UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÈLE D'OPTIMISATION DE LA REDISTRIBUTION DES VÉLOS D'UN SYSTÈME DE VÉLOPARTAGE

ANDRÉANNE LEDUC

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 2013

© Andréanne Leduc, 2013.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MODÈLE D'OPTIMISATION DE LA REDISTRIBUTION DES VÉLOS D'UN SYSTÈME DE VÉLOPARTAGE

présenté par : LEDUC Andréanne

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

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

Mme MORENCY Catherine, Ph.D., présidente

M. ROUSSEAU Louis-Martin, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. TRÉPANIER Martin, ing., Ph.D., membre et codirecteur

M. CONTARDO Claudio, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier grandement mon directeur de recherche le professeur Louis-Martin Rousseau du département de mathématiques et de génie industriel pour m'avoir guidé et soutenu et pour m'avoir aidé à résoudre les innombrables problèmes dans les modèles. Je tiens aussi à remercier mon co-directeur de recherche le professeur Martin Trépanier aussi du département de mathématiques et de génie industriel pour son support, sa rigueur et sa motivation.

Mes remerciements vont également à Bixi pour les données qu'ils m'ont offertes ainsi qu'à la professeure Catherine Morency du département des génies civil, géologique et des mines et à Hubert Verreault pour leurs commentaires pertinents et leur aide dans l'obtention des données.

Pour leur appui financier, je tiens à remercier le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), les fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FQRNT) ainsi que le centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT).

Finalement, j'aimerais remercier l'ensemble du département de génie industriel de l'École Polytechnique de Montréal.

RÉSUMÉ

Les systèmes de vélopartage de troisième et quatrième génération comme le système BIXI de Montréal sont de plus en plus populaires partout à travers le monde. Le nombre d'usagers grandissant et la grande variabilité de la demande entraînent plusieurs difficultés au niveau de la gestion quotidienne. Un des principaux enjeux opérationnels des systèmes de vélopartage est le problème de redistribution des vélos dans le but de balancer les stations.

En effet, les systèmes de vélopartage à sens unique, c'est-à-dire sans retour du vélo à sa station de départ, présentent des débalancements importants entre les stations au cours de la journée. La redistribution est donc nécessaire pour assurer à l'usager qu'il trouvera un vélo ou un stationnement lorsqu'il en aura besoin. Cependant, cette opération est coûteuse et difficile à planifier puisqu'elle nécessite une bonne compréhension des comportements des utilisateurs et implique une modélisation mathématique complexe.

La contribution de cette recherche se situe au niveau du développement d'un outil opérationnel applicable dans un contexte réel permettant d'optimiser les activités de redistribution statique et dynamique. En effet, les problèmes de redistribution statique de nuit et dynamique de jour ont été abordés dans la littérature, mais aucun auteur n'apporte une solution concrète et applicable par l'industrie. En outre, la majorité des opérateurs de systèmes de vélopartage basent présentement leur redistribution sur leur expérience acquise de l'utilisation des vélos.

En premier lieu, une revue de littérature a donc été réalisée sur les différents systèmes de vélopartage et leur fonctionnement en mettant l'accent sur le système BIXI de Montréal, sur les trois principaux enjeux liés à la redistribution (le problème de design de système, le problème de redistribution statique de nuit et le problème de redistribution dynamique de jour), sur l'analyse des patrons de demande des vélos ainsi que sur les indicateurs de performance utilisés pour qualifier la redistribution dans les systèmes de vélopartage.

L'outil développé dans le cadre de cette recherche s'appuie sur des modèles d'optimisation en programmation par contraintes développés à l'aide du logiciel AIMMS. La méthodologie qui a permis le développement des modèles d'optimisation a débuté par l'examen des données BIXI. Cette analyse a permis de bien comprendre les données disponibles, les besoins en termes de redistribution et la performance actuelle des systèmes. Par la suite, le logiciel AIMMS ainsi que

la programmation par contraintes ont été choisis pour la modélisation. Finalement, les différents modèles pour le problème de redistribution statique et pour le problème de redistribution dynamique ont été développés de façon itérative.

Le processus méthodologique a permis de développer six différents modèles qui résolvent les deux problèmes de différentes façons. Trois modèles résolvent le problème statique : le modèle statique avec objectif précis, le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite ainsi que le modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite. Trois modèles résolvent le problème dynamique : le modèle dynamique avec objectif précis, le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite ainsi que le modèle dynamique avec niveau de service.

L'objectif de la recherche étant de développer un outil facilement utilisable par les opérateurs de systèmes de vélopartage, une interface utilisateur a été développée dans AIMMS. L'interface utilisateur permet à l'opérateur de facilement comprendre et analyser les résultats du modèle en plus de modifier facilement les paramètres pour pouvoir tester différents scénarios. La nuit, l'opérateur exécute le modèle une fois et les routes optimales des camions de redistribution sont calculées. Le jour, l'opérateur peut exécuter le modèle à chaque fois qu'un camion termine une opération de redistribution. Les routes des camions sont donc calculées pour les deux prochaines heures par exemple. Plus la fréquence à laquelle l'opérateur exécute le modèle est importante, plus les résultats sont précis et optimaux.

Pour valider son efficacité, l'outil a été testé sur les données de la journée du 16 juin 2011 du système BIXI. Les modèles les plus intéressants sont le modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite pour le problème statique de nuit et le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite pour le problème dynamique de jour. Une analyse sommaire a permis de conclure que les modèles généraient de bonnes solutions. En effet, le modèle dynamique avec niveau de service a, par exemple, permis de générer une solution qui diminuait de 50% le nombre de périodes de non-service par rapport à ce qui a été calculé avec les données du 16 juin 2011. Une analyse de sensibilité a aussi été faite sur certains paramètres pour démontrer leur influence sur la solution. Ainsi, il a été possible de conclure que les paramètres initiaux influençaient beaucoup le résultat obtenu.

L'outil est donc efficace, flexible, il s'implante facilement et est un bon point de départ pour le développement d'un logiciel de redistribution plus complet.

ABSTRACT

Bikesharing systems of third and fourth generation like the BIXI system in Montreal are gaining in popularity across the world. The rapidly growing number of users and the important variability of the demand lead to important challenges in the daily management of a bikesharing system. One of the most important operational challenges in the bikesharing systems is the redistribution of the bicycles in order to balance the stations.

The one-way bikesharing systems (with no return of the bike at its original location) present important unbalances between stations during the day. A redistribution system becomes necessary to insure that a user will find a bicycle or a parking spot when needed. However, the redistribution is costly and hard to plan because it is based on a good understanding of the users' behavior and implies a complex mathematical modeling.

The contribution of this research is to develop an operational tool that can be used in a real operating context. The tool developed needs to support the optimization of the static and dynamic redistribution of the bicycles. Researches on static (at night) and dynamic (during the day) redistribution are present in the literature but no author brings a concrete solution easily applicable in an operational context. Moreover, the majority of bikesharing system operators based their redistribution on their empirical knowledge of the bicycles' demand.

Firstly, a literature review was conducted on the different bikesharing systems and the way they operate focusing on the BIXI system in Montreal, the principal redistribution challenges (system design, static redistribution and dynamic redistribution), the demand analysis and the key performance indicators used to qualify the redistribution in bikesharing systems.

The tool that has been developed in this research is based on optimization models in constraint programming developed on the AIMMS platform. The development of these models started with an analysis of BIXI's data to better understand available data, need in terms of redistribution and actual performance of the system. Subsequently, AIMMS and constraint programming were chosen for the modeling. Finally, the models for static and dynamic redistribution were developed iteratively.

The methodology used has led to the development of six different models addressing in different ways the static and dynamic problem. Three models addressed the static problem, the static

model with precise target, the static model with precise target and unsatisfied demand, the static model with target interval and satisfy demand. Three other models addressed the dynamic problem: the dynamic model with precise target, the dynamic model with precise target and unsatisfied demand and the dynamic model with service level.

The main objective of the model is to develop a tool easily usable by bikesharing systems' operators; a user interface has been developed in AIMMS. With the user interface, the operator can easily understand and analyze the output data of a model. In addition, he can also modify parameters to test different scenarios. At night, the operator runs the model one time and the optimal truck routes are calculated. During the day, the operator can run the model every time a truck completes a redistribution operation. The truck routes are then calculated for the next two hours for example. The more often the model is run, better are the results.

To validate the effectiveness of the tool, it has been tested on data from the BIXI system from June 16th 2011. The most interesting models are the static model with target interval and unsatisfied demand for the static problem at night and the dynamic model with precise target and unsatisfied demand for the dynamic problem during the day. By performing a summary analysis, it was possible to conclude that the models were generating good solutions. For example, the dynamic model with service level has generated a solution decreasing the number of non-service periods by 50% in relation to the data from June 16th 2011. A sensibility analysis has also been conducted on some of the parameters to demonstrate their influence on the solution. From those analyses, it is possible to conclude that the starting point of a model influences significantly the results achieved at the end.

The tool that has been developed is effective, flexible, easy to implement and it is also a good starting point for the development of a more complete redistribution software.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ IV

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VIII

LISTE DES TABLEAUX XII

LISTE DES FIGURES XIII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XV

LISTE DES ANNEXES XVI

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 4

1.1 Histoire et contexte actuel des systèmes de vélopartage 4

1.1.1 Première génération 4

1.1.2 Deuxième génération 5

1.1.3 Troisième génération 6

1.1.4 Portrait actuel des systèmes de vélopartage à travers le monde 8

1.1.5 Perspectives futures 13

1.2 BIXI Montréal 14

1.2.1 Importance du système BIXI à Montréal 14

1.2.2 Fonctionnement du système BIXI à Montréal 16

1.2.3 Statistiques d'utilisation 17

1.3 Problèmes de recherche opérationnelle liés au débalancement de la distribution géographique des vélos 20

1.3.1 Design stratégique du réseau 21

1.3.2 Redistribution 23

1.4 Prévision de la demande 34

1.5 Développement d'indicateurs de performance 36

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE 39

2.1 Méthodologie générale 39

2.2 Description des outils utilisés 41

2.2.1 Access 41

2.2.2 AIMMS 43

2.3 Description détaillée de chacune des étapes 46

2.3.1 Examen des données 46

2.3.2 Choix du logiciel et de la technique de modélisation 51

2.3.3 Développement des modèles d'optimisation 53

CHAPITRE 3 DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS MODÈLES D'OPTIMISATION DÉVELOPPÉS 55

3.1 Structure de base 55

3.1.1 Paramètres 56

3.1.2 Variables 59

3.1.3 Contraintes 61

3.1.4 Fonctions objectifs 61

3.2 Modèles de redistribution statique 62

3.2.1 Modèle statique avec objectif précis 62

3.2.2 Modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite 65

3.2.3 Modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite 69

3.3 Modèles de redistribution dynamique 72

3.3.1 Modèle dynamique avec objectif précis 72

3.3.2 Modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite 77

3.3.3 Modèle dynamique avec niveau de service 78

3.4 Résumé des modèles présentés 84

CHAPITRE 4 MONTAGE DE L'OUTIL (PROTOTYPE) ET DÉVELOPPEMENT DES APPLICATIONS 85

4.1 Cadre général d'utilisation de l'outil 85

4.1.1 Contexte 85

4.1.2 Gestion de l'information 86

4.2 Interface utilisateur 88

4.2.1 Saisie de données 89

4.2.2 Affichage des résultats 92

4.3 Avantages et développements possibles 93

4.3.1 Avantages de l'outil 93

4.3.2 Développements possibles 94

CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS 95

5.1 Analyse d'une journée du système de vélopartage Bixi en terme de redistribution 95

5.1.1 Analyse des locations aux cinq minutes 95

5.1.2 Comparaison entre les données de la table transfert et les données calculées 98

5.1.3 Analyse des traces GPS 100

5.1.4 Indicateurs de performance 102

5.2 Expérimentations avec les différents modèles et analyse des résultats 106

5.2.1 Description des instances 106

5.2.2 Comparaison entre les différents modèles 107

5.2.3 Analyse de sensibilité sur certains paramètres 112

CONCLUSION 115

BIBLIOGRAPHIE 118

ANNEXES 122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Objectifs spécifiques de quelques systèmes de vélopartage de troisième génération 10

Tableau 1.2 Présence internationale des systèmes BIXI 15

Tableau 2.1 Structure de la table état du réseau 46

Tableau 2.2 Structure de la table locations 47

Tableau 2.3 Structure de la table stations 48

Tableau 2.4 Structure de la table transferts 48

Tableau 3.1 Paramètres du modèle statique avec objectif précis 63

Tableau 3.2 Paramètres du modèle statique avec intervalle optimal et demande insatisfaite 70

Tableau 3.3 Paramètres du modèle dynamique avec objectif précis 75

Tableau 3.4 Paramètres du modèle dynamique avec niveau de service 79

Tableau 3.5 Résumé des modèles présentés 84

Tableau 5.1 Stations les plus débalancées 97

Tableau 5.2 Comparaison entre les résultats calculés et la table transfert 99

Tableau 5.3 Analyse des données GPS (station la plus près) 101

Tableau 5.4 Résultats des différentes instances pour le modèle statique avec objectif précis 108

Tableau 5.5 Résultats des différentes instances pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite 108

Tableau 5.6 Résultat des différentes instances pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite 111

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Évolution du nombre de systèmes de troisième génération au niveau mondial 8

Figure 1.2 Présence géographique des systèmes de troisième génération 9

Figure 1.3 Taille des différents systèmes de vélopartage en Amérique (Shaheen et al., 2012).....15

Figure 1.4 Une station BIXI (BIXI, 2013) 16

Figure 1.5 Dispersion spatiale des stations selon leur facteur d'équilibre (Morency et al., 2010) 18

Figure 1.6 Dispersion spatiale des stations selon leur niveau de service (Morency et al., 2010) ..19

Figure 1.7 Dispersion spatiale des stations selon leur facteur de redistribution (Morency et al., 2010).....19

Figure 2.1 Méthodologie 39

Figure 3.1 Structure de base des modèles d'optimisation.....56

Figure 4.1 Structure de données de l'outil 87

Figure 4.2 Page d'accueil de l'outil.....89

Figure 4.3 Page permettant de modifier les paramètres de base 90

Figure 4.4 Page permettant de modifier les paramètres mis à jour 91

Figure 4.5 Page permettant d'afficher les résultats de l'optimisation 93

Figure 5.1 Mouvement total par stations incluant les locations et les retours.....96

Figure 5.2 Balance totale pour toute la journée par station.....97

Figure 5.3 Patrons de demande pour les 5 stations les plus débalancées.....98

Figure 5.4 Nombre de transferts à chaque période de 5 minutes pour la journée du 16 juin 2011 100

Figure 5.5 Nombre de périodes de 5 minutes où une station était vide le 16 juin 2011 103

Figure 5.6 Nombre de périodes de 5 minutes où une station était pleine le 16 juin 2011 104

Figure 5.7 Nombre de périodes de 5 minutes où une station était en non-service le 16 juin 2011 105

Figure 5.8 Comparaison des indicateurs de performance unitaires entre les différents modèles statiques 109

Figure B.1 Performance en fonction du nombre de camions pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite 126

Figure B.2 Performance en fonction de la capacité des camions pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite 126

Figure B.3 Performance en fonction du nombre de camions pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite 127

Figure B.4 Performance en fonction de la capacité des camions pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite 127

Figure B.5 Performance en fonction de la durée de base d'une opération pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite 128

Figure B.6 Performance en fonction de la durée de base d'une opération pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite 128

Figure B.7 Performance en fonction de la durée de base d'une opération pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite 129

Figure B.8 Performance en fonction de la durée par vélo pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite 129

Figure B.9 Performance en fonction de la période de résolution pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite 130

Figure B.10 Performance en fonction du temps de résolution pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite 131

Figure B.11 Performance en fonction du temps de résolution pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite 131

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

1-PDTSP	One-commodity pickup and delivery traveling salesman problem, problème du voyageur de commerce à une commodité
GPS	Global Positioning System, système de géopositionnement
IRP	Inventory Routing Problem, prolème de route d'inventaire
MVBP	Multiple-Vehicle Balancing Problem, problème de balancement à plusieurs véhicules
NAB	Normalised Available Bicycles, nombre de vélos disponibles normalisé
OSBL	Organisme sans but lucratif
PDP	Pickup and Delivery Problems, problème de ramassage et de livraison
RFID	Radio Frequency Identification, radio-identification
SIG	Système d'information géographique
SP	Swapping Problem, problème d'échange
SQL	Structured Query Language, langage de requite structurée
SVLS	Société de vélo en libre-service
VBA	Visual Basic for Applications

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – AJOUTS À LA MÉTHODOLOGIE….……...122

A.1 Macro VBA (Access) du calcul du changement de niveau d'inventaire à chaque station……122

A.2 Macro VBA (Access) du calcul de la demande réelle à partir de la table locations…….....123

A.3 Macro VBA (Excel) de la recherche de la station la plus près .....…125

Annexe B – AJOUTS À L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ..……...……126

B.1 Nombre de camions et leur capacité …….……..……..126

B.2 Durée de base et durée par vélo…….128

B.3 Période de résolution……..130

B.4 Temps de résolution……...……131

INTRODUCTION

Les systèmes de vélopartage comme le système BIXI gagnent en popularité et attirent de plus en plus d'adeptes partout à travers le monde. Cette augmentation du nombre de membres et la grande variabilité quotidienne et hebdomadaire de la demande rendent la gestion d'un tel système très difficile. D'ailleurs, dans un système de vélopartage à sens unique (sans retour du vélo à la station de départ), un déséquilibre entre les stations est présent la majorité du temps et les stations ne peuvent être balancées qu'à travers la redistribution. Le problème de redistribution des vélos dans le but de balancer les stations est donc le principal enjeu opérationnel des systèmes de vélopartage.

En plus d'être coûteuse, cette opération est difficile à planifier puisqu'elle nécessite une bonne compréhension des comportements des utilisateurs et implique une modélisation mathématique complexe. Quelques travaux de recherche ont été faits sur le sujet, mais aucun n'apporte une solution concrète et applicable facilement par l'industrie. D'ailleurs, pour l'instant, la redistribution des vélos s'appuie principalement sur une prévision empirique de l'utilisation des vélos et sur l'expérience des opérateurs, mais n'a pas fait l'objet d'analyses approfondies. Il apparaît donc essentiel de développer un mécanisme d'optimisation de la redistribution des vélos en fonction de la demande puisque la redistribution doit être adaptée à différents facteurs dont le type de journée, la période de l'année et les conditions météorologiques.

L'objectif principal du projet présenté dans le cadre de ce mémoire est donc de développer un outil d'optimisation pour la redistribution des vélos dans un système de vélopartage à sens unique. Cet objectif sous-tend premièrement une meilleure compréhension des techniques actuelles de redistribution. Un autre sous-objectif implique le développement d'indicateurs de performance permettant de comparer la performance de la redistribution d'une journée à l'autre en fonction du niveau de service et des coûts engendrés.

Pour être efficace et répondre à ces objectifs, l'outil développé doit répondre à certains critères précis. En effet, il doit d'abord être général pour pouvoir être appliqué moyennant de légères modifications à n'importe quel système de vélopartage. Il doit évidemment être efficace. L'efficacité de l'outil développé sera d'ailleurs testée sur les données du système montréalais BIXI à l'aide de différents indicateurs de performance. Ces indicateurs doivent correspondre aux

différents besoins des opérateurs de systèmes de vélopartage. En outre, l'outil doit aussi être facilement applicable dans un cadre opérationnel. Ainsi, l'applicabilité du modèle dans un cadre réel sera validée en fonction des procédures utilisées actuellement par BIXI. Finalement, le modèle devra permettre de relever un défi de taille auquel fait face tout système de vélopartage : assurer aux usagers qu'un vélo sera disponible lorsqu'il souhaitera en emprunter un, et cela à un coût minimum pour l'entreprise.

Ce mémoire présente donc au développement des modèles pour résoudre les problèmes de redistribution et leur adaptation en un outil facilement utilisable par les différents systèmes de vélopartage en couvrant différents sujets présentés de la façon suivante.

Le premier chapitre présente une revue de littérature qui couvre les principaux articles liés aux systèmes de vélopartage et à l'optimisation de leurs opérations. Les trois générations de systèmes de vélopartage y sont décrites. Cette description est complétée par une réflexion sur l'avenir des systèmes de vélopartage. La revue de littérature présente aussi le système BIXI de Montréal, son contexte, son évolution et son fonctionnement. Par la suite, les trois principaux enjeux liés à la redistribution des vélos soit le problème de design de système, le problème de redistribution statique de nuit et le problème de redistribution dynamique de jour sont décrits de concert avec les différentes tentatives de résolution de ces problèmes présentes dans la littérature. Finalement, comme ces aspects ont une importante influence sur le problème de redistribution, un survol des articles portant sur l'analyse des patrons de demande des vélos et sur les indicateurs de performance est présenté.

Dans le second chapitre, la méthodologie du projet de recherche est présentée. Les différentes étapes ayant permis de développer le modèle d'optimisation sont décrites et appuyées par des exemples. De plus, le second chapitre inclut un résumé des travaux sur l'analyse de la demande et de la redistribution actuelle du système de vélopartage BIXI étant donné leur importance dans le projet.

Le chapitre 3 présente les six modèles principaux qui ont été développés pour répondre aux problèmes de redistribution statique et dynamique : le modèle statique avec objectif précis, le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite, le modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite, le modèle dynamique avec objectif, le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite ainsi que le modèle dynamique avec niveau de service.

Le chapitre 4 présente comment l'outil pour optimiser la redistribution des vélos a été développé en fonction des modèles à travers la création d'une interface utilisateur dans AIMMS. La façon dont l'outil peut être utilisé dans le quotidien opérationnel de BIXI est présentée à travers différents exemples de situations et des captures d'écran de l'interface.

Le chapitre 5 présente les résultats qui ont été obtenus avec les différents modèles. Ces résultats sont évalués en fonction de différents indicateurs de performance. Le chapitre 5 présente aussi une analyse de sensibilité sur certains paramètres clés comme le nombre de camions et leur capacité.

Finalement, le mémoire est conclu par une discussion sur les applications possibles du modèle dans d'autres systèmes de vélopartage en plus d'une présentation des perspectives possibles pour d'autres travaux de recherche.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente un survol des travaux qui ont été faits sur les systèmes de vélopartage et sur l'optimisation des opérations de ces derniers. En premier lieu, l'évolution des systèmes de vélopartage à travers le monde sera présentée. Puis, le système de vélopartage de la ville de Montréal (BIXI) sera présenté en détail. Ensuite, les trois principaux problèmes opérationnels liés à la redistribution des vélos soit le problème de design du système, le problème de redistribution statique et le problème de redistribution dynamique seront étudiés. Finalement, pour bien comprendre leurs impacts sur les problèmes d'optimisation de la redistribution des vélos, un survol des travaux touchant à l'analyse de la demande des vélos et aux indicateurs de performance des systèmes de vélopartage sera présenté.

1.1 Histoire et contexte actuel des systèmes de vélopartage

Depuis l'apparition de la première génération de systèmes de vélopartage en 1965 à Amsterdam, il y eut une importante évolution dans ce domaine. En effet, les systèmes comme BIXI à Montréal et Vélib' à Paris font partie de ce qui est appelé la troisième génération des systèmes de vélopartage.

1.1.1 Première génération

Tel que mentionné précédemment, le premier système de vélopartage a vu le jour en 1965 à Amsterdam. Ce système qui s'appelait Witte Fietsen qu'on peut traduire par vélos blancs a été élaboré par le mouvement Provo, une organisation environnementale (Shaheen, Guzman, & Zhang, 2010). Le but premier de ce système était de régler les problèmes de circulation au centre-ville d'Amsterdam. En effet, les systèmes de première génération étaient opérés comme des organismes sans but lucratif (OSBL) et avaient comme objectif de répondre à des préoccupations sociales et environnementales (Shaheen et al., 2010).

Le concept était très simple, il s'agissait de vélos ordinaires peints en blanc que l'utilisateur pouvait emprunter et laisser à peu près n'importe où pour le prochain utilisateur (DeMaio, 2009). La seule règle régissant cette première génération de systèmes de vélopartage était que l'utilisateur ne devait pas barrer le vélo à son arrivée à destination. Le premier système de Witte

Fietsen n'a pas fonctionné tel que planifié par le mouvement Provo. En effet, plusieurs utilisateurs se sont approprié les vélos pour leur utilisation personnelle. De plus, plusieurs vélos ont été endommagés ou tout simplement jetés dans les canaux (DeMaio, 2009). Finalement, en plus des vélos volés ou endommagés, les policiers ont confisqué tous les vélos trouvés abandonnés ou qui n'étaient pas barrés puisque ces derniers encourageaient le vol. Ainsi, la première version du programme des vélos blancs a été rapidement abandonnée (Shaheen et al., 2010).

Malgré l'échec de la première version du système des vélos blancs, cette initiative a mené au développement de la première génération des systèmes de vélopartage dans d'autres villes d'Europe. Les systèmes de première génération se distinguent par trois principales caractéristiques : la gratuité du service, des vélos peints d'une couleur particulière et des vélos en libre-service placés aléatoirement dans une certaine zone (Shaheen et al., 2010).

Deux autres exemples de systèmes de première génération sont le système de Cambridge fondé en 1993 et celui de La Rochelle fondé en 1974. Le système des vélos verts de Cambridge a été arrêté peu après sa mise en œuvre puisque la quasi-totalité des 300 vélos en service a été volée (Midgley, 2009b). Cependant, le système des vélos jaunes de La Rochelle a mieux fonctionné et existe encore aujourd'hui. Évidemment, le système a été amélioré au fil du temps notamment en 2005 pour devenir un système de deuxième génération et en 2008 un système de troisième génération (Midgley, 2009a).

1.1.2 Deuxième génération

Les premiers systèmes de vélopartage de deuxième génération ont vu le jour en 1992 à Farso et Grenaa au Danemark et en 1993 à Nakskov au Danemark (Nielsen, 1993). Cependant, ces systèmes étaient de petite taille. Par exemple, celui de Nakskov comptait seulement 26 vélos (DeMaio, 2009).

C'est en janvier 1995 que la municipalité de Copenhague a lancé la première version des systèmes de vélopartage de deuxième génération à grande échelle (Shaheen et al., 2010). L'initiative Bycyklen qu'on peut traduire par vélo de ville comprenait plusieurs améliorations par rapport à la génération précédente. La première différence majeure se trouve au niveau des vélos en tant que tels. En effet, les vélos des systèmes de deuxième génération sont plus robustes et

sont conçus pour résister au vandalisme. De plus, les systèmes de deuxième génération ont introduit le concept de dépôt d'argent. En effet, les vélos du système Bycyklen sont barrés dans des supports à vélo dédiés placés un peu partout au centre-ville de Copenhague. Pour débarrer un vélo, il faut faire un dépôt d'environ 3 $ qui est récupéré lors du retour du vélo à une station (Shaheen et al., 2010). Le système Bycyklen est encore en service aujourd'hui et a mené au développement de la deuxième génération de systèmes de vélopartage.

Les systèmes de vélopartage de deuxième génération sont donc caractérisés par des vélos plus robustes portant une marque distinctive, des stations dédiées qui permettent d'emprunter ou de retourner des vélos et un dépôt financier nécessaire pour emprunter le vélo qui est rendu en totalité à l'utilisateur lors du retour du vélo.

Le succès du système de deuxième génération Bycyklen a entraîné la création d'autres systèmes de deuxième génération dont Bycykler à Sandnes en Norvège (1996), City Bikes à Helsinki en Finlande (2000) et Bycykel à Aarhus au Danemark (2005) (Shaheen et al., 2010).

Comme les systèmes de première génération, les systèmes de deuxième génération sont eux aussi majoritairement gérés par des OSBL. Les systèmes de deuxième génération étant plus coûteux que ceux de première génération, ils sont aussi souvent financés par les municipalités.

Les améliorations apportées aux systèmes de deuxième génération ont permis de diminuer les vols et d'avoir un système plus fiable. Cependant, l'absence de limite de temps à la location de concert avec la valeur minimale du dépôt et l'anonymat de la location ont poussé certains utilisateurs à garder les vélos pour une longue période ou tout simplement ne jamais les retourner (Shaheen et al., 2010). Finalement, même si les systèmes de deuxième génération ont été présentés comme une façon de réduire l'utilisation de véhicules motorisés, leur manque de fiabilité n'a pas mené à des changements significatifs dans les habitudes de transport des usagers (Bonnette, 2007).

1.1.3 Troisième génération

Les problèmes de fiabilités et de vols des deux premières générations de systèmes de vélopartage ont mené à la nécessité de développer un système de troisième génération plus fiable. Le premier système dit de troisième génération est celui de Portsmouth Universtiy en Angleterre. Le système Bikeabout a été fondé en 1996 et les étudiants pouvaient utiliser une carte magnétique pour louer

un vélo (DeMaio, 2009). La troisième génération est caractérisée par l'utilisation de différentes technologies telles que des espaces pour retourner les vélos se barrant automatiquement, des systèmes de télécommunications, des cartes intelligentes, un accès avec son téléphone mobile et des ordinateurs embarqués (DeMaio, 2009). Les technologies utilisées permettent d'avoir un suivi de l'information et de contrôler les locations et les retours.

Entre 1996 et 2005, il y a eu l'apparition d'autres systèmes de vélopartage de troisième génération au rythme plutôt lent d'un ou deux nouveaux systèmes lancés chaque année. Par exemple, il y a eu la mise sur pied de Vélo à la Carte à Rennes en France en 1998 et Call a Bike à Munich en Allemagne en 2000 (DeMaio, 2009). 2005 a été une année importante pour les systèmes de troisième génération avec le déploiement de Vélo'v à Lyon, un système qui comptait plus de 1500 vélos (OBIS, 2011). Deux années plus tard, le système Vélib' à Paris voyait le jour avec un système de plus de 7000 vélos. Le succès important et inattendu de ces deux systèmes de troisième génération à grand déploiement a eu une influence importante sur le développement de plusieurs autres systèmes de vélopartage de troisième génération.

D'importants systèmes de troisième génération ont commencé à voir le jour à l'extérieur de l'Europe en 2008 avec le lancement de différentes plateformes au Brésil, au Chili, en Chine en Nouvelle-Zélande, en Corée du Sud à Taiwan, aux États-Unis et au Canada (DeMaio, 2009).

Les systèmes de troisième génération dont les modèles de financement et de propriété sont variables sont caractérisés par des vélos robustes portant une marque distinctive, des stations dédiées permettant d'emprunter ou de retourner des vélos, des interfaces utilisateurs nécessaires pour faire une location ou un retour et la présence de plusieurs technologies avancées permettant de faire le suivi des vélos (Shaheen et al., 2010).

En résumé, bien qu'innovatrice, la première génération de systèmes de vélopartage présentait plusieurs problèmes au niveau du vol et du vandalisme. La deuxième génération est venue pallier ces lacunes avec l'ajout de station dédiées et d'un dépôt nécessaire pour louer un vélo. Cependant, l'anonymat des systèmes de deuxième génération et l'absence de limite de temps ont engendré des comportements d'utilisateurs peu souhaitables comme l'emprunt de vélo à long terme et le vol. L'absence de fiabilité des systèmes de première et de deuxième génération a donc donné naissance aux systèmes de troisième génération qui utilisent la technologie pour faire le suivi de l'utilisation des vélos et assurer la fiabilité du système.

1.1.4 Portrait actuel des systèmes de vélopartage à travers le monde

Avant de faire un survol des hypothèses présentes dans la littérature sur ce que sera la quatrième génération des systèmes de vélopartage, cette sous-section dresse un portrait des systèmes de vélopartage existant actuellement à travers le monde en plus de mettre l'accent sur leurs succès et leurs lacunes.

Tel que présenté précédemment, les systèmes de vélopartage ont beaucoup évolué depuis l'apparition du premier prototype en 1965. Dans les dernières années, il y a eu une multiplication fulgurante de ces systèmes à travers le monde. En effet, en décembre 2007 seulement 68 villes avaient un système de vélopartage en opération, dont 61 en Europe et 1 en Asie. En décembre 2012, il y avait 493 systèmes en opération à travers le monde, dont 352 en Europe, 90 en Asie, 35 en Amérique du Nord, 15 en Amérique du Sud, 4 en Océanie et 1 en Afrique (DeMaio & Meddin, 31 décembre 2012). Les graphiques suivants dressent un portrait de la croissance importante des systèmes de vélopartage de troisième génération dans les dernières années.

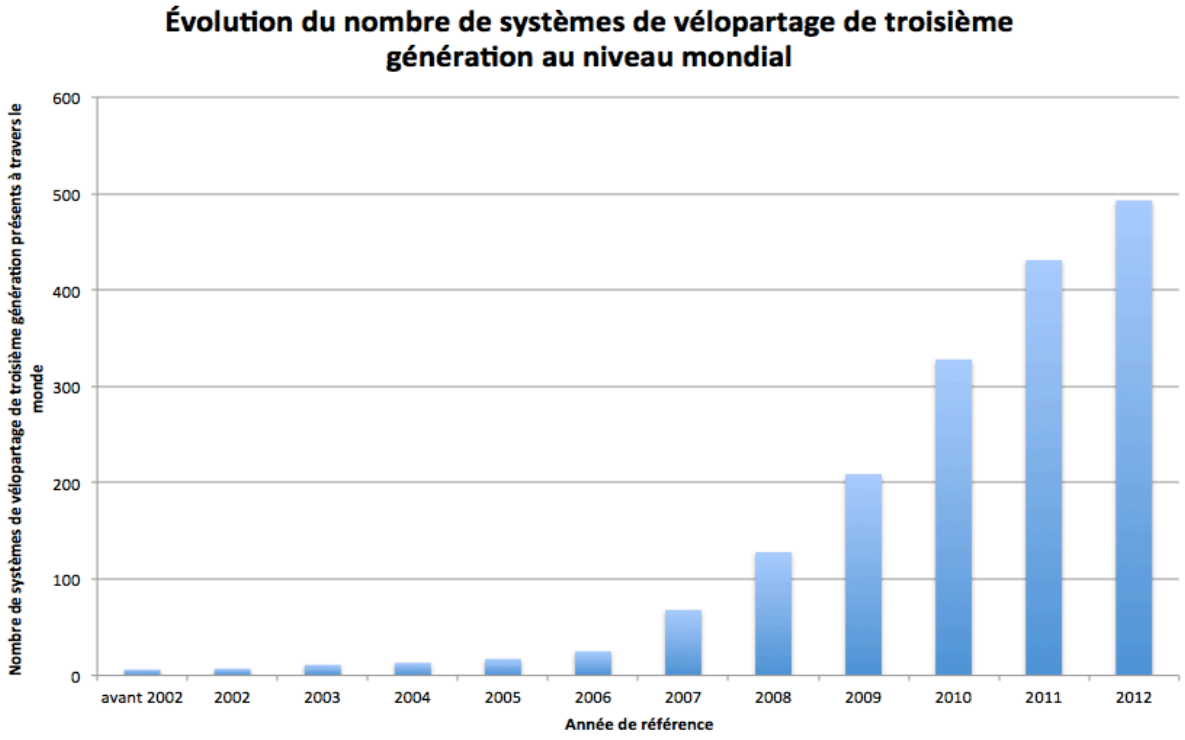

Figure 1.1 Évolution du nombre de systèmes de troisième génération au niveau mondial

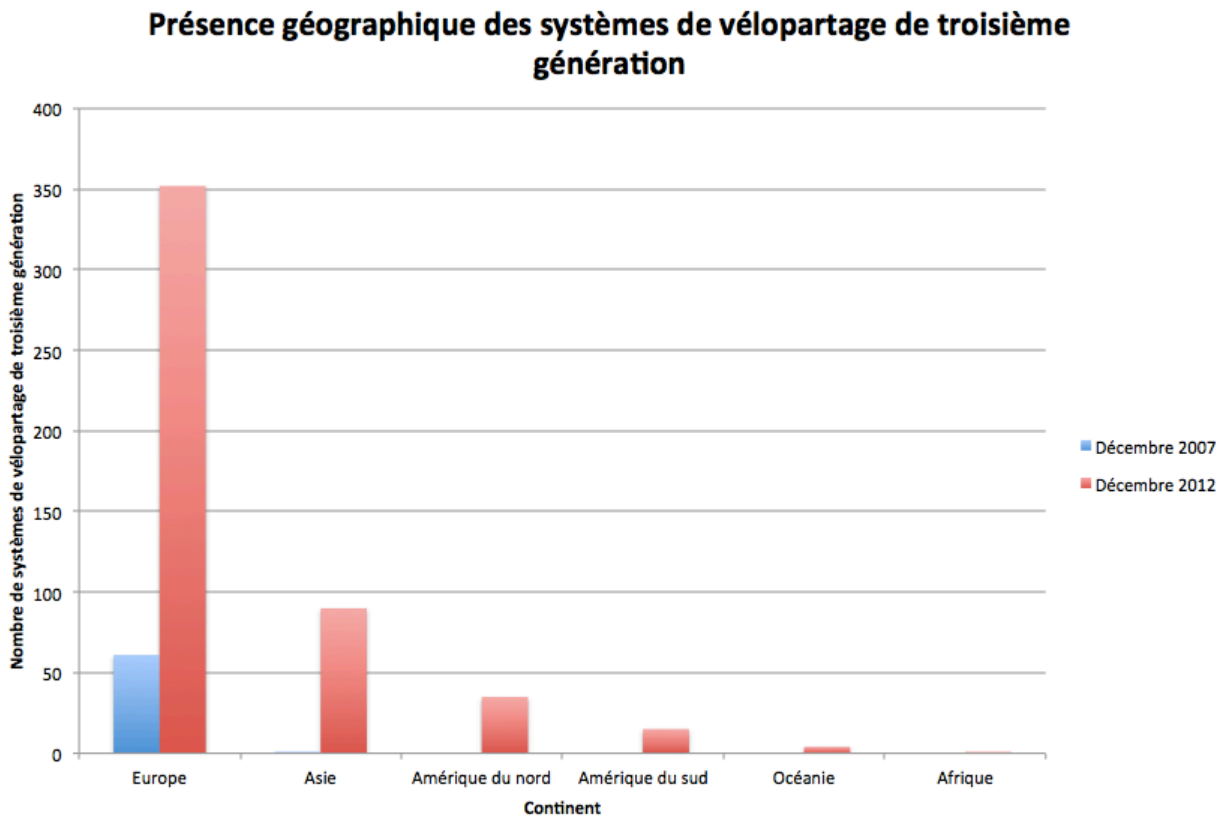

Figure 1.2 Présence géographique des systèmes de troisième génération

Cette répartition géographique des systèmes de vélopartage de troisième génération peut être expliquée par certains phénomènes conjoncturels et législatifs. En effet, même si l'Europe a toujours été en avance quant au nombre de systèmes de vélopartage présents sur son territoire, elle présente un ralentissement de la croissance du nombre de ces systèmes en 2012. Ce phénomène s'explique partiellement par l'incertitude économique en Europe. La conjoncture économique a aussi retardé le déploiement d'importants systèmes en Amérique du Nord en 2012. Cependant, on a pu assister à l'apparition de plus petits systèmes. L'Asie connaît pour sa part une croissance phénoménale de son nombre de systèmes de vélopartage. Plusieurs nouveaux systèmes ont vu le jour en Chine et plusieurs autres doivent être lancés très bientôt. Le faible nombre de systèmes de vélopartage en Océanie est attribuable à la loi sur le port du casque obligatoire qui ralentit l'implantation de tels systèmes. Même si l'Amérique centrale et l'Afrique ont très peu de systèmes de vélopartage, le potentiel y est énorme et on peut s'attendre à une croissance importante en 2013 (DeMaio & Meddin, 31 décembre 2012).

1.1.4.1 Objectifs des systèmes de vélopartage : impact social et environnemental

Généralement, les systèmes de vélopartage sont lancés dans le but d'augmenter la mobilité des utilisateurs, d'améliorer la qualité de l'air et de réduire la congestion. Dans son article, Midgley (2009a) recense les objectifs spécifiques de certaines villes. Ces objectifs sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau 1.1 Objectifs spécifiques de quelques systèmes de vélopartage de troisième génération

Systèmes	Objectifs
Barcelone, Espagne	• Améliorer le passage d'un mode de transport à l'autre et promouvoir le transport durable; • Créer un nouveau moyen de transport public individuel pour les besoins quotidiens des citoyens; • Implanter un système de transport en commun intégré, durable et faisant la promotion de la santé; • Promouvoir le vélo comme moyen de transport; • Améliorer la qualité de vie et réduire la pollution de l'air et la pollution par le bruit.
Gothembourg, Suède	• Promouvoir le cyclisme; • Promouvoir l'utilisation du vélo pour les voyages de courtes distances.
Lyon, France	• Aider à créer un système de transport plus durable dans la région en lançant un système de vélopartage public engendrant de nouvelles options de déplacements pour les voyages de courte distance; • Aider à atteindre les objectifs de transport et d'utilisation du territoire incluant la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la réduction de la congestion, la réduction des coûts de stationnement et d'entretien des routes, la réduction des coûts pour l'utilisateur, la conservation de l'énergie, la réduction des accidents, l'amélioration de la santé publique et le développement d'un support pour la croissance intelligente de l'utilisation du territoire.
Montréal, Canada	• Encourager l'utilisation du vélo au lieu de l'auto pour les voyages de courtes distances en ville.
Paris, France	• Améliorer la qualité de l'air et la santé publique; • Améliorer la mobilité de tous; • Faire de la ville un endroit plus beau et agréable où vivre; • Encourager le développement économique; • Renforcer la solidarité régionale.
Washington D.C., États-Unis	• Fournir le plus d'options de transport en ville possibles et réduire le niveau de congestion principalement au centre-ville.

Les objectifs des systèmes de vélopartage peuvent donc tous être divisés en deux grandes catégories : les objectifs à impacts sociaux et ceux à impacts environnementaux. Jusqu'à ce jour, peu de recherche a été faite pour quantifier les impacts sociaux et environnementaux des systèmes de vélopartage. Cependant, plusieurs sondages ont été effectués par les propriétaires des systèmes de vélopartage. Shaheen et al. (2010) ont recensé quelques-uns des résultats de ces sondages dans leur article. Ils mentionnent notamment que les usagers de Vélib' parcourent une distance d'environ 312 000 km par jour ce qui représente une diminution de 57 720 kg de CO_2 par jour comparativement à l'auto. Ils mentionnent aussi les usagers de BIXI qui, en août 2009, avaient parcouru une distance d'environ 3 612 799 km, ce qui représente une diminution des émissions de gaz à effet de serre de 909 053 kg si chaque usager avait pris sa voiture. La présence plus en plus marquée des systèmes de vélopartage autour du monde a permis de mettre en lumière leurs avantages et leur utilité. Plusieurs systèmes rapportent des usagers satisfaits qui voient leur qualité de vie grandement améliorée par la présence de cette nouvelle façon de se déplacer pour les voyages de courtes distances (Shaheen et al., 2010).

1.1.4.2 Modèles d'affaire et fournisseurs

Tel que mentionné précédemment, une des caractéristiques des systèmes de vélopartage de troisième génération est qu'ils sont basés sur des modèles d'affaires différents. En effet, il existe différents modèles de financement et différents fournisseurs de service.

Il existe aussi plusieurs fournisseurs de service pour les systèmes de vélopartage dont notamment des gouvernements municipaux (Green Bikes à Cambridge en Angleterre ou Bicibur à Burgos en Espagne), des sociétés en commandite (BIXI à Montréal au Canada), des compagnies de publicité (Vélib' à Paris en France), des entreprises à but lucratif (NextBike à Berlin en Allemagne) et des OSBL (Witte Fiets à Amsterdam aux Pays-Bas) (DeMaio, 2009). Actuellement, les principaux fournisseurs sont Clear Channel Adshel, BIXI, Veolia Transportation, Cemusa, JCDecaux et B-Cycle (Shaheen et al., 2010). La performance de chaque modèle dépend de la situation, il n'existe pas de modèle parfait et chaque modèle a ses avantages et ses inconvénients. En Amérique du Nord, en janvier 2012, sur les 19 systèmes de vélopartage de troisième génération, 11 (58 %) étaient des OSBL, quatre (21 %) étaient des entreprises privées, trois (15 %) étaient des organismes gouvernementaux opérés par un sous-traitant et un seul (5 %) était un organisme gouvernemental et opéré par le Gouvernement (Shaheen, Martin, Cohen, & Finson, 2012).

Le modèle de financement d'un système de vélopartage est primordial puisque les activités de ce type de systèmes sont coûteuses. En effet, la profitabilité des systèmes de vélopartage est très difficile à atteindre et n'a pas encore été mesurée à long terme. Les exploiteurs de tels systèmes ont principalement trois sources de revenus : les frais chargés aux utilisateurs, les revenus liés à la publicité et les subventions. Le choix d'un modèle de financement est étroitement lié au type de fournisseur de service. Selon Gifford et Campus (2004), aux États-Unis, les programmes gérés comme des OSBL plutôt que comme des entreprises à profit ont plus de chance de réussir.

L'investissement (fabrication des vélos et des stations, licence ou achat du système d'information pour gérer les locations, cartes d'accès, installation, etc.) et les coûts d'opérations (maintenance, redistribution, employés, assurance, bureaux, entrepôts, site internet, électricité, etc.) varient en fonction du système choisi, de la densité de population, de la zone de service et du nombre de vélos (DeMaio, 2009). Dans chacun des cas, le coût de la redistribution est un coût non négligeable.

1.1.4.3 Lacunes des systèmes actuels

Tel que présenté dans les sections précédentes, les principaux problèmes avec les systèmes de vélopartage toutes générations confondues sont le vol et le vandalisme. Évidemment, la technologie a permis de réduire l'importance de ces phénomènes dans les systèmes de troisième génération. De plus, les vélos sont construits de façon à diminuer le vandalisme : le vélo est plus lourd et plus massif, les pièces n'ont pas les mêmes dimensions que dans les vélos traditionnels et les vélos doivent être désassemblés avec des outils spéciaux. Cependant, même si les nouveaux systèmes sont plus résistants au vol et au vandalisme c'est un problème qui demeure présent et qu'il ne faudra pas négliger dans la quatrième génération.

Un autre problème important est la redistribution des vélos. En effet, cette tâche inévitable n'est pas seulement coûteuse, mais elle pollue puisqu'elle implique généralement l'utilisation de camions pour déplacer les vélos d'une station à l'autre. Il est primordial de garder ce problème en tête lors du design et de la mise en place du réseau. Le problème de redistribution devra être au cœur de la création des systèmes de quatrième génération.

Une dernière considération non négligeable est celle du port du casque. En effet, le port du casque n'est pas obligatoire pour la majorité des systèmes de vélopartage ce qui cause des problèmes au niveau de l'assurance et de la responsabilité. Par exemple, en 2008, Vélib' avait

trois morts à son actif. De même, NextBike avait été impliqué dans trois accidents alors que BIXI et Hangzhou avaient chacun été impliqués dans un accident (Shaheen et al., 2010). La question des casques devra donc être abordée dans les systèmes de quatrième génération d'autant plus pour la croissance en Océanie puisque la législation y oblige le port du casque en vélo.

1.1.5 Perspectives futures

Les systèmes de quatrième génération doivent pallier les lacunes mentionnées précédemment et aider les systèmes de vélopartage dans l'atteinte de leurs objectifs sociaux et environnementaux.

Selon DeMaio (2009), alors que la troisième génération a intégré plusieurs technologies, la quatrième génération devra présenter des améliorations sur le plan de l'efficacité, de la facilité d'utilisation et du respect de l'environnement. Selon lui, la quatrième génération sera basée sur six principaux aspects : la distribution améliorée, la facilité d'installation, le design des stations, le suivi, les vélos électriques et le modèle d'affaires.

La redistribution des vélos qui fait l'objet de ce mémoire est en effet un enjeu de taille de plus en plus étudié. Toujours selon DeMaio (2009), les systèmes de quatrième génération incluront des incitatifs en temps, en crédits ou en argent pour encourager les usagers à prendre le vélo à une certaine station ou rapporter le vélo à une autre et ainsi diminuer le besoin en redistribution. Par exemple, Vélib' donne un crédit de 15 minutes pour ceux qui atteindront une des 100 stations en haut d'une colline. Il propose aussi une correspondance gratuite à un autre moyen de transport pour les stations en hauteur. Finalement, il suggère aussi de payer certains utilisateurs pour redistribuer les vélos au lieu des camions.

La facilité d'installation des stations est un autre aspect clé des systèmes de quatrième génération selon DeMaio (2009). Des stations comme celles de BIXI qui peuvent être installées et désinstallées rapidement sont donc l'idéal. À l'instar de BIXI, la prochaine génération devra aussi utiliser l'énergie solaire pour alimenter ses stations.

La troisième génération des systèmes de vélopartage a innové en intégrant plusieurs technologies. La quatrième génération devra faire mieux en assurant un meilleur suivi en implantant un système de positionnement global (GPS). Cela permettra d'aller chercher plusieurs données pour analyser les habitudes de transports des usagers.

Selon DeMaio (2009), le vélo électrique fera lui aussi partie de la quatrième génération des systèmes de vélopartage dans le but d'aider à monter les côtes et à pédaler sur de plus longues distances. Cela permettrait de rejoindre les utilisateurs qui ne prennent pas le vélo à cause de l'effort physique demandé.

Finalement, une augmentation de la popularité des systèmes de vélopartage implique aussi une croissance dans le nombre, la grosseur et les types de fournisseurs.

La vision de la prochaine génération de système de vélopartage de Shaheen et al. (2010) n'est pas très différente de celle de DeMaio (2009). En effet, selon eux les systèmes de quatrième génération devront mettre l'accent sur quatre principaux aspects : la flexibilité des stations, l'optimisation de la redistribution des vélos, l'intégration des cartes intelligentes à d'autres modes de transport et de nouvelles avancés technologiques comme le suivi en temps réel à partir de GPS. Selon Shaheen et al. (2010), BIXI qui a été fondé en 2009 est un hybride entre la troisième et la quatrième génération avec ses stations mobiles alimentées à l'aide de panneaux solaires.

1.2 BIXI Montréal

Étant donné que les différents modèles développés dans le cadre de cette recherche ont été testés sur les données du système BIXI de Montréal. Il est important d'en décrire le fonctionnement, le contexte et les particularités.

1.2.1 Importance du système BIXI à Montréal

Lancé en 2009, BIXI est le premier système de vélopartage au Canada. C'est Stationnement de Montréal qui a initié le système et il est actuellement opéré par la Société de vélo en libre-service (SVLS). Le système BIXI de Montréal comprend environ 5120 vélos, 411 stations et un peu plus de 40 000 membres (BIXI, 2013) ce qui en fait le plus important système de quatrième génération. BIXI est aussi présent à Ottawa, à Toronto et ailleurs dans le monde. En effet, le système a été vendu à plus d'une dizaine de villes. Le tableau suivant (BIXI, 2013) décrit la présence et l'importance des systèmes BIXI à travers le monde.

Tableau 1.2 Présence internationale des systèmes BIXI

Ville	Nom du système	Lancement	Vélos	Stations
Montréal	Bixi Montréal	12 mai 2009	5120	411
Toronto	Bixi Toronto	3 mai 2011	1000	80
Ottawa	Bixi de la capitale	18 mai 2011	250	25
Londres	Barclays Cycle Hire	30 juillet 2010	9200	687
Melbourne	Melbourne Bike Share	31 mai 2010	600	52
Washington D.C.	Capital BikeShare	20 septembre 2010	1395	152
Minneapolis	Nice Ride Minnesota	10 juin 2010	1200	116
Washington State University	GreenBike Program	1 septembre 2010	84	9
Boston	Hubway	28 juillet 2011	610	61
Chattanooga	Bike Chattanooga	31 juillet 2012	300	30

Les 5120 vélos et 411 stations du système de Montréal en font le système de vélopartage le plus important en Amérique du Nord. Cependant, il sera prochainement dépassé par le système de la ville de New York. La figure suivante tirée de l'article de Shaheen et al. (2012) dresse un portrait des systèmes de vélopartage de troisième et quatrième génération en Amérique du Nord. Ce portrait ne permet pas seulement de voir les différents ratios vélo/membre pour l'ensemble des systèmes de vélopartage en Amérique du Nord, mais il permet aussi de constater l'importance du système BIXI de Montréal.

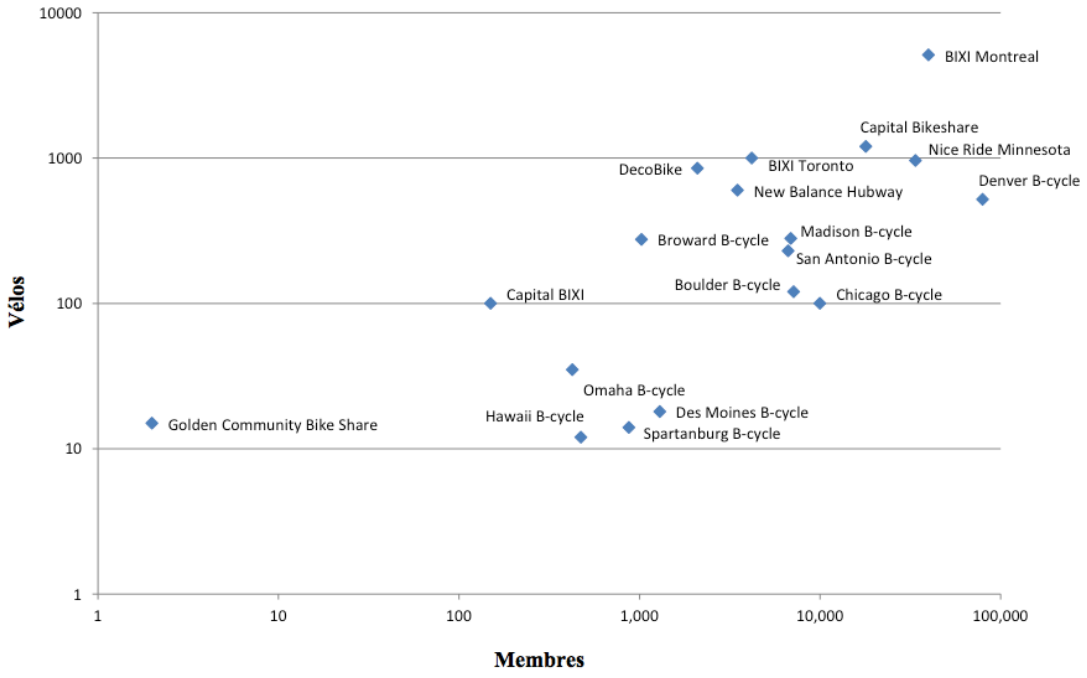

Figure 1.3 Taille des différents systèmes de vélopartage en Amérique (Shaheen et al., 2012)

1.2.2 Fonctionnement du système BIXI à Montréal

Le système BIXI a été installé à Montréal à l'été 2009. Il est passé de 20 stations à 215 stations en un mois. Le système BIXI a connu un succès instantané et la deuxième phase qui était prévue pour 2010 a été devancée et de nouvelles stations ont été installées en août 2009 (Morency, Trepanier, & Godefroy, 2010).

1.2.2.1 Stations

Tel que discuté dans la section précédente, BIXI est un des premiers systèmes de quatrième génération principalement à cause de ses stations très flexibles qui peuvent être installées et désinstallées rapidement. En effet, les stations BIXI sont alimentées grâce à des panneaux solaires qui permettent une mobilité accrue. Selon Morency et al. (2010), une station peut être installée en seulement 40 minutes.

Chaque station est composée d'une borne transactionnelle et de plusieurs points d'ancrage pour les vélos. Chaque borne transactionnelle est équipée d'un lecteur de radio-identification (RFID) qui transmet l'information à la borne transactionnelle. Le panneau solaire d'alimentation (1), les points d'ancrage (2) et la borne transactionnelle (3) sont représentés sur la figure suivante (BIXI, 2013).

Figure 1.4 Une station BIXI (BIXI, 2013)

1.2.2.2 Vélos

Les vélos du système BIXI sont confortables, sécuritaires, maniables et surtout robustes pour résister au vandalisme et prévenir le vol. Les vélos qui ont trois vitesses sont équipés d'un panier, de phares à l'avant et à l'arrière, de réflecteurs sur les roues (BIXI, 2013). Ils sont aussi équipés d'une puce RFID qui communique avec le point d'ancrage.

1.2.2.3 Abonnement

Il existe principalement deux types d'usagers : les membres qui doivent payer 82,50 CAD pour une période d'abonnement de un an et les usagers occasionnels qui doivent payer à l'utilisation. Chaque membre possède une clé RFID qu'il peut utiliser pour louer un vélo sans avoir à interagir avec la borne transactionnelle. Pour leur part, les usagers occasionnels doivent interagir avec la borne transactionnelle pour effectuer le paiement. Chaque transaction est enregistrée dans une base de données notamment pour permettre la facturation (Morency et al., 2010).

La structure de facturation pour les membres est simple : les 45 premières minutes sont gratuites, il en coûte 1,75 CAD pour les 15 minutes suivantes puis les tarifs augmentent pour les périodes de temps suivantes. Un utilisateur occasionnel paie 5 CAD pour 24 h et il est sujet aux mêmes frais par minute que le membre.

1.2.3 Statistiques d'utilisation

Dans l'article de Morency et al. (2010), plusieurs statistiques du système BIXI sont recensées pour les mois de juillet, août et septembre 2009. Ces statistiques ont certainement évoluées, mais sont pertinentes dans le cadre de ce mémoire puisqu'elles permettent de mieux comprendre le contexte dans lequel BIXI évolue et les facteurs qui influencent la redistribution. Les membres représentent quotidiennement entre 50,3 % et 72,8 % des utilisateurs. Les proportions plus faibles sont observées la fin de semaine. Le ratio hommes/femmes est de 1,73. Les hommes sont donc davantage représentés que dans la population. De plus, l'âge moyen est de 34 ans. Les auteurs ont conclu qu'il y avait une surreprésentation des personnes de 25-34 chez les membres par rapport à la population de Montréal et cette constatation est d'autant plus vraie pour les hommes.

Morency et al. (2010) ont développé trois indicateurs permettant de classer les stations dans différentes catégories.

Le premier indicateur est le facteur d'équilibre qui représente le ratio entre le nombre de locations et le nombre de retours. Un facteur d'équilibre élevé représente donc une station qui est un point de départ et un facteur d'équilibre faible représente une station qui est un point d'arrivée. La figure suivante (Morency et al., 2010) permet de visualiser les résultats de l'analyse sur une carte de la ville de Montréal.

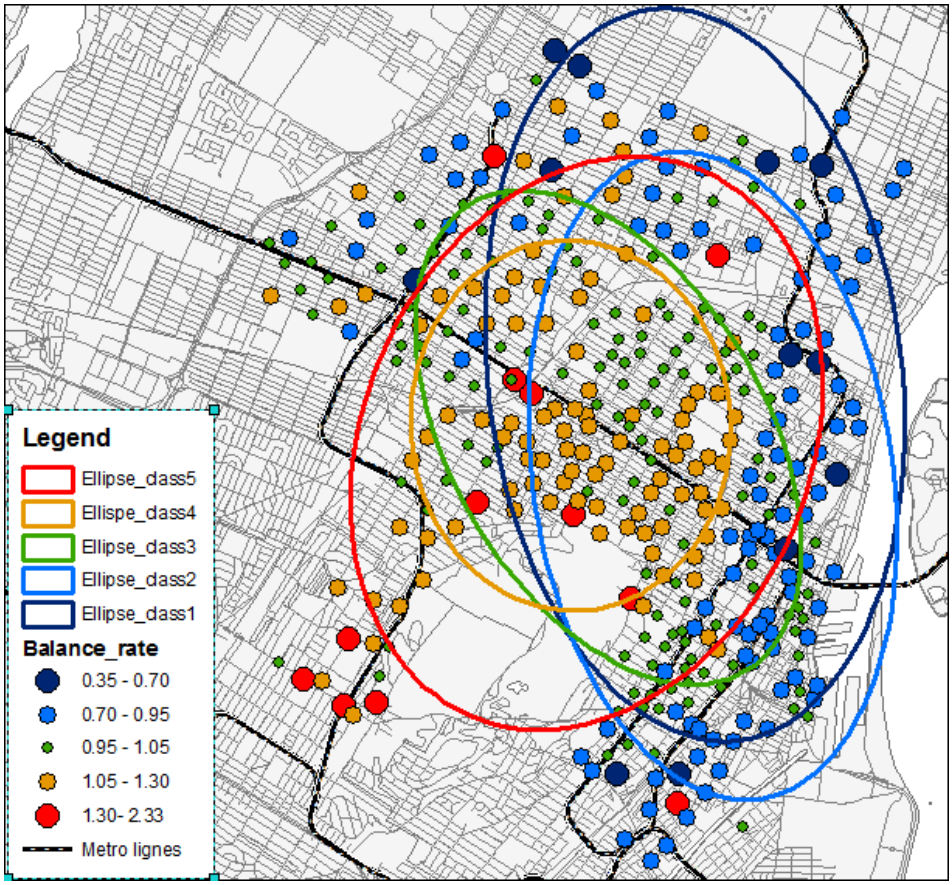

Figure 1.5 Dispersion spatiale des stations selon leur facteur d'équilibre (Morency et al., 2010)

Le deuxième indicateur est celui du niveau de service et est divisé en deux ratios. Le premier représente la proportion du temps où une station est pleine (aucun usager ne peut rapporter un vélo) et le deuxième représente la proportion du temps où une station est vide (aucun usager ne peut emprunter de vélo). La figure de droite représente le ratio de temps où la station est vide et celle de gauche le ratio de temps où la station est pleine (Morency et al., 2010).

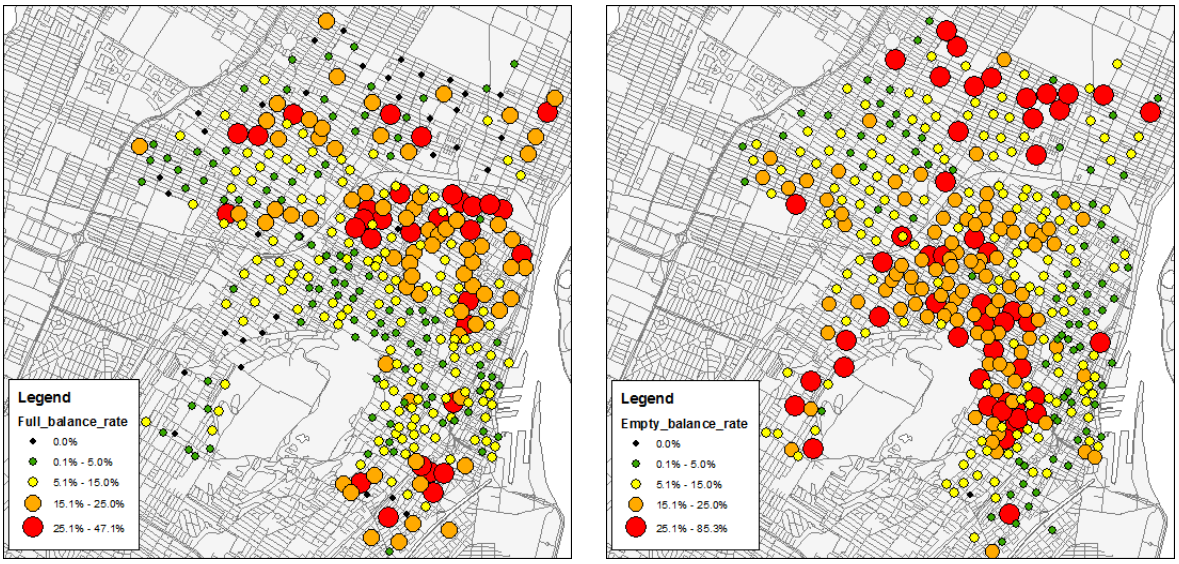

Figure 1.6 Dispersion spatiale des stations selon leur niveau de service (Morency et al., 2010)

Le troisième indicateur, celui de redistribution est aussi divisé en deux ratios. Le premier représente le ratio d'ajout de vélos qui est en fait le nombre de vélos ajoutés par le camion de redistribution sur le nombre total d'ajouts de vélos à la station (incluant les ajouts de redistribution et ceux faits par les usagers) et le deuxième ratio, celui de retrait est calculé de la même façon. Les résultats sont représentés sur la figure suivante (Morency et al., 2010). La figure de gauche représente les ratios de retraits et la figure de droite les ratios d'ajouts.

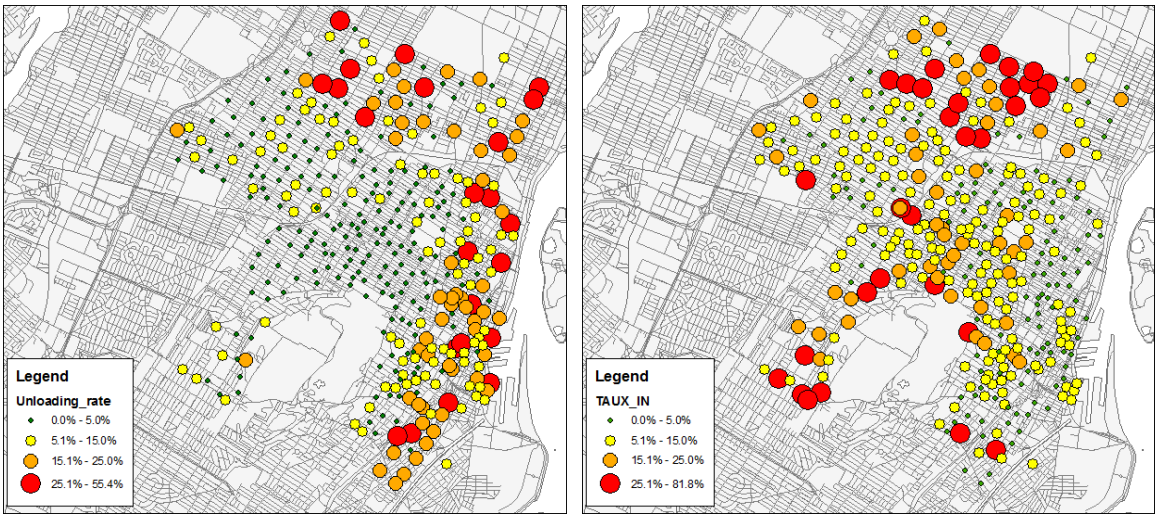

Figure 1.7 Dispersion spatiale des stations selon leur facteur de redistribution (Morency et al., 2010)

D'autres statistiques recensées par (Shaheen et al., 2012) viennent compléter les analyses précédentes. En effet, dans leur article, les auteurs constatent que la majorité des utilisateurs de BIXI Montréal (56 %) utilisent le système pour se rendre au travail ou à l'école, que 81 % des usagers de BIXI Montréal sont totalement en accord avec le fait que BIXI a amélioré le transport public à Montréal et que la majorité des utilisateurs de BIXI ne portent jamais de casque lors de l'utilisation.

En somme, BIXI est un système en pleine croissance qui fonctionne bien malgré les défis liés à la redistribution. BIXI est un des premiers systèmes de vélopartage de quatrième génération et gagnerait à être amélioré sur deux principaux aspects : l'optimisation de ses opérations à travers l'optimisation de la redistribution et la sécurité à travers la promotion du port du casque.

1.3 Problèmes de recherche opérationnelle liés au débalancement de la distribution géographique des vélos

La multiplication et la complexification des systèmes de vélopartage ont engendré plusieurs problèmes en gestion des opérations. Un des principaux problèmes est la gestion de la demande. En effet, la demande étant variable et difficile à prévoir, il est difficile d'assurer aux usagers qu'à chaque moment de la journée toute station aura au moins un vélo ou un stationnement libre. Ainsi, le problème le plus commun des systèmes de vélopartage est le débalancement dans la distribution géographique des vélos. Par exemple, en fin de soirée, il n'y a presque plus de vélos au centre-ville. Le débalancement entre les stations est dû principalement au fait que l'usage des vélos est généralement à sens unique et de courte durée (Vogel & Mattfeld, 2010).

Les causes du débalancement peuvent être classées dans deux catégories : les causes continues et les causes discrètes (Vogel & Mattfeld, 2010). Les causes continues comprennent l'ajout ou le retrait unilatéral de vélos. C'est le cas pour une station située en hauteur pour laquelle les vélos seront systématiquement retirés. Les causes continues incluent aussi le changement dans la direction du flux. Par exemple, une station située au centre-ville se remplira le matin et se videra en soirée. En plus de ces causes continues, le débalancement peut aussi être influencé par des évènements discrets comme un changement de météo, une panne de métro ou un festival. La prévision de la demande et l'analyse des patrons de demande seront étudiées en détail dans la section 1.4.

Il existe deux principales mesures pour gérer la demande et le niveau de service : le design stratégique du réseau et la redistribution des vélos. Le design stratégique consiste en une prévision de la demande a priori dans le but de développer le réseau de façon à diminuer le besoin en redistribution. Par exemple, en évitant lorsque possible de placer une station en haut d'une côte. La redistribution des vélos présente deux problèmes distincts : le problème statique et le problème dynamique. Le problème statique est le problème de redistribution lorsqu'il y a peu de changement de l'état du réseau, c'est le cas pour la redistribution de nuit par exemple. Le problème dynamique est le problème de redistribution qui inclut la modification de l'état du réseau. Le problème tient compte du fait qu'il y a des locations et des retours de vélos en même temps qu'a lieu la redistribution. Ce problème est le problème de redistribution de jour. Finalement, le problème de débalancement des stations peut aussi être réglé par l'ajout d'incitatifs à rapporter ou emprunter les vélos à certaines stations. Cette stratégie sera discutée dans la section sur le problème de redistribution dynamique puisque les deux stratégies peuvent être implantées simultanément.

Un survol de la littérature étudiant ces différents problèmes de recherche opérationnelle sera donc présenté dans les prochaines sections.

1.3.1 Design stratégique du réseau

Étant donné la croissance et le développement de plusieurs systèmes de vélopartage, plusieurs chercheurs se sont penchés sur le problème de design du réseau. Le problème du design du réseau inclut notamment le choix de la zone à couvrir, du nombre de stations et leur positionnement en plus du nombre de vélos et à chaque station. La première étape est de choisir la zone à couvrir. S'il y a une importante densité de population, les stations peuvent être positionnées un peu partout à travers la ville. Cependant, si ce n'est pas le cas, il faut placer les stations dans des zones spécifiques. La deuxième étape est celle de la localisation des stations. Les stations doivent être positionnées stratégiquement par rapport aux autres services de transport en commun et par rapport aux infrastructures routières (pistes cyclables et autres) (García-Palomares, Gutiérrez, & Latorre, 2012). L'optimisation du design du réseau à travers le choix du positionnement et de la capacité de chacune des stations est donc une étape cruciale dans le développement d'un nouveau système de vélopartage.

Un des premiers articles sur le design stratégique du réseau est celui de Lin, J.-R. et Yang (2011). Les auteurs ont développé un modèle innovateur qui considère à la fois le point de vue des usagers et celui des investisseurs. Le niveau de service des usagers est mesuré par la disponibilité des vélos aux stations alors que celui des investisseurs est mesuré par le coût de la redistribution (longueur des routes), le coût d'inventaire et le coût d'implantation. Pour résoudre le problème, ils proposent un modèle non linéaire en nombre entier pour trouver l'emplacement optimal des stations et le besoin en pistes cyclables. Cependant, le modèle n'inclut pas le réseau routier existant et les modèles de demande et de niveau d'inventaire à chaque station ont été simplifiés.

L'article de Shu, Chou, Liu, Teo et Wang (2010) propose un modèle permettant de répondre aux problèmes opérationnels des systèmes de vélopartage suivants :

- Combien de vélos devraient se trouver dans le réseau si on connaît la position des stations a priori selon le taux d'utilisation des vélos souhaité?
- Quelle est la valeur de la redistribution?
- Combien de points d'ancrage devront être installés à chaque station en lien avec la redistribution qui sera mise en place?

Pour répondre à ces questions, les auteurs proposent un modèle de programmation linéaire (problème de flot) déterministe pour évaluer la performance du système stochastique. Les résultats sont validés avec les données d'achalandage du MRT de Singapour. Les auteurs admettent cependant que leur approche repose sur le fait que les paramètres du système doivent être connus a priori.

De leur côté, Martinez, Caetano, Eiró et Cruz (2012) s'attaquent au problème de disposition géographique des stations, du nombre de vélos dans le système et des activités de redistribution nécessaires quotidiennement. Ils tentent donc d'intégrer plusieurs considérations opérationnelles dans le même modèle. Le problème est NP-Complet et difficile à résoudre analytiquement pour des instances moyennes à grandes. Les auteurs ont donc développé une heuristique qui divise la journée en plusieurs périodes de temps à l'intérieur d'un modèle de programmation linéaire partiellement en nombres entiers. Le modèle est testé avec les données de la ville de Lisbonne. Cependant, la redistribution n'est incluse que comme un coût supplémentaire a posteriori.

Finalement, la recherche de García-Palomares et al. (2012) propose une méthode qui utilise les systèmes d'information géographique (SIG) pour modéliser la distribution de la demande, choisir la localisation géographique et la capacité des stations et définir les caractéristiques de la demande des stations. La première étape consiste à connaître et modéliser la distribution de la demande. La seconde consiste à appliquer un modèle de meilleur emplacement pour trouver le nombre de points d'ancrage et les emplacements possibles. Lorsque le design du réseau est obtenu en associant les points d'ancrage aux emplacements pour créer des stations, il suffit de décrire les caractéristiques de demande de chaque station. Les auteurs ont aussi évalué différents scénarios en changeant le nombre de stations. Deux objectifs des méthodes de meilleur emplacement ont été testés : un pour maximiser la zone couverte et l'autre pour maximiser l'utilisation. Les analyses ont été faites pour le réseau de Madrid où, étant donné la densité de population, la méthode de maximisation de la zone couverte est la plus efficace. Les lacunes de ce modèle sont qu'il ne tient pas compte que certains endroits dans la ville comme les parcs qui ne sont ni des zones résidentielles ni des zones commerciales (où les gens vont travailler), mais qui peuvent attirer un bon nombre d'usagers du système de vélopartage. Une autre lacune est la création de stations isolées lors de l'utilisation du modèle de maximisation de la zone couverte. La méthode nécessite aussi des études plus approfondies pour choisir l'emplacement exact de chacune des stations. L'évaluation de différents scénarios a tout de même permis de démontrer qu'une augmentation du nombre de stations amenait logiquement une meilleure couverture de la demande et une meilleure accessibilité, mais diminuerait le retour sur investissement et la profitabilité. En effet, tel que démontré par Shu et al. (2010), un nombre important de stations augmente grandement les coûts sans nécessairement apporter une amélioration notable. Il faut donc toujours faire un compromis entre les améliorations possibles et les coûts engendrés. Ce principe s'applique aussi à la redistribution.

En somme, plusieurs auteurs se sont penchés sur la question de l'optimisation du design du réseau. Cependant peu ont intégré la redistribution et ses coûts comme un critère a priori dans le développement de leur modèle.

1.3.2 Redistribution

La redistribution des vélos à l'aide de camions est présente dans la majorité des systèmes de vélopartage. Son optimisation est primordiale puisque la redistribution des vélos représente un

des coûts les plus importants dans la majorité des systèmes de vélopartage. Par exemple, on estime que la redistribution coûte 3 USD par vélo dans le système Vélib' (DeMaio, 2009). De plus, les coûts annuels opérationnels incluant entre autres la maintenance, la redistribution, le personnel varient entre 250 USD à 1600 USD par vélo en fonction de la technologie (DeMaio, 2009; Midgley, 2009a). La section suivante présente donc un survol de la littérature sur les problèmes de redistribution du point de vue de la recherche opérationnelle.

1.3.2.1 Modèles classiques

Les problèmes statiques et dynamiques abordés dans les sections suivantes sont semblables à certains modèles plus classiques d'optimisation de route. La liste de ces problèmes qui est présentée dans la section suivante est inspirée de celle développée par Raviv, Tzur et Forma (2012).

Problèmes de ramassage et livraison (PDP)

Le problème de redistribution des vélos dans un système de vélopartage à sens unique correspond à ramasser et livrer un item identique : le vélo. Il est donc très semblable aux problèmes de ramassage et livraison d'une commodité. Berbeglia, Cordeau, Gribkovskaia et Laporte (2007) ont fait un survol de la littérature sur les PDP (Pickup and Delivery Problem) et les ont classés selon différentes caractéristiques. Selon leur classification, le problème de redistribution des vélos dans un système de vélopartage est très semblable au problème de ramassage et livraison d'une commodité (plusieurs à plusieurs) avec un objectif non linéaire c'est-à-dire qu'une commodité (le vélo) doit être livrée et ramasser à différents points de cueillette (stations). Cependant, aucun article n'a été écrit sur ce genre de problème. De plus, dans un PDP les quantités à livrer ou à ramasser sont prédéterminées alors qu'elles sont une variable dans le modèle de redistribution des vélos.

Problème du voyageur de commerce à une commodité (1-PDTSP)

Le 1-PDTSP (one-commodity pickup and delivery traveling salesman problem) a été introduit par Hernández-Pérez et Salazar-González (2004a). Le 1-PDTSP est une généralisation du problème du voyageur de commerce où chaque client doit se débarrasser ou recevoir une certaine quantité d'un seul produit. Dans leur article, les auteurs présente une résolution à l'aide d'une méthode de branch-and-cut. Ils présentent aussi, dans un autre article, une heuristique permettant

de résoudre des instances allant jusqu'à 550 nœuds (Hernández-Pérez & Salazar-González, 2004b). Comme les PDP, le 1-PDTSP suppose la connaissance a priori des quantités à livrer ou à ramasser alors qu'elles sont des variables dans le problème de redistribution de vélos. De plus, l'objectif du 1-PDTSP est de trouver le chemin le plus court pour visiter tous les nœuds une seule fois alors que, dans le problème de redistribution de vélos, la visite d'une station peut être optionnelle ou peut se faire en deux temps.

Chemla (2012) démontre d'ailleurs que, même si le 1-PDTSP représente une solution du problème de redistribution dans le cas où les quantités à livrer ou à ramasser sont connues a priori, il peut être utile de visiter une station plus d'une fois.

Problème de routes de distribution (IRP)

Bertazzi, Savelsbergh et Speranza (2008) présentent un survol de la littérature sur l'IRP (Inventory Routing Problem) qui peut lui aussi être comparé au problème de redistribution des vélos. En effet, l'IRP consiste à déterminer les routes des véhicules et les quantités d'un produit (les vélos le cas présent) à ramasser à chaque usine (ou à chaque station). Ainsi, contrairement au 1-DPTSP et aux PDP, la quantité à ramasser ou à livrer est une variable et n'est pas définie a priori. Cependant, dans l'IRP le produit est généralement ramassé à chaque nœud. Ainsi, une visite réduit invariablement l'inventaire du nœud visité. Les retours de marchandise qui permettent d'augmenter l'inventaire sont peu ou aucunement présents alors que dans un problème de redistribution d'un système de vélopartage, les livraisons sont aussi présentes que les ramassages. De plus, l'objectif de l'IRP diffère de celui du problème de redistribution puisqu'il consiste à minimiser les coûts de commande, d'entreposage et de transport. Dans le cas du problème de transport, ce sont les coûts de transport et le niveau de service aux usagers qui doivent être optimisés.

Problème d'échange (SP)

Finalement, le SP (Swapping problem) présente aussi plusieurs points en commun avec le problème de redistribution dans un système de vélopartage. L'objectif du SP qui a été introduit par Anily et Hassin (1992) est de trouver la route la plus courte permettant à un véhicule dont la capacité est limitée à une seule unité de réarranger des objets de certains nœuds en surplus à d'autres nœuds en déficit. Puisque les objets réarrangés peuvent être de différents types, le SP est

plus général que le problème de redistribution des vélos. Cependant, le réarrangement est fait par un seul camion dont la capacité est limitée à une seule unité alors que dans le cas de la redistribution, il peut y avoir plusieurs camions dont la capacité est supérieure à une unité. De plus, la capacité peut varier d'un camion à l'autre.

1.3.2.2 Problème de redistribution statique (nuit)

Le problème de redistribution statique consiste à redistribuer les vélos dans le but de faire passer les stations d'un niveau initial à un niveau optimal avec plusieurs camions de capacité fini dans un temps prédéterminé.

Le problème de redistribution statique correspond au problème de redistribution de nuit. En effet, l'objectif de chaque station n'est pas influencé par la demande dans le temps. Ainsi, l'impact de l'usager sur le système est considéré comme négligeable pendant la nuit et l'objectif de la redistribution est d'atteindre un certain niveau à chaque station pour permettre de répondre à la demande le matin venu. La solution cherchée est un ensemble de routes qui doivent être suivies par les véhicules et un nombre de vélos qui doivent être retirés ou ajoutés à chaque station. Plusieurs modèles ont été développés pour résoudre ce problème et présentent chacun des fonctions objectifs différentes.

Le modèle développé par Chemla, Meunier et Calvo (2012) a comme objectif de réduire la distance totale parcourue par la flotte de véhicules. Il suppose que deux camions d'une capacité finie sont disponibles et doivent permettre à chaque station de passer de son état initial à son état optimal sans limite de temps. Ce problème est NP-difficile et l'auteur l'a résolu à l'aide d'un modèle en nombres entiers dont les variables reflètent le choix de certaines routes. Il utilise la génération de colonnes pour résoudre le problème. Le sous-problème est résolu par énumération améliorée avec des règles de dominance, la borne inférieure est trouvée à l'aide de la programmation dynamique et la borne supérieure d'un algorithme mimétique. Cependant, la résolution à l'optimale est trop longue et complexe pour être utilisée sur une ville au complet. Le modèle doit être utilisé seulement pour les stations problématiques. De plus, l'absence de limite de temps enlève du réalisme à la modélisation puisque normalement les camions doivent agir pendant la nuit et avoir fini la redistribution le matin venu.

Benchimol et al. (2011) se sont basés sur le modèle de voyageur de commerce avec livraison et capacité développé par Chalasani et Motwani (1999). En effet, Chalasani et Motwani présentent

dans leur article une version du SP pour un camion avec n'importe quelle capacité et un seul type d'objet. Benchimol et al. (2011) ont donc utilisé ce modèle pour développer un problème de redistribution avec un seul camion de capacité C. À l'instar de Chemla et al. (2012), l'objectif du modèle est d'amener chaque station de son état initial à son état optimal à un coût de voyagement minimum c'est-à-dire par le chemin le plus court. Encore une fois, le modèle n'est pas une représentation parfaite de la réalité puisque les auteurs considèrent qu'il n'y a qu'un seul camion, que l'état optimal de chaque station doit être atteint, et qu'il n'y a pas de limite de temps. De plus, la méthode utilisée pour définir les objectifs de chaque station n'est pas expliquée. La résolution est donc intéressante d'un point de vue théorique d'autant plus que les auteurs discutent la différence entre un problème avec préemption (chaque station peut être visitée plus d'une fois) et sans préemption (chaque station n'est visitée qu'une seule fois), mais le modèle n'est pas applicable dans une situation réelle.

Contrairement aux modèles de Benchimol et al. (2011) et Chemla et al. (2012), le modèle de Raviv et al. (2012) n'oblige pas à atteindre le niveau d'inventaire optimal de chaque station. Les auteurs utilisent la méthode développée par Raviv et Kolka (2012) pour calculer le niveau de service prévu pour tous les niveaux d'inventaire atteints à la fin de la nuit. De cette façon, la fonction objectif est de diminuer la somme de tous les manques (pénuries) de vélos et d'espaces de stationnement. Il est possible d'ajouter la diminution du temps de parcours comme deuxième objectif. Cela permet donc d'imposer une limite de temps au repositionnement et d'atteindre un modèle plus conforme à la réalité. Les auteurs proposent donc un modèle qui permet de considérer l'aspect dynamique et stochastique de la demande, ce que les modèles précédents n'avaient pas réussi. Le modèle présenté est un modèle partiellement en nombres entiers. Leur modèle est très efficace pour trouver une solution de bonne qualité pour des instances réelles pour un problème allant jusqu'à 104 stations et 2 véhicules.

Plus récemment, Schuijbroek, Hampshire et van Hoeve (2013) ont développé un modèle pour résoudre le problème statique qui, d'une part, détermine les besoins en terme de niveau de service à chaque station en posant une borne supérieure et une borne inférieure et, d'autre part, détermine les routes optimales de redistribution. L'objectif de leur modèle est de terminer les opérations de redistribution le plus tôt possible. Les auteurs ont développé une heuristique qui optimise les regroupements (clusters) en premier et les routes en deuxième. Le problème de regroupement

considère simultanément la contrainte de niveau de service et le coût des routes. Pour ce faire, ils ont utilisé la méthodologie suivante.

1. Modélisation de la demande pour déterminer un niveau d'inventaire minimal et maximal à chaque station qui permet d'avoir un bon niveau de service;
2. Création de deux groupes de stations : celles qui n'ont pas nécessairement besoin de redistribution et celles qui en ont besoin;
3. Calcul des besoins en terme de routes pour atteindre un bon niveau de service à chaque station;

Ce sont donc les premiers à présenter un modèle basé sur un intervalle pour le niveau souhaité à chaque station plutôt qu'un objectif unique.

Finalement, les auteurs ont testé leur modèle sur les données du système Hubway à Boston et celles du système Bikeshare à Washington. Ils ont aussi développé un modèle partiellement en nombres entiers inspiré du modèle de Raviv et al. (2012) et un modèle de programmation par contrainte pour comparer leurs résultats à leur modèle de base (l'heuristique). Ils ont conclu que l'heuristique est meilleure que le modèle partiellement en nombres entiers en tout temps et meilleure que la programmation par contrainte pour les instances plus importantes. En effet, ils ont conclu que la programmation par contraintes est efficace pour les instances qui présentent peu de stations et beaucoup de stations visitées par véhicule. L'importance de leur recherche est donc au niveau du développement d'une nouvelle formulation basée sur des intervalles souhaités pour le niveau des stations plutôt qu'un objectif unique. Les auteurs ont aussi prouvé que le nombre de clients insatisfaits est proportionnel au nombre de temps ou une station est vide ou pleine.

Bref, le problème statique est difficile à résoudre à l'optimalité pour des instances importantes. De plus, les auteurs semblent prioriser des modèles de programmation par contraintes ou des heuristiques pour résoudre ce problème.

1.3.2.3 Problème de redistribution dynamique (jour)

Le problème de redistribution dynamique diffère du problème de redistribution statique dans la mesure où la demande en temps réel des utilisateurs est considérée dans le modèle. Comme dans le cas du problème de redistribution statique, le but du modèle est de trouver les routes empruntées par les camions de redistribution ainsi que le nombre de vélos ramassés ou livrés à

chaque station. L'objectif est double : minimiser le coût de la route et maximiser le niveau de service des utilisateurs, c'est-à-dire prévenir les pénuries de vélos et les pénuries de stationnements.

La redistribution dynamique est comparable au problème de redistribution dans le jour puisque les besoins en redistribution sont influencés par la demande des utilisateurs du système en temps réel.

Il existe principalement deux moyens de favoriser le balancement géographique des vélos durant la journée : les incitatifs ou stratégies de prix et la redistribution en tant que telle. Tel que discuté précédemment, la méthode des incitatifs consiste à favoriser la location ou le retour des vélos à une station plus qu'à une autre en donnant des avantages comme un crédit de temps ou de l'argent à l'utilisateur. Cette méthode n'implique donc pas une intervention directe des opérateurs sur le système. D'un autre côté, pour effectuer la redistribution, ce sont de gros camions de capacité finie qui se promènent d'une station à une autre pour ramasser ou livrer des vélos. Ces deux méthodes sont discutées dans les sections qui suivent.

Stratégies de prix et incitatifs

Il existe plusieurs possibilités d'incitatifs pour encourager les utilisateurs à louer ou à rapporter un vélo à une certaine station. Certains proposent de donner du temps de location gratuit ou des crédits en argent alors que d'autres proposent carrément de faire varier les prix de façon continue en fonction de la demande prévue à chacune des stations. Cette section présente donc un survol des articles qui ont été écrits sur le sujet.

Même si l'analyse de ces systèmes est présente dans la littérature, les incitatifs sont peu présents dans les systèmes de vélopartage. Un bon exemple est celui des stations V+ dans le système Vélib' à Paris. Lorsqu'un usager rapporte un vélo à une station V+, il reçoit du temps de location gratuit. Les stations V+ sont celles qui présentent beaucoup plus de locations par rapport au nombre de retours, ce sont des stations situées en hauteur ou en périphérie.

Fricker, C. et Gast, N. (2012) ont été les premiers à présenter la modélisation d'un système de stratégie de prix pour les systèmes de vélopartage. Ils ont étudié l'influence d'une stratégie de prix c'est-à-dire que le coût de la location à chacune des stations évolue dans le temps en fonction des manques ou des surplus de vélos. Ils ont comparé leur résultat pour un modèle symétrique où

toutes les stations sont identiques et ont une demande semblable et pour un modèle asymétrique où certaines stations sont plus populaires.

Les auteurs ont conclu que de retourner un vélo à une station non saturée ne changeait pas significativement le comportement de la station ni les indicateurs de performance reliés comme le temps de non-service. Cependant, ils ont conclu que le fait de retourner un vélo à la station la moins pleine parmi deux stations améliorait significativement la performance du système même si seulement une petite fraction des usagers adoptait ce comportement. La comparaison d'un modèle symétrique et asymétrique a permis de conclure que, même si le choix de la station la moins pleine parmi deux améliorait significativement la performance d'un système symétrique et éliminait le besoin d'une redistribution des vélos, les politiques de prix n'étaient pas suffisantes pour améliorer significativement la performance d'un système asymétrique. En effet, dans un système symétrique, une politique de prix encourageant le choix de la station la moins pleine parmi deux permet d'améliorer sensiblement la performance du système, mais n'est pas suffisante et doit être accompagnée d'une redistribution des vélos à l'aide d'un camion. Ainsi, dans un système de vélopartage à sens unique (asymétrique), une redistribution faite avec des camions est nécessaire même si un système d'incitatifs a été mis en place.

De leur côté, Waserhole et Jost (2012) ont modélisé le problème de stratégies de prix comme un réseau fermé de files d'attente. Pour leur modélisation, les auteurs ont considéré une demande statique, une capacité infinie pour chaque station et l'absence de temps de transport. Même si le modèle est une simplification de la réalité, ils ont pu tester l'influence d'une politique de prix. Ils ont testé différentes politiques dont une politique de prix statique où les prix sont indépendants de l'état du système et une politique de prix symétrique qui tente d'avoir un nombre équivalent d'usagers qui font un voyage dans toutes les directions. Les modèles sont seulement théoriques et n'ont pas été testés dans un système réel.

Finalement, Chemla (2012) présente une simulation permettant de tester l'effet d'un politique de prix sur les demandes à chaque station. Il propose que le prix d'une location évolue dans le temps selon la demande prévue. Ainsi, une location à une station plus populaire coûtera plus cher pour décourager les utilisateurs d'y louer un vélo. Son modèle suppose par contre la connaissance des prix en temps réel par tous les utilisateurs. De plus, la simulation est dépendante de la modélisation des réactions des usagers.

En somme, même si quelques recherches ont démontré que les politiques de prix pouvaient être efficaces, ces dernières ne peuvent pas suffirent à balancer un réseau à elles seules et doivent être accompagnées d'un système de redistribution (Fricker, Christine & Gast, Nicolas, 2012).

Redistribution

Tel que mentionné précédemment, la redistribution dynamique (pendant le jour) d'un système de vélopartage à sens unique est primordiale pour son bon fonctionnement. En effet, lorsque le ratio de temps auquel les camions visitent les stations est de l'ordre de 10 % du ratio d'arrivée des usagers, la performance du système est grandement améliorée (Fricker, C. & Gast, N., 2012).

Pour tester différents modèles de redistribution dynamique, Chemla (2012) a développé un outil basé sur la simulation. Le simulateur utilise les paramètres suivants pour modéliser le système de vélopartage et le comportement des utilisateurs : la temps limite de la simulation, le nombre de répétitions, les évènements discrets et leur influence sur le système, le nombre de stations, le nombre de véhicules, le nombre de points d'ancrage, le nombre de camions, la capacité de chacun des camions, le temps de voyage des vélos, la matrice origine-destination, le taux d'arrivée des usagers à chaque station, la capacité de chaque station, les coordonnées de chaque station, le temps de voyage des camions ainsi que les types de clients. Le modèle est donc très complet et, même si la modélisation de certains évènements discrets est simplifiée, il représente assez fidèlement la réalité. Grâce à l'outil de simulation, l'auteur a testé les trois modèles de redistribution suivants :

1. Une-étape-deux-étapes : lorsqu'un camion a terminé de visiter une station, il suffit de trouver les deux stations les plus débalancées (plus vide et plus pleine) et, selon la charge du camion, l'une ou l'autre des stations est choisie;
2. Une-étape-deux-stations avec prévision :
    a. Une-étape avec prévision : le principe est le même que le modèle une-étape-deux-étapes, mais au lieu d'utiliser l'état actuel des stations, le modèle utilise l'état prévu des stations;
    b. Deux-étapes avec prévision : le niveau d'inventaire prévu à chaque station dépend de l'ordre dans lequel les stations sont visitées :
        i. Deux-étapes : les 2 visites sont effectuées;

ii. Deux-étapes-un-arrêt : seule la première station est visitée;

3. Heuristique de coloriage : Un ensemble de stations a une couleur et un objectif de couleur en fonction de s'il s'agit d'une station de dépôt, de retrait ou une station neutre.

Grâce au modèle de simulation, l'auteur conclue que :

- L'ajout de règles de redistribution améliore le système;
- La meilleure méthode est le une-étape avec prévision;
- L'utilisation d'un horizon de prévisions plus long engendre de mauvaises performances;
- Diviser la ville en plusieurs zones comporte plusieurs avantages.

De leur côté, Contardo, Morency et Rousseau (2012) définissent et présentent une formulation mathématique du problème. Cependant, cette dernière ne pouvant être utilisée pour de grandes et moyennes instances, les auteurs présentent une approche qui utilise la décomposition de Dantzing-Wolfe (Dantzig & Wolfe, 1960) et la décomposition de Benders (Benders, 1962). Les tests faits avec différentes instances, leur ont permis de démontrer l'efficacité de leur méthodologie pour générer une borne inférieure et supérieure. En effet, ils arrivent à trouver des bornes inférieures et une solution réalisable rapidement (en environ 5 minutes) pour une instance de 5 véhicules et jusqu'à 100 stations.

Dans leur recherche, Caggiani et Ottomanelli (2012) présentent un système de support à la décision pour le processus de redistribution des vélos dans un système de vélopartage. Le but du système de support à la décision est de minimiser le coût de la redistribution pour l'opérateur du système, de déterminer le flux optimal de redistribution des vélos, les patrons de distribution ainsi que le temps entre les opérations de redistribution tout en tentant de maximiser le niveau de satisfaction des usagers. Bref, le modèle permet de définir le meilleur objectif de repositionnement et les routes pour y arriver. La méthode utilisée est basée sur un système d'interférence flou. Cette dernière a été testée sur une petite instance de 5 stations avec un véhicule. Dans chacun des cas étudiés, la méthode a permis de diminuer les utilisateurs perdus, la réduction allant de 10,2 % à 75 %. Le système d'aide à la décision est plus performant lorsque la demande est réduite. Finalement, le système développé est modulaire et peut donc être adapté pour des instances plus importantes.

Vogel et Mattfeld (2010) présentent eux aussi un modèle d'aide à la décision. Ce dernier est basé sur un modèle global de boucle de rétroaction. Les auteurs ont préféré cette approche à une modélisation spatiotemporelle des activités de redistribution. Le modèle développé par les auteurs est utilisé pour modéliser la probabilité d'une location réussie (présence d'un vélo) en fonction du nombre d'utilisateurs dans le système. La fonction est aussi partie intégrante d'un système de modèles dynamiques qui permet d'analyser l'influence des différents niveaux de redistribution. Ces analyses ont permis aux auteurs de conclure que la redistribution des vélos était essentielle dans un système de vélopartage à sens unique et que la performance du système en terme de satisfaction des usagers était proportionnelle aux ressources investies dans la redistribution.

Alors que la majorité des articles utilisent des distances euclidiennes pour calculer le temps de déplacement entre les différentes stations, Lin, J.-H. et Chou (2012) propose une méthode d'optimisation des distances actuelles. Ils présentent, de plus, un système qui intègre l'information des stations en temps réel, un SIG web, le réseau routier réel et des heuristiques pour faire le repositionnement dans un système de vélopartage. Le système inclut un simulateur ayant pour but d'aider les opérateurs de systèmes de vélopartage à optimiser l'opération de redistribution. Le système a été testé par rapport à sa capacité à résoudre le problème du voyageur de commerce. Les résultats expérimentaux démontrent que leur modèle de distances réelles génère de meilleures routes (temps de voyage plus court) que ceux utilisant les distances euclidiennes. Selon les auteurs, le meilleur algorithme de redistribution est l'algorithme de l'intersection la plus loin possible qui est obtenu en suivant les trois étapes suivantes :

1. Commencer avec un sous-graphe d'un seul nœud (le dépôt par exemple);
2. Trouver le nœud qui est le plus loin du dépôt et joindre ce nœud au dépôt;
3. Avec le sous-tour ainsi formé, trouver le nœud qui n'est pas dans le sous-tour qui est le plus loin de tous les nœuds du sous-tour;
4. Trouver le lien dans le sous-tour qui permet de minimiser la distance totale du sous-tour;
5. Répéter les étapes trois et quatre jusqu'à que tous les nœuds soient dans le trajet.

Les auteurs recommandent donc aux opérateurs de systèmes d'utiliser l'algorithme de l'intersection la plus loin possible de concert avec le système et l'interface graphique qu'ils ont

développés. Ce système permet d'ailleurs la simulation de l'état des stations pour aider l'opérateur à prendre de meilleures décisions.

En conclusion, plusieurs auteurs ont utilisé la simulation pour tester différentes heuristiques de redistribution. Seuls Contardo et al. (2012) présentent une modélisation mathématique pour résoudre le problème de redistribution dynamique. Par exemple, Nair et Miller-Hooks (2011) proposent un modèle de programmation partiellement en nombres entiers, mais seulement pour répondre à la demande à cout terme, un environnement qui est donc très similaire au problème statique. Finalement, aucun article n'a été écrit sur l'optimisation de la redistribution dynamique par programmation par contraintes.

1.4 Prévision de la demande

Le développement de modèles de redistribution dynamiques et statiques implique inévitablement la modélisation de la demande dans les systèmes de vélopartage. Plusieurs auteurs se sont penchés sur le sujet et un survol des différentes recherches se penchant sur la prévision de la demande et l'analyse des patrons de demande dans un système de vélopartage sera présenté dans les paragraphes qui suivent.

Froehlich, Neumann et Oliver (2009) ont écrit un des premiers articles à ce sujet. Ils proposent une analyse du comportement des usages du système Bicing à Barcelone pour détecter des patrons de demande temporels et spatiotemporels. Le système Bicing qui compte 6000 vélos et 400 stations est du même ordre de grandeur que le système BIXI à Montréal. Grâce aux systèmes de troisième et de quatrième génération, de plus en plus de données sont disponibles et peuvent être utilisées pour comprendre et prévoir le comportement des utilisateurs. Les auteurs ont fait une analyse spatiotemporelle du niveau d'inventaire à chaque 5 minutes à chaque station sur une période de 13 semaines. Ils ont utilisé ces données pour faire des regroupements de différentes stations selon leur patron de demande. De leurs analyses, ils ont pu conclure qu'il y avait une utilisation accrue des vélos le matin, durant l'heure du diner et en fin d'après-midi les jours de semaine. Ils ont aussi remarqué que les stations regroupées ensemble en fonction de leur patron de demande possédaient les mêmes caractéristiques géographiques. Par exemple, les stations vides étaient situées en hauteur, les zones résidentielles se vidaient et se remplissaient le matin alors qu'on observait un comportement inverse pour les zones industrielles et commerciales. Les

auteurs ont aussi testé certains modèles de prévision et ont conclu qu'avec 10 à 15 jours de semaine il était possible de construire un modèle de demande. Cependant, le modèle n'incluait pas certains facteurs discrets comme la météo ou les évènements spéciaux.

Kaltenbrunner, Meza, Grivolla, Codina et Banchs (2010) ont aussi basé leur recherche sur l'analyse des données du système Bicing à Barcelone. Ils arrivent sensiblement aux mêmes conclusions que Froehlich et al. (2009). Cependant, en plus de faire l'analyse des patrons de demande, ils ont mis au point un modèle de prévision de la demande à court terme à l'aide de séries chronologiques (modèle autorégressif à moyennes mobiles) qui permet de prévoir le nombre de vélos et de points d'ancrage disponibles à court terme. Leur modèle pourrait permettre d'améliorer le site web de Bicing qui pourrait présenter les données prévues à court terme plutôt que les données actuelles pour l'état des stations. Cependant, le modèle développé par les auteurs n'inclut pas la redistribution ni l'influence des conditions météorologiques.

Borgnat et al. (2011) ont aussi utilisé les séries chronologiques pour prédire l'utilisation horaire et quotidienne des vélos, mais en se basant sur le système Vélo'v de Lyon. Les auteurs présentent en fait une analyse temporelle et spatiale de l'utilisation des vélos à l'aide de l'exploration de données. Cette analyse leur permet de regrouper les stations selon les différents patrons de demande. Ils arrivent sensiblement aux mêmes conclusions que les auteurs présentés précédemment à savoir qu'il y a une augmentation dans l'utilisation le matin, le midi et en fin d'après-midi des jours de semaine et en après-midi des jours de fin de semaine. Le modèle développé par les auteurs permet donc, d'une part, de modéliser l'évolution temporelle des mouvements de vélo avec une précision d'environ 90 % et, d'autre part, de mettre en lumière les patrons de demandes pour visualiser les flux de système Vélo'v dans la ville de Lyon.

Finalement, Vogel, Greiser et Mattfeld (2011) ainsi que Vogel et Mattfeld (2011) démontrent comment l'exploration de données utilisées sur les données opérationnelles d'un système de vélopartage permet de déduire les patrons de demande et de prévoir la demande dans le but d'améliorer la planification stratégique (design de réseau), tactique (mise en place de stratégies de prix) et opérationnelle (redistribution). Leur analyse est basée sur les données du système Citybike Wien à Vienne. Encore une fois, les auteurs utilisent l'exploration de données, les séries chronologiques et une analyse de regroupement pour mettre en lumière les patrons de demande et

bâtir un modèle de prévision. En outre, les auteurs ont inclus dans leur modèle l'influence de la météo.

Les modèles de prévision de la demande sont donc une bonne base pour la construction de modèles de recherche opérationnelle qui optimisent les opérations à un niveau stratégique, tactique et opérationnel.

1.5 Développement d'indicateurs de performance

Pour évaluer la performance d'un système de redistribution, il est important d'établir des indicateurs de performance. Pour ce faire, la majorité des opérateurs de systèmes de vélopartage mesure la fraction du temps pendant laquelle les stations sont pleines ou vides. Certains opérateurs sont même pénalisés par la municipalité en fonction de ces indicateurs, c'est le cas, par exemple, du système Vélib' à Paris (Schuijbroek et al., 2013). À Vienne, l'opérateur du système doit s'assurer que les stations ne sont pas pleines pour plus de 60 minutes pendant le jour et plus de 180 minutes pendant la nuit (DeMaio, 2009). Le temps de non-service c'est-à-dire le temps durant lequel une station est vide ou pleine est un bon indicateur. D'ailleurs Raviv et Kolka (2012) ont prouvé que le nombre de clients insatisfaits est proportionnel au temps de non-service. Cependant, certains auteurs croient qu'il ne faut pas pénaliser le temps total où une station est vide ou pleine puisque, par exemple, une station vide au centre-ville le matin est souhaitable. Il faudrait donc faire attention à la période de temps en particulier où la station est vide ou pleine (Raviv & Kolka, 2013). Les paragraphes qui suivent sont un survol des différents indicateurs de performance présents dans la littérature.

Au niveau de l'analyse du niveau de service, Nair et Miller-Hooks (2011) ont décomposé le niveau de service global du système dans un ensemble d'intervalles pour chaque station. C'est le concept qui a été repris par Schuijbroek et al. (2013) dans leurs travaux décrits précédemment dans la section sur le problème de redistribution dynamique.

De leur côté, Raviv et Kolka (2013) ont introduit une fonction d'insatisfaction des usagers pour mesurer la performance d'une station. Ils ont fait une analyse numérique approfondie, basée sur les données du système Tel-O-Fun à Israël pour démontrer l'efficience et l'efficacité de cette fonction. Dans leur article, les auteurs présentent aussi une méthode d'approximation pour estimer la valeur de la fonction. Leur recherche se distingue de celle de Nair et Miller-Hooks

(2011) dans la mesure où ils considèrent la séquence de visite des vélos aux stations plutôt que le débalancement global de la station. Par exemple, une station peut avoir un inventaire global qui lui permettra de répondre à la demande de la journée, mais présentée une pénurie en périodes de grandes demandes. Les travaux de Raviv et al. (2012) sont d'ailleurs basés sur cette fonction d'insatisfaction. Cependant, le modèle omet l'interdépendance de la demande entre les différentes stations. Par exemple, un usager qui arrive à une station où il n'y a pas de point d'ancrage disponible ira probablement jusqu'à la station la plus près pour y stationner son vélo.

L'article de Lathia, Ahmed et Capra (2012) tentent de mesurer l'impact de l'ouverture de l'accès du système de vélopartage de Londres aux utilisateurs occasionnels. En effet, le système de Londres a été ouvert en juillet 2010 et était seulement accessible aux abonnés. Cependant, en décembre 2010 les opérateurs du système ont donné l'accès aux utilisateurs occasionnels qui pouvaient maintenant emprunter un vélo sans être membre en payant par carte de crédit ou débit. Tel que prévu, le nombre de voyages a augmenté, mais les auteurs de l'article se sont penchés sur d'autres impacts de ce changement de politique à travers différents indicateurs de performance. Pour développer leurs indicateurs de performance et faire leur analyse, les auteurs ont utilisé différentes techniques d'exploration de données en plus de faire des analyses spatiotemporelles et des regroupements de stations.

Selon la revue de littérature faite par les auteurs, beaucoup d'articles ont été écrits sur l'influence de la météo sur les trajets à vélo. Cependant, cette dernière n'influencerait pas autant l'utilisation du vélo comme moyen de transport qu'on aurait tendance à le croire. En effet, d'autres facteurs structurels, saisonniers, sociaux et politiques doivent être pris en compte. Les auteurs ont donc tenté d'inclure tous ces facteurs dans leur analyse. L'indicateur de performance qu'ils ont utilisé est le nombre de vélos disponibles normalisés (NAB) qui est en fait le nombre de vélos disponibles à chaque station sur la capacité totale de la station (Froehlich et al., 2009). Un facteur de 0 signifie une station vide alors qu'un facteur de 1 signifie une station pleine et ni l'un, ni l'autre n'est souhaitable. Pour faire leur analyse, les auteurs ont calculé le NAB à trois niveaux pour quantifier l'influence de l'ouverture du système aux utilisateurs occasionnels :

- Tendance temporelle moyenne sur le système au complet : les auteurs ont analysé l'évolution temporelle du NAB du système dans sa globalité;

- Différences spatiotemporelles : les auteurs ont analysé la distribution géographique des patrons et faits des regroupements de stations selon leurs patrons de NAB en utilisant un algorithme de classification hiérarchique;
- Différences au niveau des stations : en calculant les facteurs de corrélation entre les patrons avant et après l'ouverture, les auteurs ont sélectionné certaines stations et comparé en détail l'évolution de la demande.

Cette étude est donc intéressante au niveau des différents indicateurs de performance utilisés notamment le NAB et leur application pour quantifier l'évolution d'un réseau. Ces indicateurs de performance pourraient donc être réutilisés pour quantifier l'effet d'un changement dans la politique de redistribution. D'ailleurs les auteurs ont observé que dans le système de vélopartage de Londres, les problèmes de débalancement arrivaient principalement pendant le jour alors que la majorité des articles se concentrent sur le problème statique de nuit.

En somme, la majorité des indicateurs de performance présentés dans la littérature sont basés sur le temps où une station est vide ou pleine.

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour développer l'outil de redistribution. En premier lieu, les étapes générales sont décrites. Puis, un bref survol des deux logiciels utilisés dans le développement de l'outil (Access et AIMMS) est fait. Enfin, l'étape de l'examen des données, celle du choix du logiciel et de la technique de modélisation et celle du développement des modèles d'optimisation sont décrites en détail. Les différents modèles développés sont pour leur part présentés dans le chapitre suivant.

2.1 Méthodologie générale

Dans cette section, la méthodologie générale utilisée pour développer l'outil d'optimisation de la redistribution des vélos est expliquée. La figure suivante démontre les différentes étapes qui composent la méthodologie.

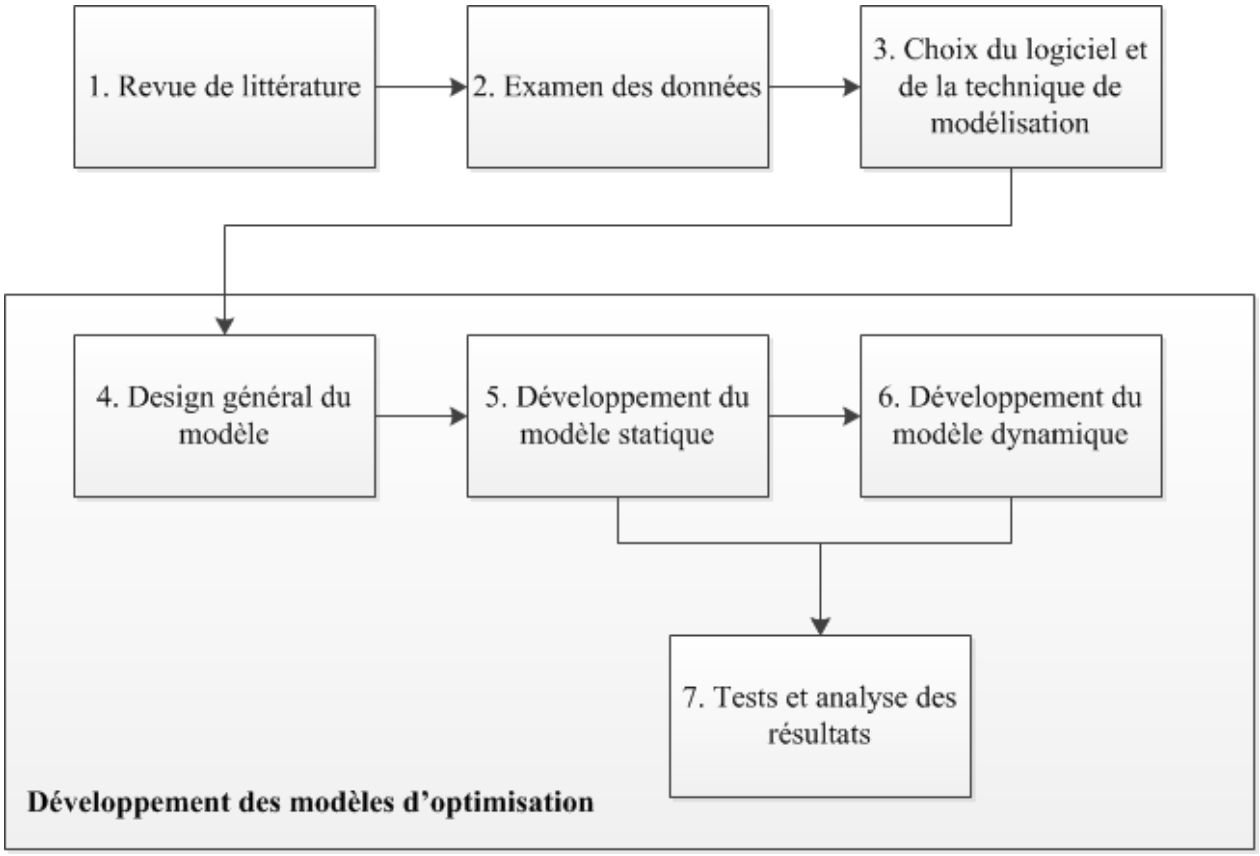

Figure 2.1 Méthodologie

La recherche a été entamée grâce à une revue de littérature présentée dans le chapitre précédent. Cette revue de littérature a permis de mettre en lumière les différentes recherches qui ont été faites pour résoudre les problèmes de redistribution dynamique et statique. Cette revue de littérature a notamment permis de choisir la technique de modélisation et, par le fait même, le logiciel à utiliser (étape 3).

La deuxième étape de la méthodologie est celle de l'examen des données. Cette étape est basée sur les données du système d'information du système de vélopartage BIXI à Montréal. Les données de la semaine du 11 au 16 septembre 2011 (inclusivement) et du 16 juin 2011 ont été utilisées. Ces dernières permettent notamment d'avoir de l'information sur l'état des différentes stations à chaque 5 minutes, les transferts de vélos faits par les camions et les traces GPS des camions utilisés pour la journée du 16 juin 2011. Les données obtenues ont été analysées brièvement pour déterminer la performance du système de redistribution actuel et mettre en lumière les améliorations possibles. Les données et leur analyse ont aussi permis de faire le design général du modèle d'optimisation (étape 4). Les données ont été analysées à l'aide du logiciel Access qui est présenté à la section 2.2.1. Finalement, les données disponibles et les résultats préliminaires des analyses qui ont été faites sont décrits dans la section 2.3.1.

La troisième étape de la méthodologie est celle du choix du logiciel et de la technique de modélisation. Tel que vu dans le chapitre précédent, il existe plusieurs techniques de modélisation pour résoudre le problème de redistribution statique et dynamique dans un système de vélopartage. Certains auteurs ont utilisé la simulation (Chemla, 2012). D'autres ont présenté une formulation mathématique du problème (Contardo et al., 2012). Plusieurs ont aussi développé des modèles d'aide à la décision basés sur la prévision de la demande (Caggiani & Ottomanelli, 2012; Vogel & Mattfeld, 2010). Un seul auteur présente un modèle simple à l'aide de la programmation par contraintes pour le modèle statique (Schuijbroek et al., 2013). Dans le cadre de ce mémoire, la technique de modélisation choisie est la programmation par contraintes et le logiciel utilisé est le logiciel AIMMS. Les différents arguments ayant mené à ces choix sont présentés à la section 2.3.2.

Les étapes suivantes sont celles qui ont permis de développer les modèles d'optimisation. Les étapes 4 à 7 sont itératives puisque selon les résultats obtenus le design général du modèle peut

être modifié. De plus, plusieurs modèles ont été développés avant d'arriver à des modèles intéressants pouvant être utilisés par BIXI.

Le design général du modèle consiste à décider quelles informations seront utilisées par le modèle d'optimisation (le nombre de camions et leur capacité, les stations, l'objectif de redistribution à chaque station, etc.), quelle sera la fonction objectif (déplacer le plus de vélos, réduire le temps de non-service, etc.) et quelles seront les informations retournées par le modèle (le chemin des camions, le nombre de vélos récupérés ou remis à chacun des stations, etc.).

Une fois ces données définies, les différents modèles doivent être développés. Il existe deux grands types de modèles : les modèles statiques qui permettent de répondre au problème de redistribution de nuit et les modèles dynamiques qui permettent de répondre au problème de redistribution pendant le jour alors que les vélos sont déplacés par les utilisateurs pendant la redistribution. Les différents modèles développés de façon itérative ont été testés sur différentes instances fictives puisqu'il manquait certaines données, dont une modélisation de la demande, pour pouvoir tester les modèles avec les données réelles de Bixi.

Les différents modèles développés autant pour la redistribution statique de nuit que pour la redistribution dynamique de jour sont présentés dans le chapitre 3.

2.2 Description des outils utilisés

Dans le cadre de ce mémoire, deux principaux logiciels informatiques ont été utilisés : Access et AIMMS. Access est un logiciel de gestion de bases de données qui a été utilisé pour classer et analyser les données du système d'information du système de vélopartage BIXI de Montréal. AIMMS est un logiciel d'optimisation qui a été utilisé pour développer les différents modèles d'optimisation et les traduire en un outil facilement utilisable par BIXI.

2.2.1 Access

Tel que mentionné précédemment, Acces est un logiciel de gestion de base de données et a permis d'enregistrer et d'analyser un extrait de la base de données du système BIXI. Le but de la présente section est de présenter brièvement le fonctionnement du logiciel.

Microsoft Access est le système de gestion de bases de données relationnelles de la suite Office. Access permet de stocker des bases de données, de faire des requêtes dans les bases de données stockées et de programmer des modifications en Visual Basic for Applications (VBA).

Access est donc un logiciel qui gère la structure, le stockage, les transactions et la sécurité de la base de données. Le fonctionnement du logiciel est plutôt simple. L'information de la base de données est stockée dans des tables. Une table est un tableau de données dont les colonnes sont des champs qui permettent de décrire certains attributs de l'entité à définir et dont les lignes sont des enregistrements qui représentent différentes entités uniques. Par exemple, une table peut présenter chacune des stations d'un système de vélopartage. Ainsi, chaque ligne (enregistrement) représente une station et chaque colonne (champ) représente un attribut de cette station, sa latitude ou sa longitude par exemple. Chaque enregistrement de la table doit être identifié de façon unique avec une clé relationnelle composée d'un ou plusieurs champs (le numéro de chaque station par exemple).

Les différentes tables sont reliées entre elles en fonction de cette clé relationnelle. Par exemple, il peut y avoir une table qui représente tous les trajets ayant eu lieu entre une station et une autre. Les champs correspondants à la station d'origine et à la station de destination feront référence à la table des stations à l'aide de la clé relationnelle. Les bases de données relationnelles sont donc un ensemble de plusieurs tables reliées entre elles en fonction de ces clés relationnelles.

Acces offre aussi plusieurs moyens de faire des requêtes dans les bases de données. Il est possible d'utiliser l'assistant de requête qui est une interface qui permet facilement à un utilisateur moins expérimenté de créer une requête. Cette requête est ensuite traduite en langage SQL (Structured Query Language). Il est possible de coder directement en SQL. Il est aussi possible de programmer des modifications dans les tables ou les requêtes en VBA.

En outre, Access permet de représenter facilement l'information de la base de données pour la modifier ou pour afficher le résultat d'une requête. En effet, le logiciel permet de créer des pages qui peuvent être par la suite utilisées pour modifier ou analyser la base de données.

Dans le cas de la présente recherche, le logiciel Access a été utilisé pour enregistrer une extraction de la base de données du système de vélopartage BIXI de la semaine du 11 au 16 septembre 2011 et du 16 juin 2011. L'information extraite a ensuite été modifiée pour être analysée et pour permettre le développement des modèles d'optimisation. En effet, la structure de

l'outil d'optimisation de la redistribution est basée sur la structure de la base de données relationnelle du système BIXI.

La structure du fichier Access ainsi que les données BIXI et la façon dont elles sont analysées sont présentées en détail dans la section 2.3.1.

2.2.2 AIMMS

AIMMS est le logiciel qui a été utilisé pour le développement de l'outil d'optimisation. Toutes les informations plus techniques présentées dans les paragraphes qui suivent sont tirées du site internet de AIMMS (www.aimms.com).

AIMMS est un logiciel qui permet la modélisation de modèles mathématiques avancés. Il permet aussi de se connecter à certaines bases de données et environnements de programmation. Le logiciel est aussi intéressant puisqu'il permet de présenter le résultat des modèles sur une page facile d'utilisation pour quelqu'un qui ne connait pas la programmation ou la modélisation mathématique. AIMMS suggère d'ailleurs à ses utilisateurs d'utiliser le logiciel pour les applications suivantes :

- un modèle mathématique complet entièrement sur AIMMS;
- une application pour réduire le coût et le temps d'exécution d'un modèle plus complexe;
- une extension d'une solution standard;
- une composante d'optimisation pour une application complète;
- une composante d'optimisation comme une extension Excel.

De plus, AIMMS est un logiciel d'optimisation complet puisqu'il permet entre autres de modéliser et de résoudre les types de programmes mathématiques suivants :

- programmation linéaire;
- programmation partiellement en nombres entiers;
- programmation par contraintes;
- programmation non linéaire;
- programmation partiellement en nombres entiers non linéaire.

Pour résoudre ces modèles, AIMMS fait appel aux meilleurs solveurs. AIMMS sélectionne automatiquement le meilleur solveur pour le problème, mais il est aussi possible d'aller modifier le solveur dans les paramètres. Le logiciel possède plusieurs solveurs dont CPLEX, un solveur de IBM ILOG pour les programmes linéaires et les programmes partiellement en nombres entiers et CP Optimizer, un des solveurs les plus performants pour la programmation par contraintes développé par IBM ILOG. Le solveur CP Optimizer est celui qui est utilisé dans l'outil d'optimisation de la redistribution présenté dans ce mémoire.

Un autre avantage de AIMMS qui est important pour la présente recherche est sa facilité à créer des liens avec d'autres programmes comme Excel et des bases de données. En effet, AIMMS permet d'aller chercher des paramètres dans la base de données Access. Cette propriété a été utilisée pour les modèles développés dans le cadre ce mémoire.

AIMMS présente plusieurs modules et façons de programmer en fonction du type de programme mathématique. La programmation par contraintes avec le solveur CP Optimizer a été intégrée dans AIMMS à la version 3.13. Les différents modèles développés dans le cadre de ce mémoire utilisent le module de planification de tâches en programmation par contraintes de AIMMS. Ce module est présenté dans la sous-section suivante.

2.2.2.1 Description du module de planification de tâches en programmation par contraintes

Tel que mentionné précédemment, le module utilisé pour le développement des modèles présentés dans le cadre de ce mémoire est le module de planification de tâches en programmation par contraintes.

AIMMS définit la programmation par contraintes comme étant le processus de résoudre un système de contraintes de différents types en fonction d'un ensemble de variables discrètes inconnues en fonction d'une fonction objectif pouvant être optimisée ou minimisée. AIMMS est un logiciel intéressant pour la programmation par contraintes puisque, d'une part, son langage de modélisation est basé sur la notation algébrique et permet de facilement capturer la structure de la programmation par contraintes. D'autre part, AIMMS permet la visualisation des variables sous forme de diagramme de Gantt ou de réseaux. Finalement, AIMMS présente un module de planification de tâches simple permettant aux planificateurs de formuler leurs problèmes de façon intuitive.

Le module de planification de tâches est basé sur la notion d'activités et de ressources. Les activités correspondent à l'exécution d'un objet dans le problème de planification. C'est, par exemple, l'exécution d'une commande ou, dans notre cas, la visite d'une station par un camion de redistribution. Les activités sont les variables du problème de planification et peuvent être décrites par leur présence, leur temps de début, leur durée et leur temps de fin. La modélisation sur AIMMS permet aussi de définir une date de début et une date d'échéance pour chaque tâche. Elle permet aussi de spécifier un temps de mise en place entre chaque paire ou chaque groupe d'activités.

Les ressources correspondent à ce qui est disponible pour exécuter les activités. Les ressources représentent, par exemple, un employé, mais peuvent aussi correspondre au chargement d'un camion ou à l'état d'un budget. Une ressource est décrite par sa capacité, son niveau d'activité et l'ensemble des activités qui nécessitent cette ressource. De plus, une activité peut demander plusieurs ressources à la fois.

Il existe deux types de ressources : les ressources séquentielles et les ressources parallèles. Les ressources séquentielles représentent des ressources devant être utilisées l'une après l'autre. Elles peuvent aussi être appelées ressources unitaires ou exclusives et sont utilisées pour représenter des activités qui ne peuvent pas être exécutées en même temps. C'est le cas d'un travailleur ou d'une machine. En effet, la machine ou le travailleur ne peut travailler que sur une pièce à la fois. Les ressources séquentielles permettent d'ailleurs de représenter les temps de mise en place.

De leur côté, les ressources parallèles définissent des ressources devant être utilisées en parallèle. Elles sont aussi connues sous le nom de ressources cumulatives. Une ressource parallèle limite la consommation de ressources d'activités qui ont lieu en parallèle. C'est le cas d'un budget par exemple. En effet, plusieurs activités nécessitant un certain investissement peuvent être exécutées en même temps à condition de ne pas dépasser le budget. Le chargement des camions dans le cas du modèle d'optimisation de la redistribution des vélos est une ressource parallèle.

Finalement, un intervalle de planification doit aussi être défini pour encadrer l'espace de temps pendant lequel se fera la planification.

La modélisation mathématique précise des différents modèles ainsi que les variables et leurs attributs sont présentés en détail dans le chapitre 3.

2.3 Description détaillée de chacune des étapes

Dans cette section les étapes de l'examen des données, du choix du logiciel et de la technique d'optimisation et du développement des modèles d'optimisation seront décrites en détail. Cependant, les différents modèles d'optimisation ayant été développés sont présentés dans le chapitre suivant.

2.3.1 Examen des données

Tel que décrit précédemment, l'examen des données s'est fait avec le logiciel Access et une extraction de la base de données du système de vélopartage BIXI à Montréal pour la semaine du 11 au 16 septembre 2011 ainsi que la journée du 12 juin 2011. En premier lieu, la structure de la base de données sera présentée suivie par un survol des différentes manipulations et requêtes permettant d'analyser les données. Finalement, le fichier Excel des traces GPS des camions de redistribution de la journée du 12 juin 2011 sera discuté.

2.3.1.1 Structure de la base de données relationnelle

Dans l'extraction qui a été faite dans Access, quatre tables sont présentes à la base : la table de l'état du réseau, la table des locations, la table des stations et la table des transferts. Les relations entre les tables ne sont pas explicites dans la base de données Access puisque ce n'est qu'une extraction qui ne présente pas, par exemple, la table des membres ou la table des vélos.

État du réseau

La table d'état du réseau permet de voir le niveau d'inventaire à chaque station à chaque 5 minutes. La structure de la table de l'état du réseau est décrite dans le tableau suivant.

Tableau 2.1 Structure de la table état du réseau

Champs	Description
sta_id	Numéro de la station dont on présente le niveau d'inventaire
et_date	Date à laquelle le niveau d'inventaire a été calculé
et_heure	Heure à laquelle le niveau d'inventaire a été calculé
et_nb_vel	Nombre de vélos disponibles
et_nb_vid	Nombre de points d'ancrage disponibles
et_nb_def	Nombre de vélos défectueux

Ainsi, le somme de et_nb_vel, et_nb_vid et et_nb_def correspond à la capacité de chaque station. Ces données sont capturées à chaque 5 minutes pour chaque station et nous permettent donc de déduire les mouvements de vélos qui ont eu lieu à chaque station à chaque période de 5 min. Le calcul de cette donnée sera présenté dans la sous-section 2.3.1.2.

Locations

La table Locations permet de représenter chacune des locations de vélos ayant eu lieu dans la journée à l'aide de la traçabilité des vélos. Le tableau suivant présente les informations disponibles dans la table locations.

Tableau 2.2 Structure de la table locations

Champs	Description
mem_id	Numéro du membre qui fait la location (le no. est modifié pour préserver l'anonymat)
mem_type	Type du membre qui fait la location
mem_genre	Genre du membre qui fait la location
mem_lng	Langue usuelle du membre qui fait la location
mem_datnai	Date de naissance du membre qui fait la location
mem_codep	Code postal du membre qui fait la location
ab_type	Type d'abonné (mensuel, annuel ou occasionnel)
stat_id_o	Numéro de la station d'origine de la location
tr_date_o	Date de la location du vélo à la station d'origine
tr_heure_o	Heure de la location du vélo à la station d'origine
stat_id_d	Numéro de la station de destination de la location
tr_date_d	Date de retour du vélo à la station de destination
tr_heure_d	Heure de retour du vélo à la station de destination
loc_duree	Durée de la location
loc_cred	Crédits à la location
loc_durtot	Durée totale de la location (somme de loc_duree et loc_cred)
vel_id	Numéro d'identification du vélo qui a été loué
mem_id_c	Numéro de carte du membre qui fait la location

Cette table permet donc d'obtenir beaucoup d'informations sur les trajets et sur les membres. Il est possible de savoir par exemple le pourcentage du temps où un usager utilisera une station dans un rayon de 500 m de son domicile. Cette table nous permet aussi de distinguer les locations qui ont été faites par les membres et celles qui ont été faites pour la redistribution. L'information sur la redistribution en tant que telle est présente dans la table transferts (section 2.3.1.1.4) et un survol de l'analyse des données de cette table est présenté dans la section 2.3.1.2.

Stations

La table stations permet de décrire dans le détail les caractéristiques de chaque station. Les champs stat_id et sta_id des deux tables décrites précédemment font référence à la table stations. La structure de cette table est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 2.3 Structure de la table stations

Champs	Description
sta_id	Numéro de la station décrite par l'enregistrement
sta_bixid	Numéro d'identification BIXI de la station
sta_nom	Nom de la station
sta_lat	Latitude de la station
sta_long	Longitude de la station
sta_xcoord	Coordonnée X de la station
sta_ycoord	Coordonnée Y de la station
sta_année	Année où la station était en service

Transferts

La table transferts permet de représenter les activités de redistribution. Un transfert de vélos est fait entre une station et une autre dans le but de redistribuer les vélos d'une station en surplus à une station en manque. Le tableau suivant représente les informations présentes dans la table transferts.

Tableau 2.4 Structure de la table transferts

Champs	Description
vel_id	Numéro d'identification du vélo transféré
sta_id_o	Numéro de la station d'origine du transfert
tr_date_o	Date de retrait du vélo à la station d'origine
tr_heure_o	Heure de retrait du vélo à la station d'origine
sta_id_d	Numéro de la station de destination du transfert
tr_date_d	Date de dépôt du vélo à la station de destination
tr_heure_d	Heure du dépôt du vélo à la station de destination

Cette table donne donc de l'information sur la redistribution vélo par vélo. Cependant, elle implique que les opérateurs de camions de redistribution utilisent le système d'information de la bonne façon pour signifier que le mouvement de vélos représente un transfert et non une location. La vérification de ce comportement sera présentée dans la section suivante (2.3.1.2).

2.3.1.2 Manipulations et requêtes pour analyser les données

Les manipulations et requêtes qui ont été faites pour analyser les données ont deux principaux objectifs : confirmer que le système d'information a été utilisé correctement par les différents intervenants notamment par les opérateurs de camions de redistribution et analyser les données pour voir les améliorations pouvant être apportées au système grâce à l'outil de redistribution qui sera développé.

L'analyse s'est faite en 5 étapes :

1. Calcul du changement de niveau d'inventaire à chaque station;
2. Calcul de la demande réelle à partir de la table locations;
3. Calcul des mouvements de vélos générés par les camions;
4. Comparaison des résultats obtenus à l'étape 3 à ceux de la table transfert;
5. Calcul des indicateurs de performance (stations pleines et stations vides).

Ces étapes sont présentées en détail dans les sous-sections suivantes.

Calcul du changement de niveau d'inventaire à chaque station

Cette manipulation est faite à l'aide d'une macro VBA détaillée à l'annexe A.1. La macro ajoute un champ à la table état du réseau. Le champ et_diff est calculé comme la différence du nombre de vélos entre 2 états (à chaque 5 minutes) pour chaque station. Par exemple, au temps t_i, on stocke dans le champ et_diff la différence entre et_nb_vel au temps t_i et et_nb_vel au temps t_{i-1}. En d'autres mots, et_diff représente la balance des vélos qui ont été ramenés et loués dans l'intervalle $[t_{i-1}, t_i]$. Une balance négative signifie que plus de vélos ont été empruntés que ramenés pendant la période de 5 minutes alors qu'une balance positive signifie que plus de vélos ont été ramenés qu'empruntés.

Calcul de la demande réelle à partir de la table locations

La deuxième étape de la manipulation des données est le calcul de la demande réelle à partir de la table locations. Pour ce faire, les requêtes demande_arrivée_vélos et demande_départ_vélos sont créées à partir de la table locations. Ces requêtes comptent le nombre de locations pour chaque moment précis. Une arrivée est comptée lorsque la station est dans le champ station de

destination alors qu'un départ est compté lorsque la station est dans le champ station d'origine. Ces requêtes nous donnent les locations à la minute près. Ainsi, pour pouvoir les comparer aux données calculées à l'étape 1, il faut regrouper les données par groupe de 5 minutes. Ce regroupement est fait à partir de la création de deux nouvelles tables et d'une macro VBA (annexe A.2). La macro calcule le mouvement réel de vélo qu'il y a eu par période de 5 minutes dans l'intervalle $]t_{i-1}, t_i]$. Elle stocke ces données dans la table arrivees_velos pour les changements d'inventaire positifs et departs_velos pour les changements d'inventaire négatifs. Finalement, il suffit de créer une requête pour calculer la balance de la demande réelle, qui, pour chaque période de 5 minutes, fait la différence entre les arrivées et les départs.

Dans le calcul de la demande réelle à partir de la table locations, il faut faire attention de ne pas prendre en compte les mouvements de vélos qui n'ont pas été faits par des usagers.

Calcul des mouvements de vélos générés par les camions

Théoriquement, la différence entre le changement de niveau d'inventaire calculé à l'étape 1 et la demande réelle calculée à l'étape 2 représente les mouvements de vélos qui ont été engendrés par les camions ou l'effet de l'agrégation des données. Le calcul des mouvements de vélos générés par les camions consiste donc à calculer la différence entre le changement d'inventaire et la demande réelle. Une différence négative signifie que des vélos ont été retirés par des camions alors qu'une différence positive signifie que des vélos ont été ajoutés.

Comparaison des résultats obtenus à l'étape 3 à ceux de la table transfert

Théoriquement, si les opérateurs de camions pour la redistribution ont bien utilisé le système d'information, les résultats calculés à l'étape 3 devraient correspondre au contenu de la table transfert. L'étape 4 consiste donc à comparer les résultats du calcul des mouvements de vélos générés par les camions aux données dans la table transfert. Les résultats obtenus nous permettent de croire que les opérations de redistribution n'ont pas toutes été rapportées dans le système d'information puisque les résultats obtenus à l'étape 3 ne correspondent pas ou très peu aux données contenues dans la table transfert. Ainsi, il semble que certains opérateurs n'aient pas entré tous leurs mouvements dans la base de données. Les résultats obtenus à cette étape sont discutés au chapitre 5.

Calcul des indicateurs de performance

Finalement, après toutes ces manipulations qui ont évalué la qualité des données récupérées par le système d'information, des indicateurs de performance ont été calculés pour quantifier le niveau de service avec le système de redistribution mis en place actuellement. Les deux indicateurs de performances qui ont été calculés sont le nombre de périodes de temps où chaque station a été vide et le nombre de périodes de temps où chaque station a été pleine. Évidemment, tel que mentionné dans le chapitre précédent, il est important d'associer ces moments à des périodes de la journée puisqu'une station vide peut être souhaitable au centre-ville le matin par exemple. Les résultats obtenus à cette étape sont détaillés dans le chapitre 5.

2.3.1.3 Traces GPS du 12 juin 2011

En plus des données disponibles avec l'extraction de la base de données du système BIXI, les traces GPS des camions de redistribution du 12 juin 2011 ont elles aussi été analysées. Les traces GPS présentaient la position de chacun des deux camions à chaque minute. Pour en faire l'analyse, la différence entre la position à chaque minute a été calculée et une différence minime de l'ordre de 10^{-5} pendant plusieurs minutes a été considérée comme un arrêt à une station pour la redistribution. Par la suite, la station la plus près de chaque position du camion a été trouvée grâce à une macro VBA dans Excel (annexe A.3). Cependant, étant donné que les informations de la table transfert ne sont pas complètes et que les données des traces GPS sont disponibles seulement pour deux camions, il a été difficile de retracer le chemin réellement emprunté et les vélos réellement redistribués par les camions. Les résultats de l'analyse complète des traces GPS sont discutés dans le chapitre 5.

2.3.2 Choix du logiciel et de la technique de modélisation

Suite à la revue de littérature et à l'analyse des données, un choix devait être fait quant à la technique de modélisation et au choix du logiciel. Tel que présenté dans la revue de littérature, la résolution du problème dynamique de redistribution des vélos dans un système de vélopartage s'est faite principalement à l'aide de la simulation (Chemla, 2012). D'autres auteurs ont présenté une formulation mathématique du problème (Contardo et al., 2012) et certains ont aussi développé des modèles d'aide à la décision basés sur la prévision de la demande (Caggiani & Ottomanelli, 2012; Vogel & Mattfeld, 2010). Un seul auteur a présenté une formulation à l'aide

de la programmation par contraintes et s'en sert pour résoudre le problème statique seulement (Schuijbroek et al., 2013).

La programmation par contraintes a été choisie pour modéliser le problème dynamique et le problème statique parce que cette dernière a été justement mise au point pour résoudre des problèmes de grandes tailles comme des problèmes de planification et d'ordonnancement. Les modèles mathématiques permettant de trouver des solutions optimales ou quasi optimales nécessitent une simplification importante du problème. Ainsi, étant donné que le but principal du modèle développé dans le cadre de ce mémoire est d'en faire un outil facilement utilisable pour un système de vélopartage, il était important que le modèle inclue toutes les contraintes d'une situation réelle et qu'il puisse trouver des solutions pour des instances importantes. Le système BIXI de Montréal compte notamment 411 stations et 5120 vélos.

Un modèle développé par programmation par contraintes permettra donc de trouver rapidement une bonne solution au problème malgré l'importance du nombre de contraintes et de variables. Il permettra donc de résoudre le problème pour des systèmes de vélopartage d'une taille importante, et ce très rapidement.

Le choix de AIMMS pour modéliser le problème s'est fait tout naturellement puisque la version 3.13 de ce logiciel inclut un module de planification des tâches en programmation par contraintes et un solveur CP Optimizer très performant. De plus, AIMMS permet une visualisation claire des résultats des problèmes. En effet, le logiciel permet de voir l'ordonnancement sur un diagramme de Gantt et permet de représenter sur une carte les routes empruntées par les camions de redistribution. En plus de permettre de représenter la solution, AIMMS permet aussi de créer des pages avec lesquelles un utilisateur moins expérimenté peut faire varier les paramètres de bases et tester les solutions ainsi trouvées. Finalement, AIMMS permet aussi de faire facilement des liens avec une base de données Access.

En somme, le but de la recherche est de développer un outil d'optimisation de la redistribution d'un système de vélopartage à sens unique. Cet outil doit être facile à utiliser, rapide à exécuter, permettre d'inclure toutes les contraintes d'un système de vélopartage, permettre de modéliser l'évolution de la demande et permettre de résoudre des instances importantes. La programmation par contrainte et AIMMS ont donc été choisis pour modéliser le problème statique et dynamique.

2.3.3 Développement des modèles d'optimisation

Suite au choix de la programmation par contraintes et de AIMMS, les modèles d'optimisation ont été développés. Tel que décrit précédemment, le développement des modèles d'optimisation s'est fait itérativement. En premier lieu, le design général du modèle a été mis au point. Puis, plusieurs modèles statiques et dynamiques ont été développés. Ces modèles ont été testés et le design général a été quelque peu modifié. D'autres modèles ont donc été créés et ainsi de suite pour développer un bon modèle statique et un bon modèle dynamique pouvant être utilisés facilement par les opérateurs de systèmes de vélopartage.

Les différents modèles ayant été développés seront présentés dans le chapitre suivant, mais cette section présente un survol des hypothèses qui ont été émises avant le développement du modèle. Le contexte d'utilisation est lui aussi abordé puisque ce dernier influence inévitablement le développement des modèles.

2.3.3.1 Contexte d'utilisation

Tel que mentionné dans la section précédente, le but du projet est de développer un outil facilement utilisable par tous les systèmes de vélopartage pour optimiser leur redistribution. Le modèle doit donc être simple tout en répondant à toutes les contraintes d'un système de vélopartage.

L'outil inclura deux modèles différents : le modèle statique pour la redistribution de nuit et le modèle dynamique pour la redistribution de jour.

Le modèle statique sera exécuté au début de la période de nuit pour prévoir tous les déplacements dans la nuit. L'objectif du modèle statique est que l'inventaire de chaque station soit dans un intervalle optimal calculé préalablement permettant de répondre à la demande le matin venu. La redistribution de nuit doit être faite avec le moins de déplacements possible et donc avec le moins de camions possible. Le résultat du modèle sera les routes des camions et le nombre de vélos à prendre ou apporter à chaque station.

Contrairement au modèle statique de nuit, le modèle dynamique de jour sera exécuté plusieurs fois par jour. En effet, le modèle sera exécuté à chaque fois qu'un camion aura fini la redistribution à une certaine station. À ce moment, le modèle sera exécuté pour tous les camions pour un certain horizon de temps déterminer par le planificateur. Le modèle sera donc ajusté en

temps réel avec les vrais niveaux d'inventaire même s'il inclura une portion de prévision de la demande. Il n'y aura pas d'objectif précis pour chaque station. L'objectif sera plutôt de diminuer le nombre d'usagers insatisfaits en fonction de la demande prévue.

De plus, les modèles pourront aussi être utilisés pour exécuter des simulations en fonction de différents scénarios comme le retrait d'un camion ou le changement de la capacité des camions.

2.3.3.2 Hypothèses

Les modèles développés reposent sur les hypothèses suivantes :

- Certains paramètres sont connus a priori comme le nombre de camions disponibles et leur capacité ainsi que la position des différentes stations;
- Le temps de transport pour les camions entre les différentes stations est connu ou peut être estimé;
- Le temps d'une opération de redistribution en fonction du nombre de vélos et de la position de la station est connu ou peut être estimé;
- Le système d'information permet de connaître le niveau d'inventaire de chaque station en temps réel ou à une granularité intéressante (ex. chaque 5 minutes);
- Pour le modèle dynamique, un bon modèle de prévision de la demande existe.

En fonction de ce contexte d'utilisation et de ces hypothèses, plusieurs modèles ont été développés. Ces derniers sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3 DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS MODÈLES D'OPTIMISATION DÉVELOPPÉS

Le chapitre 3 présente les différents modèles d'optimisation qui ont été développés dans le cadre de la présente recherche. La description des modèles met l'accent sur leurs développements mathématiques. Le chapitre 3 débute par une description de la structure de base de tous les modèles. Cette dernière a été réutilisée dans chacun des modèles. Puis, les modèles statiques développés pour la nuit sont présentés avec leurs particularités, leurs contraintes et leurs fonctions objectifs. Par la suite, les modèles dynamiques développés pour le problème de redistribution dans le jour sont présentés. Finalement, la conclusion présente un résumé de tous les modèles présentés dans ce chapitre ainsi que leurs particularités.

Alors que le chapitre 3 présente les développements mathématiques et la modélisation derrière les différents modèles qui ont été développés dans le cadre de cette recherche, le chapitre 4 démontre le fonctionnement réel de l'outil. En effet, le chapitre 4 s'attarde sur comment les employés de BIXI ou de tout autre système de vélopartage à sens unique pourront utiliser l'outil au quotidien. L'accent est donc mis sur l'interface utilisateur et les fonctionnalités opérationnelles de l'outil développé.

3.1 Structure de base

Dans cette section, les différentes parties de la structure de base qui a été utilisée dans tous les modèles sont présentées. Chaque partie de la structure est discutée en détail. Puis, les ajouts et les modifications à la structure pour les différents modèles développés sont présentés pour chaque modèle.

Tous les modèles utilisent comme intrant des paramètres de base qui seront peu ou pas modifiés, des paramètres mis à jour qui seront mis à jour à toutes les fois que le modèle sera exécuté et des variables dont les valeurs doivent être définies par la résolution du modèle. Le but de tous les modèles est de trouver la valeur optimale de ces variables qui permettent de décrire les routes des camions et la quantité de vélo pris ou enlevés à chaque station en fonction d'un objectif défini par la fonction objectif. La figure suivante résume la structure de base de tous les modèles développés.

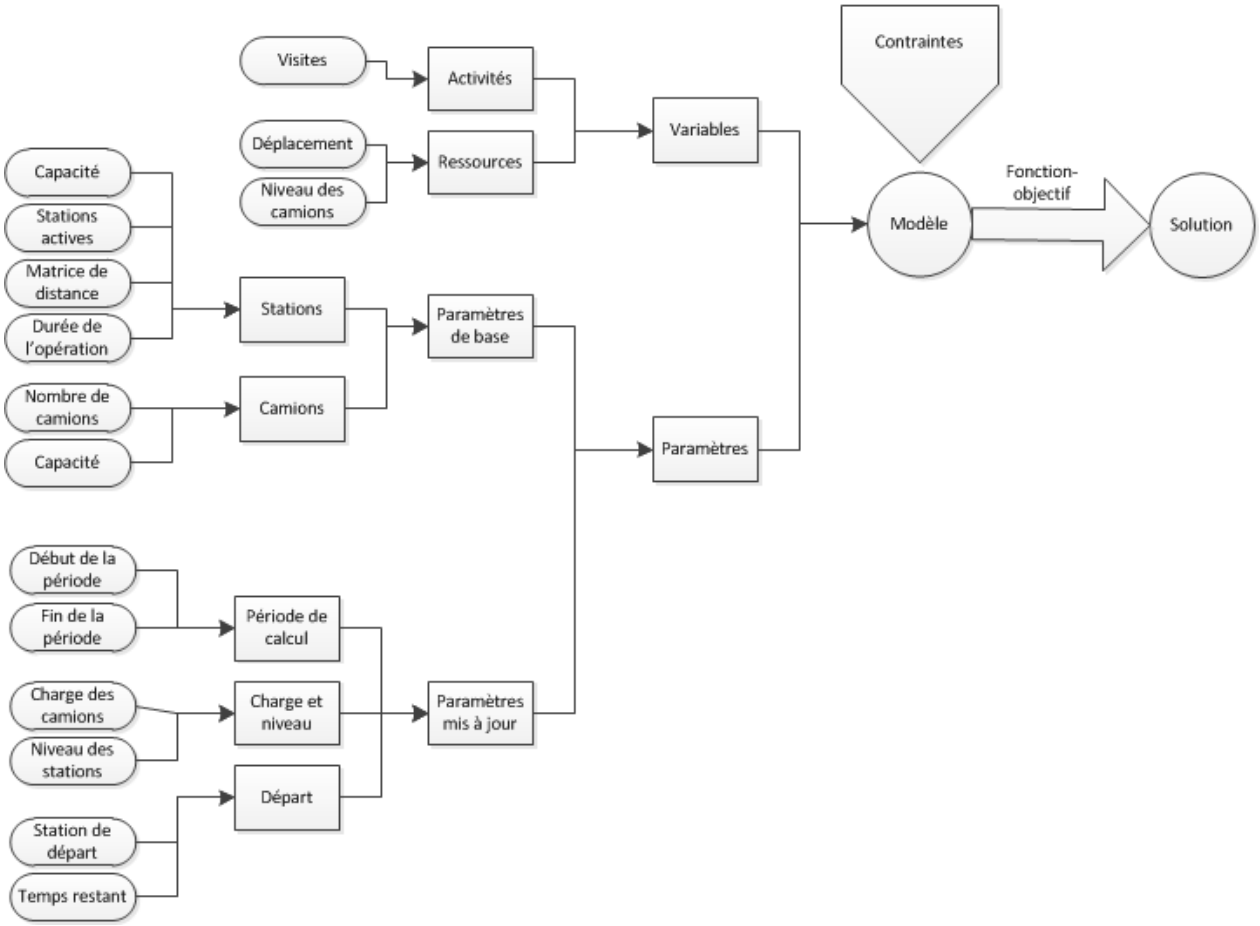

Figure 3.1 Structure de base des modèles d'optimisation

Dans un premier temps, les paramètres de base et les paramètres mis à jour seront présentés. Ensuite, les variables modélisées comme des activités et des ressources seront présentées. Puis, les différentes contraintes pouvant entrer dans le modèle seront discutées. Finalement l'influence de la fonction objectif et les différentes possibilités pour cette dernière seront présentées.

3.1.1 Paramètres

Les paramètres sont divisés en deux grandes catégories : les paramètres de base et les paramètres mis à jour. Les paramètres de base sont ceux qui ne sont peu ou pas changés dans le modèle (la position de chacune des stations par exemple) alors que les paramètres mis à jour sont ceux qui sont mis à jour à chaque fois que le modèle est exécuté (le niveau de chacune des stations par exemple).

3.1.1.1 Paramètres de base

Les paramètres de bases sont divisés en fonction de deux ensembles : les camions et les stations.

Camions

L'ensemble des camions est décrit par l'indice **c**. L'ensemble des camions est créé en fonction du paramètre **NbCamions** qui décrit le nombre de camions disponibles. Ainsi, la définition de l'ensemble camion est faite de la façon suivante selon la notation AIMMS :

```
Ensemble Camions (
Definition: NbElementRange(1, NbCamions, 1, "Camion")
)
```

Par la suite, chaque camion est décrit en fonction de sa capacité grâce au paramètre **CapaciteCamion(c)**.

Stations

L'ensemble des stations actives est décrit par l'indice **s**. Des sous-ensembles de stations sont créés pour décrire les stations au centre-ville (**cv**) et celles en périphérie (**pe**). L'ensemble station permet de décrire la distance entre toutes les paires de stations grâce au paramètre **Distance(so,sd)** ainsi que la durée d'une opération à chaque station grâce au paramètre **Duree(s,c)**. En outre, chaque station est aussi décrite par sa capacité c'est-à-dire la quantité maximale de vélos pouvant y être stockés par le paramètre **CapaciteStation(s)**.

Distance entre toutes les paires de stations

Chaque station est définie par sa latitude avec le paramètre **lat(s)** et sa longitude avec le paramètre **long(s)**. La matrice des distances entre toutes les paires de stations est calculée comme une distance euclidienne entre tous les points en fonction de leur latitude et de leur longitude. Cette distance euclidienne est par la suite multipliée par un facteur de 1,5 pour tenir compte du fait que la distance en ville ne correspond pas à la plus courte distance entre deux points (distance euclidienne), mais plutôt à une distance réseau. Par la suite, la distance en minutes est calculée en considérant une vitesse en ville moyenne de 30 km/h.

Le paramètre **Distance(so,sd)** est donc défini par les propriétés suivantes en fonction de la notation développée par AIMMS.

```
Paramètre Distance(so,sd) (
Unit : minute
Definition : if so<>sd then
(round(arccos(cos(radians(90-lat(so)))*cos(radians(90-
lat(sd)))+sin(radians(90-lat(so)))*sin(radians(90-
lat(sd)))*cos(radians(long(so)-long(sd))))*6731/30*60))[minute]
else
0
endif
)
```

L'idéal serait d'utiliser des données historiques pour prévoir le temps de transport en fonction des heures de la journée, mais un tel modèle de prévision n'a pas encore été développé. Cependant, le modèle est facilement adaptable et pourra être ajusté rapidement lorsque l'information sera disponible.

Durée d'une opération à chaque station

La durée d'une opération à chaque station est définie en fonction d'une durée de base avec le paramètre **DureeBase(s)** et d'une durée par vélo **DureeParVelo**. Le temps de base est défini en fonction des différents sous-ensembles de station. Par exemple, le temps de base sera plus important au centre-ville et moins important en périphérie. Ce temps est additionné au temps par vélo déplacé pour calculer le temps total. Le nombre de vélos déplacés diffère selon les modèles. L'équation de calcul du paramètre **Duree(s,c)** est donc présentée dans les sections suivantes lors de la description détaillée de chacun des modèles.

3.1.1.2 Paramètres mis à jour

Tel que décrit précédemment, les paramètres mis à jour sont les paramètres qui sont mis à jour à chaque fois que le modèle est exécuté. Ces paramètres peuvent être divisés en trois grandes catégories : la période de calcul, les paramètres de charge et de niveau et les paramètres liés au départ.

Période de calcul

La période de calcul est la période pour laquelle le mouvement des camions sera optimisé. Cette dernière est décrite par deux paramètres : le début de la période **DebutPeriode** et la fin de la période **FinPeriode**. Elles correspondent à des chaînes de caractères qui décrivent une journée et une heure précise telle que « 2012-11-17 11 :00 ».

Charge et niveau

Avant d'exécuter le modèle, il est important de mettre à jour la charge de chaque camion c'est-à-dire le nombre de vélos présents dans chaque camion. La charge de chaque camion est définie par le paramètre **ChargeCamion(c)**. Ensuite, le niveau de chaque station au moment du début de la période est défini par le paramètre **NiveauInitial(s)**.

Départ

Un autre paramètre qu'il est important de définir est le moment auquel un camion sera en mesure d'atteindre la prochaine station. Cette donnée est définie par le paramètre **TempsPremiereStation(s,c)**. Ce paramètre est fonction de la station actuelle où se trouve le camion **StationDepart(c)** et du temps restant au camion à cette station **TempsRestantStation(c)**. En fonction du temps restant et de la distance entre la station de départ et toutes les stations, le paramètre **TempsDepart(s,c)** qui correspond au temps en minute pour chaque camion pour terminer son travail et se rendre à la prochaine station. En effet, le paramètre **TempsDepart(s,c)** est défini de la façon suivante :

```
Paramètre TempsDepart(s,c) (
Unit: minute
Definition: (Distance(StationDepart(c),s)+TempsRestantStation(c)) [minute]
)
```

Le paramètre **TempsPremiereStation(s,c)** est donc la somme entre la variable de début de la période et le paramètre **TempsDepart(s,c)**. Il est défini de la façon suivante :

```
Paramètre TempsPremierStation(s,c) (
Range: calendrier
Definition: stringtotimeslot("%c%y-%m-%d%H:%M",calendrier,DebutPeriode) +
TempsDepart(s,c)
)
```

3.1.2 Variables

Tel que décrit dans le chapitre précédent, le module utilisé pour le développement des modèles présentés dans le cadre de ce mémoire est le module de planification de tâches en programmation par contraintes.

Ce dernier est basé sur la notion d'activités et de ressources. Les activités correspondent à l'exécution d'une visite à une station par un camion et les ressources permettent de décrire le

temps de déplacement du camion entre une station et la suivante en plus de décrire le nombre de vélos dans chaque camion.

3.1.2.1 Activités

Les visites des camions à une station sont représentées comme des activités. Chaque activité (chaque visite) peut être programmée dans l'horaire. L'activité **Visite(s,c)** est indexée en fonction des stations et des camions c'est-à-dire qu'il existe une telle activité pour chaque camion et pour chaque station. La variable activité **Visite(s,c)** est décrite par les propriétés suivantes.

```
Activité Visite(s,c) (
Schedule domain : {TempsPremiereStation(s,c)..FinPeriode}
Property : Optional
Length : Duree(s)
)
```

Les activités et les ressources sont décrites en fonction de la notation définie par AIMMS.

3.1.2.2 Ressources

Tel que mentionné précédemment, il existe deux types de ressources : les ressources séquentielles et les ressources parallèles. Dans les modèles présentés dans les sections suivantes, le déplacement d'un camion entre chacune des stations est représenté par une ressource séquentielle comme un temps de préparation alors que le chargement du camion est représenté par une ressource parallèle. Les différentes ressources et leurs propriétés sont présentées en détail dans les sections suivantes.

Déplacement

La ressource **VoyageCamion(c)** est décrite par les propriétés suivantes.

```
Ressource séquentielle VoyageCamion(c) (
Schedule domain : Calendrier
Activities : Visite(s,c)
Transition : (Visite(so,c),Visite(sd,c)):Distance(so,sd)
)
```

La transition entre chaque visite doit donc se faire en passant par la ressource **VoyageCamion(c)** d'une durée définie par le paramètre **Distance(so,sd)**. De plus, chaque activité et ressource est programmée pour une certaine période de temps. Dans ce cas-ci, le *schedule domain* correspond à la période de temps calendrier qui est découpée par périodes d'une minute, qui commence au

début de la période définie par le paramètre **DebutPeriode** et se termine à la fin de la période définie par le paramètre **FinPeriode**.

Chargement camion

La ressource parallèle **ChargementCamion(c)** permet de s'assurer que l'ordre des visites des stations sera dépendant de la capacité des camions. Cette ressource est définie par les propriétés suivantes.

```
Ressource parallèle ChargementCamion(c) (
Schedule domain : Calendrier
Activities : Visite(s,c)
Level range : {0..CapaciteCamion(c)}
Initial level : ChargeCamion(c)
Begin Change : Visite(s,c):BesoinStation(s)
)
```

Le paramètre *Begin Change* est différent d'un modèle à l'autre tout dépendant si la quantité à ramasser ou rendre à chaque station est en fonction d'un paramètre ou d'une variable. Ces changements seront expliqués lors de la description précise de chacun des modèles.

3.1.3 Contraintes

Les variables activités et ressources telles que définies précédemment engendrent certaines contraintes. Par exemple, il doit y avoir un déplacement de camions entre chaque visite de station et la capacité maximale des camions ne doit pas être dépassée. Ces contraintes sont implicites dans la définition des différentes ressources et activités.

En fonction des besoins des différents modèles, certains présentent d'autres contraintes. La seule contrainte présente dans tous les modèles est la contrainte qu'il ne peut y avoir qu'une seule visite par station. La forme de cette contrainte diffère selon les modèles et sera présentée plus en détail dans la description de chacun des modèles.

3.1.4 Fonctions objectifs

La fonction objectif définit ce qui sera optimisé (maximisé ou minimisé) dans chacun des modèles. Cette dernière changera donc beaucoup en fonction des différents modèles et de leur objectif. La fonction objectif de chaque modèle sera donc présentée en détail dans les sections suivantes en fonction des différents modèles.

3.2 Modèles de redistribution statique

Tel que mentionné dans les premiers chapitres, les modèles de redistribution statiques permettent de représenter la redistribution qui se fait durant la nuit. Les modèles considèrent que la location et le retour de vélo pendant la redistribution sont négligeables. Ainsi, il n'est pas nécessaire de considérer les variations dans la demande lors de l'optimisation de la redistribution.

Trois modèles de redistribution statique sont présentés dans cette section. Le premier modèle (modèle statique avec objectif précis) implique que le niveau optimal de chacune des stations est connu a priori. Lors d'une visite à une station, un camion doit absolument amener la station à son état optimal. Le deuxième modèle (modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite) est très semblable au premier, mais le camion ne doit pas absolument amener la station à son état optimal, mais plutôt tenter de l'en rapprocher. Le dernier modèle (modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite) est semblable au modèle de programmation par contraintes présenté par Schuijbroek et al. (2013). Le nombre de vélos à déplacer n'est pas connu a priori, mais le niveau d'inventaire de chaque station doit le plus possible se trouver dans un intervalle souhaité. Ce modèle ressemble au deuxième à l'exception qu'un intervalle plutôt qu'une cible précise est utilisé.

3.2.1 Modèle statique avec objectif précis

Le modèle statique avec un objectif plus précis est le plus simple. En effet, au début de la nuit, le niveau de chaque station est connu. Le but du modèle est d'amener chacune des stations à un niveau déterminé à l'avance (le niveau optimal). À chaque fois qu'un camion visite une station, il doit absolument amener cette station à son niveau optimal. Le but du modèle est donc de déplacer le plus de vélos possible durant la nuit dans le temps imparti et avec la flotte de véhicules disponibles.

3.2.1.1 Paramètres

Les changements par rapport à la structure de base sont minimes. Ce modèle implique la création de deux nouveaux paramètres : **ObjectifStation(s)** qui définit le niveau objectif pour chacune des stations et le paramètre **BesoinStation(s)** qui calcule le besoin en redistribution de chaque station pour amener une station de son niveau initial à son niveau optimal.

Le paramètre **BesoinStation(s)** est défini de la façon suivante :

$$BesoinStation(s) = ObjectifStation(s) - NiveauInitial(s) \ \forall s \in stations$$

Ainsi, lorsque le paramètre est négatif, cela signifie que le camion doit retirer des vélos de la station. Si le paramètre est positif, le camion doit apporter des vélos à la station.

Le tableau suivant résume les différents indices et paramètres ainsi que leur définition. Les cases en gras représentent les modifications apportées à la structure de base.

Tableau 3.1 Paramètres du modèle statique avec objectif précis

	Type	**Nom**	**Description**
Paramètres de base	paramètre	NbCamions	nombre de camions
	ensemble	Camions c	ensemble des camions
	paramètre	CapaciteCamion(c)	capacité de chacun des camions
	ensemble	Stations s	ensemble des stations
	ensemble	Stations en périphérie pe	sous-ensemble des stations en périphérie
	ensemble	Stations au centre-ville cv	sous-ensemble des stations au centre-ville
	paramètre	CapaciteStation(s)	capacité de chacune des stations
	paramètre	lat(s)	latitude
	paramètre	long(s)	longitude
	paramètre	Distance(so,sd)	matrice des distances entre toutes les stations
	paramètre	DureeBase(s)	temps de base pour effectuer une opération en fonction de la localisation de la station (centre-ville, périphérie ou autre)
	paramètre	DureeParVelo	temps nécessaire pour déplacer un vélo
	paramètre	Duree(s,c)	temps total nécessaire pour effectuer une opération
Paramètres mis à jour	paramètre	DebutPeriode	début de la période de calcul
	paramètre	FinPeriode	fin de la période de calcul
	paramètre	ChargeCamion(c)	charge actuelle de chacun des camions
	paramètre	NiveauInitial(s)	niveau actuel de chacune des stations
	paramètre	**ObjectifStation(s)**	**niveau optimal pour chaque station**
	paramètre	**BesoinStation(s)**	**besoin en redistribution pour chaque station**
	paramètre	StationDepart(c)	station de départ de chacun des camions
	paramètre	TempsRestantStation(c)	temps restant pour finir les opérations de chacun des camions
	paramètre	TempsDepart(s,c)	temps qu'un camion c prendra pour se rendre à une station s
	paramètre	TempsPremiereStation(s,c)	moment auquel un camion c sera rendu à une station s

Tel que mentionné précédemment, le calcul du temps total nécessaire pour effectuer une opération varie d'un modèle à l'autre. Dans le modèle statique avec objectif précis, le paramètre **Duree(s,c)** est défini de la façon suivante.

```
Paramètre Duree(s,c) (
Unit : minute
Definition : (DureeBase(s)+DureeParVelo*abs(BesoinStation(s))) [minute]
)
```

En effet, comme le besoin de redistribution à chaque station est connu a priori et comme on oblige le camion à amener chaque station à son état optimal lors d'une visite, le paramètre **BesoinStation(s)** est celui qui définit la quantité de vélos déplacés à chaque station.

3.2.1.2 Variables

Il n'y a aucun changement par rapport aux différentes propriétés des variables. Ces dernières sont les mêmes que celles présentées dans la structure de base.

3.2.1.3 Contraintes

Les contraintes implicites étant générées par la déclaration des variables activités et ressources dans le module de planification de tâches, la seule contrainte explicite de ce modèle est celle qui limite à une seule visite par station. Dans le cas présent, cette contrainte est primordiale, car, à chaque visite, la station est amenée à son niveau optimal. Deux visites signifieraient donc qu'il y aurait trop ou trop peu de vélos par rapport à l'objectif. Cette contrainte limite aussi le nombre de camions qui peuvent visiter une station. Une station ne peut pas être visitée par deux camions différents. La contrainte est définie mathématiquement de cette façon :

$$\sum_{c} Visite(s,c).present \leq 1 \; \forall c \in camions$$

La propriété visite.present permet de savoir si une activité optionnelle a été programmée ou non. Si l'activité a été programmée visite.present = 1 sinon visite.present = 0.

3.2.1.4 Fonction objectif

La fonction objectif du modèle statique avec objectif précis est définie par l'équation suivante :

$$max\left(\sum_{s}\sum_{c} Visite(s,c).present \times |BesoinStation(s)|\right)$$

La fonction objectif consiste donc à maximiser le nombre de vélos déplacés. Étant donné que le problème est limité par une période de temps et une flotte de véhicule fixe, le but est d'amener le plus de stations possible à leur niveau optimal en pondérant davantage les stations qui ont un plus grand besoin de redistribution.

Il serait aussi intéressant de pouvoir inclure dans cette fonction objectif la notion de la distance parcourue par les camions. Comme il est difficile de comparer dans une même équation un nombre de vélos redistribués et une distance, la notion de distance parcourue est incluse à travers une deuxième étape d'optimisation.

En effet, lorsque, lors de la première exécution du modèle, le modèle arrive à trouver la valeur optimale dans le temps imparti, le modèle sera exécuté une deuxième fois. La deuxième fois, la fonction objectif consistera à minimiser la fin de la dernière activité avec l'équation suivante.

$$min\left(max\big((s,c), visite(s,c).end\ \big)\right)$$

De plus, pour s'assurer que le modèle ne favorisera pas la diminution de la distance parcourue au profit de la redistribution, la contrainte suivante est ajoutée.

$$\sum_{s}\left|ObjectifStation(s) - \left(NiveauInitial(s) + \sum_{c} visite.present(s,c) \times BesoinStation(s)\right)\right| = 0$$

Les résultats obtenus grâce à cette seconde optimisation sont présentés au chapitre 5.

3.2.2 Modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite

Le principal problème du modèle présenté dans la section précédente est qu'il oblige un camion qui se rend à une station à amener cette dernière à son niveau optimal. Le camion ne peut donc pas visiter une station et lui amener deux vélos de moins que son objectif de redistribution. Le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite présenté dans cette section vient pallier ce problème en modélisant la quantité de vélos déplacés à chaque station comme une variable. Ainsi, il se peut que la demande en vélos à une station ne soit pas satisfaite à 100 % ce qui est impossible dans le modèle précédent. À l'instar du modèle statique avec objectif précis, le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite implique la connaissance d'un niveau optimal pour chaque station a priori. Le but du modèle est, encore une fois, de redistribuer le plus

de vélos possible, mais il est aussi d'amener le maximum de stations le plus près de leur niveau optimal.

3.2.2.1 Paramètres

Au niveau des paramètres, les changements par rapport à la structure de base sont au niveau de la définition du besoin de chaque station.

Comme dans le modèle statique avec objectif précis, le paramètre **BesoinStation(s)** permet de définir le besoin en redistribution de chacune des stations. Ce paramètre est défini exactement comme dans le modèle précédent c'est-à-dire en fonction du paramètre **ObjectifStation(s)** qui définit le niveau souhaité pour chacune des stations et le paramètre **NiveauInitial(s)** qui définit le niveau initial de chacune des stations. Tous les paramètres présents dans le modèle sont donc identiques à ceux du modèle précédent. Ils sont présentés dans le tableau 3.1.

Le changement est principalement au niveau des variables puisque la quantité de vélos amassés ou remis est une variable. Les changements au niveau des variables sont discutés dans la section suivante. Cependant, ces derniers ont entraîné la modification de la définition du paramètre **Duree(s,c)** qui définit la durée de l'activité de chargement ou de déchargement. Le paramètre **Duree(s,c)** est défini de la façon suivante.

```
Paramètre Duree(s,c) (
Unit : minute
Definition :(DureeBase(s)+DureeParVelo*sum(c,MouvementPositif(s,c)+MouvementNe
gatif(s,c))) [minute]
)
```

3.2.2.2 Variables

Au niveau des variables, il y a eu des changements au niveau des activités et des ressources et au niveau de l'ajout d'une variable de mouvement, cette dernière n'étant pas défini a priori par le besoin de chaque station contrairement au modèle statique avec objectif précis.

Pour ce qui est de l'ajout de la variable définissant le mouvement, l'idéal aurait été de créer une variable pouvant être négative ou positive en fonction du sens du mouvement (vélos remis ou amassés). Cependant, AIMMS ne permet pas de définir un changement d'une ressource en fonction d'une variable pouvant prendre une valeur négative. En d'autres mots, lors de la définition de la ressource **ChargementCamion(c)**, il est impossible de définir la propriété

« Begin Change » par une variable pouvant prendre une valeur négative. Il ne serait donc pas possible d'avoir des chargements négatifs (déchargement de vélos) avec une seule variable. Cette particularité de AIMMS a donc engendré la création de deux variables de mouvement et le dédoublement de la variable activité.

En effet, deux variables de mouvement ont été créées : **MouvementPositif(s,c)** et **MouvementNegatif(s,c)**. Ces deux variables peuvent prendre des valeurs entières entre 0 et la capacité de chacun des camions et représentent la quantité de vélos qui seront bougés (soit positivement, soit négativement) à la visite d'un camion c. La variable **MouvementPositif(s,c)** représente un ajout de vélos alors que la variable **MouvementNegatif(s,c)** représente un retrait de vélos.

Tel que mentionné précédemment, le dédoublement des variables mouvements a aussi engendré la nécessité de dédoubler la variable activité **Visite(s,c)**. Les activités **VisitePositive(s,c)** et **VisiteNegative(s,c)** ont donc été créées. Ces activités ont exactement les mêmes propriétés que l'activité **Visite(s,c)** dans la structure de base. Les détails de ces propriétés sont présentés dans la section 3.1.2.1.

Le dédoublement de l'activité **Visite(s,c)** a nécessité des modifications dans les propriétés des différentes ressources.

La ressource **ChargementCamion(c)** est maintenant définie de la façon suivante pour permettre un changement de niveau négatif lors d'une visite négative et un changement de niveau positif lors d'une visite positive.

```
Ressource parallèle ChargementCamion(c) (
Schedule domain : Calendrier
Activities : VisitePositive(s,c), VisiteNegative(s,c)
Level range : {0..CapaciteCamion(c)}
Initial level : ChargeCamion(c)
Begin Change : VisitePositive(s,c):MouvementPositif(s,c),VisiteNegative(s,c):-
MouvementNegatif(s,c)
)
```

La définition de la ressource **VoyageCamion(c)** a elle aussi été modifiée de la façon suivante.

```
Ressource séquentielle VoyageCamion(c) (
Schedule domain : Calendrier
Activities : VisitePositive(s,c), VisiteNegative(s,c)
Transition :(VisitePositive(so,c),VisitePositive(sd,c)):Distance(so,sd),
(VisitePositive(so,c),VisiteNegative(sd,c)):Distance(so,sd),
```

```
(VisiteNegative(so,c),VisitePositive(sd,c)):Distance(so,sd),
(VisiteNegative(so,c),VisiteNegative(sd,c)):Distance(so,sd)
)
```

Cette façon de décrire les mouvements et les ressources est importante puisqu'elle est réutilisée dans plusieurs modèles qui seront présentés subséquemment.

3.2.2.3 Contraintes

La création de nouvelles variables a entraîné la création de plusieurs contraintes et la modification de la contrainte qui restreint à une seule visite par station.

La contrainte qui restreint à une seule visite par station est maintenant définie de la façon suivante :

$$\sum_{c}(VisitePositive(s,c).present\ + VisiteNegative(s,c).present) \leq 1\ \forall c \in camions$$

Les autres contraintes créées permettent d'assurer la cohérence entre les valeurs des variables de mouvements et la présence des activités associées. Les contraintes ajoutées sont les suivantes :

$$VisitePositive(s,c).present = 1 \Leftrightarrow MouvementPositif \geq 1\ \forall s \in stations, c \in camions$$

$$VisitePositive(s,c).present = 0 \Leftrightarrow MouvementPositif = 0\ \forall s \in stations, c \in camions$$

$$VisiteNegative(s,c).present = 1 \Leftrightarrow MouvementNegatif \geq 1\ \forall s \in stations, c \in camions$$

$$VisiteNegative(s,c).present = 0 \Leftrightarrow MouvementNegatif = 0\ \forall s \in stations, c \in camions$$

3.2.2.4 Fonction objectif

Dans le cas du modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite, l'objectif est qu'un maximum de stations se rapproche de l'état optimal. L'objectif est donc de minimiser la différence entre le mouvement ayant eu lieu et le besoin de redistribution de chaque station. La fonction objectif est donc la suivante :

$$min\left(\sum_{s}\left|\sum_{c}(MouvementPositif(s,c) + MouvementNegatif(s,c)) - BesoinStation(s)\right|\right)$$

Encore une fois, avec la technique présentée à la section 3.2.1.4, il est possible de minimiser le temps total d'utilisation des camions (un proxy pour la distance totale parcourue par les camions) grâce à une deuxième exécution du modèle qui minimise le temps de fin de la dernière activité.

Cette technique de minimisation du temps requis est intéressante seulement lorsque la solution trouvée est optimale. En effet, dans le cas contraire, le modèle tente de maximiser l'utilisation des camions en favorisant la redistribution. Le modèle priorise donc la redistribution au profit de l'utilisation des camions. Ainsi, les camions sont donc utilisés à un maximum pour redistribuer le plus de vélos possible (se rapprocher de l'objectif). La notion de distance parcourue devrait être incluse dans la fonction objectif du modèle seulement si l'opérateur désire favoriser la redistribution tout en tenant compte de la distance. L'objectif de redistribution de chaque station ne doit donc plus être atteint à tout prix.

3.2.3 Modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite

Le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite est très intéressant lorsque les opérateurs de systèmes de vélopartage ont défini un niveau objectif précis pour chaque station à la fin de la nuit. Cependant, il pourrait parfois être intéressant d'avoir un intervalle optimal plutôt qu'une valeur précise. Ainsi, le modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite permet de ne pas pénaliser une station dont le niveau se trouve dans l'intervalle objectif même si le niveau de la station ne correspond pas exactement à un niveau objectif précis. Ce modèle est semblable à celui développé par Schuijbroek et al. (2013). La structure du modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite est très semblable à celle du modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite. Les changements sont principalement au niveau des paramètres et de la fonction objectif.

3.2.3.1 Paramètres

Les changements par rapport à la structure de base sont au niveau de l'ajout de deux paramètres pour définir un intervalle optimal. Les paramètres **NiveauStationMax(s)** et **NiveauStationMin(s)** ont été ajoutés et permettent de définir le niveau maximal optimal de la station et le niveau minimal optimal de la station.

Contrairement au modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite, le paramètre **BesoinStation(s)** n'a pas été créé puisque la différence entre l'état final et l'état initial sera calculée a posteriori et comparée à l'intervalle optimal dans la fonction objectif.

Le tableau suivant présente donc les différents paramètres du modèle. Les paramètres en gras sont ceux qui diffèrent de la structure de base.

Tableau 3.2 Paramètres du modèle statique avec intervalle optimal et demande insatisfaite

	Type	**Nom**	**Description**
Paramètres de base	paramètre	NbCamions	nombre de camions
	ensemble	Camions c	ensemble des camions
	paramètre	CapaciteCamion(c)	capacité de chacun des camions
	ensemble	Stations s	ensemble des stations
	ensemble	Stations en périphérie pe	sous-ensemble des stations en périphérie
	ensemble	Stations au centre-ville cv	sous-ensemble des stations au centre-ville
	paramètre	CapaciteStation(s)	capacité de chacune des stations
	paramètre	lat(s)	latitude
	paramètre	long(s)	longitude
	paramètre	Distance(so,sd)	matrice des distances entre toutes les stations
	paramètre	DureeBase(s)	temps de base pour effectuer une opération en fonction de la localisation de la station (centre-ville, périphérie ou autre)
	paramètre	DureeParVelo	temps nécessaire pour déplacer un vélo
	paramètre	Duree(s,c)	temps total nécessaire pour effectuer une opération
Paramètres mis à jour	paramètre	DebutPeriode	début de la période de calcul
	paramètre	FinPeriode	fin de la période de calcul
	paramètre	ChargeCamion(c)	charge actuelle de chacun des camions
	paramètre	NiveauInitial(s)	niveau actuel de chacune des stations
	paramètre	**NiveauStationMax(s)**	**borne supérieure de l'intervalle objectif**
	paramètre	**NiveauStationMin(s)**	**borne inférieure de l'intervalle objectif**
	paramètre	StationDepart(c)	station de départ de chacun des camions
	paramètre	TempsRestantStation(c)	temps restant pour finir les opérations de chacun des camions
	paramètre	TempsDepart(s,c)	temps qu'un camion c prendra pour se rendre à une station s
	paramètre	TempsPremiereStation(s,c)	moment auquel un camion c sera rendu à une station s

3.2.3.2 Variables

Les variables sont sensiblement les mêmes que dans le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite. Il y a eu l'ajout de deux variables permettant de calculer la différence des stations dont le niveau ne se retrouve pas dans l'intervalle optimal. Ainsi, les variables **Surplus(s)** et **Manque(s)** ont été créées. La variable **Surplus(s)** permet de calculer le nombre de vélos en surplus par rapport à la borne supérieure de l'intervalle optimal et la variable **Manque(s)** permet de calculer le nombre de vélos manquant pour atteindre la borne inférieure du niveau de chaque station. Ces deux variables sont des variables entières.

La définition des activités et des ressources reste inchangée par rapport au modèle statique avec objectif précis (se référer à la section 3.2.2.2).

3.2.3.3 Contraintes

Les contraintes sont sensiblement les mêmes que dans le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite. Il y a seulement eu l'ajout de deux nouvelles contraintes.

Ces deux nouvelles contraintes ont été définies pour permettre de quantifier les variables **Surplus(s)** et **Manque(s)** en fonction de l'intervalle optimal. Les deux contraintes sont définies selon les équations suivantes :

[1] $$NivesauInitial + \sum_c MouvementPositif(s,c) - MouvementNegatif(s,c) \leq NiveauStationMax(s) + Surplus(s)\ \forall s \in stations$$

[2] $$NivesauInitial + \sum_c MouvementPositif(s,c) - MouvementNegatif(s,c) \geq NiveauStationMin(s) - Manque(s) \forall s \in stations$$

3.2.3.4 Fonction objectif

La fonction objectif est de minimiser l'écart entre le niveau final des stations et leur intervalle objectif en minimisant la somme des variables **Surplus(s)** et **Manque(s).** L'équation correspondante est donc la suivante :

$$min\left(\sum_s surplus(s) + manque(s)\right)$$

À l'instar des deux modèles précédents, lorsqu'une solution optimale est trouvée, il est possible de minimiser le temps de fin de la dernière activité à l'aide d'une seconde exécution du modèle.

3.3 Modèles de redistribution dynamique

La redistribution dynamique représente le problème de redistribution dans la journée alors que les utilisateurs continuent à emprunter et à rapporter des vélos en même temps que se fait la redistribution. Les modèles sont dynamiques puisque les mouvements de vélos induits par les usagers doivent être inclus dans la modélisation.

Trois modèles de redistribution dynamique sont présentés dans cette section. Le premier modèle (modèle dynamique avec objectif précis) est semblable au modèle statique avec objectif précis dans le sens qu'un niveau optimal quotidien est connu a priori pour chaque station. Ainsi, l'objectif de redistribution est connu a priori, mais ce dernier évolue en même temps que la demande. À chaque visite, le camion doit amener la station à son niveau optimal. Le second modèle (modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite) est semblable au premier modèle, mais n'oblige pas le camion à amener la station à son niveau optimal. En effet, le mouvement de redistribution induit par le camion est représenté par une variable. Les deux premiers modèles dynamiques présentés sont donc très semblables aux modèles statiques présentés dans la section précédente. Aucun modèle dynamique avec intervalle objectif ne sera présenté, mais son développement aurait été très semblable à celui du modèle statique. Le dernier modèle dynamique présenté (modèle dynamique avec niveau de service) est innovateur et intéressant puisqu'il a comme objectif de maximiser le niveau de service c'est-à-dire de minimiser la demande non satisfaite tout en tenant compte de la demande de vélos des usagers. Les sections suivantes présentent donc les particularités de ces modèles et leurs variations par rapport à la structure de base.

3.3.1 Modèle dynamique avec objectif précis

Tel que présenté précédemment, le modèle dynamique avec objectif précis suppose la connaissance d'un niveau optimal pour chaque station a priori. À chaque visite à une station, le camion devra amener cette station au niveau optimal. Les niveaux optimaux ou objectifs précis peuvent être modifiés selon la période de la journée en changeant les paramètres.

3.3.1.1 Paramètres

Par rapport à la structure de base, plusieurs paramètres ont été ajoutés pour créer le modèle dynamique avec objectif précis. Les premiers paramètres ajoutés sont les mêmes que pour le modèle statique avec objectif précis : **ObjectifStation(s)** et **BesoinStation(s)**. Ils sont définis de la même façon que dans le modèle statique avec objectif précis (section 3.2.1.1).

Pour pouvoir définir une demande précise par période, le développement du modèle dynamique à objectif précis a nécessité la création d'un ensemble de périodes (horizon). L'horizon **Periodes** a été défini en fonction du paramètre **NbPeriodes**. La valeur de ce dernier est calculée en fonction du paramètre **NbMin** qui représente le nombre de minutes dans chaque période de la façon décrite ci-dessous.

```
Paramètre NbPeriodes (
Definition: ceil((FP-DP+(1)[minute])/NbMin)
)
```

FP et **DP** représentent respectivement la fin de la période de planification et le début de la période de planification alors que la fonction *ceil* permet d'arrondir à l'entier le plus grand.

Pour spécifier la demande à chaque période, le paramètre **Demande(h,s)** a été créé. Ce paramètre définit la demande de vélos pour chaque station s à chaque période h. Le paramètre **Demande(h,s)** est utilisé de concert avec le paramètre **BesoinStation(s)** pour définir le paramètre **BesoinStations(h,s)**. Le paramètre **BesoinStations(h,s)** définit le besoin en redistribution pour chaque station s à la fin de chaque période h en fonction de la demande. Par exemple, le besoin à la première période p-01 correspondra à la somme du besoin de redistribution initial (**BesoinStations(h,s)**) et de la demande à la période. Ainsi, si la station avait un besoin initial de 2 vélos supplémentaires pour atteindre l'objectif (**BesoinStation(s)** ou **BesoinStations(h-1,s)**) et que 3 usagers rapportent des vélos à la station pendant la période (**Demand(h,s)**), la station aura un besoin de 5 vélos à la fin de la période (**BesoinStations(h,s)**). Les propriétés qui décrivent ce paramètre sont les suivantes :

```
Paramètre BesoinStations(h,s) (
Definition : if h='p-01' then
BesoinStation(s)+demande(h,s)
Else
BesoinStations(h-1,s)+demande(h,s)
Endif
)
```

La définition du paramètre **Duree(s)** a elle aussi dû être transformée. Le paramètre est maintenant défini en fonction de la variable **BesoinReel(s,c)**. La définition de cette variable est expliquée en détail dans la section suivante. Le paramètre **Duree(s)** est décrit de la façon suivante :

```
Paramètre Duree(s) (
Unit: Minute
Definition : (DureeBase(s)+DureeParVelo*abs(sum(c,BesoinReel(s,c)))) [minute]
)
```

3.3.1.1.1 Création du lien entre le calendrier et les périodes

L'évolution de la demande en fonction de différentes périodes implique la création d'une procédure qui fait le lien entre le calendrier (les dates réelles) et les périodes. Par exemple, il est important de savoir si le 1er janvier 2013 11 :32 correspond à la période p-05 ou à la période p-06. Dans AIMSS, le lien entre le calendrier et les périodes est défini par une procédure.

Dans le cas présent, le calendrier est défini de la façon suivante :

```
Procédure LienCalendrierHorizon (
Body : createtimetable(LienPeriodeCal, DP, DebutIntervalle,
NbMinutesDansPeriode(h), NbMinutesDansPeriode(h), TempsInactif,calendrier)
)
```

Les paramètres de la fonction *createtimetable* ont l'influence suivante :

- **LienPeriodeCal** est l'ensemble dans lequel sera stocké le résultat de la procédure. L'ensemble **LienPeriodeCal** associe chaque période de temps définie dans le calendrier (chaque minute) à une période;
- **DP** est le paramètre élément qui correspond au début de la période d'optimisation;
- Le paramètre élément **DebutIntervalle** indique à quelle période correspond le début de la période d'optimisation. Par exemple, généralement, le début de la période d'optimisation correspond à la période p-01 puisque la période p-00 correspond aux niveaux initiaux;
- Le paramètre **NbMinutesDansPeriode(h)** indique le nombre de minutes incluses dans chaque période et est défini par le paramètre **NbMin**;
- L'ensemble **TempsInactif** représente l'ensemble des temps inclus dans le calendrier qui ne doivent pas être considérés dans le développement des périodes. Par exemple, les périodes de fin de semaine pourraient ne pas être incluse dans l'horizon de prévision. Il peut correspondre à un ensemble vide;

- Le calendrier **Calendrier** est le même calendrier défini précédemment qui permet d'indiquer les périodes de temps de base.

La création du calendrier implique donc la création des paramètres suivants : **NbMin**, **NbMinutesDansPeriode(h)** et **DebutIntervalle** et des ensembles suivants : **LienPeriodeCal(h)** et **TempsInactif**

Le tableau suivant résume tous les paramètres et ensembles inclus dans le modèle mis à part les paramètres de bases qui sont les mêmes que ceux du tableau 3.1. Les éléments en caractères gras représentent les éléments qui ne sont pas présents dans le modèle de base.

Tableau 3.3 Paramètres du modèle dynamique avec objectif précis

	Type	**Nom**	**Description**
Paramètres mis à jour	paramètre	DebutPeriode	début de la période de calcul
	paramètre	FinPeriode	fin de la période de calcul
	paramètre	ChargeCamion(c)	charge actuelle de chacun des camions
	paramètre	NiveauInitial(s)	niveau actuel de chacune des stations
	paramètre	**ObjectifStation(s)**	**niveau optimal pour chaque station**
	paramètre	**BesoinStation(s)**	**besoin en redistribution pour chaque station**
	paramètre	StationDepart(c)	station de départ de chacun des camions
	paramètre	TempsRestantStation(c)	temps restant pour finir les opérations de chacun des camions
	paramètre	TempsDepart(s,c)	temps qu'un camion c prendra pour se rendre à une station s
	paramètre	TempsPremiereStation(s,c)	moment auquel un camion c sera rendu à une station s
Horizon et calendrier	**horizon**	**Périodes h**	**toutes les périodes présentes dans l'horizon**
	paramètre	**NbPeriodes**	**nombre de périodes**
	paramètre	**NbMin**	**nombre de minutes incluses dans chaque période**
	paramètre	**Demande(h,s)**	**nombre de vélos loués ou ramenés par les usagers à la période h pour chaque station**
	paramètre	**BesoinStations(h,s)**	**besoin en redistribution pour chaque station à chaque période**
	ensemble	**LienPeriodeCal**	**lien entre les périodes et le calendrier**
	paramètre	**DebutIntervalle**	**début de l'intervalle de planification**
	paramètre	**NbMinutesDansPeriode**	**nombre de minutes dans chaque période**
	ensemble	**TempsInactif**	**ensemble des temps inactifs qui sont dans le calendrier, mais ne doivent pas être inclus dans l'horizon de prévision**

3.3.1.2 Variables

Tel que mentionné précédemment, le développement du modèle a aussi nécessité la création de la variable **BesoinReel(s,c)** qui définit le besoin réel qui a été comblé à chaque station et par quel camion c'est-à-dire à quel niveau de **BesoinStation(s)** en valeur absolue correspond la période de temps à laquelle la station a été visitée.

La définition de la variable **BesoinReel(s,c)** a nécessité la création de la variable binaire **Debut(h,s,c)**. Cette dernière définit si l'activité de redistribution **Visite(s,c)** commence à la période h. Si l'activité commence à la période h, la variable **Debut(h,s,c)** prendra la valeur 1 et sinon elle prendra la valeur 0. La variable binaire **Debut(h,s,c)** est définie de la façon suivante :

```
Variable Debut(h,s,c) (
Range : binary
Definition : if visite(s,c).Begin in lienperiodecal(h) then
1
else
0
endif
)
```

Par la suite, la variable **BesoinReel(s,c)** est définie de la façon suivante :

```
Paramètre BesoinReel(s,c) (
Definition : sum(h,debut(h,s,c)*abs(BesoinStations(h,s)))
)
```

La définition des variables d'activité et de ressources est sensiblement la même que celle du modèle de base. La seule différence est au niveau du changement de niveau dans la ressource **ChargementCamion(c)** qui est maintenant fonction de la variable **BesoinReel(s,c)**. Cependant, puisque AIMMS n'accepte par que le paramètre *Begin Change* soit défini par une variable pouvant prendre une valeur négative. Il faut le décrire par l'expression suivante :

```
visite(s,c):sum(h,debut(h,s,c)*BesoinStations(h,s))
```

3.3.1.3 Contraintes

Mises à part les contraintes de planification implicites, la seule contrainte présente dans le modèle est celle d'une visite par station et sa définition est la même que celle dans le modèle statique avec objectif précis (section 3.2.1.3).

3.3.1.4 Fonction objectif

L'objectif est le même que celui du modèle statique avec objectif précis c'est-à-dire de rendre le plus de stations possible à leur niveau objectif. Elle est donc définie de la façon suivante :

$$max\left(\sum_{s}\sum_{c} Visite(s,c).present \times BesoinReel(s,c)\right)$$

3.3.2 Modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite

Le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite est très semblable au modèle dynamique avec objectif précis à l'exception prêt qu'il permet de ne pas atteindre l'objectif de redistribution à chaque visite. Sa structure est donc un hybride entre le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite et le modèle dynamique avec objectif précis.

3.3.2.1 Paramètres

Le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite inclut tous les paramètres dont ceux d'horizon et de calendrier introduits dans le modèle précédent. Il est donc possible de se référer au tableau 3.3.

Le paramètre **Duree(s)** possède les mêmes définitions de paramètres que celles du modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite.

3.3.2.2 Variables

Par rapport au modèle précédent, la variable **BesoinReel(s,c)** n'existe plus puisque le mouvement est défini par les variables **MouvementPositif(s,c)** et **MouvementNegatif(s,c)**. Les autres variables sont exactement les mêmes que celles du modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite. Il est donc possible de se référer à la section 3.2.2.2 pour les détails.

Finalement, par rapport au modèle dynamique avec objectif précis, il y a dédoublement de la variable **Debut(h,s,c)** pour créer les variables **DebutPositive(h,s,c)** et **DebutNegative(h,s,c)** puisqu'il y a eu dédoublement des activités. Ces variables binaires servent à définir si la visite(s,c) commence à la période h et sont utilisées dans la définition de l'objectif.

3.3.2.3 Contraintes

Les contraintes sont les mêmes que celles du modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite (section 3.2.2.3).

3.3.2.4 Fonction objectif

La définition de la fonction objectif de ce modèle influence beaucoup les résultats obtenus. Ces résultats seront discutés en détail au chapitre 5. La fonction objectif de ce modèle permet de minimiser la différence entre l'objectif de redistribution et la redistribution ayant eu lieu tout en minimisant l'écart entre le niveau optimal de la station et le niveau réel pour toutes les périodes de temps.

La fonction objectif est la suivante :

$$
\begin{aligned}
&min\Bigg(\sum_{s}\Bigg|\sum_{c}(MouvementPositif(s,c) - MouvementNegatif(s,c)) \\
&-\sum_{h}\sum_{c} BesoinStations(h,s)\times DebutPositive(h,s,c) \\
&+ BesoinStations(h,s)\times DebutNegative(h,s,c)\Bigg| \\
&+\sum_{h}\sum_{s}\sum_{c}|BesoinStations(h,s)\times(1 - DebutNegative(h,s,c))\times(1 \\
&- DebutPositive(h,s,c))|\Bigg)
\end{aligned}
$$

3.3.3 Modèle dynamique avec niveau de service

Les modèles dynamiques précédents sont intéressants lorsqu'un niveau optimal pour chaque station est connu en fonction de la période de la journée. Cependant, ces modèles ne prennent pas totalement en considération le dynamisme de la demande. Le modèle dynamique avec niveau de service a donc été créé. L'objectif de ce modèle est de maximiser le niveau de service en réduisant le nombre d'usagers qui n'ont pas été servis. La structure du modèle dynamique avec niveau de service est semblable à la structure du modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite.

3.3.3.1 Paramètres

Le modèle dynamique avec niveau de service inclut tous les paramètres permettant de décrire l'horizon des périodes et le calendrier, mais n'inclut pas les paramètres **ObjectifStation(s)** et **BesoinStation(s)**. Les autres paramètres sont tous identiques au modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite. Les paramètres présents dans le modèle dynamique avec niveau de service sont donc décrits dans le tableau suivant. Encore une fois, les paramètres en gras sont ceux qui différent de la structure de base.

Tableau 3.4 Paramètres du modèle dynamique avec niveau de service

	Type	**Nom**	**Description**
Paramètres mis à jour	paramètre	DebutPeriode	début de la période de calcul
	paramètre	FinPeriode	fin de la période de calcul
	paramètre	ChargeCamion(c)	charge actuelle de chacun des camions
	paramètre	NiveauInitial(s)	niveau actuel de chacune des stations
	paramètre	StationDepart(c)	station de départ de chacun des camions
	paramètre	TempsRestantStation(c)	temps restant pour finir les opérations de chacun des camions
	paramètre	TempsDepart(s,c)	temps qu'un camion c prendra pour se rendre à une station s
	paramètre	TempsPremiereStation(s,c)	moment auquel un camion c sera rendu à une station s
Horizon et calendrier	**horizon**	**Périodes h**	**toutes les périodes présentes dans l'horizon**
	paramètre	**NbPeriodes**	**nombre de périodes**
	paramètre	**NbMin**	**nombre de minutes incluses dans chaque période**
	paramètre	**Demande(h,s)**	**nombre de vélos loués ou ramenés par les usagers à la période h pour chaque station**
	paramètre	**BesoinStations(h,s)**	**besoin en redistribution pour chaque station à chaque période**
	ensemble	**LienPeriodeCal**	**lien entre les périodes et le calendrier**
	paramètre	**DebutIntervalle**	**début de l'intervalle de planification**
	paramètre	**NbMinutesDansPeriode**	**nombre de minutes dans chaque période**
	ensemble	**TempsInactif**	**ensemble des temps inactifs qui sont dans le calendrier, mais ne doivent pas être inclus dans l'horizon de prévision**

3.3.3.2 Variables

La structure générale des variables d'activités et de ressources est la même que pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite et le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite.

Outre ces variables, la modélisation de l'évolution du niveau de vélos aux différentes stations implique la création de plusieurs variables. Les variables **DebutPositive(h,s,c)** et **DebutNegative(h,s,c)** du modèle précédent sont remplacées par les variables **FinPostive(h,s,c)** et **FinNegative(h,s,c)** sont des variables binaires qui indiquent si les activités visites positives ou les visites négatives se terminent à la période h. Le modèle inclut aussi l'ajout de la variable **Manque(h,s)** et la variable **Surplus(h,s)** qui indiquent respectivement les vélos qui ne pourront pas être loués à cause d'une station vide à chaque période par station et les vélos qui ne pourront pas être ramenés à cause d'une station pleine à chaque période par station. Ces variables peuvent prendre n'importe quelle valeur entière.

Par la suite, la variable **NiveauStations(h,s)** qui indique le niveau de la station s à la fin de la période h est définie en fonction des autres variables présentées précédemment de la façon suivante :

```
Variable NiveauStations(h,s) (
Range : {0..CapaciteStation(s)}
Definition : if h='p-01' then
NiveauInitial(s)+demande(h,s)+sum(c,FinPositive(h,s,c)*MouvementPositif(s,c)-
FinNegative(h,s,c)*MouvementNegatif(s,c))+manque(h,s)-surplus(h,s)
else
niveaustations(h-
1,s)+demande(h,s)+sum(c,FinPositive(h,s,c)*MouvementPositif(s,c)-
FinNegative(h,s,c)*MouvementNegatif(s,c))+manque(h,s)-surplus(h,s)
endif
)
```

3.3.3.3 Contraintes

Le modèle dynamique avec niveau de service inclut les mêmes contraintes que le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite ainsi que celles du modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite.

À ces contraintes, s'ajoutent les contraintes permettant de définir la valeur des variables **Manque(h,s)** et **Surplus(h,s)** en fonction de la capacité maximale et minimale des stations de la façon suivante. La première contrainte permet de définir la variable manque pour toutes les

périodes sauf la première. La contrainte 2 permet de définir la variable manque pour la première période. Les contraintes 3 et 4 permettent de définir la variable surplus.

$$[1]\left(NiveauStation(h-1,s)+demande(h,s)+\sum_{c}FinPositive(h,s,c)\times MouvementPositif(s,c)-FinNegative(h,s,c)\times MouvementNegatif(s,c)\right)\geq 0-manque(h,s)$$

$$\forall h\in periodes\setminus\{p-01\},\forall s\in stations$$

$$[2]\left(NiveauInitial(s)+demande(h,s)+\sum_{c}FinPositive(h,s,c)\times MouvementPositif(s,c)-FinNegative(h,s,c)\times MouvementNegatif(s,c)\right)\geq 0-manque(h,s)$$

$$\forall h\in periodes|\ h=p-01,\forall s\in stations$$

$$[3]\left(NiveauStation(h-1,s)+demande(h,s)+\sum_{c}FinPositive(h,s,c)\times MouvementPositif(s,c)-FinNegative(h,s,c)\times MouvementNegatif(s,c)\right)\leq CapacitéStation(s)+Surplus(h,s)$$

$$\forall h\in periodes\setminus\{p-01\},\forall s\in stations$$

$$[4]\left(NiveauInitial(s) + demande(h,s) + \sum_{c} FinPositive(h,s,c) \times MouvementPositif(s,c) - FinNegative(h,s,c) \times MouvementNegatif(s,c)\right) \leq CapacitéStation(s) + Surplus(h,s)$$

$$\forall h \in periodes |\ h = p - 01, \forall s \in stations$$

En plus des contraintes permettant de définir la valeur des variables **Surplus(h,s)** et **Manque(h,s)**, les contraintes 5 à 8 ont dû être ajoutées pour s'assurer que ces variables n'étaient pas utilisées par le modèle pour créer ou supprimer des vélos fictifs. Ces contraintes sont les suivantes :

$$[5]\left(Capacite\ Stations(s) + 1 - \left(NiveauStation(h-1,s) + demande(h,s) + \sum_{c} FinPositive(h,s,c) \times MouvementPositif(s,c) - FinNegative(h,s,c) \times MouvementNegatif(s,c)\right)\right) \times Surplus(h,s) = 0$$

$$\forall h \in periodes \setminus \{p - 01\}, \forall s \in stations$$

$$[6]\left(Capacite\ Stations(s) + 1 - \left(NiveauInitial(s) + demande(h,s) + \sum_{c} FinPositive(h,s,c) \times MouvementPositif(s,c) - FinNegative(h,s,c) \times MouvementNegatif(s,c)\right)\right) \times Surplus(h,s) = 0$$

$$\forall h \in periodes |\ h = p - 01, \forall s \in stations$$

$$[7] \Bigg(NiveauStation(h-1,s) + 1 + demande(h,s) + \sum_{c} FinPositive(h,s,c) \times MouvementPositif(s,c) - FinNegative(h,s,c) \times MouvementNegatif(s,c) \Bigg) \times manque(h,s) \leq 0$$

$$\forall h \in periodes \setminus \{p - 01\}, \forall s \in stations$$

$$[8] \Bigg(NiveauInitial(s) + 1 + demande(h,s) + \sum_{c} FinPositive(h,s,c) \times MouvementPositif(s,c) - FinNegative(h,s,c) \times MouvementNegatif(s,c) \Bigg) \times manque(h,s) \leq 0$$

$$\forall h \in periodes |\ h = p - 01, \forall s \in stations$$

3.3.3.4 Fonction objectif

La fonction objectif est très simple et consiste à minimiser la valeur des variables **Manque(h,s)** et **Surplus(h,s)** de la façon suivante :

$$min \left(\sum_{h} \sum_{s} Manque(h,s) + Surplus(h,s) \right)$$

3.4 Résumé des modèles présentés

Les caractéristiques des 6 modèles présentés sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3.5 Résumé des modèles présentés

Modèle	**Description**
1. Modèle statique avec objectif précis	Maximisation du nombre de vélos déplacés pour atteindre un niveau d'inventaire précis pour chaque station à la fin de la nuit
2. Modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite	Minimisation de la différence entre la redistribution et l'objectif de redistribution à chaque station
3. Modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite	Minimisation de la différence entre la redistribution et l'intervalle optimal de chaque station
4. Modèle dynamique avec objectif précis	Maximisation du nombre de vélos déplacés pour atteindre un niveau d'inventaire précis à chaque station selon la période de la journée
5. Modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite	Minimisation de la différence entre la redistribution et l'objectif de redistribution en fonction de la période de la journée pour chaque station
6. Modèle dynamique avec niveau de service	Minimisation du nombre d'usagers non servis

CHAPITRE 4 MONTAGE DE L'OUTIL (PROTOTYPE) ET DÉVELOPPEMENT DES APPLICATIONS

Le but de développer tous les modèles présentés dans le chapitre précédent est de permettre aux différents opérateurs de vélopartage d'avoir un outil pour faciliter et optimiser la redistribution des vélos dans le système. Le chapitre 4 présente comment les modèles pourront être utilisés comme outil de redistribution.

Le chapitre 4 présente dans un premier temps le cadre général d'utilisation de l'outil à travers le contexte d'utilisation et l'explication du fonctionnement de la gestion de l'information. Dans un deuxième temps, l'interface utilisateur est présentée autant au niveau de la saisie de l'information qu'au niveau de l'affichage des résultats. Finalement, les avantages de l'outil développé sur AIMMS et les développements possibles pour améliorer l'application sont présentés.

4.1 Cadre général d'utilisation de l'outil

Pour bien saisir le fonctionnement de l'outil, il est important de comprendre dans quel cadre opérationnel il sera utilisé. Tel que mentionné précédemment, un des problèmes opérationnels les plus importants des systèmes de vélopartage se situe au niveau de la redistribution. La présente section présente donc le contexte d'utilisation de l'outil pour l'optimisation de la redistribution ainsi que le fonctionnement de la gestion de l'information dans le système.

4.1.1 Contexte

Le but de l'utilisation de l'outil est d'aider les opérateurs des systèmes de vélopartage dans l'optimisation des opérations quotidiennes de redistribution. L'outil de redistribution sera utilisé de 2 façons différentes tout dépendant s'il s'agit d'une opération de redistribution de nuit ou d'une opération de redistribution de jour.

Dans un contexte de redistribution statique de nuit, l'opérateur devra exécuter le modèle une seule fois au début de la nuit pour obtenir les meilleures routes pour les camions et la quantité de vélos à redistribuer à chaque station.

Dans un contexte de redistribution dynamique de jour, l'opérateur pourra exécuter le modèle à chaque fois qu'un camion aura fini une activité de redistribution. L'optimisation de la redistribution inclura tous les camions et se fera pour une période déterminée par l'opérateur pouvant inclure les deux prochaines heures par exemple. L'outil indiquera à l'opérateur la route que les camions devront prendre pour la période de redistribution choisie ainsi que le nombre de vélos qui devront être retirés ou ajoutés à chaque station. Ce plan de redistribution pourra être utilisé directement dans son entièreté, mais l'outil pourra aussi être exécuté de nouveau à chaque fois qu'un camion aura terminé une activité de redistribution. Le choix de la fréquence d'exécution du modèle revient à l'opérateur du système. Plus le système sera exécuté fréquemment, plus les données seront près de la réalité et plus les résultats obtenus seront efficaces.

4.1.2 Gestion de l'information

L'utilisation de l'outil dans le contexte décrit dans la section précédente implique une importante gestion de l'information.

Tel que présenté dans la structure de base des modèles, il existe principalement deux types de paramètres : les paramètres de base et les paramètres mis à jour. Les paramètres de base sont importés une première fois dans l'outil et sont très peu changés (quelques fois par saison) alors que les paramètres mis à jour sont mis à jour à chaque fois que le modèle est exécuté c'est-à-dire à chaque fois que l'opérateur de système de vélopartage veut générer des routes de redistribution. Les paramètres et leur définition ont été expliqués en détail dans le chapitre 3.

Certains des paramètres de base ou mis à jour sont propres à certains modèles. Ainsi, les paramètres objectif station, demande et minutes par période doivent être importés dans l'outil en fonction du modèle utilisé. Le paramètre objectif station est utilisé pour définir le niveau optimal des stations dans le modèle statique avec objectif précis, le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite, le modèle dynamique avec objectif précis et le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite. Ce dernier est remplacé par un niveau de station maximal et minimal dans le modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite. Le paramètre objectif station n'est pas présent dans le modèle dynamique avec niveau de service. Pour tous les modèles dynamiques, l'ajout d'un paramètre qui permet de connaître la demande à toutes les périodes et d'un paramètre qui permet de définir le nombre de minutes par période est nécessaire.

Le schéma suivant décrit comment l'information sera traitée.

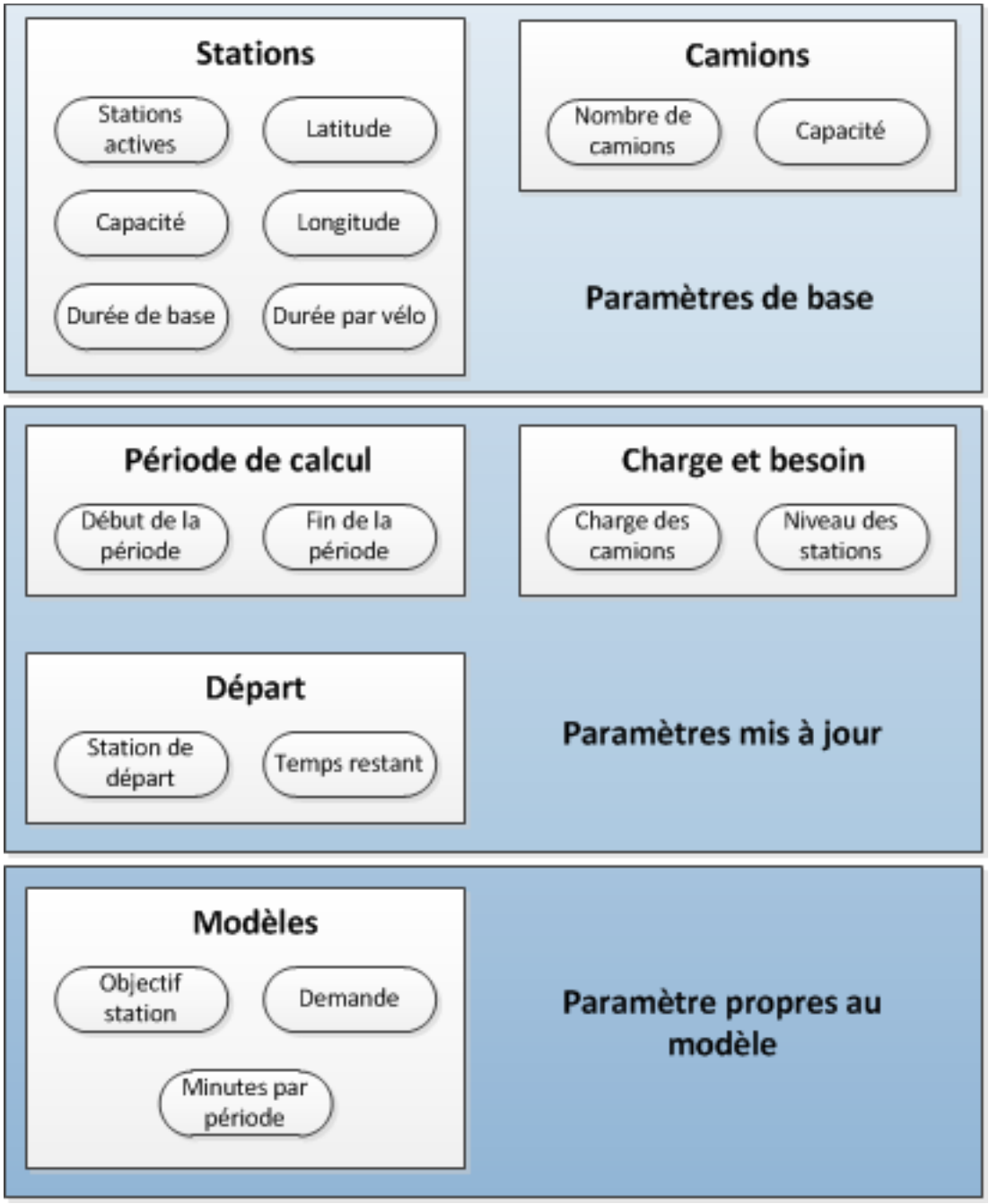

Figure 4.1 Structure de données de l'outil

L'opérateur doit donc fournir toutes ces informations au modèle avant de l'exécuter. Le modèle fournira par la suite à l'opérateur la route empruntée par chacun des camions et la quantité de vélos retirés ou laissés à chacune des stations visitées par chacun des camions.

4.2 Interface utilisateur

Tel que mentionné au chapitre 2, AIMMS permet de créer des pages qui facilitent l'utilisation et la gestion des modèles par l'opérateur de système de vélopartage. La présente section permettra donc de détailler la façon dont l'opérateur du système de vélopartage utilisera l'outil d'optimisation de la redistribution quotidiennement. Pour présenter l'interface utilisateur de l'outil, le présent chapitre met l'accent sur deux modèles qui seront probablement les plus utilisés : le modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite et le modèle dynamique avec niveau de service. Tous les exemples graphiques présentés sont tirés du modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite. Enfin, il est important de garder en tête que les pages présentées dans ce chapitre sont un exemple de ce qui peut être fait et que ces dernières peuvent être modifiées facilement en fonction des besoins des opérateurs de systèmes de vélopartage.

Le modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite a été choisi parce qu'il est plus flexible que le modèle statique avec objectif précis et est identique au modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite lorsque le niveau maximal des stations est le même que le niveau minimal.

Le modèle dynamique avec niveau de service a été choisi parce que c'est celui qui représente le mieux la réalité du problème dynamique de jour.

La page d'accueil de l'utilisateur est la même pour tous les modèles. L'opérateur de système a l'option d'exécuter le modèle, d'aller modifier les paramètres de base, les paramètres mis à jour ou de s'informer sur les résultats. Avant d'exécuter le modèle, il doit aussi sélectionner le temps imparti pour la résolution. De plus, le menu d'accueil lui permet de quitter l'application et d'accéder à la déclaration du modèle dans AIMMS pour aller procéder à des modifications plus précises que ce que lui permet l'interface utilisateur normalement. Cependant, l'interaction entre l'usager et le modèle AIMMS doit être très limitée pour éviter les erreurs graves ou les modifications trop importantes au modèle.

La capture d'écran présenté à la page suivante permet de voir une page d'accueil standard.

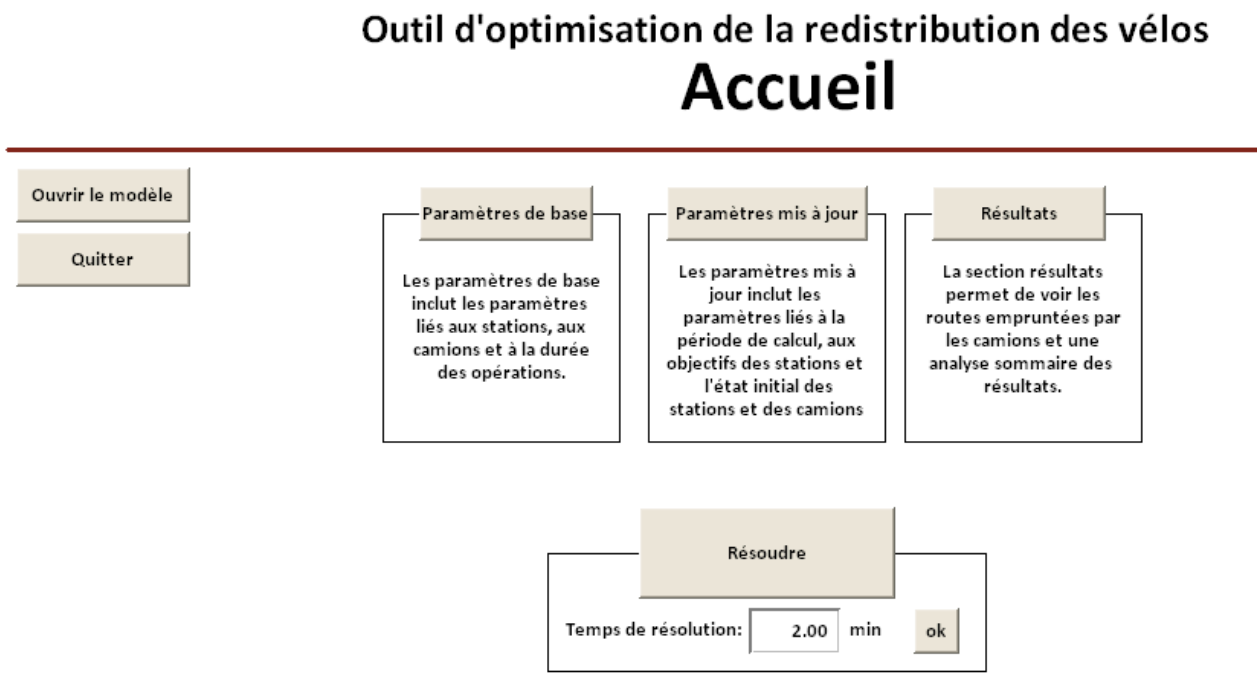

Figure 4.2 Page d'accueil de l'outil

Les boutons du haut permettent d'accéder à d'autres pages. Les pages paramètres de base et paramètres mis à jour sont discutés dans la section 4.2.1 alors que la page résultat est présentée en détail dans la section 4.2.2.

4.2.1 Saisie de données

L'outil développé devait permettre à l'utilisateur de modifier facilement les paramètres. La page présentée permet la saisie et la modification manuelle de données; la section 4.2.1.1 présente la façon dont les données peuvent être importées directement d'une base de données.

La saisie de données est divisée en deux pages selon les deux types de paramètres, une des pages permet la modification des paramètres de base alors que l'autre permet la modification des paramètres mis à jour.

La page des paramètres de base permet à l'utilisateur d'entrer les paramètres de base (les données liées à l'ensemble des stations, les données liées à l'ensemble des camions et les données liées à la durée des opérations de redistribution) et de tester différents scénarios en modifiant ces paramètres de base.

La capture d'écran suivante représente la page que voit l'utilisateur lors de l'utilisation de l'outil d'optimisation de la redistribution des vélos.

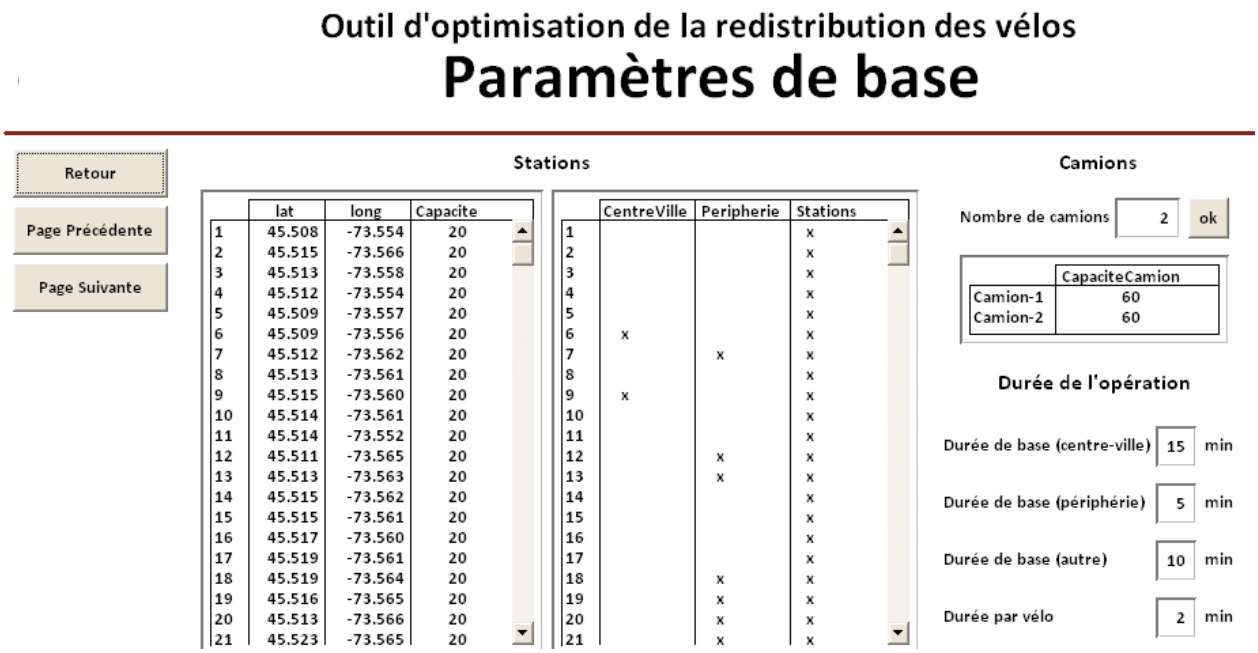

Figure 4.3 Page permettant de modifier les paramètres de base

Les deux tableaux au centre de la page permettent à l'utilisateur de modifier les paramètres liés aux stations. Il peut ainsi modifier la latitude, la longitude ou la capacité d'une station, supprimer une station ou indiquer si une station se trouve en périphérie ou au centre-ville.

Grâce aux informations dans le coin supérieur droit, l'utilisateur peut facilement modifier le nombre et la capacité de chacun des camions. Si l'utilisateur modifie le nombre de camions, le tableau avec les capacités sera automatiquement modifié.

Finalement, les informations dans le coin inférieur droit permettent à l'utilisateur de modifier les paramètres liés à l'opération de redistribution des vélos. Il peut donc modifier la durée de base pour une station au centre-ville, en périphérie ou ailleurs et modifier la durée par vélo.

Même si la modification de ces paramètres de base peut permettre de tester différents scénarios, ces paramètres ne devraient pas être modifiés régulièrement.

La page des paramètres mis à jour présente les paramètres qui doivent être mis à jour à chaque fois où le modèle est exécuté.

La capture d'écran suivante démontre l'interface utilisateur pour la saisie de paramètres mis à jour.

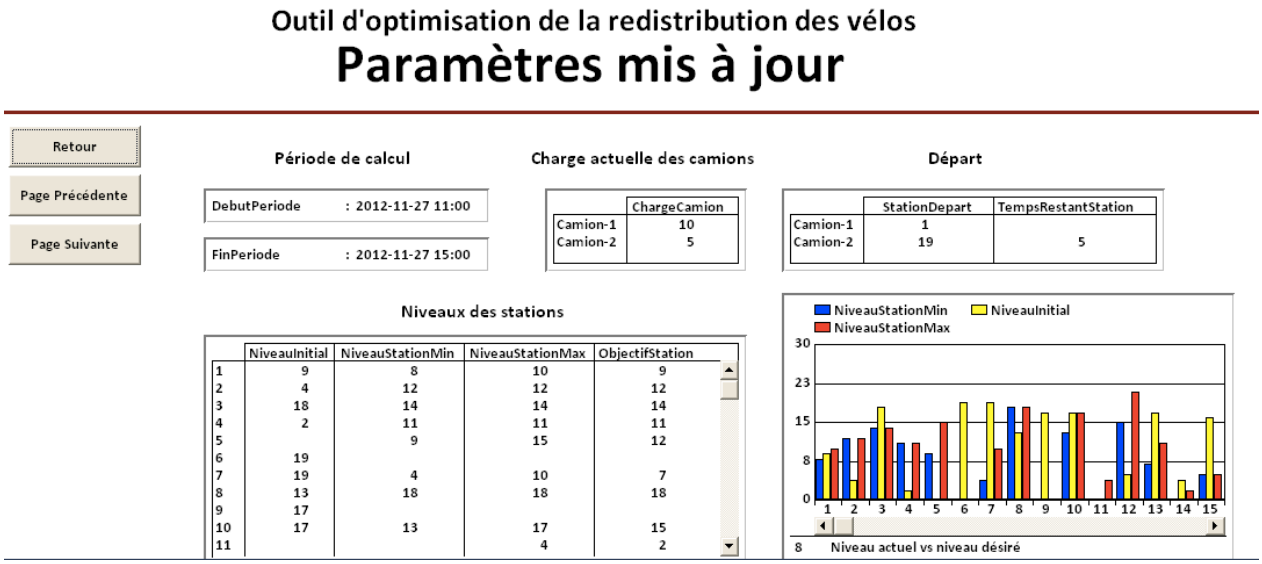

Figure 4.4 Page permettant de modifier les paramètres mis à jour

Dans le coin supérieur gauche, l'utilisateur peut entrer la période de calcul pour laquelle la redistribution des vélos sera optimisée. De plus, le tableau de charge actuelle des camions permet d'indiquer le nombre de vélos se trouvant actuellement dans chaque camion. Le tableau « départ » dans le coin supérieur droit permet d'indiquer la station actuelle où se trouve chaque camion. La deuxième colonne permet d'indiquer le temps restant en minutes pour chaque camion à chaque station. Dans le cas présenté, le camion 1 est déjà prêt à partir alors que le camion 2 doit rester encore 5 minutes à la station où il se trouve actuellement.

Le tableau du niveau des stations au milieu inférieur de la page permet d'indiquer le niveau actuel de chaque station, le niveau minimal, le niveau maximal et le niveau objectif. Le graphique présente la même information, mais sous une forme plus visuelle et permet de mettre en lumière toutes les possibilités d'affichage permises par AIMMS. Ce tableau et ce graphique sont applicables seulement dans le cas d'un modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite. Pour le modèle dynamique avec niveau de service, seulement le niveau initial serait requis, mais il pourrait être tout aussi intéressant de le représenter graphiquement pour comparer les stations entre elles.

Dans le cas des modèles dynamiques comme le modèle dynamique avec niveau de service, cette page présenterait aussi un tableau permettant d'indiquer la demande de vélo pour chaque période à chaque station et une case permettant de modifier la durée d'une période mise par défaut à 5 minutes. Ce qui est intéressant dans le cas d'un modèle dynamique, c'est que les patrons de demande peuvent être modifiés en fonction du type de journée c'est-à-dire si c'est une journée pluvieuse où s'il y a un festival par exemple. Évidemment, plus le modèle de prévision de la demande sera précis, plus les résultats obtenus à travers l'outil d'optimisation de la redistribution seront efficaces. L'outil permet tout de même de tester rapidement l'influence de différents patrons de demande et, étant donné que le niveau actuel des stations est ajusté à chaque optimisation, la précision des routes est accrue et les patrons de demande sont ajustés.

4.2.1.1 Liens avec les bases de données

La saisie de toutes ces données de façon manuelle peut être lourde pour l'utilisateur de l'outil d'optimisation. Le lien entre la base de données et l'outil de redistribution devient donc primordial. En effet, un des avantages d'utiliser AIMMS pour le développement de l'outil est que ce logiciel permet d'aller chercher de l'information directement des bases de données.

Dans le cadre de cette recherche, des liens entre la base de données Access présentée au chapitre 2 et l'outil d'optimisation ont été créés et testés. Ces liens permettent d'aller chercher l'information dans la base de données à travers une procédure simple. Il est aussi possible d'aller chercher l'information dans la base de données à travers une requête SQL. En terme d'interface utilisateur, il suffirait d'ajouter un bouton permettant de mettre à jour les données en fonction de la base de données.

4.2.2 Affichage des résultats

Finalement, suite à la résolution du problème, l'usager peut afficher une page de résultat qui lui permet de voir rapidement l'information dont il a besoin pour donner des indications précises aux chauffeurs de camion et pour analyser les résultats des différents scénarios testés.

La page des résultats indique la valeur de la fonction objectif, le trajet des camions sur une carte et deux tableaux présentent respectivement les activités d'ajouts de vélos et les activités de retraite de vélos. Il est possible de classer ces activités en fonction des différents attributs pour analyser l'information de différentes façons.

La figure suivante est la capture d'écran de la page résultats du modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite.

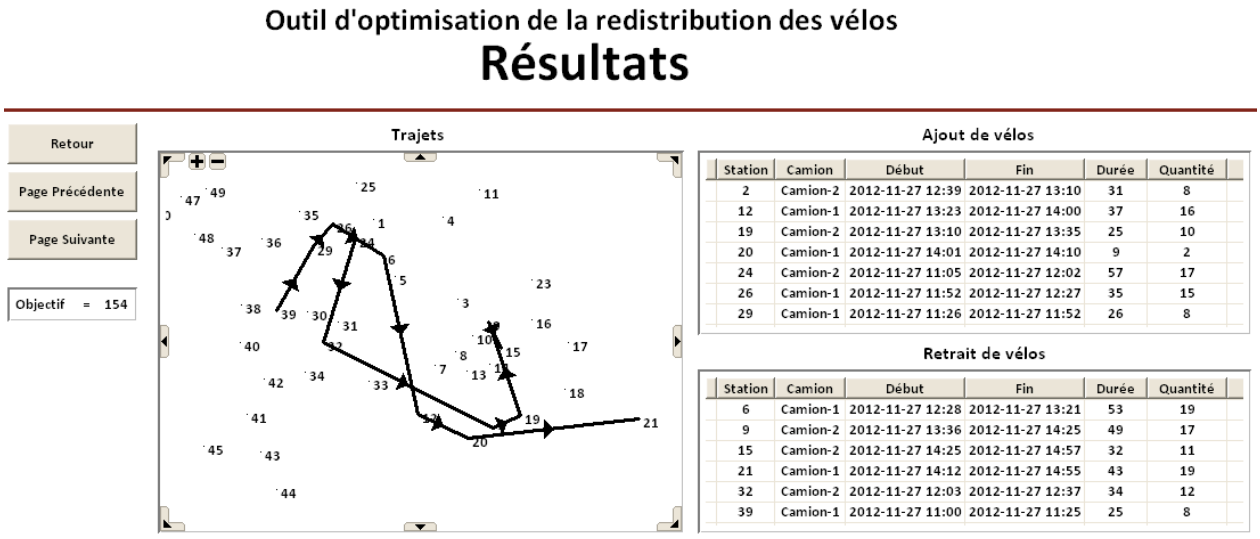

Figure 4.5 Page permettant d'afficher les résultats de l'optimisation

Tel que mentionné précédemment, il est facilement possible de modifier les pages et donc d'ajouter plus d'informations sur la page résultats en fonction des indicateurs de performance sélectionnés par l'opérateur de système de vélopartage. Les résultats pourraient, par exemple, être affichés par camion pour toute la tournée.

4.3 Avantages et développements possibles

La présente section fait un survol des différents avantages de l'outil développé dans le cadre de ce mémoire en plus de présenter les différents développements possibles pour améliorer ou modifier l'outil.

4.3.1 Avantages de l'outil

L'outil présenté dans les sections précédentes comporte plusieurs avantages au niveau opérationnel. Les principaux avantages sont les suivants :

- L'outil développé est simple, flexible et intuitif;

- Il permet une optimisation du trajet des camions, même si la solution n'est pas nécessairement optimale, elle est un bon point de départ pour l'optimisation de la redistribution;
- L'outil facilite la modification des paramètres et permet de tester rapidement différents scénarios;
- Dans le cas dynamique en particulier, l'outil permet de réagir rapidement à certains évènements discrets comme un changement de température;
- La représentation visuelle des résultats permet une analyse instantanée de la solution.

4.3.2 Développements possibles

En plus de tous ces avantages, l'outil développé à partir des modèles présentés dans le chapitre 3 est modulaire et facilement modifiable pour être amélioré. Parmi les différents développements possibles, il y notamment :

- Le développement d'un module permettant l'analyse instantanée de scénarios pour pouvoir comparer l'influence de la quantité de camions par exemple;
- L'amélioration de la solution obtenue à travers le modèle grâce à une heuristique;
- L'optimisation automatique des routes à partir des nouvelles données à chaque 10 minutes par exemple;
- L'inclusion du patron de demande et de la prévision de la demande dans le modèle.

CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS

Le chapitre 5 présente les expérimentations qui ont été faites sur les données Bixi et sur les modèles développés. Les résultats de ces expérimentations sont présentés et analysés. Le chapitre est divisé en deux principales sections : l'analyse des données Bixi et des données GPS de la journée du jeudi 16 juin 2011 et les résultats des expérimentations avec les différents modèles.

5.1 Analyse d'une journée du système de vélopartage Bixi en terme de redistribution

L'analyse générale des données Bixi a déjà été présentée dans la revue de littérature. Le but de cette section n'est donc pas de faire une analyse précise des patrons de demande, mais de mettre en lumière les données liées à la redistribution pour la journée du jeudi 16 juin 2011. La division de cette section est basée sur les différentes étapes méthodologiques présentées dans le chapitre 2. Il est d'abord question de l'analyse des locations à toutes les 5 minutes pour chaque station. Puis, la comparaison entre les données de la table transfert et les données calculées est présentée (méthodologie présentée dans la section 2.3.1.2.4). Ensuite, les résultats de l'analyse des données GPS sont présentés (méthodologie présentée dans la section 2.3.1.3). Finalement, les différents indicateurs de performance pour la journée du 16 juin 2011 sont analysés (méthodologie présentée dans la section 2.3.1.2.5).

Les analyses présentées dans cette section ont pour objectif d'aider le développement d'instances pour comparer l'efficacité des différents modèles présentés dans le chapitre 3 et de développer une base de comparaison pour analyser l'efficacité des résultats trouvés à l'aide des modèles.

5.1.1 Analyse des locations aux cinq minutes

L'analyse des locations aux cinq minutes a pour but de permettre de développer des patrons de demande réalistes. Ces patrons seront réutilisés pour développer les instances utilisées pour tester et comparer les différents modèles. La méthodologie utilisée pour calculer ces données est présentée dans le chapitre 2 à la section 2.3.1.2.

À partir des données obtenues sur la balance entre les locations et les retours aux 5 minutes (une balance négative indique qu'il y a eu plus de locations que de retours alors qu'une balance positive indique qu'il y a eu plus de retours que de locations), le nombre de mouvements total en absolu a été calculé. Ce calcul permet de voir les stations qui ont eu le plus d'activité la journée du 16 juin 2011. Les données obtenues sont présentées sur la carte suivante. Les stations les plus foncées sont celles pour lesquelles il y a eu davantage de mouvements. Comme c'était prévisible, il y a eu davantage de mouvements pour les stations situées au centre-ville.

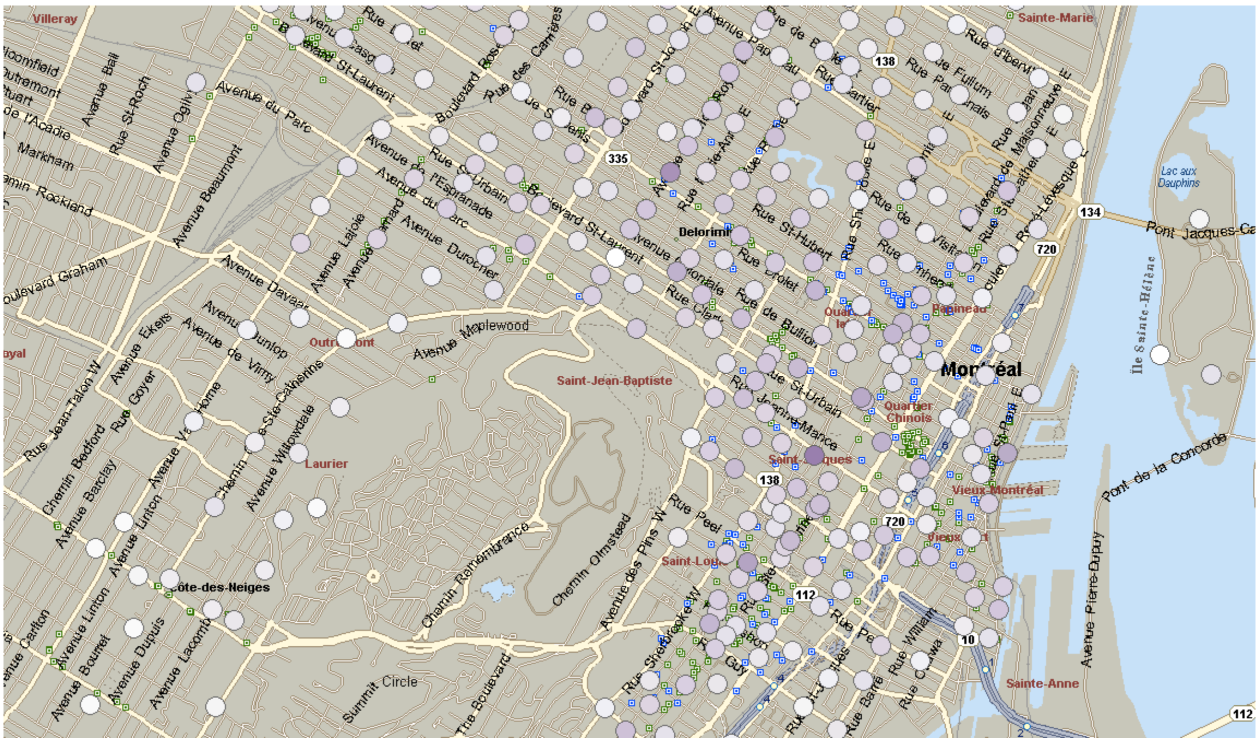

Figure 5.1 Mouvement total par station incluant les locations et les retours

La balance totale de chaque station pour toute la journée du 16 juin 2011 a aussi été calculée. Ce calcul est un bon indicateur de redistribution puisqu'il indique les stations qui sont les plus débalancées au total sur la journée. Évidemment, certaines stations peuvent être balancées sur le total de la journée, mais présenter des besoins de redistribution le soir et le matin. Le calcul présenté est donc seulement un proxy du besoin en redistribution. Les données obtenues sont présentées sur la carte suivante. Les points rouges représentent les stations qui ont une balance positive (plus de retours que de locations) alors que les points bleus représentent les stations qui ont une balance négative (plus de locations que de retours). Les stations plus foncées sont plus débalancées.

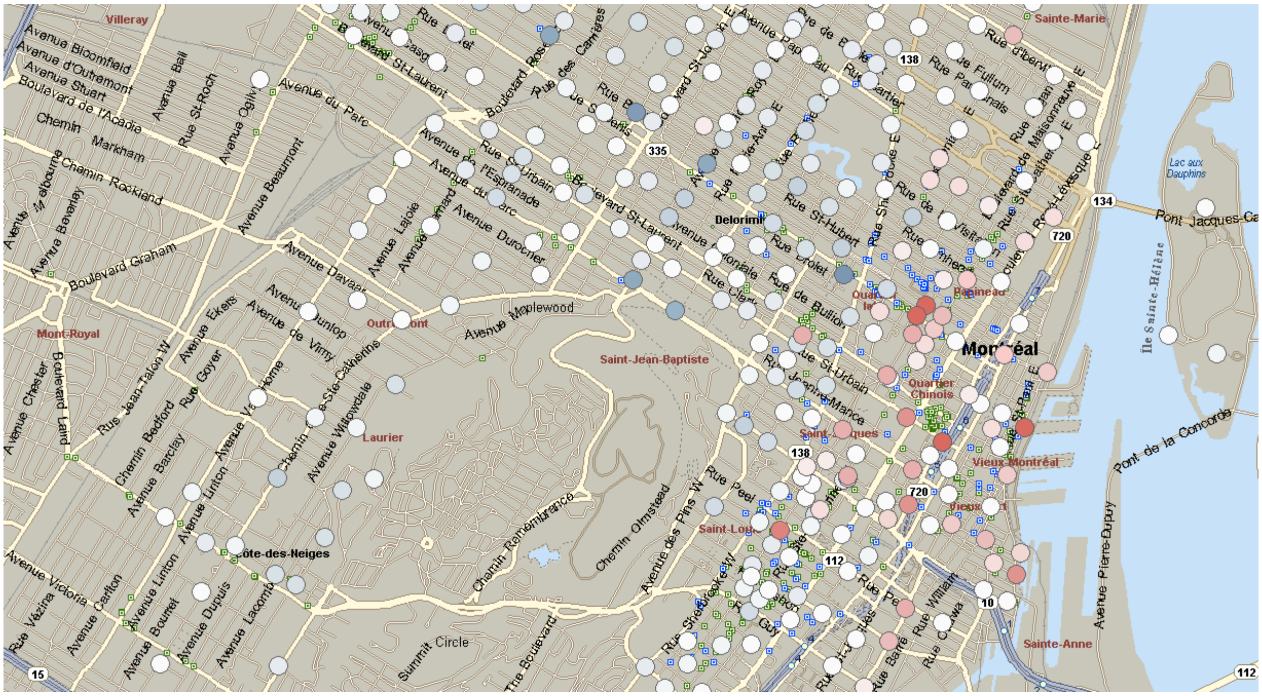

Figure 5.2 Balance totale pour toute la journée par station

L’analyse de ces données a permis de mettre en valeur les 5 stations les plus débalancées qui sont les suivantes :

Tableau 5.1 Stations les plus débalancées

Station	Nom	Mouvement total (absolu)	Balance totale
31	Métro Place-d'Armes	213	97
14	St-Denis / Maisonneuve	259	93
25	de la Commune / Place Jacques-Cartier	294	92
15	Berri / de Maisonneuve	236	92
212	Square Saint-Louis	251	-79

Les stations les plus débalancées seront utilisées dans la création des instances présentées dans la section 5.2.1. Le patron de demande de ces cinq stations les plus débalancées a été analysé brièvement pour mettre en lumière les périodes de la journée présentant le plus de locations et de retours et donc nécessitant le plus de redistribution.

Le graphique suivant présente donc le patron de demande de ces stations pour la journée du 16 juin 2011 à chaque cinq minutes.

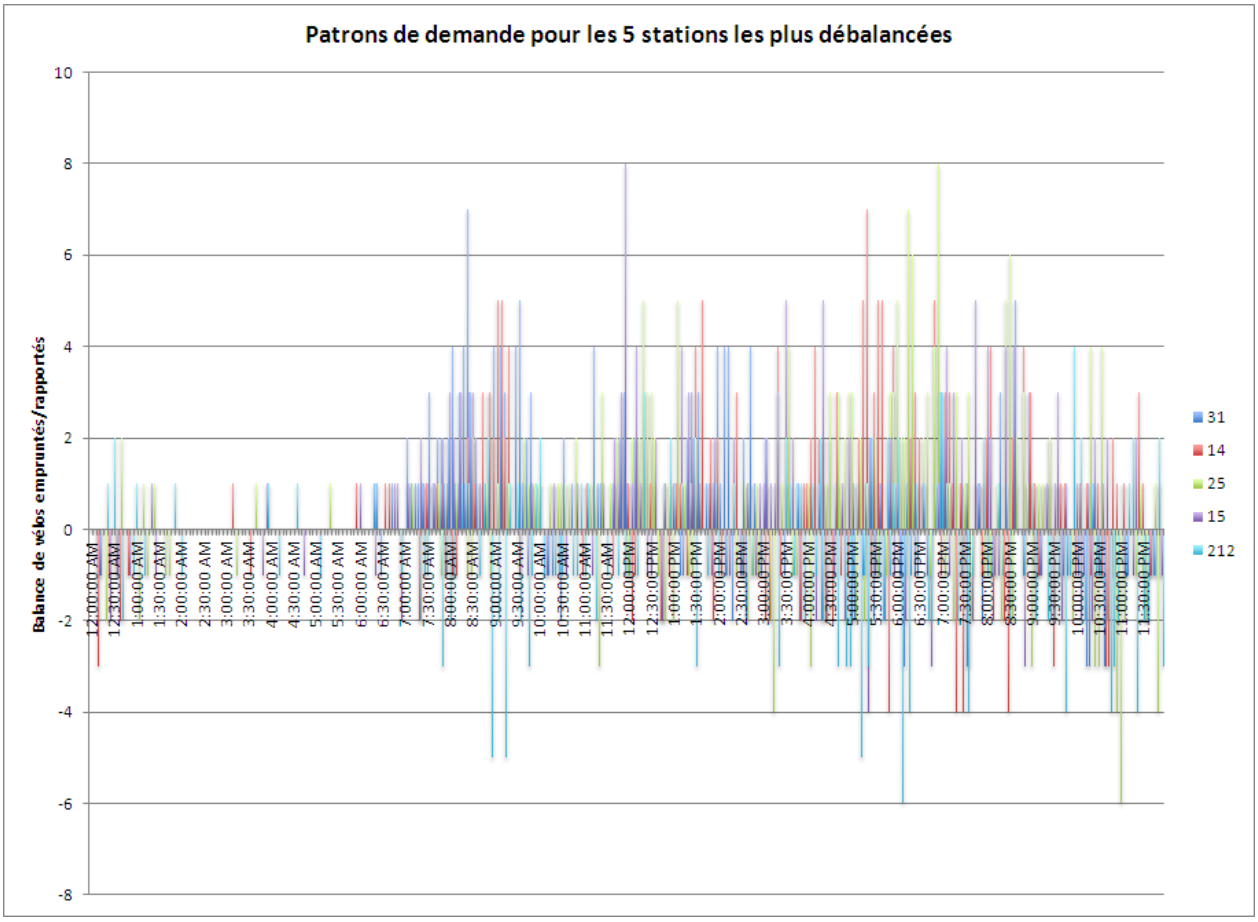

Figure 5.3 Patrons de demande pour les 5 stations les plus débalancées

Ce graphique permet donc de conclure que les plus grands besoins en terme de redistribution sont de 7 h jusqu'à 23 h 30 pour la journée du 16 juin 2011. La période de nuit où le mouvement des usagers peut être négligé est donc de 23 h 30 à 7 h exclusivement.

5.1.2 Comparaison entre les données de la table transfert et les données calculées

La comparaison entre les données de la table transfert et les données calculées a pour but de confirmer si l'utilisation du système d'information du système de vélopartage Bixi enregistre bien toutes les informations de redistribution. Il s'agit de comparer la différence entre l'état des stations à chaque cinq minutes et les locations réelles à chaque cinq minutes avec les données de la table transfert pour voir si elles correspondent. La méthodologie de ce calcul est expliquée à la section 2.3.1.2.4.

Le tableau suivant présente une portion des résultats de cette analyse.

Tableau 5.2 Comparaison entre les résultats calculés et la table transfert

Stations dans la table transfert			Différence entre l'état des stations et les locations																															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	30	31	32	33	34	35
6																																		
249				1								1			1			1				2												
441	82	210														3	1		1	1				1			1			1				3
213	12	77		1					1	1				1															1					
12														16																				
														4												1								
196														1				1																
																1				2														
														1								2												
394																																		
312	35	260															1	1				1												
35														1																				
261																											1						1	
									1																1									
226																											1		1					
291														1				1						1										
291	103																1											1						
223	103																									1	1						2	
20																																		
297	102																										1							
112	3																																	

Chaque ligne représente une période de cinq minutes dans la journée. La partie de gauche représente les stations pour lesquelles il y a eu des mouvements dans la table transfert. L'hypothèse est que la table transfert enregistre toutes les opérations de redistribution. La partie de gauche indique pour chaque station (colonnes) la différence entre l'état de la station et les locations. Le nombre calculé indique donc la quantité de vélos qui aurait théoriquement été bougés par un camion de redistribution. Les mouvements inférieurs ou égaux à 2 peuvent être négligés.

Si la table transfert était bien utilisée, les stations dans la partie de droite devraient présenter un mouvement important lorsqu'elles sont présentes dans la partie de gauche. Cependant, ce n'est jamais le cas (cercles rouges) sauf pour la station 12 (cercle vert) à la cinquième ligne.

Il faudrait donc faire une étude plus poussée de l'utilisation de la table transfert et de la structure de la base de données pour comprendre les disparités. Les données de la table transfert ne sont donc pas toutes exactes. Il faut donc faire très attention lors de l'utilisation et de l'analyse de ces données.

5.1.3 Analyse des traces GPS

La méthodologie pour l'analyse des traces GPS est présentée dans le chapitre 2 à la section 2.3.1.3. L'analyse des traces GPS avait pour but de suivre une journée de redistribution et de comparer avec les résultats des différents modèles. Cependant, les données des traces GPS disponibles n'ont pas permis de déduire de façon précise la redistribution ayant eu lieu. Les résultats de l'analyse sont tout de même présentés de façon à mettre en lumière les lacunes dans les données utilisées et les informations qui seraient nécessaires pour faire une analyse complète.

Tout d'abord, les données disponibles étaient la position à chaque minute de deux camions. Cependant, une analyse sommaire des données de la table transfert a permis de conclure que plus de deux camions étaient utilisés pour la redistribution du 16 juin 2011. En effet, il y a souvent plus de deux transferts à deux endroits différents aux cinq minutes ce qui laisse présager qu'il y a plus de 2 camions. Le graphique suivant montre le nombre de transferts aux cinq minutes.

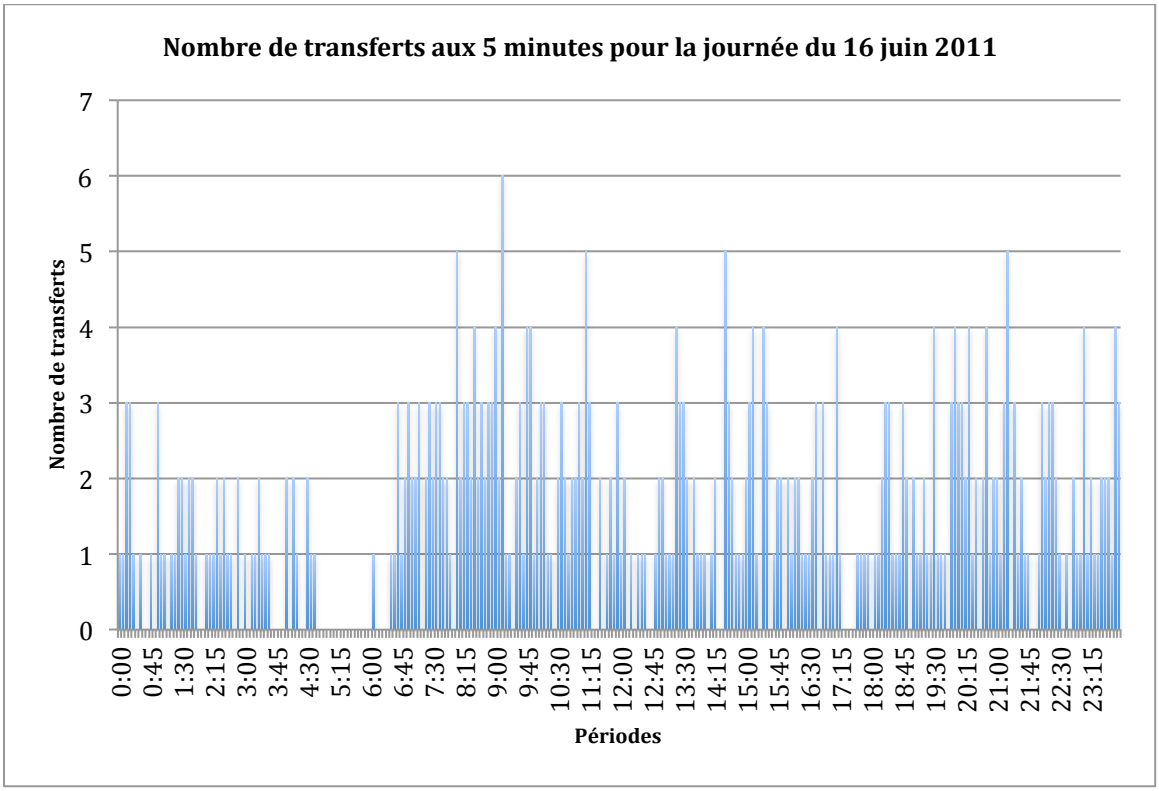

Figure 5.4 Nombre de transferts à chaque période de 5 minutes pour la journée du 16 juin 2011

Tel que mentionné précédemment, le graphique laisse présager qu'il y a plus de deux camions qui font de la redistribution. En effet, il semble y avoir au moins quatre camions. Ainsi, les

données GPS sont incomplètes et permettront difficilement de déduire la redistribution totale ayant eu lieu la journée du 16 juin 2011.

Cependant, les données GPS ont été analysées pour tenter de déduire les routes des deux camions dont les informations étaient disponibles. Les coordonnées GPS des camions ont donc été analysées pour déterminer d'une part les moments où le camion était à l'arrêt et, d'autre part, la station la plus près lors d'un arrêt. Ces données ont été comparées à celle de la table transfert pour déterminer la quantité de vélos redistribués. Une partie des résultats obtenus est présentée dans le tableau ci-après.

Tableau 5.3 Analyse des données GPS (station la plus près)

Période	Camion 1	Station	Camion 2	Station	Stations dans la table transfert		
11-06-16 0:00	0		5	6	6		
11-06-16 0:05	0		1	6	249		
11-06-16 0:10	0		0		441	82	210
11-06-16 0:15	0		0		213	12	77
11-06-16 0:20	0		1	254	12		
11-06-16 0:25	4	276	5	254			
11-06-16 0:30	2	276	5	254	196		
11-06-16 0:35	0		5	254			
11-06-16 0:40	5	276	5	254			
11-06-16 0:45	5	276	4	254	394		
11-06-16 0:50	5	276	0				
11-06-16 0:55	3	276	3	284	312	35	260
11-06-16 1:00	5	276	2	286	35		
11-06-16 1:05	5	276	2	227	261		
11-06-16 1:10	2	276	0				
11-06-16 1:15	0		5	226	226		
11-06-16 1:20	4	276	3	226	291		
11-06-16 1:25	5	276	0		291	103	
11-06-16 1:30	5	276	1	20	223	103	
11-06-16 1:35	5	276	5	20	20		
11-06-16 1:40	5	276	1	20	297	102	
11-06-16 1:45	5	276	3	3	112	3	
11-06-16 1:50	5	276	0		304		
11-06-16 1:55	6	276	0				

Les lignes représentent la division de la journée du 16 juin 2011 en périodes de cinq minutes. La colonne intitulée Camion 1 et la colonne intitulée Camion 2 indiquent respectivement le nombre

de minutes où le camion est à l'arrêt dans la période de cinq minutes pour le camion 1 et pour le camion 2. La troisième colonne présente la station la plus près de la position GPS (latitude et longitude) du camion 1 alors que la quatrième colonne présente la station la plus près de la position GPS (latitude et longitude) du camion 2. La section de gauche (les colonnes 6 à 8) représente les stations pour lesquelles il y a de la redistribution dans la table transfert. Les cases en vert sont celles pour lesquelles il y a une correspondance entre l'arrêt d'un camion et une redistribution présente dans la table transfert. Il est donc possible que plusieurs données soient manquantes et qu'il n'y ait pas toujours de correspondance. Il se peut que les camions soient en arrêt pour une pause, mais il est possible de conclure qu'il y avait définitivement plus de deux camions qui se chargeaient de la redistribution le 16 juin 2011.

L'analyse des données GPS a donc permis de conclure qu'il ne sera pas possible de comparer la réelle redistribution ayant eu lieu le 16 juin 2011 à la redistribution calculée avec les modèles. Les modèles seront donc comparés théoriquement entre eux et des analyses de sensibilité seront faites sur les paramètres pour voir leur influence sur la redistribution. Avant l'implantation de l'outil, il sera donc important de comparer les performances du système de redistribution actuelle à la redistribution proposée par l'outil avec des données plus précises.

5.1.4 Indicateurs de performance

L'analyse des indicateurs de performance a pour but de développer une base de comparaison pour les résultats obtenus à l'aide des modèles. La méthodologie utilisée pour calculer les indicateurs de performance est présentée au chapitre 2 dans la section 2.3.1.2.5. Les indicateurs calculés sont le nombre de périodes sur la journée où une station était vide, le nombre de périodes sur la journée où une station était pleine et le nombre total de périodes sur la journée où une station était en état de non-service (vide ou pleine).

Cependant, il faut faire attention avec l'interprétation de ces données. D'abord une station pleine est généralement moins souhaitable qu'une station vide parce qu'un usager qui se cherche un vélo peut toujours prendre un autre moyen de transport alors qu'un usager qui doit remettre son vélo ne peut pas faire disparaître son vélo. En outre, une station vide au centre-ville le matin peut être souhaitable et il en est de même que pour une station pleine au centre-ville en fin d'après-midi. Le nombre de périodes où une station était vide ou pleine demeure un bon proxy de

l'efficacité du système de redistribution, mais il faut faire attention à quelle période et à quelle station cela correspond.

La première carte présente le nombre de périodes de cinq minutes pendant la journée du 16 juin 2011 où chaque station était vide. Plus les stations sont foncées, plus le nombre de périodes est important.

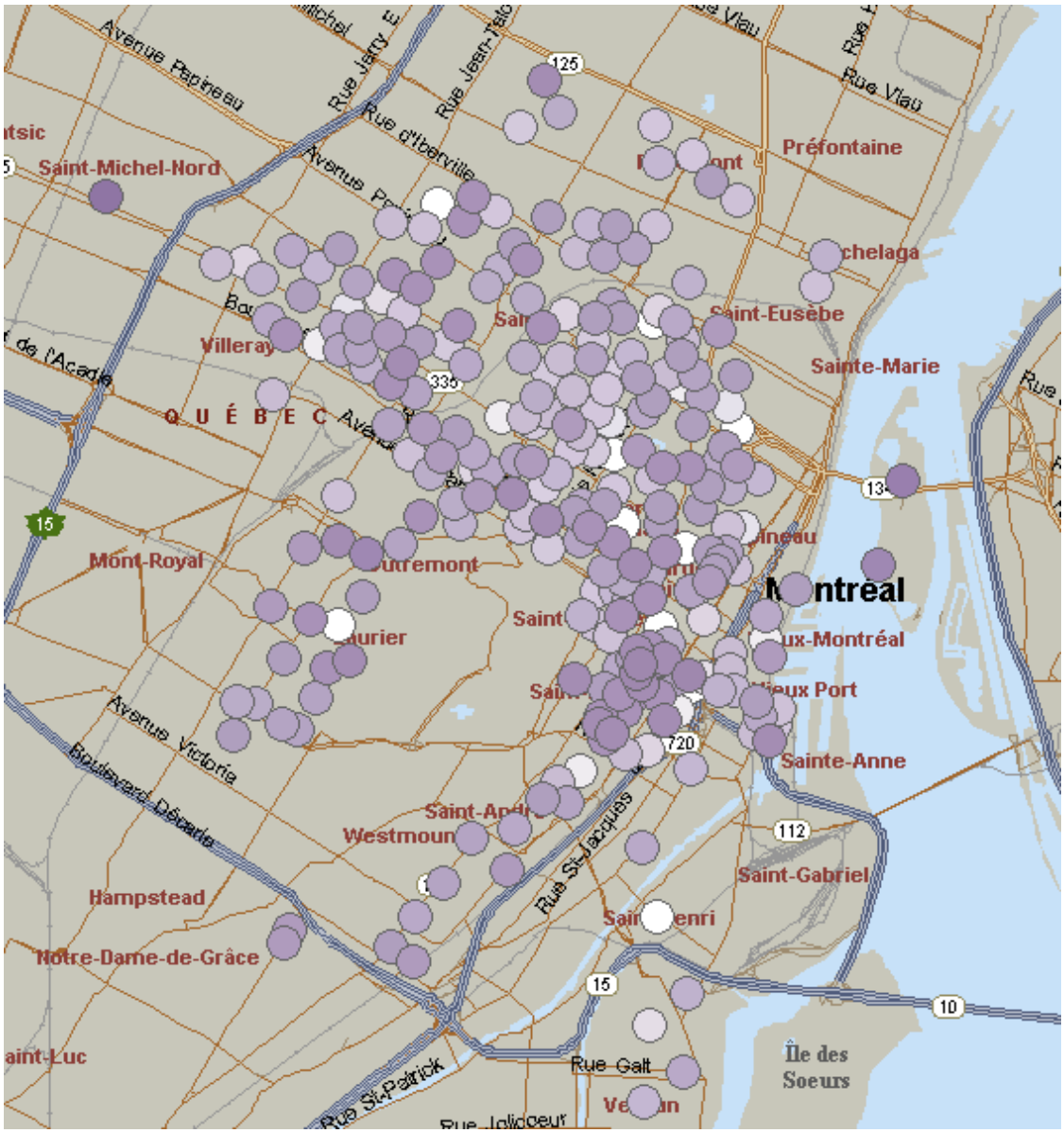

Figure 5.5 Nombre de périodes de 5 minutes où une station était vide le 16 juin 2011

La deuxième carte présente le nombre de périodes de cinq minutes pendant la journée du 16 juin 2011 où une chaque station était pleine. Encore une fois, plus les stations sont foncées, plus le nombre de périodes est important.

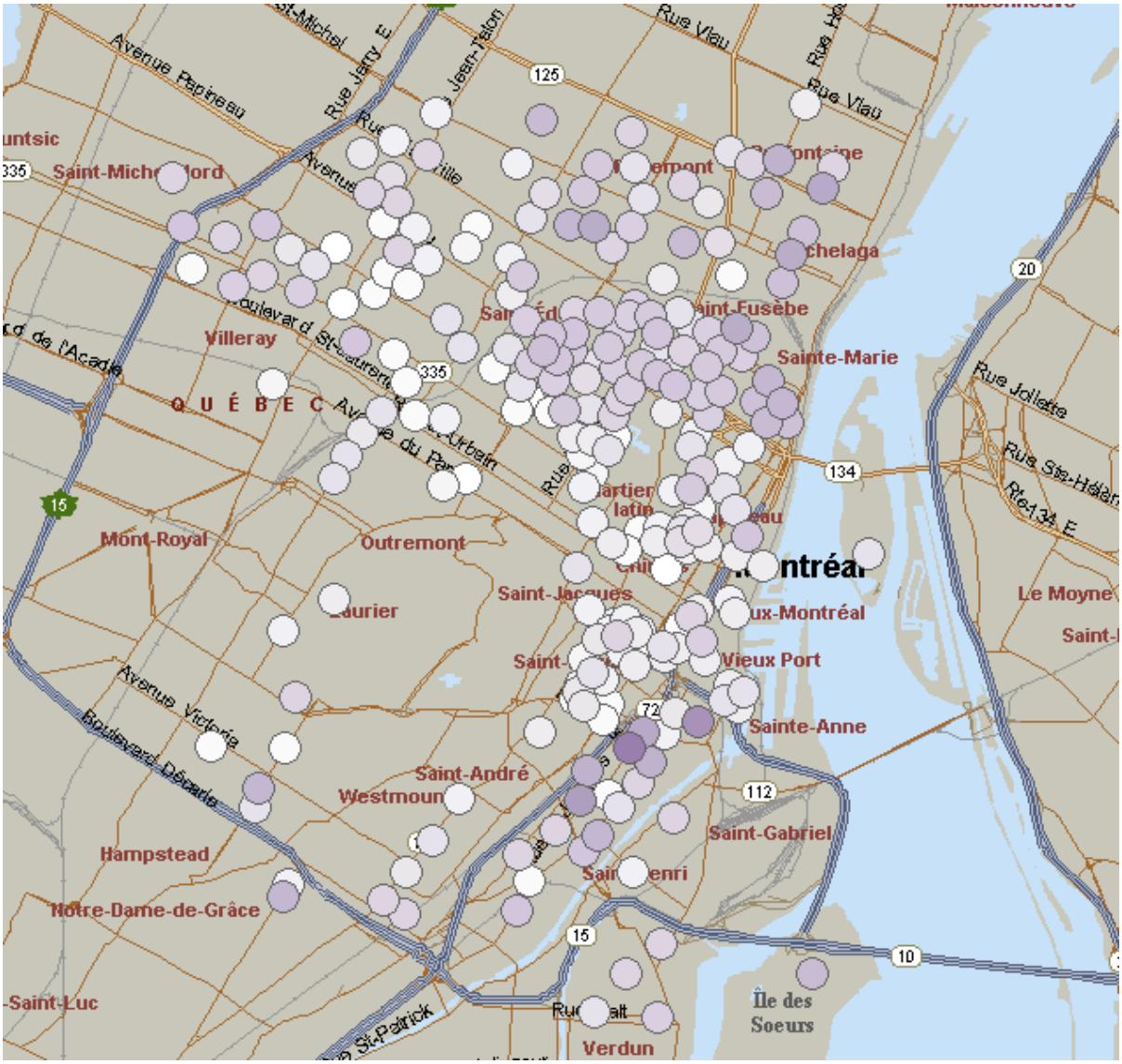

Figure 5.6 Nombre de périodes de 5 minutes où une station était pleine le 16 juin 2011

De ces deux premières cartes, il est difficile de déterminer un patron clair. Les données seront plutôt utilisées pour comparer les performances obtenues à l'aide des modèles théoriques avec les données du 16 juin 2011 aux performances réellement obtenues la journée du 16 juin 2011 avec les techniques de redistribution actuelle basée sur l'expérience des opérateurs.

Finalement, la troisième et dernière carte présente le nombre de périodes de cinq minutes pendant la journée du 16 juin 2011 où chaque station était en non-service c'est-à-dire où chaque station était soit vide ou pleine.

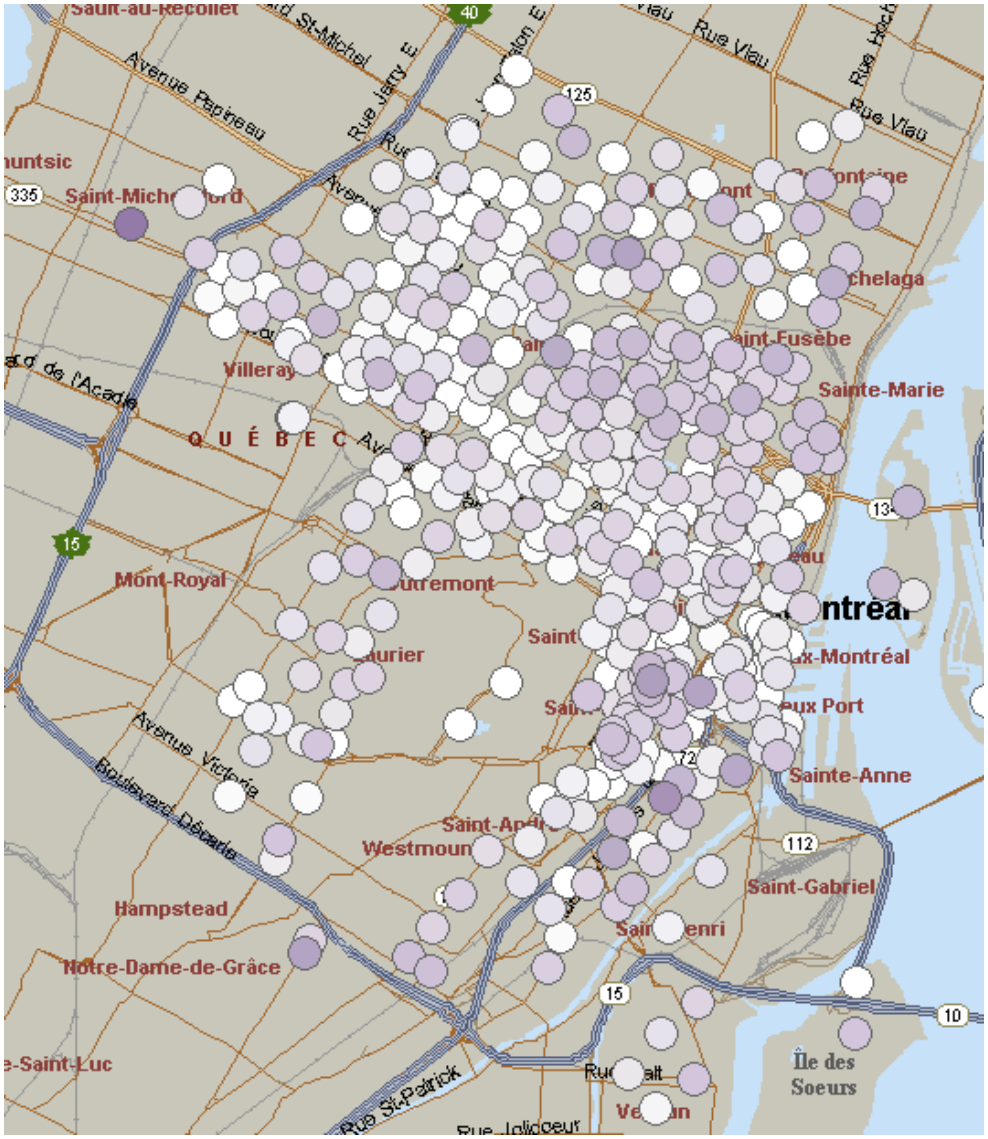

Figure 5.7 Nombre de périodes de 5 minutes où une station était en non-service le 16 juin 2011

Tel que mentionné précédemment, l'analyse de ces cartes a tout de même permis de dégager certaines statistiques qui seront utilisées pour comparer la redistribution calculée avec les modèles à la redistribution ayant réellement eu lieu le 16 juin 2011. D'abord les stations étaient pleines en moyenne 58,1 périodes de 5 minutes sur un total de 288 périodes dans la journée c'est-à-dire que les stations étaient pleines 20,17% du temps en moyenne. De plus, les stations étaient vides en moyenne 43,8 périodes de 5 minutes sur un total de 288. Les stations étaient donc vides

15,23% du temps en moyenne. Finalement, les stations étaient en moyenne dans un étant de non-service 58,6 périodes sur 288 ce qui veut dire qu'une station était dans un état de non-service en moyenne 20,34% du temps.

5.2 Expérimentations avec les différents modèles et analyse des résultats

Dans cette section, les expérimentations faites avec les différents modèles ainsi que l'analyse des résultats obtenus seront présentées. Dans un premier temps, les instances utilisées pour évaluer les modèles seront décrites. Puis, une analyse comparative entre les différents modèles sera présentée. Finalement, une analyse de sensibilité sur quelques paramètres comme le nombre de camions et leur capacité, la durée de base et la durée par vélo ainsi que le temps de résolution est présentée.

5.2.1 Description des instances

Les instances utilisées pour tester les modèles ont été développées pour tester l'efficacité du modèle en fonction de la taille du problème. Considérant le ratio de 1 camion pour 80 stations de la journée du 16 juin 2011, les modèles statiques et dynamiques seront testés sur les instances suivantes :

- 15 stations, 1 camion (15s1c);
- 25 stations, 1 camion (25s1c);
- 50 stations, 1 camion (50s1c);
- 100 stations, 2 camions (100s1c);
- 400 stations, 5 camions (400s5c).

L'influence des autres paramètres est présentée dans la section 5.2.3. Dans l'instance de base, les stations ont toutes la même durée de base de 10 minutes pour l'opération de redistribution. Ainsi, aucune station ne sera considérée en périphérie ou au centre-ville. La durée par vélo sera fixée à 30 secondes. Les camions auront tous une capacité de 50 vélos et une charge actuelle de 25 vélos. Le camion 1 partira de la station 1, le camion 2 de la station 2, etc. Finalement le temps restant à chacune des stations sera considéré nul.

La période de calcul pour les modèles statiques sera de 23 h 30 le 16 juin 2011 à 6h59 le 17 juin 2011. La période de calcul pour les modèles dynamiques sera de 15h01 le 16 juin 2011 à 17h00 le 16 juin 2011.

Les données seront calculées pour un temps de résolution de deux minutes pour pouvoir comparer la performance des différents modèles.

Les stations choisies pour les instances sont celles qui représentaient en absolu le plus grand débalancement à la fin de la journée (voir section 5.1.1). Les données de latitude, de longitude et de capacité sont les données réelles des stations. Le niveau initial des stations est le niveau qu'elles avaient réellement au début de l'intervalle de calcul le 16 juin 2011 et le niveau objectif est le niveau qu'elles avaient réellement à la fin de l'intervalle de calcul le 16 juin 2011. Finalement, les données en terme de location de vélos sont les données réelles de la journée du 16 juin 2011.

Les résultats de la comparaison de ces différentes instances sur les différents modèles sont présentés dans la section suivante.

5.2.2 Comparaison entre les différents modèles

Les modèles ont été comparés en fonction des instances présentées dans la section précédente. Dans un premier temps, les modèles statiques ont été comparés entre eux. Dans un deuxième temps, ce sont les modèles dynamiques qui ont été comparés entre eux. Les modèles statiques n'ont pas été comparés directement aux modèles dynamiques puisqu'ils ne tentaient pas de résoudre le même problème.

5.2.2.1 Modèles statiques

Dans le cas des modèles statiques, seulement les résultats du modèle statique avec objectif précis et du modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite ont été comparés. Il n'est pas nécessaire de comparer le modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite puisque, lorsque le minimum et le maximum sont égaux, ce modèle est équivalent au modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite. Ainsi, si les données de départ sont les mêmes pour tous les modèles, les résultats du modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite correspondront exactement aux résultats du modèle statique avec objectif précis et

demande insatisfaite. En outre, avec les données disponibles, il n'était pas possible de créer un intervalle objectif correspondant à la réalité.

Les résultats des modèles statiques ont été comparés en fonction des différentes instances présentées dans la section précédente pour un temps de résolution de deux minutes. Une analyse de sensibilité sur le temps de résolution est présentée dans la section suivante.

L'indicateur de performance qui a permis de comparer les modèles entre est la différence entre le niveau des stations et le niveau objectif à la fin de la nuit en fonction de la redistribution prévue par chacun des modèles. Donc, plus la valeur de l'indicateur de performance est basse, plus le modèle est efficace. Un indicateur de performance unitaire c'est-à-dire la division de la différence entre le niveau réel et l'objectif par le nombre de stations a aussi été calculé pour pouvoir comparer les différentes instances entre elles.

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants.

Tableau 5.4 Résultats des différentes instances pour le modèle statique avec objectif précis

Instance	**Indicateur de performance (vélos)**	**Indicateur unitaire (vélos/station)**	**Temps de résolution (s)**
15s1c	0	0	0.02
25s1c	0	0	0.03
50s1c	81	1.62	120
100s2c	177	1.77	120
400s5c	764	1.91	120

Tableau 5.5 Résultats des différentes instances pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite

Instance	**Indicateur de performance (vélos)**	**Indicateur unitaire (vélos/station)**	**Temps de résolution (s)**
15s1c	0	0	0.09
25s1c	0	0	0.36
50s1c	71	1.42	120
100s2c	180	1.8	120
400s5c	1409	3.52	120

Un indicateur de performance de zéro signifie que le modèle a trouvé la solution optimale avant la fin du temps impartie. C'est la raison pour laquelle le temps de résolution est inférieur à 120 secondes.

La comparaison des deux tableaux de résultats permet de conclure que les résultats obtenus avec le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite sont toujours meilleurs que ceux obtenus avec le modèle statique avec objectif précis sauf dans le cas de 100 stations (les résultats sont très près) et de 400 stations. En effet, ces résultats sont présentés sur le graphique suivant en comparant les différents indicateurs de performance unitaires obtenus.

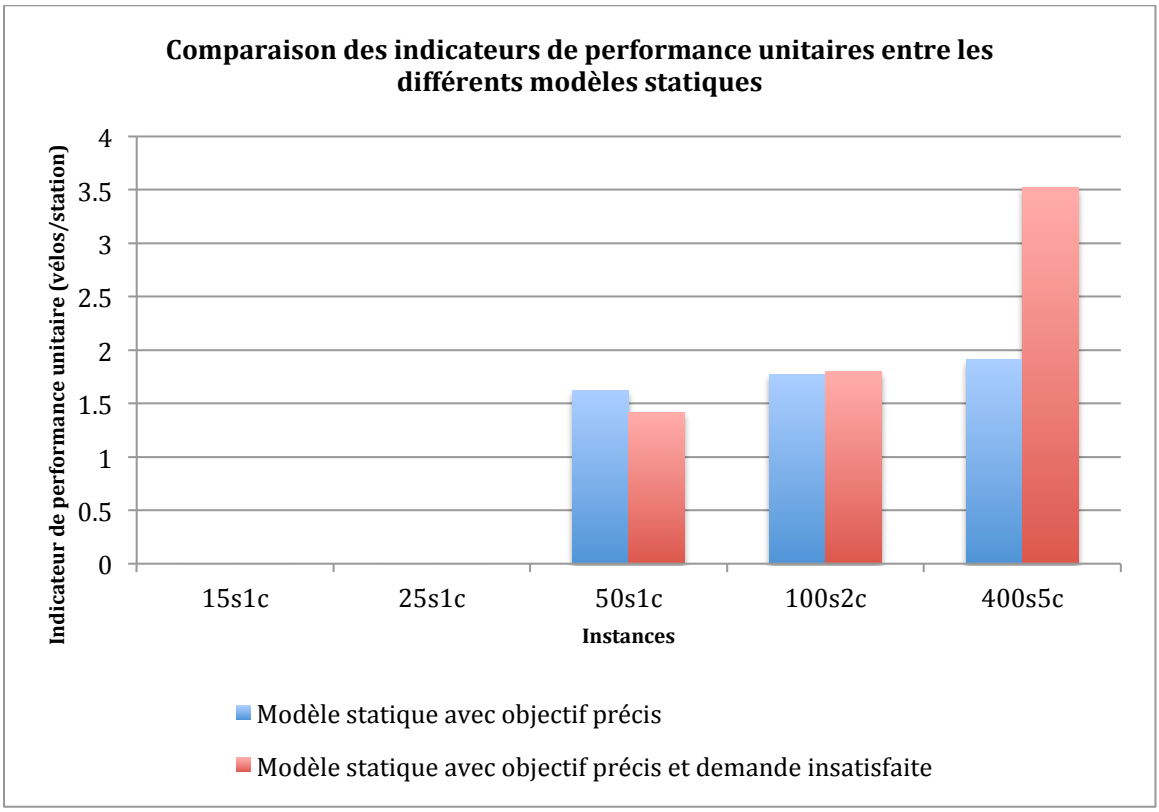

Figure 5.8 Comparaison des indicateurs de performance unitaires entre les différents modèles statiques

Les résultats obtenus pour l'instance de 100 et de 400 stations ont été analysés davantage et, si un temps de résolution de dix minutes est utilisé plutôt qu'un temps de résolution de deux minutes, la solution obtenue avec le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite est nettement supérieure à la solution obtenue avec le modèle statique avec objectif précis. Il est donc possible de conclure que les performances du modèle statique avec objectif précis et

demande insatisfaite sont meilleures que les performances du modèle statique avec objectif précis dans la résolution du problème de redistribution statique de nuit.

De plus, étant donné que des résultats optimaux ont été obtenus pour les instances 15s1c et 25s1c, la deuxième optimisation présentée au chapitre 4 a été utilisées. Les deux mêmes solutions ont été trouvées par les deux modèles.

Les solutions permettent de terminer la redistribution à 3h06 pour l'instance 15s1c et à 5h17 pour l'instance 25s1c. Pour le modèle statique avec objectif précis, cela représente une amélioration de 23 minutes pour l'instance 15s1c et une amélioration de 13 minutes pour l'instance 25s1c. Pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite, cela représente une amélioration de 27 minutes pour l'instance 15s1c et une amélioration de 1h32 pour l'instance 25s1c. La seconde exécution du modèle devient donc très intéressante surtout dans le cas du modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite.

5.2.2.2 Modèles dynamiques

Pour ce qui est des modèles dynamiques, seulement le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite ainsi que le modèle dynamique avec niveau de service ont été comparés. Tel que démontré dans la section précédente, les modèles qui permettent de ne pas satisfaire la demande de redistribution totalement offrent de meilleurs résultats. De plus, le solveur a de la difficulté à traiter le modèle dynamique avec objectif précis tel qu'il a été décrit. Pour toutes ces raisons, la comparaison au niveau des modèles dynamiques s'est faite seulement entre le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite et le modèle dynamique avec niveau de service.

Les résultats des modèles dynamiques ont été comparés en fonction des différentes instances présentées dans la section précédente pour un temps de résolution de deux minutes. Une analyse de sensibilité sur le temps de résolution est présentée dans la section suivante. Cependant, étant donné que les deux modèles n'ont pas le même objectif et que le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite est dépendant de la valeur d'objectif qui lui est assignée, les deux modèles n'ont pas été comparés selon le même indicateur de performance. Les résultats des modèles pour les différentes instances ont donc seulement été comparés en fonction du résultat de la fonction objectif du modèle. Comme pour les modèles statiques, plus la valeur de l'objectif est basse, meilleure est la performance du modèle.

Les résultats du modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5.6 Résultat des différentes instances pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite

Instance	**Indicateur de performance**	**Indicateur unitaire**	**Temps de résolution (s)**
15s1c	3229	215.27	120
25s1c	4999	199.96	120
50s1c	11112	222.24	120
100s2c	36076	360.76	120
400s5c	197795	494.49	120

L'analyse de ces données permet de conclure que généralement, plus le nombre de stations augmente, plus la valeur de la solution se détériore. De plus, le modèle ne trouve pas toujours de solutions en 2 minutes avec l'instance 400s5c, des améliorations au solveur pourrait donc être apportées.

De son côté, le modèle dynamique avec niveau de service arrive à trouver une bonne solution pour l'instance 15s1c, mais le solveur n'arrive pas à trouver une solution réalisable pour les autres instances en moins de 30 minutes. Cependant, la solution pour l'instance 15s1c présente seulement 37 périodes au total où une station était pleine ou vide ce qui représente 10,28% du temps, un pourcentage nettement meilleur qui celui obtenu avec la redistribution actuelle (20,34%). Pour tenter de trouver une solution, ces modèles ont été testés avec plus de camions de redistribution et avec plus de temps de résolution. Malgré ces modifications aux paramètres, le solveur ne trouve toujours pas de solution réalisable. Dans le cas du modèle dynamique avec niveau de service, il faudrait donc, dans une recherche subséquente, améliorer les performances du solveur en se penchant sur son fonctionnement.

Ainsi, il est donc possible de conclure que, même si le modèle dynamique avec niveau de service est le plus intéressant en terme de sa fonction objectif, le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite est celui qui présente les meilleures performances. De plus, une amélioration des performances du solveur serait intéressante à faire dans une recherche subséquente.

5.2.3 Analyse de sensibilité sur certains paramètres

Cette section présente une analyse de sensibilité sur l'influence du nombre de camions et de leur capacité, de la durée de base et de la durée par vélo, de la période de résolution ainsi que sur l'influence du temps de résolution.

L'analyse de sensibilité a été faite sur le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite puisque c'est le modèle qui démontrait les meilleures performances des modèles statiques. L'analyse de sensibilité a aussi été faite sur le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite puisque c'est le modèle qui démontrait les meilleures performances des modèles dynamiques. Les analyses de sensibilité se sont faites à partir de la définition de base de l'instance 100s2c. Les différents paramètres testés ont donc été les seuls à changer par rapport au modèle de base. Les sections suivantes présentes une synthèse des résultats alors que les résultats précis sont présentés à l'annexe B.

Avant de présenter les différentes analyses de sensibilité, il est important de mettre en lumière l'importance des ingrédients aléatoires dans le solveur. En effet, à travers les différents tests effectués, il a été possible de remarquer qu'un même modèle exécuté avec une différente solution initiale donnait un résultat différent. Le comportement aléatoire du solveur ajoute un élément d'erreur dans les analyses de sensibilité qu'il ne faut pas négliger. Cependant, certaines tendances ont tout de même pu être dégagées. Il est donc important de garder ce facteur en tête lors de la lecture des différentes conclusions.

5.2.3.1 Nombre de camions et leur capacité

Le nombre de camions et leur capacité sont des paramètres importants. L'analyse de sensibilité sur le nombre de camions et leur capacité a permis de conclure que, dans le cas statique, l'augmentation du nombre de camions et l'augmentation de leur capacité donnaient sensiblement les mêmes résultats. En terme de capacité ajoutée, il ne vaut pas mieux favoriser une stratégie à l'autre. Au contraire, dans le cas dynamique l'augmentation du nombre de camions détériorait la solution alors que l'augmentation de la capacité améliorait la solution. Le fait que l'augmentation du nombre de camions détériore la solution peut paraître contre-intuitif, mais il faut comprendre que l'ajout de camions implique une augmentation importante du nombre de variables et donc de la complexité du problème. De plus, il est important de noter que, plus le temps de résolution est

important, meilleure devient la solution avec plus de camions. En effet, les solutions avec plus de camions s'améliorent plus rapidement que les solutions avec moins de camions. Il ne faut pas non plus conclure qu'il suffit d'augmenter la capacité des camions pour améliorer les performances du modèle. En effet, il est important de comprendre que l'analyse de sensibilité dépend beaucoup des instances et du cas précis. Les graphiques obtenus suite à l'analyse sont présentés à l'annexe B-1.

5.2.3.2 Durée de base et durée par vélo

La durée de base et la durée par vélo influencent la durée totale de l'opération et donc ont beaucoup d'influence sur le résultat. Une analyse de sensibilité sur ces paramètres permet de voir s'il vaut la peine d'investir du temps dans l'optimisation de la durée des opérations. Les graphiques suivants présentent les résultats obtenus. Encore une fois, les tendances ne sont pas toujours claires. Cependant, il semble important de mettre davantage de temps dans l'optimisation de la durée par vélo plutôt que dans la durée de base d'une opération. En outre, il est possible de voir que ces facteurs ont une importante influence sur la valeur de l'objectif. Ainsi, pour un cas réel, il serait important de s'assurer de la validité du paramètre entré dans le modèle. Les résultats détaillés sont présentés à l'annexe B-2.

5.2.3.3 Période de résolution

Dans le cas de la redistribution dynamique, la période de résolution qui correspond à l'horizon de temps pour lequel le modèle est exécuté est très importante puisqu'une période plus courte permet d'avoir de meilleurs résultats, mais oblige à exécuter le modèle plus souvent. La période de résolution n'est pas importante dans un cas statique puisqu'elle ne dépend pas de l'opérateur, mais du temps imparti pour la redistribution de nuit. Le graphique suivant présente l'influence de la période de résolution sur les résultats.

Les analyses présentées à l'annexe B-3 démontrent que, plus la période de résolution est longue, plus l'indicateur de performance unitaire (l'objectif unitaire) se détériore. Ainsi, il vaut mieux planifier sur des périodes plus courtes. Cependant, il ne faut pas que la période soit trop courte puisque le modèle planifie seulement les opérations qui peuvent avoir entièrement lieu sur la période de résolution. Par exemple, une opération qui nécessite 22 minutes plus 10 minutes de transport ne sera pas considérée sur une période de résolution de 30 minutes. Le modèle mettra

peut-être même moins de vélos dans l'opération pour diminuer le temps d'opération. Cela amène donc le modèle à des solutions sous-optimales.

5.2.3.4 Temps de résolution

L'analyse de sensibilité du temps de résolution permet de voir l'influence de ce paramètre sur les résultats du modèle. Cela a permis de conclure que, généralement, plus le temps de résolution est long, meilleurs sont les résultats. Cependant, tel que présenté précédemment, les résultats d'un modèle dépendent beaucoup de la solution optimale et il est possible d'avoir plusieurs valeurs d'objectif pour les mêmes paramètres et le même temps de résolution. L'amélioration de la procédure utilisée par le solveur est donc essentielle.

Tous les résultats de ces analyses de sensibilité sont propres à l'instance 100s2c présentée précédemment et il n'est pas possible de généraliser les conclusions tirées de ces analyses. Une analyse plus exhaustive des modèles dans un cadre réel pourrait être faite dans le cadre d'une recherche subséquente pour quantifier de façon précise les améliorations apportées par les modèles. Les prochaines étapes et les perspectives de recherche sont présentées dans la conclusion.

CONCLUSION

Ce mémoire a présenté le développement d'un outil pour améliorer et optimiser la redistribution des vélos dans un système de vélopartage à sens unique. En effet, le problème de redistribution statique de nuit et le problème de redistribution dynamique de jour ont été résolus à l'aide de modèles développés en programmation par contraintes à l'aide du logiciel AIMMS. À partir de ces modèles, un outil a été développé pour permettre à l'opérateur de système de vélopartage de facilement planifier les opérations de redistribution.

Les systèmes de vélopartage sont de plus en plus populaires et se multiplient partout sur la planète. La redistribution des vélos est un des problèmes opérationnels les plus importants des systèmes de vélopartage. En effet, les opérations de redistribution sont coûteuses et difficiles à planifier. Jusqu'à ce jour, la majorité des opérateurs de systèmes de vélopartage basent leur planification sur l'expérience acquise du système. Aucune optimisation n'est faite sur les trajets de redistribution.

La revue de littérature qui a fait le survol des travaux sur les trois principaux enjeux liés à la redistribution (le problème de design de système, le problème de redistribution statique de nuit et le problème de redistribution dynamique de jour) a permis de conclure que peu de travaux avaient été faits sur les problèmes d'optimisation de la redistribution dynamique. Le problème de redistribution dynamique est un problème complexe puisqu'il faut tenir compte de différents facteurs, dont la demande des usagers ayant lieu pendant la redistribution.

Deux modèles d'équilibrage du niveau des stations ont été analysés: le modèle basé sur des stratégies de prix et le modèle basé sur une redistribution physique à l'aide de camion. La revue de littérature a permis de conclure qu'une redistribution serait toujours nécessaire dans un système de vélopartage de taille moyenne. L'outil a donc été développé pour résoudre ce problème de redistribution physique dans un contexte dynamique, mais aussi dans un contexte statique.

La revue de littérature a aussi permis de mettre en lumière le fait qu'aucun auteur n'a tenté de résoudre le problème dynamique à l'aide de la programmation par contraintes et qu'un seul article présente une modélisation en programmation par contraintes pour le modèle statique. En

outre, le modèle statique présenté impliquait d'importantes simplifications pour la modélisation du problème.

Les modèles d'optimisation de la redistribution statique et dynamique présentés dans cette recherche sont donc basés sur la programmation par contraintes d'une part parce qu'elle permet la modélisation de la réalité complexe du problème de redistribution et, d'autre part, parce que cette technique de modélisation pour résoudre le problème de redistribution des vélos dans un système de vélopartage n'a pas été abordée jusqu'à ce jour dans la littérature.

Cette recherche contribue donc à résoudre le problème de redistribution statique et dynamique des vélos dans un système de vélopartage en présentant six modèles de redistribution: le modèle de redistribution statique avec objectif précis, le modèle de redistribution statique avec objectif précis et demande insatisfaite, le modèle de redistribution statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite, le modèle de redistribution dynamique avec objectif précis, le modèle de redistribution dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite ainsi que le modèle de redistribution dynamique avec niveau de service. En outre, pour résoudre le véritable problème opérationnel des systèmes de vélopartage, ces modèles ont été intégrés dans un outil permettant à l'opérateur de système de vélopartage de facilement planifier la redistribution et tester différents scénarios. Finalement, suite à l'analyse des résultats, les modèles présentant les meilleures performances sont le modèle statique avec intervalle objectif et demande insatisfaite pour sa versatilité et le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite pour son efficacité.

L'outil développé à l'aide de ces modèles présente plusieurs avantages. D'abord, il est général et peut être appliqué à n'importe quel système de vélopartage. Ensuite, il donne des résultats intéressants et des trajets de redistribution efficaces. Il est aussi facilement applicable dans un cadre opérationnel. Finalement, il répond au problème de redistribution puisqu'il permet d'assurer aux usagers qu'un vélo sera disponible lorsqu'il souhaitera en emprunter un, et cela à un coût minimum pour l'entreprise. Malgré tous ces avantages, l'outil développé comporte certaines limites. Dans un premier temps, sa performance est étroitement liée aux données qui sont importées dans le modèle. Par exemple, le patron de demande doit être le plus fidèle possible à la réalité et le temps d'une opération doit être modélisé correctement. Dans un même ordre d'idée, la performance de certains modèles dépend du niveau objectif qui est entré dans le modèle pour chaque station. Ce dernier doit être choisi de façon renseignée et intelligente. En outre, le

modèle n’a pas été testé dans un cadre opérationnel ni comparé aux données réelles d’un système. Finalement, la programmation par contraintes permet d’avoir une bonne solution, mais pas nécessairement la solution optimale et la solution dépend beaucoup de la solution initiale. La solution obtenue à travers l’outil peut donc toujours être améliorée.

Concernant les perspectives de cet outil, il est possible, dans un premier temps de travailler sur les limites mentionnées dans le paragraphe précédent. En effet, la première étape qui devrait être faite est de tester l’outil en temps réel dans un système de vélopartage et de comparer ses performances aux performances de la redistribution actuelle. Cette comparaison permettra de quantifier de façon précise les améliorations apportées par l’outil développé. De tester l’outil dans un cadre opérationnel réel permettra aussi le développement de nouveaux indicateurs de performance plus pertinents.

De plus, la solution obtenue avec le modèle de programmation par contraintes pourrait et devrait être améliorée à l’aide d’une heuristique. Une prochaine recherche pourrait donc se pencher sur le développement de l’heuristique pour améliorer la première solution trouvée à l’aide de la programmation par contraintes. L’analyse des résultats a aussi permis de conclure que les modèles pourraient grandement bénéficier d’une amélioration du solveur.

Tel que mentionné précédemment, les résultats des différents modèles sont grandement liés aux données importées et aux objectifs pour chaque station. Une prochaine étape serait donc de faire une analyse statistique sur les données historiques pour développer par exemple une bonne modélisation des temps de transport ou de la durée d’une opération ou des patrons de demande modifiables selon certains évènements discrets comme des festivals ou des changements de température. Les modèles développés devraient par la suite être testés sur les données historiques et en temps réel.

Finalement, il pourrait y avoir une amélioration de l’interface utilisateur pour améliorer la facilité d'emploi de l’outil et faire en sorte qu’il puisse facilement s’adapter à n’importe quel système de vélopartage. Une modélisation à l’aide d’un autre outil qu’AIMMS pourrait aussi être intéressante.

En conclusion, l’outil développé est un excellent point de départ pour le développement d’une solution opérationnelle pour répondre aux problèmes de redistribution dans les systèmes de vélopartage à sens unique.

BIBLIOGRAPHIE

Anily, S., & Hassin, R. (1992). The Swapping Problem. *Networks, 22*(4), 419-433. doi: 10.1002/Net.3230220408

Benchimol, M., Benchimol, P., Chappert, B., De La Taille, A., Laroche, F., Meunier, F., & Robinet, L. (2011). Balancing the Stations of a Self Service "Bike Hire" system. *RAIRO-Operations Research, 45*(1), 37-61. doi: 10.1051/Ro/2011102

Benders, J.F. (1962). Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische mathematik, 4*(1), 238-252.

Berbeglia, G., Cordeau, J.-F., Gribkovskaia, I., & Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *Top, 15*(1), 1-31.

Bertazzi, L., Savelsbergh, M., & Speranza, M.G. (2008). Inventory routing. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, 49-72.

BIXI. (2013). Rouler à BIXI. Tiré de https://montreal.bixi.com/rouler-a-bixi/

Bonnette, B. (2007). *The Implementation of a Public-Use Bicycle Program in Philadelphia.* (Mémoire de maîtrise, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA).). Tiré de http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1011&context=senior_seminar

Borgnat, P., Abry, P., Flandrin, P., Robardet, C., Rouquier, J.-B., & Fleury, E. (2011). Shared Bicycles in a City: A Signal Processing and Data Analysis Perspective. *Advances in Complex Systems, 14*(3), 415-438. doi: 10.1142/S0219525911002950

Caggiani, L., & Ottomanelli, M. (2012). A modular soft computing based method for vehicles repositioning in bike-sharing systems. *Proceedings of Ewgt2012 - 15th Meeting of the Euro Working Group on Transportation, 54*, 675-684. doi: 10.1016/J.Sbspro.2012.09.785

Chalasani, P., & Motwani, R. (1999). Approximating capacitated routing and delivery problems. *SIAM Journal on Computing, 28*(6), 2133-2149. doi: 10.1137/S0097539795295468

Chemla, D. (2012). *Algorithms for optimizing shared transport systems.* (Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Paris).)

Chemla, D., Meunier, F., & Calvo, R.W. (2012). *The static Multi Vehicles rebalancing Problem.* Communication présentée à ROADEF 2012, Angers, France. Tiré de http://uma.ensta-paristech.fr/files/diam/docro/roadef_2012/papers/paper_263.pdf

Contardo, C., Morency, C., & Rousseau, L.M. (2012). Balancing a dynamic public bike-sharing system. *Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'entreprise, la Logistique et le Transport*.

Dantzig, G.B., & Wolfe, P. (1960). Decomposition principle for linear programs. *Operations research, 8*(1), 101-111.

DeMaio, P. (2009). Bike-sharing: History, impacts, models of provision, and future. *Journal of Public Transportation, 12*(4), 41-56.

DeMaio, P., & Meddin, R. (31 décembre 2012). 2012 Bike-share Year in Review [Billet de blogue]. Tiré de http://bike-sharing.blogspot.ca/2012/12/2012-bike-share-year-in-review.html

Fricker, C., & Gast, N. (2012). Incentives and regulations in bike-sharing systems with stations of finite capacity. Tiré de http://arxiv.org/abs/1201.1178v2

Fricker, C., & Gast, N. (2012). Incentives and regulations in bike-sharing systems with stations of finite capacity. *arXiv preprint arXiv:1201.1178*.

Froehlich, J., Neumann, J., & Oliver, N. (2009). *Sensing and predicting the pulse of the city through shared bicycling.* Communication présentée à Twenty-First International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-09), Pasadena, CA (p. 1420-1426). Tiré de http://www.nuriaoliver.com/bicing/IJCAI09_Bicing.pdf

García-Palomares, J.C., Gutiérrez, J., & Latorre, M. (2012). Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach. *Applied Geography, 35*(1), 235-246.

Gifford, J., & Campus, A. (2004). Will smart bikes succeed as public transportation in the United States? *Center for Urban Transportation Research, 7*(2), 1.

Hernández-Pérez, H., & Salazar-González, J.-J. (2004a). A branch-and-cut algorithm for a traveling salesman problem with pickup and delivery. *Discrete Applied Mathematics, 145*(1), 126-139.

Hernández-Pérez, H., & Salazar-González, J.-J. (2004b). Heuristics for the one-commodity pickup-and-delivery traveling salesman problem. *Transportation Science, 38*(2), 245-255.

Kaltenbrunner, A., Meza, R., Grivolla, J., Codina, J., & Banchs, R. (2010). Urban cycles and mobility patterns: Exploring and predicting trends in a bicycle-based public transport system. *Pervasive and Mobile Computing, 6*(4), 455-466. doi: 10.1016/J.Pmcj.2010.07.002

Lathia, N., Ahmed, S., & Capra, L. (2012). Measuring the impact of opening the London shared bicycle scheme to casual users. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 22*, 88-102. doi: 10.1016/J.Trc.2011.12.004

Lin, J.-H., & Chou, T.-C. (2012). A Geo-Aware and VRP-Based Public Bicycle Redistribution System. *International Journal of Vehicular Technology, 2012*, 14. doi: 10.1155/2012/963427

Lin, J.-R., & Yang, T.-H. (2011). Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 47*(2), 284-294. doi: 10.1016/J.Tre.2010.09.004

Martinez, L.M., Caetano, L., Eiró, T., & Cruz, F. (2012). An optimisation algorithm to establish the location of stations of a mixed fleet biking system: an application to the city of Lisbon. *Proceedings of Ewgt2012 - 15th Meeting of the Euro Working Group on Transportation, 54*, 513-524. doi: 10.1016/J.Sbspro.2012.09.769

Midgley, P. (2009a). The role of smart bike-sharing systems in urban mobility. *JOURNEYS, 2*, 23-31.

Midgley, P. (2009b). *Shared Smart Bicycle Schemes in European Cities.* Communication présentée à Fourth Regional Environmentally Sustainable Transport (EST) Forum in Asia, Seoul, South Korea. Tiré de http://www.uncrd.or.jp/env/4th-regional-est-forum/Presentations/28_PS4_gTKP.pdf

Morency, C., Trepanier, M., & Godefroy, F. (2010). Insights into Montreal's bikesharing system.

Nair, R., & Miller-Hooks, E. (2011). Fleet Management for Vehicle Sharing Operations. *Transportation Science, 45*(4), 524-540. doi: Doi 10.1287/Trsc.1100.0347

Nielsen, B.H. (1993). *The Bicycle in Denmark: Present Use and Future Potential*. Denmark: Ministry of Transport.

OBIS. (2011). Optimising Bike Sharing in European Cities A Handbook. Tiré de http://www.obisproject.com/palio/html.wmedia?_Instance=obis&_Connector=data&_ID=936&_CheckSum=-804522034

Raviv, T., & Kolka, O. (2012). Dynamic management of stock levels in a bike sharing system.

Raviv, T., & Kolka, O. (2013). Optimal inventory management of a bike-sharing station. *IIE Transactions*, (sous presse).

Raviv, T., Tzur, M., & Forma, I.A. (2012). Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches.

Schuijbroek, J., Hampshire, R., & van Hoeve, W.-J. (2013). Inventory Rebalancing and Vehicle Routing in Bike Sharing Systems.

Shaheen, S.A., Guzman, S., & Zhang, H. (2010). Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia Past, Present, and Future. *Transportation Research Record, 2143*(2143), 159-167. doi: 10.3141/2143-20

Shaheen, S.A., Martin, E.W., Cohen, A.P., & Finson, R.S. (2012). *Public Bikesharing in North America: Early Operator and User Understanding*. (Rapport n^{o} CA-MTI-12-1029). Washington, DC: Mineta Transportation Institute. Tiré de http://transweb.sjsu.edu/PDFs/research/1029-public-bikesharing-understanding-early-operators-users.pdf.

Shu, J., Chou, M., Liu, Q., Teo, C.-P., & Wang, I.-L. (2010). Bicycle-sharing system: deployment, utilization and the value of re-distribution. *National University of Singapore-NUS Business School*. Tiré de http://bschool.nus.edu/Staff/bizteocp/BS2010.pdf

Vogel, P., Greiser, T., & Mattfeld, D.C. (2011). Understanding Bike-Sharing Systems using Data Mining: Exploring Activity Patterns. *Procedia-Social and Behavioral Sciences, 20*, 514-523. doi: 10.1016/J.Sbspro.2011.08.058

Vogel, P., & Mattfeld, D. (2010). *Modeling of repositioning activities in bike-sharing systems.* Communication présentée à World Conference on Transport Research (WCTR), Lisbonne, Portugal. Tiré de http://intranet.imet.gr/portals/0/usefuldocuments/documents/02702.pdf

Vogel, P., & Mattfeld, D. (2011). Strategic and Operational Planning of Bike-Sharing Systems by Data Mining–A Case Study. *Computational Logistics*, 127-141.

Waserhole, A., & Jost, V. (2012). Vehicle Sharing System Pricing Regulation: Transit Optimization of Intractable Queuing Network.

ANNEXE A – AJOUTS À LA MÉTHODOLOGIE

A.1 Macro VBA (Access) du calcul du changement de niveau d'inventaire à chaque station

La macro Access en VBA ayant permis le calcul du changement de niveau d'inventaire à chaque station basé sur le niveau d'inventaire à chaque 5 minutes contenu dans la table état réseau est la suivante.

```
Sub Calcul_Demande()
Dim rec As Recordset
Dim nostat As String
Dim s1 As Integer
Dim s2 As Integer

Set rec = CurrentDb.OpenRecordset("v_extr_etat_reseau")

Do While Not rec.EOF
nostat = rec!sta_id
s2 = rec!et_nb_vel

Do While rec!sta_id = nostat
s1 = rec!et_nb_vel
rec.Edit
rec!et_diff = s1 - s2
rec.Update

s2 = rec!et_nb_vel
rec.MoveNext

Loop

Loop


End Sub
```

A.2 Macro VBA (Access) du calcul de la demande réelle à partir de la table locations

Les deux macros Access en VBA ayant permis le calcul de la demande réelle à chaque 5 minutes à partir de la table locations (une pour les départs de vélos et une pour les arrivées de vélos) sont respectivement les suivantes.

```
Sub Calcul_Demande_Reelle_Departs()
Dim rec1 As Recordset
Dim rec2 As Recordset

Dim demande As Long

Set rec1 = CurrentDb.OpenRecordset("Demande_Depart_Velos")
Set rec2 = CurrentDb.OpenRecordset("Departs_Velos")

rec1.MoveFirst
rec2.MoveFirst

Do While Not rec1.EOF
    demande = 0

    If rec2!sta_id = rec1!stat_id_o Then

        Do While rec1!tr_date_o <= rec2!et_date And rec2!sta_id =
rec1!stat_id_o
            demande = demande + rec1!nb_vel
            rec1.MoveNext

            If rec1.EOF Then Exit Do

        Loop
        rec2.Edit
        rec2!departs = demande
        rec2.Update
        rec2.MoveNext

    Else
        rec2.Edit
        rec2!departs = demande
        rec2.Update
        rec2.MoveNext
    End If

Loop

End Sub
```

```
Sub Calcul_Demande_Reelle_Arrivees()
Dim rec1 As Recordset
Dim rec2 As Recordset

Dim demande As Long

Set rec1 = CurrentDb.OpenRecordset("Demande_Arrivee_Velos")
Set rec2 = CurrentDb.OpenRecordset("Arrivees_Velos")

rec1.MoveFirst
rec2.MoveFirst

Do While Not rec1.EOF

    demande = 0

    If rec2!sta_id = rec1!stat_id_d Then

        Do While rec1!tr_date_d <= rec2!et_date And rec2!sta_id =
rec1!stat_id_d
            demande = demande + rec1!nb_vel
            rec1.MoveNext

            If rec1.EOF Then Exit Do

        Loop

        rec2.Edit
        rec2!arrivees = demande
        rec2.Update
        rec2.MoveNext

    Else

        rec2.Edit
        rec2!arrivees = demande
        rec2.Update
        rec2.MoveNext

    End If

Loop

End Sub
```

A.3 Macro VBA (Excel) de la recherche de la station la plus près

La macro Excel en VBA ayant permis de trouver la station la plus près de chaque postition de chaque camion est la suivante.

```
Sub trouverStationLaPlusProche()

    Dim sht As Worksheet
    Set sht = ThisWorkbook.Sheets("Stations")

    Dim stations(500, 3) As Double
    Dim nds As Integer

    'Lire stations
    Dim n As Integer
    n = 2
    Do While sht.Cells(n, 1) > 0
        stations(n - 1, 1) = sht.Cells(n, 3)
        stations(n - 1, 2) = sht.Cells(n, 2)
        stations(n - 1, 3) = sht.Cells(n, 1)
        n = n + 1
    Loop

    nds = n - 2 'nb de stations
    Dim dist As Double
    Dim distance As Double
    Dim lastat As Integer, ladist As Double
    n = 2
    Set sht = ThisWorkbook.Sheets("16juin2011")
    Do While sht.Cells(n, 1) > 0
        'garder le plus près
        dist = 1e+20
        For t = 1 To nds
            distance = ((sht.Cells(n, 4) - stations(t, 2)) ^ 2 +
(sht.Cells(n, 3) - stations(t, 3)) ^ 2)
            If distance < dist Then
                lastat = t
                ladist = distance
                dist = distance
            End If
        Next t
        sht.Cells(n, 18) = stations(lastat, 1)
        sht.Cells(n, 19) = ladist
        n = n + 1
    Loop

End Sub
```

ANNEXE B – AJOUTS À L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Il est important de noter que, pour toutes les analyses de sensibilité, plus l'indicateur de performance est faible, meilleure est la solution. Un indicateur de 0 est optimal.

B.1 Nombre de camions et leur capacité

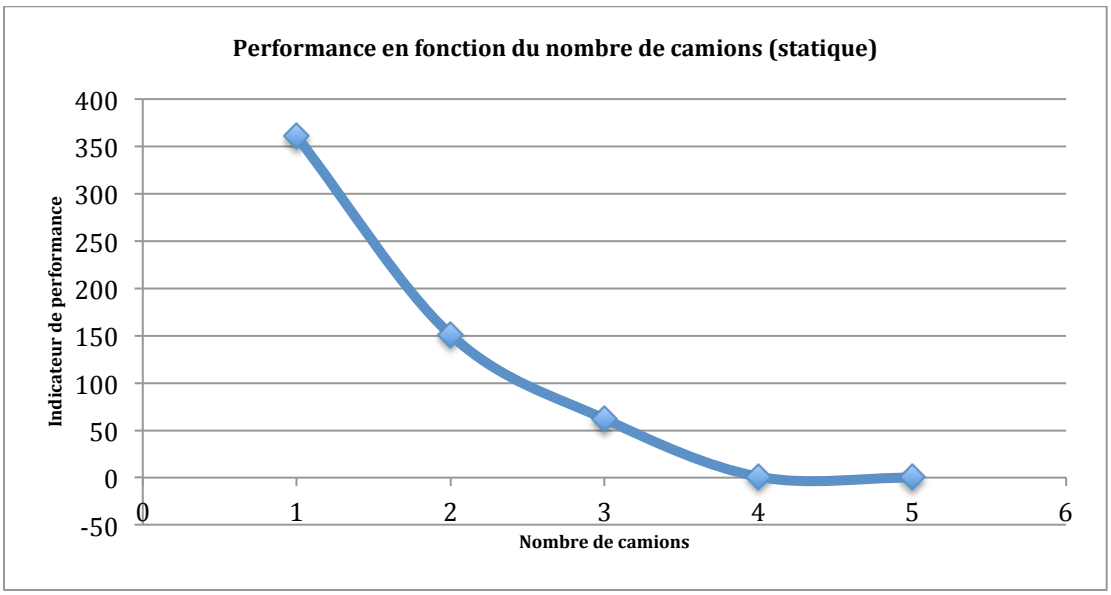

Figure B.1 Performance en fonction du nombre de camions pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite

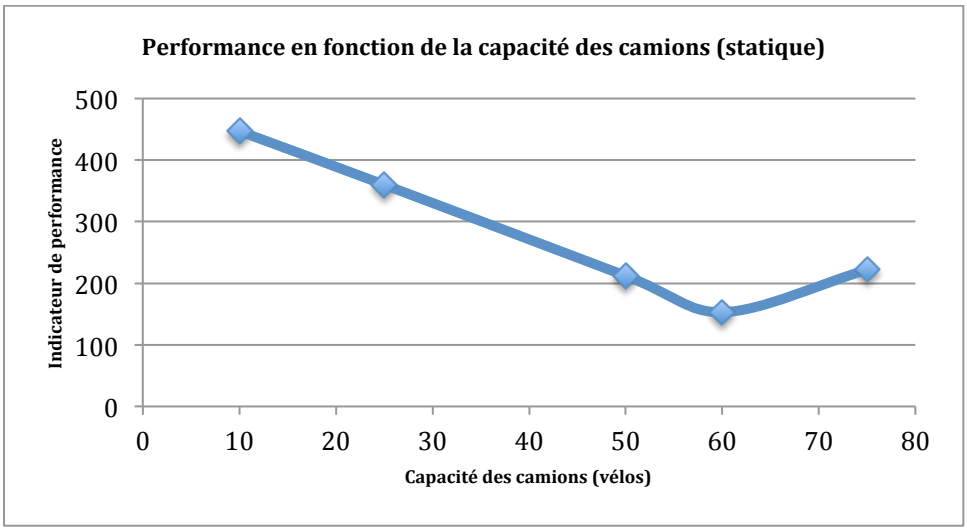

Figure B.2 Performance en fonction de la capacité des camions pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite

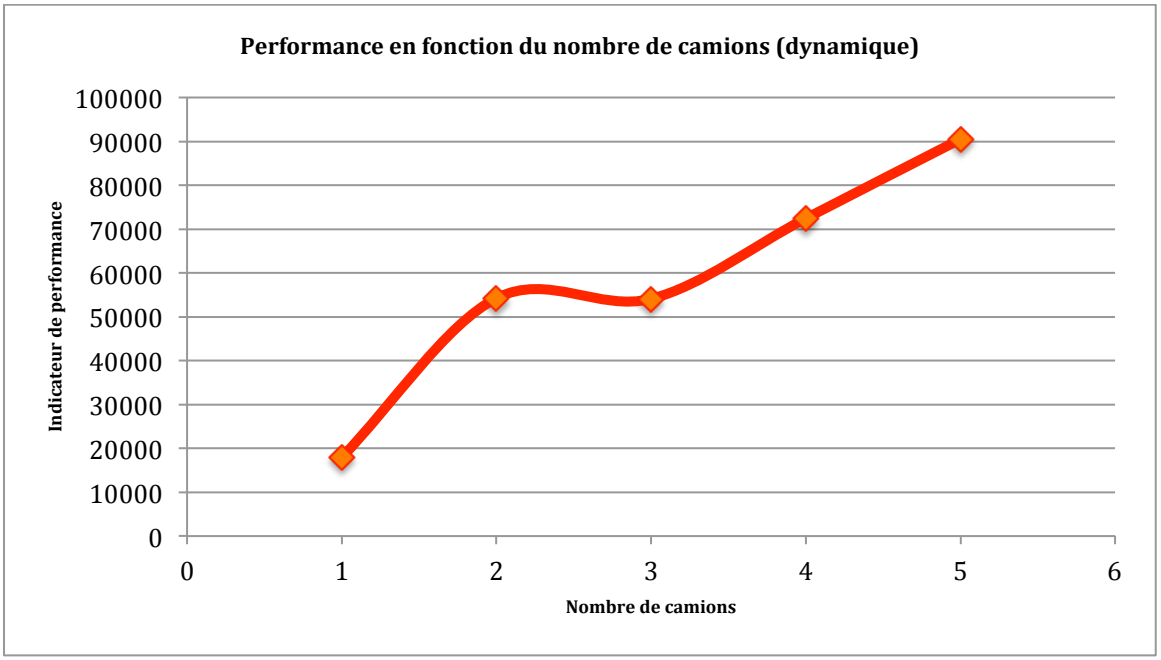

Figure B.3 Performance en fonction du nombre de camions pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite

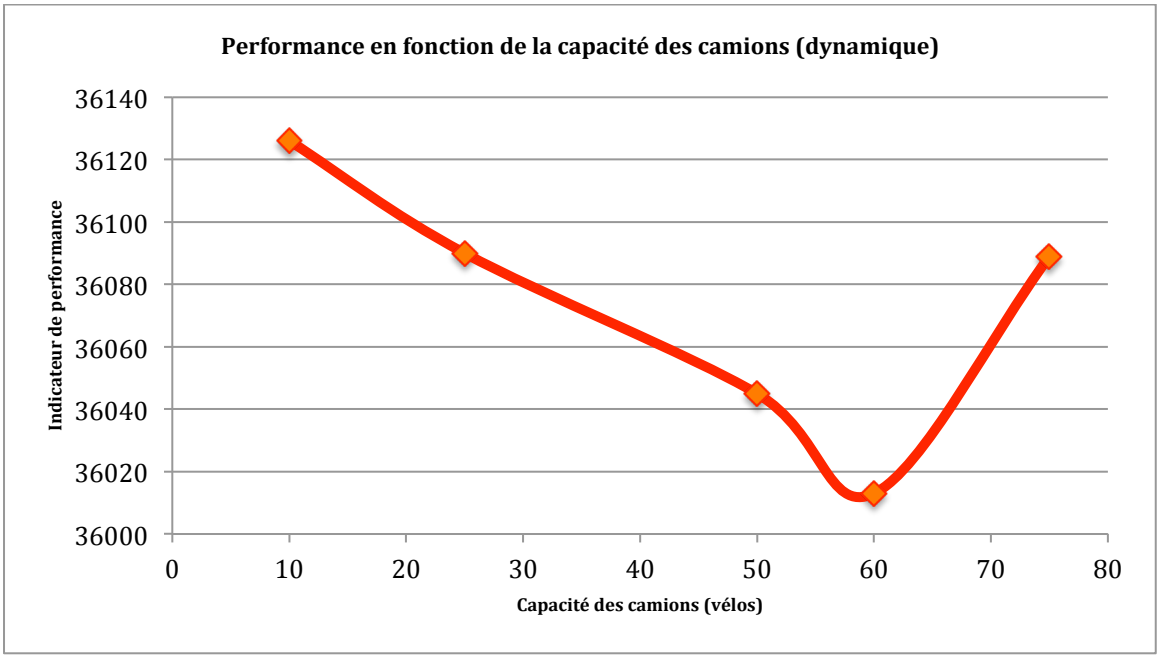

Figure B.4 Performance en fonction de la capacité des camions pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite

B.2 Durée de base et durée par vélo

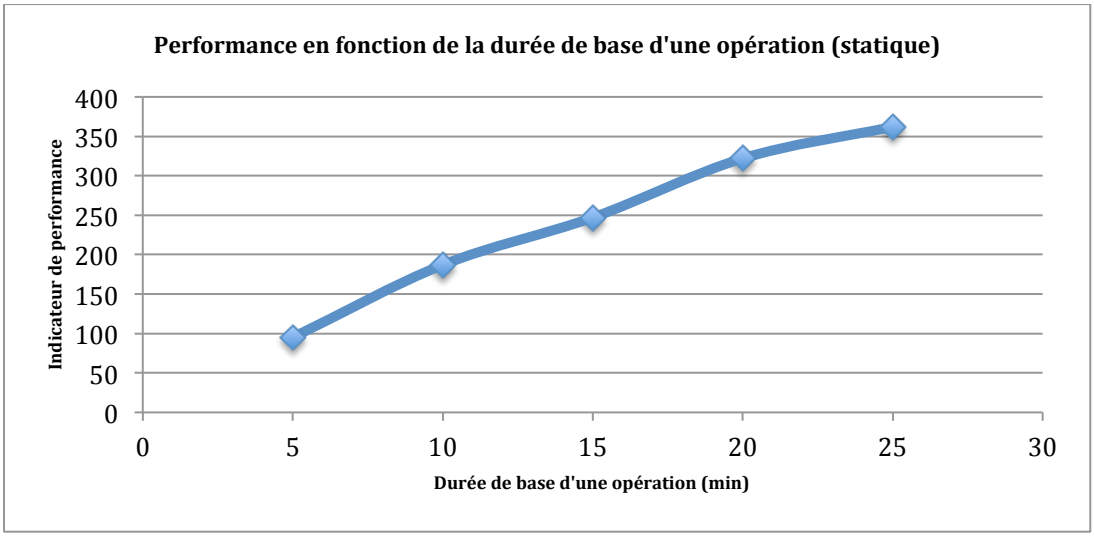

Figure B.5 Performance en fonction de la durée de base d'une opération pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite

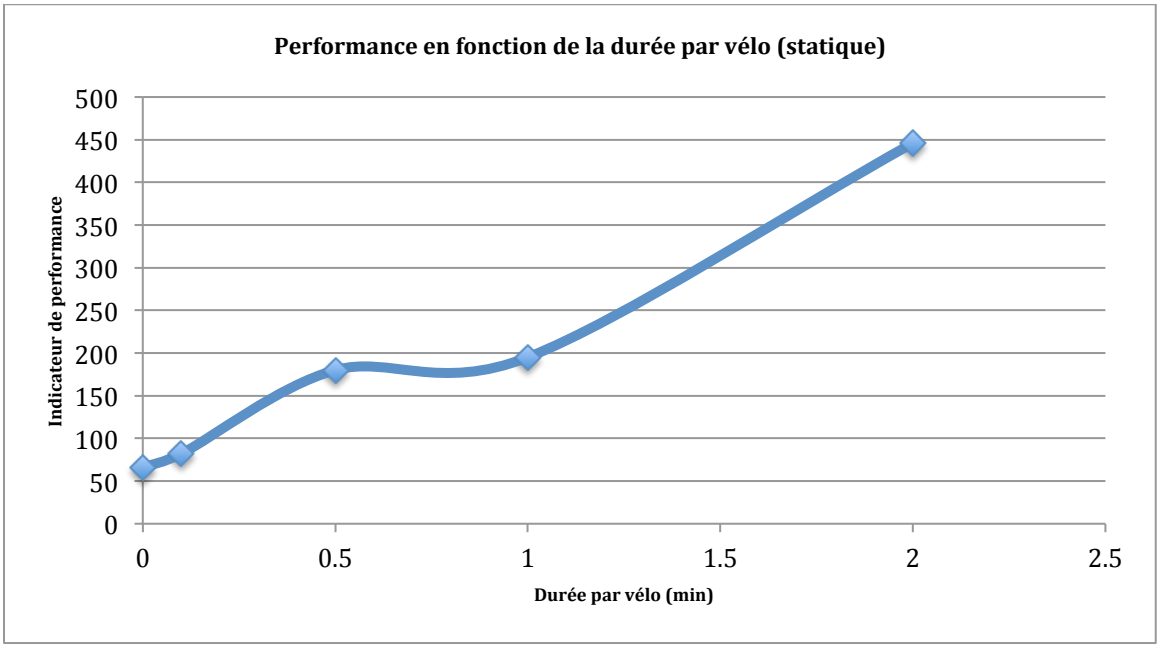

Figure B.6 Performance en fonction de la durée de base d'une opération pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite

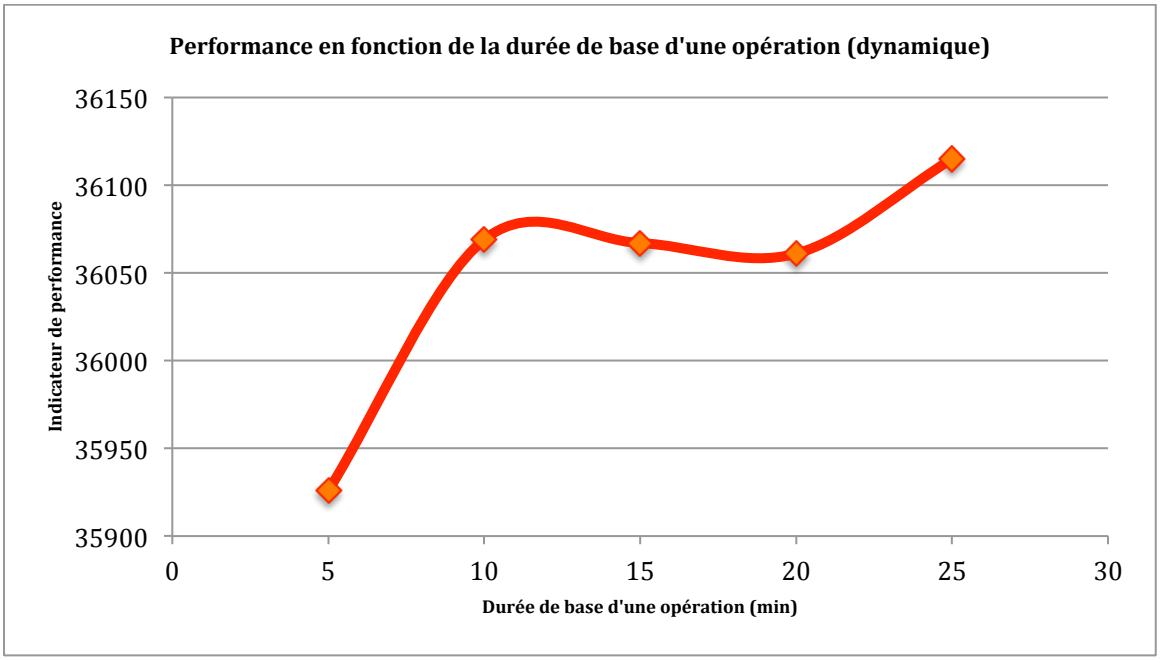

Figure B.7 Performance en fonction de la durée de base d'une opération pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite

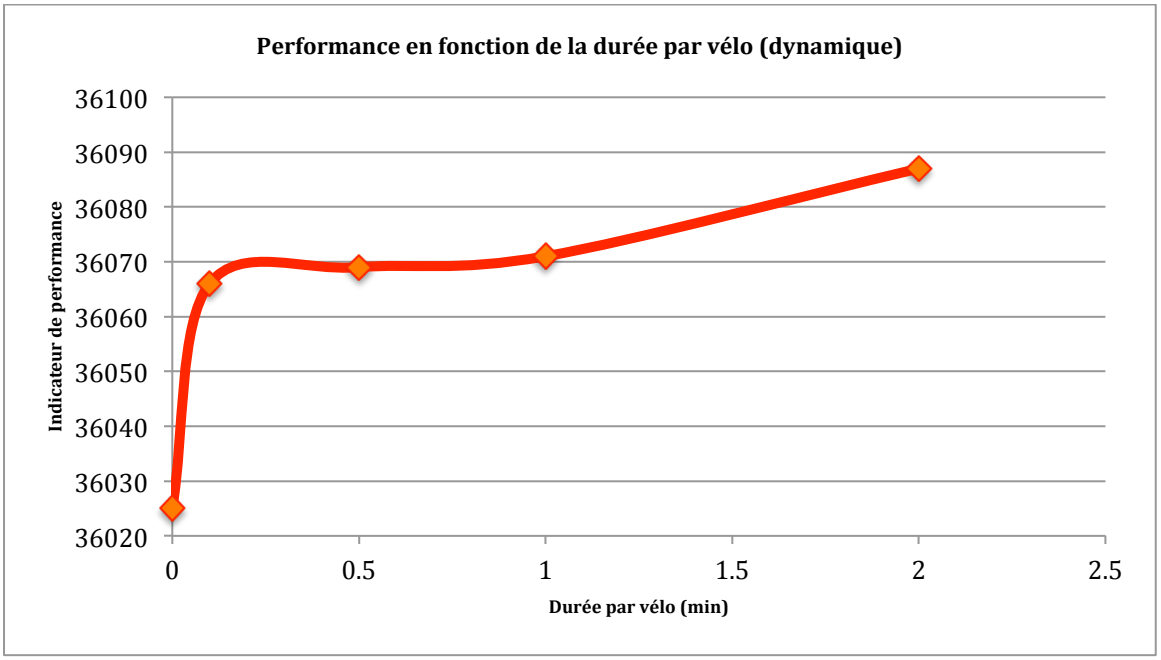

Figure B.8 Performance en fonction de la durée par vélo pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite

B.3 Périodes de résolution

Le graphique suivant présente l'influence de la période de résolution sur les résultats. L'indicateur de performance est unitaire (divisée par le nombre de périodes) puisque la fonction objectif est sommée sur toutes les périodes. Ainsi, plus il y a de périodes, plus la valeur de l'objectif peut être importante.

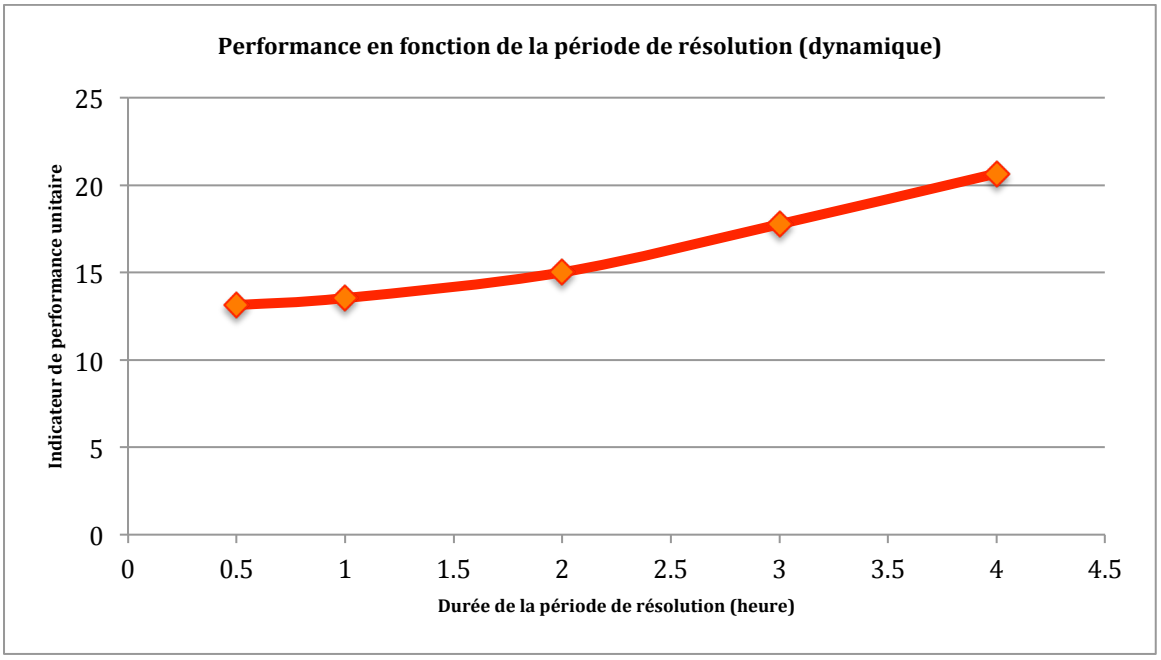

Figure B.9 Performance en fonction de la période de résolution pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite

B.4 Temps de résolution

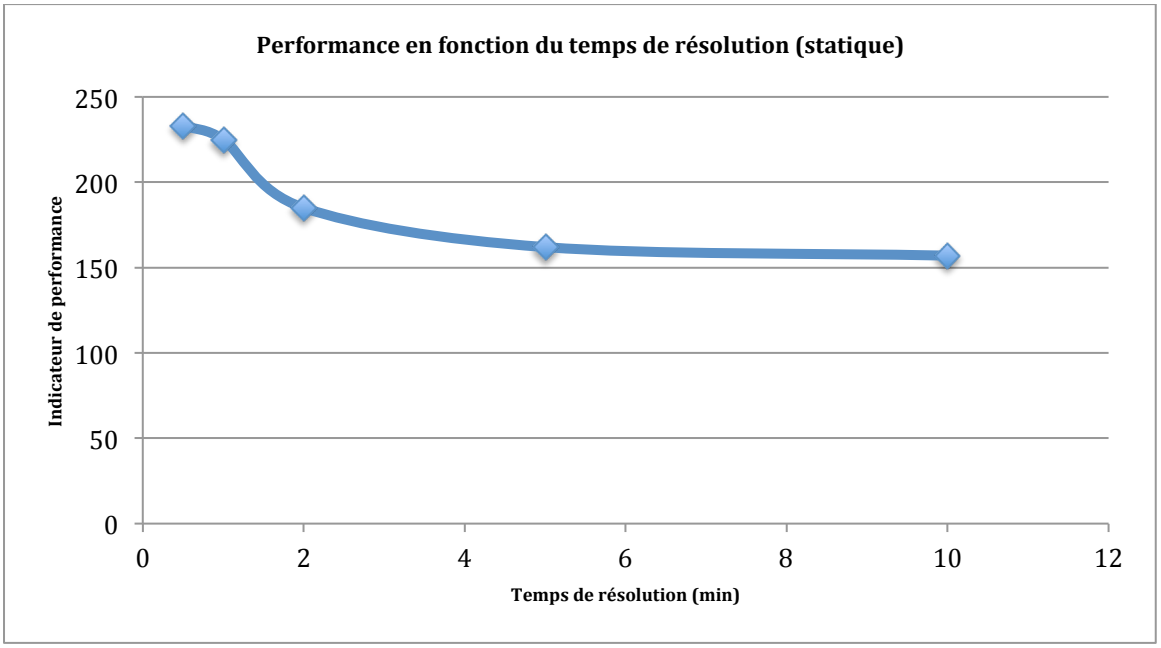

Figure B.10 Performance en fonction du temps de résolution pour le modèle statique avec objectif précis et demande insatisfaite

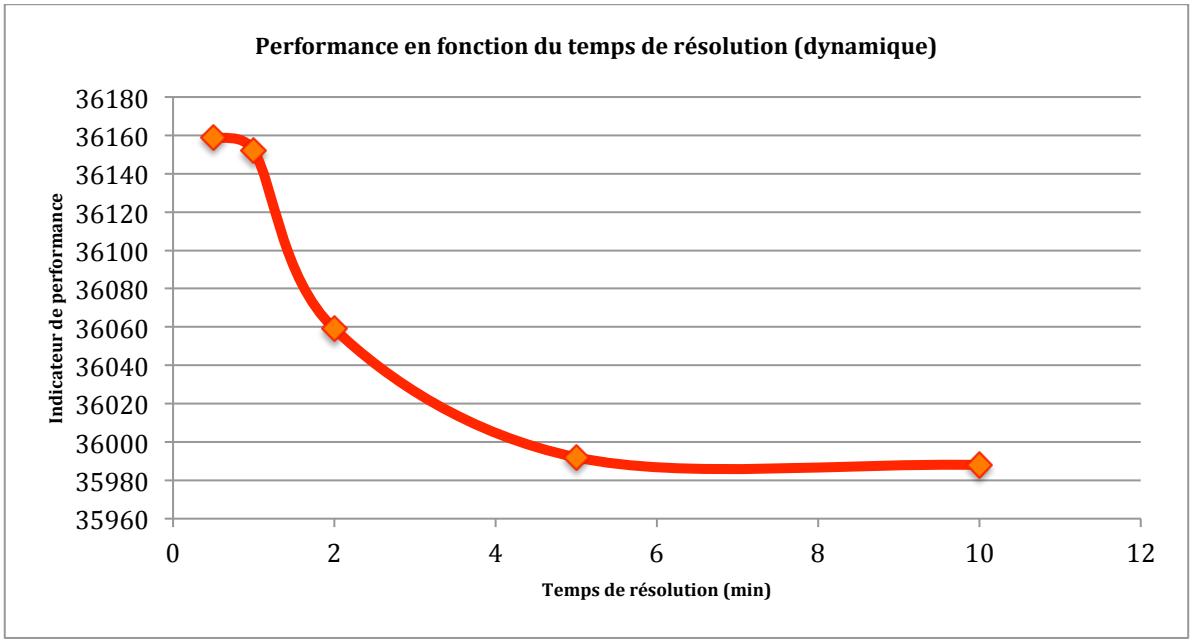

Figure B.11 Performance en fonction du temps de résolution pour le modèle dynamique avec objectif précis et demande insatisfaite