

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE

SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

Par **Mohamed GUEDRIA**

**MODELISATION ET EVALUATION DES LIVRAISONS URBAINES
A BASE DE PETITS VEHICULES**

Sous la direction de : Jean-Paul BOURRIERES
(Co-directeurs : Jean-Christophe DESCHAMPS, Nicolas MALHENE)

Soutenue le 6 décembre 2018

Membres du jury :

| | | | |
|------|--|------------------------------|-----------------------|
| Mme. | BOTTA-GENOULAZ, Valérie | Professeure à l'INSA de Lyon | Président |
| Mme. | BOTTA-GENOULAZ, Valérie | Professeure à l'INSA de Lyon | Rapporteur |
| M. | DURAND, Bruno, Maître de conférences HDR à l'Université Paris-Nanterre | | Rapporteur |
| Mme. | LEHOUX, Nadia, Professeure à l'université Laval, Québec | | Examinateur |
| M. | BOURRIERES, Jean-Paul, Professeur à l'Université de Bordeaux | | Directeur de thèse |
| M. | MALHENE, Nicolas, Enseignant-chercheur à l'EIGSI, La Rochelle | | Co-directeur de thèse |
| M. | DESCHAMPS, Jean-Christophe, Maître de conférences à l'Université de Bordeaux | | Co-directeur de thèse |

Titre : Modélisation et évaluation des livraisons urbaines à base de petits véhicules

Résumé : Le VRP permet de modéliser la problématique du TMV. Pour autant dans sa version la plus simpliste il ne peut convenir aux nouvelles contraintes qui renforcent la complexité de l'environnement urbain tel que la congestion. Raison pour laquelle ce travail se positionne en premier sur un TDVRP (Time-Dependent-Vehicle-Routing-Problem) dans le but de représenter au mieux le contexte urbain actuel. La résolution de ces deux problèmes est efficace, entraînant une réduction du nombre de véhicules supplémentaires nécessaires en raison des retards de congestion peuvent être éliminés. Mais cette solution n'est pas sans conséquence pour les clients finaux puisque son but est d'éviter le passage aux heures de pointes et cela peut engendrer des retards de livraison. Pour cette raison nous voulons proposer une nouvelle solution qui permet de résoudre le problème du chemin le plus court et en intégrant la dépendance au temps (TDVRP). Cette solution se repose sur une meilleure exploitation des véhicules, en premier lieu, pour réduire le nombre de véhicule sur la route. Ce problème s'appelle MT-VRP (Multi-Trip VRP) qui a été évoqué en 2007 par (Azi, et al. 2007). Dans un deuxième temps nous voulons proposer un MT VRP qui utilise différents types de véhicule en termes de capacité de chargement. Dans cette optique vient notre travail qui propose une nouvelle solution de MTTDVRP (TW avec fenêtres de temps) en testant une nouvelle solution en utilisant un véhicule léger de faible capacité de chargement (type tricycle) dans un but de réduire les nuisances liés au TMV.

Mots clés: TMV, VRP, City Logistics, TD-VRPTW, *Goods transport, VRP, City Logistics, TD-VRPTW*

Title: Modeling and evaluation of urban delivery based on small vehicles

Abstract: The VRP makes it possible to model the problem of TMV. However, in its most simplistic version it cannot be adapted to the new constraints which reinforce the complexity of the urban environment such as congestion. This is why this work is placed first on a TDVRP (Time-dependent-Vehicle-Routing-Problem) in order to best represent the current urban context. The resolution of these two problems is effective; resulting in a reduction in the number of additional vehicles needed due to congestion delays can be eliminated. But this solution is not without consequences for end customers since its goal is to avoid the switch to peak hours and this can lead to delivery delays. For this reason we want to propose a new solution that solves the problem of the shortest path and integrating time dependency (TDVRP). This solution relies on better operation of vehicles, in the first place, to reduce the number of vehicles on the road. This problem is called MT-VRP (Multi-Trip VRP) which was raised in 2007 by (Azi, et al. 2007). In a second step we want to propose a MT VRP that uses different types of vehicle in terms of loading capacity. In this perspective comes our work that proposes a new solution of MTTDVRP (TW with time windows) by testing a new solution using a light vehicle of low load capacity (tricycle type) in order to reduce the nuisance associated with TMV.

Keywords: TMV, VRP, City Logistics, TD-VRPTW, *Goods transport, VRP, City Logistics, TD-VRPTW*

Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu mon directeur de thèse, M. Jean-Paul Bourrières, Professeur des Universités à l'université de Bordeaux pour m'avoir accueilli au sein de son équipe. Je lui suis également reconnaissant pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela. J'adresse de chaleureux remerciements à mon Co-encadrant de thèse, M. Jean-Christophe Deschamps, Maître de conférences à l'université de Bordeaux, pour son attention de tout instant sur mes travaux. Son énergie et sa confiance ont été des éléments moteurs pour moi. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec lui. Un très grand merci à M. Nicolas Malhéné, Enseignant-chercheur à l'école d'ingénieurs de La Rochelle (EIGSI), pour son implication dans le projet, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Notamment sur la problématique d'optimisation de la logistique urbaine. Il m'a beaucoup appris, j'ai apprécié son enthousiasme et sa sympathie. Je voudrais remercier les rapporteurs de cette thèse Mme. Valérie Botta-Genoulaz, Professeur à l'INSA de Lyon, et M. Bruno DURAND, Maitre de conférences HDR à l'Université Paris-Nanterre, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. J'associe à ces remerciements Mme. Nadia Lehoux, Professeur à l'Université Laval au Québec, pour avoir accepté d'examiner mon travail. J'adresse de sincères remerciements à toute l'équipe EIGSI de La Rochelle pour m'avoir accueilli chaleureusement au sein de leurs locaux. Je désire grandement remercier Mme Luminita ION, coordinatrice de la dominante Energie à l'EIGSI de La Rochelle et surtout Mme Rose Emily Campbell, enseignante à l'EIGSI de La Rochelle, pour m'avoir fait confiance tout au long de ces années. Leurs remarques, leurs ouvertures d'esprit, leurs franchises, leurs gentillesses sont autant d'éléments qui m'ont permis d'atteindre les objectifs dans le cadre de mon doctorat. Je les remercie pour tout cela. Bien sûr, atteindre ces objectifs n'aurait pas été possible sans l'aide des membres de Proxiway de La Rochelle qui ont participé au projet. Je souhaite notamment remercier Mme Anne Chané, responsable Proxiway. Je désire en outre remercier tous les membres de Proxiway pour leur sympathie, leur amitié. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec eux. Le cadre de travail était idéal. Je souhaite remercier spécialement mes frères et sœur, Wassim, Afef et Thouraya, ainsi que mes chers parents, Jamel et Zahra pour leur soutien au cours de ces années et sans lesquels je n'en serais pas là aujourd'hui.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 7 |
| 1. Chapitre 1 : Contexte et Problématique..... | 9 |
| 1.1 Introduction | 10 |
| 1.1.1 Processus d'urbanisation | 10 |
| 1.1.2 Pollution et santé | 10 |
| 1.1.3 Congestion et centre-ville..... | 12 |
| 1.2 Le système TMV et axes d'amélioration..... | 12 |
| 1.2.1 Finalité..... | 12 |
| 1.2.2 Diversité des parties prenantes et des marchandises | 14 |
| 1.2.3 Mesures d'amélioration..... | 15 |
| 1.3 Stratégie d'amélioration | 18 |
| 1.4 Problématique de thèse..... | 19 |
| 1.4.1 Projet ADEME VELUD..... | 19 |
| 1.4.2 De l'utilisation de petits véhicules en TMV | 21 |
| 1.4.3 Contextualisation du sujet de thèse | 22 |
| 1.5 Conclusion..... | 26 |
| 2. Chapitre 2 : Etat de l'art | 27 |
| 2.1 Introduction | 28 |
| 2.2 Le problème VRP et le contexte urbain..... | 28 |
| 2.2.1 Modélisation des flux de transport | 28 |
| 2.2.2 L'ELU comme élément d'optimisation du schéma logistique urbain | 30 |
| 2.2.3 Généralités sur les problèmes de routage | 32 |
| 2.3 Focus sur les problèmes de VRP pour le TMV | 33 |
| 2.3.1 TD-VRP: Time-Dependent Vehicle Routing Problem..... | 33 |
| 2.3.2 Multi-Level VRP | 36 |
| 2.3.3 DVRP : VRP dynamique..... | 37 |
| 2.3.4 Les voyages multiples | 38 |
| 2.4 Positionnement des travaux..... | 39 |

| | |
|---|----|
| 3. Chapitre 3 : Modélisation du problème de tournée à voyages multiples et fenêtres de temps sous contrainte de congestion de trafic (MTTD-VRPTW) et études d'application | 42 |
| 3.1 Introduction | 43 |
| 3.2 Caractérisation du MTTD-VRPTW | 43 |
| 3.2.1 Temps total d'exploitation..... | 44 |
| 3.2.2 Temps de préparation au dépôt..... | 45 |
| 3.2.3 Le temps de trajet | 45 |
| 3.2.4 Temps de service | 46 |
| 3.3 Modèle MTTD-VRPTW | 48 |
| 3.3.1 Problème et définitions..... | 48 |
| 3.3.2 Formalisation du MTTD-VRPTW | 49 |
| 3.4 Analyse des facteurs impactant le temps d'exploitation | 55 |
| 3.4.1 Méthode d'analyse des effets des actions..... | 55 |
| 3.4.2 Etude 1 : effets des paramètres de livraison sur le temps d'exploitation..... | 61 |
| 3.4.3 Etude 2 : Effet sur le temps d'exploitation des paramètres conditionnant le temps de chargement au dépôt et le temps de service | 69 |
| 3.4.4 Etude 3 : Impact de la capacité de camion sur le temps d'exploitation..... | 73 |
| 3.5 Conclusion..... | 77 |
| 4. Chapitre 4 : Etude de cas à La Rochelle..... | 79 |
| 4.1 Introduction | 80 |
| 4.2 Contexte de l'étude..... | 80 |
| 4.2.1 Le TMV à La Rochelle..... | 80 |
| 4.2.2 Le CDU ELCIDIS | 82 |
| 4.3 Paramétrage du modèle | 83 |
| 4.3.1 La congestion | 84 |
| 4.3.2 Données nécessaires au calcul du temps de trajet | 85 |
| 4.3.3 Données nécessaires au calcul du temps de service | 86 |
| 4.3.4 Vérification des distances..... | 87 |
| 4.4 Comparaison des tournées réelles vs théoriques optimales..... | 88 |
| 4.4.1 Expérimentation avec un VPG | 89 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.4.2 | Expérimentation avec un VGG | 91 |
| 4.5 | Quel véhicule pour la réalisation de tournées en zone urbaine ?..... | 92 |
| 4.5.1 | Contexte d'étude et résultats | 93 |
| 4.5.2 | Analyse des résultats | 94 |
| 4.6 | Où localiser le CDU de La Rochelle ? | 104 |
| 4.7 | Conclusion..... | 109 |
| | Conclusion générale..... | 109 |
| 5. | Annexes | 112 |
| 5.1 | Annexe 1 : Principe et application des plans d'expérience | 113 |
| 5.2 | Annexe 2 : Résultats des plans d'expérience..... | 120 |
| 5.3 | Annexe 3: Résultats d'une semaine d'observation de tournées réelles à La Rochelle, en vue d'estimer un indice horaire de congestion..... | 127 |
| 5.4 | Annexe 4: Observation relative à la disponibilité des places de parking | 128 |
| 5.5 | Annexe 5 : Données relatives au calcul des temps de parking par type de véhicule | 128 |
| 5.6 | Annexe 6 : Détails des observations effectuées avec un véhicule utilitaire léger et un autre de type 3,5 T | 130 |
| a) | Observations VUL..... | 131 |
| b) | Observations 3,5 T | 135 |
| 6. | Bibliographie | 139 |

Introduction générale

Aujourd’hui, la maîtrise de l’activité du transport est une nécessité absolue pour des industries sujettes à une concurrence exacerbée et des problématiques environnementales et économiques. Sur le plan environnemental, le transport doit être pensé dans une logique de développement durable, caractérisée par la réduction de l’émission de gaz à effet de serre, et par une meilleure maîtrise de l’empreinte carbone du transport routier. Sur le plan économique, il est nécessaire de rationaliser la gestion transport par l’utilisation optimale des moyens. La rationalisation de la flotte de véhicules et l’optimisation du déplacement des véhicules permettent, en effet, de réduire les coûts énergétiques liés à la consommation des énergies fossiles, amenées à se raréfier, et dont l’augmentation de prix incessante est difficilement supportable pour les transporteurs. Face à ces défis, les entreprises peuvent recourir à la mutualisation et/ou à l’externalisation de leurs prestations de transport, ainsi qu’à l’utilisation d’outils d’aide à la décision. Une stratégie de mutualisation consiste à mettre en commun des ressources de stockage et à partager l’utilisation de véhicules. L’externalisation des prestations de transport consiste à recourir à la sous-traitance pour assurer la distribution de leurs produits. Ces orientations stratégiques ont pour but de contribuer à la réduction des coûts de transport. Les outils d’aide à la décision, qui s’appuient sur des résultats de recherche opérationnelle, visent à maximiser les taux de charge et à limiter le nombre de véhicules utilisés, ainsi que la distance totale parcourue. Au-delà de la performance économique, la réduction du nombre de véhicules utilisés et de la distance parcourue concourent à la réduction de l’empreinte carbone des produits transportés et de la consommation des énergies fossiles. L’un des tout premiers travaux visant à optimiser les tournées des véhicules remonte aux années 50 (Dantzig, et al., 1959). Depuis, cette problématique est connue sous le vocable VRP (Vehicle Routing Problem).

L’optimisation du TMV (Transport de Marchandises en Ville) fait appel au VRP. Pour autant, le contexte urbain induit des contraintes spécifiques, dues notamment à la congestion du trafic, qui renforcent la complexité du problème. C’est pourquoi notre travail s’est intéressé au TDVRP (Time-Dependent-Vehicle-Routing-Problem) dans le but de représenter au mieux le contexte urbain actuel. Le TDVRP considère qu’un même trajet peut prendre plus ou moins de temps selon la période horaire à laquelle le véhicule circule (Kok, et al., 2012). Si nous voulons de plus réduire le nombre de véhicules de livraison en centre-ville, il faut envisager la multiplication des tournées de ces véhicules, ce qui nous amène au MT-VRP (Multi-Trip VRP) évoqué dans (Azi, et al., 2007) qui correspond bien aux conditions « du dernier kilomètre » impliquant une flotte très limitée de petits véhicules qui doivent effectuer plusieurs tournées pour réaliser un plan journalier de livraison. Enfin le MTVRP-TW considère le problème de tournées multiples sous contrainte de plages horaires (Time Windows) de livraison (Brando, et al., 1997), qui correspond aux pratiques actuelles.

Nous positionnons notre travail dans une problématique MTTDVRP –TW dans un contexte de centre-ville, impliquant un unique véhicule de livraison, de faible capacité de chargement dans un but de réduire les nuisances liées au TMV.

Pour présenter nos travaux, la présente thèse est divisée en 4 chapitres.

Le premier chapitre porte sur les pratiques usuelles du TMV, afin de fixer les bases et le contexte général de la thèse. Dans un premier temps, nous décrivons le « système de logistique urbaine » et ses différents éléments. Puis, nous approfondissons l'analyse du processus de livraison en ville. Enfin, nous délimitons la problématique sur laquelle porte notre recherche.

Le deuxième chapitre est consacré à un état de l'art sur les problèmes de tournées de véhicules de livraison, en détaillant les variantes de ce problème et les méthodes de résolution qui s'y rattachent, pour enfin définir le positionnement de la thèse.

Le troisième chapitre expose le modèle de programmation linéaire à variables mixtes que nous avons mis au point pour optimiser la planification de tournées urbaines utilisant un véhicule de faible gabarit. Sur la base de ce modèle, nous menons une exploration paramétrique visant à évaluer la sensibilité de la performance de livraison aux différents paramètres, et ce selon plusieurs scénarios de TMV. Parmi ces paramètres, nous nous intéressons en particulier à la capacité du véhicule, afin d'identifier les modalités qui permettent d'exploiter un petit véhicule sans sacrifier la performance économique.

Le quatrième chapitre porte sur une étude de cas en centre-ville rochelais, en calibrant notre modèle par des données réelles issues de campagnes d'observation que nous avons menées. L'interprétation de des résultats issus du modèle instancié au cas rochelais conduit à préciser les conditions qui rendent réaliste l'exploitation d'un petit véhicule.

Enfin, nous proposons une conclusion, qui résume les différents résultats de la thèse avant d'en proposer les principales perspectives.

Chapitre 1 :

1. Contexte et Problématique

1.1 Introduction

Ce premier chapitre présente les objectifs, les contraintes et modalités, ainsi que les acteurs du transport de marchandises en ville. Nous abordons les différents points qui nous semblent caractériser l'environnement urbain de la distribution de marchandises, puis nous précisons la problématique contextualisant notre sujet de thèse.

1.1.1 Processus d'urbanisation

Depuis 2007-2008, la part de la population mondiale vivant dans des agglomérations urbaines a dépassé celle de la population vivant dans les zones rurales. Désormais, plus de 3,3 milliards de personnes habitent en ville, dont plus de 500 millions dans des mégapoles de plus de 10 millions d'habitants ou de très grandes villes de plus de 5 millions d'habitants. Selon les prévisions de l'ONU, le taux d'urbanisation mondial va s'accroître considérablement au cours des prochaines décennies, atteignant 59,7% en 2030 et 69,6% en 2050¹ ; les centres urbains anciens et nouveaux vont absorber l'essentiel de la croissance démographique à venir.

Cette concentration démographique présente d'importantes contreparties négatives, puisqu'elle amplifie le problème de l'approvisionnement des villes, pourtant indispensable à leur fonctionnement : le transport des hommes et des marchandises contribue ainsi pour une grande part au coût social des villes. Les enquêtes récentes étayent la thèse selon laquelle les nuisances générées par le transport de marchandises en ville (TMV) vont croître rapidement dans les prochaines années et soulignent que la manière dont la logistique urbaine est actuellement organisée n'est pas durable. Dans la définition de la norme AFNOR X 50-600, la logistique est une fonction « dont la finalité est la satisfaction des besoins exprimés ou latents, aux meilleures conditions économiques pour l'entreprise et pour un niveau de service déterminé. Les besoins sont de nature interne (approvisionnement de biens et de services pour assurer le fonctionnement de l'entreprise) ou externe (satisfaction des clients). La logistique fait appel à plusieurs métiers et savoirs faire qui concourent à la gestion et à la maîtrise des flux physiques et d'informations, ainsi que des moyens ».

Transposée au contexte urbain, la logistique et l'ensemble de ses acteurs expriment des besoins et des conditions qui, loin de se limiter au seul aspect économique, s'inscrivent dans les différentes dimensions d'un référentiel durable.

1.1.2 Pollution et santé

La logistique urbaine, dont l'activité la plus visible est le TMV, est source de nuisances et en particulier de pollution et de congestion :

- ✓ 30 à 35% des émissions de CO2 en ville sont dues au TMV ;
- ✓ plus de 5% des émissions totales de PM10 (particules fines inférieure à 10 µm) et 30% des émissions totales de NOx (oxydes d'azote) sont dues au TMV ;

¹ Le Monde Diplomatique, Avril 2010, pages 20 et 21

- ✓ en 2030, la consommation d'énergie imputable au TMV représentera 45% de la consommation d'énergie nécessaire au transport global de marchandises ;
- ✓ d'ici à 2030, le nombre de kilomètres-tonnes transportés pourrait croître de 63%.

Au niveau européen, une large étude² sur les impacts de la pollution urbaine a été conduite entre 2003 et 2008. Celle-ci a permis de mettre en lumière les problèmes sanitaires spécifiques que pose la pollution issue du trafic routier. Selon l'OMS, (rapport de synthèse de l'évaluation des risques, mise à jour 2005) « le fait de respirer de l'air pur est considéré comme une condition essentielle de la santé et du bien-être de l'homme. Cependant, la pollution de l'air continue de faire peser une menace importante sur le plan sanitaire partout dans le monde [...]. Plus de 2 millions de décès prématurés peuvent chaque année être attribués aux effets de la pollution de l'air extérieur dans les villes et de l'air à l'intérieur des habitations [...] à travers le monde ». Chaque jour, ce sont 115 personnes qui meurent de manière prématurée à cause des particules fines émises par le diesel. Les particules fines sont responsables de 6% des décès par cancer du poumon.

Néanmoins, dans la quasi-totalité des agglomérations françaises, la qualité de l'air est globalement bonne. Les agences en charge de la surveillance de la qualité de l'air (AIRPARIF, ATMO, etc.), qui calculent quotidiennement les concentrations de dioxyde d'azote, de particules fines, de dioxyde de soufre et d'ozone, indiquent que la qualité de l'air est bonne pendant 80 à 85% de l'année. Ces indices satisfaisants mesurent la qualité de l'air à laquelle la majeure partie de la population est exposée, mais le constat est moins bon lorsqu'on s'intéresse à la pollution dite de « proximité trafic ». Dans les agglomérations, une forte dégradation de la qualité de l'air est, en effet, observée principalement à proximité immédiate des axes de circulation. De manière générale, les voies de la zone urbaine, et plus spécifiquement celles du centre-ville, sont les plus exposées à la pollution, en raison de l'intensité du trafic et l'effet « canyon » (voies peu larges et bordées de part et d'autre d'un bâti dense) est défavorable à la dispersion des polluants émis par les véhicules en circulation. Densément peuplé, le cœur de ville expose sa population à des dépassements, dû au trafic, des valeurs limites pour la protection de la santé. Pourtant, l'urbanisation des populations rend l'approvisionnement des agglomérations de plus en plus complexe et contraint, mais il faut bien que les marchandises arrivent jusqu'au magasin ou au domicile pour satisfaire aux besoins des citadins.

Dans une ville européenne, les flux de marchandises représentent environ 15% des véhicules parcourus sur la voirie urbaine et 40 à 50% de l'ensemble des camions-kilomètres à l'intérieur de l'aire urbaine.

Pointé du doigt, le transport de fret urbain impacte significativement la qualité de l'air. Pourtant, malgré la volonté des pouvoirs publics, depuis les années 90, de transformer le TMV, celui-ci a connu peu

²Observatoire régional de santé Île-de-France : Impacts sanitaires de la pollution atmosphérique urbaine et des expositions à proximité du trafic routier dans l'agglomération parisienne (Sabine Host, Edouard Chatignoux et Adrien Saunal)

Lien : http://www.ors-idf.org/dmdocuments/2012/Synthese_erpurs_EIS_trafic.pdf

d'évolutions par rapport au transport des personnes. Néanmoins, plusieurs schémas de livraison alternatifs et moins polluants ont été expérimentés (Delaître, 2008), (Dablanc, et al., 2010), (Trentini, et al., 2011). Si certains schémas sont en faveur d'une augmentation du volume des véhicules de livraison pour en réduire le nombre, d'autres, au contraire, plaident en faveur de véhicules de petit gabarit ayant un impact environnemental plus faible. A l'heure où la question de la mise en œuvre des AOMD (Autorités d'Organisation de la Mobilité Durable) se pose, il est essentiel de renforcer les méthodes d'analyse mises à disposition des acteurs locaux du TMV.

1.1.3 Congestion et centre-ville

La congestion routière est un problème qui prend de plus en plus d'ampleur (Lesteven, 2012). Dans son étude sur les coûts associés à la congestion, (Koning, 2011)³ part du principe qu'une infrastructure de transport est congestionnée lorsqu'elle ne peut répondre à la demande qui s'adresse à elle sans dégrader la qualité du service offert. Ce phénomène est la traduction du rapport charge/capacité que l'on retrouve dans toute organisation de moyens confrontée à une demande. La demande de transport est variable sur l'année, le mois, la semaine et, pour ce qui nous intéresse, sur la journée. Les pics de demande apparaissent dans une journée au moment où de nombreux individus partagent une même infrastructure de transport. Les nuisances qui en découlent sont le temps perdu par les usagers, ainsi que les pollutions environnementales, sonores et visuelles (Perbet, 2004) impactant la qualité de vie sur les résidents des zones congestionnées, notamment par les véhicules de livraison en centre-ville.

On peut distinguer le coût individuel et le coût sociétal induits par la congestion urbaine (Knoning 2011). Le coût individuel, à la charge de chaque usager du réseau routier, intègre une composante économique liée à l'utilisation du véhicule (carburant, assurance, amortissement et entretien du véhicule) et un coût qualitatif lié au temps de déplacement, fonction inverse de la vitesse moyenne de circulation. Le coût sociétal adresse une dimension collective et est fonction du nombre de citoyens, usagers et habitants, exposés aux nuisances.

En définitive, la densité démographique croissante des zones urbaines pose un difficile problème de maintien de la congestion et de la pollution à des niveaux acceptables. Le phénomène de congestion impacte doublement le niveau de pollution, d'une part en raison du nombre de véhicules sur la voirie et, d'autre part, en raison du mauvais rendement des moteurs dans les situations de congestion.

1.2 Le système TMV et axes d'amélioration

1.2.1 Finalité

Nous pouvons positionner l'approvisionnement de la ville dans une architecture intégrante conforme au paradigme systémique. En effet, la notion de système émerge dès lors qu'il est possible d'identifier une

³ Martin Koning. Essais sur la congestion dans les transports à Paris. Economies et finances. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2011.

relation de *finalité* entre une entité qui souhaite consommer un objet, mais qui ne peut le produire par elle-même, et une entité système capable de produire un tel objet (Figure 1-1).

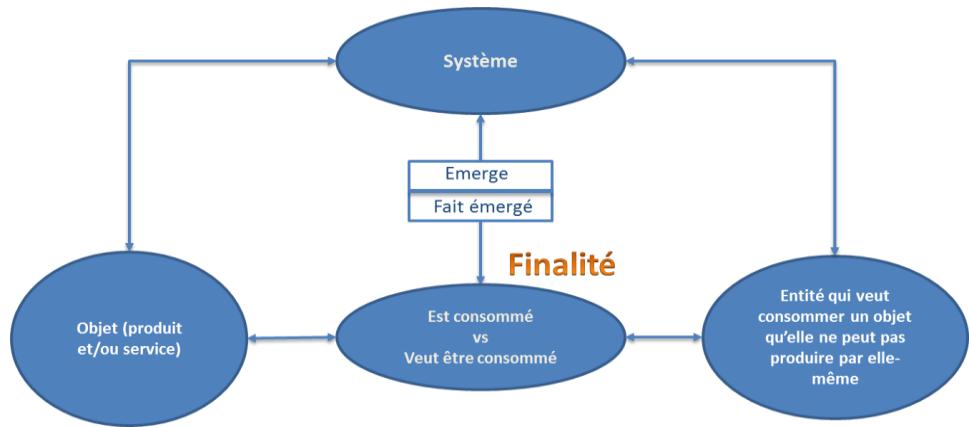


Figure 1-1 : Représentation d'un système (Malahéné, et al., 2010)

Dans (Le Moigne, 1990), la notion de processeur désigne une ressource capable de transformer un intrant en un extrant dans un référentiel Espace / Temps / Forme. Pour réaliser des missions complexes, les processeurs sont organisés et mis en interrelation, les intrants des uns devenant les extrants des autres, pour permettre au système de réaliser sa finalité et les objectifs associés.

La transposition du paradigme systémique au contexte de logistique urbaine (Figure 1-21, Figure 1-2) permet de définir le système « logistique urbaine » et plus particulièrement le TMV par une finalité de transport d'une entité marchandise d'un point vers un autre point d'un environnement urbain, et ce dans un délai imparti.

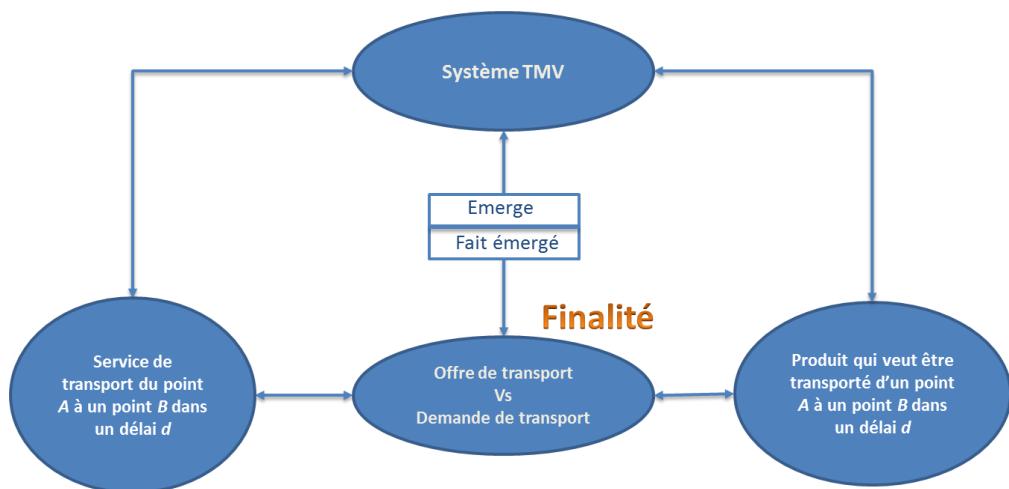


Figure 1-2 : Émergence du système TMV (Malahéné et Breuil, 2010)

1.2.2 Diversité des parties prenantes et des marchandises

L'écosystème du TMV est vaste et implique de nombreux acteurs (producteurs, opérateurs logistiques, commerçants, entreprises, citoyens et autorités publiques) dont les rôles sont divers (Figure 1.3). Depuis plusieurs années, ces parties prenantes travaillent à la coordination des activités de logistique urbaine pour réduire les nuisances de l'approvisionnement du centre-ville. Certaines collectivités (Paris, Lyon, Toulouse, etc.) ont défini des chartes de bonnes pratiques engageant des représentants de chaque catégorie d'acteurs : chargeurs, destinataires, transporteurs, acteurs du transport fluvial et ferroviaire, agences de l'Etat, collectivités et organisations professionnelles, etc. Ces chartes portent sur l'optimisation des livraisons et sur la limitation de leurs impacts, en particulier :

- Pour les chargeurs, favoriser les modes minimisant les nuisances lors des acheminements et des livraisons en ville,
- Pour les transporteurs, optimiser les tournées d'approvisionnements, respecter les horaires de livraison.

Il faut souligner la variété des biens transportés (notamment, alimentaires ou non-alimentaires), des lieux de livraison (en entreprise, à domicile), et de nature du conditionnement (colis, palettes, ...). Organiser les livraisons et/ou les enlèvements de manière à satisfaire l'ensemble des acteurs semble illusoire, eu égard à la diversité, sinon l'incompatibilité, des objectifs de ces acteurs. Pour que la performance, au sens large, du TMV progresse, son orchestration par les acteurs institutionnels est nécessaire.



Figure 1-3 : parties prenantes du système TMV

1.2.3 Mesures d'amélioration

Pour (Goldman et Gorham, 2006), rechercher la durabilité du TMV doit viser à réduire les mouvements de camions vides dans les quartiers et les centres urbains encombrés, en vue d'améliorer l'efficacité environnementale et économique des opérations de fret urbain. Dans (Dablanc, 2007), cette proposition est complétée en intégrant la dimension sociale : le TMV durable a pour objectif « l'amélioration des performances environnementales (diminution des véhicules-km nécessaires aux livraisons, diminution des émissions sonores, etc.) et sociales (conditions de travail des chauffeurs livreurs, conditions d'exercice de la sous-traitance) des activités urbaines de livraison et d'enlèvement, sans dégradation (voire avec amélioration) des performances économiques des activités, notamment commerciales, des centres urbains ». Le champ exploratoire du TMV durable est donc très large, et les améliorations dans ce domaine supposent des mesures de nature différente, dont le programme Européen BESTUFS a établi une typologie (BESTUFS, 2007), que nous résumons ci-après :

1.2.3.1 Mise en œuvre d'infrastructures propres

Il s'agit d'aménager les infrastructures utilisées pour l'exercice du TMV, notamment les voies de circulation et le stationnement en ville. Certains aménagements spécifiques ont été expérimentés et mis en œuvre de manière pérenne :

- Partage de sites propres avec les systèmes de transport en commun,
- Réservation de voies de circulation pour les véhicules sur des tranches horaires spécifiques,
- Aires de livraison dynamiques.

D'autres aménagements font l'objet d'expérimentations mettant l'accent sur le caractère dynamique de la gestion du TMV et s'appuyant sur le développement de nouvelles technologies pour identifier le demandeur.

1.2.3.2 Amélioration des plans de livraison et des tournées

La ville étant souvent le point de destination final des marchandises, une part importante des véhicules circule avec des facteurs de charge réduits qui n'excèdent que rarement 60 %. Derniers acteurs de la chaîne logistique, les opérateurs du TMV n'ont pas toujours à temps les informations pertinentes pour établir une planification performante des livraisons, situation qui conduit souvent à une planification et un ordonnancement inefficace et donc à une mauvaise utilisation des ressources.

Enfin, les aléas de trafic en zone urbaine justifient de mieux informer les chauffeurs pour leur permettre d'optimiser leur parcours en fonction de l'évolution de leur chargement (nature et volume), de la congestion du trafic ou de tout autre évènement. Au-delà de la mise en œuvre de technologies permettant une communication de ce type, il s'agit surtout de définir les traitements d'information permettant de retourner aux chauffeurs une véritable aide à la décision bénéficiant à la performance du TMV.

Ces activités doivent contribuer à répondre à la demande des villes, encourageant les acteurs du transport à réagir en temps réel. Le développement des nouvelles technologies d'information et de communication permettent d'escompter d'ajuster au mieux le routage des véhicules de tournées, sous réserve de disposer des bons modèles.

1.2.3.3 Installation d'Entrepôts Logistiques Urbains (ELU)

Un autre type d'amélioration s'intéresse à l'implantation et à l'exploitation d'entrepôts logistiques urbains (ELU), dont les plus répandus sont les Centres de Distribution Urbaine (CDU) et les Espaces Logistiques de Proximité (ELP) (Durand, et al., 2012). De manière générale, les ELU sont des plateformes logistiques qui peuvent améliorer le transit de marchandises dans la ville et sa périphérie (Boudouin, 2006). En fonction de la capacité et du positionnement géographique des ELU vis-à-vis des points à livrer, tous n'ont pas la même fonction et diffèrent dans leur configuration (Browne et al, 2005). La Figure 1-4 positionne géographiquement les différents ELU dans la zone urbaine (Trentini et al. 2011).

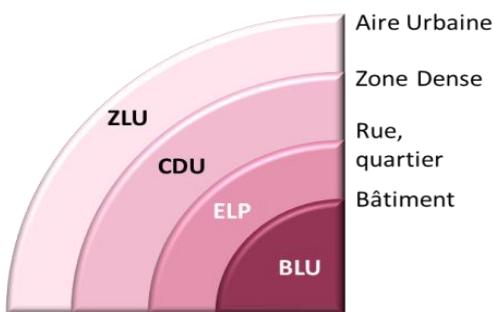


Figure 1-4 : ELU selon leur couverture spatiale (Trentini et al. 2011)

Plusieurs projets ayant connu des succès relatifs (La Rochelle, Bordeaux, Strasbourg, etc.) ont été proposés pour maximiser le potentiel des ELU par un maillage de la ville. Dans cette idée, un maillage optimal, pour peu qu'il soit associé à une véritable stratégie collaborative entre opérateurs, permettrait à un transporteur de déposer la marchandise sur une plateforme en périphérie de la ville et limiter ainsi la pénétration des gros camions en centre-ville pour réduire l'impact écologique.

Si l'avantage des ELU et ELP est indéniable sur le plan de l'impact environnemental, il n'en est pas nécessairement de même sur le plan de la rentabilité et le modèle économique associé à ces dispositifs fait encore débat. La question de l'efficacité se pose vis-à-vis des modèles d'affaires pour adapter l'ELU à différents services : services domestiques, stockage, collecte, nettoyage, etc. Certaines propositions reposent sur des combinaisons entre plusieurs installations pour permettre de configurer au mieux le besoin en entreposage urbain. Ces combinaisons devront être :

- Permanentes et souples pour répondre à un besoin, saisonnier par exemple ;
- Éphémères pour répondre à un besoin ponctuel, comme la construction d'un bâtiment ou un évènement culturel par exemple.

Les ELU constituent une donnée du schéma logistique étudié dans cette thèse, et nous revenons plus en détail sur ce concept dans le chapitre suivant.

1.2.3.4 Régulation et contrôle

Les mesures de régulation et de contrôle s'attachent à réglementer l'accès au centre-ville pour les véhicules utilitaires. Ces mesures aboutissent généralement à la définition de restrictions spatiales et/ou horaires. Pour les restrictions spatiales, il s'agit de limiter l'accès à certaines zones géographiques, telles que le centre et l'hyper-centre de la ville. En réduisant le nombre de véhicules qui entrent dans la zone, les autorités locales cherchent à réduire les émissions polluantes et l'encombrement des voiries, et à améliorer la sécurité des autres usagers. Les restrictions concernent les véhicules d'un type bien défini, caractérisé par un PTAC⁴, une motorisation, un gabarit (hauteur, longueur, largeur au sol) ou encore un nombre d'essieux (Allen et al., 2007; Russo and Comi, 2010).

En Europe et en France en particulier, la réglementation est généralement locale, propre à une agglomération, une commune, voire à un quartier. Les opérateurs peuvent ainsi se trouver confrontés à des contraintes réglementaires variables au cours d'une même tournée.

La mise en place de mesures restrictives pour interdire ou limiter l'accès de grands véhicules polluants à certaines zones que les autorités locales souhaitent protéger, induit des coûts :

- administratifs pour élaborer les textes réglementaires,
- de contrôle pour assurer le respect de ces textes.

Pour réguler la demande du trafic et l'usage des infrastructures routières, les autorités locales peuvent faire payer l'accès à un périmètre géographique donné (Singapour en 1975, Royaume-Uni à partir de 2002, Suède à partir de 2006, Norvège, Malte à partir de 2007, Italie à partir de 2008). Le péage urbain se justifie par l'internalisation des coûts locaux spécifiques du TMV, qui ne sont pas pris en compte par les taxes globales sur les carburants.

Enfin, des mesures de contrôle sont nécessaires pour vérifier le respect de la régulation par les différentes parties prenantes.

1.2.3.5 Mise en œuvre de partenariats

La mise en œuvre d'une organisation de logistique urbaine suppose d'unir les diverses parties prenantes autour d'une volonté commune.

De manière générale, on définit un partenariat comme une variété d'arrangements ayant différents objectifs, durées de vie, structures, procédures d'exploitation, et membres. Un partenariat peut être simplement un moyen de débattre ou partager des informations, ou plus ambitieusement, un forum d'élaboration des politiques, ou encore un arrangement contractuel pour la livraison de services (Lowndes

⁴ PTAC : poids total autorisé en charge, c'est-à-dire le poids cumulé du véhicule et de son chargement.

and Sullivan, 2004). Dans le contexte du TMV, l'idée est de créer des synergies entre les compétences de chacune des parties prenantes, pour permettre la coordination et la synchronisation des actions de chacun, une meilleure exploitation des ressources mises en commun, une maximisation des bénéfices et une minimisation des risques.

Force est de constater pourtant que les acteurs de la logistique du fret urbain, notamment les acteurs économiques que sont les opérateurs de livraison, sont généralement peu enclins à développer une approche coopérative du TMV, compte tenu sans doute des implications sur le partage d'informations et de ressources susceptibles de remettre en cause des avantages concurrentiels. De plus, vis-à-vis des risques de dommages sur les biens transportés ou de perte du contrôle de la qualité globale du service, le transfert de responsabilité peut s'avérer difficile à définir en cas de prestation multi-acteurs.

Pourtant, face aux nouvelles exigences de qualité (ponctualité, traçabilité, sûreté), à l'accroissement de la concurrence, au renchérissement durable du prix du carburant et à la sensibilité accrue de la société aux problèmes de sécurité routière et au respect de l'environnement, les acteurs du TMV doivent évoluer vers des pratiques collaboratives pour déployer une véritable stratégie d'optimisation globale d'utilisation des ressources.

1.2.3.6 Déploiement de véhicules adaptés

S'il est prématué d'imaginer la disparition pure et simple des véhicules de livraison classiques au seul profit d'infrastructures alternatives (pipeline urbain, par exemple), des combinaisons de différents moyens pourront être envisagées dans un avenir proche, afin d'optimiser la rentabilité et l'acceptabilité de la logistique du dernier kilomètre.

En effet, de plus en plus de véhicules adaptés au centre urbain sont utilisés par les opérateurs de transport, qui doivent en conséquence adapter leurs activités aux caractéristiques spécifiques de ces véhicules. La capacité de charge des cargocycles, par exemple, est bien différente de celle des utilitaires de 3,5 tonnes... En contrepartie, le gabarit et l'agilité de petits véhicules innovants permet d'envisager un dimensionnement au plus juste de la flotte face au besoin (nature des marchandises, fréquence de livraison, géographie de l'agglomération, ...).

1.3 Stratégie d'amélioration

Le processus d'amélioration du TMV doit être considéré comme une unité fonctionnelle regroupant plusieurs activités de même nature ou de natures différentes. Il est probablement utopique de vouloir répondre aux différents enjeux de la logistique urbaine à travers une activité unique et il semble nécessaire de mener une action transversale, tant les solutions envisageables sont interdépendantes.

Les processus d'amélioration sont sous-tendus par deux orientations stratégiques émergeant assez nettement d'une volonté collective des parties prenantes. La première, à visée économique, encourage la mutualisation des activités, des équipements et des moyens humains dans le but d'optimiser, à la plus large

échelle, les flux de livraison. La seconde, à visée environnementale et sociétale, se focalise sur l'introduction de moyens de livraison « doux », basés principalement sur l'utilisation de véhicules de petit gabarit, notamment électriques.

Sans être totalement antinomiques, les ambitions économiques, environnementales et sociétales du TMV demeurent confrontées à un dilemme. En effet, si les petits véhicules, électriques notamment, constituent une solution intéressante du point de vue de la minimisation des nuisances en milieu urbain, ceux-ci peinent à démontrer leur efficience du point de vue de la productivité du TMV, en comparaison avec le recours traditionnel aux véhicules de grande capacité.

1.4 Problématique de thèse

Au sein de la problématique générale d'amélioration du TMV, telle que nous l'avons relatée dans le paragraphe précédent, nous isolons une problématique particulière propre à l'utilisation de petits véhicules. Nous présentons le projet ADEME VELUD, qui est à l'origine de notre réflexion, puis nous précisons le problème de TMV abordé dans notre thèse.

1.4.1 Projet ADEME VELUD

L'utilisation en TMV de camions de grande capacité présente certes l'avantage de réduire le nombre de ruptures de charge, synonymes de coûts. Mais les autorités locales voient aujourd'hui d'un mauvais œil ces gros porteurs qui encombrent les rues et viennent ajouter à la pollution urbaine. Les agglomérations interdisent l'accès aux camions à certaines heures et organiseront bientôt une véritable chasse aux véhicules diesel. L'avenir semble donc appartenir aux petits utilitaires, notamment électriques, pour le TMV, et les constructeurs vont devoir trouver des solutions technologiques et organisationnelles supports à la logistique du dernier kilomètre.

En effet, les petits gabarits s'inscrivent dans l'air du temps. Capables de se faufiler dans les rues exiguës, ils peuvent accompagner l'évolution de la demande de transport en petites marchandises, née du développement de l'e-commerce. Ils sont aussi parfaitement adaptés à la livraison des courses à domicile dans les milieux urbains denses. Mais légèreté ne rime pas avec fiabilité ! Les véhicules les plus innovants sont généralement proposés par de petits constructeurs dont la pérennité est toute relative : beaucoup de petits constructeurs ont disparu. Il faut dire que les livraisons urbaines mettent à rude épreuve les véhicules légers et les exposent à de nombreux problèmes techniques : châssis fragiles, pare-brises régulièrement endommagés, casses d'essieux, etc.

À ces contraintes techniques s'ajoute un handicap de productivité : la capacité de chargement réduite d'un véhicule léger conduit à multiplier les retours vers la base de chargement et, par suite, les temps d'attente

du véhicule et du chauffeur à chaque rechargement. Néanmoins, ces temps de chargement peuvent être masqués si l'on parvient à réaliser chaque chargement pendant la tournée précédente, à l'aide d'un jeu de remorques.

Le projet VELUD (Véhicule électrique pour la logistique urbaine durable) financé par l'ADEME et coordonné par l'EIGSI sur la période 2014-2016, a expérimenté un véhicule utilitaire léger électrique pour la livraison du dernier kilomètre dans la ville de La Rochelle. Le véhicule était un prototype RENAULT constitué d'une semi-remorque tirée par un tracteur électrique léger, conçu sur la base d'un modèle Twizy (Figure 1-5).



Figure 1-5 : Vue du prototype VELUD TWIZY

Le véhicule proposé a été développé dans le respect de la réglementation européenne pour les véhicules de catégorie L6e : véhicule à moteur à quatre roues dont le poids à vide n'excède pas 350 kg. Une fois connecté, l'ensemble forme un tout rigide sur 3 essieux, pouvant embarquer jusqu'à 15 conteneurs à l'intérieur d'un caisson, pour un volume total de 1 m³.

Bien que ce prototype ne soit pas suivi d'une production en série, le concept modulaire expérimenté dans VELUD augure de nombreux usages pour le futur. Le véritable potentiel de ce type de véhicule, se révèle dans un schéma logistique articulé autour d'un ELU qui pourra accueillir différentes remorques et caissons (Figure 1-6). Si l'on considère qu'un caisson peut lui-même devenir un format standard de container, ce concept trouve un intérêt particulier en TMV associé à une zone portuaire.



Figure 1-6 : Structure modulaire du prototype VELUD TWIZY

Dans ce schéma, un préparateur charge les caissons stockés sur les quais de l'ELU où sont organisées les tournées. Ces caissons sont embarqués par le tracteur lors de son passage. Les manœuvres d'attelage, dételage peuvent se faire sans descendre du véhicule. En l'absence de perte de temps, la rupture de charge peut ainsi être négligée.

1.4.2 De l'utilisation de petits véhicules en TMV

Les résultats du projet ADEME VELUD valident l'intérêt d'un concept de petit véhicule modulaire de livraison dans un contexte urbain tel que le centre-ville de la Rochelle. Si, techniquement, la proposition est séduisante, il reste à démontrer la viabilité économique de l'utilisation de petits gabarits en lieu et place de véhicules de grande capacité, lesquels ont la préférence des opérateurs dans un schéma logistique traditionnel. Ci-dessous, nous mettons en avant les principaux points d'argumentation favorisant ou non les petits véhicules en TMV.

1.4.2.1 Productivité vs réduction des nuisances

Il incombe aux collectivités publiques de contenir, par la réglementation, les effets du développement économique sur la qualité de vie citoyenne. L'intérêt des collectivités publiques pour l'utilisation de petits véhicules en TMV ne fait pas de doute. En effet, les camions ont une emprise au sol supérieure à celle des véhicules particuliers, sont plus lents, plus bruyants, plus polluants et amplifient la congestion du trafic. Naturellement, les petits véhicules trouvent dans l'électromobilité une solution adaptée aux problématiques urbaines. De fait, le retour de la voiture électrique sur le devant de la scène est une opportunité pour le secteur du TMV. Mais l'utilisation d'utilitaires électriques pour les livraisons urbaines nécessite de nouveaux schémas logistiques, notamment concernant les infrastructures de recharge des accumulateurs.

Fondamentalement, l'utilisation de petits véhicules répond aux exigences d'accessibilité des centres urbains, de limitation des nuisances de trafic, ainsi qu'aux exigences de limitation de la pollution dans les zones les plus peuplées, car les petits porteurs peuvent facilement être électrifiés. En contrepartie, la faible capacité des véhicules engendre une multiplication des tournées, ce qui dégrade la rentabilité.

1.4.2.2 Sensibilité aux conditions de circulation et de livraison

Le contexte urbain réduit l'efficacité des véhicules, en raison des conditions de circulation et de stationnement difficiles. Les mesures de restriction d'accès au centre-ville obligent les entreprises à utiliser plusieurs véhicules, au détriment du taux de chargement. Les mauvaises conditions de circulation font que la réalisation des tournées s'éloigne de la planification initiale et rendent celle-ci inefficace.

Généralement négligées dans les études, les opérations de *déchargement* des marchandises en ville posent également problème. Celles-ci sont souvent effectuées dans des conditions non réglementaires, par exemple en stationnant des véhicules à l'extérieur des aires de chargement désignées, dans les rues piétonnes, sur les voies réservées aux autobus, sur les pistes cyclables ou sur les trottoirs. Ces comportements génèrent des conflits avec l'ensemble des usagers de l'espace public (y compris avec les piétons en cas de stationnement sur le trottoir).

A l'évidence, les mauvaises conditions de circulation et de livraison en ville ont moins de prise sur les petits véhicules, et la planification optimale des tournées gagne en robustesse eu égard à l'utilisation de gros véhicules.

Nous proposerons donc une modélisation assez précise des opérations de stationnement et de déchargement pour les intégrer dans notre modèle de planification logistique avec petit véhicule.

1.4.2.3 Localisation des ELU

Les véhicules légers sont capables d'assurer des tournées rapides. Cette flexibilité est cruciale dans le cadre de l'articulation région/ville en corrélation avec des ELUs situés en périphérie de la ville. Mais ces infrastructures positionnées à l'extérieur des villes pour des raisons d'accès peuvent se montrer difficiles à positionner du point de vue de la distribution intra-urbaine. Pour pallier ce problème, les grands messagers internationaux ont très largement recours à une sous-traitance spécialisée, installée en proximité des centres-ville et exploitant des flottes dédiées au TMV. Les avantages d'une telle structuration logistique ont été présentés dans la littérature (Taniguchi and Van der Heijden, 2000), (Crainic et al, 2009). Nous pouvons citer le cas de Fedex qui, en 2010, faisait livrer en électrique à Lyon, Bordeaux, Toulouse, Rennes, Nice, Montpellier et Orléans avec différents transporteurs régionaux dont Becycle, La Petite Reine et Transport écologique du midi, pour un total de 63.000 livraisons en triporteur, dégageant une économie de 6.000 litres et 15 tonnes de gaz à effet de serre (Chaussin, 2011).

1.4.2.4 Electromobilité

Si toutes les parties prenantes du TMV sont conscientes de l'intérêt du petit véhicule électrique dans les centres villes, seules quelques entreprises spécialisées ont commencé à équiper leurs flottes. En effet, les retours d'expérience sur l'exploitation de flottes électriques sont encore peu nombreux. Malgré les efforts de certains constructeurs, les coûts d'acquisition restent supérieurs à ceux des véhicules carbonés et les coûts d'exploitation sont encore difficiles à déterminer.

1.4.3 Contextualisation du sujet de thèse

Au sein de la problématique générale du TMV, nous avons isolé une problématique spécifique d'utilisation de petits véhicules orbitant autour d'un ELU pour réaliser la distribution du dernier kilomètre en ville. Dans cette idée, un maillage de la zone urbaine, associé à une stratégie collaborative entre opérateurs, permet à un transporteur de déposer les marchandises dans un ELU pour limiter la pénétration des gros camions en centre-ville, tandis que les livraisons en ville sont assurées par des véhicules de faible gabarit, idéalement à propulsion électrique.

Nous nous intéressons au rôle d'un opérateur logistique en charge d'optimiser un service de TMV dans le cadre des réglementations publiques et des exigences des collectivités locales.

Compte tenu de la diversité des contextes urbains, des parties prenantes et des types de marchandises, nous ne chercherons pas à proposer une solution unique satisfaisant l'ensemble des problématiques de l'approvisionnement de la ville. Notre objectif principal est d'examiner les conditions qui rendent pertinents les schémas reposant sur des véhicules faiblement capacitaires.

1.4.3.1 La demande de livraisons en ville

Si chaque ville présente une configuration propre à l'histoire de son développement, nous pouvons identifier quelques invariants de la demande en livraisons et de la structure commerciale du centre-ville.

Le commerce de gros et les établissements à caractère industriel génèrent des mouvements de marchandises très importants, mais ceux-ci demeurent en règle générale extérieurs au centre-ville. Par ailleurs, le secteur tertiaire n'est pas le plus générateur de mouvements. En effet, selon les enquêtes du Laboratoire LAET, le transport de marchandises en centre-ville est principalement dû aux activités liées au commerce et à l'artisanat (Figure 1-7).

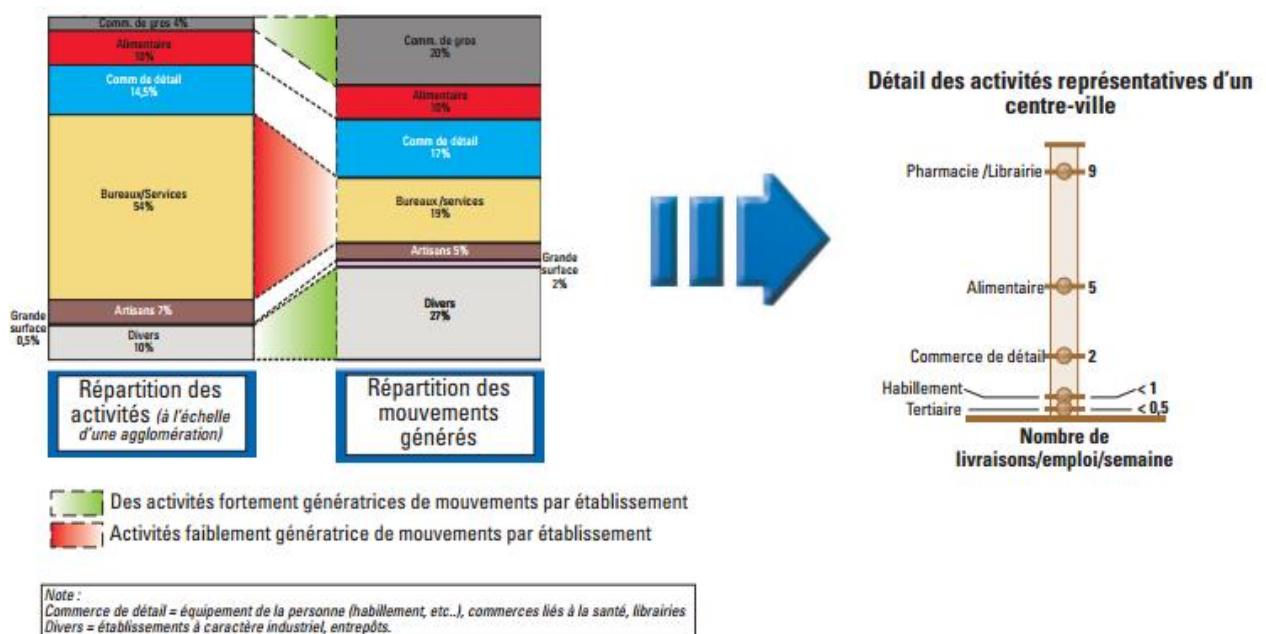


Figure 1-7 : Structure commerciale et mouvements par activité dans un centre-ville
 (Enquête Nationale Transport de Marchandises en Ville, LET)

1.4.3.2 L'offre de transport

Nous retiendrons pour le transport de marchandises en ville 3 modes de gestion usuels :

- Le transport pour compte d'autrui, activité effectuée par des transporteurs professionnels et qui s'apparente à une prestation de service,
- Le transport compte propre destinataire, activité de transport effectuée par un commerçant pour son propre approvisionnement (enlèvement chez un grossiste),
- Le transport compte propre expéditeur, activité de transport d'un grossiste approvisionnant des commerçants avec sa propre flotte.

Contrairement au transport en compte propre, qui effectue principalement des traces directes entre deux acteurs, le compte d'autrui s'organise quant à lui autour de tournées pour réduire les coûts de prestation (Figure 1-8).

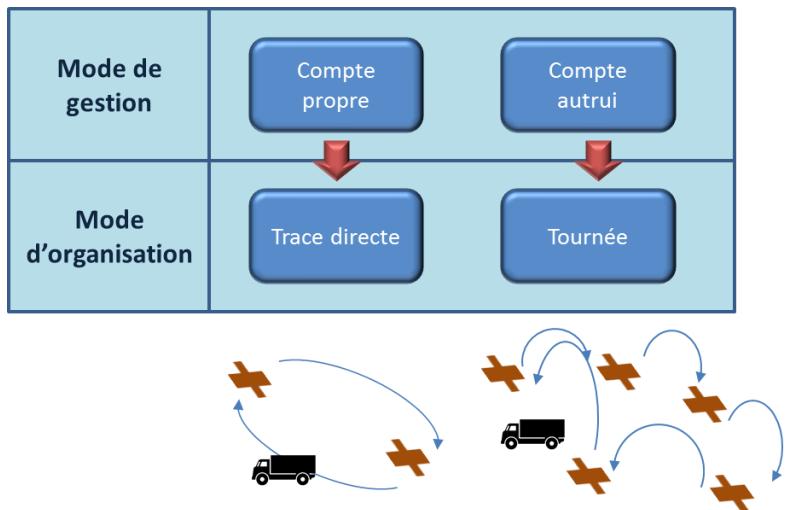


Figure 1-8 : Mode de gestion / Mode d'organisation

Il est tout à fait possible de modéliser chacun des modes de gestion. Cependant, les deux derniers n’obéissent pas à des modalités très structurées. Aussi nous intéresserons-nous au transport pour compte d’autrui, qui répond à une logique systémique. Plus particulièrement, nous considérons les activités de *messagerie*, c'est-à-dire la distribution de petits paquets, qui constitue l'une des branches majeures du TMV et qui connaît actuellement une forte croissance en raison de l'accélération du commerce électronique. L'activité de messagerie réalise le groupage des colis et leur tri à des fins d'acheminement vers des zones précises où s'organise la distribution. Ce choix est orienté par le positionnement de notre recherche sur le TMV de colis de taille compatible avec un petit gabarit de véhicule.

1.4.3.3 L'acte de livraison

Enfin, la notion de livraison et les contraintes associées méritent d'être précisées. En droit commercial, l'acte de livraison fait référence à « la remise physique de la marchandise au destinataire ». En droit public, l'acte de livraison désigne l'arrêt du véhicule sur l'espace public pour le chargement et le déchargement de marchandises. Ce distinguo explique le flou qui entoure l'attribution des zones de livraison dans la ville et les abus qui peuvent être observés quant à leur utilisation. Dans les faits, ces emplacements sont utilisés par différents types de véhicule, y compris les véhicules des particuliers arguant d'une activité de chargement/déchargement plus ou moins réelle. La durée de cette activité n'étant pas fixée, il est difficile pour les autorités locales de verbaliser les abus.

Nos travaux doivent donc intégrer le fait qu'une aire de stationnement n'est pas systématiquement disponible pour permettre une activité de chargement/déchargement. En effet, un véhicule utilitaire qui ne trouve pas de place de stationnement aura tendance à se garer en double file, occasionnant une gêne pour le trafic. Ce phénomène est amplifié sur certains créneaux horaires (cf. Figure 1-9) pendant lesquels particuliers et transporteurs se partagent l'espace urbain (Delaître, 2008).

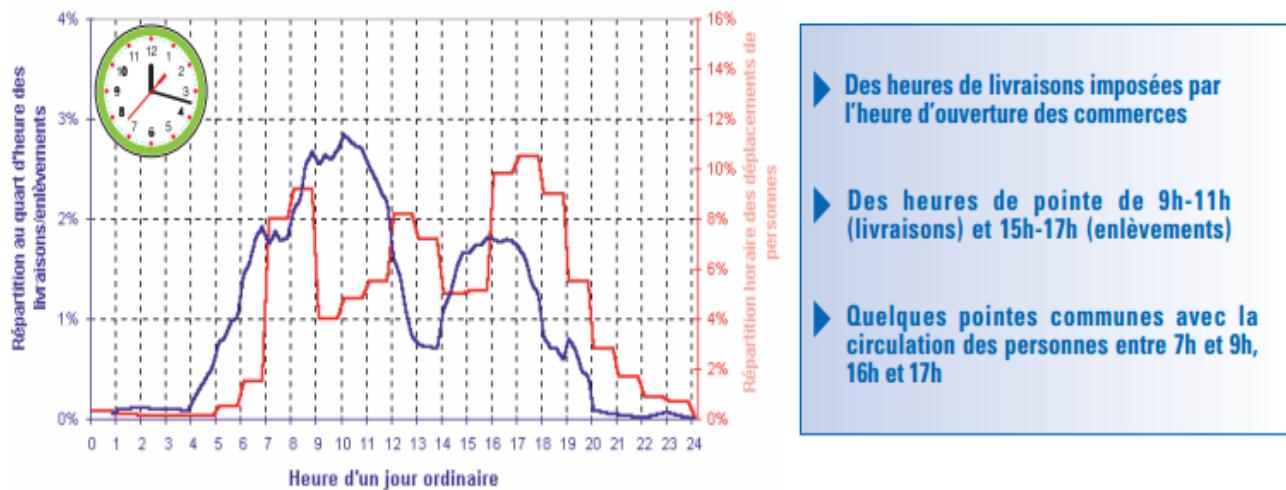


Figure 1-9 : Nature des déplacements en centre-ville (Delaître, 2008)

L'analyse de l'incidence de la disponibilité des stationnements sur les coûts de livraison en centre-ville montre qu'un livreur peut avoir intérêt à laisser son véhicule en double voie, au risque d'être verbalisé (Figgliozi, 2017). Nous supposerons, pour notre part, l'existence d'une verbalisation dissuasive obligeant les chauffeurs à stationner sur une aire autorisée de livraison, même si celle-ci est relativement éloignée du lieu de chargement/déchargement. Nous caractérisons l'acte de livraison par 5 délais distincts :

- Le temps de parking, nécessaire à la recherche d'une aire de livraison libre, proche du lieu de destination de la marchandise,
- Le temps de déchargement de la marchandise,
- Un premier temps de marche, nécessaire au livreur pour aller de son véhicule à l'adresse du destinataire,
- Le temps de remise de la marchandise au destinataire,
- Un deuxième temps de marche, nécessaire au livreur pour revenir à son véhicule.

En ajoutant le temps de transport au temps de livraison, nous reconstituons le temps de transport entre deux points d'une tournée (Figure 1-10)



Figure 1-10 : Décomposition des temps entre deux points d'une tournée

Dans cette représentation, seuls le temps de remise de la marchandise et le temps de déchargement marchandise pourraient s'apparenter à une constante, alors que tous les autres temps dépendent de la distance et de la fluidité du trafic ou bien encore de la combinaison de ces deux facteurs.

1.5 Conclusion

La problématique du TMV est fortement conditionnée par la congestion du trafic qui s'aggrave et devient critique, surtout dans les grandes villes (Les Conseillers, 2012), où la durée des déplacements quotidiens atteint des niveaux sans précédent. Mais les villes de taille moyenne sont confrontées, elles aussi, à la variabilité du trafic au cours d'une même journée, lié au partage de l'espace routier urbain par les véhicules individuels et par les transporteurs.

En rapport avec une stratégie d'amélioration intégrant des objectifs de minimisation des nuisances écologiques et sociétales dans le cœur des villes, nous avons extrait de la problématique générale du TMV un schéma de distribution organisé autour d'un ELU et d'un véhicule faiblement capacitaire, idéalement électrique, s'opposant au schéma classique reposant sur un véhicule de grande capacité, peu adapté au centre-ville.

La mise en œuvre d'un TMV basé sur l'utilisation d'un petit gabarit de véhicule doit constituer une solution offrant un bon compromis entre les attendus de productivité, plutôt à l'avantage des gros gabarits, et les exigences d'acceptabilité écologique et citoyenne des véhicules de livraison en centre-ville. Un tel compromis suppose une compréhension des différents facteurs impactant la performance logistique, notamment le facteur capacitaire du véhicule, étude qui constitue notre sujet de recherche.

Chapitre 2 :

2. Etat de l'art

2.1 Introduction

Dans un premier temps, nous documentons le système de logistique urbaine, qui repose sur la préparation de tournées dans un ELU (Espace Logistique Urbain). L'analyse de ce type d'infrastructure nécessite préalablement de décrire les flux de marchandises qui y transittent.

Dans un second temps, nous examinons les travaux qui ont orienté notre recherche du point de vue de l'optimisation des tournées de livraison, ou Vehicle Routing Problem (VRP), en nous référant à quatre types principaux de problèmes: VRP avec temps de trajet dépendants de la période de la journée, VRP multi-niveaux, VRP dynamique et Multi Trip VRP.

2.2 Le problème VRP et le contexte urbain

2.2.1 Modélisation des flux de transport

Une classification détaillée des mouvements de marchandises en ville suivant la définition de (Segalou, et al., 2004) permet d'identifier les flux de marchandises en ville sur lesquels portent nos travaux de recherche.

Les *flux inter-établissements* caractérisent les mouvements associés au ramassage et à la livraison (Pickup and Delivery) de marchandises liés aux activités économiques de la zone urbaine. Trois origines peuvent être identifiées pour ces flux (Routhier, et al., 2007):

- Transport de tiers: pour rationaliser leur flux, les prestataires s'appuient sur une stratégie de remplissage des camions. Les exemples typiques sont les services de livraison de colis, les services de livraison express, la distribution de supermarchés et de magasins moyens, mais aussi la distribution de restaurants, etc.
- Transport en compte propre: cette catégorie se réfère aux transports effectués directement par les producteurs, les artisans et les sociétés de distribution, sans impliquer de transporteur professionnel. Les itinéraires concernés sont en général de petits circuits et ne comportent qu'un seul point de départ. Les artisans et les petites entreprises ont souvent un seul véhicule. Dans ce cas, les problèmes d'optimisation de transport peuvent être modélisés comme des problèmes du voyageur de commerce, ou Travelling Salesman Problem (TSP), dans lequel un même véhicule doit visiter une et une seule fois un ensemble de clients. Pour les moyennes et grandes entreprises de distribution disposant de plusieurs véhicules, les modèles VRP sont une généralisation des problèmes de TSP à plusieurs véhicules et peuvent donc s'appliquer.
- Transport en compte propre du destinataire: il s'agit par exemple de sociétés de distribution qui collectent des biens chez des fournisseurs ou des détaillants, des métiers de bouche qui s'approvisionnent sur les marchés ou les grandes surfaces professionnelles. Ici encore, les flux généralement mono-véhicule et les itinéraires de ramassage nous ramènent à des problèmes TSP.

Les *flux générés par le client final* correspondent aux mouvements associés aux besoins des consommateurs. On retrouve deux catégories principales:

- Les mouvements liés aux achats : ces mouvements sont réalisés par les véhicules privés de particuliers (Gonzalez-Feliu, et al., 2010). Ces flux ne sont pas optimisés, dans la mesure où le comportement des usagers n'est pas toujours rationnel.
- Les livraisons à domicile : les mouvements sont ici opérés par un professionnel pour compte d'autrui ou en compte propre, mais à destination de particuliers. Dans ce cas, les routes doivent être optimisées. Lorsque les biens sont prélevés dans les magasins et livrés à domicile, la distribution prend la forme d'un problème TSP pour trouver la tournée le plus courte.

Les *flux générés par la gestion urbaine* sont des flux liés aux travaux de développement d'une ville, à la maintenance des équipements publics et à d'autres besoins fonctionnels de la ville. De nature et de caractéristiques diverses, ces mouvements sont associés à la construction et aux travaux publics, ou à la collecte des déchets. Ces flux peuvent être optimisés avec des modèles de routage à arcs (Pia, et al., 2006), ou par des modèles de pick-up complexes et des VRP de livraison. Le transport de déchets dangereux conduit au développement de VRP spécifiques, avec des objectifs de minimisation des risques (Tarantilis, et al., 2001).

Aussi la problématique du TMV rentre-t-elle dans le cadre du VRP, tel que défini par la communauté scientifique, mais en s'intéressant aux mouvements de marchandises opérés par des professionnels du transport qui s'appuient, ou devraient s'appuyer, sur des approches d'optimisation pour rationaliser leur activité. Les flux logistiques que nous considérons dans notre thèse au sein d'une typologie des flux du TMV apparaissent en vert dans le Tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Typologie du TMV

| Flux de TMV | Origine | Exemple |
|-------------------------------------|--|---|
| Flux Inter-établissements | Générés par le transport de tiers | - Livraison des supermarchés - Livraison des petits commerces |
| | Générés par les expéditeurs en compte propre | - Livraison des artisans et petits producteurs |
| | Générés par les destinataires en compte propre | - Réapprovisionnement des artisans |
| Flux générés par le client final | Générés par les particuliers pour les achats | - Trajets associés aux achats ménagers quotidiens |
| | Générés par les livraisons à domicile | - Livraisons à domicile pour des achats à distance |
| Flux générés par la gestion urbaine | Générés par les organismes rattachés à la collectivité | - Bâtiments et travaux publics - Maintenance des réseaux - Collecte des ordures ménagères - Pompiers |

2.2.2 L'ELU comme élément d'optimisation du schéma logistique urbain

Les municipalités doivent faire face à une croissance constante du transport des marchandises en ville, liée à l'augmentation de la population urbaine, qui contribue à la congestion du trafic, à la pollution atmosphérique, à la pollution sonore et aux accidents dans les centres urbains. Au cours des dernières années, des restrictions de trafic ont été introduites dans la plupart des grandes villes européennes, nécessitant une adaptation des modes de transport en milieu urbain. De telles limitations empêchent les gros camions d'entrer dans les centres urbains, limitent le nombre de voyages qu'un véhicule est autorisé à faire dans des zones spéciales et encouragent l'utilisation de véhicules écologiques ou écologiques généralement moins gros. Les entreprises logistiques doivent s'adapter à cette nouvelle réglementation et anticiper des restrictions futures plus sévères. L'une des solutions à ces contraintes est la mise en œuvre d'Entrepôts Logistiques Urbains (ELU), où le transbordement, le dégroupage et la consolidation de chargements sont possibles (Boudouin, 2006). Un ELU peut être considéré comme « un ensemble d'équipements destinés à organiser la circulation des marchandises par la mise en œuvre de points de

rupture de charge » (Routhier, et al., 2002) et se définit comme « une entité logistique permettant de gérer les flux qui pénètrent ou sortent de la ville en les faisant transiter par un site où sont groupées ou dégroupées les marchandises avant distribution finale ». Nous retiendrons cette définition en précisant que la distribution finale est réalisée sous forme de tournées.

Selon le lieu d'implantation et le schéma dans lequel il s'insère, l'ELU peut avoir différentes fonctions (Raimbault, et al., 2010). Il peut s'agir d'un simple entrepôt, ou d'un ensemble d'implantations coordonnées dans une zone d'activité, ou encore d'un site spécialement aménagé et multimodal (Boudouin, 2006) (Boudouin, 2009).

Selon (Abdelhaï, 2017), les avantages à insérer un ELU dans le système TMV sont multiples :

- La possibilité de transborder la charge de véhicules lourds vers des véhicules plus petits et plus respectueux de l'environnement utilisant l'énergie électrique ou le gaz naturel, ou des tricycliques et bicyclettes.
- L'utilisation de petits véhicules permettant d'éviter et de réduire les frais d'une dégradation très rapide de la chaussée par les poids lourds. Moins encombrants, les petits véhicules s'adaptent aussi aux contraintes urbaines par une moindre gêne visuelle.
- L'implication d'un nombre réduit d'acteurs logistiques éco-responsables en milieu urbain permet de faire respecter les différentes réglementations et de diminuer le conflit d'utilisation des aires stationnements et de la voirie en général.
- L'organisation intra-urbaine des flux permet une meilleure planification visant à la réduction du nombre des tournées des véhicules de livraison et des kilomètres parcourus dans l'espace urbain.
- L'amélioration du taux de chargement des véhicules de livraison urbaine.
- La réduction de la congestion urbaine, surtout durant les heures de pointe.
- Une meilleure satisfaction des clients par l'amélioration du taux des livraisons à temps.
- Une meilleure flexibilité dans la gestion des commandes et des stocks dans les magasins des clients finaux (commerces de la ville).
- La mise en oeuvre d'un partenariat durable avec les autorités publiques, permettant d'éviter des mesures drastiques de limitation du trafic en ville, telles que péage urbain ou taxe kilométrique.

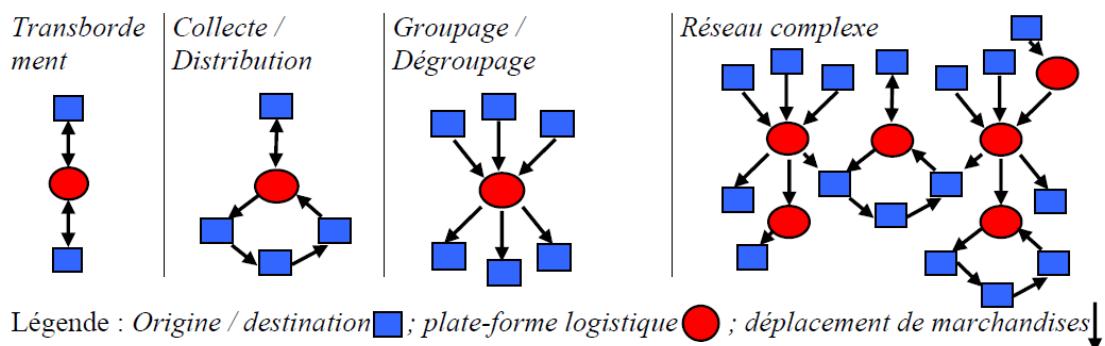


Figure 2-1 : Réseaux logistique utilisant des plateformes, (Raimbault et al 2010)

La Figure 2-1 illustre la variété des organisations logistiques utilisant des plateformes.

L'usage d'ELUs peut amener une certaine complexité dans la gestion des flux et l'optimisation du flux de transport. Il conduit au développement de modèles spécifiques, dont font partie :

- Les problèmes de localisation des entrepôts sous contrainte de routage, souvent connus dans la littérature sous le nom de Location Routing Problem (LRP) dont on peut trouver un état de l'art dans (Prodhon et al., 2014) (Drexl et al., 2015).
- Les problèmes de livraison à deux échelons: un premier échelon consiste à acheminer les marchandises des ELUs situés en périphérie des villes vers des points spécifiques appelés satellites, à partir desquels les marchandises peuvent être prises en charge par d'autres véhicules et livrer aux différents clients. Ces problèmes sont appelés Two Echelon Vehicle Routing Problems (Cuda et al., 2015) et peuvent parfois être couplés à des problématiques de localisation d'entrepôt (Crainic et al., 2010).
- Dès lors que des plateformes sont disponibles, le transbordement peut être vu comme un levier d'optimisation. Différents travaux existent dans la littérature proposant des approches exactes (Rais et al., 2014), ainsi que des méta heuristiques pour résoudre les problèmes de manière satisfaisante (Danloup et al., 2018). Notons que les travaux s'intéressant au Cross-Docking s'apparentent parfois à des problèmes de transbordement entre véhicules (Van Belle et al, 2012).

Le concept de Centre de Distribution Urbaine nous intéresse tout particulièrement, en tant que forme spécifique d'ELU positionné en centre-ville. En réalité, les flux-amont d'un ELU n'étant pas particularisés par le contexte urbain, nous ne nous intéressons dans le cadre de cette thèse qu'aux flux-aval irrigant la ville. Par ailleurs, si la localisation de l'ELU est un paramètre pris en compte dans notre modélisation du problème logistique, il ne s'agit pas de l'objet central de notre recherche. En effet, notre intérêt se porte principalement sur la prise en compte des contraintes spécifiques liées au milieu urbain et l'adaptation du gabarit de véhicule à ces contraintes dans l'évaluation des performances du processus de livraison de marchandises.

2.2.3 Généralités sur les problèmes de routage

La Figure 2-2**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** représente une configuration classique de type VRP (Toth, et al., 2002), (Golden, et al., 2008). Si les marchandises doivent être collectées et livrées, le VRP devient Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery (VRPPD).

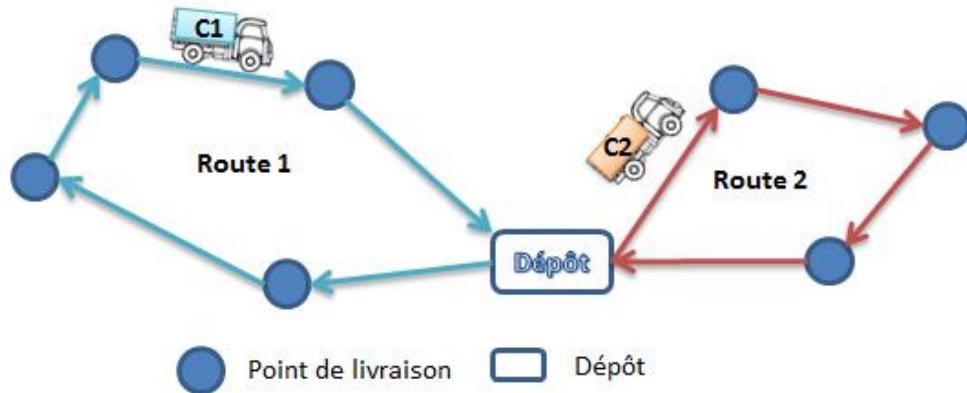


Figure 2-2 : Schématisation d'un VRP

Le VRP Multi Dépôt (MDVRP) et le VRP périodique (PVRP) sont des extensions possibles du problème de livraison de marchandises. Dans le problème MDVRP, les véhicules sont situés dans différents dépôts (Karabatic et al. 2015), tandis que dans un énoncé PVRP (Francis et al., 2006), les clients doivent être visités un certain nombre de fois (par ex. deux fois par semaine) pendant une période donnée.

Notons que les mouvements en compte propre ainsi que les flux générés par les voitures privées peuvent être associés à des problèmes de TSP (Gutin, et al., 2006). Dans ce cas, la plupart du temps, les voyages ne sont pas ou peu optimisés.

2.3 Focus sur les problèmes de VRP pour le TMV

Nous passons ici en revue les différentes familles de VRP en rapport avec l'activité de TMV. L'une des caractéristiques propres du TMV est la sensibilité du temps de trajet à la période horaire de la journée, due aux effets de la congestion urbaine. Ces problèmes sont connus de la littérature sous le nom de Time-Dependent VRP.

Nous aborderons également les problèmes VRP de type multi niveaux, qui permet d'intégrer l'existence d'un ELU avec changement de flotte de véhicules. Le VRP dynamique sera évoqué afin de prendre en considération un contexte changeant où les clients se font connaître « au fil de l'eau ». Enfin, nous considérerons les problèmes VRP multi trajets, où plusieurs tournées sont réalisées, la plupart du temps par un même véhicule, dans un contexte urbain.

2.3.1 TD-VRP: Time-Dependent Vehicle Routing Problem

Le problème traditionnel de routage des véhicules considère que les temps de déplacement entre les lieux à visiter dépendent uniquement des distances. En réalité, dès lors que le phénomène de congestion est pris en compte, la vitesse moyenne des déplacements varie selon le moment de la journée et peut biaiser l'optimisation du plan de distribution (Hill, et al., 1992) (Cattaruzza, et al., 2014). Dans (Ehmke, et al.,

2012), les auteurs évaluent à $\pm 20\%$ l'erreur commise dans l'évaluation de la durée globale du plan de livraison lors des heures de forte congestion.

De l'étude de cas rapportée dans (Maden, et al., 2010), il ressort que 65% des routes planifiées sur la base d'un temps de déplacement constant (sans congestion) étaient en réalité impactées par les phénomènes de congestion, conduisant à un dépassement de 57 minutes du temps de travail maximum autorisé de 10 heures. Il a été aussi observé sur ce cas d'étude que, en prenant en compte la dépendance des temps de déplacement à l'heure de la journée, l'optimisation de la tournée permettait d'économiser 7% des émissions de CO₂.

Néanmoins, l'objectif de réduction des émissions peut s'avérer difficile à concilier avec les objectifs économiques dans l'optimisation des tournées. Dans (Kuo, 2010) un critère de minimisation des émissions incite les véhicules à éviter les embouteillages et les heures de pointes synonymes de consommation de carburant, avec comme résultat final d'accroître de 23,37% le temps global des tournées de transport et de 40,26% la distance globale parcourue.

Dans (Cattaruzza, et al., 2014), il est fait allusion à la prise en compte tardive, à partir des années 90, d'un temps de déplacement fonction de la période de la journée. Avant cette époque en effet, la difficulté de collecter des données et les limitations informatiques du stockage de ces données restaient un frein à l'expérimentation (Hill, et al., 1992). Dans (Van Woensel, et al., 2008), les vitesses moyennes de déplacement ont pu être établies aux différentes heures de la journée, à partir des données de trafic recueillies par le gouvernement flamand. Les résultats publiés dans (Ehmke, 2012) montrent comment l'inclusion du temps dans la matrice des distances, rendant ces données non stationnaires, compliquent la résolution exacte ou approchée du problème d'optimisation.

Aujourd'hui, la collecte de données soulève encore des difficultés pratiques. Les heures de pointe peuvent être connues, mais les temps de déplacement dans le réseau de transport peuvent être affectés de manière tout à fait variable (Fleischmann, et al., 2004). Pourtant, il est permis d'espérer que les technologies mobiles les plus récentes facilitent la collecte des temps de déplacement : les mouvements de téléphones mobiles ou les capteurs installés sur les flottes de taxis par exemple peuvent être suivis, en vue de fournir des informations en temps réel et des sources de données fiables sur le trafic (Ehmke, 2012).

Nous avons insisté ici sur la difficulté de mise en œuvre pratique du TD-VRP, qui requiert une fiabilité des données. Pour autant, cette condition semble indispensable à une planification performante de la tournée des véhicules en milieu urbain.

2.3.1.1 Méthodes de résolution du TD-VRP

La particularité du problème TD-VRP est qu'un même trajet peut prendre plus ou moins de temps selon l'heure à laquelle le véhicule circule (Kok, et al., 2012).

Différentes heuristiques et méta-heuristiques ont été proposées dans la littérature pour résoudre ce problème. Parmi elles, citons :

- la méthode modifiée de Clark Wright et l'heuristique 2-opt présentée par (Hill, et al., 1992)
- les heuristiques « Nearest-Neighbor » et plan de coupe « Cutting Plane» (Malandraki, et al., 1992)
- l'heuristique LS itéré « Local Search Algorithm » de (Hashimoto, et al., 2008) ou (Kuo, 2010),
- les colonies de fourmis « Multi-Ant-Colony» (Donati, et al., 2008).
- la méthode Tabou sous des formes variées, (Ichoua, et al., 2003) (Kuo, et al., 2009) (Maden, et al., 2010).

Une autre direction est explorée dans (Soler, et al., 2009), où le TD-VRP avec fenêtres de temps est transformé en un VRP sans fenêtres de temps avec flotte de véhicule hétérogène.

2.3.1.2 Modélisation du temps de trajet et de service

Pour prendre en considération la variation des temps de trajet selon le contexte horaire, la plupart des approches de la littérature s'appuient sur une discréétisation du temps journalier en intervalles de temps. Ces derniers peuvent être de longueur différente (Fleischmann, et al., 2004), se voir attribuer une vitesse moyenne (Ichoua, et al., 2003), (Donati, et al., 2008) ou un temps de déplacement spécifique (Fleischmann, et al., 2004).

Dans (Hill, et al., 1992), la variation des temps de trajet est modélisée par l'attribution d'une vitesse spécifique à chaque sommet du graphe pour chaque intervalle de temps. Cette vitesse peut être considérée comme la vitesse moyenne pour une zone géographique proche du nœud pendant l'intervalle de temps considéré et ainsi conduire à l'estimation du temps de déplacement.

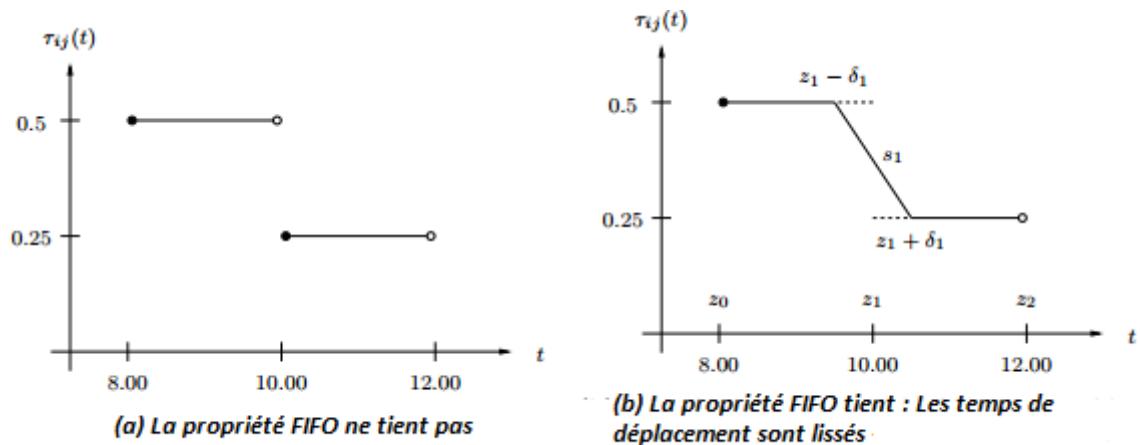


Figure 2-3 : Modélisation du temps de trajet en fonction de la période horaire

L'inconvénient d'une modélisation discontinue du temps d'un trajet est de ne pas garantir l'ordre FIFO des passages des véhicules sur un trajet donné. En effet, le modèle pourra, en raison d'une période horaire plus favorable, affecter à un véhicule un temps de trajet plus faible qu'au véhicule qui le précède, ce qui peut

conduire à inverser artificiellement l'ordre de passage des véhicules au sommet suivant. En vue de rétablir la propriété FIFO du passage des véhicules, certains auteurs (Van Woensel, et al., 2008) (Fleischmann, et al., 2004) (Cattaruzza, et al., 2015) pallient ce défaut de modélisation par une caractérisation lissée du temps de trajet (Figure 2-3).

Quant à la modélisation du temps de service, qui désigne la durée de l'approche du site et de la livraison, la littérature relate deux écoles, l'une déterministe, et l'autre, plus rare, stochastique. Dans le cas déterministe, les temps de service sont fixes (Ben Mohamed, et al., 2017), (Ehmke, et al., 2012), (Kuo, et al., 2009) et seul le temps de trajet est fonction de la période horaire. Dans le cas d'une modélisation stochastique (Li, et al., 2010), (Miranda, et al., 2016), les temps de services sont conditionnés par une demande stochastique des clients.

Pour notre part, nous considérons dans la présente thèse que non seulement les temps de trajet, mais aussi les temps de service, sont fonction du contexte horaire, partant de l'observation que la congestion du trafic peut affecter significativement le temps que met un véhicule à se garer.

2.3.2 Multi-Level VRP

Dans le contexte de la logistique urbaine, l'intégration de plateformes ELUs intermédiaires avant d'atteindre les destinations finales conduit à un modèle Multi-Level VRP (Figure 2-4).

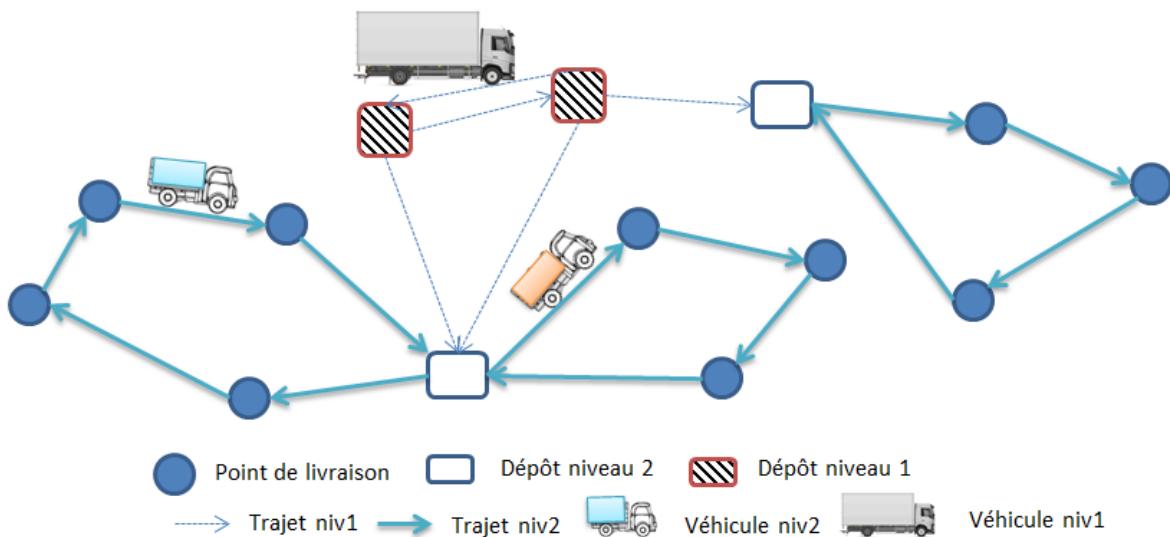


Figure 2-4 : Illustration du Multi-Level VRP

Le système logistique multi-niveaux le plus étudié est le VRP à deux échelons (2E-VRP), dans lequel le premier niveau consiste à approvisionner un ELU à partir de sources de marchandises (usines, ports, aéroports) moyennant des véhicules de niveau 1, le fret étant ensuite consolidé ou éclaté dans l'ELU pour être livré par des véhicules de 2^{ème} niveau aux clients finaux. Dans (Crainic, et al., 2009), il est proposé un modèle qui généralise ce système sur la base de schémas logistiques simplifiés.

Le problème de routage à deux échelons (2E-VRP) amène à considérer un coût d'utilisation des plateformes logistiques, l'objectif pouvant alors être de minimiser les coûts cumulés d'exploitation et de routage. Les livraisons fractionnées sont interdites (Nguyen, et al., 2012) ou permises (Jepsen, et al., 2013). Le problème 2E-VRP conduit à résoudre séquentiellement deux problèmes VRP mono-niveau plus simples (Crainic, et al., 2008), (Perboli, et al., 2011). Une version améliorée du 2E-VRP prévoit un partage des ressources de stockage et de transport pour offrir une flexibilité opérationnelle entre les niveaux intra et extra-urbain (Crainic, et al., 2012). Cette organisation intègre des sites satellites de consolidation et/ou de transbordement, et ce dans les deux sens en permettant aussi le transfert de marchandises entre clients et de l'intra-urbain vers l'extra-urbain.

Une méthode exacte du problème 2E-VRP est proposée dans (Baldacci, et al., 2013) sous contrainte de capacité des véhicules. Le plus souvent, néanmoins, la résolution du problème 2E-VRP fait appel à une adaptation d'heuristiques tels GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), rebranchement de chemins « Path-Relinking » (Crainic, et al., 2011), recherche adaptative de voisinage (Hemmelmayr, et al., 2012), ou Branch-and-Cut (Jepsen, et al., 2013).

2.3.3 DVRP : VRP dynamique

Dans un contexte de planification dite statique, toutes les données nécessaires à la définition du problème de planification optimale des tournées de véhicules sont connues en avance, et restent constantes par la suite. Dans le problème de VRP dynamique (DVRP) (Gendreau, et al., 1999), (Ichoua, et al., 2000), (Potvin, et al., 2006), (Psaraftis, 1995), les informations utilisées pour le calcul du plan sont amenées à évoluer, une fois les véhicules lancés sur la route. Notons que, dans un contexte urbain, les informations dynamiques peuvent porter sur les demandes de livraison ou d'enlèvement, les temps de déplacement, les temps de service comme dans les cas présentés par (Fleischmann, et al., 2004) (Potvin, et al., 2006).

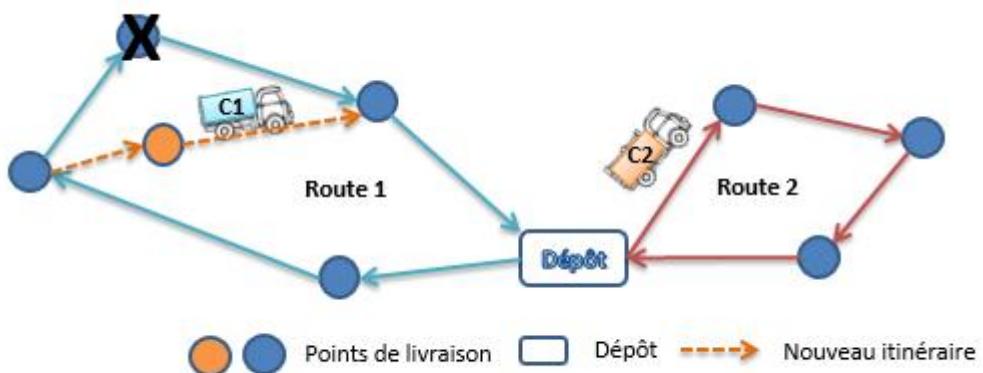


Figure 2-5 : Illustration du DVRP

Dans une autre acceptation du terme, un VRP est dit dynamique si les données d'entrée (temps de déplacement, demandes, ...) dépendent explicitement de la période horaire, sinon il est qualifié de statique (Ghiani, et al., 2003).

L'intérêt pour le DVRP a rapidement augmenté avec le développement des technologies de la communication comme le GPS, la téléphonie mobile, etc. et les supports associés qui offrent l'opportunité de collecter et de traiter les informations en temps réel. Le terme Real Time se substitue d'ailleurs au terme dynamique dans la littérature pour exprimer le fait que l'activité du livreur et de son véhicule peut être suivie en permanence. Ce « lien » doit rendre plus efficace le pilotage de cette activité.

Dans (Güner, et al., 2012), il est souligné que plus de 50% des retards dans le temps de déplacement sont causés des événements réellement imprévisibles, face à quoi l'utilisation d'informations en temps réel sur la congestion peut produire des gains substantiels (Kim, et al., 2005). Ainsi, une méthode dynamique pour le ramassage et la livraison de marchandises dans le centre-ville de Barcelone a été définie (Grzybowska, et al., 2012).

2.3.4 Les voyages multiples

Le problème de routage de véhicules multi-voyages « Multi-Trip VRP » (MTVRP) n'a été étudié que depuis deux décennies. Son intérêt a récemment augmenté dans le contexte du TMV, qui limite la capacité des véhicules en raison de l'étroitesse des rues ou de dispositions réglementaires.

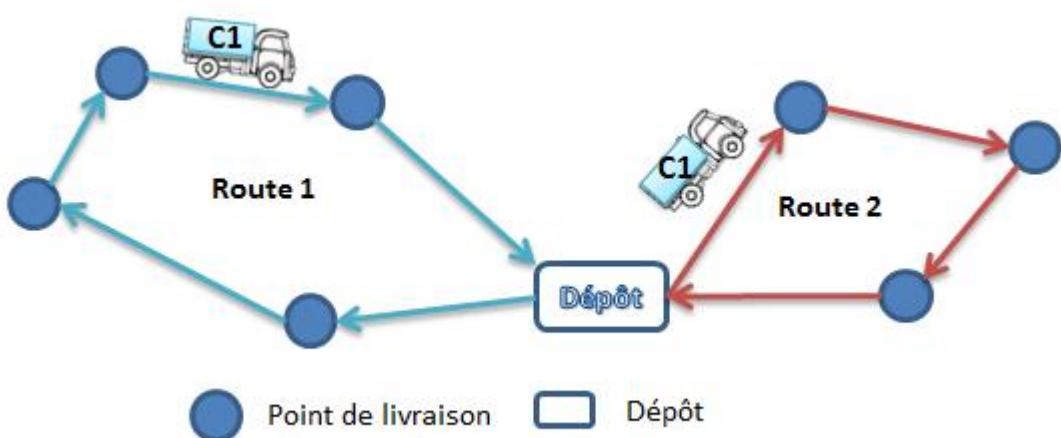


Figure 2-6 : Illustration d'un Multi Trip VRP à un véhicule

2.3.4.1 MTVRP

Le MTVRP est une variante du VRP autorisant le ou les véhicule(s) à effectuer plus d'une tournée pendant une journée de travail (Figure 2-6).

Les auteurs utilisent le plus souvent une heuristique, de type Bin Packing (Fleischmann, 1990) ou Tabou (Taillard, 1993), (Taillard, et al., 1996) pour déterminer les chargements et les affecter aux véhicules. La

recherche Tabou est une méta heuristique d'optimisation itérative présentée par F. W. Glover en 1986. Les tournées de véhicules qui forment les solutions VRP sont stockées dans une liste. À partir de cette liste, un sous-ensemble d'itinéraires est sélectionné et une solution MTVRP est construite. Dans (Petch, et al., 2003), un algorithme minimise le temps maximal d'une tournée de véhicules, puis une liste de solutions est construite à l'aide d'une heuristique Bin Packing. Dans (Olivera, et al., 2007), les auteurs dressent une liste d'itinéraires issus d'un VRP, étiquetés chacun de sa propre performance de coût et de durée. A partir de tirages dans cette liste, des solutions MTVRP sont isolées, dont on sélectionne la meilleure par une approche Tabou. L'algorithme de Split Procedure utilisé par (Cattaruzza, et al., 2014) consiste à partager les tournées en sous-tournées à optimiser isolément, à l'aide d'un algorithme évolutionniste (Prins, 2004).

En opposition aux approches algorithmiques, on trouve dans (Mingozzi, et al., 2013) une méthode exacte effectuant le partitionnement du MTVRP en deux problèmes, d'une part la détermination des routes faisables, d'autre part la génération des ordonnancements faisables. Cette méthode a été appliquée à un problème MTVRP à 120 clients.

2.3.4.2 MTVRP-TW avec fenêtres de temps

Lorsqu'on restreint les livraisons par des contraintes horaires, le MTVRP de base devient un problème MTVRP-TW (Multi Trip Vehicule Routing Problem with Time Windows). Une solution exacte du MTVRP-TW à un seul véhicule par recherche du plus court chemin est proposée dans (Azi, et al., 2007). Une extension à deux véhicules (Azi, et al., 2010) utilise une approche par génération de colonnes associée à une résolution de type branch-and-price. Des améliorations de cette méthode ont permis d'en réduire le temps de calcul (Macedo, et al., 2011), (Hernandez, et al., 2014).

Certains auteurs (Crainic, et al., 2015), (Nguyen, et al., 2013) ont étudié le MTVRP Multizones. Ce problème concerne les problèmes de synchronisation qui se posent dans les systèmes à deux niveaux (cf section 2.2.2), où les véhicules de chaque niveau partagent des plateformes logistiques afin de transférer le fret. Dans ce cas, les fenêtres de livraisons sont prises en compte pour contraindre, non seulement, les livraisons finales, mais aussi les livraisons intermédiaires dans les plateformes (Cattaruzza, et al., 2016).

2.4 Positionnement des travaux

La livraison au dernier kilomètre de marchandises en centre-ville constitue l'objet principal de notre recherche.

Les éléments originaux que nous cherchons à développer sont

- i) d'une part, l'analyse détaillée des activités de service, qui correspond à la phase finale de la livraison et, à l'instar des temps de transport, sont sensibles à l'état du trafic en contexte urbain.
- ii) d'autre part, l'analyse de performance découlant de l'utilisation de véhicules dont le faible gabarit oblige à effectuer des tournées multiples.

En référence aux quatre familles de VRP structurant l'état l'art, le modèle développé et utilisé dans notre recherche combine le TDVRP, pour les aspects contextuels du trafic, ainsi que le MTVRP-TW pour les tournées multiples à un seul véhicule, sous contrainte de fenêtres de livraison. Nous qualifions de MTTD-VRPTW (Multi Trip Time Dependent Vehicle-Routing Problem with Time Windows) le problème abordé, que nous modélisons dans le chapitre suivant.

Nous n'abordons pas la planification multi-niveau de la distribution des marchandises, mais nous considérons néanmoins l'hypothèse de l'existence d'un ELU périphérique pour la planification de livraison finale des marchandises en centre-ville.

Ce positionnement de nos travaux vise à argumenter et à évaluer l'utilisation de petits véhicules en centre-ville, perspective qui s'accorde avec la volonté des autorités locales. Nous cherchons ainsi à vérifier que ces dispositions, qui permettraient de limiter fortement les nuisances de porteurs de grande capacité en ville, ne nuisent pas drastiquement à la performance économique des opérateurs. La capacité réduite des véhicules de livraison conduit à imaginer un schéma reposant :

- soit sur une flotte de petits véhicules dont la somme des capacités égaleraient la capacité d'un porteur de grand gabarit,
- soit sur un véhicule unique multipliant les tournées à partir d'un dépôt pendant la journée, de sorte que le nombre de tournées multiplié par la capacité du petit véhicule égaleraient la capacité d'un porteur grand gabarit.

Nous avons positionné notre recherche sur le second scénario. Il nous appartient donc:

1. de positionner la plateforme logistique dans notre schéma ;
2. de proposer un modèle réaliste intégrant les variations des temps qui impactent son déroulement et en particulier le temps de service, trop souvent négligé ;
3. d'optimiser les voyages que va accomplir le véhicule, en rapport avec la relation distance/temps qui demeure délicate à caractériser, car celle-ci dépend de la zone considérée, de la capacité du véhicule, et, surtout, du moment de l'activité. Cette difficulté explique sans nul doute le fait que les livreurs en zone urbaine s'appuient exclusivement sur leur connaissance du terrain pour établir leurs tournées et non pas sur les applications de calcul de tournées que l'on peut retrouver chez les professionnels du transport.

L'ensemble des contraintes que nous avons soulevées font la complexité du TMV. En les intégrant dans notre modèle MTTD-VRPTW à un seul véhicule, nos études ont comme ligne directrice l'évaluation de l'influence des principaux paramètres du TMV sur la durée et la distance parcourue par le véhicule, tout en assurant la qualité de service par le respect des horaires de livraison aux clients. Les résultats comparatifs, les uns reposant sur l'utilisation d'un utilitaire de moyen gabarit, les autres sur l'exploitation d'un petit véhicule, nous permettront de conclure sur les conditions réalistes du TMV à faible gabarit.

Chapitre 3 :

3. Modélisation du problème de tournée à voyages multiples et fenêtres de temps sous contrainte de congestion de trafic (MTTD-VRPTW) et études d'application

3.1 Introduction

En réponse aux spécificités du contexte urbain, l'analyse de l'état de l'art présentée au chapitre précédent nous conduit, au sein des différentes classes de problèmes de tournées de véhicule, à combiner le problème de tournée à voyages multiples et fenêtres de temps avec la prise en compte des phénomènes de congestion du trafic, ce qui détermine une approche que nous qualifions de MTTD-VRPTW.

Dans ce chapitre, nous présentons, dans un premier temps, les caractéristiques et hypothèses de travail associées au périmètre de notre étude. Puis, nous détaillons notre modèle d'optimisation de tournées, qui prend la forme programme linéaire à variables mixtes, en vue d'une résolution par l'utilisation d'un solveur. Le chapitre fait une part particulière à l'analyse de la sensibilité de la durée globale des tournées, considérée comme performance principale, aux paramètres-clé d'entrée du modèle, étude menée par la méthode dite des plans d'expérience de Taguchi.

3.2 Caractérisation du MTTD-VRPTW

Dans le problème classique du VRP, tel qu'il se présente notamment dans le secteur de la messagerie ou du courrier, un prestataire dispose d'une ou plusieurs plateformes logistiques, à partir d'où une flotte de camions effectue une ou plusieurs rotations (ou tournées) chaque jour. Chacun des véhicules est chargé dans une plateforme, assure une tournée de livraisons chez les clients et revient à la plateforme en fin de tournée. Dans un contexte urbain, les boucles sont raccourcies du fait des distances réduites ou/et du fait des capacités réduites des véhicules. Dès lors, un même véhicule peut, durant une même journée de travail, effectuer plusieurs tournées, ce qui permet de rentabiliser l'utilisation des ressources, si toutefois les conditions de circulation permettent des rotations rapides. Dans le cas où la flotte de véhicules se réduit à une seule unité, ce véhicule unique est amené à effectuer de nombreuses tournées de livraison pour satisfaire la demande des clients et l'optimisation de son plan de distribution est un Multi-Trip VRP.

Notre recherche se situe dans la problématique Multi-Trip VRP à un seul véhicule, en contexte urbain (Figure 3-1).

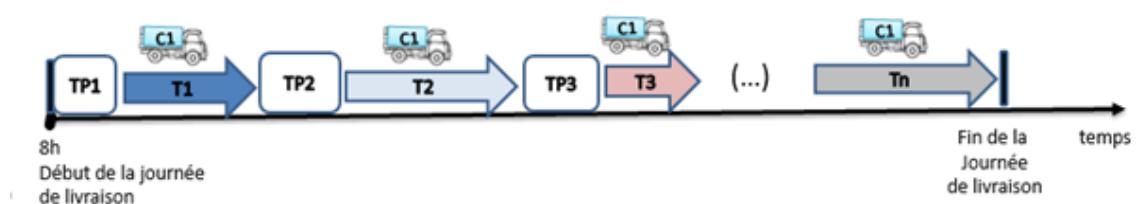


Figure 3-1 : Multi-Trip VRP à un seul véhicule

En début de journée, l'unique camion (C1) se voit allouer un chargement journalier et, compte tenu de la limite capacitaire du véhicule, le plan prévoit plusieurs tournées (T_1, T_2, \dots, T_n) pour réaliser la

livraison. Naturellement, des temps de préparation (TP_1, \dots, TP_n), incluant un temps de chargement, sont associés aux tournées successives.

L'efficacité recherchée des tournées à déterminer répond principalement à deux indicateurs de performance, la distance globale parcourue et la durée globale ou temps total d'exploitation. Si la distance est facile à évaluer, le temps total d'exploitation mérite quant à lui d'être plus précisément défini.

3.2.1 Temps total d'exploitation

Le temps total d'exploitation (TE) représente le temps nécessaire pour effectuer toutes les tournées de livraison prévue sur la journée (Figure 3-2), soit

$$TE = \sum_{tournée i} [TP_i + \sum_{trajet j} (TT_{ij} + TS_{ij})]$$

avec

- TP_i temps de préparation de la tournée i ;
- TT_{ij} temps de transport du trajet j dans la tournée i ; le premier trajet part de la plateforme et le dernier trajet retourne à la plateforme ;
- TS_{ij} temps de service, ou temps passé sur le lieu de livraison j ;

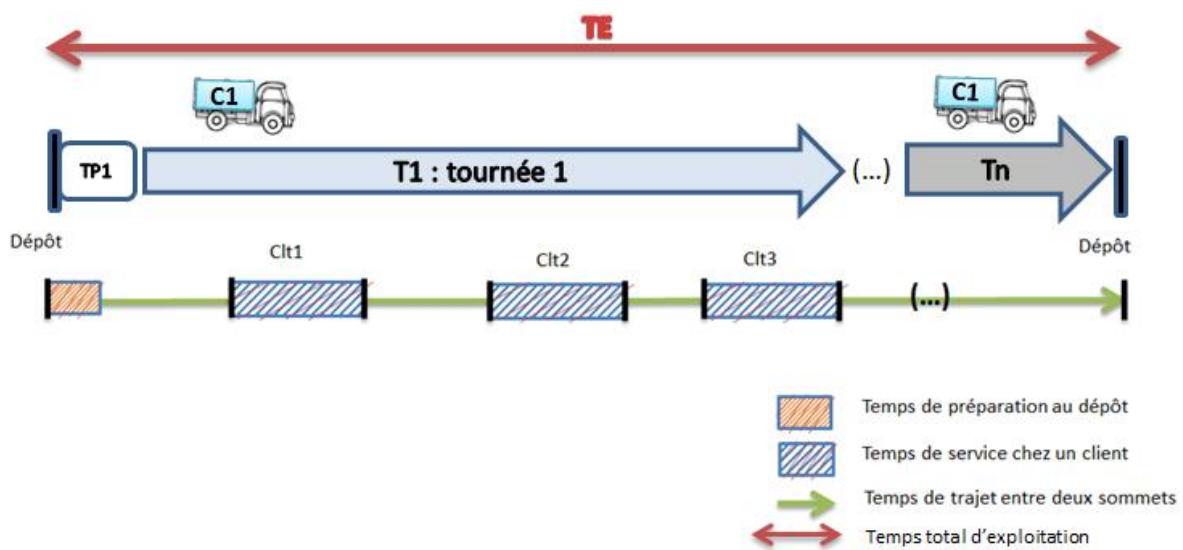


Figure 3-2: Temps total d'exploitation (TE) du Multi-Trip VRP à un seul véhicule

En exprimant le temps total d'exploitation sous la forme globalisée

$$TE = TP + (TT + TS)$$

il apparaît

- une composante TP cumulant les temps de préparation des tournées, dont la valeur ne dépend que du nombre de colis à manipuler et non du contexte horaire,
- une composante $TT + TS$ cumulant les temps de trajet et de service, qui est impactée par l'état de la circulation.

A l'évidence, seule la composante $TT + TS$ du temps global d'exploitation est à prendre en compte du point de vue de l'impact environnemental de l'activité.

Nous allons détailler plus avant les composantes TP, TT, TS du temps total d'exploitation TE .

3.2.2 Temps de préparation au dépôt

Le temps de préparation au dépôt représente le temps, cumulé sur l'ensemble des tournées, nécessaire à la manutention des produits au sein de la plateforme afin de charger le véhicule. Nous pouvons approximer ce temps de préparation des chargements par un paramètre

$$TChargDepot$$

fonction croissante de la capacité du camion.

3.2.3 Le temps de trajet

L'expression

$$Temps de trajet = \frac{Distance parcourue}{Vitesse moyenne du véhicule}$$

rappelle la dépendance du temps de trajet à la vitesse moyenne réalisée sur le trajet. Cette dernière est soumise à des aléas de circulation, dont certains peuvent ne pas être résorbés sur le restant du parcours. Cette situation est fréquente en milieu urbain, soumis à la congestion du trafic, aussi notre modèle doit-il prendre en compte la variabilité des temps de trajet selon le contexte horaire.

La congestion du trafic résulte de la saturation des capacités de l'infrastructure routière, eu égard à la demande des utilisateurs (Koning, 2011) et engendre une dégradation de la qualité du service offerte à ceux-ci. Ce "mal urbain" a été étudié au sein de différentes disciplines, en particulier par les économistes qui cherchent à en estimer le coût. Nous n'irons pas dans cette direction et ne chercherons qu'à représenter l'impact du phénomène de congestion sur la durée d'un trajet et, ce faisant, sur la durée des tournées de livraison.

C'est pourquoi nous calculons le temps d'un trajet sous la forme

$$Temps de trajet = \frac{Distance parcourue}{Vitesse moyenne du véhicule} \times Indice de congestion$$

où l'indice de congestion est fonction de la tranche horaire pendant laquelle s'effectue le déplacement. La question de la méthode utilisée pour estimer la ou les valeurs de cet indice se pose. Nous avons utilisé Google-Maps©, qui intègre les phénomènes de congestion, pour construire un tableau synthétisant distances et temps de trajet pour un ensemble de trajets réalisés sur différentes tranches horaires. Sur ce principe, nous avons mené une étude portant sur 3 villes (Nantes, Bordeaux et Toulouse) pour faire une estimation de l'indice de congestion dans chaque tranche horaire. Pour chacune de ces villes, nous avons retenu 30 trajets passant par le centre-ville et observé les temps moyens de parcours relevés heure par heure sur 24 heures (Figure 3-3). Nous constatons que, si les valeurs diffèrent d'une ville à l'autre, les tendances restent similaires, avec un pic de congestion en début de matinée et en fin de journée. Nous étalonnons l'indice de congestion à 1 aux heures creuses (où les temps de trajet sont minimaux) et faisons varier l'indice proportionnellement à la durée du trajet. Ainsi, entre 9h00 et 10h00, la durée des trajets s'avère être multipliée par un facteur 1,7 par rapport aux heures creuses, et ce coefficient définit l'indice de congestion pour la tranche horaire considérée.

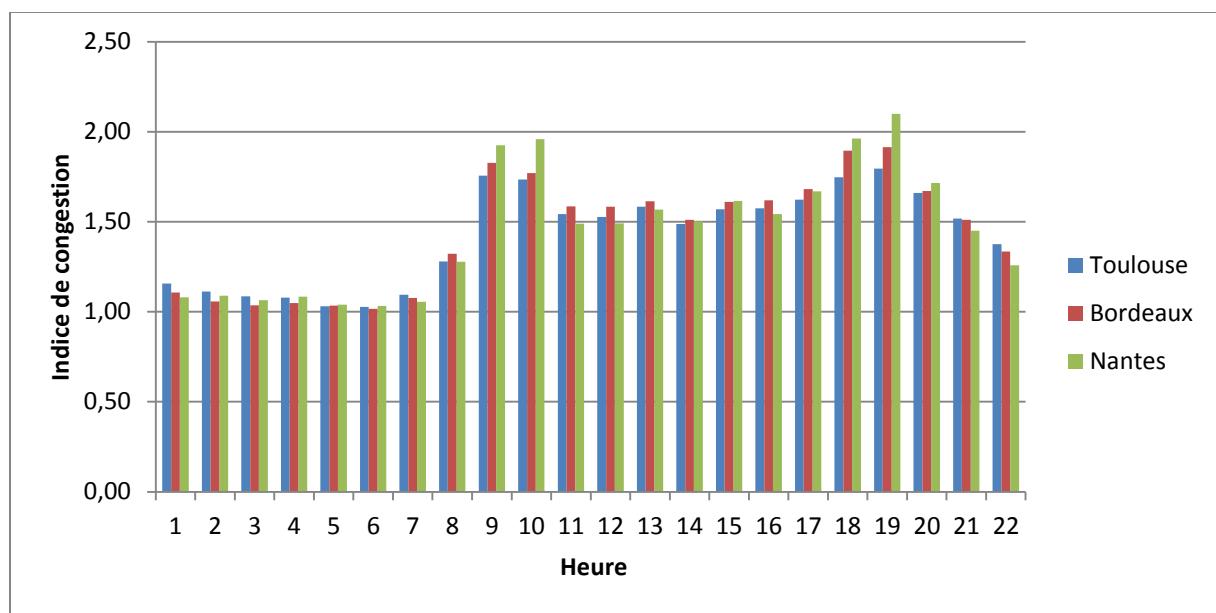


Figure 3-3 : Représentation des indices de congestion pour Toulouse, Bordeaux et Nantes

3.2.4 Temps de service

Dans une recherche d'optimisation de tournées, le temps de service est généralement défini comme une donnée constante. Dans certains travaux (Azi, et al., 2007) (Crainic, et al., 2015), ce temps est défini comme une donnée fonction du nombre de colis à manipuler. Or, dans un contexte urbain, ce temps se décompose plus précisément (voir Figure 3-4) en :

- un temps de recherche d'une aire de parking proche du client,
- un temps de déchargement des colis,
- un temps de déplacement du livreur du véhicule jusqu'à l'adresse du destinataire,

- un temps de remise de la marchandise au destinataire,
- un temps de retour au véhicule.



Figure 3-4 : Décomposition du temps de service

D'une observation que nous avons menée durant une semaine sur des tournées de livraison à La Rochelle, il ressort (cf. Annexe 3) que le temps de service représentait plus de 50% de la durée d'une tournée.

Nous avons donc souhaité prendre en compte la notion de temps de service dans notre modèle, sous une forme faisant apparaître deux composantes:

$$Temps\ Service = \underbrace{T_{parking} \times IndiceCongestion}_A + \underbrace{T_{Dchgt} \times NbColis}_B$$

La partie A qualifie le temps d'approche nécessaire au livreur pour stationner le véhicule, qui peut être relativement important et fonction de l'indice de congestion. La partie B, fonction du nombre de colis à manipuler, additionne le temps de déchargement des produits au temps passé chez le client, une fois le véhicule arrêté.

Partie A (temps de recherche de stationnement)

Le temps de recherche d'une place stationnement est variable. En effet, les places de stationnement (y compris les aires de livraison) se raréfient aux heures de pointes, aussi cette composante du temps de service peut-elle devenir importante. Une étude⁵ menée dans le cadre du PREDIT montre ainsi qu'un automobiliste perd en moyenne entre 3,3 minutes et 11,8 minutes, selon la ville considérée, pour parvenir à se garer à l'issue d'un trajet. Un livreur ne trouvant pas de place de stationnement à proximité du point de livraison et stationnant, par la force des choses, en pleine voie, vient impacter la circulation, phénomène étudié dans la thèse de Delaître (Delaître, 2008). On peut aussi tenter d'évaluer dans quelle mesure la disponibilité des aires de livraison affecte le coût de l'activité de livraison (Figliozi, et al., 2017). Pour répondre au problème de modélisation du temps de parking, nous devons donc déterminer les principaux facteurs qui l'influencent. Une étude (cf Annexe 5) que nous avons menée sur deux quartiers rochelais montre que, outre le phénomène de congestion du trafic, le temps de stationnement est également influencé par le gabarit du véhicule. En effet, la probabilité de disposer d'une place de stationnement correspondant à plusieurs places contiguës de parking, nécessaires à un gros gabarit, est plus faible que la probabilité pour un petit gabarit de trouver une place réduite.

⁵ http://195.46.198.110/Publications/Temps_de_recherche.pdf

Dans l'expression de la composante A du temps de service, il convient donc de calibrer le paramètre $T_{parking}$ selon le gabarit du camion. En vue d'établir ce paramètre, nous avons suivi l'activité et relevé spécifiquement les temps de parking de deux livreurs, l'un utilisant un petit gabarit (Renault Kangoo) et un autre utilisant un moyen gabarit (camionnette Iveco 3,5T). Ces chronométrages ont démontré que le temps de parking nécessaire à un moyen gabarit est environ 3 fois plus grand que pour un simple gabarit.

Partie B (temps de déchargement)

Afin de ne pas complexifier inutilement le modèle, nous avons choisi d'agrégier l'ensemble des temps postérieurs au parking en un temps global de déchargement, lui-même proportionnel à deux facteurs :

$TDchgt$, constante représentant le temps unitaire pour manipuler un colis, fonction du gabarit du véhicule. Il est en effet beaucoup rapide d'accéder à un colis dans un véhicule léger que dans un véhicule lourd.

$NbColis$, nombre de colis à livrer au point de livraison considéré.

3.3 Modèle MTTD-VRPTW

3.3.1 Problème et définitions

Il s'agit de formuler le problème d'optimisation du MTTD-VRPTW, en vue d'une résolution par programmation mathématique. Au préalable, nous énonçons quelques définitions et hypothèses.

Dépôt : Le dépôt est un point unique de début et de fin de la tournée, situé dans un ELU en périphérie de la ville. Les horaires d'ouverture du dépôt sont fixes. Nous prendrons comme hypothèse que les capacités de traitement, de stockage des colis et de stationnement des véhicules au dépôt sont illimitées.

Camion : Dans la présente thèse, nous considérons le problème MTTD-VRPTW à un seul véhicule, ou camion. Un camion contient un nombre limité de colis de taille standard. Le camion est libre d'effectuer plusieurs tournées (aller-retours au dépôt), mais son activité est contrainte par la durée journalière de travail du chauffeur-livreur.

Point de livraison : Chaque point de livraison est caractérisé par ses coordonnées géographiques, ainsi que la fenêtre de temps durant laquelle les livraisons sont possibles.

Commande : la commande est la consigne de livraison associée à un client, caractérisée par un nombre de colis à livrer. Dans le présent travail, les colis sont supposés de taille et de poids standard.

Hypothèses : Afin de réduire la complexité du problème, notre modélisation repose sur un certain nombre d'hypothèses complémentaires. Nous regroupons ci-après l'ensemble des hypothèses de validité de notre modèle :

- La flotte de véhicules est réduite à un seul camion, de capacité finie,
- Il n'existe qu'un seul dépôt d'où part et où revient le camion à chaque tournée,
- Le camion ne peut pas visiter un même client plusieurs fois dans la même tournée,
- La livraison de chaque client doit respecter strictement la fenêtre de temps qui lui est propre. Nous n'avons pas intégré, dans la fonction objective d'optimisation, de système de pénalité pour retard de livraison, car ceci ne correspond pas à la pratique du secteur.
- La performance principale à optimiser est la distance globale (critère kilométrique) parcourue par le camion et/ou le temps total d'exploitation (critère chronométrique).

3.3.2 Formalisation du MTTD-VRPTW

3.3.2.2 Paramétrage

Nous considérons un graphe $G = (N_T, E)$, où N_T est l'ensemble des points de livraison, y compris le dépôt, et $E = \{(i, j) : i, j \in N_T, i \neq j\}$ est l'ensemble des trajets possibles entre ces points. Par ailleurs, nous définissons par $N_C \subset N_T$ l'ensemble des clients à livrer lors d'une tournée. À chaque trajet entre deux points de livraison i et j est associée une distance routière $dist_{ij}$ et un temps T_{ij} .

La quantité globale de colis standard à livrer dans une journée est

$$D = \sum_{i \in N_C} nbdt_i$$

où $nbdt_i$ désigne le nombre de colis requis par le client i .

La fenêtre de temps propre au client i est notée $[T_{min,i}, T_{max,i}]$. Celui-ci doit donc être livré au plus tôt à $T_{min,i}$ et au plus tard à $T_{max,i}$.

L'unicité du dépôt, origine et fin des tournées, nous conduit à représenter celui-ci par deux points virtuels $O_1, O_2 \in N_T$ représentant, respectivement, le point de départ et le point d'arrivée du véhicule au dépôt, séparés d'une distance nulle $dist_{O_1 O_2} = 0$.

La capacité du véhicule, exprimée en nombre de colis maximum, est notée $CapK$. Pour respecter la journée de travail du chauffeur, le camion a un temps limité d'activité journalière, représenté par $kMaxTimeOnRoute$. Dans cette limite, le camion est libre d'effectuer jusqu'à T tournées afin de livrer l'ensemble des clients.

D'autres paramètres conditionnant le problème d'optimisation ont été retenus. Le Tableau 3-1 résume l'ensemble des paramètres du modèle.

Tableau 3-1 : Liste des paramètres du modèle d'optimisation

| Paramètres | Description |
|------------------------------------|--|
| M | Nombre quasi infini |
| T | Nombre maximal de tournées dans la journée |
| $[T_{min_i}, T_{max_i}]$ | Fenêtre de livraison du client i |
| $[I_{min_p}, I_{max_p}, indice_p]$ | Indice de congestion associé à une tranche horaire p définie par ses bornes min et max. |
| $kMaxTimeOnRoute$ | Temps maximal d'exploitation journalière du camion |
| $TChargDepot$ | Temps de chargement au dépôt, notamment de manutention des colis pour la tournée. |
| $TParking$ | Temps de recherche d'un parking avant de commencer la livraison des colis chez un client |
| $TDchgt$ | Temps nécessaire pour décharger un colis |
| $CapK$ | Capacité du camion |
| $Vitesse$ | Vitesse moyenne d'un camion en ville |
| $dist_{ij}$ | Distance entre les clients i et j |
| $nbbt_i$ | Nombre de colis demandé par le client i |
| $nbTrips$ | Nombre de tournées à faire |
| $nbrClients$ | Nombre maximum de points à visiter, comprenant le dépôt |
| α, β | Pondération associée à la fonction objective, permettant d'exprimer différentes stratégies de résolution |

3.3.2.2 Variables de décision

Le Tableau 3-2 définit l'ensemble des variables de décision utilisées par le modèle.

Tableau 3-2 : Liste et description des variables de décision

| Variables | Description |
|-----------|---|
| T_{ij} | Temps de trajet entre le sommet i et le sommet j en l'absence de congestion |
| RT_{ij} | Temps de trajet avec prise en compte de la congestion entre i, j |
| a_i^t | Heure d'arrivée à un sommet i dans la tournée t |
| Ind_i^t | Indice de congestion au sommet i dans la tournée t |
| c_j^t | Charge du camion se rendant au point j dans la tournée t |
| s_i^t | Temps de service au point i dans la tournée t |

| | |
|--------------|---|
| x_{ij}^t | Variable égale à 1 si le trajet (i, j) est parcouru par le véhicule dans la tournée t , 0 sinon |
| v_i^t | Variable égale à 1 si le véhicule de livraison visite le sommet i dans la tournée t , 0 sinon |
| $Z1_{p,i}^t$ | Variable égale à 1 si l'heure d'arrivée au point i dans la tournée t est antérieure ou égale à la borne maximale de la période de congestion p , 0 sinon |
| $Z2_{p,i}^t$ | Variable égale à 1 si l'heure d'arrivée au point i dans la tournée t est postérieure ou égale à la borne minimale de la période de congestion p , 0 sinon |
| sbt_i^t | Variable sauvegardant le nombre de visites à l'entrée du sommet i durant la tournée t . Variable utilisée pour éviter les sous-tours. |

3.3.2.3 Fonction objective

Notre modèle d'optimisation permet de minimiser un compromis entre kilométrage global et/ou durée totale de notre tournée, à travers deux pondérations α et β . La fonction objective est de la forme

$$\text{Min} (\alpha \sum_{i,j \in N_T} \sum_{t \in T} x_{ij}^t \text{dist}_{ij} + \beta \sum_{t \in T} a_{02}^t)$$

où a_{02}^t est l'heure d'arrivée au dépôt au terme de la tournée t .

Dans la plupart des problèmes de Multi-Trip VRP, on recherche la réduction de la distance totale parcourue (Crainic, et al., 2015). Dans le contexte urbain, nous mettons plutôt l'accent sur la minimisation du temps d'exploitation, sujet aux perturbations de trafic et aux difficultés de stationnement, en posant $\alpha, \beta = 0,1$ dans fonction objective, mais le modèle peut être utilisé selon d'autres combinaisons.

3.3.2.4 Contraintes

La limitation du nombre de tournées du camion dans la journée s'exprime par la contrainte inégalité

$$\sum_{t \in T} x_{01j}^t \leq nbTrips \quad \forall j \in N_T - \{O_1\} \quad (1)$$

La contrainte inégalité (2) stipule que, si le trajet i, j est parcouru, alors le camion doit livrer au point j :

$$\sum_{i \in N_T} x_{ij}^t = v_j^t \quad \forall t \in T, \forall j \in N_C - \{i\} \quad (2)$$

La contrainte égalité (3) garantit la conservation des flux en chaque point de la tournée, c'est-à-dire que le nombre (0 ou 1) de véhicules entrant dans l'arc est égal au nombre de véhicules sortants :

$$\sum_{i \in N_T} x_{ji}^t = v_j^t \quad \forall t \in T, \forall j \in N_C - \{i\} \quad (3)$$

L'une des hypothèses de travail est qu'un véhicule ne doit visiter un client qu'une seule fois dans une même tournée de livraison. Cette contrainte s'exprime par

$$\sum_{t \in T} v_i^t = 1 \quad \forall i \in N_C \quad (4)$$

Les contraintes (5) et (6) exigent que chaque tournée commence et se termine au dépôt. Ces deux contraintes sont complémentaires aux contraintes (2) et (3).

$$\sum_{i \in N_C \cup \{O_2\}} x_{O_1 j}^t = 1 \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N_C \cup \{O_1\}} x_{O_2 j}^t = 1 \quad \forall t \in T \quad (6)$$

Pour éviter les solutions composées de sous-tours disjoints, les contraintes (7), (8), (9) et (10) interdisent qu'un véhicule exécute un sous-tour au sein d'une même tournée de véhicule. Pour éviter les sous-tours, on utilise une variable de décision sbt_i^t qui sauvegarde le nombre de clients visités par le véhicule au point i durant la tournée t .

La contrainte (7) exige que le nombre de visites au départ du dépôt O_1 soit égal à 1.

$$sbt_{O_1}^t = 1 \quad \forall t \in T \quad (7)$$

La contrainte (8) stipule que le nombre de visites pendant la tournée doit être supérieur ou égal à 2.

$$sbt_i^t \geq 2 \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in N_T \setminus \{O_1\} \quad (8)$$

La contrainte (9) limite le nombre de visites au nombre maximum de clients à visiter, dépôt compris :

$$sbt_i^t \leq nbrClients \quad \forall t \in T, \quad \forall i \in N_T \quad (9)$$

La contrainte (10) complète les trois contraintes précédentes en exigeant, qu'à chaque nouveau point j visité, le nombre cumulé de visites dans la tournée t doit être supérieur ou égal au nombre cumulé de visites au sommet i précédemment visité.

$$sbt_i^t - sbt_j^t + 1 \leq nbrClients (1 - x_{ij}^t) \quad \forall t \in T, \forall i \in N_T \setminus \{O_2\} \quad (10)$$

$$\forall j \in N_T \setminus \{O_1\}, \quad i \neq j$$

La contrainte égalité (11) force le chargement initial $c_{O_1}^t$ du camion au départ de la tournée t au sommet O_1 .

$$c_{O_1}^t = \sum_{i \in N_C} v_i^t nbbt_i \quad \forall t \in T \quad (11)$$

La capacité maximale du véhicule $CapK$ est respectée à travers la contrainte:

$$c_{O_1}^t \leq CapK \quad \forall t \in T \quad (12)$$

La contrainte inégalité (13) stipule que, si le véhicule parcourt le trajet (i, j) , c'est-à-dire $x_{ij}^t = 1$, alors le nombre de colis dans le camion au point i est supérieur ou égal au nombre de colis au point j :

$$c_i^t \geq c_j^t + nbbt_j - M(1 - x_{ij}^t) \quad \forall t \in T, \forall i \in N_T \setminus \{O_2\}, \quad \forall j \in N_T \setminus \{O_1\} \quad (13)$$

Par ces trois dernières contraintes, nous exprimons le fait que le nombre de colis est maximum au départ de chaque tournée et décroît au fil de cette dernière jusqu'à atteindre la valeur zéro au retour au dépôt.

L'équation (14) garantit que la variable c_i^t (charge embarquée sur le camion) est non négative :

$$c_i^t \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall i \in N_T \quad (14)$$

Pour assurer la conformité des heures de livraison aux fenêtres de temps associées à chaque client, on utilise les contraintes (15) à (18b).

L'équation (15) permet de calculer l'heure d'arrivée a_j^t au point j dans la tournée t si le véhicule parcourt le segment (i, j) . Cette heure d'arrivée est l'heure d'arrivée au nœud précédent j augmentée du temps de trajet RT_{ij} entre les points i et j et du temps de service s_i^t au point i :

$$a_j^t \geq (a_i^t + RT_{ij} + s_i^t) - M(1 - x_{ij}^t) \quad \forall t \in T, \forall i, j \in N_T \quad (15)$$

L'équation (16) détermine le temps RT_{ij} de trajet entre i et j en modulant temps nominal T_{ij} du trajet par l'indice de congestion Ind_i^t de la tranche horaire, voir plus loin les contraintes (21a) et (21b).

$$RT_{ij} = T_{ij} Ind_i^t \quad \forall t \in T, \forall i, j \in N_T \quad (16)$$

Les équations (17a), (17b) et (17c) calculent le temps de service au point considéré :

- si le point i est un point de livraison, alors le temps de service s_i^t est calculé en fonction du nombre de colis à livrer et du temps de stationnement du camion (ce temps est calculé en fonction de la congestion Ind_i^t aussi) :

$$s_i^t = TDchgt\ nbbt_i + TParking\ Ind_i^t \quad \forall t \in T, \forall i \in N_T \quad (17a)$$

- s'il s'agit du dépôt (point O_1) au départ d'une tournée, alors le temps de service est égal à la constante $TChargDepot$ qui représente le temps nécessaire pour charger l'ensemble des colis à livrer durant la tournée.

$$s_{O1}^t = TChargDepot \quad \forall t \in T \quad (17b)$$

- s'il s'agit du dépôt (point O_2) au retour de la tournée, alors ce temps est nul :

$$s_{O2}^t = 0 \quad \forall t \in T \quad (17c)$$

Les contraintes (18a) et (18b) assurent le respect des fenêtres de temps lors des livraisons :

$$a_i^t \geq Tmin_i \ v_i^t \quad \forall t \in T, \forall i \in N_T \quad (18a)$$

$$a_i^t \geq Tmax_i \ v_i^t \quad \forall t \in T, \forall i \in N_T \quad (18b)$$

Nous présentons maintenant le calcul du facteur de congestion Ind_i^t au point i dans la tranche horaire, requis par le calcul de la durée RT_{ij} selon la relation (16). La congestion du trafic varie en fonction de la période de la journée, plus précisément en fonction de l'heure d'arrivée a_i^t du camion au point i pendant une tournée t . Nous traduisons ce mécanisme adaptatif sous la forme d'un jeu de contraintes linéaires. Sur la base des relevés présentés Figure 3-3, nous définissons 6 tranches horaires $p \in \{1, \dots, 6\}$ définies chacune par un intervalle $Imin_p$ et $Imax_p$ et nous associons un indice de congestion Ind_i^t spécifique à chaque tranche horaire, et ce pour chaque point i . Les équations (19a) à (20b) permettent, par l'intermédiaire de variables binaires $Z1_{p,i}^t$ et $Z2_{p,i}^t$, de déterminer la tranche horaire p dans laquelle se situe l'arrivée du véhicule au point i , et ainsi d'appliquer, moyennant les contraintes (21a) et (21b), l'indice de congestion Ind_i^t qui convient.

$$M(Z1_{p,i}^t - 1) \leq Imin_p - a_i^t \quad \forall t \in T, \forall i \in N_T, \forall p \in \{1..6\} \quad (19a)$$

$$Imin_p - a_i^t \leq M \ Z1_{p,i}^t \quad \forall t \in T, \forall i \in N_T, \forall p \in \{1..6\} \quad (19b)$$

$$-M * Z2_{p,i}^t < Imax_p - a_i^t \quad \forall t \in T, \forall i \in N_T, \forall p \in \{1..6\} \quad (20a)$$

$$-M \ Z2_{p,i}^t < a_i^t - Imax_p \leq M(1 - Z2_{p,i}^t) \quad \forall t \in T, \forall i \in N_T, \forall p \in \{1..6\} \quad (20b)$$

$$-M (Z1_{p,i}^t + Z2_{p,i}^t) \leq Ind_i^t - indice_p \quad \forall i \in N_T, \forall p \in \{1..6\} \quad (21a)$$

$$Ind_i^t - indice_p \leq M (Z1_{p,i}^t + Z2_{p,i}^t) \quad \forall i \in N_T, \forall p \in \{1..6\} \quad (21b)$$

Enfin, nous complétons le jeu de contraintes pour garantir que l'activité journalière du camion ne dépasse pas la valeur autorisée (22) et pour gérer l'enchaînement des tournées (23) en garantissant que le début de la tournée $t+1$ est postérieure à la fin de la tournée t .

$$a_{02}^t - a_{01}^t \leq KmaxTimeOnRoute \quad \forall t \in T \quad (22)$$

$$a_{01}^t \leq a_{02}^{t+1} \quad \forall t \in T - 1, \forall i \in N_T, \forall j \in N_T \quad (23)$$

3.4 Analyse des facteurs impactant le temps d'exploitation

Notre modèle d'optimisation du problème MTTD-VRPTW a été implémenté à l'aide du solveur CPLEX d'IBM. A partir d'un jeu de données réelles décrivant une situation de transport en zone urbaine, nous avons appliqué un protocole expérimental visant à analyser la sensibilité du temps d'exploitation aux principaux paramètres propres au contexte urbain. Nos objectifs sont i) de déterminer les principaux paramètres impactant le temps d'exploitation et ii) de valider l'intérêt d'utiliser un véhicule de faible gabarit dans un contexte urbain.

Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode des plans d'expérience de Taguchi (Taguchi, et al., 1987). La méthode vise à évaluer la sensibilité d'une variable de sortie à la variation de paramètres d'entrée, sur la base de statistiques expérimentales. Nous rappelons le principe de la méthode des plans d'expériences, puis nous décrivons nos plans d'expérience, enfin nous présentons les résultats et concluons sur la sensibilité du temps d'exploitation aux principaux facteurs contextuels, ainsi que sur les conditions favorables à l'utilisation d'un véhicule de faible gabarit. Le lecteur pourra consulter l'annexe 1a pour plus de détails sur la terminologie des plans d'expériences.

3.4.1 Méthode d'analyse des effets des actions

Notre modèle rend le temps d'exploitation fonction de plusieurs paramètres : temps de préparation des tournées au dépôt, degré de congestion du trafic, nombre de colis par commande.

$$TE = \sum_{tournée t} [TP_t + \sum_{trajet ij} (T_{tij} Ind_i^t + TParking Ind_i^t + TDchgt nb_{tij})]$$

A ce stade, nous ne sommes pas encore en mesure de préciser quel est, dans un scénario donné, le paramètre le plus influent, ni de proposer les conditions avantageant tel ou tel gabarit de véhicule. Par ailleurs, la capacité du véhicule impacte le nombre de tournées nécessaires, donc à la fois le temps d'exploitation et la distance parcourue et ce type d'interaction n'est pas mise en évidence dans la forme actuelle du modèle. D'où l'intérêt d'une analyse de sensibilité pour mieux connaître les effets individuels des paramètres et de leurs interactions sur le temps d'exploitation.

La méthode des plans d'expérience consiste à réaliser une série de tests au cours desquels des paramètres d'entrée A, B, ... peuvent prendre chacun un ensemble de valeurs prédéfinies A_i, B_j, ...

appelées niveaux (A_i est le i ème niveau du paramètre A). Les résultats expérimentaux de la variable de sortie sont collectés pour différents jeux de valeurs des paramètres d'entrée.

Pour mener à bien l'analyse, il est possible d'explorer toutes les combinaisons des niveaux des paramètres d'entrée (plan complet) ou seulement une partie (plan fractionnaire), voir à ce sujet l'annexe 1 b.

3.4.1.1 Principe de la méthode

Qu'il s'agisse d'un plan complet ou fractionnaire, le but est d'établir, à partir des résultats des tests un modèle de comportement F du type :

$Y^* = F(A, B, C, AB, AC, \dots)$ où :

- Y^* est la grandeur à étudier
- F est la loi de comportement
- (A, B, C, AB, AC, \dots) sont des variables explicatives ou paramètres (A, B, C, \dots) et interactions entre paramètres (AB, AC, \dots).

La méthode s'appuie sur deux hypothèses :

- 1) La relation $Y^* = F(A, B, C, AB, AC, \dots, \varepsilon)$ est approximable par la forme additive

$$Y^* = Y(A, B, C, AB, AC, \dots) + H(\varepsilon)$$

avec Y composante déterministe de F (qui sera modélisée algébriquement) et H composante aléatoire (supposée suivre une loi de probabilité donnée).

- 2) La part déterministe $Y(A, B, C, \dots)$ fera l'objet d'une modélisation linéaire.

Pour la part déterministe, on choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse du système (modèle) aux paramètres d'entrée et aux interactions. Il existe plusieurs modèles du type additif pouvant y être associés (Taguchi, et al., 1987), (Pillet, 2001), (Goupy, et al., 2006.).

Nous avons utilisé une formulation vectorielle de la méthode des plans d'expérience (Vigier, 1991). Dans ce modèle, des vecteurs sont associés aux paramètres d'entrée. Par exemple, le vecteur décrivant le niveau de valeurs utilisé pour le paramètre A est noté $[A]$. Ainsi, en cas de paramètres à 3 niveaux, si le paramètre A se trouve au niveau 1, et si le paramètre B se trouve au niveau 2, les vecteurs $[A]$ et $[B]$ sont :

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dans une étude avec paramètres à trois niveaux, la part déterministe de la réponse Y est modélisée comme suit (seules les interactions entre deux paramètres sont ici présentées) :

$$Y = M + [a_1 \ a_2 \ a_3] [A] + [b_1 \ b_2 \ b_3] [B] + \dots + [A] \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} [B]$$

avec

- M Moyenne de tous les résultats du plan
 a_i Effet moyen du paramètre A lorsqu'il est au niveau i
 b_i Effet moyen du paramètre B lorsqu'il est au niveau i
 c_{ij} Effet moyen de l'interaction AB lorsque A est au niveau i et B au niveau j

Les effets moyens individuels sont obtenus par

$$a_i = Y_{moy}(A_i) - M$$

avec

$Y_{moy}(A_i)$ Moyenne de tous les résultats du plan lorsque A est au niveau i

tandis que l'effet moyen de l'interaction des paramètres A et B est déterminé par

$$c_{ij} = Y_{moy}(A_i, B_j) - M - a_i - b_j$$

avec

$Y_{moy}(A_i, B_j)$ Moyenne de tous les résultats du plan lorsque A est au niveau i et B au niveau j

A partir de cette modélisation, l'expression de la réponse s'obtient en indiquant les niveaux des paramètres, d'en calculer les effets moyens et de reporter ceux-ci dans l'équation matricielle indiquée précédemment. S'agissant par exemple d'un scénario positionnant A au niveau 2 et B au niveau 3, la réponse Y se calcule de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 Y(A_2, B_3) &= M + [a_1 \ a_2 \ a_3] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [b_1 \ b_2 \ b_3] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \dots + [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= M + a_2 + b_3 + c_{23}
 \end{aligned}$$

Le modèle étant additif, la réponse correspondant à un scénario pour A au niveau i et B au niveau j est la moyenne de tous les résultats ajustée par la contribution individuelle de chaque paramètre A, B et de l'interaction AB selon le niveau auquel se trouve chaque paramètre.

Pour faciliter l'interprétation, nous présenterons les effets moyens des paramètres et des interactions d'une manière graphique (effets moyens en ordonnée et niveaux des paramètres d'entrée en abscisse).

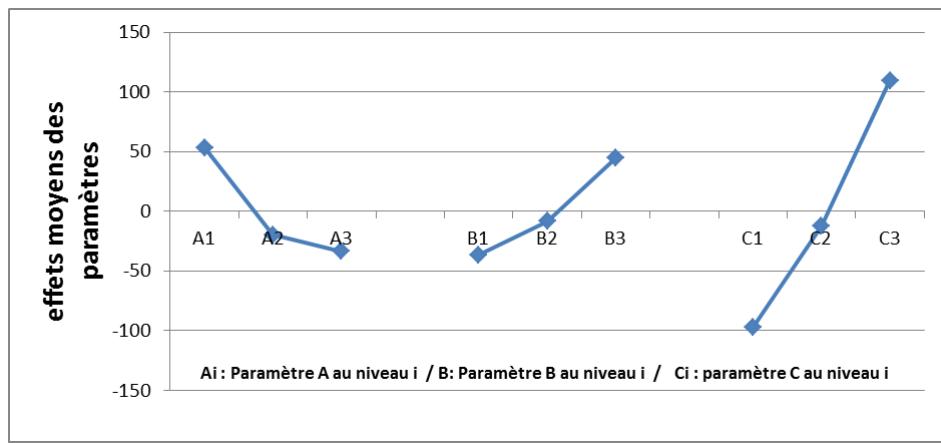


Figure 3-5 : Représentation graphique des effets moyens des paramètres

Ainsi, l'exemple représenté Figure 3-5 semble indiquer la prédominance du paramètre C , mais une analyse de variance est nécessaire pour corroborer (ou non) les effets des paramètres et de leurs interactions et pouvoir conclure. Pour ce faire, nous utilisons la démarche ANOVA (ANalysis Of Variance) détaillé dans l'Annexe A1c.

Application à nos travaux

La méthode des plans d'expérience est généralement utilisée dans de nombreux domaines industriels ou de recherche pour la conception et l'amélioration des produits (Louvet, et al., 2005) ; depuis quelques années, des plans d'expérience numériques (Jourdan, 2003) sont utilisés pour obtenir des informations sur le phénomène simulé avec un nombre restreint de simulations.

Dans nos travaux, nous utilisons cette méthode, décrite par un exemple détaillé d'application dans l'annexe A1d, est exploitée dans plusieurs buts :

- mettre en évidence les effets individuels des paramètres et des interactions sur les réponses étudiées (temps de trajet, temps de service, temps d'exploitation)
- étudier des scénarios permettant de comparer les performances de plusieurs types de livraison.

3.4.1.2 Conception des plans d'expérience

Nos plans d'expériences définissent les campagnes de résolution que nous avons menées, par le solveur CPLEX, de notre modèle MTTD-VRPTW avec différents jeux de paramètres.

Choix de la fonction de sortie

La fonction étudiée est le temps total d'exploitation

$$TE = TP + (TT + TS)$$

somme du temps cumulé TP de préparation des tournées, du temps cumulé TT de transport et du temps cumulé TS de service.

Le temps de préparation cumulé TP est fonction du nombre de colis chargés au dépôt, et donc de la capacité du véhicule.

Le temps de transport cumulé TT prend en compte la congestion du trafic :

$$TT = \sum_{tournée t} \sum_{i,j \in NT} RT_{ij}^t$$

Le temps de service cumulé TS est la somme des temps de service, lui-même fonction de la congestion du trafic et du nombre de colis à livrer, sur l'ensemble des points visités et l'ensemble des tournées :

$$TS = \sum_{tournée t} \sum_{i \in NT} s_i^t$$

Choix des paramètres d'entrée et des niveaux

Nous avons étudié l'impact de 5 paramètres d'entrée sur le temps d'exploitation. Les trois premiers paramètres, présentés dans Tableau 3-3, ont été décrits dans ce chapitre. Nous y avons ajouté deux paramètres qui influencent les temps de trajet et donc le temps d'exploitation : i) la localisation P du dépôt par rapport à la zone urbaine de livraison et ii) la superficie Z de la zone urbaine de livraison concernée par les tournées. Notre étude porte sur 50 points de livraison, générés par une loi aléatoire uniforme.

Nous affectons à chaque paramètre trois niveaux de valeur selon le tableau ci-dessous. Ces niveaux se trouvent dans les plages que l'on rencontre typiquement dans une ville de taille moyenne.

Tableau 3-3 : paramètres et niveaux retenus pour l'étude

| | Indice de Congestion Ind_i^t | Nbre de colis par commande $nbbt_i$ | Capacité du camion en colis Cap_k | Position du dépôt P (km) | Etendue zone livraison Z (km) |
|----------|-----------------------------------|--|--|----------------------------|---------------------------------|
| Niveau 1 | 1 | 1 | 10 | 0 | 2 |
| Niveau 2 | 1,5 | 5 | 35 | 0,4 | 4 |
| Niveau 3 | 2 | 10 | 70 | 7 | 6 |

Indice de congestion (Ind_i^t) pour mémoire, ce paramètre est un facteur multiplicateur qui module le temps de trajet en fonction de la tranche horaire. Ce paramètre prend la valeur 1 pour une congestion inexistante, la valeur 1,5 pour une congestion moyenne et la valeur 2 pour une congestion maximale (dans ce cas, les temps de trajet sont multipliés par 2, en accord avec notre étude, cf Figure 3-3).

Nombre de colis par commande (nbbt_i) Ce paramètre représente le nombre de colis fixé pour chaque commande. Nous prenons trois valeurs 1, 5 et 10. Ce nombre est fixé pour toutes les livraisons d'une même tournée.

Capacité du véhicule (Capk) Nous souhaitons étudier l'influence de ce paramètre et déterminer quels sont les autres paramètres qui peuvent être en interaction avec la capacité du véhicule. Selon la définition, donnée en chapitre 1, des différents types de véhicule de livraison en ville, une capacité de 10 colis (de taille standard) correspond à un véhicule type triporteur (faible capacité), une capacité de 35 colis à une fourgonnette et une capacité de 70 colis à une camionnette 3,5T. Ce sont les trois niveaux affectés à ce paramètre.

Position du dépôt Pour ce paramètre, la valeur $P_1=0$ situe le dépôt (voir Figure 3-6) au centre (nœud 51) de la zone de livraison. La valeur $P_2=0,4$ situe le dépôt en périphérie (nœud 52) de la zone de livraison, et la valeur $P_3=7$ situe le dépôt hors zone urbaine. Ces valeurs correspondent à la distance moyenne du dépôt aux points de livraison.

Etendue de la zone de livraison Ce paramètre représente la superficie du rectangle circonscrivant la zone de livraison. Les trois valeurs fixées pour ce paramètre sont $Z_1 = 2$, pour une zone de 4 km^2 , $Z_2 = 4$, pour une zone de (16 km^2) ; $Z_3 = 6$ pour une zone de (36 km^2) .

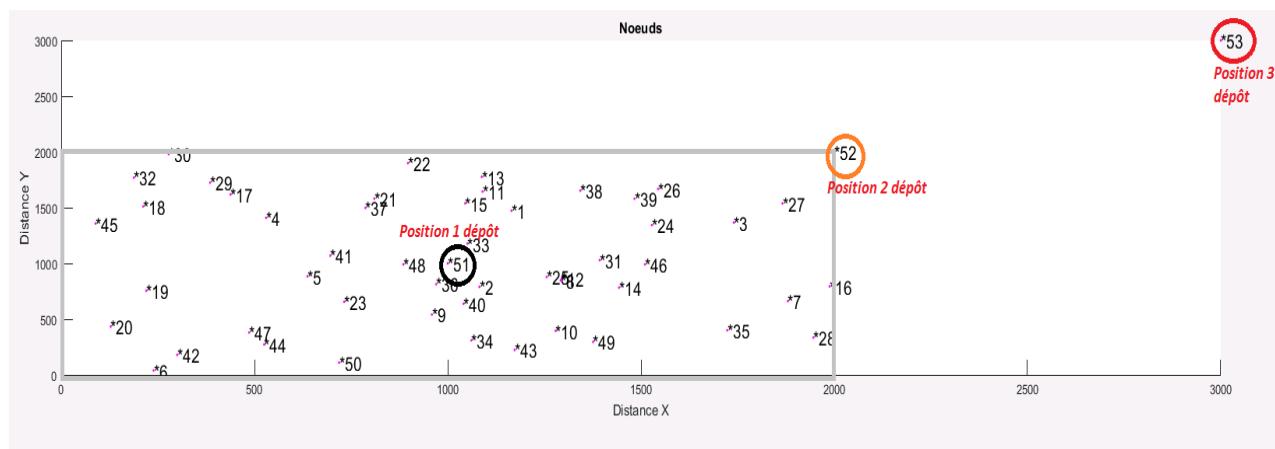


Figure 3-6 : réseau de livraison dans une zone urbaine de 4 km^2 avec trois positions de dépôt

Choix du plan d'expérience

Les 3 niveaux de chacun des 5 paramètres d'entrées définissent $3^5 = 243$ combinaisons possibles pour un plan d'expérience complet, à l'évidence trop complexe. Comme présenté dans l'annexe A1b, une table fractionnaire de 27 tests permet d'analyser les effets des 5 paramètres, mais son inconvénient est de ne pas permettre d'analyser toutes les interactions. Notre choix s'est plutôt porté sur un plan complet avec trois paramètres à trois niveaux, mais en ne faisant varier que 2 paramètres à chaque expérimentation, ce qui résume l'étude à $27 \times 3 = 81$ tests.

L'ensemble de nos expérimentations est détaillé dans l'annexe A2 et nous en relatons les résultats dans ce chapitre.

L'étude des effets des paramètres d'entrée sur les performances d'une tournée de livraison a fait l'objet de 3 études :

- 1) Etude de l'effet des paramètres de livraison sur le temps d'exploitation (Etude 1),
- 2) Etude de l'effet des paramètres ($TDchgt$, $TParking$ et $TChargDepot$) liés au temps de service sur le temps d'exploitation ,
- 3) Etude des conditions favorisant l'utilisation en zone urbaine d'un véhicule à petit gabarit (type tricycle) plutôt qu'un véhicule de moyen gabarit (type 20 m³)

Une attention particulière a été portée aux effets de la congestion du trafic et de la capacité du camion sur le temps d'exploitation.

3.4.2 Etude 1 : effets des paramètres de livraison sur le temps d'exploitation

Cette première étude comporte deux plans d'expérience : le premier vise à montrer les effets de la congestion, du nombre de colis par commande et la position du dépôt sur le temps d'exploitation; le deuxième met en évidence les effets sur le temps d'exploitation de la variation de la capacité maximale du véhicule, du nombre de colis par commande et de l'étendue de la zone de livraison.

3.4.2.1 Plan PEX1: Effet de la congestion, du nombre de colis / commande et de la position du dépôt sur le temps d'exploitation

Le but de cette étude est d'analyser la performance d'un petit véhicule en observant les effets découplés de la congestion, du nombre de colis par commande et de la position du dépôt sur le temps total d'exploitation TE (cf Figure 3-7).

La congestion est un paramètre important intégré dans le modèle qui influe, d'une part, sur les temps de trajet et, d'autre part, sur le temps de service à chaque livraison. Le temps total d'exploitation étant la somme du temps de trajet cumulé et le temps de service cumulé, nous étudions les effets des paramètres d'entrée sur ces temps (trajets et services) distinctement. Pour cette expérience, nous gelons les paramètres « Capacité du camion » et « Etendue zone de livraison » à Capk=10 et Z=2. Pour cette étude, nous avons limité le nombre de clients à NbClt=10. Sur cette base, nous faisons varier les trois paramètres «Congestion (Ind_i) », « Nbre de colis par commande (nbbt_j) », et « Position du dépôt (P_i) ».

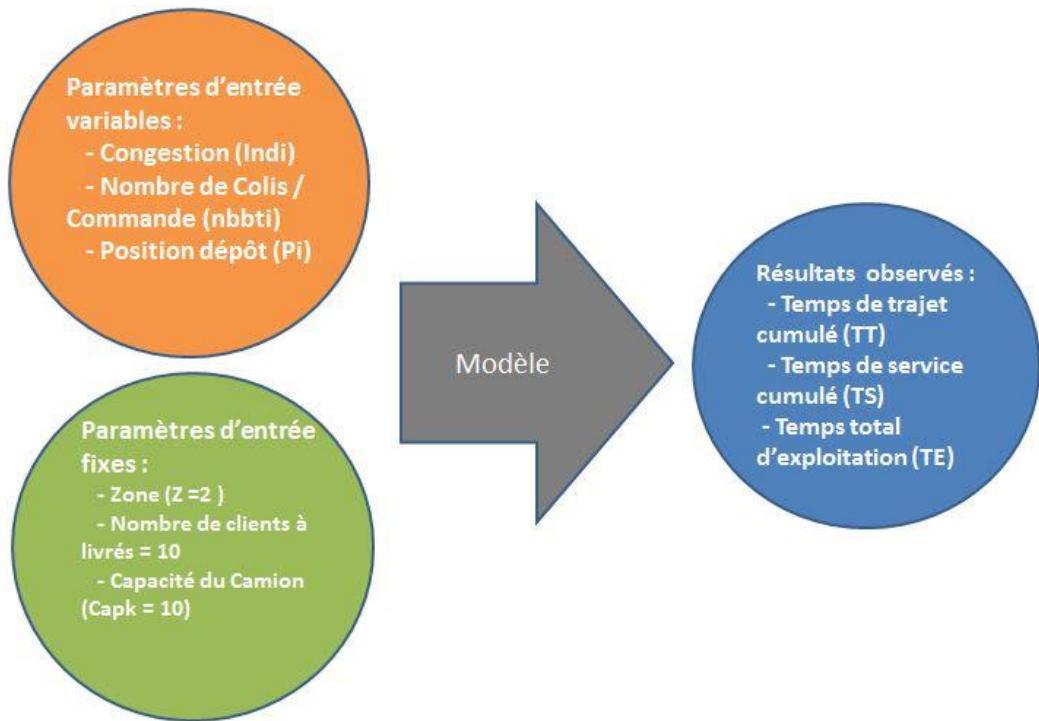


Figure 3-7 : Paramètres d'entrée et réponses du plan d'expérience (PEX1)

Les résultats issus des simulations, les modèles élaborés, les résultats de l'analyse de la variance sont détaillés dans l'Annexe A2a sous l'intitulé PEX1.

Nous présentons ci-dessous les *modèles réduits* obtenus au terme du traitement du plan d'expérience, qui explicitent l'influence individuelle de chaque facteur sur le temps cumulé de trajet, sur le temps cumulé de service et sur le temps total d'exploitation, ainsi que l'influence des interactions entre couples de facteurs, lorsque celles-ci sont significatives :

$$TT = 78 + [-26 \ 0 \ 26] [Ind] + [-48 \ -3 \ 51] [nbbt] + [-34 \ -9 \ 43] [P]$$

$$+ {}^t[nbbt] \begin{bmatrix} 31 & 6 & -37 \\ 1 & 1 & -2 \\ -32 & -7 & 39 \end{bmatrix} [P] + {}^t[Ind] \begin{bmatrix} 16 & 1 & -17 \\ 0 & 0 & 0 \\ -16 & -1 & 17 \end{bmatrix} [nbbt]$$

$$TS = 236 + [-8 \ 0 \ 8] [Ind] + [-180 \ -14 \ 194] [nbbt]$$

$$TE = 314 + [-34 \ 0 \ 34] [Ind] + [-228 \ -17 \ 245] [nbbt] + [-34 \ -9 \ 43] [P]$$

$$+ {}^t[nbbt] \begin{bmatrix} 31 & 6 & -37 \\ 1 & 1 & -2 \\ -32 & -7 & 39 \end{bmatrix} [P]$$

Nous tirons de ces résultats les observations suivantes :

Le facteur individuel dominant est le nombre de colis par commande, qui influe à la fois sur le temps de trajet (par la multiplication du nombre de tournées nécessaires) et sur le temps de service (par la multiplication des manipulations de déchargement). Viennent ensuite les

facteurs indice de congestion et position du dépôt, d'influence semblable sur le temps d'exploitation.

Les interactions significatives sont, d'une part, le couple nombre de colis par commande / position du dépôt et, d'autre part, le couple indice de congestion / nombre de colis par commande. En effet, le nombre de colis par commande et la position du dépôt influent ensemble sur la distance kilométrique globale à parcourir et donc sur le temps cumulé de trajet. De même, l'indice de congestion et le nombre de colis par commande se combinent pour dégrader conjointement le temps cumulé de trajet.

L'interprétation des interactions ne se prête pas à une analyse de tendances ; remarquons pourtant que, pour le temps d'exploitation, on perd pratiquement autant de temps à livrer 1 colis pour les 10 clients quand le dépôt est proche (31 min) que pour livrer les 10 clients avec 10 colis quand le dépôt est à 7 km (39 min). Les effets moyens de l'interaction nombre de colis / position du dépôt restent pourtant faibles devant les effets moyens des autres paramètres et la combinaison paramétrique qui minimise le temps d'exploitation est : indice de congestion le plus faible (Ind1), nombre de colis le plus faible (nbbt1) et position du dépôt la plus proche (P1).

Au global, la sensibilité du temps d'exploitation à l'un des trois facteurs, et ce en tenant compte de l'interaction significative entre le nombre de colis/commande et la position du dépôt, peut être évaluée en ayant fixé les deux autres. Ainsi, pour un nombre de colis par commande fixé à $nbbt_2 = 5$ et une position du dépôt $P_2 = 0,4\text{km}$, on pose $[nbbt] = {}^t[0 \ 1 \ 0]$ et $[P] = {}^t[0 \ 1 \ 0]$ et l'on obtient l'expression du temps total d'exploitation en fonction de l'indice de congestion (Figure 3.8a) :

$$\text{TE} = 314 + [-34 \ 0 \ 34] [Ind] + [-17] + [-9] + [1]$$

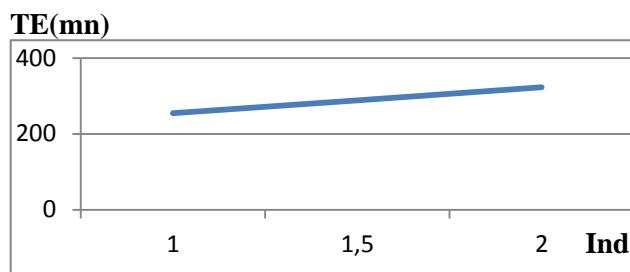


Figure 3.8 a : Impact de l'indice de congestion sur le TE
(pour $nbbt_2 = 5$ et $P_2 = 0,4\text{ km}$)

De même, pour un indice de congestion fixé à $Ind_2 = 1,5$ et une position du dépôt $P_2 = 0,4\text{km}$, on pose $[Ind] = {}^t[0 \ 1 \ 0]$ et $[P] = {}^t[0 \ 1 \ 0]$ et l'on obtient l'expression du temps total d'exploitation en fonction du nombre de colis par commande (Figure 3.8b) :

$$TE = 314 + [-228 \quad -17 \quad 245] [nbbt] + [-9] + {}^t[nbbt] \begin{bmatrix} 6 \\ 1 \\ -7 \end{bmatrix}$$

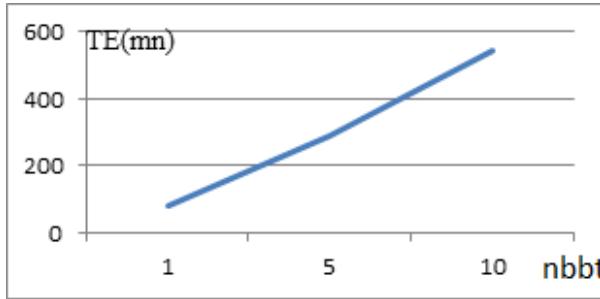


Figure 3.8b Impact du nombre de colis par commande sur le TE
(pour $Ind_2 = 1,5$ et $P_2 = 0,4$ km)

Enfin, pour un indice de congestion $Ind_2 = 1,5$ et un nombre de colis par commande fixé à $nbbt_2 = 5$ on pose $[Ind] = {}^t[0 \quad 1 \quad 0]$ et $[nbbt] = {}^t[0 \quad 1 \quad 0]$ pour obtenir l'expression du temps total d'exploitation en fonction de la position du dépôt (Figure 3.8c) :

$$TE = 314 + [-17] + [-35 \quad -9 \quad 44] [P] + [1 \quad 1 \quad -2] [P]$$

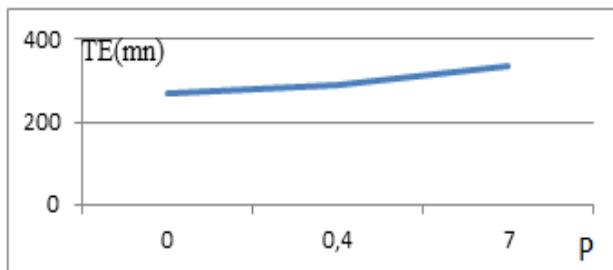


Figure 3.8 c Impact de la position du dépôt sur le TE
(pour $Ind_2 = 1,5$ et $nbbt_2 = 5$)

3.4.2.2 Plan PEX2 : Effet de la capacité du camion, du nombre de colis par commande et de l'étendue la zone de livraison sur le temps d'exploitation

Dans cette deuxième analyse, nous nous intéressons à l'impact de la capacité du véhicule de livraison sur le temps total d'exploitation. Les tests sont faits sous l'hypothèse d'un temps constant de chargement au dépôt et de déchargement des colis chez les clients. Comme précédemment, nous détaillons les impacts de ces paramètres sur le temps de trajet et le temps de service cumulés.

Nous faisons varier les paramètres d'entrée la capacité du véhicule (Cap_k), le nombre de colis ($nbbt_i$), et l'étendue de notre zone d'action (Z_i). Les paramètres fixés sont : l'indice de congestion ($Ind_1 = 1$), la position du dépôt ($P_2 = 0,4$) et le nombre de clients à livrer ($NbClt = 10$).

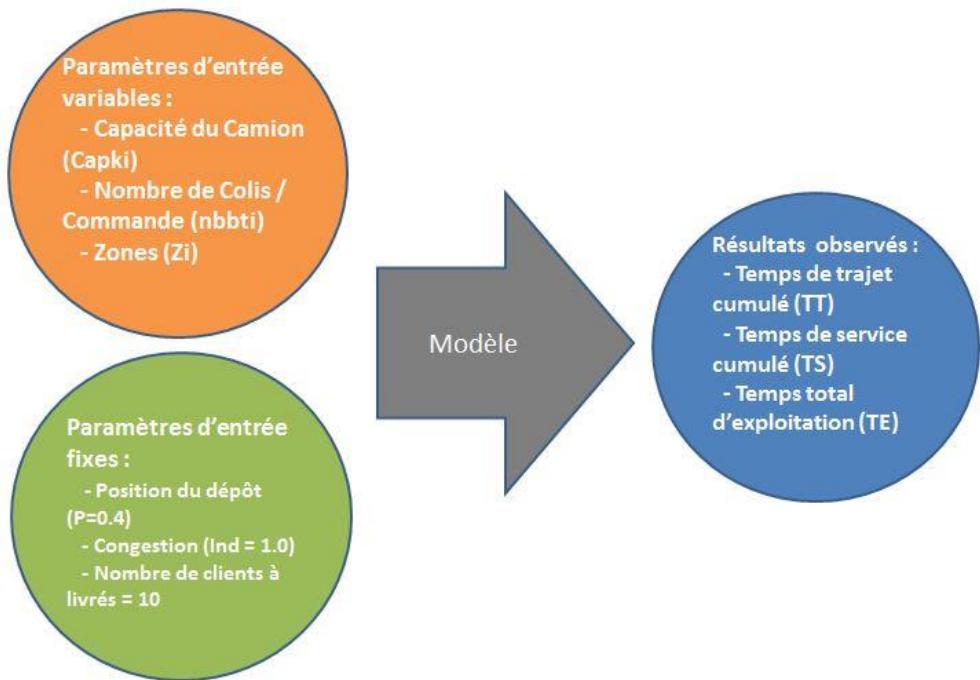


Figure 3-9 : Paramètres d'entrée et résultats de sortie du plan d'expérience PEX2

Nos résultats sont détaillés dans l'Annexe A2b sous l'intitulé PEX2.

Ci-dessous les modèles réduits des effets des paramètres sur le temps cumulé de trajet, le temps cumulé de service et le temps total d'exploitation :

$$TT = 127 + [53 - 20 - 34][Capk] + [-36 -8 45][nbbt] + [-98 -12 110][Z] + \\ {}^t[Capk] \begin{bmatrix} -54 & -5 & 59 \\ 19 & 0 & -19 \\ 34 & 5 & -39 \end{bmatrix} [nbbt]$$

$$TS = 226 + [-175 - 14 189][nbbt]$$

$$TE = 353 + [55 - 20 - 35][Capk] + [-211 - 22 233][nbbt] + [-97 - 12 109][Z] + \\ {}^t[Capk] \begin{bmatrix} -56 & -5 & 61 \\ 20 & 0 & -20 \\ 35 & 5 & -40 \end{bmatrix} [nbbt]$$

Nous tirons de ces résultats les observations suivantes :

La zone de livraison est le facteur individuel prédominant pour le temps de trajet mais le nombre de colis par commande a un effet considérable sur le temps de service et donc sur le temps d'exploitation. Une interaction qui affecte considérablement le temps de trajet et le temps d'exploitation est celle entre la capacité des camions et le nombre de colis par commande.

Le temps d'exploitation s'avère être affecté par les effets moyens individuels des paramètres, mais aussi par une interaction significative entre le nombre de colis et la capacité du camion (Figure 3-10).

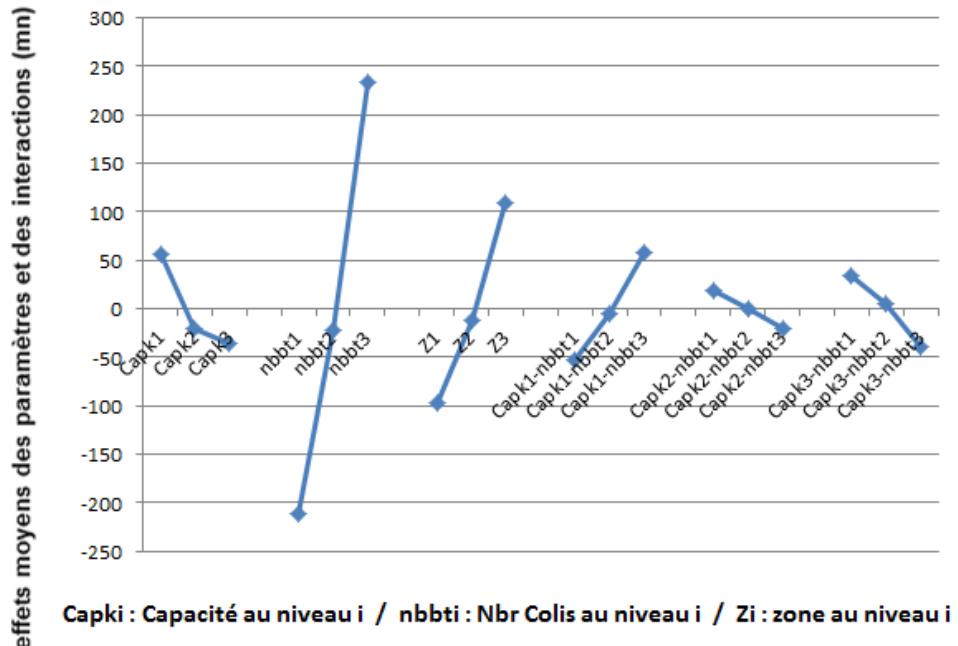


Figure 3-10 : Effets moyens des paramètres et de leurs interactions sur le temps d'exploitation (PEX2)

Le temps d'exploitation dépend essentiellement du nombre de colis. Bien que la capacité du camion soit un facteur important, on remarque que les effets de l'interaction entre la capacité du camion et le nombre de colis est de même ordre de grandeur. L'interprétation des interactions ne se prête pas à une analyse des tendances. On peut pourtant remarquer que les couplages qui minimisent le temps d'exploitation sont i) capacité camion faible et nombre de colis/commande faible (gain de 56 min) et ii) capacité camion importante et nombre de colis important (gain de 40 min). Le scénario qui minimise le temps d'exploitation est : capacité minimale (Capk1), avec nombre de colis/commande faible (nbdt1) et zone de livraison peu étendue (Z1).

Nous pouvons évaluer la sensibilité du temps d'exploitation à l'un des trois facteurs, et ce en tenant compte des interactions significatives entre ceux-ci, en ayant fixé les deux autres. Ainsi, pour un nombre de colis par commande fixé à $nbdt_2 = 5$ et une étendue $Z_2 = 16 \text{ km}^2$ de la zone de livraison, on pose $[nbdt] = {}^t[0 \ 1 \ 0]$ et $[Z] = {}^t[0 \ 1 \ 0]$ et l'on obtient l'expression du temps total d'exploitation en fonction de l'indice de congestion (Figure 3.11a) :

$$TE = 353 + [55 - 20 - 35][Capk] + [-22] + [-12] + {}^t[Capk] \begin{bmatrix} -5 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix}$$

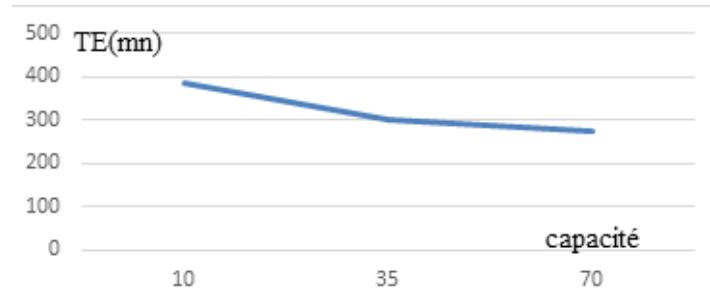
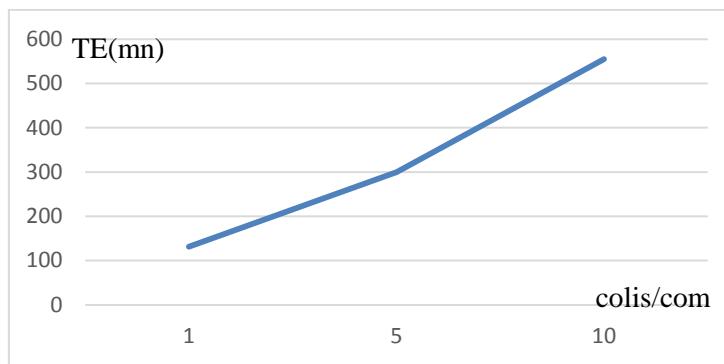


Figure 3-11 a : Impact de la capacité du camion sur le TE

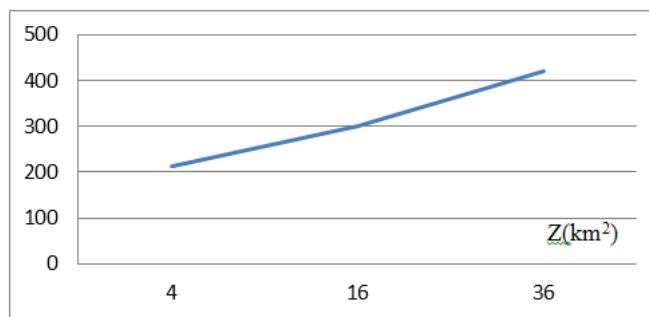
De même, l'influence du nombre de colis/commande sur le temps total d'exploitation, pour une capacité du camion $capk_2 = 35$ et une étendue $Z_2 = 16 \text{ km}^2$ de la zone de livraison s'obtient en posant $[Capk] = {}^t[0 \ 1 \ 0]$ et $[Z] = {}^t[0 \ 1 \ 0]$ (Figure 3.11b) :

$$TE = 353 + [-20] + [-211 - 22 \ 233][nbbt] + [-12] + [20 \ 0 \ -20][nbbt]$$

Figure 3-11 b : Impact du nombre de colis/commande sur le TE (pour $capk_2 = 35$ et $Z_2 = 16 \text{ km}^2$)

Enfin, l'influence de l'étendue de la zone de livraison sur le temps total d'exploitation, par exemple pour une capacité du camion $capk_2 = 35$ et un nombre de colis par commande $nbbt_2 = 5$ colis/ s'obtient en posant $[Capk] = {}^t[0 \ 1 \ 0]$ et $[nbbt] = {}^t[0 \ 1 \ 0]$, ce qui donne (Figure 3.11c) :

$$TE = 353 + [-20] + [-22] + [-97 \ -12 \ 109][Z]$$

Figure 3-11c : Impact de l'étendue de la zone de livraison sur le TE (pour $capk_2 = 35$ et $nbbt_2 = 5$ colis /commande)

3.4.2.3 Conclusions de l'étude 1

Les plans d'expérience PEX1 et PEX2 nous ont permis d'explorer les effets individuels des principaux paramètres de livraison, ainsi que leurs interactions principales, sur le temps d'exploitation. Dans notre cas d'étude, sont apparus les faits suivants :

- Le temps cumulé de trajet TT est allongé principalement par le nombre de colis/commande (qui nécessite de multiplier les tournées), l'éloignement du dépôt et l'étendue de la zone à livrer, car tous ces paramètres viennent augmenter le kilométrage global. A l'inverse, l'augmentation de la capacité du camion agit fortement sur la diminution du TT, en raison de la réduction du nombre de tournées nécessaires. Par ailleurs, nous relevons des interactions significatives : entre le nombre de colis/commande et l'éloignement du dépôt, qui se combinent pour augmenter le kilométrage ; entre le nombre de colis par commande et la capacité du camion, qui se trouvent fortement corrélés par l'effet inverse qu'ils produisent sur le nombre de tournées ; dans une moindre mesure, entre congestion et nombre de colis par commande, deux facteurs qui se combinent pour augmenter le temps de trajet.
- Le temps cumulé de service TS est pour l'essentiel dû au facteur nombre de colis par commande, qui impacte le temps de déchargement des colis chez les clients. L'effet de la congestion de la circulation reste minime, car l'exposition du camion à ce paramètre est de courte durée.
- Il n'est pas surprenant de constater que le temps total d'exploitation TE croît avec l'indice de congestion, le nombre de colis par commande, l'éloignement du dépôt et la superficie de la zone de livraison, et inversement décroît avec la capacité du camion. Les facteurs les plus sensibles sont le nombre de colis par commande et l'étendue de la zone de livraison, en raison de l'allongement du kilométrage qu'ils engendrent. Cet effet est contrecarré par l'augmentation de la capacité du camion, ce qui toutefois apparaît inadapté au contexte urbain.

Il résulte clairement de cette étude que le temps de trajet et le temps d'exploitation sont dégradés par l'emploi d'un petit véhicule, toutes choses égales par ailleurs. On constate par exemple (Figure 3-11a) une augmentation de 90 mn (soit 30% d'augmentation) du temps d'exploitation en utilisant une capacité de 10 colis plutôt que de 35 colis.

Nous rappelons que notre modèle adopte l'hypothèse, comme c'est le plus souvent le cas dans la littérature (Azi, et al., 2007) (Crainic, et al., 2015), selon laquelle le temps de service dépend uniquement du nombre de colis et non de la capacité du camion. Or, nos observations de terrain montrent plutôt que le temps de chargement au dépôt, de parking et de déchargement chez le client (Figure 3.4) est dépendant de la capacité du camion. En pratique, nous avons observé que plus de 50% du temps d'exploitation correspond au temps cumulé de service (voir Annexe 3) et que celui-ci dépend à la fois du degré de congestion et de la capacité du camion.

Par l'étude suivante, nous avons donc souhaité approfondir l'analyse des paramètres qui conditionnent le temps de service. Cette étude complémentaire consiste à tester plusieurs jeux de valeurs pour chaque paramètre, pour déterminer les seuils à partir desquels un petit véhicule aurait l'avantage sur un plus gros véhicule, en compensant l'augmentation du temps cumulé de trajet par une diminution du temps cumulé de service.

3.4.3 Etude 2 : Effet sur le temps d'exploitation des paramètres conditionnant le temps de chargement au dépôt et le temps de service

Il s'agit ici d'étudier la sensibilité du temps total d'exploitation aux paramètres utilisés dans le calcul du temps cumulé de service, en l'occurrence le temps de préparation de la tournée au dépôt ($TChargDepot$), le temps de déchargement par colis ($TDchgt$) et le temps nécessaire pour garer un véhicule ($TParking$). On peut considérer en effet qu'un véhicule de faible gabarit rend plus aisé l'accès aux marchandises et qu'il lui correspond un temps de déchargement unitaire $TDchgt$ plus faible. La même observation s'appliquant aux paramètres $Tparking$ et $TChgtDepot$, on peut gagner en temps cumulé de service en utilisant un véhicule de petit gabarit. Notre étude vise à déterminer quelle performance de service doit offrir un petit gabarit pour que le temps total d'exploitation soit meilleur que celui obtenu avec un moyen gabarit.

Rappelons l'expression du temps total d'exploitation:

$$TE = TP + (TT + TS)$$

Rappelons l'expression du temps cumulé de service sur un nœud client:

$$TS = \sum ((Tparking \times Ind) + (TDchgt \times nbdt))$$

Nous comparons les temps d'exploitation obtenus avec un petit gabarit de capacité $Capk_1 = 10$ et un moyen gabarit de capacité $Capk_3 = 35$ dans des conditions semblables en fixant les autres paramètres comme suit :

- Indice de congestion ($Ind_1 = 1$)
- Nombre de colis par commande ($nbdt_3 = 10$)
- Position de dépôt ($P_2 = 0.4$)
- Zone de livraison ($Z_1 = 2$)
- Nombre de clients à livrer : 10 clients

3.4.3.1 Impact du temps de déchargement par colis ($TDchgt$)

Tout d'abord, nous allouons à chacun des deux véhicules (petit et moyen gabarit) un temps de chargement $TDchgt$, compris dans l'intervalle 0 à 240s (4mn), et étudions l'effet de ce différentiel sur le temps total d'exploitation TE en gardant constants les autres paramètres ($Tparking$, $TChgtDepot$).

La Figure 3-12 présente les résultats obtenus par notre modèle MTTD-VRPTW sous CPLEX. La figure indique qui, du petit ou du moyen gabarit, offre le plus petit TE, selon les valeurs du couple ($TDchgt$ petit gabarit, $TDchgt$ moyen gabarit). Nous constatons qu'un différentiel de 52 s du temps de chargement entre petit et moyen gabarits est nécessaire pour donner l'avantage, au regard du TE, au petit gabarit.

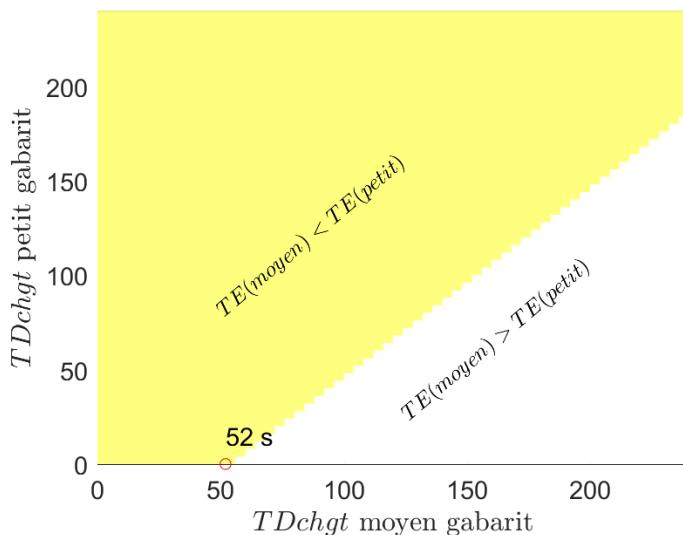


Figure 3-12 : impact des temps de déchargement (petit et moyen gabarit) sur le TE

3.4.3.2 Impact du temps cumulé de préparation au dépôt ($TChargDepot$)

Dans cette partie, nous allons procéder de la même façon pour évaluer l'incidence du paramètre $TChargDepot$, temps cumulé de préparation des tournées au dépôt, sur le temps total d'exploitation TE. Nous allouons à chacun des deux véhicules (petit et grand gabarit) une valeur $TChargDepot$, comprise dans l'intervalle 0 à 10000 secondes, en gardant constants les paramètres restants ($Tparking$, $TDChgt$). Notons que la valeur $TChargDepot=0$ peut s'obtenir en préparant les chargements en temps masqué et en utilisant un véhicule à plusieurs remorques. Le but de cette étude est d'observer l'effet du temps cumulé de préparation des chargements au dépôt sur le TE et de déterminer en deçà de quelle valeur ce paramètre donne l'avantage au petit gabarit.

Les résultats obtenus par notre modèle MTTD-VRPTW sous CPLEX (Figure 3-13) indiquent qu'une réduction globale de 5224 s (87 mn) du temps cumulé de chargement est nécessaire pour que le TE

tourne à l'avantage du petit porteur. Cette exigence correspond à environ 9mn sur chaque chargement au dépôt.

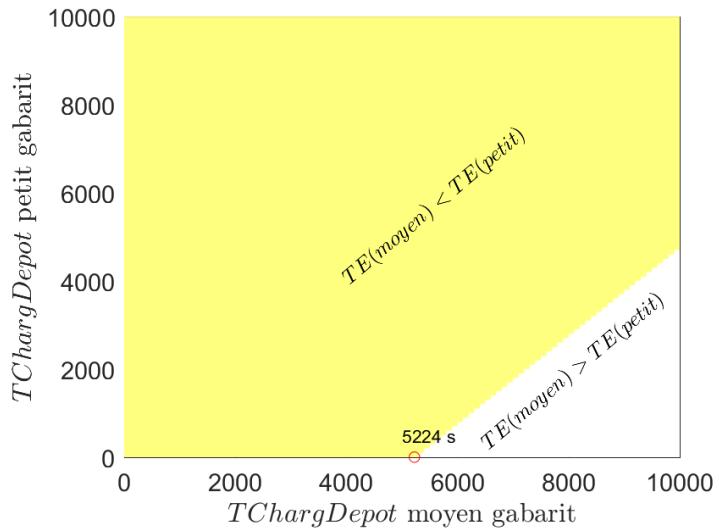


Figure 3-13 : impact des temps de chargement au dépôt (petit et moyen gabarit) sur le TE

3.4.3.3 Impact du temps de parking (Tparking)

Enfin, nous faisons varier le paramètre $T_{parking}$, temps de parking chez les clients, en gardant constants les paramètres restants ($TChargDepot$, $TDChgt$). Les valeurs du paramètre $T_{parking}$ allouées aux deux véhicules sont comprises entre 0 à 800 secondes. Les résultats obtenus par notre modèle MTTD-VRPTW sous CPLEX (Figure 3-14) évaluent à 522 s, soit environ 9mn, la réduction du temps de parking rendant le petit gabarit avantageux.

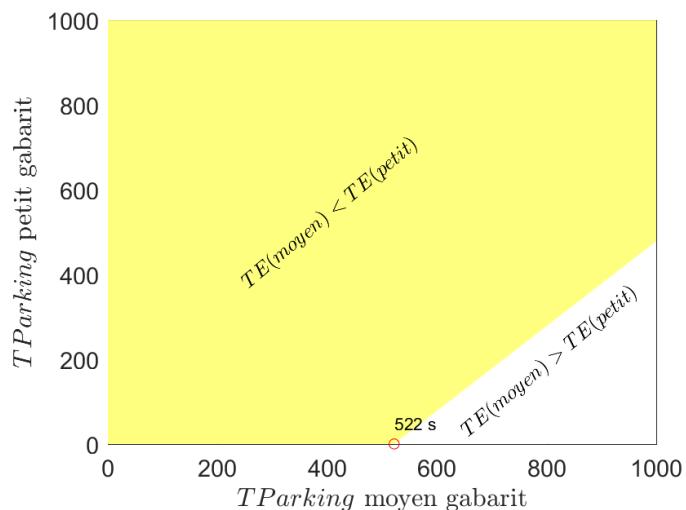


Figure 3-14 : impact du temps de parking (petit et moyen gabarit) sur le TE

3.4.3.4 Conclusions de l'étude 2

Compte tenu de la structure additive de la fonction qui donne le temps d'exploitation, et compte tenu du fait que nos trois paramètres $TChargDepot$, $TChgt$, $Tparking$ n'affectent pas le temps cumulé de trajet, nous écrivons le différentiel, selon que l'on utilise un petit ou un moyen gabarit, du temps d'exploitation comme suit:

$$\Delta TE = \Delta TS = \Delta TChargDepot + \sum ((\Delta Tparking \times \text{Ind}) + (\Delta TDchgt \times \text{nbbt}))$$

Si $\overline{\Delta TE}$ (dans notre cas d'étude, $\overline{\Delta TE} = 90mn$) représente le gain escompté, sur le temps d'exploitation, par l'utilisation d'un véhicule de petit gabarit plutôt que de moyen gabarit, nous souhaitons obtenir $\Delta TE \geq \overline{\Delta TE}$ et donc

$$\Delta TChargDepot + \sum ((\Delta Tparking \times \text{Ind}) + (\Delta TDchgt \times \text{nbbt})) \geq \overline{\Delta TE}$$

L'inégalité ci-dessus détermine, dans l'espace des paramètres $\Delta TChargDepot$, $\Delta Tparking$, $\Delta TDchgt$, le domaine avantageant le petit gabarit. La limite intérieure de ce domaine, soit

$$\Delta TChargDepot + \sum ((\Delta Tparking \times \text{Ind}) + (\Delta TDchgt \times \text{nbbt})) = \overline{\Delta TE}$$

est un triangle critique dont les trois sommets sont connus, puisque nous avons préalablement établi

$$\Delta TChargDepot = 5224 \text{ s} \quad \text{pour } \Delta TDchgt = 0, \Delta TParking = 0$$

$$\Delta TDchgt = 52 \text{ s} \quad \text{pour } \Delta TChargDepot = 0, \Delta TParking = 0$$

$$\Delta TParking = 522 \text{ s} \quad \text{pour } \Delta TChargDepot = 0, \Delta TDchgt = 0$$

Nous concluons que le temps d'exploitation est à l'avantage du véhicule de petit gabarit pour tout triplet $\Delta TChargDepot$, $\Delta Tparking$, $\Delta TDchgt$ appartenant au domaine extérieur au triangle critique (Figure 3-15).

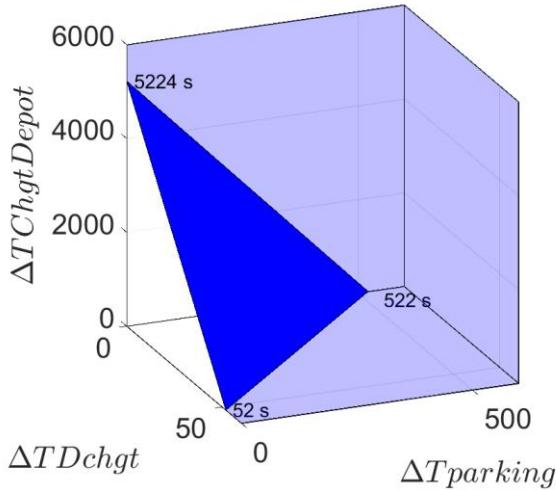


Figure 3-15 : Domaine paramétrique avantageant le véhicule de petit gabarit au regard du TE

Cette étude a permis de cerner la valeur des trois paramètres ($TChgtDepot$, $TChgt$, $Tparking$) conditionnant le temps de service, et les performances requises pour privilégier un véhicule à faible gabarit.

Une dernière étude, basée sur un jeu de paramètres réaliste issu d'une observation de terrain que nous avons menée, vise à conforter l'idée qu'il est possible de déterminer des conditions justifiant l'utilisation d'un véhicule de faible gabarit en milieu urbain.

3.4.4 Etude 3 : Impact de la capacité de camion sur le temps d'exploitation

Cette étude vient compléter l'étude 2 en comparant les temps d'exploitation obtenus avec des valeurs différentes de la capacité du camion (petit, moyen et grand gabarit), et ce en prenant en compte différents jeux de valeurs du trio de paramètres $TDchgt$, $TParking$ et $TChgtDepot$. Les valeurs de ces paramètres sont issues d'observations de terrain effectuées par l'entreprise ELCIDIS en suivant des tournées de livraison dans le centre-ville de La Rochelle.

3.4.4.1 Plan PEX3 : effet de la capacité du camion sur le temps d'exploitation

Dans cette étude, nous faisons varier la capacité du camion ($Capk_i$), le nombre de colis par commande ($nbbt_i$), et le degré de congestion (Ind_i), de la même façon que dans le PEX2. On retrouve les mêmes 3 niveaux pour tous les paramètres variables. Le nombre de colis total varie ici de 10 à 100 puisqu'on livre 10 clients dans chaque tournée, avec le même nombre de colis pour chacun. Les paramètres fixés sont : la position du dépôt ($P_1=0.4$), le nombre de clients à livrer ($NbClt=10$) et l'étendue de zone ($Z_1=2$).

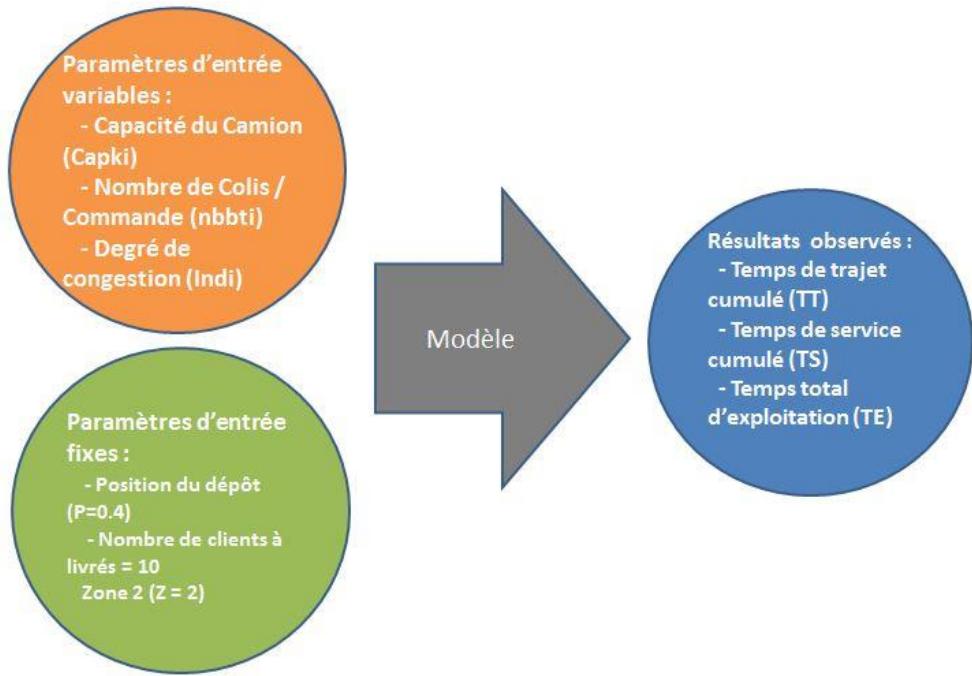


Figure 3-16 : Paramètres d'entrée et résultats de sortie du plan d'expérience 3 (PEX3)

Les valeurs choisies pour les paramètres variables (Tableau , Tableau 3- et Tableau), sont déduites de nos observations de terrain et donnent lieu à trois jeux de données.

Jeu de donnée n°1 : Le temps de service est ici considéré comme indépendant de la capacité du camion et uniquement fonction du nombre de colis à livrer à chaque client. Les paramètres temps de parking ($T_{parking}$), temps de déchargement par colis ($TDchgt$) et temps de chargement au dépôt ($TempsChargDepot$) sont fixes.

Tableau 3-4 : 1° jeu de données pour le calcul du temps de service

| Capacité du véhicule | $T_{parking}$ (s) | $TDchgt$ (s) | $TempsChargDepot$ (s) |
|----------------------|-------------------|--------------|-----------------------|
| Capk1 = 10 | 72 | 240 | 900 |
| Capk2 = 35 | 72 | 240 | 900 |
| Capk3 = 70 | 72 | 240 | 900 |

Les résultats du plan d'expérience pour ce jeu de données (Figure 3-17) confirment que l'hypothèse d'un temps de service indépendant de la capacité du véhicule conduit à une variation du temps total d'exploitation identique à celle du temps de trajet. Ce premier jeu va servir de référence pour les deux jeux suivants. Dans une telle situation, le temps d'exploitation est minimal pour l'utilisation du véhicule de plus grand gabarit.

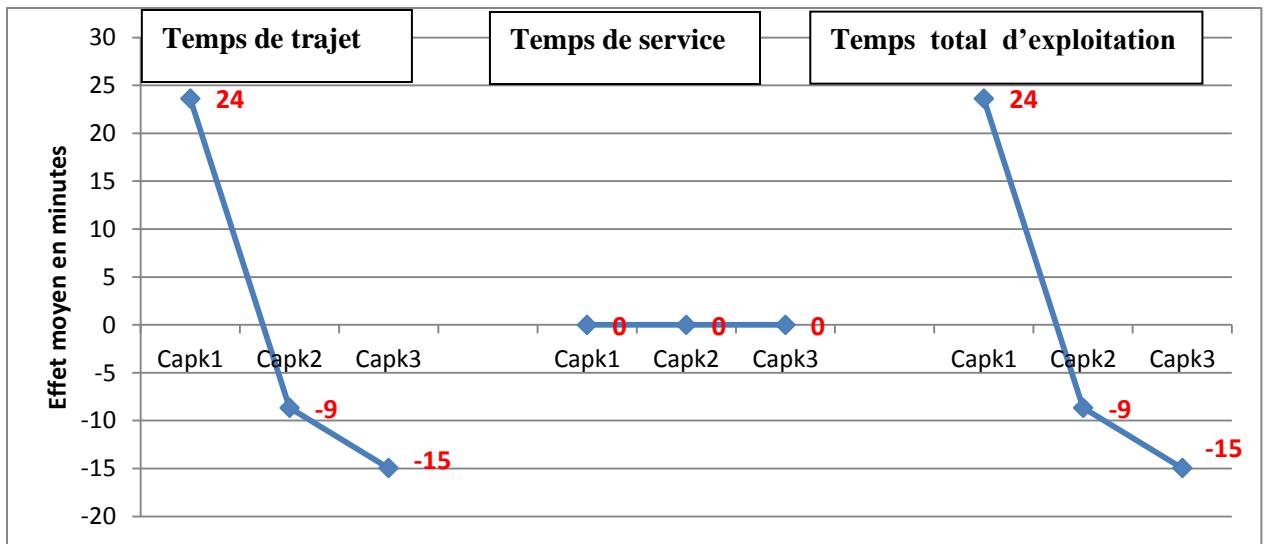


Figure 3-17 : Effet de la capacité du véhicule sur le temps total d'exploitation (PEX3 jeu de données 1)

Jeu de données n°2 : le temps de service est ici considéré comme dépendant de la capacité du camion, tandis que le temps de parking et de déchargement décroissent avec la capacité des véhicules.

Tableau 3-5 : 2° jeu de données pour le calcul du temps de service

| Capacité du véhicule | $T_{parking}$ (s) | $TDchgt$ (s) | $TempsChargDepot$ (s) |
|----------------------|-------------------|--------------|-----------------------|
| Capk1 = 10 | 25 | 180 | 900 |
| Capk2 = 35 | 72 | 240 | 900 |
| Capk3 = 70 | 72 | 240 | 900 |

Les résultats du plan d'expérience (Figure 3-18) obtenus montrent que le véhicule de petite capacité ne minimise pas le temps de service, en raison d'un passage plus fréquent au dépôt et de la multiplication des chargements, qui n'est pas entièrement compensé par la diminution des temps de parking et de déchargement. Pour ce jeu de valeurs, le véhicule de plus grand gabarit reste intéressant à exploiter.

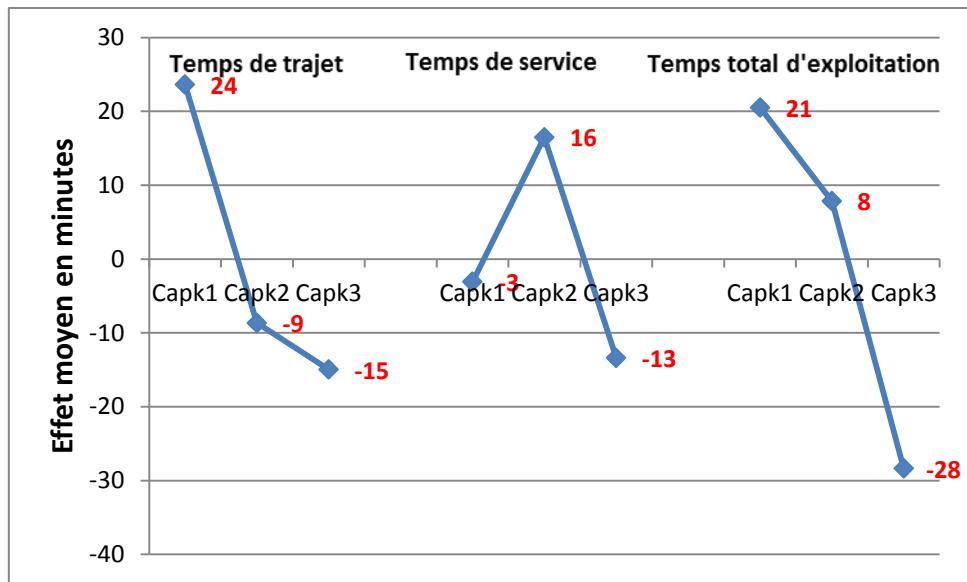


Figure 3-18 : Effet de la capacité du véhicule sur le temps total d'exploitation (PEX3 jeu de données 2)

Jeu de données n°3 : cette dernière analyse se fonde sur le même jeu de valeurs que dans les cas précédents, exception faite du temps de chargement au dépôt qui est considéré comme nul ou négligeable. Ceci suppose l'utilisation d'un véhicule multi remorques, c'est-à-dire un petit véhicule tracteur venant prendre des remorques de faible capacité, chargées en temps masqué pendant la tournée précédente.

Tableau 3-6 : 3° jeu de données pour le calcul du temps de service

| Capacité du véhicule | <i>Tparking</i> (s) | <i>TDchgt</i> (s) | <i>TempsChargDepot</i> (s) |
|----------------------|---------------------|-------------------|----------------------------|
| Capk1 = 10 | 25 | 180 | 0 |
| Capk2 = 35 | 72 | 240 | 900 |
| Capk3 = 70 | 72 | 240 | 900 |

Les résultats du plan d'expérience (Figure 3-19) montrent que le véhicule de petit gabarit minimise ici le temps d'exploitation, car l'augmentation du temps cumulé de trajet est largement compensée par la diminution du temps cumulé de service.

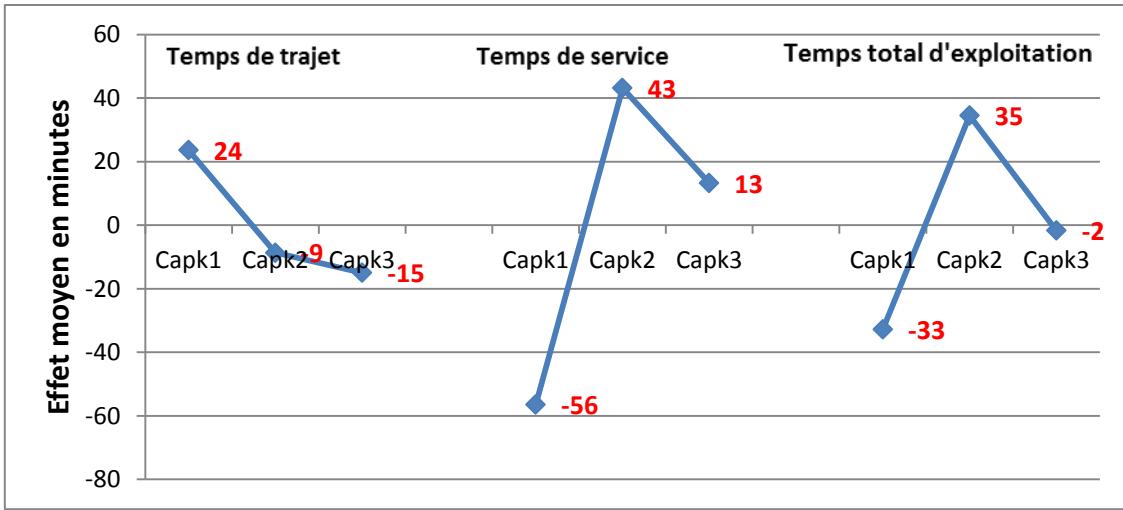


Figure 3-19 : Effet de la capacité du véhicule sur le temps total d'exploitation (PEX3 jeu de données 3)

3.4.4.2 Conclusions de l'étude 3

Notre étude, basé sur des temps techniques réalistes issus de nos observations de terrain, montre qu'un véhicule de petit gabarit peut être intéressant en contexte urbain, à condition que le temps cumulé de chargement au dépôt soit très faible voire nul, ce qui suppose de pouvoir masquer les temps de chargement, par exemple grâce à un système multi-remorques. Dans ces conditions en effet, le gain en temps de service obtenu par le raccourcissement des temps de parking et de déchargement reste dominant par rapport aux pertes en temps cumulé de trajet qui résultent de la multiplication des tournées.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au problème de tournée de véhicules dans un contexte urbain, en ciblant notre analyse sur les phénomènes propres à ce contexte. Nous avons proposé une modélisation de la problématique MTTD-VRPTW multi-tournées à un camion, sous contraintes de fenêtres temporelles de livraison et prenant en compte la congestion du trafic, par un modèle de programmation linéaire à variables mixtes.

Notre analyse s'est, dans un premier temps, centré sur la prise en compte des effets de la congestion sur le temps cumulé de trajet, le temps cumulé de service et donc sur le temps total d'exploitation.

Puis, nous avons mené une étude de sensibilité de la performance temporelle aux principaux paramètres du problème, via des plans d'expérience issus de notre modèle d'optimisation résolu par le solveur CPLEX. Tout d'abord, nous avons mis en évidence les effets des paramètres, en incluant les interactions significatives de ceux-ci, sur le temps cumulé de trajet, sur le temps cumulé de service et

le temps total d'exploitation. Ceci nous a permis, d'une part, de clarifier les paramètres sur lesquels on peut jouer afin gagner en performance et, d'autre part, de déterminer les conditions qui favoriseraient l'utilisation d'un véhicule de faible gabarit en contexte urbain.

Ainsi, il a été montré que, pour qu'un petit gabarit devienne avantageux, il faut que les temps de rupture de charge au dépôt soit quasi-nuls. En pratique, cela veut dire que le gestionnaire des tournées de livraison doit préparer les tournées en temps masqué.

Le chapitre suivant portera sur la validation expérimentale de notre modèle à partir d'un cas d'étude de logistique urbaine dans la ville de La Rochelle.

Chapitre 4 :

4. Etude de cas à La Rochelle

4.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est d'évaluer l'intérêt d'un utilitaire ultra léger face à l'utilisation d'un camion de grand gabarit sur la base d'une étude cas de zone urbaine. L'analyse s'appuie sur des données de terrain collectées à La Rochelle à travers plusieurs campagnes de mesures réalisées auprès de PROXIWAY, filiale de TRANSDEV, qui exploite la plateforme logistique urbaine ELCIDIS dans le cadre d'une Délégation de Service Publique.

Les données recueillies ont permis de paramétriser le modèle d'optimisation de tournées détaillé dans le chapitre 3, de manière à instancier ce modèle au cas rochelais.

Sur la base du modèle ainsi paramétré, nous avons réalisé une étude comparative de performance selon le gabarit du véhicule, avec pour objectifs:

- d'observer, d'une part, si la mise en œuvre d'un véhicule de petit gabarit, dont l'intérêt est évident du point de vue environnemental et sociétal, est une solution qui ne sacrifie pas l'efficience logistique,
- et, d'autre part, d'observer dans quelle mesure la localisation d'un ELU en périphérie de la ville, plutôt qu'en centre-ville, viendrait pénaliser le temps d'exploitation.

4.2 Contexte de l'étude

4.2.1 Le TMV à La Rochelle

La communauté d'agglomération (CdA) de La Rochelle est un Etablissement Public et de Coopération Intercommunale regroupant 28 communes. Selon une enquête de l'INSEE datant de 2013, la CdA représentait 164332 habitants pour une étendue de 327 km². La commune de La Rochelle (Figure 4-1), avec environ 75000 habitants, représentait alors 48% de la population de la CdA.

La concentration des établissements et des emplois sur La Rochelle révèle l'attractivité commerciale et l'importance de la ville dans le développement économique de toute l'agglomération (La Rochelle compte 53% des établissements et représente 58% des emplois de la CdA). En revanche, ce pôle d'activités commerciales et administratives génère un nombre important de mouvements de marchandises à l'intérieur de la ville, pour satisfaire les besoins des habitants de cette ville et des villes voisines, qui s'approvisionnent sur le marché rochelais.

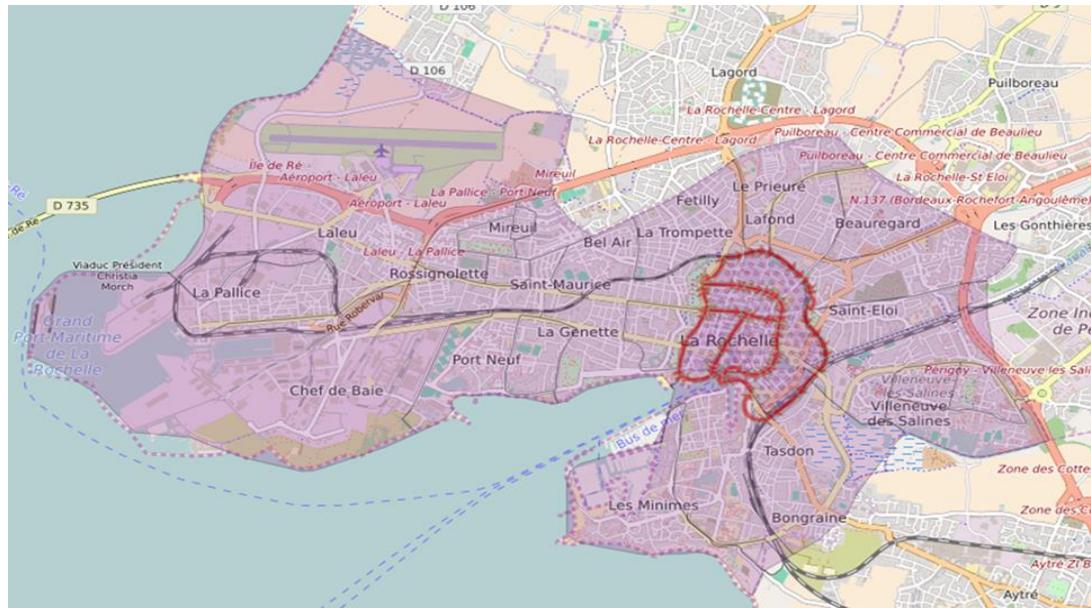


Figure 4-1 : Commune de La Rochelle

Une simulation des mouvements de marchandises en ville du logiciel FRETURB⁶ montre que les établissements rochelais génèrent plus de 47000 mouvements de marchandises par semaine toutes activités confondues.

Tableau 4-1 : Mouvements par secteur d'activité économique à La Rochelle

| Secteur d'activité | Mouvements | % | Etablissements | % |
|----------------------|--------------|-------------|----------------|-------------|
| Petit commerce | 12710 | 27% | 2005 | 16% |
| Artisanat / Service | 11428 | 24% | 2895 | 23% |
| Tertiaire de bureau | 6759 | 14% | 6783 | 54% |
| Entrepôt / Transport | 5484 | 12% | 53 | 0% |
| Industrie | 5195 | 11% | 490 | 4% |
| Commerce de gros | 5153 | 11% | 246 | 2% |
| Grande distribution | 528 | 1% | 10 | 0% |
| Agriculture | 282 | 1% | 92 | 1% |
| Total | 47539 | 100% | 12574 | 100% |

Trois secteurs d'activité économique (petit commerce, artisanat et services, tertiaire de bureau) génèrent à eux-seuls 65% des mouvements hebdomadaires (Tableau 4-1). Ces mouvements de TMV représentent le support physique du développement économique, mais sont aussi une source de nuisances environnementales et citoyennes.

La Rochelle se caractérise par un centre-ville historique difficile d'accès, ce qui amplifie les problèmes de congestion et de nuisances.

⁶ FRETURB est un logiciel développé par le Laboratoire Aménagement, Economie et Transports (LAET)

Au centre-ville de La Rochelle, les secteurs du petit commerce, de l'artisanat et des services, et tertiaire de bureau totalisent 91% (dont 80% en réception et 20% en expédition) des mouvements hebdomadaires (Tableau 4-2).

Tableau 4-2 : Mouvements par secteur d'activité économique dans le centre-ville rochelais

| Secteur d'activité | Mouvements | % | Etablissements | % |
|----------------------|--------------|-------------|----------------|-------------|
| Petit commerce | 6279 | 50% | 1059 | 27% |
| Artisanat / Service | 2962 | 24% | 714 | 18% |
| Tertiaire de bureau | 2145 | 17% | 1988 | 51% |
| Entrepôt / Transport | 509 | 4% | 86 | 2% |
| Industrie | 457 | 4% | 35 | 1% |
| Commerce de gros | 117 | 1% | 3 | 0% |
| Grande distribution | 82 | 1% | 1 | 0% |
| Agriculture | 10 | 0% | 7 | 0% |
| Total | 12561 | 100% | 3893 | 100% |

4.2.2 Le CDU ELCIDIS

Dans le cadre du projet européen ELCIDIS (ELectric City DIstribution System) qui regroupait en 2001 sept villes européennes, dont La Rochelle, et l'association CITELEC⁷, une plate-forme de 700m² dédiée à l'activité de cross-docking et à la location d'espace de stockage a été implantée à La Rochelle au début des années 2000. L'objectif du CDU ELCIDIS est de protéger le centre historique de La Rochelle, tout en améliorant la performance du système de distribution du fret urbain à travers, notamment, l'utilisation de véhicules propres à motorisation électrique.

Au niveau local, le projet de plateforme ELCIDIS a été adopté par la CdA, qui reste propriétaire d'une partie de la flotte des véhicules. Depuis 2006, la gestion du site et des livraisons est confiée à PROXIWAY, filiale du groupe TRANSDEV, dans le cadre d'une délégation de service public d'électromobilité. Une originalité rochelaise, cette délégation regroupe plusieurs projets autour de l'électromobilité, dont la plate-forme ELCIDIS, ainsi que d'autres prestations de transport de passagers.

En analysant l'activité d'ELCIDIS, nous avons tenté d'estimer le nombre de mouvements générés par l'activité logistique. Pour calculer ces mouvements, nous nous sommes basés sur deux hypothèses :

- un mouvement est constitué par un déplacement entre deux points de livraison ou d'enlèvement,
- tout destinataire n'est livré qu'une seule fois par jour (le cas contraire restant marginal)

La part du flux hebdomadaire capté par ELCIDIS est d'environ 2% de la demande totale en matière de TMV. Ce pourcentage est calculé par rapport au total des mouvements des trois plus gros générateurs de flux de marchandises que nous avons cités (petit commerce, l'artisanat et services, tertiaire de

⁷ CITELEC Association de villes européennes intéressées par le véhicule électrique, fondée en 1990 sous l'égide des Communautés Européennes.

bureau). ELCIDIS participe concrètement à la réduction des nuisances du TMV via l'utilisation de véhicules propres (88 tonnes de CO₂ évités en 2014 selon l'ADEME). La zone d'intervention d'ELCIDIS se situe principalement dans l'hyper centre-ville rochelais (Figure 4-2), où la réglementation associée à la logistique urbaine est la plus contrainte.



Figure 4-2 : Zone d'activité principale d'ELCIDIS

Notre analyse de l'activité ELCIDIS était motivée par le fait que l'opérateur PROXIWAY y exploite une flotte hétérogène de véhicules comprenant des véhicules de petit gabarit et des véhicules de grand gabarit:

- 4 véhicules utilitaires électriques de type 4 m³ (CITROEN BELINGO), dont nous exploiterons les données pour calibrer ce que nous appelons le Véhicule Petit Gabarit (VPG) dans notre modèle ;
- 2 véhicules utilitaires (de marque MODEC et de marque GRUAU) électriques de type 20 m³, équivalent 3,5 tonnes dont nous exploiterons les données pour calibrer ce que nous appelons le Véhicule Grand Gabarit (VGG) dans notre modèle ;

4.3 Paramétrage du modèle

Il nous fallait procéder au calibrage des paramètres de notre modèle de planification en rapport avec le cas rochelais. Ce paramétrage vise à définir les valeurs des différentes données d'entrées du modèle présenté au chapitre 3 : distances routières, temps de parking, temps de déchargement par type de véhicule, vitesse des véhicules, et indices de congestion aux différentes heures de la journée pour la ville de La Rochelle (Figure 4-3).

Nous avons mené deux semaines d'observation auprès d'ELCIDIS, afin d'observer les modalités de livraison impliquant des véhicules de gabarits différents (VPG et VGG) et de recueillir les données correspondantes pour paramétriser notre modèle.

Dans cette étude, nous avons choisi d'observer le temps et la distance nécessaires pour effectuer une tournée de livraison de bout en bout (départ et retour au dépôt pour chaque tournée observée). A cette occasion, nous avons identifié la décomposition de la durée globale d'une tournée en temps de transport et temps de service (temps techniques de livraison au client depuis la place de parking), telle que décrite dans le chapitre 3.

4.3.1 La congestion

Nous avons mené sur La Rochelle une analyse comparable à celles réalisées à Toulouse, Bordeaux et Nantes pour obtenir la valeur horaire de l'indice de congestion (Figure 4-3).

La congestion rochelaise est moindre qu'à Bordeaux, Nantes et Toulouse. Nous trouvons un indice de congestion variable de 1 (aux heures creuses) à 1,54 (à 19h). A titre de comparaison, l'indice de congestion atteint la valeur 2 à 19h à Nantes. Toutefois, le profil de fluctuation de l'indice de congestion est similaire dans les différentes villes, avec un premier pic à 10h du matin et un deuxième entre 18h et 19h.

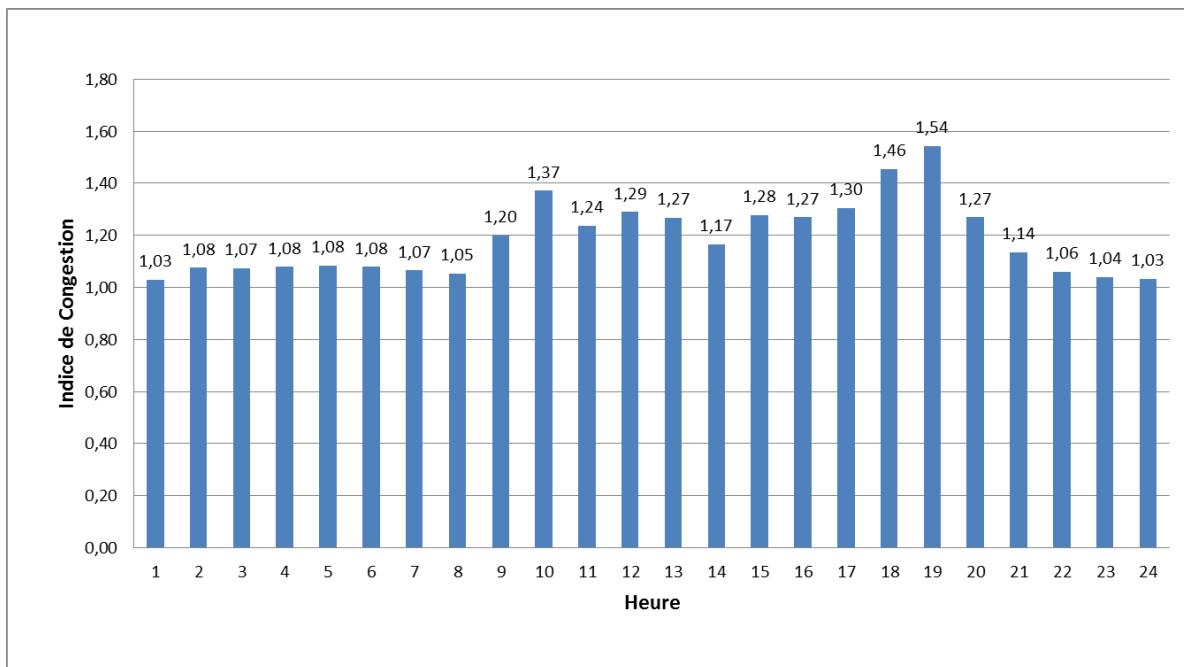


Figure 4-3 : indices de congestion pour la ville de La Rochelle le 19/06/2017

Pour alimenter notre modèle, nous ne considérerons que les indices de congestion entre 7h à 16h, que nous agrégeons en 9 plages horaires possédant un indice de congestion propre (Tableau 4-3).

Tableau 4-3 : Indice de congestion pour La Rochelle de 7h à 16h

| Plages horaires | Indices de congestion |
|-----------------|-----------------------|
| 7h-8h | 1 |
| 8h-9h | 1,2 |
| 9h-10h | 1,4 |
| 10h-11h | 1,25 |
| 11h-12h | 1,3 |
| 12h-13h | 1,27 |
| 13h-14h | 1,17 |
| 14h-15h | 1,3 |
| 15h-16h | 1,3 |

4.3.2 Données nécessaires au calcul du temps de trajet

Le temps de trajet de chaque mouvement est proportionnel à la distance à parcourir, à l'indice de congestion au moment où le véhicule effectue le trajet et inversement proportionnel à la vitesse moyenne du véhicule.

Vitesse moyenne du véhicule

Nous avons observé sur les tournées ELCIDIS une vitesse moyenne de 18km/h, quel que soit le type de véhicule utilisé. Cette valeur sera retenue dans notre modèle

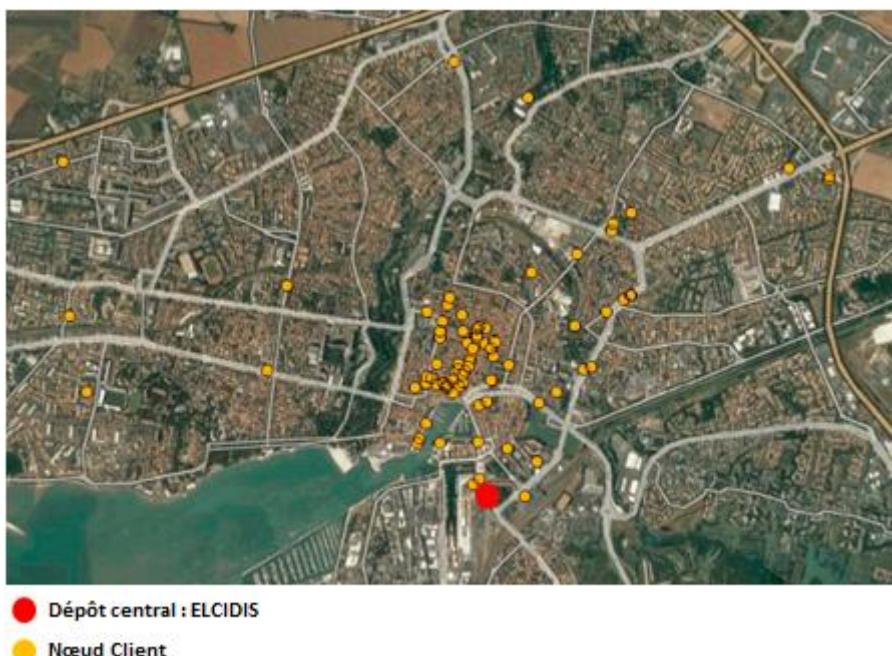


Figure 4-4 : réseau de 86 nœuds clients sur La Rochelle

Matrice des distances réelles

Le réseau constitué des clients à livrer comporte 86 clients dont 93% se situent dans une zone d'environ 4 km² de superficie, auxquels s'ajoute le dépôt que constitue la plateforme ELCIDIS (Figure 4-4).

La matrice des distances comporte les distances réelles séparant tout couple de points visités (clients et dépôt). Nous avons utilisé l'API Google-Maps® pour obtenir ces distances. Le choix s'est porté sur cet API puisqu'il propose un itinéraire optimisé en distance, qui prend en compte des contraintes réalistes telles que sens uniques et vitesses autorisées.

4.3.3 Données nécessaires au calcul du temps de service

Nous avons effectué une nouvelle campagne d'observations sur le site ELCIDIS, visant à analyser en détail le temps de service. Nous avons relevé les temps suivants pour chaque livraison (cf. Annexe 6):

- Temps nécessaire pour se garer sur une aire de livraison,
- Temps nécessaire pour décharger et livrer tous les colis à chaque client, comprenant :
 - o le temps d'extraction des colis du véhicule,
 - o le temps de marche pour aller vers le lieu de livraison,
 - o le temps de remise de la marchandise chez le client,
 - o le temps de marche pour retourner au véhicule.

Durant l'étude, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la caractérisation fine du temps nécessaire pour garer un véhicule en milieu urbain. Nous avons effectué des chronométrages au centre-ville de La Rochelle, en demandant aux transporteurs de nous indiquer le moment où, au terme d'un trajet, ils commencent à rechercher un emplacement de parking, puis le moment où le véhicule est parqué. La valeur moyenne des temps de parking constatés est retenue pour paramétriser notre modèle.

Ces premières observations ont montré un écart de temps important selon le gabarit du véhicule, puisque le temps de parking moyen des VPG est 3 fois plus faible que celui des VGG, en raison de manœuvres plus rapides et du taux de disponibilité des places simples plus élevé que celui des places doubles. L'étude portant sur le taux de disponibilité des places est détaillée dans l'Annexe 4.

Dans une même logique, nous avons relevé, par l'observation de l'activité réelle, le temps moyen de déchargement par colis et le taux moyen de remplissage du véhicule. Le taux de remplissage moyen des VGG atteint 35%. En effet, les colis n'étant que très rarement gerbés, le chargement ne se fait que sur une demi-hauteur de remorque. Le volume utilisé est donc en réalité d'environ 7m³, soit un maximum de 70 colis de dimensions standards (60 cm x 40 cm x 40 cm) pour un volume d'environ 0,1 m³. Pour les VPG, le taux moyen de remplissage est d'environ 85%, avec un volume maximal de

chargement équivalent à 4 m³, soit un volume réel transporté de 3,5 m³, ce qui correspond à une capacité de 35 colis standards.

En définitive, les paramètres conditionnant le temps de service ont été instanciés dans notre modèle par les valeurs présentées dans le Tableau 4-4.

Tableau 4-4: valeurs moyennes observées des paramètres conditionnant le temps de service

| | Grand Gabarit | Petit Gabarit |
|--|---------------|---------------|
| Paramètre $TDchgt$ Temps de déchargement (s/colis) | 240 | 180 |
| Paramètre $Tparking$ Temps de parking (s) | 72 | 25 |
| Paramètre $CapK$ Capacité totale de chargement (colis) | 70 | 35 |

4.3.4 Vérification des distances

Nous avons étudié les écarts entre, d'une part, la distance cumulée réelle résultant des tournées observées à ELCIDIS et, d'autre part, la distance cumulée théorique résultant de l'API Google-Maps pour ces mêmes tournées.

Les tableaux 4-5 et 4-6 synthétisent les résultats obtenus sur 4 journées, respectivement pour un VPG et un VGG. La colonne « calculée » correspond à la distance totale obtenue sur chaque journée en faisant la somme des distances, déterminées par Google-Maps, entre points de livraison. La colonne « observée » donne la valeur de la distance totale parcourue lors des tournées réelles.

Tableau 4-5: Comparaison entre distance globale réelle et théorique pour un VPG Berlingo

| Jours | CALCULEE (m) | OBSERVEE (m) | ECART (m) | ECART (%) |
|-------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 1 | 9876 | 10500 | -624 | - 06% |
| 2 | 14062 | 12500 | 1562 | + 12% |
| 3 | 9612 | 9000 | 612 | + 07% |
| 4 | 20580 | 22000 | -1420 | - 06% |

Tableau 4-6 : Comparaison entre distance globale réelle et théorique pour un VGG 3,5T

| Jours | CALCULEE (m) | OBSERVEE (m) | ECART (m) | ECART (%) |
|-------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 1 | 18730 | 18000 | 730 | 4 |
| 2 | 12645 | 15000 | -2355 | -16 |
| 3 | 7168 | 10500 | -3332 | -32 |
| 4 | 12782 | 10800 | 1982 | 18 |

Ces observations montrent la difficulté d'obtenir des données précises sur les distances en milieu urbain. En effet, les distances réelles parcourues par les véhicules peuvent s'avérer significativement supérieures aux distances indiquées par un API, en raison d'initiatives prises par les chauffeurs (itinéraires bis visant à contourner un embouteillage ou jugés plus rapides), ou au contraire inférieures aux distances théoriques (voir par ex. jour 2 et 3 Tableau 4-6). Dans ce dernier cas, cela s'explique par la réglementation rochelaise relative au TMV, qui autorise les véhicules électriques à emprunter les voies de bus, ce qui n'est pas pris en compte par l'API Google-Maps.

Néanmoins, ne disposant pas de données plus précises, nous avons validé l'utilisation des distances données par cet API pour l'instanciation au cas rochelais de la matrice des distances requise par notre modèle d'optimisation de tournées.

4.4 Comparaison des tournées réelles vs théoriques optimales

Dans ce paragraphe, nous comparons, sur la base des indicateurs distance globale et temps global d'exploitation, les tournées réelles avec les tournées optimales calculées par notre modèle. Ces dernières ont été calculées en tenant compte des heures de départ des tournées et des données relatives à la demande client, sans pour autant imposer la séquence de visite, comme c'est le cas pour les tournées réelles.

Notre objectif est ici d'observer si les tournées réelles pratiquées par l'opérateur sont proches des tournées théoriques optimales.

4.4.1 Expérimentation avec un VPG

Le VPG étudié autorise une charge utile de 650 kg. Durant les observations de terrain, nous avons chronométré les temps utiles à la caractérisation de l'activité de livraison, et ce dans toutes les phases de livraison et sans interférer avec les choix du chauffeur. Ainsi, certains facteurs, tels que des appels téléphoniques, le comportement d'usagers perturbant la circulation, et autres travaux sur la voie publique ont amené de la variabilité de routage et ont générés des chemins alternatifs.

Les résultats comparatifs, qui concernent l'analyse d'une semaine de livraison, sont synthétisés dans le Tableau 4-7.

Tableau 4-7 : Résultats comparatifs entre tournées réelles et théoriques optimales (VPG sur semaine de livraison)

| Jour | | Distance totale (m) | Ecart réel/simulé en valeur absolue | Temps total (s) | Ecart réel/simulé en valeur absolue | Temps de trajet (s) | Ecart réel/simulé en valeur absolue | Temps de service (s) | Ecart réel/simulé en valeur absolue |
|------|--------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 1 | réel | 10500 | 19% | 4285 | 15% | 2294 | 26% | 1991 | 2% |
| | simulé | 8455 | | 3644 | | 1694 | | 1950 | |
| 2 | réel | 12500 | 29% | 3287 | 18% | 2012 | 34% | 1275 | 8% |
| | simulé | 8872 | | 2708 | | 1328 | | 1380 | |
| 3 | réel | 9000 | 20% | 4649 | 17% | 2294 | 36% | 2355 | 2% |
| | simulé | 7157 | | 3857 | | 1457 | | 2400 | |
| 4 | réel | 22000 | 34% | 7292 | 19% | 3806 | 38% | 3486 | 1% |
| | simulé | 14612 | | 5886 | | 2356 | | 3530 | |
| Moy. | | | 26% | | 17% | | 34% | | 3% |

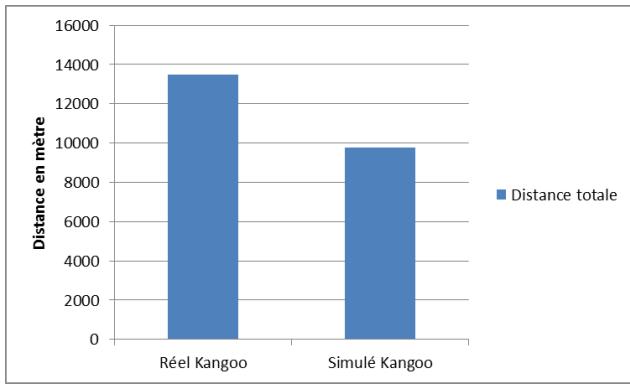


Figure 4-5 : Distance totale parcourue par un VPG

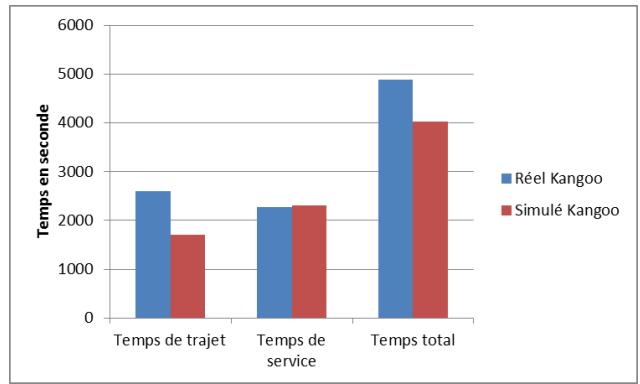


Figure 4-6 : Temps de trajet, temps de service et temps total d'exploitation pour un VPG

Concernant l'indicateur distance parcourue, tant cumulée sur la semaine (Figure 4-5) que jour par jour (Tableau 4-5), nos résultats montrent une distance réelle systématiquement et significativement supérieure (en moyenne de 26%) à la distance théorique optimale. Nous interprétons ce résultat par le fait que les chauffeurs adaptent leur trajet en fonction de leur connaissance du terrain et des situations rencontrées sur le parcours, ce qui confère un caractère erratique aux tournées (Figure 4-7). En d'autres termes, les décisions de bon sens prises par les chauffeurs pour faire face à des situations locales d'engorgement du trafic s'avèrent coûteuses en distance sur l'ensemble d'une tournée.

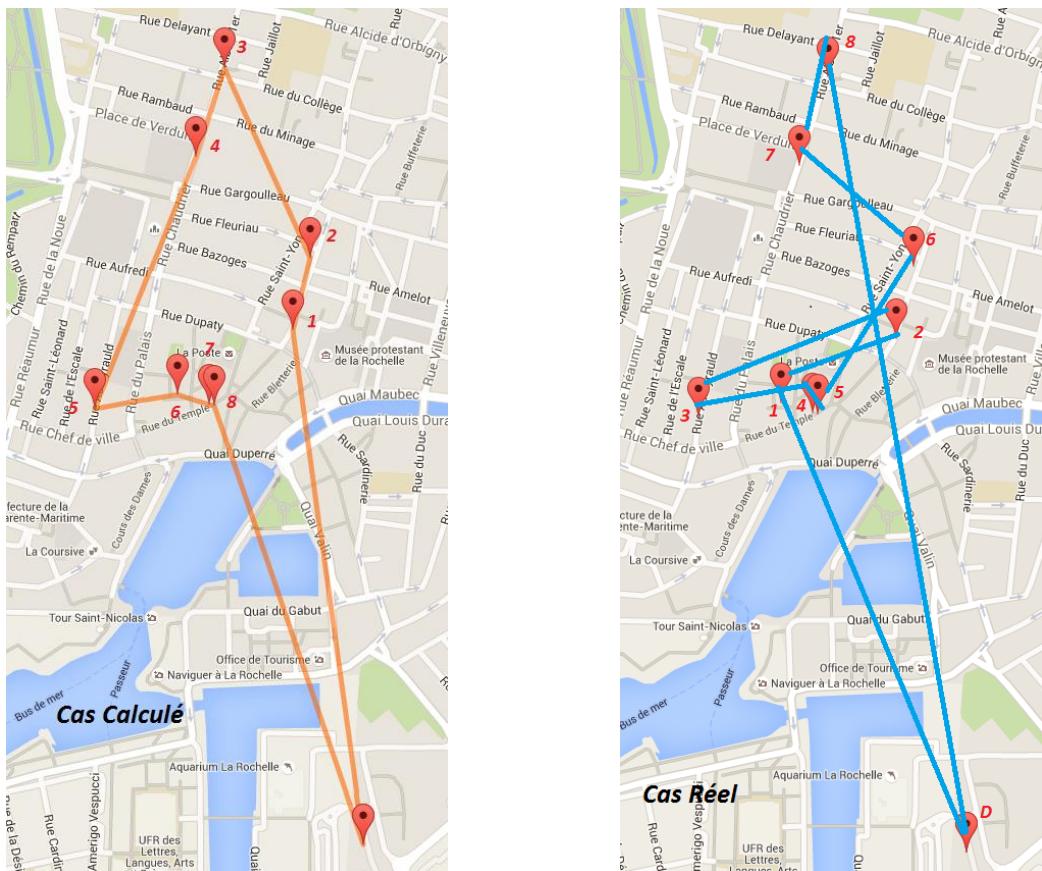


Figure 4-7 : trajet optimal calculé vs trajet réel (jour 1)

Quant au temps cumulé d'exploitation (Figure 4-6), nous distinguons le temps cumulé de service et le temps de cumulé de trajet. Pour mémoire, le temps de service est lié au nombre de colis manipulés (identique pour les tournées réelles et calculées) et au temps de parking (fonction de la congestion). Nous observons des écarts de temps de service assez faibles, en moyenne de 3%, ce qui nous permet de conclure que notre modélisation du temps de service est satisfaisante.

Le temps de trajet réel s'avère supérieur de 34% en moyenne au temps de trajet théorique optimal, ce qui s'explique par une augmentation de 26% en moyenne de la distance parcourue dans le cas réel, aggravée par le facteur de congestion (plus un véhicule passe de temps sur la route, plus il est pénalisé par la congestion).

4.4.2 Expérimentation avec un VGG

Nous comparons de la même manière les résultats issus de notre modèle d'optimisation aux observations de terrain, dans le cas de l'utilisation d'un véhicule 3,5 t (Tableau 4-8).

Tableau 4-8: Résultats comparatifs entre tournées réelles et théoriques optimales (VGG sur semaine de livraison)

| Jour | | Distance Totale (m) | Ecart réel/simulé en valeur absolue | Temps Total (s) | Ecart réel/simulé en valeur absolue | Temps de trajet (s) | Ecart réel/simulé en valeur absolue | Temps de service (s) | Ecart réel/simulé en valeur absolue |
|------|--------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 1 | réel | 10800 | 14% | 6871 | 12% | 2853 | 15% | 4018 | 10% |
| | simulé | 12323 | | 7705 | | 3285 | | 4420 | |
| 2 | réel | 15000 | 21% | 5854 | 12% | 2983 | 26% | 2871 | 3% |
| | simulé | 11864 | | 5147 | | 2200 | | 2947 | |
| 3 | réel | 10500 | 42% | 4799 | 22% | 1616 | 48% | 3183 | 8% |
| | simulé | 6072 | | 3753 | | 835 | | 2918 | |
| 4 | réel | 18800 | 9% | 6047 | 11% | 3023 | 19% | 3024 | 3% |
| | simulé | 16376 | | 5402 | | 2455 | | 2947 | |
| Moy. | | | 22% | | 14% | | 27% | | 6% |

Les résultats obtenus permettent de corroborer l'analyse précédente, mais nous observons quelques particularités. Notamment, la tournée réelle du jour 1 réalise une distance parcourue plus courte que la distance théorique optimisée. La raison en est le recours systématique par le VGG des voies réservées, non identifiées par l'API Google Maps et par suite inconnues de notre modèle d'optimisation. A contrario, le jour 3 fait apparaître un gain important de 42% en distance, et de 48% en durée, à l'avantage de la tournée théorique optimisée. La Figure 4-8 et la Figure 4-9 permettent de comparer les distances et les temps cumulés sur la semaine d'observation. Ici encore, il apparaît un excès de 22% en kilométrage et de 14% en temps des tournées réelles par rapport aux tournées optimales, et ce en dépit du fait que notre modèle d'optimisation ignore certains raccourcis, ce qui laisse ainsi entrevoir des marges de productivité substantielles par l'optimisation des tournées.

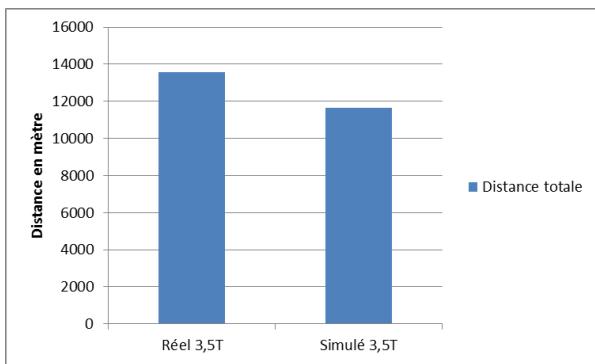


Figure 4-8 : Distance totale parcourue par un VGG

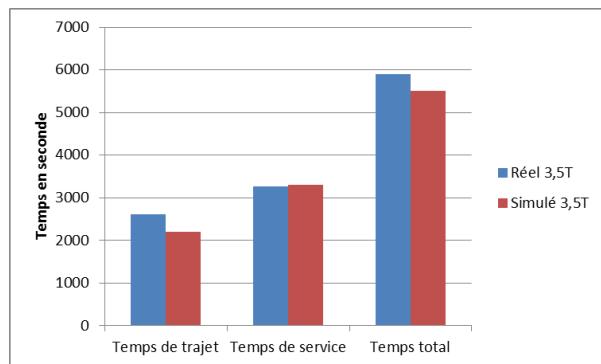


Figure 4-9 : Temps de trajet, temps de service et temps total d'exploitation pour un VGG

4.5 Quel véhicule pour la réalisation de tournées en zone urbaine ?

Nous étudions ici la faisabilité de mise en œuvre d'un VPG en lieu et place des traditionnels VGG dans un centre-ville comme celui de La Rochelle. L'étude s'attache à comparer, en utilisant notre modèle d'optimisation de tournées préalablement calibré pour le cas rochelais, la performance logistique obtenue respectivement par un VPG et un VGG. Il s'agit d'analyser les temps globaux d'exploitation associés aux tournées et d'évaluer l'impact de la réalisation en temps masqué des activités de chargement au dépôt.

Nous rappelons que le temps cumulé d'exploitation comporte les temps cumulés de trajet et de service, auxquels s'ajoute le temps cumulé de chargement au dépôt.

Dans le cas d'un VGG, ce temps de chargement peut être conséquent mais, compte tenu de la capacité du véhicule, l'opération de chargement sera rarement réalisée plus d'une fois. En contrepartie, la longueur des tournées et le gabarit du véhicule rendent le temps de trajet et le temps de service sensibles aux conditions de circulation et autres contraintes urbaines.

Dans le cas d'un VPG, le véhicule réalise plusieurs tournées rapides pour satisfaire la même demande et doit repasser au dépôt à chaque tournée pour faire le plein de colis, ce qui engendre un temps de chargement augmenté. En contrepartie, le temps de service est à l'avantage du VPG en raison de la facilité de stationnement et de déchargement dont il fait preuve.

Nous nous intéressons ici au masquage des temps de rupture de charge occasionnés par le recharge du TPG au début de chaque tournée. À l'image de la solution technologique évaluée dans le projet ADEME VELUD, nous proposons l'usage d'un véhicule ultra léger composé d'un tracteur (sur la base d'une RENAULT Twizy) et d'une remorque de petit gabarit (1 m^3). Cette remorque permet de transporter, le cas échéant, une batterie supplémentaire augmentant l'autonomie du VPG. L'avantage le plus marquant dans l'utilisation de remorques réside dans la possibilité, pendant qu'une remorque et son tracteur réalisent une tournée n , de charger une deuxième remorque

destinée à la tournée $n+1$. Le temps de rupture de charge devient alors négligeable, puisqu'au terme de la tournée n le véhicule repasse par l'entrepôt, et y troque une remorque vide avec une remorque préchargée. La durée de cet échange de remorque est inférieure à la minute et peut être négligée.

La démarche d'analyse et d'expérimentation que nous relatons ici vise à évaluer dans quelle mesure le gain de temps lié au masquage des ruptures de charge, associé à l'utilisation d'un VPG exécutant de multiples tournées dans une même journée, permettrait de concurrencer l'utilisation d'un VGG.

4.5.1 Contexte d'étude et résultats

Le jeu de données utilisé pour réaliser l'étude s'appuie sur les choix suivants :

- Le nombre de clients à livrer dans une journée est fixé à 10, cette valeur représentant la valeur maximale que nous avons pu observer lors de notre analyse de terrain. Les dix clients sont choisis aléatoirement, par une loi de probabilité uniforme, dans le panel de clients livrés par ELCIDIS lors de tournées réelles et dont nous avons relevé la localisation exacte (voir Annexe 6).
- En vue de contenir la complexité du problème et les temps de calcul correspondants, nous considérons que chaque client demande un même nombre de colis. Ce nombre de colis par client est déterminé entre 1 et 10 colis par un tirage probabiliste. La valeur 10 est compatible avec la capacité maximale du VPG (cf. Tableau 4-9).
- L'heure de départ des tournées est fixée à 9h00 du matin, conformément aux tournées observées sur le terrain.
- La résolution du plan optimal de livraison porte sur une journée, mais cette résolution est répliquée sur 60 jours pour obtenir une certaine variété de situations (dispersion des clients, variation des demandes, ...).

Les valeurs des principaux paramètres techniques retenues dans cette étude sont présentées dans le Tableau 4-9. Ces paramètres résultent de l'étude de sensibilité effectuée dans le chapitre précédent.

Tableau 4-9: Valeur des paramètres techniques par type de véhicule

| | VPG (TWIZY) Temps de chargement masqué | VGG (3,5T) |
|---|--|------------|
| Temps de déchargement ($TDchgt$) en s/colis | 180 | 240 |
| Temps de parking (s) ($Tparking$) en s | 25 | 72 |
| Capacité totale de chargement en colis ($CapK$) | 10 | 70 |
| Temps de chargement <i>TempsChargDepot</i> en s | 0 | 900 |
| Vitesse moyenne en km/h | 18 | 18 |

La vitesse moyenne 18 km/h est conforme à celle observée sur le terrain pour tous les véhicules. Le temps de 900 s, soit 15 mn, pour charger le VGG est également issu de l'observation de terrain, alors que ce temps quasi nul pour le VPG est dû à l'utilisation de remorques préchargées en temps masqué.

4.5.2 Analyse des résultats

Les résultats relatifs à cette étude, présentés dans le Tableau 4-10, porte sur 60 jours de livraison. Pour chaque jour et pour les deux types de véhicule VPG et VGG, les variables optimisées sont le nombre total de colis, le nombre de tournées effectuées, le temps cumulé de trajet, le temps cumulé de service, le temps cumulé d'exploitation, la distance cumulée, la dispersion géographique des points de livraison et le taux moyen de remplissage du véhicule. La dispersion géographique des clients est simplement évaluée par la distance moyenne séparant les différents points de livraison de la tournée.

GUEDRIA MOHAMED

Tableau 4-10 : Résultats de 60 jours de livraison optimisée avec 10 commandes /j, selon gabarit de véhicule

| jours | Nbre Trip VGG | Nbre Trip VPG | Nombre total de colis |
|-------|---------------|---------------|-----------------------|
| 1 | 1 | 4 | 37 |
| 2 | 1 | 6 | 51 |
| 3 | 1 | 6 | 56 |
| 4 | 1 | 7 | 56 |
| 5 | 1 | 8 | 69 |
| 6 | 1 | 5 | 48 |
| 7 | 1 | 7 | 57 |
| 8 | 1 | 6 | 50 |
| 9 | 1 | 6 | 53 |
| 10 | 1 | 6 | 55 |
| 11 | 1 | 6 | 52 |
| 12 | 1 | 7 | 60 |
| 13 | 1 | 8 | 66 |
| 14 | 1 | 7 | 60 |
| 15 | 1 | 7 | 60 |
| 16 | 1 | 6 | 57 |
| 17 | 1 | 6 | 54 |
| 18 | 1 | 6 | 52 |
| 19 | 1 | 6 | 51 |
| 20 | 1 | 6 | 55 |

| TT VGG (s) | TT VPG (s) | TS VGG (s) | TS VPG (s) | TE VGG (s) | TE VPG (s) | Distance totale VGG (m) | Distance totale VPG (m) | Dispersion des nœuds (m) | Ecart TE VGG - TE VPG (s) | Ratio | Taux de remplissage VPG / TT VPG | Taux de remplissage VGG % |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------|----------------------------------|---------------------------|
| 1390 | 3263 | 10680 | 6972 | 12070 | 10235 | 6950 | 16319 | 3494 | 1835 | 2,14 | 93% | 53% |
| 1459 | 5609 | 14040 | 9492 | 15499 | 15101 | 7298 | 28046 | 4733 | 398 | 1,69 | 85% | 73% |
| 1634 | 6625 | 15240 | 10392 | 16874 | 17017 | 8172 | 33127 | 4669 | -143 | 1,57 | 93% | 80% |
| 2200 | 8580 | 15240 | 10392 | 17440 | 18972 | 17440 | 42903 | 5372 | -1532 | 1,21 | 80% | 80% |
| 1555 | 6983 | 18360 | 12732 | 19915 | 19715 | 7777 | 34919 | 4367 | 200 | 1,82 | 86% | 99% |
| 2315 | 5479 | 13320 | 8952 | 15635 | 14431 | 11575 | 27400 | 4303 | 1204 | 1,63 | 96% | 69% |
| 2288 | 7432 | 15480 | 10572 | 17768 | 18004 | 11443 | 37164 | 5303 | -236 | 1,42 | 81% | 81% |
| 1253 | 5826 | 13800 | 9312 | 15053 | 15138 | 6265 | 29135 | 4737 | -85 | 1,6 | 83% | 71% |
| 2192 | 6024 | 14520 | 9852 | 16712 | 15876 | 10962 | 30122 | 3887 | 836 | 1,64 | 88% | 76% |
| 1323 | 5346 | 15000 | 10212 | 16323 | 15558 | 6616 | 26733 | 4844 | 765 | 1,91 | 92% | 79% |
| 1772 | 4830 | 14280 | 9672 | 16052 | 14502 | 8864 | 24152 | 4164 | 1550 | 2 | 87% | 74% |
| 2215 | 6219 | 16200 | 11112 | 18415 | 17331 | 11075 | 31097 | 4366 | 1084 | 1,79 | 86% | 86% |
| 1562 | 7667 | 17640 | 12192 | 19202 | 19859 | 7810 | 38339 | 4333 | -657 | 1,59 | 83% | 94% |
| 2272 | 7604 | 16200 | 11112 | 18472 | 18716 | 11364 | 38024 | 4889 | -244 | 1,46 | 86% | 86% |
| 1653 | 7819 | 16200 | 11112 | 17853 | 18931 | 8269 | 39100 | 5427 | -1078 | 1,42 | 86% | 86% |
| 1527 | 6431 | 15480 | 10572 | 17007 | 17003 | 7635 | 32159 | 4226 | 4 | 1,64 | 95% | 81% |
| 1694 | 4447 | 14760 | 10032 | 16454 | 14479 | 8470 | 22236 | 3759 | 1975 | 2,26 | 90% | 77% |
| 1290 | 5558 | 14280 | 9672 | 15570 | 15230 | 6451 | 27792 | 5022 | 340 | 1,74 | 87% | 74% |
| 1629 | 5561 | 14040 | 9492 | 15669 | 15053 | 8146 | 27807 | 4419 | 616 | 1,71 | 85% | 73% |
| 1959 | 6621 | 15000 | 10212 | 16959 | 16833 | 9796 | 33106 | 4903 | 126 | 1,54 | 92% | 79% |

GUEDRIA MOHAMED

| | | | |
|----|---|---|----|
| 21 | 1 | 7 | 65 |
| 22 | 1 | 5 | 45 |
| 23 | 1 | 6 | 55 |
| 24 | 1 | 5 | 48 |
| 25 | 1 | 7 | 64 |
| 26 | 1 | 5 | 43 |
| 27 | 1 | 5 | 41 |
| 28 | 1 | 7 | 65 |
| 29 | 1 | 6 | 52 |
| 30 | 1 | 6 | 60 |
| 31 | 1 | 6 | 49 |
| 32 | 1 | 5 | 46 |
| 33 | 1 | 5 | 44 |
| 34 | 1 | 7 | 45 |
| 35 | 2 | 9 | 77 |
| 36 | 1 | 5 | 47 |
| 37 | 1 | 8 | 70 |
| 38 | 1 | 6 | 54 |
| 39 | 1 | 6 | 52 |
| 40 | 1 | 4 | 40 |
| 41 | 1 | 6 | 49 |
| 42 | 1 | 7 | 66 |
| 43 | 1 | 8 | 50 |
| 44 | 1 | 7 | 64 |
| 45 | 1 | 7 | 60 |
| 46 | 1 | 5 | 42 |
| 47 | 1 | 6 | 54 |
| 48 | 1 | 6 | 52 |
| 49 | 1 | 4 | 37 |

| | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1371 | 8585 | 17400 | 12012 | 18771 | 20597 |
| 1465 | 4702 | 12600 | 8412 | 14065 | 13114 |
| 1993 | 6280 | 15000 | 10212 | 16993 | 16492 |
| 2326 | 6330 | 13320 | 8952 | 15646 | 15282 |
| 1484 | 7025 | 17160 | 11832 | 18644 | 18857 |
| 2116 | 4877 | 12120 | 8052 | 14236 | 12929 |
| 1019 | 4165 | 11640 | 7692 | 12659 | 11857 |
| 2378 | 7422 | 17310 | 11981 | 19688 | 19403 |
| 1036 | 4744 | 14280 | 9672 | 15316 | 14416 |
| 1570 | 5857 | 16200 | 11112 | 17770 | 16969 |
| 3014 | 8060 | 13560 | 9132 | 16574 | 17192 |
| 1901 | 4926 | 12840 | 8592 | 14741 | 13518 |
| 2712 | 5902 | 12360 | 8232 | 15072 | 14134 |
| 2499 | 6602 | 15240 | 10392 | 17739 | 16994 |
| 2285 | 7893 | 21180 | 14172 | 23465 | 22065 |
| 2665 | 5074 | 13320 | 8952 | 15985 | 14026 |
| 3051 | 8637 | 18600 | 12912 | 21651 | 21549 |
| 2583 | 6202 | 13800 | 9312 | 16383 | 15514 |
| 3411 | 6962 | 14280 | 9672 | 17691 | 16634 |
| 2621 | 5917 | 11400 | 7512 | 14021 | 13429 |
| 3378 | 6999 | 14280 | 9672 | 17658 | 16671 |
| 2013 | 4996 | 16200 | 11112 | 18213 | 16108 |
| 2848 | 7346 | 17640 | 12192 | 20488 | 19538 |
| 1970 | 4376 | 16200 | 11112 | 18170 | 15488 |
| 3153 | 10367 | 16200 | 11112 | 19353 | 21479 |
| 2425 | 5331 | 11880 | 7872 | 14305 | 13203 |
| 3060 | 7377 | 14760 | 10032 | 17820 | 17409 |
| 3267 | 7406 | 14280 | 9672 | 17547 | 17078 |
| 1110 | 2855 | 10680 | 6972 | 11790 | 9827 |

| | |
|-------|-------|
| 6859 | 42929 |
| 7325 | 23511 |
| 9965 | 31403 |
| 11632 | 31652 |
| 7421 | 35125 |
| 10582 | 24389 |
| 5096 | 20827 |
| 11891 | 37114 |
| 5183 | 23723 |
| 7852 | 29288 |
| 15073 | 40301 |
| 9506 | 24632 |
| 13563 | 29510 |
| 12498 | 33013 |
| 11426 | 39467 |
| 13325 | 25371 |
| 15258 | 43187 |
| 12919 | 31014 |
| 17057 | 34812 |
| 13109 | 24589 |
| 16893 | 34997 |
| 10066 | 24981 |
| 14240 | 36735 |
| 9854 | 21880 |
| 15768 | 51836 |
| 12125 | 26655 |
| 15304 | 36885 |
| 16338 | 37033 |
| 5553 | 14275 |

| | | | | |
|------|-------|------|------|------|
| 4939 | -1826 | 1,4 | 93% | 93% |
| 3968 | 951 | 1,79 | 90% | 64% |
| 4848 | 501 | 1,63 | 92% | 79% |
| 4930 | 364 | 1,41 | 96% | 69% |
| 4528 | -213 | 1,68 | 91% | 91% |
| 4865 | 1307 | 1,65 | 86% | 61% |
| 4234 | 802 | 1,85 | 82% | 59% |
| 4989 | 285 | 1,61 | 93% | 93% |
| 3911 | 900 | 2,04 | 87% | 74% |
| 4925 | 801 | 1,9 | 100% | 86% |
| 5090 | -618 | 1,13 | 82% | 70% |
| 6675 | 1223 | 1,74 | 92% | 66% |
| 6564 | 938 | 1,39 | 88% | 63% |
| 6801 | 745 | 1,57 | 64% | 64% |
| 6058 | 1400 | 1,8 | 86% | 55% |
| 5746 | 1959 | 1,76 | 94% | 67% |
| 6905 | 102 | 1,49 | 88% | 100% |
| 6264 | 869 | 1,5 | 90% | 77% |
| 4983 | 1057 | 1,39 | 87% | 74% |
| 6357 | 592 | 1,27 | 100% | 57% |
| 5600 | 987 | 1,38 | 82% | 70% |
| 5656 | 2105 | 2,22 | 94% | 94% |
| 5835 | 950 | 1,66 | 83% | 71% |
| 6191 | 2682 | 2,54 | 91% | 91% |
| 7478 | -2126 | 1,07 | 86% | 86% |
| 5938 | 1102 | 1,48 | 84% | 60% |
| 5200 | 411 | 1,36 | 90% | 77% |
| 6714 | 469 | 1,31 | 87% | 74% |
| 6142 | 1963 | 2,44 | 93% | 53% |

GUEDRIA MOHAMED

| | | | |
|----|---|---|----|
| 50 | 1 | 6 | 55 |
| 51 | 1 | 7 | 65 |
| 52 | 1 | 7 | 57 |
| 53 | 1 | 6 | 55 |
| 54 | 1 | 5 | 41 |
| 55 | 1 | 7 | 64 |
| 56 | 1 | 5 | 47 |
| 57 | 1 | 5 | 41 |
| 58 | 1 | 7 | 65 |
| 59 | 1 | 6 | 52 |
| 60 | 1 | 4 | 37 |

| | | | |
|-------------|---|---|----|
| Moy enne | 1 | 6 | 54 |
|-------------|---|---|----|

| | | | | | |
|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 2510 | 6275 | 15000 | 10212 | 17510 | 16487 |
| 1815 | 5784 | 17400 | 12012 | 19215 | 17796 |
| 2835 | 6957 | 15480 | 10572 | 18315 | 17529 |
| 2642 | 5432 | 15000 | 10212 | 17642 | 15644 |
| 3461 | 6960 | 11640 | 7692 | 15101 | 14652 |
| 2253 | 6390 | 17160 | 11832 | 19413 | 18222 |
| 3127 | 7386 | 13080 | 8772 | 16207 | 16158 |
| 2884 | 5245 | 11640 | 7692 | 14524 | 12937 |
| 2286 | 6621 | 17310 | 11981 | 19596 | 18602 |
| 3124 | 8263 | 14280 | 9672 | 17404 | 17935 |
| 3314 | 6715 | 10680 | 6972 | 13994 | 13687 |

| | | | | | |
|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 2203 | 6319 | 14736 | 10004 | 16939 | 16323 |
|------|------|-------|-------|-------|-------|

| | |
|-------|-------|
| 12550 | 31379 |
| 9077 | 28920 |
| 14175 | 34786 |
| 13210 | 27164 |
| 17308 | 34802 |
| 11266 | 31951 |
| 15636 | 36934 |
| 14423 | 26226 |
| 11433 | 33106 |
| 15621 | 41318 |
| 16571 | 33580 |

| | |
|-------|-------|
| 11122 | 31516 |
|-------|-------|

| | | | | |
|------|------|------|-----|-----|
| 6725 | 1023 | 1,63 | 92% | 79% |
| 6398 | 1419 | 2,08 | 93% | 93% |
| 5240 | 786 | 1,52 | 81% | 81% |
| 6380 | 1998 | 1,88 | 92% | 79% |
| 6233 | 449 | 1,11 | 82% | 59% |
| 6251 | 1191 | 1,85 | 91% | 91% |
| 6183 | 49 | 1,19 | 94% | 67% |
| 5748 | 1587 | 1,47 | 82% | 59% |
| 6494 | 994 | 1,81 | 93% | 93% |
| 5717 | -531 | 1,17 | 87% | 74% |
| 6680 | 307 | 1,04 | 93% | 53% |

| | | | | |
|------|-----|------|-----|-----|
| 5360 | 615 | 1,63 | 88% | 76% |
|------|-----|------|-----|-----|

Nous nous proposons d'analyser, dans un premier temps, les écarts de temps d'exploitation entre les deux types de véhicules avant de nous intéresser aux distances parcourues.

i. Analyse des temps

Les valeurs colorées *en vert* de la colonne « Ecart » du Tableau 4-10 indiquent les situations pour lesquelles l'usage d'un VPG conduit à un temps d'exploitation inférieur à celui obtenu avec un VGG.

La Figure 4-10 présente les valeurs journalières moyennes des temps d'exploitation issus du tableau précédent.

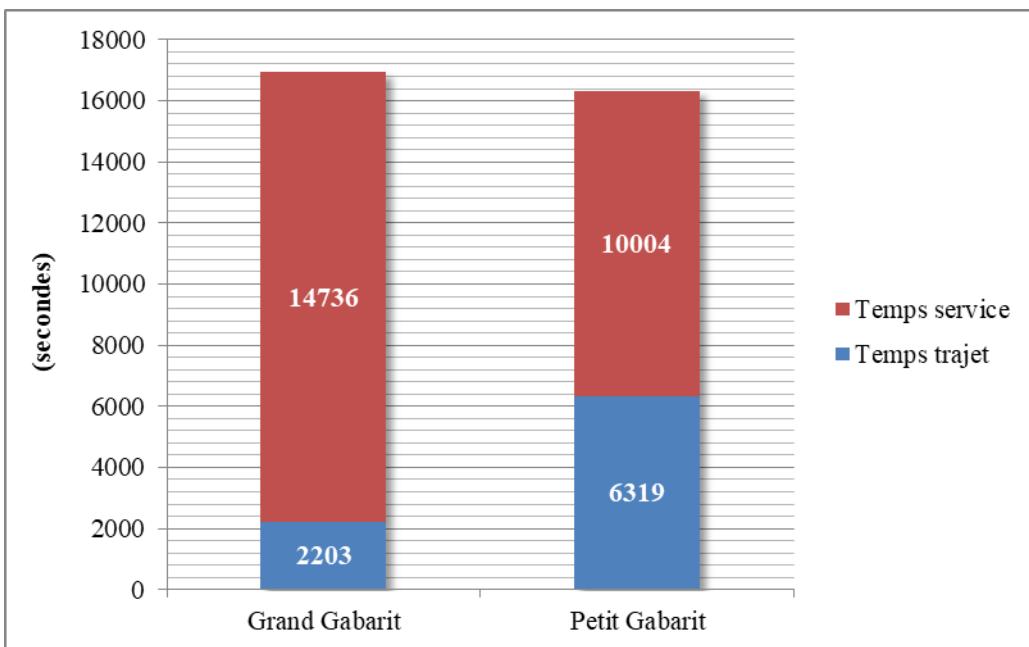


Figure 4-10 : Synthèse des temps sur 60 jours de simulation

Nous pouvons observer les éléments suivants :

- Le temps journalier moyen de trajet d'un VPG est 2,86 fois supérieur au temps moyen de trajet d'un VPG. Ce résultat quantifie l'effet du fractionnement des tournées dû au petit gabarit
- Le temps journalier moyen de service est en faveur de l'utilisation d'un VPG, avec une diminution de 32,11% par rapport au temps de service d'un VGG. Les raisons principales sont, d'une part, l'économie des 900 s de temps de chargement du VGG, compte tenu des chargements du VPG effectués en temps masqué, et, d'autre part, l'aptitude du petit véhicule à se garer plus rapidement.
- En définitive, 48 des 60 temps journaliers d'exploitation issus Tableau 4-10 sont à l'avantage du VPG et le temps journalier moyen d'exploitation est légèrement en faveur du VPG avec une économie de temps de 3,6%.

Au bilan, l'utilisation d'un VPG (dont l'intérêt écologique et le moindre impact sur le trafic est par ailleurs évident) s'avère ne pas grever le temps d'exploitation, sous réserve que les hypothèses retenues ici (temps de rupture de charge négligeable) et que les valeurs de paramètres (indice de congestion, ...) soient réalistes.

ii. Analyse de distance

Les résultats précédents ont montré que 80% des situations simulées sont à l'avantage du VPG, quant aux performances et plus particulièrement le temps total d'exploitation (TE). Il reste à savoir quelles sont les limites de ces performances, en matière de distance totale parcourue. Nous nous proposons en conséquence d'étudier les écarts de distance entre les deux types de véhicule sur les 60 jours afin de déterminer la limite kilométrique à partir de laquelle il serait préférable de ne pas utiliser un véhicule à faible capacité.

La distance moyenne parcourue demeure en effet un indicateur de performance essentiel. La comparaison des distances moyennes parcourues, respectivement plus de 11 km et 31 km pour les véhicules de grand et petit gabarit, confirme le résultat de l'analyse des temps de trajet, à savoir qu'un véhicule de grand gabarit est avantage par l'exécution d'une seule tournée.

Le but est d'observer, dans un premier temps, le seuil de distance totale parcourue au-delà duquel le petit véhicule perdrait l'avantage (point P Figure 4-11) et dans un deuxième temps d'observer le seuil du différentiel de distance parcourue par les deux types véhicules (point Q Figure 4-12) qui favorise le petit véhicule. La Figure 4-11 représente le différentiel de temps d'exploitation en fonction de la distance totale parcourue par le petit véhicule pris comme référence. Le nuage des points mesurés peut être approché par une droite de régression, dont l'équation (précisée sur la figure) nous permet de définir le seuil de distance à partir duquel le petit véhicule n'est plus gagnant par rapport à un véhicule de plus grand gabarit. Nous déterminons qu'un VPG parcourant une distance totale supérieure à $P=37,4$ km n'est pas compétitif, eu égard au temps d'exploitation, avec un VGG.

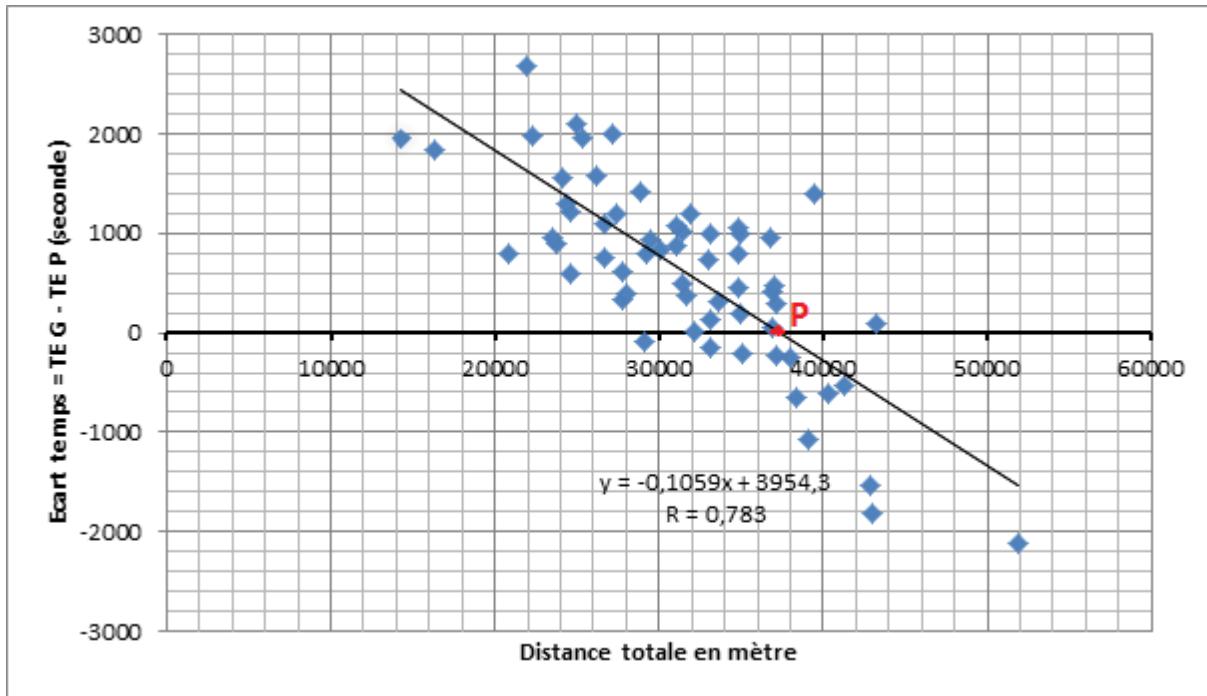


Figure 4-11 : Ecart de temps d’exploitation des VPG et VGG en fonction de la distance

parcourue par le VPG (sur 60 jours)

Nous procémons maintenant à une analyse du différentiel des temps d’exploitation entre VPG et VGG en fonction du différentiel des distances totales parcourues par ces véhicules (Figure 4-12). Nous identifions une droite de régression indiquant un écart critique de distance $Q=25$ km au-delà duquel le temps d’exploitation du VPG dépasse celui du VGG. Par exemple, on pourra remplacer avantageusement un VGG réalisant une tournée de 10km par un VPG, à condition que celui-ci parcoure moins de 35 km.

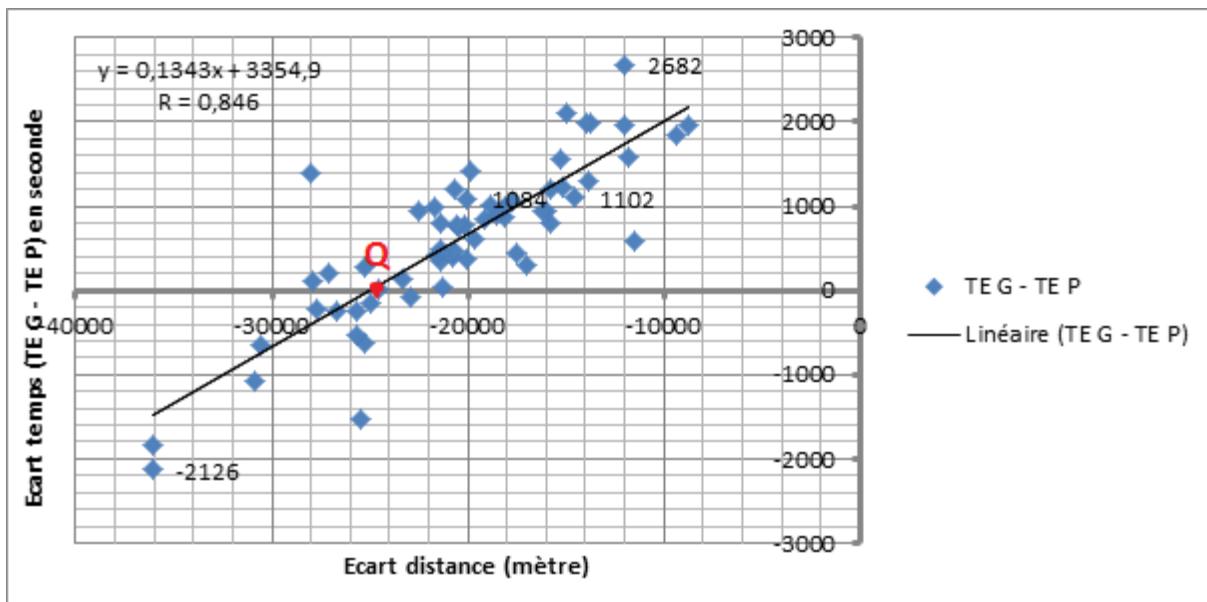


Figure 4-12 : Ecart de temps d’exploitation des VPG et VGG en fonction des écarts de distance parcourue (sur 60 jours)

iii. Analyse de la dispersion des points de livraison

Nous avons observé une variation importante, d'un jour à l'autre, du différentiel de temps d'exploitation selon que l'on utilise un VPG ou un VGG pour une même campagne de livraison. Cet écart varie de -2126 s (jour 45) à 2682 s (jour 44), ce qui représente donc, respectivement, le cas le moins favorable et le cas le plus favorable à l'utilisation du TPG. Pour en comprendre les raisons, nous avons pour ces deux jours croisé les informations de distance et de temps d'exploitation avec les autres indicateurs disponibles que sont la dispersion géographique des clients dans la ville et le taux de remplissage du véhicule.

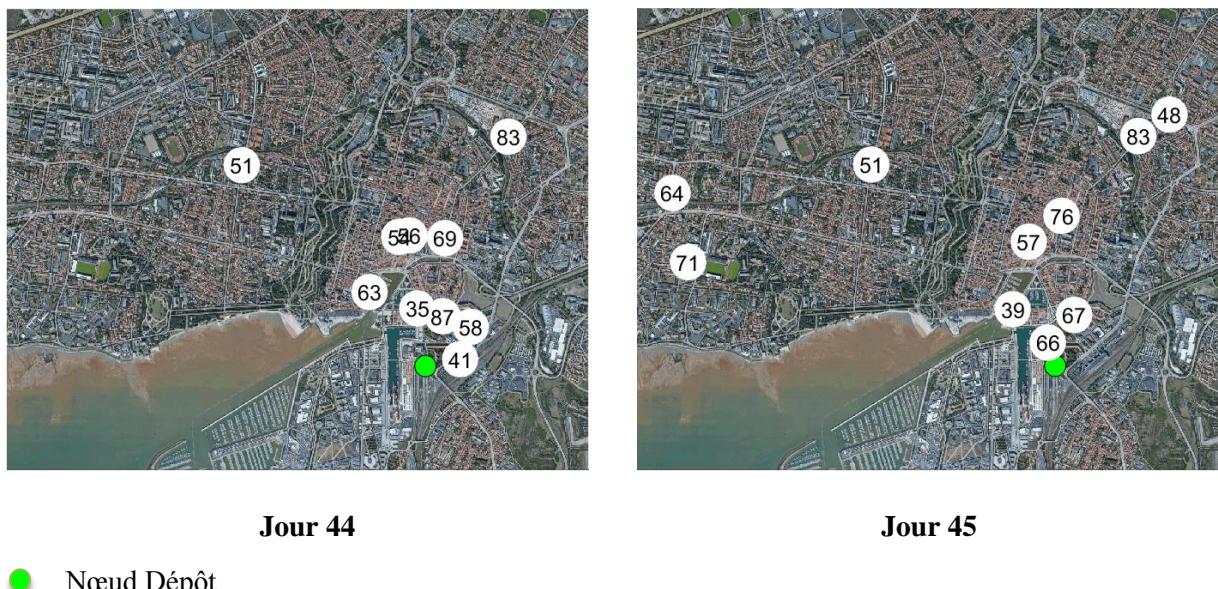


Figure 4-13 : Répartition géographique des clients, jours 44 et 45

La Figure 4-13 représente la localisation des différents clients visités durant ces deux journées. Nous remarquons que les points de livraison du jour 44 sont relativement concentrés au centre-ville, alors qu'une forte dispersion des lieux de livraisons est observée pour le jour 45. Cette dispersion explique l'augmentation importante, de 21 km (jour 44) à 52 km (jour 45), de la distance réalisée par le VPG, ce qui donne un ratio 2,5. En comparaison, ce ratio tombe à 1,6 pour le VGG du fait de l'unicité de la tournée. A l'évidence, la dispersion géographique des clients est un facteur aggravant le fractionnement des tournées en défaveur d'un VPG.

Nous poursuivons l'analyse en nous intéressant aux journées 21 et 30 pour lesquelles les indices de dispersion des points de livraison (Figure 4-14) sont semblables (cf Tableau 4-12), respectivement 4939 et 4925. Nous considérons donc que ces deux situations sont comparables, et pouvons analyser les autres facteurs impactant la performance.



Jour 21



Jour 30

Figure 4-14 : Répartition géographique des clients similaire

La tournée réalisée le jour 21 correspond à une situation très défavorable au VPG avec une distance parcourue de 42929 m pour un temps d'exploitation de 20597 s, au lieu de 6859 m et 18771 s dans le cas du VGG, ce qui représente plus de 600% d'augmentation de la distance et une perte de temps de l'ordre de 9,8%. Il faut donc considérer le facteur distance comme un élément de consolidation de la performance en temps d'exploitation.

À contrario, le jour 30 montre une situation où le VPG est gagnant avec un temps d'exploitation compétitif de 16969 s mais une distance parcourue de 29288 km contre 17770 s et 7852 km pour le VGG. Ceci correspond à une augmentation de distance de 373% pour une économie de temps de 4,5%. Ceci indique que la distance parcourue n'est pas le seul facteur expliquant les variations du temps d'exploitation.

Le

Tableau 4-11 (jour 21) et le Tableau 4-12 (jour 30) décrivent les tournées calculées par le modèle pour un VPG. Les constats que nous pouvons faire ici sont les suivants :

- On relève pour le jour 21 l'existence de 4 tournées mono-client, qui sature la capacité du VPG (10 colis embarqués). La demande totale de 65 colis nécessite 7 rotations, pour un taux moyen de remplissage de 93% ;
- En comparaison, l'activité du jour 30 ne comporte que 3 tournées mono-client. La demande totale est ici de 57 colis, nécessitant 6 rotations, pour un taux moyen de remplissage de 100%.

Tableau 4-11 : Séquence de visite des clients (Jour 21 – VPG)

| Trip N° | Indice(s) Client(s) visités | Demande client(s) en Nb Colis |
|---------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1 | 11 | 10 |
| 2 | 2 | 10 |
| 3 | 53 | 10 |
| 4 | 23 et 25 | 9 + 1 |
| 5 | 12 et 16 | 3 + 6 |
| 6 | 30 et 13 | 2 + 8 |
| 7 | 17 | 6 |

Tableau 4-12 : Séquence de visite des clients (Jour 30 – VPG)

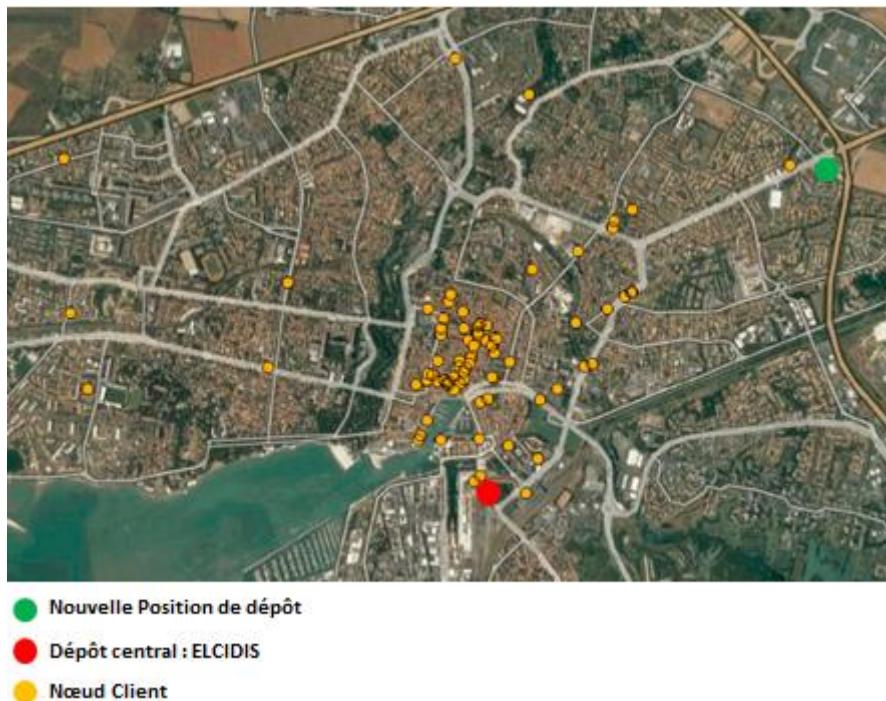
| Trip N° | Indice(s) Client(s) visités | Demande client(s) en Nb Colis |
|---------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1 | 3, 11 et 2 | 4 + 3 + 3 |
| 2 | 24 et 4 | 1 + 9 |
| 3 | 16 | 10 |
| 4 | 25 et 29 | 4 + 6 |
| 5 | 14 | 10 |
| 6 | 20 | 10 |

Nous pouvons donc conclure que le nombre de colis demandé par client, à situation similaire de dispersion de clients sur le territoire, influence fortement le temps d'exploitation, ainsi que le taux de charge moyen du VPG. Cette conclusion vient appuyer notre analyse de sensibilité du modèle réalisé au chapitre 3, ayant montré que la « demande client » est un facteur impactant de manière significative la performance globale de transport. Cette donnée a d'autant plus d'impact que la capacité des véhicules est petite, imposant en cela un fractionnement de la charge sur plusieurs rotations, et une dégradation du taux de remplissage.

4.6 Où localiser le CDU de La Rochelle ?

Dans le cadre de travaux de thèse antérieurs menés à l'EIGSI (Abdelhaï, 2017), une étude a été faite sur la localisation des CDU. L'approche reposait sur l'analyse du positionnement des plateformes régionales desservant les villes, ainsi que sur une analyse multicritère et multi-acteurs, sans toutefois intégrer les modalités opératoires des tournées. L'application de cette recherche à la ville de La Rochelle a conduit à la définition d'une nouvelle position du CDU, située en hyper centre, considérée comme un compromis entre les attendus des différents acteurs, plus éloignée du centre-ville que la position actuelle d'ELCIDIS. Les nouvelles coordonnées géographiques place le CDU en périphérie de la ville (Figure 4-15). Nous nous proposons ici d'analyser l'impact de ce changement sur la performance des tournées (temps, distance).

Notre analyse s'appuie sur les résultats des 30 premiers jours de tournées optimales présentés dans l'étude précédente. Tous les paramètres autres que la localisation du dépôt sont invariants.



GUEDRIA MOHAMED

Tableau 4-13 : Résultats de 30 jours de de livraison optimisée avec 10 commandes /j sur un réseau de 33 clients (nouvelle position du CDU)

| jours | Nbre Trip G | Nbre Trip P | Nombre total de colis | TT G (s) | TT P (s) | TS G (s) | TS P (s) | TE G (s) | TE P (s) | Distance totale G (mètre) | Distance totale P (mètre) | Dispersion des nœuds (mètre) | Ecart TE G - TE P (s) | Ratio TS P / TT P | Taux de remplissage P % | Taux de remplissage G % |
|-------|-------------|-------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | 4 | 37 | 3313 | 6627 | 10787 | 7042 | 13993 | 13599 | 13360 | 26723 | 5090 | 394 | 1,05 | 93% | 37% |
| 2 | 1 | 6 | 51 | 1890 | 7614 | 14040 | 9492 | 15930 | 17106 | 9449 | 38071 | 6675 | -1176 | 1,25 | 85% | 51% |
| 3 | 1 | 6 | 56 | 2129 | 8527 | 15240 | 10392 | 17369 | 18919 | 10647 | 42639 | 6564 | -1550 | 1,22 | 93% | 56% |
| 4 | 1 | 7 | 56 | 2210 | 10124 | 15240 | 10392 | 17450 | 20516 | 11052 | 50622 | 6801 | -3066 | 1,03 | 80% | 56% |
| 5 | 1 | 8 | 69 | 3518 | 13931 | 18544 | 12859 | 21878 | 26663 | 14187 | 56157 | 6058 | -4785 | 0,91 | 86% | 69% |
| 6 | 1 | 5 | 48 | 4093 | 9777 | 13453 | 9042 | 17413 | 18729 | 16505 | 39425 | 5746 | -1316 | 0,91 | 96% | 48% |
| 7 | 1 | 7 | 57 | 2298 | 9013 | 15480 | 10572 | 17778 | 19585 | 11494 | 45067 | 6905 | -1807 | 1,17 | 81% | 57% |
| 8 | 1 | 6 | 50 | 1740 | 7296 | 13800 | 9312 | 15540 | 16608 | 8703 | 36481 | 6264 | -1068 | 1,28 | 83% | 50% |
| 9 | 1 | 6 | 53 | 3895 | 10373 | 14665 | 9951 | 18415 | 20225 | 15707 | 41828 | 4983 | -1810 | 0,94 | 88% | 53% |
| 10 | 1 | 6 | 55 | 1713 | 6472 | 15000 | 10212 | 16713 | 16684 | 8566 | 32360 | 6357 | 29 | 1,58 | 92% | 55% |
| 11 | 1 | 6 | 52 | 4457 | 11132 | 14423 | 9769 | 18737 | 20804 | 17974 | 44888 | 5600 | -2067 | 0,86 | 87% | 52% |
| 12 | 1 | 7 | 60 | 3969 | 12671 | 16362 | 11223 | 20169 | 23783 | 16005 | 51096 | 5656 | -3614 | 0,87 | 86% | 60% |
| 13 | 1 | 8 | 66 | 1974 | 9000 | 17640 | 12192 | 19614 | 21192 | 9870 | 45002 | 5835 | -1578 | 1,35 | 83% | 66% |
| 14 | 1 | 7 | 60 | 2298 | 8479 | 16200 | 11114 | 18498 | 19593 | 11491 | 42399 | 6191 | -1095 | 1,31 | 86% | 60% |
| 15 | 1 | 7 | 60 | 1932 | 10074 | 16200 | 11112 | 18132 | 21186 | 9661 | 50372 | 7478 | -3054 | 1,10 | 86% | 60% |
| 16 | 1 | 6 | 57 | 1841 | 8128 | 15480 | 10572 | 17321 | 18700 | 9209 | 40642 | 5938 | -1379 | 1,30 | 95% | 57% |
| 17 | 1 | 6 | 54 | 4359 | 11026 | 14908 | 10132 | 19119 | 21058 | 17580 | 44460 | 5200 | -1939 | 0,90 | 90% | 54% |
| 18 | 1 | 6 | 52 | 1779 | 7462 | 14280 | 9672 | 16059 | 17134 | 8898 | 37312 | 6714 | -1075 | 1,30 | 87% | 52% |
| 19 | 1 | 6 | 51 | 2020 | 7230 | 14040 | 9492 | 16060 | 16722 | 10103 | 36150 | 6142 | -662 | 1,31 | 85% | 51% |
| 20 | 1 | 6 | 55 | 3660 | 11977 | 15150 | 10314 | 18660 | 22189 | 14762 | 48298 | 6725 | -3529 | 0,85 | 92% | 55% |
| 21 | 1 | 7 | 65 | 1730 | 9742 | 17400 | 12012 | 19130 | 21754 | 8652 | 48710 | 6398 | -2624 | 1,23 | 93% | 65% |

GUEDRIA MOHAMED

| | | | |
|----|---|---|----|
| 22 | 1 | 5 | 45 |
| 23 | 1 | 6 | 55 |
| 24 | 1 | 5 | 48 |
| 25 | 1 | 7 | 64 |
| 26 | 1 | 5 | 43 |
| 27 | 1 | 5 | 41 |
| 28 | 1 | 7 | 65 |
| 29 | 1 | 6 | 52 |
| 30 | 1 | 6 | 60 |

| | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1574 | 5438 | 12600 | 8412 | 14174 | 13850 |
| 3673 | 12042 | 15150 | 10314 | 18673 | 22253 |
| 2326 | 7353 | 13320 | 8952 | 15646 | 16305 |
| 1867 | 9051 | 17160 | 11832 | 19027 | 20883 |
| 3846 | 10232 | 12241 | 8131 | 15966 | 18284 |
| 1578 | 5385 | 11640 | 7692 | 13218 | 13077 |
| 4180 | 13203 | 17483 | 12101 | 21490 | 25184 |
| 1652 | 6817 | 14280 | 9672 | 15932 | 16489 |
| 1800 | 7523 | 16200 | 11112 | 18000 | 18635 |

| | |
|-------|-------|
| 7871 | 27193 |
| 14814 | 48558 |
| 11632 | 36769 |
| 9336 | 45255 |
| 15512 | 41262 |
| 7891 | 26925 |
| 16857 | 53239 |
| 8260 | 34089 |
| 9001 | 37619 |

| | | | | |
|------|-------|------|------|-----|
| 5240 | 324 | 1,55 | 90% | 45% |
| 6380 | -3581 | 0,84 | 92% | 55% |
| 6233 | -659 | 1,22 | 96% | 48% |
| 6251 | -1856 | 1,31 | 91% | 64% |
| 6183 | -2318 | 0,78 | 86% | 43% |
| 5748 | 141 | 1,43 | 82% | 41% |
| 6494 | -3694 | 0,90 | 93% | 65% |
| 5717 | -557 | 1,42 | 87% | 52% |
| 6680 | -635 | 1,48 | 100% | 60% |

| | | | |
|---------|---|---|----|
| Moyenne | 1 | 6 | 55 |
|---------|---|---|----|

| | | | | | |
|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 2644 | 9124 | 14947 | 10170 | 17537 | 19257 |
|------|------|-------|-------|-------|-------|

| | |
|-------|-------|
| 11835 | 41654 |
|-------|-------|

| | | | | |
|------|-------|------|-----|-----|
| 6142 | -1720 | 1,16 | 89% | 55% |
|------|-------|------|-----|-----|

Le Tableau 4-13 synthétise les performances des tournées partant de la nouvelle localisation du dépôt, préconisée dans (Abdelhaï, 2017), obtenues sur 30 jours pour les deux types de véhicule.

Le premier constat concerne le nombre de situations en faveur (vis-à-vis du temps global d'exploitation) du VPG. Si l'on considère, en effet, le différentiel de temps d'exploitation obtenu avec un VPG et un VGG, selon la position actuelle (Tableau 4-10) ou la position nouvelle (Tableau 4-13) du CDU, on dénombre 80% de situations favorables au VPG le cas où le CDU est proche du centre-ville (position actuelle), et seulement 30% de situations favorables dans le cas du CDU projeté en périphérie de la ville. En particulier, si l'on compare le différentiel de temps d'exploitation du jour le moins favorable au VPG obtenu avec la position actuelle du CDU avec la valeur correspondante obtenue avec la position nouvelle du CDU (Tableau 4-14), l'augmentation relative constatée est de 125%. A contrario, pour le jour le plus favorable au VPG, une comparaison similaire conduit à une augmentation relative de 85%. La nouvelle position de l'entrepôt tend donc à dégrader fortement la situation la moins favorable VPG, ainsi que le gain de performance obtenu dans la situation la plus à l'avantage du VPG.

Tableau 4-14 : Comparaison des valeurs extrêmes du différentiel de temps d'exploitation entre VGG et VPG, selon la position du CDU

| | Position actuelle du CDU (ELCIDIS) | Nouvelle position du CDU | Augmentation relative |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Jour le moins favorable au VPG | - 2126 | - 4785 | 125% |
| Jour le plus favorable au VPG | + 2682 | + 394 | 85% |

En comparant (Figure 4-17) les temps moyens de trajet et de service obtenus pour les deux localisations du CDU durant les 30 jours de livraison optimisée, nous relevons les observations suivantes :

- En utilisant un VPG, le temps moyen d'exploitation obtenu avec la position nouvelle du dépôt ne dépasse que de 7% le temps moyen d'exploitation obtenu avec la position actuelle.
- Les temps de service ne sont pas impactés par le changement de localisation de l'entrepôt.
- Les temps de trajet sont impactés de manière plus significative. La délocalisation de l'entrepôt à l'extérieur de la ville engendre une augmentation du temps moyen de trajet de 10,3% pour le VPG et 19,8% pour le VGG.

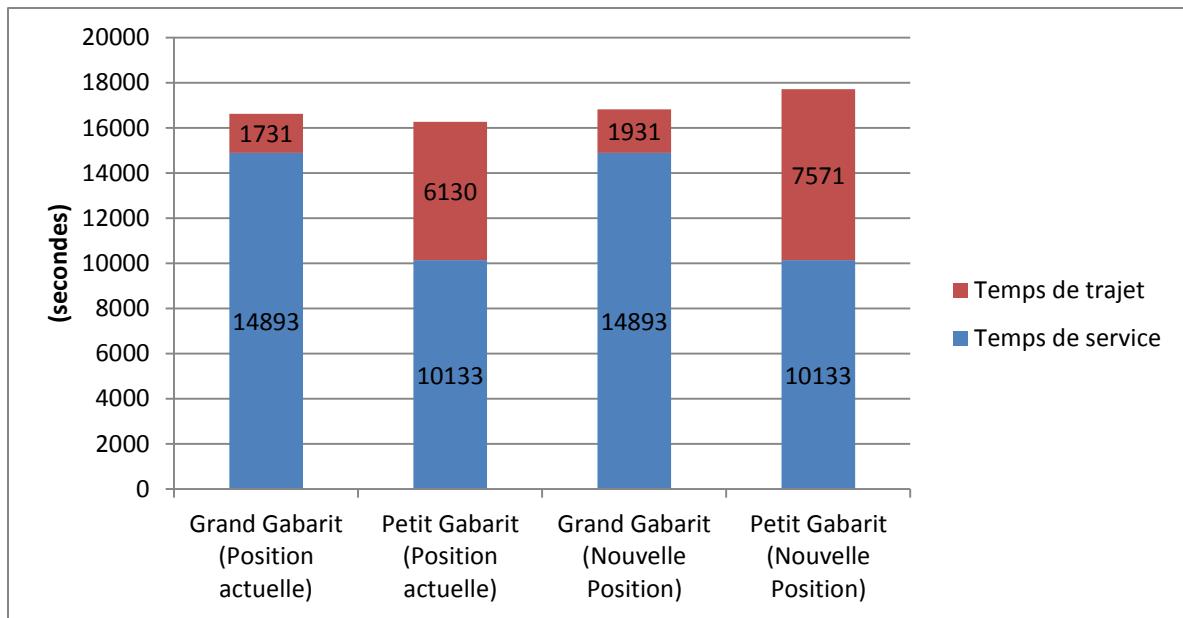


Figure 4-16 : Comparaison des temps moyen d'exploitation sur 30 jours, selon la localisation du CDU.

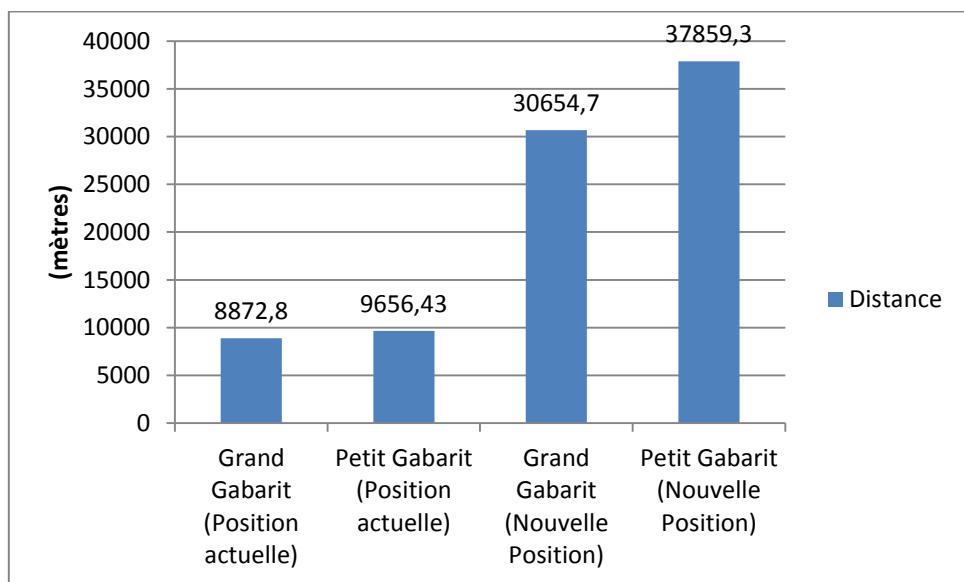


Figure 4-17 : Comparaison des distances journalières moyennes sur 30 jours, selon la localisation du CDU

Enfin, si nous analysons les distances journalières moyennes sur les 30 jours pour les deux localisations de l'entrepôt (Figure 4-17), nous observons une augmentation de 9,2% et 19% de la distance parcourue respectivement par les VPG et les VGG lorsque l'entrepôt est localisé à l'extérieur de la zone urbaine au lieu de la situation actuelle ELCIDIS.

Cette étude montre que la nouvelle position envisagée du CDU, jugée souhaitable en tant que compromis entre les attendus des autorités locales et des transporteurs régionaux, impacte négativement la performance opérationnelle des tournées, surtout si l'on utilise un VPG. Cette réflexion illustre encore une fois la complexité du système logistique urbaine et la difficulté de satisfaire l'ensemble des parties prenantes.

4.7 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons appliqué le modèle d'optimisation de tournées présenté au chapitre 3 à une étude de cas offert par la ville de La Rochelle.

Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à paramétriser notre modèle à l'aide de données relevées sur le terrain, afin d'obtenir un outil d'optimisation de tournées dédié aux caractéristiques du centre-ville rochelais.

Sur la base du modèle ainsi paramétré, nous avons réalisé une étude comparative de l'utilisation de deux types de véhicule, avec pour objectifs :

- d'évaluer, d'une part, si l'utilisation un véhicule de petit gabarit peut être envisagée sans grever le temps d'exploitation des tournées,
- et, d'autre part, d'évaluer l'incidence d'une localisation éventuelle du CDU en périphérie de centre-ville plutôt qu'en centre-ville comme c'est le cas actuellement.

Les différentes analyses réalisées à partir des données de la ville de La Rochelle ont permis de montrer qu'un petit véhicule peut remplacer avantageusement, c'est-à-dire sans sacrifier la performance économique à la performance environnementale, un véhicule classique de gabarit plus important, et ce dans le cadre d'un ensemble d'hypothèses précises, à savoir:

- Un paramétrage des indices de congestion propre au contexte urbain rochelais
- Une zone urbaine d'environ 4 km²,
- Un ensemble de clients faiblement dispersé dans la zone,
- Le maintien du CDU à proximité de la zone de livraison.

Conclusion générale

Le TMV constitue un système complexe impliquant différents acteurs (publics et privés) poursuivant des objectifs propres. Bien qu'essentielle à la vitalité de la ville, la distribution des marchandises engendre de nombreuses nuisances, qui ne satisfont aucune des parties prenantes. Les politiques territoriales, recherchent certes à améliorer la mobilité des passagers, mais élèvent leur niveau d'exigence vis-à-vis des enjeux écologiques, sanitaires et économiques associés au TMV.

L'objet de notre recherche était de contribuer à la conception et à la pré-évaluation d'un schéma logistique adapté au centre-ville, c'est-à-dire réduisant les nuisances par l'utilisation d'un véhicule de petit gabarit, et ce sans sacrifier la performance économique.

La méthodologie utilisée pour caractériser et résoudre le problème de MTTD-VRPTW s'est articulé en trois phases :

- Une première phase a consisté à mener différentes observations de terrain, ce qui nous a permis de justifier nos hypothèses de modélisation.
- Puis nous avons développé le modèle de planification optimisée de tournées sous la forme d'un programme mathématique linéaire à variables mixtes, intégrant les hypothèses issues de la phase précédente :
 - o La décomposition, pour chaque tournée, du temps total d'exploitation du véhicule en un temps de trajet et un temps de service, en fonction du contexte horaire.
 - o La possibilité de remplacer le véhicule classique de livraison en centre-ville par un véhicule de petit gabarit.
- La troisième phase a résidé dans l'étude de sensibilité du temps d'exploitation aux paramètres présents dans notre modèle.

L'étude de cas effectuée à La Rochelle visait à paramétrier notre modèle par des données réelles. Les résultats produits par le modèle ont été comparés avec les tournées réelles et nous avons tenté d'interpréter les écarts observés. Enfin, nous avons mené une étude comparative mettant en balance un véhicule classique et un véhicule de petit gabarit, dans le but de trouver les conditions économiques d'exploitation d'un petit véhicule dans le centre-ville de La Rochelle. Parmi ces conditions, nous avons montré l'importance d'un dépôt proche du centre-ville.

La complexité du problème d'optimisation des tournées en centre-ville nous a amené à poser un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Les perspectives de cette recherche sont d'élargir ces hypothèses afin d'améliorer le modèle proposé, en particulier sur les points suivants :

- la fonction objective du modèle proposé oriente essentiellement l'optimisation en suivant un critère de coût kilométrique et/ou de temps total d'exploitation. Il serait souhaitable d'y adjoindre une composante écologique en se basant sur le calcul des émissions.
- Le paramétrage du modèle proposé peut être amélioré de sorte à faciliter son instanciation au cas d'application.
- Concernant le temps d'exécution du modèle d'optimisation, il est probable que l'on puisse le rendre compatible avec des cas de centre-ville de grande taille en recourant à des heuristiques.

Par ailleurs, au-delà de l'hypothèse d'un petit gabarit des véhicules de livraison, il peut être intéressant de prendre plus spécifiquement en compte l'utilisation de véhicules non carbonés, notamment électriques, ce qui permet de relaxer certaines contraintes. Par exemple, un petit véhicule électrique pourra utiliser les rues piétonnes du centre-ville.

Enfin, il reste beaucoup à étudier dans le dimensionnement et l'exploitation du système logistique urbain considéré dans sa globalité. L'idée est de coordonner une organisation multi-niveaux utilisant des transports carbonés jusqu'aux centres de distribution périphériques et des véhicules non carbonés desservant chacun une zones urbaine, en recherchant les mutualisations qui permettent de minimiser les retours au dépôt, mais aussi en recherchant à articuler le niveau tactique et le niveau opérationnel du TMV, c'est-à-dire à optimiser conjointement les plans journaliers de distribution (détermination des marchandises à livrer) et les tournées (détermination du routage).

5. Annexes

5.1 Annexe 1 : Principe et application des plans d'expérience

A1-1 Principe des plans d'expérience

a) Terminologie des plans d'expériences

Les paramètres étudiés dans un plan d'expérience sont les paramètres d'entrée. Un paramètre est une grandeur le plus souvent mesurable (comme le nombre de colis, le nombre de clients) mais il peut s'agir d'une grandeur qualitative (comme le degré de congestion).

La réponse est le paramètre de sortie qui est la grandeur mesurée pour des combinaisons de valeurs (niveaux) des paramètres et qui peut être dans notre cas le temps total d'exploitation ou la distance totale. Avec le même plan, on peut étudier plusieurs réponses à la fois.

Une notion importante est celle d'interaction entre les paramètres d'entrée. Une interaction entre deux paramètres n'est pas à interpréter comme une dépendance entre les paramètres. A titre d'exemple, l'interaction entre deux médicaments A et B ne veut pas dire qu'un médicament va agir sur l'autre mais que l'effet du médicament A dépendra de la dose du médicament B et l'inverse. En pratique, on parle d'interaction entre deux paramètres A et B quand l'effet du paramètre A sur la réponse va dépendre de la valeur (appelé niveau) du paramètre B. L'interaction entre deux paramètres A et B est notée AB. La figure A1.1 permet d'illustrer les trois cas existants entre 2 paramètres :

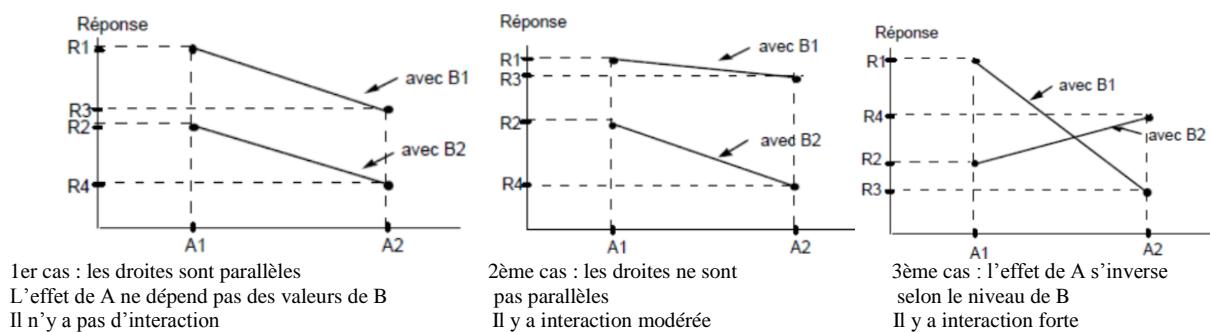


Figure A1-1 Les différents types d'interactions

Sur le même principe, on peut mettre en évidence des interactions d'ordre supérieur entre 3 ou 4 paramètres) mais leur interprétation est difficile.

On appellera action tout paramètre variable ou interaction entre paramètres.

b) Choix d'un plan d'expérience

Si on souhaite tester conjointement les effets de plusieurs paramètres d'entrée, il faut construire des plans (ou tables) contenant plusieurs scénarios (combinaisons de niveaux des paramètres d'entrée) hypothétiques. Chaque ligne d'un plan correspond à un scénario hypothétique pour lequel les niveaux des variables d'entrée sont imposés à l'intérieur de leur intervalle de variation.

Il existe deux types de plan (Goupy, et al., 2006.).

Plans complets : Dans ce cas, toutes les combinaisons des paramètres sont effectuées. Toutes les interactions peuvent être calculées, y compris celles entre plusieurs paramètres à la fois.

L'inconvénient majeur de ce type de plans réside dans le nombre exhaustif de tests qu'il faudrait faire. Par exemple, s'il faut tester les effets de 7 paramètres à 2 niveaux et de leurs interactions, cela nécessitera $2^7 = 128$ tests.

Il est évident que, pour réduire le nombre de test, il faut se limiter à peu de niveaux, mais plusieurs niveaux permettront d'associer une meilleure description de l'effet de chaque paramètre.

Plans fractionnaires :

La définition des effets moyens des paramètres et interactions présente deux propriétés remarquables :

- La somme des effets moyens d'un paramètre est nulle
- La somme des effets moyens des interactions est nulle par ligne et par colonne

Ces propriétés justifient la réduction du nombre de tests à effectuer (moins d'inconnues, moins d'équations nécessaires, moins de tests à réaliser).

Dans ce cas, seule une partie du plan complet est réalisée. Le nombre de tests dépend du nombre d'inconnues du modèle et doit permettre la vérification de l'orthogonalité de la table retenue (les combinaisons testées sont telles que chaque paramètre A apparaît autant de fois à tous ses niveaux i et chaque combinaison $A_i B_j$ apparaît). Ces plans sont notés $L_k(n)^l$ avec k pour nombre de tests, n nombre de niveaux par paramètre et l nombre d'actions (paramètres ou interactions) que l'on peut étudier et sont déjà largement connus dans la littérature (Taguchi, et al., 1987).

Chaque plan d'expériences est accompagné d'un graphe linéaire et d'une table permettant de savoir dans quelle colonne une interaction donnée est susceptible de se manifester. La Figure A1-2 présente un exemple de table $L_{27}(3)^{13}$ (table avec 27 tests qui permet, selon le graphe choisi, d'étudier l'effet de 13 actions associées à des paramètres à 3 niveaux).

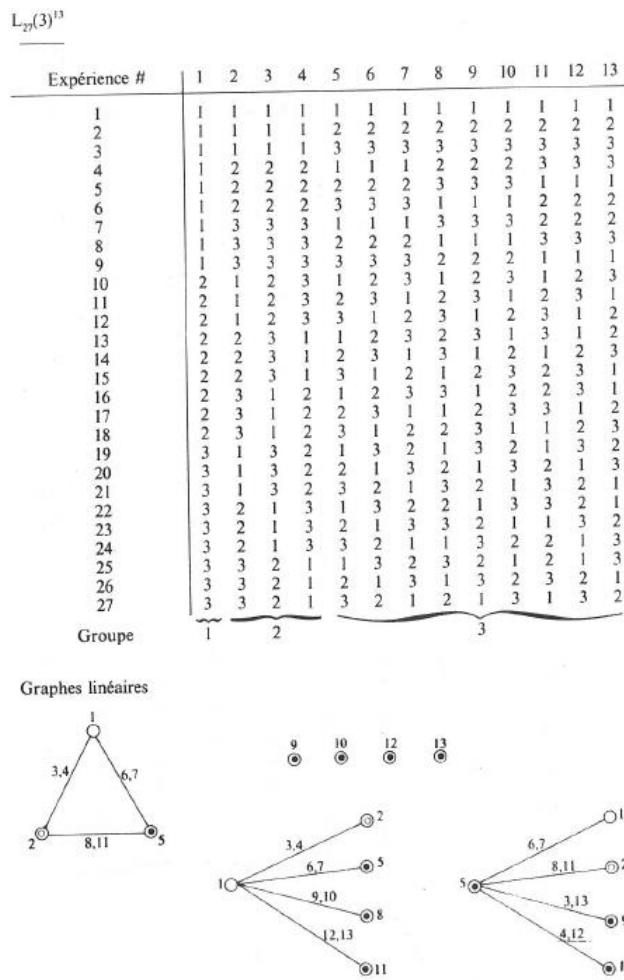


Figure A1-2 : table $L_{27}(3)^{13}$ et graphes associés

L'incontestable avantage de ce type de plan est la réduction du nombre de tests (ici 27 tests pour $3^5 = 243$ combinaisons possibles).

c) Analyse de la variance

Les valeurs des réponses obtenues par les niveaux testés doivent être analysées, afin de mesurer l'influence des facteurs et des interactions sur les variations constatées de la réponse. La principale méthode répondant à cet objectif est l'analyse de la variance (Vigier, 1991). L'analyse de la variance (ANOVA : analysis of variance) est un modèle statistique utilisé pour comparer les moyennes d'échantillons. Ce test s'applique lorsque l'on mesure les effets d'actions (paramètres ou interactions) qui ont de l'influence sur la loi d'une réponse.

On peut diviser l'analyse de la variance en 3 étapes :

Etape 1 : Calcul de la variance de chaque action : La variance des facteurs s'obtient en calculant la somme des carrés des effets moyens de l'action (paramètre ou interaction) que l'on divise par le nombre de degrés de liberté (ddl). Les formules utilisées pour déterminer les effets des paramètres et des interactions sont réunies dans le tableau ci-dessous.

| Sources | Somme des carrés | Degré de liberté | Variance |
|---------|--|----------------------|--|
| A | $S_A = \frac{N}{m_a} \sum_{i=1}^{m_a} a_i^2$ | $(m_a - 1)$ | $V_A = \frac{S_A}{(m_a - 1)}$ |
| AB | $S_{AB} = \frac{N}{m_a m_b} \sum_{ij=1}^{m_a m_b} (ab)_{ij}^2$ | $(m_a - 1)(m_b - 1)$ | $V_{AB} = \frac{S_{AB}}{(m_a - 1)(m_b - 1)}$ |

N est le nombre de tests effectués et m le nombre de niveaux de chaque paramètre.

Etape 2 : Calcul de la variance du résidu : Lorsqu'il existe un écart entre la valeur obtenue par les tests et celle donnée par le modèle, l'équation de variance fait apparaître un nouveau terme appelé communément variance résiduelle dont le calcul, assez laborieux, repose sur l'évaluation de la somme des carrés des écarts entre chaque valeur obtenue par le test et celle obtenue avec le modèle.

Pour simplifier, on utilise ce que l'on appelle communément « le théorème de Pythagore en algèbre » qui permet de calculer facilement la somme des carrés des résidus à partir de la relation suivante :

$$S_R = S_{TOT} - S_A - S_B - \dots - S_{AB} - \dots$$

avec S_{TOT} – somme des carrés des écarts entre la valeur expérimentale et la moyenne de tous les résultats M des valeurs obtenues par la simulation.

Les formules utilisées sont réunies dans le tableau ci-dessous :

| | | | |
|---------|--|------------|------------------------------|
| Résidus | $S_R = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^k (Y_{\alpha\beta} - Y_{\alpha\bar{\beta}})^2$ | γ_R | $V_R = \frac{S_R}{\gamma_R}$ |
| TOTAL | $S_T = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^k (Y_{\alpha\beta} - M)^2$ | $N - 1$ | $V_T = \frac{S_T}{N - 1}$ |

Dans notre cas $\beta = 1$ car il n'y a pas de répétitions.

Pour trouver la variance du résidu, on divise la somme des carrés des résidus par γ_R , ou degré de liberté du résidu, qui se calcule comme suit :

$$\gamma_R = N - 1 - \sum dd_i$$

Etape 3. Test de Fisher-Snedecor : La variance résiduelle est un point de comparaison. Elle doit traduire une variation des valeurs de réponse, dont l'amplitude est arbitrairement considérée comme faible. Tout facteur influent doit donc posséder des caractéristiques fortement différenciées de celles de cette composante.

Pour cette raison, on compare, pour chaque action, la variance respective à celle du résidu :

$$F_{exp} = \frac{V_A (ou V_{AB})}{V_\epsilon}$$

Le test de Fisher-Snedecor permet de comparer 2 variances, par l'utilisation de la loi statistique dite de Fisher. Celle-ci travaille sur un quotient de variances et prend en compte le nombre de degrés de liberté de chacune d'elles. On peut ensuite classer les actions en très significatives, moyennement significatives ou non-significatives avec un % de confiance donné (généralement 95% ou 99 %).

A partir du modèle déterminé, on élabore ensuite un *modèle réduit*, qui contient uniquement les actions Très significatives ou Moyennement significatives.

A1-2 Exemple d'application : évaluation de l'effet de certains paramètres sur la distance parcourue

Modélisation des effets moyens

Ce cas correspond à l'étude des jeux de paramètres suivants :

- la capacité du véhicule (Cap_k_i),
- le nombre de colis par commande ($nbbt_i$)
- l'étendue de la zone de livraison (Z_i).

Les paramètres fixés sont ici : L'indice de congestion ($Ind_i = 1$), la position du dépôt ($P_i = 0.4$) et le nombre de clients à livrer ($NbClt = 10$).

Tableau A1.1 Niveaux de valeur des paramètres variables de l'exemple (Distance)

| | Indice Param. | Paramètres variables et niveaux | | |
|----------|---------------|---------------------------------|---------------|------------|
| | | Cap Camion | Nbr Colis/Cmd | Zones (km) |
| Niveau 1 | 1 | 10 | 1 | 2 |
| Niveau 2 | 2 | 35 | 5 | 15 |
| Niveau 3 | 3 | 70 | 10 | 30 |

La table du plan d'expérience et les résultats de tests sont présentés ci-après.

Tableau A1-2 Table d'expérience

| Num : | Variables | | | Distance globale (km) |
|-------|------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------|
| | Cap Camion | Nbr Colis/Cmd | Zones (km) | |
| 1 | 10 | 1 | 2 | 7,47 |
| 2 | 10 | 1 | 15 | 35,88 |
| 3 | 10 | 1 | 30 | 70,21 |
| 4 | 10 | 5 | 2 | 18,59 |
| 5 | 10 | 5 | 15 | 63,55 |
| 6 | 10 | 5 | 30 | 126,78 |
| 7 | 10 | 10 | 2 | 31,29 |
| 8 | 10 | 10 | 15 | 103,25 |
| 9 | 10 | 10 | 30 | 220,11 |
| 10 | 35 | 1 | 2 | 7,47 |
| 11 | 35 | 1 | 15 | 35,88 |
| 12 | 35 | 1 | 30 | 70,21 |
| 13 | 35 | 5 | 2 | 9,49 |
| 14 | 35 | 5 | 15 | 35,94 |
| 15 | 35 | 5 | 30 | 78,50 |
| 16 | 35 | 10 | 2 | 13,26 |
| 17 | 35 | 10 | 15 | 49,36 |
| 18 | 35 | 10 | 30 | 103,42 |
| 19 | 70 | 1 | 2 | 7,47 |
| 20 | 70 | 1 | 15 | 35,88 |
| 21 | 70 | 1 | 30 | 70,21 |
| 22 | 70 | 5 | 2 | 7,47 |
| 23 | 70 | 5 | 15 | 35,88 |
| 24 | 70 | 5 | 30 | 70,21 |
| 25 | 70 | 10 | 2 | 9,49 |
| 26 | 70 | 10 | 15 | 35,94 |
| 27 | 70 | 10 | 30 | 78,50 |
| | | | | |
| | | | Moyenne de toutes les simulations M | 53 |
| | | | | |

Le modèle de la réponse en distance obtenu par l'application de la méthode des plans d'expérience est le suivant (l'interaction entre les 3 paramètres, étant très faible, n'est pas présentée) :

$$D (\text{km}) = 53 + [22 - 8 - 14] [Cap] + [-15 - 3 18] [Nbbt] + [-41 - 3 44] [Z]$$

$$+ {}^t[Cap] \begin{bmatrix} -22 & -2 & 24 \\ 8 & 0 & -8 \\ 14 & 2 & -16 \end{bmatrix} [Nbbt] + {}^t[Nbbt] \begin{bmatrix} 10 & 3 & -13 \\ 2 & 1 & -3 \\ -13 & -3 & 16 \end{bmatrix} [Z] + {}^t[Z] \begin{bmatrix} -15 & -3 & 18 \\ 6 & 0 & -6 \\ 10 & 2 & -12 \end{bmatrix} [Cap]$$

Analyse de la variance

On applique ensuite au modèle ci-dessus l'analyse de la variance avec ses 3 étapes, ce qui donne les résultats réunis dans le tableau A1-3.

Tableau A1-3 Analyse de variance

| | Action (paramètre ou interaction) | Somme carrés | Variance de l'action | Variance Résidu | Vaction/Vré sidu | Test Fisher (à 95%) | Test Fisher (à 99%) | Type d'action |
|--------------|-----------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| paramètres | cap | 6,81E+03 | 3,41E+03 | | 6,2 | 4,5 | 8,65 | MS |
| | nbbt | 5,09E+03 | 2,55E+03 | | 4,7 | 4,5 | 8,65 | MS |
| | z | 3,25E+04 | 1,63E+04 | | 29,7 | 4,5 | 8,65 | TS |
| interactions | capnbbt | 4,97E+03 | 1,24E+03 | 5,47E+02 | 2,3 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | nbbtZ | 1,70E+03 | 4,25E+02 | | 0,8 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | capZ | 2,63E+03 | 6,59E+02 | | 1,2 | 3,8 | 7,01 | NS |

La dernière colonne de ce tableau nous conduit à conclure que les interactions ne sont pas significatives et que le paramètre le plus influent sur la réponse en distance est la zone de livraison Z qui apparaît comme étant « Très Significative ». Viennent ensuite les paramètres capacité du camion et nombre de colis par commande, qui s'avèrent être « moyennement significatifs ».

Modèle réduit

En définitive, les conclusions de l'analyse de la variance conduit, après élimination des actions non significatives, à un modèle réduit de la réponse sous la forme :

$$D (\text{km}) = 53 + [22 - 8 - 14] [Cap] + [-15 - 3 18] [Nbbt] + [-41 - 3 44] [Z]$$

5.2 Annexe 2 : Résultats des plans d'expérience

A2-1 PEX1 Effet de l'indice de congestion, du nombre de colis par commande et de la position du dépôt

Tableau A2-1 Niveaux de valeur des paramètres variables du plan d'expérience PEX1

| | Congestion : Ind _i | Nbr Colis/Cmd : nbbt _i | Position dépôt : P _i |
|----------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Niveau 1 | 1 | 1 | 0 |
| Niveau 2 | 1,5 | 5 | 0,4 |
| Niveau 3 | 2 | 10 | 7 |

Les résultats observés sont ici le temps de trajet cumulé, le temps de service cumulé, le temps total d'exploitation et la distance totale cumulée.

Tableau A2-2 Table du plan d'expérience PEX1

| # | Ind _i | Nbbt _i | P _i | Temps de trajet (min) | Temps de service (min) | Temps total d'exploitation (min) | Distance globale (km) |
|----|------------------|-------------------|----------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 17,63 | 51 | 68,63 | 7,333 |
| 2 | 1 | 1 | 0,4 | 17,97 | 51 | 68,97 | 7,472 |
| 3 | 1 | 1 | 7 | 24,72 | 51 | 75,72 | 10,275 |
| 4 | 1 | 5 | 0 | 27,82 | 215 | 242,82 | 11,568 |
| 5 | 1 | 5 | 0,4 | 44,72 | 215 | 259,72 | 18,593 |
| 6 | 1 | 5 | 7 | 77,68 | 215 | 292,68 | 32,311 |
| 7 | 1 | 10 | 0 | 41,43 | 420 | 461,43 | 17,236 |
| 8 | 1 | 10 | 0,4 | 75,23 | 420 | 495,23 | 31,286 |
| 9 | 1 | 10 | 7 | 141,17 | 420 | 561,17 | 58,722 |
| 10 | 1,5 | 1 | 0 | 26,42 | 56,5 | 82,92 | 7,333 |
| 11 | 1,5 | 1 | 0,4 | 26,92 | 56,5 | 83,42 | 7,472 |
| 12 | 1,5 | 1 | 7 | 37,02 | 56,5 | 93,52 | 10,275 |
| 13 | 1,5 | 5 | 0 | 41,68 | 222,5 | 264,18 | 11,568 |
| 14 | 1,5 | 5 | 0,4 | 67,05 | 222,5 | 289,55 | 18,593 |
| 15 | 1,5 | 5 | 7 | 116,50 | 222,5 | 339,00 | 32,311 |
| 16 | 1,5 | 10 | 0 | 62,10 | 430 | 492,10 | 17,236 |
| 17 | 1,5 | 10 | 0,4 | 112,83 | 430 | 542,83 | 31,286 |
| 18 | 1,5 | 10 | 7 | 211,73 | 430 | 641,73 | 58,722 |
| 19 | 2 | 1 | 0 | 35,30 | 62 | 97,30 | 7,333 |
| 20 | 2 | 1 | 0,4 | 35,95 | 62 | 97,95 | 7,472 |
| 21 | 2 | 1 | 7 | 49,42 | 62 | 111,42 | 10,275 |
| 22 | 2 | 5 | 0 | 55,63 | 230 | 285,63 | 11,568 |
| 23 | 2 | 5 | 0,4 | 89,40 | 230 | 319,40 | 18,593 |
| 24 | 2 | 5 | 7 | 155,33 | 230 | 385,33 | 32,311 |
| 25 | 2 | 10 | 0 | 82,90 | 440 | 522,90 | 17,236 |
| 26 | 2 | 10 | 0,4 | 150,43 | 440 | 590,43 | 31,286 |
| 27 | 2 | 10 | 7 | 282,30 | 440 | 722,30 | 58,722 |

Le modèle additif obtenu pour le temps de trajet cumulé TT est le suivant :

$$\begin{aligned} TT(\text{min}) = & 78 + [-26 \ -0 \ 26] [Ind] + [-48 \ -3 \ 51] [Nbbt] + [-34 \ -9 \ 43] [P] \\ & + {}^t[Ind] \begin{bmatrix} 16 & 1 & -17 \\ 0 & 0 & 0 \\ -16 & -1 & 17 \end{bmatrix} [Nbbt] + {}^t[Ind] \begin{bmatrix} 11 & 3 & -14 \\ 0 & 0 & 0 \\ -11 & -3 & 14 \end{bmatrix} [P] + {}^t[Nbbt] \begin{bmatrix} 31 & 6 & -37 \\ 1 & 1 & -2 \\ -32 & -7 & 39 \end{bmatrix} [P] \end{aligned}$$

L'analyse de la variance a produit les résultats résumés dans le Tableau A2-3.

Tableau A2-3 ANOVA réponse TT (plan PEX1)

| | Action (paramètre ou interaction) | Somme carrés | Variance de l'action | Variance Résidu | Vaction/Vré sidu | Test Fisher (à 95%) | Test Fisher (à 99%) | Type d'action |
|--------------|-----------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| paramètres | Ind | 1,22E+04 | 6,08E+03 | | 24,3 | 4,5 | 8,65 | TS |
| | nbbt | 4,42E+04 | 2,21E+04 | | 88,4 | 4,5 | 8,65 | TS |
| | P | 2,78E+04 | 1,39E+04 | | 55,5 | 4,5 | 8,65 | TS |
| interactions | indnbbt | 3,28E+03 | 8,19E+02 | 2,50E+02 | 4,3 | 3,8 | 7,01 | MS |
| | indP | 1,96E+03 | 4,89E+02 | | 2,0 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | Pnbbt | 1,49E+04 | 3,72E+03 | | 14,9 | 3,8 | 7,01 | TS |

Le modèle additif pour le temps de service cumulé TS est le suivant :

$$\begin{aligned} TS(\text{min}) = & 236 + [-8 \ 0 \ 8] [Ind] + [-180 \ -13 \ 193] [Nbbt] + [0 \ 0 \ 0] [P] \\ & + {}^t[Ind] \begin{bmatrix} 2 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 2 \end{bmatrix} [Nbbt] + {}^t[Ind] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [P] + {}^t[Nbbt] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [P] \end{aligned}$$

L'analyse de la variance a produit les résultats résumés dans le Tableau A2-4.

Tableau A2-4 ANOVA réponse TS (plan PEX1)

| | Action (paramètre ou interaction) | Somme carrés | Variance de l'action | Variance Résidu | Vaction/Vré sidu | Test Fisher (à 95%) | Test Fisher (à 99%) | Type d'action |
|--------------|-----------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| paramètres | Ind | 1,15E+03 | 5,76E+02 | | 2,4 | 4,5 | 8,65 | MS |
| | nbbt | 6,28E+05 | 3,14E+05 | | 1322,5 | 4,5 | 8,65 | TS |
| | P | 0,00E+00 | 0,00E+00 | | 0,0 | 4,5 | 8,65 | NS |
| interactions | indnbbt | 4,80E+01 | 1,20E+01 | 2,38E+02 | 0,1 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | indP | 0,00E+00 | 0,00E+00 | | 0,0 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | Pnbbt | 0,00E+00 | 0,00E+00 | | 0,0 | 3,8 | 7,01 | TS |

Enfin, le modèle additif pour le temps total d'exploitation est le suivant :

$$TE \text{ (min)} = 314 + [-34 \quad 0 \quad 34] [Ind] + [-228 \quad -17 \quad 245] [Nbbt] + [-34 \quad -9 \quad 43] [P] + \\ {}^t[Ind] \begin{bmatrix} 18 & 1 & -19 \\ 0 & 0 & 0 \\ -18 & -1 & 19 \end{bmatrix} [nbbt] + {}^t[Ind] \begin{bmatrix} 11 & 3 & -14 \\ 0 & 0 & 0 \\ -11 & -3 & 14 \end{bmatrix} [P] + {}^t[Nbbt] \begin{bmatrix} 31 & 6 & -37 \\ 1 & 1 & -2 \\ -32 & -7 & 39 \end{bmatrix} [P]$$

L'analyse de la variance a produit les résultats résumés dans le Tableau A2-5.

Tableau A2-5 ANOVA réponse TE (plan PEX1)

| | Action (paramètre ou interaction) | Somme carrés | Variance de l'action | Variance Résidu | Vaction/Vré sidu | Test Fisher (à 95%) | Test Fisher (à 99%) | Type d'action |
|--------------|-----------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| paramètres | Ind | 2,08E+04 | 1,04E+04 | | 24,7 | 4,5 | 8,65 | TS |
| | nbbt | 1,01E+06 | 5,03E+05 | | 1194,7 | 4,5 | 8,65 | TS |
| | P | 2,78E+04 | 1,39E+04 | | 33,0 | 4,5 | 8,65 | TS |
| interactions | indnbbt | 4,12E+03 | 1,03E+03 | 4,21E+02 | 2,4 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | indP | 1,96E+03 | 4,89E+02 | | 1,2 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | Pnbbt | 1,49E+04 | 3,72E+03 | | 8,8 | 3,8 | 7,01 | TS |

Les analyses de variance conduisent à réduire les modèles de réponse après élimination des facteurs non significatifs. En particulier, concernant le temps total d'exploitation, nous éliminons l'effet des interactions Ind/nbbt et Ind/P et obtenons le *modèle réduit* suivant :

$$TE \text{ (min)} = 314 + [-34 \quad 0 \quad 34] [Ind] + [-228 \quad -17 \quad 245] [Nbbt] + [-34 \quad -9 \quad 43] [P] + {}^t[Nbbt] \begin{bmatrix} 31 & 6 & -37 \\ 1 & 1 & -2 \\ -32 & -7 & 39 \end{bmatrix} [P]$$

A2-2 PEX2 Effet de la capacité du véhicule, du nombre de colis par commande et de l'étendue de la zone de livraison

Pour ce deuxième plan d'expérience, nous avons choisi de faire varier les paramètres « capacité du véhicule Cap_{k_i} », « nombre de colis $nbbt_i$ » et « étendue de la zone de livraison Z_i ». Les résultats observés sont : le temps cumulé de trajet, le temps cumulé de service, le temps total d'exploitation et la distance totale cumulée.

Les trois niveaux de valeur des paramètres étaient les suivants :

Tableau A2-6 Niveaux de valeur des paramètres variables du plan d'expérience PEX2

| | Capacité camion Cap_{k_i} | Nbr Colis/Cmd $nbbt_i$ | Etendue zone de livraison Z_i |
|----------|-----------------------------|------------------------|---------------------------------|
| Niveau 1 | 10 | 1 | 2 |
| Niveau 2 | 35 | 5 | 15 |
| Niveau 3 | 70 | 10 | 30 |

Les paramètres fixés sont : l'indice de congestion ($Ind_1 = 1$), la position du dépôt ($P_2 = 0,4$) et le nombre de clients à livrer ($NbClt = 10$). Nous avons suivi le plan d'expérience défini par le Tableau A2-7.

Tableau A2-7 Table du plan d'expérience PEX2

| # | Capk _i | nbbt _i | Z _i | Temps de trajet (min) | Temps de service (min) | Temps total exploitation (min) | Distance globale (km) |
|-----------|-------------------|-------------------|----------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | 10 | 1 | 2 | 17,85 | 51 | 68,85 | 7,472 |
| 2 | 10 | 1 | 15 | 86,23 | 51 | 137,23 | 35,875 |
| 3 | 10 | 1 | 30 | 168,80 | 51 | 219,80 | 70,214 |
| 4 | 10 | 5 | 2 | 44,72 | 215 | 259,72 | 18,593 |
| 5 | 10 | 5 | 15 | 152,78 | 215 | 367,78 | 63,551 |
| 6 | 10 | 5 | 30 | 304,68 | 215 | 519,68 | 126,779 |
| 7 | 10 | 10 | 2 | 75,23 | 420 | 495,23 | 31,286 |
| 8 | 10 | 10 | 15 | 248,22 | 420 | 668,22 | 103,251 |
| 9 | 10 | 10 | 30 | 529,10 | 420 | 949,10 | 220,111 |
| 10 | 35 | 1 | 2 | 17,97 | 51 | 68,97 | 7,472 |
| 11 | 35 | 1 | 15 | 86,23 | 51 | 137,23 | 35,875 |
| 12 | 35 | 1 | 30 | 168,80 | 51 | 219,80 | 70,214 |
| 13 | 35 | 5 | 2 | 22,82 | 212 | 234,82 | 9,491 |
| 14 | 35 | 5 | 15 | 86,38 | 212 | 298,38 | 35,94 |
| 15 | 35 | 5 | 30 | 188,72 | 212 | 400,72 | 78,499 |
| 16 | 35 | 10 | 2 | 31,90 | 414 | 445,90 | 13,261 |
| 17 | 35 | 10 | 15 | 118,65 | 414 | 532,65 | 49,355 |
| 18 | 35 | 10 | 30 | 248,62 | 414 | 662,62 | 103,419 |
| 19 | 70 | 1 | 2 | 17,97 | 51 | 68,97 | 7,472 |
| 20 | 70 | 1 | 15 | 86,23 | 51 | 137,23 | 35,875 |
| 21 | 70 | 1 | 30 | 168,80 | 51 | 219,80 | 70,214 |
| 22 | 70 | 5 | 2 | 17,97 | 211 | 228,97 | 7,472 |
| 23 | 70 | 5 | 15 | 86,23 | 211 | 297,23 | 35,875 |
| 24 | 70 | 5 | 30 | 168,80 | 211 | 379,80 | 70,214 |
| 25 | 70 | 10 | 2 | 22,82 | 412 | 434,82 | 9,491 |
| 26 | 70 | 10 | 15 | 86,38 | 412 | 498,38 | 35,94 |
| 27 | 70 | 10 | 30 | 188,72 | 412 | 600,72 | 78,499 |
| Moyenne M | | | | 127 | 226 | 354 | 53 |

Le modèle additif obtenu pour le temps cumulé de trajet est le suivant :

$$\begin{aligned}
 TT(min) = & 127 + [53 - 20 - 34][Capk] + [-36 - 8 45][Nbbt] + [-98 - 12 110][Z] + \\
 & {}^t[Capk] \begin{bmatrix} -54 & -5 & 59 \\ 19 & 0 & -19 \\ 34 & 5 & -39 \end{bmatrix} [nbbt] + {}^t[Capk] \begin{bmatrix} -37 & -6 & 43 \\ 14 & 1 & -15 \\ 23 & 5 & -28 \end{bmatrix} [Z] + \\
 & {}^t[nbbt] \begin{bmatrix} 24 & 7 & -31 \\ 7 & 1 & -8 \\ -31 & -9 & 40 \end{bmatrix} [Z]
 \end{aligned}$$

L'analyse de la variance a produit les résultats résumés dans le Tableau A2-8.

Tableau A2-8 ANOVA réponse TT (plan PEX2)

| | Action (paramètre ou interaction) | Somme carrés | Variance de l'action | Variance Résidu | Vaction/Vré sidu | Test Fisher (à 95%) | Test Fisher (à 99%) | Type d'action |
|--------------|-----------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| paramètres | cap | 4,19E+04 | 2,09E+04 | | 7,4 | 4,5 | 8,65 | TS |
| | nbbt | 8,94E+05 | 4,47E+05 | | 157,4 | 4,5 | 8,65 | TS |
| | z | 1,93E+05 | 9,65E+04 | | 34,0 | 4,5 | 8,65 | TS |
| interactions | capnbbt | 3,16E+04 | 7,90E+03 | 2,84E+03 | 2,8 | 3,8 | 7,01 | MS |
| | nbbtZ | 1,30E+04 | 3,26E+03 | | 1,1 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | capZ | 1,53E+04 | 3,82E+03 | | 1,3 | 3,8 | 7,01 | NS |

Après suppression des effets non significatifs, nous obtenons donc le modèle réduit du temps cumulé de trajet sous la forme

$$TT(min) = 127 + [53 - 20 - 34][Capk] + [-36 - 8 45][Nbbt] + [-98 - 12 110][Z] + {}^t[Capk] \begin{bmatrix} -54 & -5 & 59 \\ 19 & 0 & -19 \\ 34 & 5 & -39 \end{bmatrix} [nbbt]$$

Le modèle additif obtenu pour le temps cumulé de service est le suivant :

$$TS(min) = 226 + [2 0 - 2][Capk] + [-175 - 14 189][Nbbt] + [0 0 0][Z] + {}^t[Capk] \begin{bmatrix} -2 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix} [Nbbt] + {}^t[nbbt] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [Z] + {}^t[nbbt] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [Capk]$$

L'analyse de la variance a produit les résultats résumés dans le Tableau A2-9.

Tableau A2-9 ANOVA réponse TS (plan PEX2)

| | Action (paramètre ou interaction) | Somme carrés | Variance de l'action | Variance Résidu | Vaction/Vré sidu | Test Fisher (à 95%) | Test Fisher (à 99%) | Type d'action |
|--------------|-----------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| paramètres | cap | 7,20E+01 | 3,60E+01 | | 0,3 | 4,5 | 8,65 | NS |
| | nbbt | 5,99E+05 | 2,99E+05 | | 2464,5 | 4,5 | 8,65 | TS |
| | z | 0,00E+00 | 0,00E+00 | | 0,0 | 4,5 | 8,65 | NS |
| interactions | capnbbt | 5,40E+01 | 1,35E+01 | 1,22E+02 | 0,1 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | nbbtZ | 0,00E+00 | 0,00E+00 | | 0,0 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | capZ | 0,00E+00 | 0,00E+00 | | 0,0 | 3,8 | 7,01 | NS |

L'analyse de la variance nous conduit donc à retenir l'expression réduite du temps cumulé de service :

$$TS(min) = 226 + [-175 - 14 189][nbbt]$$

Enfin, le modèle additif obtenu pour le temps total d'exploitation est le suivant :

$$TE = 353 + [55 - 20 - 35][Capk] + [-211 - 22 233][nbbt] + [-97 - 12 109][Z] +$$

$$+ {}^t[Capk] \begin{bmatrix} -56 & -5 & 61 \\ 20 & 0 & -20 \\ 35 & 5 & -40 \end{bmatrix} [Nbbt] + {}^t[nbbt] \begin{bmatrix} 24 & 7 & -31 \\ 7 & 1 & -8 \\ -31 & -9 & 40 \end{bmatrix} [Z] + {}^t[Z] \begin{bmatrix} -38 & -6 & 44 \\ 14 & 1 & -15 \\ 23 & 5 & -28 \end{bmatrix} [Capk]$$

L'analyse de la variance a produit les résultats résumés dans le Tableau A2-10.

Tableau A2-10 ANOVA réponse TE (plan PEX2)

| | Action (paramètre ou interaction) | Somme carrés | Variance de l'action | Variance Résidu | Vaction/Vré sidu | Test Fisher (à 95%) | Test Fisher (à 99%) | Type d'action |
|--------------|-----------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| paramètres | cap | 3,93E+04 | 1,96E+04 | | 13,3 | 4,5 | 8,65 | TS |
| | nbbt | 3,05E+04 | 1,52E+04 | | 10,3 | 4,5 | 8,65 | TS |
| | z | 1,97E+05 | 9,83E+04 | | 66,6 | 4,5 | 8,65 | TS |
| interactions | capnbbt | 2,95E+04 | 7,38E+03 | 1,48E+03 | 5,0 | 3,8 | 7,01 | MS |
| | nbbtZ | 1,50E+04 | 3,76E+03 | | 2,5 | 3,8 | 7,01 | NS |
| | capZ | 1,30E+04 | 3,26E+03 | | 2,2 | 3,8 | 7,01 | NS |

En éliminant les interactions non-significatives nous retenons donc le modèle réduit du temps total d'exploitation sous la forme

$$TE = 353 + [55 - 20 - 35] [Capk] + [-211 - 22 233] [nbbt] + [-97 - 12 109] [Z] +$$

$$+ {}^t[Capk] \begin{bmatrix} -56 & -5 & 61 \\ 20 & 0 & -20 \\ 35 & 5 & -40 \end{bmatrix} [Nbbt]$$

5.3 Annexe 3: Résultats d'une semaine d'observation de tournées réelles à La Rochelle, en vue d'estimer un indice horaire de congestion

Ces observations ont été faites pendant la période de 20 à 24 avril 2015 avec le transporteur PROXIWAY ELCIDIS à La Rochelle. La trace des tournées, effectuées par un MODEC (véhicule électrique de 3,5 T et 20 m³) est présentée dans le Tableau A3-1.

Tableau A3-1 : relevé d'observations de tournées réelles à La Rochelle (20 au 24 avril 2015)

| Jours de livraison | Type de véhicule (3,5T) | Heure de départ | Nombre de clients livrés | Temps total d'exploitation | Total temps de service (mn) | Total temps des trajets (mn) | Distance totale (km) |
|--------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------|
| Jour1 :20/04/15 | MODEC | 09h52 | 8 | 1h08 | 42 | 26 | 3,7 |
| Jour2 :21/04/15 | MODEC | 13h12 | 5 | 1h12 | 31 | 41 | 5,9 |
| Jour3 :22/04/15 | MODEC | 11h31 | 11 | 1h30 | 69 | 21 | 3,2 |
| Jour4 :23/04/15 | MODEC | 09h52 | 10 | 1h28 | 51 | 37 | 5,4 |
| Jour5 :24/04/15 | MODEC | 10h02 | 10 | 1h43 | 49 | 54 | 3,3 |

5.4 Annexe 4: Observation relative à la disponibilité des places de parking

Des relevés ont été effectués sur plusieurs jours et dans les mêmes rues. Le principe était de noter les places occupées toutes les 10 minutes de 7h à 12h, afin d'estimer un taux de disponibilité pour ces rues. Les observations ont porté sur les places simples et doubles de stationnement (Figure A4-1).

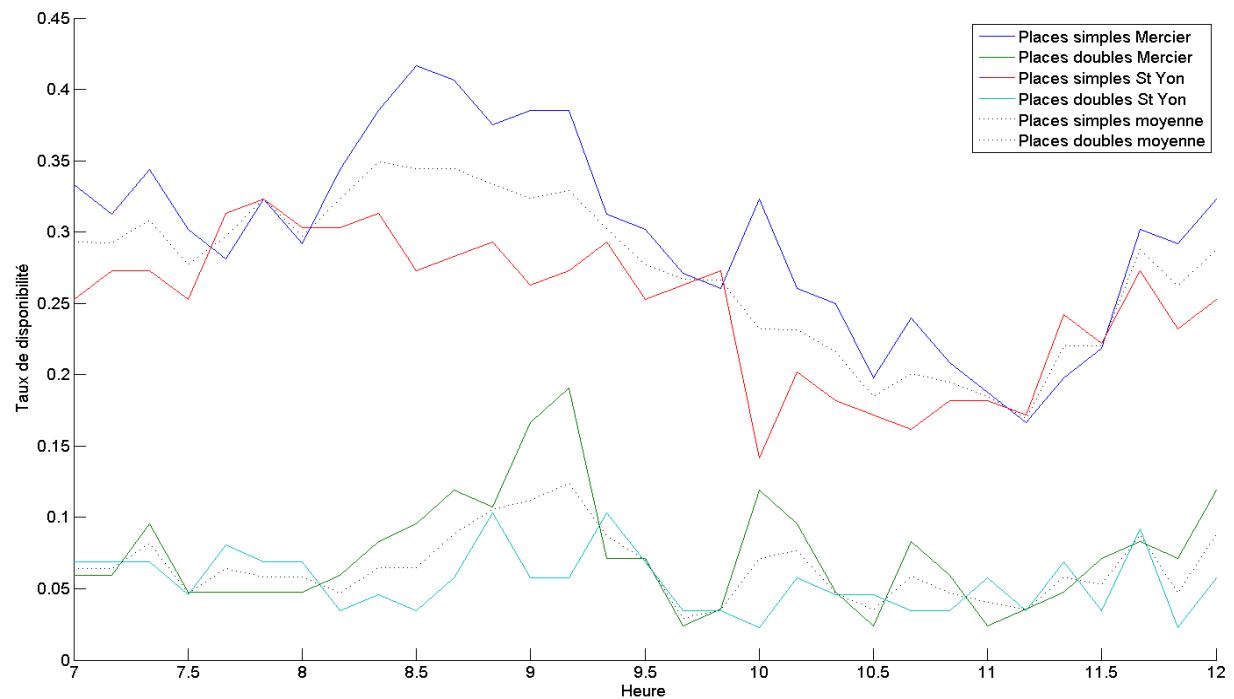


Figure A4-1 : Disponibilité de places de parking simples et doubles sur les Rues Saint-Yon et Merciers à La Rochelle (juin 2017)

5.5 Annexe 5 : Données relatives au calcul des temps de parking par type de véhicule

Dans cette partie, nous allons présenter observations de terrain qui comportaient le chronométrage de tous les temps de parking, par type de véhicule avant chaque livraison.

Ces tables indiquent l'heure à laquelle le chauffeur commence à chercher une place et le temps mis à garer le véhicule, ainsi que l'indice de congestion à l'heure de la manœuvre. Ces tables regroupent toutes les mesures effectuées pendant une semaine pour chaque type de véhicule.

Tableau A5-1 : table des temps de parking pour un véhicule type Berlingo

| Heure de passage (hh :mm :ss) | Temps de parking (hh :mm :ss) | Indice de congestion courant | Temps parking extrapoler avec un indice neutre de 1,0 (hh :mm :ss) |
|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---|
| 14:50:00 | 00:01:30 | 1,28 | 00:01:10 |
| 15:28:00 | 00:01:22 | 1,27 | 00:01:05 |
| 11:38:00 | 00:01:15 | 1,29 | 00:00:58 |
| 11:14:00 | 00:01:00 | 1,29 | 00:00:47 |
| 15:09:00 | 00:00:46 | 1,27 | 00:00:36 |
| 11:26:00 | 00:00:42 | 1,29 | 00:00:33 |
| 11:46:00 | 00:00:40 | 1,29 | 00:00:31 |
| 11:56:00 | 00:00:38 | 1,29 | 00:00:29 |
| 11:49:00 | 00:00:35 | 1,29 | 00:00:27 |
| 11:28:00 | 00:00:32 | 1,29 | 00:00:25 |
| 11:47:00 | 00:00:30 | 1,29 | 00:00:23 |
| 11:10:00 | 00:00:25 | 1,29 | 00:00:19 |
| 11:33:19 | 00:00:23 | 1,29 | 00:00:18 |
| 12:11:00 | 00:00:22 | 1,27 | 00:00:17 |
| 11:35:00 | 00:00:22 | 1,29 | 00:00:17 |
| 11:24:00 | 00:00:22 | 1,29 | 00:00:17 |
| 11:37:00 | 00:00:21 | 1,29 | 00:00:16 |
| 12:07:00 | 00:00:20 | 1,27 | 00:00:16 |
| 15:50:00 | 00:00:17 | 1,27 | 00:00:13 |
| 12:03:00 | 00:00:17 | 1,27 | 00:00:13 |
| 13:40:00 | 00:00:15 | 1,17 | 00:00:13 |
| 15:39:00 | 00:00:15 | 1,27 | 00:00:12 |
| 11:01:00 | 00:00:15 | 1,29 | 00:00:12 |
| 14:00:00 | 00:00:14 | 1,28 | 00:00:11 |
| 13:59:00 | 00:00:08 | 1,17 | 00:00:07 |
| 15:21:00 | 00:00:07 | 1,27 | 00:00:06 |

Tableau A5-2 : table des temps de parking pour un véhicule type 3,5T (Gruau)

| Heure de passage (hh :mm :ss) | Temps de parking (hh :mm :ss) | Indice de congestion courant | Temps parking extrapoler avec un indice neutre de 1,0 (hh :mm :ss) |
|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---|
| 09:30:00 | 00:01:02 | 1,37 | 00:00:45 |
| 09:47:00 | 00:01:13 | 1,37 | 00:00:53 |
| 09:54:00 | 00:04:17 | 1,37 | 00:03:08 |
| 09:55:00 | 00:00:41 | 1,37 | 00:00:30 |
| 10:04:00 | 00:01:39 | 1,24 | 00:01:20 |
| 10:06:00 | 00:03:28 | 1,24 | 00:02:48 |
| 10:09:00 | 00:01:04 | 1,24 | 00:00:52 |

| | | | |
|----------|----------|------|----------|
| 10:10:00 | 00:01:07 | 1,24 | 00:00:54 |
| 10:19:00 | 00:01:35 | 1,24 | 00:01:17 |
| 10:22:00 | 00:00:57 | 1,24 | 00:00:46 |
| 10:23:00 | 00:00:30 | 1,24 | 00:00:24 |
| 10:24:00 | 00:00:11 | 1,24 | 00:00:09 |
| 10:27:00 | 00:00:46 | 1,24 | 00:00:37 |
| 10:32:00 | 00:03:24 | 1,24 | 00:02:45 |
| 10:38:00 | 00:00:21 | 1,24 | 00:00:17 |
| 10:38:00 | 00:01:30 | 1,24 | 00:01:13 |
| 10:39:00 | 00:01:00 | 1,24 | 00:00:48 |
| 10:47:00 | 00:01:22 | 1,24 | 00:01:06 |
| 10:48:00 | 00:01:11 | 1,24 | 00:00:57 |
| 10:49:00 | 00:01:38 | 1,24 | 00:01:19 |
| 10:49:00 | 00:00:57 | 1,24 | 00:00:46 |
| 10:58:00 | 00:01:14 | 1,24 | 00:01:00 |
| 10:58:00 | 00:01:00 | 1,24 | 00:00:48 |
| 11:01:00 | 00:04:40 | 1,29 | 00:03:37 |
| 11:12:00 | 00:01:57 | 1,29 | 00:01:31 |
| 11:56:00 | 00:01:00 | 1,29 | 00:00:47 |
| 12:03:00 | 00:01:25 | 1,27 | 00:01:07 |

5.6 Annexe 6 : Détails des observations effectuées avec un véhicule utilitaire léger et un autre de type 3,5 T

On présente ici la localisation des clients et le chronométrage des livraisons observés lors de 4 tournées (jour 1 à jour 4) réalisées par un véhicule léger. On compare ensuite la structure de la tournée observée avec la tournée optimisée issue de notre modèle.

Des observations similaires, dans le cas d'un véhicule 3,5 t, sont présentées.

a) Observations VUL

Jour 1 : 30/05/17

Tableau A6-3 : Liste des clients jour 1 avec un Berlingo

| Clients | Adresse | Longitude | latitude |
|---------|--|-----------|-----------|
| 1 | Mutuelle de Poitier : 20 Place de Verdun, 17000 La Rochelle | 46.162997 | -1.153689 |
| 2 | Hôtel ibis : 1ter Rue Fleuriau, 17000 La Rochelle | 46.161270 | -1.150478 |
| 3 | Culinarion : 30 Rue des Merciers, 17000 La Rochelle | 46.160432 | -1.150243 |
| 4 | La Joie du vin : 2 Bis Rue Thiers, 17000 La Rochelle | 46.161709 | -1.149823 |
| 5 | Chantier Carrefour Market : 99 Boulevard de Cognehors, 17000 La Rochelle | 46.167410 | -1.139109 |
| 6 | Pharmacie SOIN Valerie : 28 Avenue de la Porte Royale, 17000 La Rochelle | 46.163032 | -1.139494 |
| 7 | Service animaux : 24 Rue de Dompierre, 17000 La Rochelle | 46.163895 | 1.137597 |
| 8 | Gare de la rochelle : Place Pierre Sémard, 17000 La Rochelle | 46.152542 | -1.146492 |

Tableau A6-4 : Détails du chronométrage des différents temps par tournée jour 1 Berlingo

| Jour 1 : 30/05/17 | | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| | Client 1 | Client 2 | Client 3 | Client 4 | Client 5 | Client 6 | Client 7 | Client 8 | |
| Temps trajet : | 00:07:00 | 00:01:46 | 00:02:20 | 00:00:54 | 00:04:39 | 00:04:29 | 00:03:24 | 00:08:00 | |
| Temps de parking : | 00:01:00 | 00:00:42 | 00:00:32 | 00:00:23 | 00:01:15 | 00:00:30 | 00:00:38 | 00:00:20 | |
| Temps manip 1 : | 00:01:00 | 00:00:00 | 00:01:18 | 00:03:30 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | | |
| marche aller : | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | | | |
| Remise de marcha : | 00:01:00 | 00:01:19 | 00:01:09 | 00:02:39 | 00:02:03 | 00:02:25 | 00:05:15 | 00:03:58 | |
| Marche retour : | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | | | |
| Temps manip 2 : | | 00:00:00 | 00:05:19 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | | | |
| Nbr Colis: | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | |
| Vitesse calculée du véhicule | 17 | 13,5 | 6 | 11,3 | 16,7 | 12 | 3 | 12,7 | |
| | | | | | | | | | |

Tableau A6-5 : Ordre des tournées entre simulé et observé jour 1 Berlingo

| | Ordre des tournées |
|--------------|---|
| Réel observé | Dépôt --> 1 --> 2 --> 3 --> 4 --> 5 --> 6 --> 7 --> 8 --> Dépôt |
| simulé | Dépôt --> 8 --> 6 --> 7 --> 5 --> 4 --> 1 --> 2 --> 3 --> Dépôt |

Jour 2 : 06/06/17

Tableau A6-6 : Liste des clients jour 2 avec un Berlingo

| Clients | Adresse | Longitude | Latitude |
|---------|--|-----------|-----------|
| 1 | CIC ouest : 71 B Av Jean Guiton, 17000 La Rochelle | 46.159776 | -1.166324 |
| 2 | Gare de la rochelle : Place Pierre Sémand, 17000 La Rochelle | 46.152863 | -1.145964 |
| 3 | Aquarium LR : Quai Louis Prunier, 17000 La Rochelle | 46.153559 | -1.150073 |
| 4 | Hôpital LR : Rue du Docteur Albert Schweitzer, 17000 La Rochelle | 46.157996 | -1.144809 |

Tableau A6-7 : Détails du chronométrage des différents temps par tournée jour 2 Berlingo

| Jour 2 : 06/06/2017 | Client 1 | Client 2 | Client 3 | Client 4 |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Temps trajet : | 00:06:44 | 00:12:02 | 00:02:18 | 00:05:07 |
| Temps de parking : | 00:00:22 | 00:00:40 | 00:00:17 | 00:00:22 |
| Temps manip 1 : | 00:01:02 | 00:00:48 | 00:00:10 | 00:00:22 |
| marche aller : | 00:00:33 | 00:00:30 | 00:00:10 | 00:00:54 |
| Remise de marcha : | 00:01:16 | 00:01:39 | 00:05:02 | 00:04:50 |
| Marche retour : | 00:00:27 | 00:00:22 | 00:00:10 | 00:00:50 |
| Temps manip 2 : | 00:00:04 | 00:00:11 | 00:00:00 | 00:00:14 |
| Nbr Colis: | 3 | 1 | 1 | 2 |
| Vitesse calculée du véhicule (km/h) | 35 | 25 | 14 | 16 |
| Distance parcourue (km) | 4 | 5.1 | 0.55 | 1.4 |

Tableau A6-8 : Ordre des tournées entre simulé et observé jour 2 Berlingo

| | Ordre des tournées |
|--------------|--|
| Réel observé | Dépôt --> 1 --> 2 --> 3--> 4 --> Dépôt |
| simulé | Dépôt --> 2 --> 4 --> 1--> 3 --> Dépôt |

Jour 3 : 07/06/17

Tableau A6-9 : Liste des clients jour 3 avec un Berlingo

| Clients | Adresse | Longitude | latitude |
|---------|---|-----------|-----------|
| 1 | L'optimist : 23 Quai du gabut, 17000 La Rochelle | 46.155889 | -1.149668 |
| 2 | Bistrot de Meme : 33 rue des Dâmes, 17000 La Rochelle | 46.16125 | -1.149113 |
| 3 | Comptoir des sens : 21 Rue bletterie | 46.158915 | -1.151169 |
| 4 | Tour de la chainen cours du Temple, 17000 La Rochelle | 46.156062 | -1.154262 |
| 5 | Tour Saint Nicolas : : rue de l'Armide, 17000 La Rochelle | 46.155818 | -1.152634 |

Tableau A6-10 :Détails du chronométrage des différents temps par tournée jour 3 Berlingo

| Jour 3 : 07/06/17 | Client 1 | Client 2 | Client 3 | Client 4 | Client 5 |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Temps trajet : | 00:02:22 | 00:04:57 | 00:07:36 | 00:06:27 | 00:07:46 |
| Temps de parking : | 00:00:15 | 00:00:25 | 00:00:22 | 00:00:21 | 00:00:35 |
| Temps manip 1 : | 00:02:16 | 00:01:28 | 00:01:22 | 00:02:51 | 00:02:00 |
| marche aller : | 00:00:50 | 00:00:38 | 00:01:02 | 00:00:11 | 00:01:30 |
| Remise de marcha : | 00:01:40 | 00:03:00 | 00:02:40 | 00:01:03 | 00:03:20 |
| Marche retour : | 00:00:48 | 00:00:30 | 00:00:38 | 00:00:11 | 00:01:30 |
| Temps manip 2 : | 00:00:20 | 00:00:00 | 00:00:12 | 00:01:02 | 00:00:11 |
| Nbr Colis: | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 |
| Vitesse calculée du véhicule (km/h) | 32 | 18 | 8 | 10 | 16 |
| Distance parcourue (km) | 1.2 | 1.4 | 1 | 1 | 2 |

Tableau A6-11 : Ordre des tournées entre simulé et observé jour 3 Berlingo

| | Ordre des tournées |
|--------------|---|
| Réel observé | Dépôt --> 1 --> 2 --> 3 --> 4 --> 5 --> Dépôt |
| simulé | Dépôt --> 1 --> 5 --> 3 --> 4 --> 2 --> Dépôt |

Jour 4 : 08/06/17

Tableau A6-12 : Liste des clients jour 4 avec un Berlingo

| Clients | Adresse | Longitude | latitude |
|---------|---|-----------|-----------|
| 1 | 25 rue Aristide Briand, 17000 La Rochelle | 46.164433 | -1.164811 |
| 2 | 69 av des Guiardes, 17000 La Rochelle | 46.171208 | -1.182456 |
| 3 | 6 rue Albert 1er CFDT, 17000 La Rochelle | 46.163355 | -1.152094 |
| 4 | 10 Rue Saint Yon, 17000 La Rochelle | 46.160158 | -1.151218 |
| 5 | Tout pour la musique : 22 rue Fleurion, 17000 La Rochelle | 46.161596 | -1.152669 |
| 6 | Arthure : 24 rue des merciers, 17000 La Rochelle | 46.160240 | -1.150347 |
| 7 | Mairie LR : 17 rue Frederic Mistral, 17000 La Rochelle | 46.159845 | -1.151234 |
| 8 | Institut Matille 22 Rue de l'ouvrage, 17000 La Rochelle | 46.154788 | -1.145054 |
| 9 | 17 rue Mistral, 17000 La Rochelle | 46.168440 | -1.137538 |

Tableau A6-13 : Détails du chronométrage des différents temps par tournée jour 4 Berlingo

| Jour 4 : 08/06/17 | Client 1 | Client 2 | Client 3 | Client 4 | Client 5 | Client 6 | Client 7 | Client 8 | Client 9 |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Temps trajet : | 00:13:09 | 00:05:52 | 00:14:15 | 00:03:46 | 00:07:43 | 00:02:04 | 00:03:12 | 00:06:31 | 00:03:29 |
| Temps de parking : | 00:00:15 | 00:00:08 | 00:00:14 | 00:01:30 | 00:00:46 | 00:00:07 | 00:01:22 | 00:00:15 | 00:00:17 |
| Temps manip 1 : | 00:01:53 | 00:00:30 | 00:01:59 | 00:02:25 | 00:00:34 | 00:01:17 | 00:01:00 | 00:01:01 | 00:00:13 |
| Marche aller : | 00:00:09 | 00:00:10 | 00:01:17 | 00:01:09 | 00:00:04 | 00:00:50 | 00:00:55 | 00:00:40 | 00:00:38 |
| Remise de marche : | 00:02:13 | 00:03:20 | 00:05:59 | 00:06:30 | 00:00:50 | 00:01:10 | 00:01:20 | 00:01:42 | 00:02:33 |
| Marche retour : | 00:00:10 | 00:00:12 | 00:01:18 | 00:00:15 | 00:00:03 | 00:00:25 | 00:00:38 | 00:00:00 | 00:00:20 |
| Temps manip 2 : | 00:00:27 | 00:00:25 | 00:00:17 | 00:00:15 | 00:00:09 | 00:00:16 | 00:00:36 | 00:00:00 | 00:00:05 |
| Nbr Colis: | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Vitesse calculée du véhicule (km/h) | 24 | 26 | 15 | 12 | 10 | 13 | 4 | 15 | 44 |
| Distance parcourue (km) | 5.3 | 2.4 | 3.5 | 0.7 | 1.3 | 0.45 | 0.2 | 1.6 | 2.4 |

Tableau A6-14 : Ordre des tournées entre simulé et observé jour 4 Berlingo

| | Ordre des tournées |
|--------------|---|
| Réel observé | Dépôt --> 1 --> 2 --> 3 --> 4 --> 5 --> 6 --> 7 --> 8 --> 9 --> Dépôt |
| simulé | Dépôt --> 9 --> 2 --> 1 --> 3 --> 5 --> 4 --> 7 --> 6 --> 8 --> Dépôt |

b) Observations 3,5 T

Jour 1 : 31/05/17

Tableau A6-15 : Liste des clients jour 1 avec un 3,5 T

| Clients | Adresse | Longitude | latitude |
|---------|--|-----------|-----------|
| 1 | Clinique vétérinaire 18 rue Dompierre, 17000 La Rochelle | 46.163653 | -1.138126 |
| 2 | CIC ouest : 9 Bis rue François Giroud, 17000 La Rochelle | 46.170286 | -1.121916 |
| 3 | Pharmacie de la mer : 163 BD André Sautel, 17000 La Rochelle | 46.170846 | -1.125073 |
| 4 | Carrefour Market 99 BD Cognotors, 17000 La Rochelle | 46.167832 | -1.139033 |
| 5 | Maison Marin Bistrot : 103 Avenue du 11 Novembre 1918, 17000 La Rochelle | 46.176703 | -1.151551 |
| 6 | 79 av de cordeliers Jean-Maison Marin, 17000 La Rochelle | 46.166134 | -1.141800 |
| 7 | Maison funéraire : 27 Rue du Dr Albert Schweitzer, 17000 La Rochelle | 46.158624 | -1.143502 |
| 8 | Veniel : 27 quai Maubec, 17000 La Rochelle | 46.159195 | -1.148571 |
| 9 | Adequat : 150 BD Joffre, 17000 La Rochelle | 46.154786 | -1.145055 |

Tableau A6-16 : Détails du chronométrage des différents temps par tournée jour 1 avec un 3,5 T

| Jour 1 : 31/05/17 | Client 1 | Client 2 | Client 3 | Client 4 | Client 5 | Client 6 | Client 7 | Client 8 | Client 9 |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Temps trajet : | 00:09:50 | 00:04:15 | 00:04:28 | 00:04:36 | 00:06:00 | 00:04:18 | 00:04:13 | 00:02:00 | 00:03:39 |
| Temps de parking : | 00:00:41 | 00:01:04 | 00:01:35 | 00:03:24 | 00:01:38 | 00:04:40 | 00:01:57 | 00:01:00 | 00:01:25 |
| Temps manip 1 : | 00:01:00 | 00:01:05 | 00:02:10 | 00:03:30 | 00:01:46 | 00:02:03 | 00:03:16 | | 00:02:08 |
| marche aller : | 00:01:44 | 00:00:16 | 00:00:12 | 00:00:16 | 00:00:10 | 00:00:10 | | | 00:00:15 |
| Remise de marcha : | 00:01:45 | 00:05:06 | 00:02:40 | 00:02:20 | 00:01:38 | 00:01:53 | 00:02:10 | 00:02:55 | 00:02:52 |
| Marche retour : | | 00:00:16 | 00:00:12 | 00:00:10 | 00:00:10 | 00:00:10 | | | 00:00:13 |
| Temps manip 2 : | | 00:01:00 | 00:01:03 | 00:02:00 | 00:01:00 | 00:00:00 | | | |
| Nbr Colis: | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Vitesse calculée du véhicule (km/h) | 11 | 28 | 8 | 18 | 20 | 26 | 18 | 14 | 15 |
| Distance parcourue (km) | 1.79 | 1.96 | 0.61 | 1.37 | 2.04 | 1.84 | 1.27 | 0.48 | 0.91 |

Tableau A6-17 : Ordre des tournées entre simulé et observé jour 1 avec un 3,5 T

| Ordre des tournées | |
|--------------------|---|
| Réel observé | Dépôt --> 1 --> 2 --> 3 --> 4 --> 5 --> 6 --> 7 --> 8 --> 9 --> Dépôt |
| simulé | Dépôt --> 7 --> 1 --> 2 --> 3 --> 5 --> 4 --> 6 --> 8 --> 9 --> Dépôt |

Jour 2 : 01/06/17

Tableau A6-18 : Liste des clients jour 2 avec un 3,5 T

| Clients | Adresse | Longitude | Latitude |
|---------|--|-----------|-----------|
| 1 | Hôtel Mercure LR : 36 Avenue Amerigo Vespucci, 17000 La Rochelle | 46.153838 | -1.149599 |
| 2 | Cyclomania 23 Quai de Marans, 17000 La Rochelle | 46.155485 | -1.147330 |
| 3 | Lézard créatif 27 bis quai de Maubec, 17000 La Rochelle | 46.159167 | -1.148378 |
| 4 | Bureau vallée 12 rue de Villeneuve, 17000 La Rochelle | 46.160082 | -1.147264 |
| 5 | Animaux services : 24 Rue de Dompierre, 17000 La Rochelle | 46.163911 | -1.137568 |
| 6 | Pharmacie du port-neuf 1 place de l'Île de France, 17000 La Rochelle | 46.158627 | -1.180609 |

Tableau A6-19 : Détails du chronométrage des différents temps par tournée jour 2 avec un 3,5 T

| Jour 2: 01/06/17 | Client 1 | Client 2 | Client 3 | Client 4 | Client 5 | Client 6 |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Temps trajet : | 00:01:08 | 00:01:07 | 00:03:35 | 00:03:32 | 00:04:16 | 00:16:17 |
| Temps de parking : | 00:01:39 | 00:00:11 | 00:00:30 | 00:00:21 | 00:01:11 | 00:01:14 |
| Temps manip 1 : | 00:02:27 | 00:04:01 | 00:03:16 | 00:03:30 | 00:02:19 | 00:01:47 |
| marche aller : | 00:00:20 | 00:00:50 | 00:01:17 | 00:00:07 | 00:00:13 | 00:00:57 |
| Remise de marcha : | 00:02:45 | 00:01:18 | 00:01:55 | 00:01:38 | 00:01:10 | 00:02:09 |
| Marche retour : | 00:00:15 | 00:00:28 | 00:00:25 | 00:00:03 | 00:00:10 | 00:00:43 |
| Temps manip 2 : | 00:01:19 | 00:01:58 | 00:02:17 | 00:00:35 | 00:01:05 | 00:01:05 |
| Nbr Colis: | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| Vitesse calculée du véhicule (km/h) | 12 | 25 | 16 | 4 | 15 | 18 |
| Distance parcourue (km) | 0.22 | 0.46 | 0.97 | 0.23 | 1.06 | 4.97 |

Tableau A6-20 : Ordre des tournées entre simulé et observé jour 2 avec un 3,5 T

| | Ordre des tournées |
|--------------|---|
| Réel observé | Dépôt --> 1 --> 2 --> 3 --> 4 --> 5 --> 6 --> Dépôt |
| simulé | Dépôt --> 5 --> 3 --> 4 --> 6 --> 2 --> 1 --> Dépôt |

Jour 3 : 02/06/17

Tableau A6-21 : Liste des clients jour 3 avec un 3,5 T

| Clients | Adresse | Longitude | Latitude |
|---------|---|-----------|-----------|
| 1 | Formule : 10 rue de Hôtel de ville, 17000 La Rochelle | 46.159256 | -1.151717 |
| 2 | Basilico : 41 rue du palet, 17000 La Rochelle | 46.159052 | 1.153777 |
| 3 | le piment bleu : 12 Gargoulem, 17000 La Rochelle | 46.161925 | -1.150821 |
| 4 | Boutique Lacoste rue des Merciers | 46.161124 | -1.149899 |
| 5 | Stéphane coiffure : Rue Thiers, 17000 La Rochelle | 46.161384 | -1.148419 |
| 6 | 16 rue billetterie, 17000 La Rochelle | 46.159112 | -1.150881 |

Tableau A6-22 : Détails du chronométrage des différents temps par tournée jour 3 avec un 3,5 T

| Jour 3 : 02/06/17 | Client 1 | Client 2 | Client 3 | Client 4 | Client 5 | Client 6 |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Temps trajet : | 00:05:24 | 00:02:07 | 00:02:17 | 00:02:23 | 00:01:58 | 00:03:47 |
| Temps de parking : | 00:04:17 | 00:01:07 | 00:00:57 | 00:01:30 | 00:01:22 | 00:01:00 |
| Temps manip 1 : | 00:00:44 | 00:01:57 | 00:00:52 | 00:00:30 | 00:01:49 | 00:01:57 |
| marche aller : | 00:01:01 | 00:01:01 | 00:00:32 | 00:00:20 | 00:00:34 | 00:01:18 |
| Remise de marcha : | 00:02:32 | 00:02:07 | 00:07:39 | 00:02:31 | 00:03:32 | 00:03:04 |
| Marche retour : | 00:00:35 | 00:00:40 | 00:00:25 | 00:00:20 | 00:00:20 | 00:00:37 |
| Temps manip 2 : | 00:00:35 | 00:01:03 | 00:01:22 | 00:00:35 | 00:01:01 | 00:01:17 |
| Nbr Colis: | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Vitesse calculée du véhicule (km/h) | 29 | 18 | 32 | 8 | 5 | 6 |
| Distance parcourue (km) | 2.62 | 0.63 | 1.22 | 0.34 | 0.16 | 0.39 |

Tableau A6-23 : Ordre des tournées entre simulé et observé jour 3 avec un 3,5 T

| | Ordre des tournées |
|--------------|---|
| Réel observé | Dépôt --> 1 --> 2 --> 3 --> 4 --> 5 --> 6 --> Dépôt |
| simulé | Dépôt --> 6 --> 2 --> 3 --> 1 --> 4 --> 5 --> Dépôt |

Jour 4 : 06/06/17

Tableau A6-24 : Liste des clients jour 4 avec un 3,5 T

| Clients | Adresse | Longitude | latitude |
|---------|---|-----------|-----------|
| 1 | Intermarché rue de château, 17000 La Rochelle | 46.174719 | -1.145678 |
| 2 | CHU : rue du capitaine Schweitzer, 17000 La Rochelle | 46.159843 | -1.141291 |
| 3 | La via Brasil : 3 place de la chaîne, 17000 La Rochelle | 46.155827 | -1.154453 |
| 4 | Cabane inter îles : quai des dames, 17000 La Rochelle | 46.156868 | -1.153782 |
| 5 | BioMonde : 10 rue des quatre fages, 17000 La Rochelle | 46.162742 | -1.181941 |
| 6 | Caisse de crédit mutuelle 27 / 29 Bvd Joffre, 17000 La Rochelle | 46.159986 | -1.140706 |

Tableau A6-25 : Détails du chronométrage des différents temps par tournée jour 4 avec un 3,5 T

| Jour 4 : 06/06/17 | Client 1 | Client 2 | Client 3 | Client 4 | Client 5 | Client 6 |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Temps trajet : | 00:05:40 | 00:07:54 | 00:08:33 | 00:00:26 | 00:06:32 | 00:14:55 |
| Temps de parking : | 00:01:02 | 00:01:13 | 00:03:28 | 00:00:46 | 00:01:00 | 00:00:57 |
| Temps manip 1 : | 00:01:41 | 00:04:24 | 00:02:53 | 00:01:06 | 00:01:11 | 00:02:15 |
| marche aller : | 00:00:18 | 00:00:24 | 00:00:38 | 00:00:30 | 00:00:10 | 00:00:18 |
| Remise de marcha : | 00:02:25 | 00:03:31 | 00:01:18 | 00:05:04 | 00:01:00 | 00:06:00 |
| Marche retour : | 00:00:13 | 00:00:27 | 00:00:24 | 00:00:39 | 00:00:10 | 00:00:10 |
| Temps manip 2 : | 00:00:29 | 00:00:26 | 00:01:08 | 00:01:00 | 00:00:44 | 00:01:02 |
| Nbr Colis: | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| Vitesse calculée du véhicule (km/h) | 40 | 19 | 18 | 31 | 24 | 17 |
| Distance parcourue (km) | 3.79 | 2.54 | 2.61 | 1.27 | 2.63 | 4.21 |

Tableau A6-26 : Ordre des tournées entre simulé et observé jour 4 avec un 3,5 T

| | Ordre des tournées |
|--------------|---|
| Réel observé | Dépôt --> 1 --> 2 --> 3 --> 4 --> 5 --> 6 --> Dépôt |
| simulé | Dépôt --> 6 --> 4 --> 5 --> 3 --> 1 --> 2 --> Dépôt |

6.Bibliographie

Abdelhaï Laila Approche systémique du CDU : Définition du Business Model, aide à la localisation et au pilotage [Ouvrage]. - La Rochelle : [s.n.], 2017.

Allen Julian, Stephen Anderson et Michael Browne Best practice handbook year 3: road pricing and urban freight transport, and urban freight platforms. [Revue]. - [s.l.] : Technical report, BESTUFS, 2002.

Alonso Federico, M. J. Alvarez et John E. Beasley A tabu search algorithm for the periodic vehicle routing problem with multiple vehicle trips and accessibility restrictions. [Revue]. - [s.l.] : Journal of the Operational Research Society 59.7, 2008. - pp. 963-976.

Augenstein Karoline Analysing the potential for sustainable e-mobility - the case of Germany [Revue] // Environmental Innovation and Societal Transitions. - 2015. - pp. 101-105.

Azi Nabila, Gendreau Michel et Potvin Jean-Yves An exact algorithm for a single-vehicle routing problem with time windows and multiple routes. [Revue]. - [s.l.] : European journal of operational research 178.3, 2007. - pp. 755-766.

Azi Nabila, Michel Gendreau et Jean-Yves Potvin An exact algorithm for a single-vehicle routing problem with time windows and multiple routes. [Revue]. - [s.l.] : European journal of operational research 178.3, 2007. - pp. 755-766.

Azi Nabila, Michel Gendreau et Jean-Yves Potvin An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. [Revue]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research 202.3, 2010. - pp. 756-763.

Baldacci Roberto [et al.] An exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. [Revue]. - [s.l.] : Operations Research 61.2, 2013. - pp. 298-314.

Battarra Maria, Michele Monaci et Daniele Vigo An adaptive guidance approach for the heuristic solution of a minimum multiple trip vehicle routing problem. [Revue]. - [s.l.] : Computers & Operations Research 36.11, 2009. - pp. 3041-3050.

Belmecheri Farah [et al.] Particle swarm optimization algorithm for a vehicle routing problem with heterogeneous fleet, mixed backhauls, and time window [Revue] // Journal of Intelligent Manufacturing. - Juillet 2012. - pp. 775-789.

Ben Mohamed Imen [et al.] Modelling and solution approaches for the interconnected city logistics [Revue]. - [s.l.] : International Journal of Production Research, 16 01 2017. - 9,2017 : Vol. 55. - pp. 2664-2684.

Bodin L et Golden B Classification in vehicle routing problem and scheduling [Revue] // Networks, 11(2) . - 1981. - pp. 97-108.

Boudouin Daniel et Morel Christian Logistique urbaine. L'optimisation de la circulation des biens et services en ville [Ouvrage]. - Paris : La documentation française, 2002.

Boudouin Daniel Le guide des espaces logistiques urbains (ELU) [Ouvrage]. - Paris : Logistique et transport de marchandises, 2009.

Boudouin Daniel Les espaces logistiques urbains. Guide méthodologique [Ouvrage]. - Paris : La documentation Française, 2006. - p. 112p.

Boudouin Daniel Mise en oeuvre des espaces logistiques urbains, Guide méthodologique. [Ouvrage]. - Paris : La Documentation Française., 2006. - p. 112.

Bouquin H. La notion de performance. [Rapport]. - [s.l.] : Journée d'étude IAE de Tours 15.1 , 2004.

Bourguignon Annick Performance et contrôle de gestion. [Ouvrage]. - 2000.

Bourguignon Laurence Le Moustérien de type Quina: nouvelles définitions d'une entité technique. [Ouvrage]. - [s.l.] : Diss. Paris 10, 1997.

Brandao J. C. S. et Alan Mercer The multi-trip vehicle routing problem. [Revue]. - [s.l.] : Journal of the Operational research society, 1998. - pp. 799-805.

Brandao Jose et Alan Mercer A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. [Revue]. - [s.l.] : European journal of operational research 100.1, 1997. - pp. 180-191.

Cattaruzza Diego [et al.] A memetic algorithm for the multi trip vehicle routing problem. [Revue]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research 236.3, 2014. - pp. 833-848.

Cattaruzza Diego [et al.] Vehicle routing problems for city logistics [Revue]. - [s.l.] : EURO Journal on Transportation and Logistics, 2015. - pp. 1-29.

Cattaruzza Diego, Absi Nabil et Feillet Dominique The multi-trip vehicle routing problem with time windows and release dates. [Revue]. - [s.l.] : Transportation Science 50.2, 2016. - pp. 676-693.

CGDD Les véhicules électriques en perspective Analyse coûts-avantages et demande potentielle [Rapport]. - [s.l.] : Commissariat général au développement durable, 2011.

Chiron-Augereau Virginie Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine, quels rôles pour un opérateur de transports publics urbain? : l'exemple de la RATP [Ouvrage]. - Université Paris-Est : <NNT : 2009PEST1071>. <tel-00504960v2>, 2009. - <NNT : 2009PEST1071>.

Commission-Européenne A sustainable future for transport: Towards an integrated, technology-led and user friendly system. Technical Report [<http://ec.europa.eu>]. - [s.l.] : COM(2009) 279, 2009.

Cordeau Jean Fronçois [et al.] The VRP with Time Windows [Revue] // Les Cahiers du GERAD. - Montreal : [s.n.], 2000. - pp. 99-13.

Cornillier Fabien, Laporte Gilbert et Boctor Fayed, et al. The petrol station replenishment problem with time windows. [Revue]. - [s.l.] : Computers & Operations Research 36.3, 2009. - pp. 919-935.

Crainic T.G. [et al.] Two-Echelon Vehicle Routing Problem: A satellite location analysis [Revue]. - [s.l.] : Procedia -Social and Behavioral Sciences Issue 3, 2010. - 5944-5955 : Vol. 2.

Crainic Teodor [et al.] A grasp with path-relinking metaheuristic for the two-echelon vehicle routing problem. [Revue]. - 2011. - pp. 1-7.

Crainic Teodor Gabriel [et al.] Integrating c2e and c2c traffic into city logistics planning. [Revue]. - [s.l.] : Procedia-social and behavioral sciences 39, 2012. - pp. 47-60.

Crainic Teodor Gabriel [et al.] Two-echelon vehicle routing problem: a satellite location analysis [Revue] // Procedia-Social and Behavioral Sciences. - 2010. - pp. p. 5944-5955..

Crainic Teodor Gabriel et Yuvraj Gajpal, Michel, Gendreau Multi-zone multi-trip vehicle routing problem with time windows. [Revue]. - [s.l.] : INFOR: Information Systems and Operational Research 53.2, 2015. - pp. 49-67.

Crainic Teodor Gabriel, Mancini Simona et Perboli Guido, et al. Clustering-based heuristics for the two-echelon vehicle routing problem. [Revue]. - Montreal, Canada : Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks. Logistics and Transportation 17, 2008. - Vol. 26.

Crainic Teodor Gabriel, Nicoletta Ricciardi et Storchi Giovanni Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems [Revue] // Transportation science 43(4). - 2009. - pp. 432-452.

Cucu Graindorge Tatiana Contribution à une méthodologie d'évaluation à priori des projets de transport urbain durable. Diss. [Ouvrage]. - Bordeaux : [s.n.], 2012..

Cuda R., Guastaroba G et Speranza M.G. A survey on two-echelon routing problems, [Revue]. - [s.l.] : Computers & Operations Research, 2015. - 185-199 : Vol. 55.

Dablanc Laetitia et Dina Rakotonarivo The impacts of logistics sprawl: How does the location of parcel transport terminals affect the energy efficiency of goods' movements in Paris and what can we do about it? [Revue]. - [s.l.] : Procedia-Social and Behavioral Sciences 2.3, 2010. - 6087-6096.

Dablanc Laetitia Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. [Revue]. - [s.l.] : Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2007. - Vol. 41.3. - pp. 280-285.

Danloup N., Allaoui A. et Goncalves G. A comparison of two meta-heuristics for the pickup and delivery problem with transshipment, [Revue]. - [s.l.] : Computers & Operations Research, Available online 20 July 2018. - <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.07.013>.

Dantzig G B et Ramser J H the truck dispatching problem [Revue] // Operation research . - 1959. - pp. 12:81-91.

Dantzig George B et Ramser John H The truck dispatching problem. [Revue]. - [s.l.] : Management science, 1959. - 80-91 : Vol. 6.

Delaître Loïc Méthodologie pour optimiser le transport de marchandises en ville : application aux villes moyennes et dans le cadre de l'agglomération de La Rochelle [Rapport]. - [s.l.] : École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.

Derigs U [et al.] Vehicule Routing with compartments : applications , modeling and heuristics [Revue] // OR spectrum 33 (4). - 2011. - pp. 885-914.

Desrochers M, Lenstra J K et Savelsbergh M W P A classification schema for vehicle routing and scheduling problems [Revue] // European Journal of Research. - 1990. - pp. 322-332.

DGITM - Direction Générale des Infrastructures des transport et de la Mer La Logistique Urbaine [Rapport]. - [s.l.] : LUMD, projet de recherche, 2010.

Donati Alberto V. [et al.] Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system. [Revue]. - [s.l.] : European journal of operational research 185.3, 2008. - pp. 1174-1191.

Drexel M. et Schneider M. A survey of variants and extensions of the location-routing problem, Issue 2 [Revue]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research, 2015. - 283-308 : Vol. 241.

Dror Moshe ed Arc routing: theory, solutions and applications. [Ouvrage]. - [s.l.] : Springer Science & Business Media, 2012.

Ducq Yves et Bruno Vallespir Definition and aggregation of a performance measurement system in three aeronautical workshops using the ECOGRAI method. [Revue]. - [s.l.] : Production Planning & Control 16.2, 2005. - pp. 163-177.

Durand Bruno et Gonzalez-Feliu Jesus Urban logistics and e-grocery: have proximity delivery services a positive impact on shopping trips? [Revue]. - [s.l.] : Procedia-Social and Behavioral Sciences 39, 2012. - 510-520.

Ehmke Jan Analysis of floating car data. Integration of information and optimization models for routing in city logistics [Revue] / éd. 59–78. - [s.l.] : International Series in Operations Research & Management Science, 2012. - Vol. 177.

Ehmke Jan Fabian, Steinert André et Mattfeld Dirk Christian Advanced routing for city logistics service providers based on time-dependent travel times [Revue]. - [s.l.] : Journal of computational science 3.4, 2012. - pp. 193-205.

Ehmke Jan Provision of distance matrices. In Integration of Information and Optimization Models for Routing in City Logistics [Revue]. - Springer : International Series in Operations Research & Management Science, 2012. - pp. 83-104.

Ehrler Verena et Hebes Paul Electromobility for city logistics - the solution to urban transport collapse? An alalysis beyond theory [Revue] // Procedia - Social and Behavioral Sciences. - 2012. - pp. 786 – 795.

Ehrler Verena et Hebes Paul Electromobility for city logistics—the solution to urban transport collapse? an analysis beyond theory [Revue]. - [s.l.] : Procedia-Social and Behavioral Sciences 48, 2012. - pp. 786-795.

Eksioglu Burak, Volkan Arif Vural et Reisman Arnold The vehicle routing problem : A taxonomic review [Revue] // Computers & Industrial Engineering. - 2009. - pp. 1472-1483.

El Fallhi Abdellah, Prins Christian et Wolfler Calvo Roberto A memetic algorithm and a tabu search for the multi-compartments vehicle routing problem [Revue] // Computers & Operational research. - 2008. - pp. 1725-1741.

Figliozzi Miguel et Tipagornwong Chawalit Impact of last mile parking availability on commercial vehicle costs and operations [Revue] // Supply Chain Forum: An International Journal. - 2017. - Vol. Vol. 18 , Iss. 2,2017.

Fleischmann Bernhard The vehicle routing problem with multiple use of vehicles. [Rapport]. - Fachbereich Wirtschaftswissenschaften : Technical report, Universität Hamburg, 1990.

Fleischmann Bernhard, Martin Gietz et Stefan Gnutzmann Time-varying travel times in vehicle routing [Revue]. - [s.l.] : Transportation science 38.2, 2004. - pp. 160-173.

Fleischmann Bernhard, Stefan Gnutzmann et Elke Sandvoß Dynamic vehicle routing based on online traffic information. [Revue]. - [s.l.] : Transportation science 38.4, 2004. - pp. 420-433.

Fournier Laurent Autonomie de mobilité vers une électromobilité partagée [Ouvrage]. - [s.l.] : hal-01321021, 2016.

Francis P. et Smilowitz K. Modeling techniques for periodic vehicle routing problems [Revue]. - [s.l.] : Transportation Research Part B: Methodological, Issue 10, 2006. - 872-884 : Vol. 40.

Gajpal Yuvraj et Abad P.L Multi-ant colony system (MACS) for a vehicle routing problem with backhauls [Revue] // European Journal for Operational Research. - Juillet 2009. - ISSN 03772217. - pp. 102-117.

Gendreau Michel [et al.] Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching. [Revue]. - [s.l.] : Transportation science 33.4, 1999. - pp. 381-390.

Gendreau Michel, Gilbert Laporte et René Séguin A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with stochastic demands and customers. [Revue]. - [s.l.] : Operations Research 44.3, 1996. - pp. 469-477.

Ghiani Gianpaolo [et al.] Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. [Revue]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research 151.1, 2003. - pp. 1-11.

Golden Bruce L. [et al.] The vehicle routing problem: latest advances and new challenges. [Ouvrage]. - [s.l.] : Springer Science & Business Media, 2008. - Vol. 43.

Golden Bruce L. [et al.] The vehicle routing problem: latest advances and new challenges. [Ouvrage]. - [s.l.] : Springer Science & Business Media, 2008. - Vol. 43 .

Gonzalez-Feliu Jesus [et al.] D'éveloppement des espaces logistiques urbains. CDU et ELP dans l'europe du sud-ouest [Revue]. - [s.l.] : HAL Id: halshs-00862009, 2013.

Gonzalez-Feliu Jesus [et al.] Développement des espaces logistiques urbains. CDU et ELP dans l'europe du su-ouest [Revue] // Hal. - 2013.

Gonzalez-Feliu Jesus, Florence Toilier et Jean-Louis Routhier End consumer goods movement generation in French medium urban areas. [Revue]. - [s.l.] : Procedia-Social and Behavioral Sciences 2.3, 2010. - pp. 6189-6204.

Goupy Jacques et Lee Creighton Introduction aux plans d'expériences-3ème édition-Livre+ CD-Rom. Dunod [Ouvrage]. - 2006..

Grauers Andres, Sarasini Steven et Magnus Karström Why electromobility and what is it? [Rapport]. - 2013.

Gribkovskaia Irina [et al.] Optimization model for a livestock collection problem. [Revue]. - [s.l.] : International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 36.2, 2006. - pp. 136-152.

Grzybowska Hanna et Jaume Barceló Decision support system for real-time urban freight management. [Revue]. - [s.l.] : Procedia-Social and Behavioral Sciences 39, 2012. - pp. 712-725.

Güner Ali R., Alper Murat et Ratna Babu Chinnam Dynamic routing under recurrent and non-recurrent congestion using real-time ITS information. [Revue]. - [s.l.] : Computers & Operations Research 39.2, 2012. - pp. 358-373.

Gutin Gregory et Abraham P. Punnen The traveling salesman problem and its variations. [Ouvrage]. - [s.l.] : Springer Science & Business Media, 2006. - Vol. 12.

Hashimoto Hideki, Mutsunori Yagiura et Toshihide Ibaraki An iterated local search algorithm for the time-dependent vehicle routing problem with time windows. [Revue]. - [s.l.] : Discrete Optimization 5.2, 2008. - pp. 434-456.

Hasle Geir, Knut-Andreas Lie et Ewald Quak Geometric Modelling, Numerical Simulation, and Optimization. [Ouvrage]. - Heidelberg : Operations Research Computer Science Interfaces. Springer, 2007.

Hemmelmayr Vera C., Jean-François Cordeau et Teodor Gabriel Crainic An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics. [Revue]. - [s.l.] : Computers & operations research 39.12, 2012. - pp. 3215-3228.

Hernandez Florent [et al.] A new exact algorithm to solve the multi-trip vehicle routing problem with time windows and limited duration. [Revue]. - [s.l.] : 4OR 12.3, 2014. - pp. 235-259.

Hill Arthur V. et Benton W. C. Modelling intra-city time-dependent travel speeds for vehicle scheduling problems [Revue]. - [s.l.] : Journal of the Operational Research Society, 1992. - pp. 343-351.

Ho William [et al.] A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem [Revue] // Engineering applications of Artificial Intelligence. - 2008. - pp. 548-557.

Ichoua Soumia, Gendreau Michel et Potvin Jean-Yves Vehicle dispatching with time-dependent travel times. [Revue]. - [s.l.] : European journal of operational research 144.2, 2003. - pp. 379-396.

Ichoua Soumia, Michel Gendreau et Jean-Yves Potvin Diversion issues in real-time vehicle dispatching. [Revue]. - [s.l.] : Transportation Science 34.4, 2000. - pp. 426-438.

Irlich Stefan A unified modeling and solution framework for vehicle routing and local search-based metaheuristics. [Revue]. - [s.l.] : INFORMS Journal on Computing 20.2, 2008. - pp. 270-287.

Jean-Pierre Nicolas, Pascal Pochet et Poimboeuf Hélène Mobilité urbaine et développement durable : quels outils de mesure pour quels enjeux ? [Revue] // Les Cahiers scientifiques du transport. - 2002. - pp. 53-76.

Jepsen Mads, Simon Spoorendonk et Stefan Ropke A branch-and-cut algorithm for the symmetric two-echelon capacitated vehicle routing problem. [Revue]. - [s.l.] : Transportation Science 47.1, 2013. - pp. 23-37.

Jourdan Astride Approche séquentielle du krigage. Présentation séminaire « plans d'expériences numériques » [Revue] // Ecole Nationale des Mines. - Saint Etienne : [s.n.], 2003.

Karakatic S. et Podgorelec V A survey of genetic algorithms for solving multi depot vehicle routing problem [Revue]. - [s.l.] : Applied Soft Computing, 2015. - 519-532 : Vol. 27.

Kim Seongmoon, Mark E. Lewis et Chelsea C. White Optimal vehicle routing with real-time traffic information. [Revue]. - [s.l.] : IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 6.2, 2005. - pp. 178-188.

Kok Adrianus Leendert, E. W. Hans et J. M. J. Schutten Vehicle routing under time-dependent travel times: the impact of congestion avoidance. [Revue]. - [s.l.] : Computers & operations research 39.5, 2012. - pp. 910-918.

Koning Martin Essais sur la congestion dans les transports à Paris, THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR EN SCIENCES ÉCONOMIQUES [Ouvrage]. - UNIVERSITÉ DE PARIS I - PANTHÉON SORBONNE : [s.n.], 2011.

Kuo Yiyo Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem. [Revue]. - [s.l.] : Computers & Industrial Engineering 59.1, 2010. - pp. 157-165.

Kuo Yiyo, Wang Chi-Chang et Pei-Ying Chuang Optimizing goods assignment and the vehicle routing problem with time-dependent travel speeds [Revue]. - [s.l.] : Computers & Industrial Engineering 57.4, 2009. - pp. 1385-1392.

Labadi Nacima, Prins Christian et Reghioui Mohamed A memetic algorithm for the vehicule routing problem with time windows [Revue] // Operations research. - 2008. - pp. 415,431.

Lanny Pierre et Ramadier Thierry L mobilité généralisée : formes et valeurs de la mobilité quotidienne [Revue] // Louvain-la-Neuve : Academia Bruylants. - 2007.

Le Moigne Jean-Louis La modélisation des systèmes complexes. [Revue]. - [s.l.] : Paris: Bordas, Dunot, 1990.

Le-Livre-Blanc Le Livre Blanc de la logistique urbaine [Ouvrage]. - [s.l.] : Afilog, 2012.

Lesteven Gaele Les stratégies d'adaptation à la congestion automobile dans les grandes métropoles: analyse à partir des cas de Paris, São Paulo et Mumbai. [Revue]. - [s.l.] : Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia 15, 2012.

Li C.L, Simchi-Lev D et Desrochers M On the distance constrained vehicle routing problem [Revue] // Operations Research. - 1992. - pp. 790-799.

Li Xiangyong, Pen Tian et Stephen CH Leung Vehicle routing problems with time windows and stochastic travel and service times: Models and algorithm [Revue]. - [s.l.] : International Journal of Production Economics 125.1, 2010. - pp. 137-145.

Lorino A. M. [et al.] Respiratory resistive impedance in obstructive patients: linear regression analysis vs viscoelastic modelling. [Revue]. - [s.l.] : European Respiratory Journal 10.1, 1997. - pp. 150-155.

Louvet François et Déplanque Luc Design of Experiments: the French touch [Ouvrage]. - [s.l.] : Expérimentique, 2005 .

MacDougall William, Communications Marketing & et Invest Germany Trade & Electromobility in Germany : Vision 2020 and Beyond [Ouvrage]. - Berlin : [s.n.], 2013.

Macedo Rita [et al.] Solving the vehicle routing problem with time windows and multiple routes exactly using a pseudo-polynomial model. [Revue]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research 214.3, 2011. - pp. 536-545.

Maden Will, Eglese Richard et Black Dan Vehicle routing and scheduling with time-varying data: A case study [Revue]. - [s.l.] : Journal of the Operational Research Society 61.3, 2010. - pp. 515-522.

Malandraki Chryssi et Daskin Mark S Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms. [Revue]. - [s.l.] : Transportation science 26.3, 1992. - pp. 185-200.

Malhéné Nicolas et Dominique Breuil Conceptualization of the evolution process of Urban Freight Transport. [Revue]. - [s.l.] : Proceedings of the 3rd International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain Creating value through green supply chains ILS., 2010.

Marmuse Christian Le diagnostic stratégique: une démarche de construction de sens. [Revue]. - [s.l.] : Finance Contrôle Stratégie 2.4, 1999. - pp. 77-104.

Min Hokey The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points [Revue] // Transportation Research Part A. - 1989. - pp. 503-511.

Mingozzi Aristide, Roberto Roberti et Paolo Toth An exact algorithm for the multiroute vehicle routing problem. [Revue]. - [s.l.] : INFORMS Journal on Computing 25.2, 2013. - pp. 193-207.

Miranda Douglas Moura et Samuel Vieira Conceição The vehicle routing problem with hard time windows and stochastic travel and service time. [Revue]. - [s.l.] : Expert Systems with Applications 64, 2016. - pp. 104-116.

Moutot Jean-Michel et Ganael Bascoul Effects of sales force automation use on sales force activities and customer relationship management processes. [Revue]. - [s.l.] : Journal of Personal Selling & Sales Management 28.2, 2008. - pp. 167-184.

Nagata Yuichi et Bräsy Olli A powerful route minimization heuristic for the vehicle routing problem with time window. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167637709000662> [Revue] // Operations Research Letters. - Septembre 2009. - pp. 333,338.

Nguyen Phuong Khanh [et al.] A tabu search for time-dependent multi-zone multi-trip vehicle routing problem with time windows. [Revue]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research 231.1, 2013. - pp. 43-56.

Nguyen Viet-Phuong, Christian Prins et Caroline Prodhon Solving the two-echelon location routing problem by a GRASP reinforced by a learning process and path relinking. [Revue]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research 216.1, 2012. - pp. 113-126.

Novoa Clara et Storer Robert An approximate dynamic programming approach for the vehicle routing problem with stochastic demands [Revue] // European Journal of Operational Research. - 2009. - pp. 509-515.

Olivera Alfredo et Omar Viera Adaptive memory programming for the vehicle routing problem with multiple trips. [Revue]. - [s.l.] : Computers & Operations Research 34.1, 2007. - pp. 28-47.

Patier Danièle et Routhier Jean-Louis Une méthode d'enquête du transport de marchandises en ville pour un diagnostic en politiques urbaines [Rapport]. - [s.l.] : Les Cahiers Scientifiques du Transport, (55), pp-11, 2009. - pp. 5-10.

Perbet Frank Modélisation multi-échelle procédurale de scènes animées. [Revue]. - [s.l.] : Diss. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2004.

Perboli Guido, Roberto Tadei et Daniele Vigo The two-echelon capacitated vehicle routing problem: Models and math-based heuristics. [Revue]. - [s.l.] : Transportation Science 45.3, 2011. - pp. 364-380.

Pesqueux Yvon La notion de performance globale. [Ouvrage]. - [s.l.] : La notion de performance globale., 2004.

Petch Russel J. et Said Salhi A multi-phase constructive heuristic for the vehicle routing problem with multiple trips. [Revue]. - [s.l.] : Discrete Applied Mathematics 133.1, 2003. - pp. 69-92.

Pia Alberto et Carlo Filippi A variable neighborhood descent algorithm for a real waste collection problem with mobile depots. [Revue]. - [s.l.] : International Transactions in Operational Research 13.2, 2006. - pp. 125-141.

Pillac Victor [et al.] A review of dynamic vehicle routing problems [Revue] // European Journal of Operations Research. - Février 2013. - pp. 1-11.

Pillet Maurice Les plans d'expériences par la méthode Taguchi [Ouvrage]. - [s.l.] : Maurice Pillet., 2001. - Vol. 1 : p. p. 250.

Potvin Jean-Yves [et al.] Vehicle routing and scheduling with dynamic travel times. [Revue]. - [s.l.] : Computers & Operations Research 33.4, 2006. - pp. 1129-1137.

Prins Christian A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. [Revue]. - [s.l.] : Computers & Operations Research 31.12, 2004. - pp. 1985-2002.

Prodhon C. et Prins C. A survey of recent research on location-routing problems [Revue]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research, 2014. - 1-17 : Vol. 238.

Psaraftis Harilaos N Dynamic vehicle routing: Status and prospects. [Revue]. - [s.l.] : annals of Operations Research 61.1, 1995. - pp. 143-164.

Puchinger Jakob et Raidl Günther R Combining Metaheuristics and Exact Algorithms in Combinatorial Optimization: A Survey and Classification [Revue]. - Las Palmas, Spain : Springer (Ed), 2005. - Vol. LNCS, 3562. - pp. 41-53.

Raimbault Nicolas, Douet Marie et Frément Antoine Les plates-formes logistiques : entre fluidité et fixité. 4 pages, Programme de recherche FLUIDE, Agence Nationale de la Recherche [Revue]. - [s.l.] : INRETS, ERA FRET, 2010.

Raimbault Nicolas, Douet Marie et Frémont Antoine Les plates-formes logistiques : entre fluidité et fixité [Revue] // Agence Nationale de la Recherche, INRETS, ERAFRET. - 2010. - pp. 4-pages.

Rais A., Alvevos F. et Carvalho M.S New mixed integer-programming model for the pickup-and-delivery problem with transshipment [Revue]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research, Issue 3, 2014. - 530-539 : Vol. 235.

Rangeon François La notion d'évaluation. [Ouvrage]. - [s.l.] : Actes du colloque du 17 avril 1992 sur le thème de L'Evaluation dans l'Administration., 1993.

Rodrigue Jean-Paul, Claude Comtois et Brian Slack The geography of transport systems. [Ouvrage]. - [s.l.] : Routledge, 2013.

Routhier Jean-Louis et Florence Toilier FRETURB V3, a policy oriented software of modelling urban goods movement. [Revue]. - [s.l.] : 11th WCTR., 2007.

Routhier Jean-Louis, Dufour Jean-Guy et Patier Danièle Du transport de marchandise en ville à la logistique urbaine [Ouvrage]. - Ed. : Techniques Ingénieur, 2002.

Routhier Jean-Louis, Dufour Jean-Guy et Patier Danièle Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine [Ouvrage]. - [s.l.] : Centre de prospective et de veille scientifique (DRAST), 2002.

Rushton Alan, Phil Croucher et Peter Baker The handbook of logistics and distribution management: Understanding the supply chain. [Revue]. - [s.l.] : Kogan Page Publishers, 2014.

Salomon Marc et Van de Laan Erwin Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal. [Revue]. - [s.l.] : European Journal of Operational Research, 1997. - Vol. 102: 264-278. - pp. 489-498.

Saulquin Jean-Yves et Guillaume Schier Des perceptions managérials aux pratiques RSE: une étude exploratoire. [Revue]. - [s.l.] : Gestion 2000 24.6, 2007.

Schwedes Olivier, Kettener Stefanie et Tiedtke Benjamin E-mobility in Germany: white hope for a sustainable development or fig leaf for particular interests? [Revue] // Environmental Science & Policy. - 2013. - pp. 72-80.

Segalou Erwan, Christian Ambrosini et Jean-Louis Routhier The environmental assessment of urban goods movement. [Revue]. - [s.l.] : Logistics Systems for Sustainable Cities: Proceedings of the 3rd International Conference on City Logistics (Madeira, Portugal, 25–27 June, 2003). Emerald Group Publishing Limited,, 2004. - pp. 207-220.

Shaw Terrel Performance measures of operational effectiveness for highway segments and systems. [Ouvrage]. - [s.l.] : Transportation Research Board, 2003. - Vol. 311.

Soler David, José Albiach et Eulalia Martínez A way to optimally solve a time-dependent vehicle routing problem with time windows. [Revue]. - [s.l.] : Operations Research Letters 37.1, 2009. - pp. 37-42.

Taguchi Genichi et Genichi Taguchi System of experimental design; engineering methods to optimize quality and minimize costs. [Ouvrage]. - [s.l.] : No. 04; QA279, T3., 1987.

Taillard Éric D., Gilbert Laporte et Michel Gendreau Vehicle routeing with multiple use of vehicles. [Revue]. - [s.l.] : Journal of the Operational research society, 1996. - pp. 1065-1070.

Taillard Éric Parallel iterative search methods for vehicle routing problems. [Revue]. - [s.l.] : Networks 23.8, 1993. - pp. 661-673.

Tang Montané Alfredo Fermin et Galvao Roberto Duèguez A tabu search algorithm for the vihicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service [Revue] // Computers & Operations Research. - 2006. - pp. 595-619.

Tarantilis Christos D. et Chris T Kiranoudis Using the vehicle routing problem for the transportation of hazardous materials. [Revue]. - [s.l.] : Operational Research 1.1, 2001. - pp. 67-78.

Toth Paolo et Daniele Vigo The vehicle routing problem, volume 9 of SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications. [Ouvrage]. - [s.l.] : SIAM, Philadelphia, PA, 2002.

Trentini Anna, Gonzalez-Feliu Jesus et Malhéné Nicolas Développement des espaces logistiques urbains : CDU et ELP dans l'Europe du Sud-Ouest [Revue] // <halshs-00818718>. - 2011.

Van Belle J. Valckenaers P., Cattrysse D. Cross-docking: State of the art [Revue]. - [s.l.] : Omega, Issue 6, 2012. - 827-846 : Vol. 30.

Van Belle Jan, Paul Valckenaers et Dirk Cattrysse Cross-docking: State of the art. [Revue]. - [s.l.] : Omega 40.6, 2012. - pp. 827-846.

Van Woensel Tom [et al.] Vehicle routing with dynamic travel times: A queueing approach. [Revue]. - [s.l.] : European journal of operational research 186.3, 2008. - pp. 990-1007.

Vaultier Estelle Vers une mobilité généralisée en Haute-Normandie en 2050 [Rapport]. - [s.l.] : Disponible sur : <http://www.cesdefrance.fr/pdf/10326.pdf>, 2010.

Vidal T [et al.] A Hybrid Genitic Algorithm for multidepot and periodic Vehicule routing Problem [Revue] // Operations Research. - 2012. - pp. 611-624.

Vigier Michel G Pratique des plans d'expériences : méthodologies Taguchi [Ouvrage]. - Condé-sur-Noireau : Les éditions d'organisation, 1991.