modèle 1Bis)

| 6 sites optimaux | | | 4 sites Téo + 2 sites optimaux | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sites | NB bornes | % | Sites | NB bornes | % |
| 4620055.01 | 8 | 16% | 4620062 | 18 | 36% |
| 4620062 | 10 | 20% | 4620076 | 5 | 10% |
| 4620078 | 7 | 14% | 4620148 | 14 | 28% |
| 4620148 | 12 | 24% | 4620364 | 9 | 18% |
| 4620364 | 10 | 20% | 4620402 | 1 | 2% |
| 4620433 | 3 | 6% | 4620433 | 3 | 6% |
| total | 50 | 100% | total | 50 | 100% |

Tableau 4.14 : Comparaison des proportions de bornes aux sites (modèle 1Bis)

| 6 sites optimaux | | | 4 sites Téo + 2 sites optimaux | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sites | Période | 10/10/2016 | Sites | Période | 10/10/2016 |
| 4620055.01 | 16% | 12% | 4620062 | 36% | 18% |
| 4620062 | 20% | 10% | 4620076 | 10% | 14% |
| 4620078 | 14% | 18% | 4620148 | 28% | 38% |
| 4620148 | 24% | 32% | 4620364 | 18% | 20% |
| 4620364 | 20% | 20% | 4620402 | 2% | 2% |
| 4620433 | 6% | 8% | 4620433 | 6% | 8% |

Nous comparons les résultats de ces deux cas afin de déterminer une correspondance entre les proportions proposées (Tableau 4.14). Contrairement aux résultats présentés au paragraphe 4.3, les similitudes ne sont pas évidentes.

Pour traiter cette question de la configuration des stations de recharge, il devient évident que la simulation de plus larges périodes à l'aide du modèle 2 serait intéressante. Cela permettrait de coupler les résultats de ces deux modèles et donc de proposer une analyse plus complète.

A ce stade de notre projet, nous avons donc proposé un ensemble d'expériences afin de démontrer la pertinence de nos modèles, leur utilité ainsi que leur bon fonctionnement.

# CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

## 5.1 Synthèse des travaux

Les travaux menés durant ce projet et présentés dans ce mémoire avaient pour but la localisation optimale d'un réseau de sites de recharge dédié exclusivement à une flotte de taxis électriques. En l'occurrence, nous avons travaillé sur le cas de la flotte de véhicules de Téo Taxi, pour lequel nous nous sommes appuyés sur un ensemble de données qui leur est lié. Pour réaliser cette étude, nous nous sommes appuyés sur une large revue de la littérature, présentée au chapitre 2. Dans cette revue bibliographique, nous avons parcouru un ensemble d'articles traitant de la localisation d'infrastructures en général, sur des cas d'usines, d'entrepôts de dépôts, ou encore des installations de santé. Puis, nous avons orienté notre revue vers des structures de recharge pour les véhicules électriques personnels, pour enfin nous intéresser aux cas des stations de recharge dédiées strictement aux flottes de taxis électriques. Cette revue de la littérature scientifique nous a offert une vision plus précise des travaux menés dans le domaine que nous abordions, afin d'en connaître mieux les démarches et approches, ainsi que les outils mis en œuvre. À la suite de cela, nous avons pu envisager notre propre démarche de travail, présentée au chapitre 3. Nous avons donc choisi d'orienter notre méthode vers un ensemble de modèles mathématiques en programmation linéaire, que nous avons élaborés et qui sont présentés dans ce même chapitre. Ces trois programmes ont été développés dans le but de localiser les sites de recharge au plus près des besoins de la flotte, ce que nous avons traduit par une proximité avec les extrémités des courses réalisées. L'autre aspect intégré à l'un de ces modèles est un outil de simulation, grâce auquel nous sommes capables de rejouer des journées de service de Téo Taxi, selon différents schémas de localisation des stations de recharge. L'apport du dernier modèle est la configuration des sites de recharge. Celui-ci nous permet de déterminer le nombre de bornes de recharge à intégrer à chacune des stations, toujours en fonction des besoins de la flotte. Le chapitre 4 a été consacré à la présentation des résultats obtenus par la mise en œuvre des différents modèles. Dans cette section, nous nous sommes appuyés sur la situation réelle de Téo Taxi en ce qui concerne sa configuration de recharge. Nous avons donc considéré la localisation de ses sites de recharge et ce à plusieurs stades de son développement. Nous avons mis en évidence l'intérêt de l'optimisation de la localisation des stations grâce au modèle 1, ainsi que l'importance d'une répartition intelligente des bornes aux stations avec le modèle 1Bis. Les stations ne sont pas toutes sollicitées de la même manière. Le

modèle 2 offre la possibilité de simuler des journées de taxis en tenant compte des résultats du modèle 1 (localisation optimale des stations de recharge). Les exemples présentés aux paragraphes 4.2, 4.3 et 4.4 ne nous permettent pas de valider ou invalider les résultats des autres modèles. D'autres cas devraient être explorés pour cela, nous en discutons dans les prochaines sections.

## 5.2 Contributions

Ce mémoire traite majoritairement de la localisation d'infrastructures de recharge pour les flottes de taxis électriques. D'après nos recherches bibliographiques et ce qui est reflété dans le chapitre de revue de la littérature, peu de travaux ont abordé ce problème de localisation exclusivement dédié aux taxis électriques. Nous proposons cependant une approche relativement différente de celles présentées au paragraphe 2.4. Nous avons effectivement proposé d'intégrer d'autres démarches rencontrées à la lecture d'autres travaux, afin de traiter à notre manière cette problématique de localisation de stations de recharge. Par ailleurs, trop peu de travaux intègrent la dimension de la configuration des sites, même si Xi et al. (2013) proposent un modèle complet là-dessus pour les véhicules électriques personnels.

Le deuxième volet important de nos travaux est celui de l'outil de simulation. Le problème de routage de véhicules électriques bénéficie d'une large littérature, cependant les travaux rencontrés à ce sujet ne traitent pas spécifiquement du cas des taxis. Et le cas des taxis électriques constitue un cas assez particulier de tournées de véhicules avec certaines règles qui lui sont propres : la possibilité de n'effectuer qu'une course à la fois, ou l'autorisation de se recharger seulement à vide, en sont deux exemples.

Une force supplémentaire de notre projet est de pouvoir bénéficier d'un ensemble de données relatives aux courses de taxis directement fournies par Téo Taxi. En effet, cela constitue une base concrète et solide sur laquelle nous avons appuyé notre démarche. Beaucoup de travaux antérieurs ont fondé leurs études sur des données de recensement, ou des données recueillies à partir d'autres modes de transport afin d'évaluer leur demande. Au contraire de cela, nous disposons de données obtenues à partir de relevés sur la flotte de taxi Téo, donc certainement plus fiable pour l'évaluation des besoins en recharge.

C'est donc selon ces critères que nos travaux contribuent à une avancée scientifique dans ce domaine de la localisation d'infrastructures.

## 5.3 Limites

Comme nous avons pu l'évoquer précédemment, travailler avec un partenaire sur ce projet en développement a été un atout indéniable, car il nous a permis de nous confronter à la réalité du problème, mais aussi d'accéder à des données pertinentes pour mettre en œuvre ce que nous envisagions. Cependant, en tant que projet pilote, Téo Taxi a connu depuis son lancement de nombreuses évolutions pouvant influer sur le déroulement de nos travaux : expansion de la flotte de véhicules, expansion du territoire de desserte, création et ajout de nouveaux sites de recharge, acceptation des courses hélées, modification des règles sur les courses satisfaites, etc. Toutes ces évolutions font que certains résultats évalués à un instant donné pourraient être amenés à être mis à jour. Le projet pilote est en cours jusqu'au mois de novembre 2017 et pourra être prolongé, il est donc évident que Téo Taxi sera amené à se développer pour étendre son service. Il devient donc pertinent de préciser que nous ne fournissons pas par nos travaux une solution figée, mais bien une méthode afin de traiter cette problématique qui pourra être appliquée à différents stades du développement, pour mettre à jour les résultats.

De la même manière, avec le type de données que nous avons envisagé jusqu'à maintenant, il est seulement possible d'obtenir des résultats sur des événements réalisés. Il serait néanmoins possible d'établir des résultats prédictifs, si l'on développait une méthode d'anticipation de la demande en fonction des divers paramètres d'évolution du service de taxis. Cet aspect relève cependant d'une autre dimension de la recherche.

Au niveau des résultats que nous avons présentés, il demeure des limites qui dépendent de certains choix ou hypothèses que nous nous sommes permis de faire :

- Le découpage du territoire d'étude (pour les modèles 1, 1Bis et 2) a un impact évident sur la qualité et la précision des résultats. Dans notre cas, nous avons sélectionné notre découpage selon les contours des secteurs de recensement. Ce découpage est seulement défini selon la population répartie dans chaque zone. Il n'y a donc pas d'unicité de superficie entre ces différentes zones. Notre choix de découpage pourrait donc contenir un biais vis-à-vis de densité de déplacement par zone et donc influencer certains résultats. De plus, le choix de la taille du découpage est important, dans le sens où plus la taille est grande, plus les effets de distance intrazone prennent de l'ampleur. Le choix de localisation d'une station de recharge dans une

zone devient alors une nouvelle problématique, en effet localiser cette borne à une extrémité ou l'autre de cette zone aura impact différent sur les distance et temps d'accès à cette station ;

- L'incrément de temps choisi pour le modèle 2 influe également sur la précision de nos calculs. Nous avons choisi un pas de 5 minutes dans notre cas, ce qui nous semble suffisant pour pouvoir rendre compte des phénomènes étudiés. Cependant, en réduisant celui-ci (à la minute par exemple) nous aurions pu gagner en précision. En effet, ce choix de pas de temps nous contraint, dans notre traitement préalable des données, à effectuer des arrondis aux 5 minutes dans nos matrices de temps de parcours et pour les heures de début et de fin de course. Un choix plus raffiné d'incrément limiterait les effets de ces approximations ;
- Le modèle 2, tel que formulé sous AMPL, prend en compte la méthode de l'échange de véhicules à la recharge déployée par Téo Taxi, cependant il est aisé d'y apporter les modifications simples pour permettre la recharge partielle des véhicules sur plusieurs incréments de temps. De plus, compte tenu du pas de temps choisi, la durée de l'échange de véhicules est de 5 minutes, le souci de précision sur celle-ci pourrait être surpassé avec un pas de temps réduit ;
- Pour ce qui concerne les temps et distances de parcours entre les zones de notre découpage (pour les trois modèles), ceux-ci ont été déterminés à partir de leur centroïde et les valeurs intrazones ont été conservées à zéro. Considérer des temps et distances de parcours nuls pour les trajets intrazonaux, nous amène donc à négliger ceux-ci. Ainsi un taxi qui termine une course dans une zone accueillant une station de recharge, serait capable de se rendre instantanément à cette station. Ces considérations constituent une limite évidente sur nos hypothèses. Nous pourrions donc proposer d'évaluer des temps et distances moyens comme première approximation afin de lever ce biais ;
- De plus, nous avons considéré pour ces mêmes temps et distances seulement deux matrices, en écoulement libre et en pointe de matin, pour les deux cas extrêmes de circulation (pour les trois modèles). Cependant, pour le modèle 2 notamment, il est évident que ces temps et distances ne devraient pas être uniformes sur toute la période étudiée ;
- Le modèle de consommation énergétique des véhicules considéré dans le modèle reste un modèle trivial de consommation kilométrique linéaire très peu révélateur de la réalité. Il serait alors pertinent de s'intéresser aux différents paramètres qui entrent véritablement en jeu, temps,

distance, caractéristiques de la route, etc. Ainsi nous pourrions proposer un modèle plus fiable de consommation énergétique.

Le plus gros obstacle rencontré, lors de nos travaux, a été celui de la taille du problème traité par la mise en œuvre du modèle 2. En effet, simuler le cas d'une journée entière de service avec nos choix de découpage spatial et temporel génère un problème d'une taille telle que l'intégration des données par le logiciel et sa résolution nécessitent des ressources informatiques conséquentes en termes de performances, mais aussi en temps de calcul. Notre décision de limiter nos simulations à des périodes de 6 heures découle de ces considérations. En cela, nos résultats ne nous permettent pas d'obtenir la vision globale à une journée que nous espérions.

## 5.4 Perspectives

Nous pouvons à présent envisager les poursuites de ces travaux, car il existe effectivement des perspectives pour approfondir la démarche que nous avons entreprise.

Tout d'abord concernant le modèle 2 (modèle d'attribution de courses aux véhicules), il serait envisageable de proposer des améliorations au niveau de la précision de certains paramètres, principalement sur les considérations de consommation énergétique. En effet, un modèle de consommation énergétique des véhicules électriques plus complet devrait être intégré à ce modèle afin d'offrir une meilleure approximation de la décharge des véhicules. Ce modèle devrait prendre en compte des facteurs d'influence autres que la distance seule : profils d'accélération-décélération, conditions climatiques, état de la chaussée, profil de la route, etc. Un tel modèle de consommation pourrait être développé pour différents modèles de véhicules, ceci accroîtrait la précision sur la consommation de la flotte, qui comme celle de Téo Taxi est composée de plusieurs modèles de véhicules. Ces travaux sont actuellement en cours et les résultats pourront être intégrés ultérieurement au modèle que nous avons proposé.

Ensuite, il y a des perspectives intéressantes à propos de la performance dans la résolution de ce même modèle. Nous avons vu à la section précédente que ce problème de grande échelle pouvait nous confronter à des obstacles lors de la résolution. Ainsi, des heuristiques pourraient être développées pour résoudre ce modèle. Cette nouvelle méthode de calcul offrirait une réduction certaine des temps de calcul. Dans la revue de littérature proposée à la section 2.5, plusieurs travaux

ont effectivement démontré que de nombreux problèmes de routage de véhicules sont traités par l'intermédiaire d'heuristiques.

D'autre part, d'autres approches de modélisation pourraient être employées pour traiter ce problème de simulation. Nous pensons aux approches multiagents utilisées notamment pour la simulation. Des travaux ont d'ailleurs été menés sur des problèmes liés aux véhicules électriques (Hu, Morais, Lind, & Bindner, 2016; Sweda & Klabjan, 2011).

Un dernier aspect réellement intéressant, selon nous, serait l'intégration des différents modes de transports électriques dans ces considérations de localisation d'infrastructures de recharge. En effet, comme nous avons pu le constater à travers la revue bibliographique, mais aussi l'ensemble de notre travail, les modes sont souvent traités séparément : les taxis d'un côté, les véhicules personnels d'un autre, etc. Il est évident qu'une dimension plus politique entre en jeu à ce niveau-là, cependant alors que l'on évoque les besoins et volontés de proposer des véhicules plus écologiques, la question de la recharge de ces derniers demeure primordiale pour que ce nouveau mode se développe. Développer les réseaux de recharge pour les véhicules électriques est un élément essentiel pour la promotion de ce mode. Ainsi concevoir des réseaux communs permettrait d'intégrer différents modes : taxis, véhicules personnels, autopartage, transports publics, etc.

# BIBLIOGRAPHIE

Adenso-Díaz, B., & Rodríguez, F. (1997). A simple search heuristic for the MCLP: Application to the location of ambulance bases in a rural region. *Omega, 25*(2), 181-187. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0483(96)00058-8

Agar, M. C., & Salhi, S. (1998). Lagrangean heuristics applied to a variety of large capacitated plant location problems. *Journal of the Operational Research Society, 49*(10), 1072-1084. doi:10.1057/palgrave.jors.2600621

Al-Sultan, K. S., & Al-Fawzan, M. A. (1999). A tabu search approach to the uncapacitated facility location problem. *Annals of Operations Research, 86*(0), 91-103. doi:10.1023/a:1018956213524

Asamer, J., Reinthaler, M., Ruthmair, M., Straub, M., & Puchinger, J. (2016). Optimizing charging station locations for urban taxi providers. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 85*, 233-246. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2016.01.014

Averbakh, I., Berman, O., Drezner, Z., & Wesolowsky, G. O. (2007). The uncapacitated facility location problem with demand-dependent setup and service costs and customer-choice allocation. *European Journal of Operational Research, 179*(3), 956-967. doi:https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.11.041

Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E., Maniezzo, V., & Mingozzi, A. (2002). A new method for solving capacitated location problems based on a set partitioning approach. *Computers & Operations Research, 29*(4), 365-386. doi:https://doi.org/10.1016/S0305-0548(00)00072-1

Barahona, F., & Jensen, D. (1998). Plant location with minimum inventory. *Mathematical Programming, 83*(1), 101-111. doi:10.1007/bf02680552

Berman, O., Drezner, Z., & Wesolowsky, G. O. (2005). The facility and transfer points location problem. *International Transactions in Operational Research, 12*(4), 387-402. doi:10.1111/j.1475-3995.2005.00514.x

Chen, T. D., Kockelman, K. M., & Khan, M. (2013). *The electric vehicle charging station location problem: a parking-based assignment method for Seattle*. Communication présentée à

Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, Washington, Etats-Unis (vol. 340, p. 13-1254).

Commission des transports Québec. (2015). Projets pilotes dans le secteur du transport par taxi. Tiré de https://www.ctq.gouv.qc.ca/taxi/projets_pilotes_dans_le_secteur_du_transport_par_taxi.html

Eco-Energie à Montréal. (2015). Taxelco lance Téo, le taxi réinventé à Montréal. Tiré de http://eco-energie-montreal.com/post/taxelco-teo-taxi-electrique-montreal/

Erlebacher, S. J., & Meller, R. D. (2000). The interaction of location and inventory in designing distribution systems. *IIE Transactions, 32*(2), 155-166. doi:10.1023/a:1007614431718

Goldengorin, B., Ghosh, D., & Sierksma, G. (2003). Branch and peg algorithms for the simple plant location problem. *Computers & Operations Research, 30*(7), 967-981. doi:https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00049-7

Harewood, S. I. (2002). Emergency ambulance deployment in Barbados: a multi-objective approach. *Journal of the Operational Research Society, 53*(2), 185-192. doi:10.1057/palgrave.jors.2601250

He, S. Y., Kuo, Y.-H., & Wu, D. (2016). Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: A case study of Beijing, China. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 67*, 131-148. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.003

Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S., & Hartl, R. F. (2016). The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. *European Journal of Operational Research, 252*(3), 995-1018. doi:https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.038

Hu, J., Morais, H., Lind, M., & Bindner, H. W. (2016). Multi-agent based modeling for electric vehicle integration in a distribution network operation. *Electric Power Systems Research, 136*, 341-351. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.014

Institut du véhicule innovant. (2017). *Déploiement d'un flotte de taxi électrique et connectée.* Communication présentée à 52e Congrès et Salon des transports de l'AQTR, Montréal, Canada.

Kameda, H., & Mukai, N. (2011). Optimization of Charging Station Placement by Using Taxi Probe Data for On-Demand Electrical Bus System. Dans A. KönigA. DengelK. HinkelmannK. KiseR. J. Howlett & L. C. Jain (édit.), *Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems: 15th International Conference, KES 2011, Kaiserslautern, Germany, September 12-14, 2011, Proceedings, Part III* (p. 606-615). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Keskin, M., & Çatay, B. (2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 65*, 111-127. doi:https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.013

Li, S., Huang, Y., & Mason, S. J. (2016). A multi-period optimization model for the deployment of public electric vehicle charging stations on network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 65*, 128-143. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.008

Liao, C.-S., Lu, S.-H., & Shen, Z.-J. M. (2016). The electric vehicle touring problem. *Transportation Research Part B: Methodological, 86*, 163-180. doi:https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.02.002

Nozick, L. K., & Turnquist, M. A. (2001). Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers. *European Journal of Operational Research, 129*(2), 362-371. doi:https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00234-4

Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research, 111*(3), 423-447. doi:https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00186-6

Pelletier, S., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). 50th Anniversary Invited Article—Goods Distribution with Electric Vehicles: Review and Research Perspectives. *Transportation Science, 50*(1), 3-22. doi:10.1287/trsc.2015.0646

Rahman, S.-U., & Smith, D. K. (1999). Deployment of rural health facilities in a developing country. *Journal of the Operational Research Society, 50*(9), 892-902. doi:10.1057/palgrave.jors.2600795

ReVelle, C. S., Eiselt, H. A., & Daskin, M. S. (2008). A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research, 184*(3), 817-848. doi:https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.044

Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2014). The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. *Transportation Science, 48*(4), 500-520. doi:10.1287/trsc.2013.0490

Shahraki, N., Cai, H., Turkay, M., & Xu, M. (2015). Optimal locations of electric public charging stations using real world vehicle travel patterns. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 41*, 165-176. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.011

Statistique Canada. (2016). Dictionnaire, Recensement de la population, 2016. Tiré de http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/ref/dict/geo013-fra.cfm

Sweda, T., & Klabjan, D. (2011, 6-9 Sept. 2011). *An agent-based decision support system for electric vehicle charging infrastructure deployment.* Communication présentée à 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (p. 1-5). doi:10.1109/VPPC.2011.6043201

Teo, C. P., Ou, J., & Goh, M. (2001). Impact on inventory costs with consolidation of distribution centers. *IIE Transactions, 33*(2), 99-110. doi:10.1023/a:1007646817627

Téo Taxi. (2017a). Comment commander un Téo Taxi? Tiré de http://teomtl.com/comment-commander/#appmobile

Téo Taxi. (2017b). Comment puis-je savoir si je suis dans votre zone de couverture ? . Tiré de https://taxelcohelp.zendesk.com/hc/fr/articles/115007127328-Comment-puis-je-savoir-si-je-suis-dans-votre-zone-de-couverture-

Tu, W., Li, Q., Fang, Z., Shaw, S.-l., Zhou, B., & Chang, X. (2015). Optimizing the locations of electric taxi charging stations: A spatial–temporal demand coverage approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 65*, 172-189. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.10.004

Ville de Montréal. (2008). Plan de transport. Tiré de http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=8957,99681670&_dad=portal&_schema=PORTAL

Xi, X., Sioshansi, R., & Marano, V. (2013). Simulation–optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 22*, 60-69. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2013.02.014

# ANNEXE A – PROGRAMME AMPL MODÈLE 1

```
# Modele1

#ENSEMBLES
set ZONES; #ensemble ZONES : Z
set SITES = {ZONES}; #ensemble SITES : K

#VARIABLES
var siteactive{SITES} binary; #variable binaire d'activation de site : y
var zonedesservie{SITES,ZONES} binary; # variable binaire d'association site-
zone : x

#PARAMETRES
param nbdep{ZONES,ZONES} integer; #nombre de déplacement inter-zones
param distance{SITES,ZONES} integer; #matrice de distance inter-zones
param nbsites integer; #nombre de sites à localiser

#FONCTION OBJECTIF
minimize distance_totale:
      sum{k in SITES} sum{j in ZONES} sum{i in ZONES} (nbdep[i,j] +
nbdep[j,i])/2*distance[k,j]*zonedesservie[k,j];

#CONTRAINTES

###Définir le nombre de sites à localiser (2)
subject to nbmaxsites:
      sum{k in SITES} siteactive[k] = nbsites;

###Synchroniser les variables (3)
subject to synchro {k in SITES, j in ZONES}:
      zonedesservie[k,j]<=siteactive[k];

###Définir une association unique entre sites et zones (4)
subject to asso {j in ZONES}:

      sum{k in SITES} zonedesservie[k,j]=1;
```

# ANNEXE B – PROGRAMME AMPL MODÈLE 1BIS

```
# Modele1BIS

#ENSEMBLES
set ZONES; #ensemble ZONES : Z
set SITES = {ZONES}; #ensemble SITES : K
set BORNES; #ensemble BORNES : B

#VARIABLES
var siteactive{SITES} binary; #variable binaire d'activation de site : z
var borneactivee{SITES,BORNES} binary; #variable binaire d'activation de
borne aux sites : y
var zonedesservie{SITES,ZONES} binary; # variable binaire d'association site-
zone : x

#PARAMETRES
param nbdep{ZONES,ZONES} integer; #nombre de déplacement inter-zones
param distance{SITES,ZONES} integer; #matrice de distance inter-zones
param nbsites integer; #nombre de sites à localiser
param nbbornes integer; #nombre de bornes à localiser
param maxborne{SITES} integer; #nombre maximal de bornes à chaque site

#FONCTION OBJECTIF
minimize distance_totale:
      sum{k in SITES} sum{j in ZONES} sum{i in ZONES} (nbdep[i,j] +
nbdep[j,i])/2*distance[k,j]*zonedesservie[k,j];

#CONTRAINTES

###Définir le nombre de sites à localiser (8)
subject to nbmaxsites:
      sum{k in SITES} siteactive[k] = nbsites;

###Définir le nombre de bornes à localiser (9)
subject to nbmaxbornes:
      sum{k in SITES} sum{b in BORNES} borneactivee[k,b] = nbbornes;

### Synchroniser les variables y et z (10)
subject to synchro2 {k in SITES}:
      sum{b in BORNES} borneactivee[k,b]/maxborne[k] <= siteactive[k];

### Synchroniser les variables x et y (11)
subject to synchro3 {k in SITES}:
      sum{j in ZONES}(zonedesservie[k,j]*sum{i in
ZONES}(nbdep[i,j]+nbdep[j,i])/2)<= ceil(sum{i in ZONES} sum{j in ZONES}
nbdep[i,j]/nbbornes)*sum{b in BORNES}borneactivee[k,b];

###Définir l'ordre des bornes aux sites (12)
subject to ordrebornes {k in SITES, b in BORNES}:
```

```
      borneactivee[k,b]>=borneactivee[k,b+1];

###Définir une association unique entre sites et zones (13)
subject to asso {j in ZONES}:
      sum{k in SITES} zonedesservie[k,j]=1;

###Synchroniser les variables x et z(14)
subject to synchro {k in SITES, j in ZONES}:

      zonedesservie[k,j]<=siteactive[k];
```

# ANNEXE C - PROGRAMME AMPL MODELE 2

```
# Modele2

#ENSEMBLES & PARAMETRES

set ZONES; #ensemble ZONES : Z

param start_time integer; #Temps initial
param end_time integer; #Temps final
param pas_tps integer; #Pas de temps

set HEURES = start_time..end_time by pas_tps; #ensemble HEURES : H

set POINTS = {ZONES,HEURES}; #ensemble POINTS : P
set ORIGINES within {POINTS}; #ensemble ORIGINES : O
set DESTINATIONS within {POINTS}; #ensemble DESTINATIONS : D
set COURSES within {ORIGINES,DESTINATIONS}; #ensemble COURSES : C
set SITES within {POINTS}; #ensemble SITES : S
set TAXIS; #ensemble TAXIS : V

set COURSES_LINKS within (ORIGINES cross DESTINATIONS); #Arcs de courses
set RECH_LINKS = (SITES cross SITES); #Arcs de recharge
set TO_RECH_LINKS = (DESTINATIONS cross SITES); #Arcs vers recharge
set FROM_RECH_LINKS = (SITES cross POINTS); #Arcs à partir de recharge
set TO_COURSES_LINKS = (POINTS cross ORIGINES); #Arcs vers courses
set FROM_COURSES_LINKS = (DESTINATIONS cross POINTS); #Arcs à partir de
courses
set ATT_LINKS = (POINTS cross POINTS); #Arcs attente

param tps{ZONES,ZONES}; #Temps de déplacement inter-zones
param distance{ZONES,ZONES}; #Distance de parcours inter-zones
param cmax; #Capacité de charge maximale des véhicules
param taux_decharge; #Taux de décharge
param taux_recharge; #Taux de recharge

#FONCTION OBJECTIF & VARIABLES & NOEUDS & ARCS

### Fonction Objectif
minimize Nb_taxis;#Minimiser le nombre de taxis en service

### Définition variable capacité de charge des taxis
var cap {(a,h) in POINTS, v in TAXIS} >= 0, <= cmax;

### Définition des noeuds
node Alpha: net_out >= 0; #Noeud source
node Beta: net_in >= 0; #Noeud destination
node Noeud {(a,h) in POINTS, v in TAXIS}:net_in = 0 ;
```

```
### Définition des arcs
arc Arc_Courses {(a,h,b,g) in COURSES_LINKS, v in TAXIS} binary,
      from Noeud[a,h,v], to Noeud[b,g,v]; #Arcs de courses

arc Arc_Rech {(a,h,b,g) in RECH_LINKS, v in TAXIS:a=b and g=h+pas_tps}
binary,
      from Noeud[a,h,v], to Noeud[b,g,v]; #Arcs de recharge

arc Arc_To_Rech {(a,h,b,g) in TO_RECH_LINKS, v in TAXIS:g-h=tps[a,b] and
a<>b} binary,
      from Noeud[a,h,v], to Noeud[b,g,v];#Arcs vers recharge

arc Arc_From_Rech {(a,h,b,g) in FROM_RECH_LINKS, v in TAXIS:g-h=tps[a,b] and
a<>b} binary,
      from Noeud[a,h,v], to Noeud[b,g,v]; #Arcs à partir de recharge

arc Arc_To_Courses {(a,h,b,g) in TO_COURSES_LINKS, v in TAXIS:g-h=tps[a,b]
and a<>b} binary,
      from Noeud[a,h,v], to Noeud[b,g,v]; #Arcs vers courses

arc Arc_From_Courses {(a,h,b,g) in FROM_COURSES_LINKS, v in TAXIS:g-
h=tps[a,b] and a<>b} binary,
      from Noeud[a,h,v], to Noeud[b,g,v]; #Arcs à partir courses

arc Arc_Att {(a,h,b,g) in ATT_LINKS, v in TAXIS:a=b and g=h+pas_tps} binary,
      from Noeud[a,h,v], to Noeud[b,g,v]; #Arcs d'attente

arc Arc_Dep {(b,g) in SITES, v in TAXIS:g=start_time} binary,
      from Alpha, to Noeud[b,g,v], obj Nb_taxis 1; #Arcs de départ

arc Arc_Arr {(a,h) in SITES, v in TAXIS} binary,
      from Noeud[a,h,v], to Beta; #Arcs d'arrivée

#CONTRAINTES

### Réaliser les courses obligatoires
subject to courses_obl{(a,h,b,g) in COURSES_LINKS}:
      sum{v in TAXIS} Arc_Courses[a,h,b,g,v]=1;

### Définir la charge initiale des taxis en sortie du point alpha
subject to charge_initiale{(b,g) in SITES, v in TAXIS:g=start_time}:
      cap[b,g,v] = cmax;

### Définir la décharge des taxis sur les 5 arcs
##### Décharge   sur les arcs de courses
subject to decharge1{(a,h,b,g) in COURSES_LINKS, v in TAXIS}:
      cap[b,g,v]<=cap[a,h,v]-
taux_decharge*distance[a,b]*Arc_Courses[a,h,b,g,v]+cmax*(1-
Arc_Courses[a,h,b,g,v]);
##### Décharge   sur les arcs vers les sites
```

```
subject to decharge2{(a,h,b,g) in TO_RECH_LINKS, v in TAXIS:g-h=tps[a,b] and
a<>b}:
      cap[b,g,v]<=cap[a,h,v]-
taux_decharge*distance[a,b]*Arc_To_Rech[a,h,b,g,v]+cmax*(1-
Arc_To_Rech[a,h,b,g,v]);
##### Décharge   sur les arcs à partir des sites
subject to decharge3{(a,h,b,g) in FROM_RECH_LINKS, v in TAXIS:g-h=tps[a,b]
and a<>b}:
      cap[b,g,v]<=cap[a,h,v]-
taux_decharge*distance[a,b]*Arc_From_Rech[a,h,b,g,v]+cmax*(1-
Arc_From_Rech[a,h,b,g,v]);
##### Décharge   sur les arcs vers les courses
subject to decharge4{(a,h,b,g) in TO_COURSES_LINKS, v in TAXIS:g-h=tps[a,b]
and a<>b}:
      cap[b,g,v]<=cap[a,h,v]-
taux_decharge*distance[a,b]*Arc_To_Courses[a,h,b,g,v]+cmax*(1-
Arc_To_Courses[a,h,b,g,v]);
##### Décharge   sur les arcs à partir des courses
subject to decharge5{(a,h,b,g) in FROM_COURSES_LINKS, v in TAXIS:g-h=tps[a,b]
and a<>b}:
      cap[b,g,v]<=cap[a,h,v]-
taux_decharge*distance[a,b]*Arc_From_Courses[a,h,b,g,v]+cmax*(1-
Arc_From_Courses[a,h,b,g,v]);

### Définir charge pendant l'attente
subject to charge_att{(a,h,b,g) in ATT_LINKS, v in TAXIS:a=b and
g=h+pas_tps}:
      cap[b,g,v]<=cap[a,h,v]+cmax*(1-Arc_Att[a,h,b,g,v]);

### Définir la recharge des taxis
subject to recharge1{(a,h,b,g) in RECH_LINKS, v in TAXIS:a=b and
g=h+pas_tps}:
      cap[b,g,v]<=cmax;

### Contrainte de départ
subject to contrainte_dep{v in TAXIS}:
      sum{(b,g) in SITES:g=start_time} Arc_Dep[b,g,v] <= 1;

### Contrainte de symétrie
subject to contrainte_sym{v in TAXIS: v <> card(TAXIS)}:
      sum{(b,g) in SITES:g=start_time} Arc_Dep[b,g,v]>=sum{(b,g) in
SITES:g=start_time} Arc_Dep[b,g,v+1];
```