

Louvain School of Management

Problème de localisation d'installations : influence de la comptabilisation des coûts de transport

Auteur : Gaylor Deroissart
Promoteur(s) : Professeur Jean-Sébastien Tancrez
Année académique 2018-2019
Master en sciences de gestion (HD)

Problème de localisation d'installations : influence de la comptabilisation des coûts de transport

Gaylor Deroissart

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme
de Master en Sciences de gestion

Louvain School of Management
Université Catholique de Louvain Mons

Promoteur : Prof. Jean-Sébastien Tancrez

Septembre 2019

Résumé

Ce présent travail porte sur la problématique de la localisation d'installations, et tout particulièrement sur l'influence que peut avoir la comptabilisation des coûts de transport. Cette étude s'inscrit donc dans le domaine du supply chain network design et de la recherche opérationnelle.

La première partie de ce travail est consacrée à la présentation de l'état de l'art, afin d'introduire le contexte dans lequel s'enracine ce mémoire. Cela nous a permis d'exposer les différents types de modèles mathématiques utilisés au cours de projets de supply chain network design, visant à déterminer l'emplacement idéal d'installations. Cela nous a ainsi donné l'occasion de porter un regard attentif sur la formulation des coûts de transport employée dans ces différents types de modèles. Nous avons alors constaté que, majoritairement, les frais liés au transport sont exprimés comme étant simplement un coût par unité transportée. Cependant, cette formulation ne permet de pas de tenir compte d'éléments tels que le poids ou la dimension des produits. De plus, une telle formulation émet également l'hypothèse forte que les camions utilisés pour le transport de marchandises sont constamment utilisés au maximum de leur capacité, ce qui est loin d'être le cas en réalité.

Sur base du constat effectué au cours de la revue la littérature scientifique, nous avons proposé, dans la seconde partie du travail, une nouvelle façon de comptabiliser les coûts de transport. Pour ce faire, nous sommes repartis du "Uncapacitated Facility Location Problem", pour lequel nous avons décomposé le terme relatif aux coûts de transport. Nous avons introduit un terme afférent au taux de remplissage des camions, permettant ainsi de se rapprocher davantage de la "réalité".

La troisième partie expose la méthodologie qui a été employée pour réaliser de manière efficace les 1890 expériences numériques. Cette méthodologie met en oeuvre des interactions entre différents programmes afin de minimiser les interventions nécessaires dans l'exécution expériences et des analyses.

Enfin, les résultats sont présentés au sein de la dernière partie et ont mis en lumière l'importance que revêt le taux de remplissage des camions. En effet, lorsque celui-ci varie, nous avons constaté d'importantes variations au sein de la solution optimale, notamment en termes de coûts totaux, d'emplacements et de nombres d'installations ouvertes. L'influence de la capacité des camions, des coûts fixes d'ouverture d'entrepôts et des distances parcourues a également été étudiée.

Mots clés : Localisation, coûts de transport, taux de remplissage, supply chain network design

Remerciements

Je tiens à remercier mes proches et mes amis qui m'auront soutenu et encouragé tout au long de ce mémoire.

Ensuite je remercie également mon promoteur, le Professeur Jean-Sébastien Tancrez, pour le temps qu'il m'a accordé, ses remarques pertinentes et ses précieux conseils, me permettant ainsi de mener à bien ce travail.

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	ii
1 Introduction	1
2 État de l'art	3
2.1 Supply chain	3
2.1.1 Définition de la supply chain	4
2.2 Supply chain management	5
2.2.1 Origine et développement du supply chain management	5
2.2.2 Principe du supply chain management	6
2.2.3 Stratégie et objectifs	7
2.3 Supply chain network design	8
2.3.1 Définition	8
2.3.2 Les étapes d'un projet de supply chain network design	9
2.3.2.1 Définition du projet	9
2.3.2.2 Analyse	9
2.3.2.3 Design des solutions	10
2.3.2.4 Décision de la solution	11
2.3.2.5 Mise en oeuvre	12
2.3.3 Types de modèles utilisés dans le cadre du supply chain network design	12
2.3.3.1 Les modèles analytiques	12
2.3.3.2 Les modèles continus	14
2.3.3.3 Les modèles de type réseau	14

2.3.3.4	Les modèles discrets	14
2.3.3.4.a	Modèles statiques et déterministes	15
2.3.3.4.b	Modèles dynamiques	21
2.3.3.4.c	Modèles stochastiques	21
2.3.4	Zoom sur les coûts de transport	25
3	Présentation du modèle	27
3.1	Uncapacited Facility Location Problem	27
3.2	Décomposition du terme $C_{i,j}$ du <i>UFLP</i>	28
3.3	Motivations de l'extension	29
4	Méthodologie employée	32
4.1	Paramètres du modèle et hypothèses	32
4.2	Réalisation des expériences numériques	34
4.2.1	Excel - Données	34
4.2.2	Fico Xpress IVE	35
4.2.3	Excel - Résultats	36
4.2.4	Octave	37
5	Analyse et discussion des résultats	42
5.1	Analyse de l'évolution du nombre d'entrepôts, de leur localisation et de leur affectation	42
5.1.1	Influence du taux de remplissage	43
5.1.2	Influence de la capacité de chargement des camions	46
5.1.3	Influence des coûts fixes d'ouverture	46
5.1.4	Influence de la taille de la région	46
5.2	Analyse de la variation des coûts opérations, de transports et de stockage	50
5.2.1	Influence du taux de remplissage	50
5.2.2	Influence de la capacité de chargement des camions	52
5.2.3	Influence des coûts fixes d'ouverture	52
5.2.4	Influence de la taille de la région	53
5.2.5	Contribution des coûts de transport	54
5.3	Discussion des résultats et recommandations	55

6 Conclusion et perspectives	58
A Cartes	62
B Analyses hub	66
B.1 Influence de la capacité de chargement	66
B.2 Influence des coûts fixes d'ouverture	69
B.3 Influence de la taille de la carte	72
C Analyses cost	76
C.1 Influence du taux de remplissage	76
C.2 Influence de la capacité de chargement	80

*

Table des figures

2.1	Chaîne logistique directe [1]	4
2.2	Chaîne logistique élargie [1]	5
2.3	Chaîne logistique globale [1]	5
2.4	Étapes d'un projet de supply chain network design [2]	9
2.5	Types de modèles de localisation [3]	12
2.6	Types de modèles discrets [4]	15
3.1	Taux de remplissage moyen de quelques pays européen [5]	30
3.2	Types de modèles de localisation [6]	31
4.1	Méthodologie employée	34
4.2	Localisation des clients	35
4.3	Demande des clients	35
4.4	Coûts fixes d'ouverture f_i	35
4.5	Demande des clients	37
4.6	Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.4	38
4.7	Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.5	38
4.8	Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.6	39
4.9	Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.7	39
4.10	Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.8	40
4.11	Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.9	40
4.12	Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 1	41
5.1	Évolution du nombre d'entrepôts - M200-F3600	43
5.2	Évolution du nombre d'entrepôts - M500-F6200	44

5.3	Évolution du nombre d'entrepôts - M1000-F3600	45
5.4	Évolution du nombre d'entrepôts - M200-T10	47
5.5	Évolution du nombre d'entrepôts - M500-T20	47
5.6	Évolution du nombre d'entrepôts - M1000-T10	48
5.7	Évolution du nombre d'entrepôts - F3600-T10	48
5.8	Évolution du nombre d'entrepôts - F6200-T20	49
5.9	Évolution du nombre d'entrepôts - F8700-T10	49
5.10	Évolution du coût total - M200	51
5.11	Évolution du coût total - M500	51
5.12	Évolution du coût total - M1000	52
5.13	Évolution du coût total - M1000-F3600	53
5.14	Évolution du coût total - M1000-T20	53
5.15	Évolution du coût total - F6200-T20	54
5.16	Évolution des coûts totaux, de transport et d'entrepôts - M200-F3600-T10	55
5.17	Camion à double plancher	57
A.1	M200-F6200-T20	62
A.2	M200-F6200-T20	63
A.3	M200-F6200-T20	63
A.4	M200-F6200-T20	64
A.5	M200-F6200-T20	64
A.6	M200-F620-T200	65
A.7	M200-F6200-T20	65
B.1	Évolution du nombre d'entrepôts - M200-F6200	66
B.2	Évolution du nombre d'entrepôts - M200-F8700	67
B.3	Évolution du nombre d'entrepôts - M500-F3600	67
B.4	Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 1	68
B.5	Évolution du nombre d'entrepôts - M1000-F6200	68
B.6	Évolution du nombre d'entrepôts - M1000-F6200	69
B.7	Évolution du nombre d'entrepôts - M200-T20	69
B.8	Évolution du nombre d'entrepôts - M200-T50	70

B.9	Évolution du nombre d'entrepôts - M500-T10	70
B.10	Évolution du nombre d'entrepôts - M500-T50	71
B.11	Évolution du nombre d'entrepôts - M1000-T10	71
B.12	Évolution du nombre d'entrepôts - M1000-T20	72
B.13	Évolution du nombre d'entrepôts - F3600-T20	72
B.14	Évolution du nombre d'entrepôts - F3600-T50	73
B.15	Évolution du nombre d'entrepôts - F6200-T10	73
B.16	Évolution du nombre d'entrepôts - F6200-T50	74
B.17	Évolution du nombre d'entrepôts - F8700-T20	74
B.18	Évolution du nombre d'entrepôts - F8700-T50	75
C.1	Évolution du coût total - M200-F3600	76
C.2	Évolution du coût total - M200-F6200	77
C.3	Évolution du coût total - M200-F8700	77
C.4	Évolution du coût total - M500-F3600	78
C.5	Évolution du coût total - M500-F6200	78
C.6	Évolution du coût total - M500-F8700	79
C.7	Évolution du coût total - M1000-F6200	79
C.8	Évolution du coût total - M1000-F8700	80
C.9	Évolution du coût total - M1000-F3600	81
C.10	Évolution du coût total - M1000-F3600	81
C.11	Évolution du coût total - M1000-F3600	82
C.12	Évolution du coût total - M1000-F3600	82

Liste des tableaux

- 4.1 Valeurs des paramètres du modèle 33

- 5.1 Évolution du nombre d'entrepôts pour différentes valeurs de taux 44
- 5.2 Nombre de cas pour lesquels des entrepôts disparaissent et au moins un nouveau apparaît . . 45
- 5.3 Évolution du coût total différentes valeurs de taux 50
- 5.4 Synthèse des résultats 56

Chapitre 1

Introduction

L'importance que revêt à l'heure actuelle le supply chain management n'est plus à démontrer. En effet, une gestion efficace de la chaîne logistique permet de la transformer en un véritable outil stratégique, contribuant ainsi à l'obtention d'avantages concurrentiels durables. Cela est d'autant plus important de nos jours, dans la mesure où les entreprises évoluent dans des environnements incertains et toujours plus concurrentiels.

Afin de mettre à disposition des clients les produits toujours plus rapidement, il s'avère indispensable de maîtriser de manière optimale l'acheminement de ces produits depuis leur lieu de fabrication jusqu'à l'emplacement des clients. Cette gestion efficiente du flux matière sera donc tributaire de la coopération entre les différents acteurs impliqués dans la chaîne logistique, mais également de l'emplacement des différentes installations par lesquelles transiteront les produits à transporter.

Cette recherche de localisation d'installations constitue le domaine dans lequel s'enracine ce mémoire. Celle-ci fait appel à des modèles mathématiques modélisant la supply chain étudiée. Ces modèles sont utilisés en combinaison de méthodes d'optimisation afin de ainsi de fournir l'emplacement idéal pour les installations à positionner. Cet emplacement idéal dépendra de l'objectif poursuivi par les personnes en charge de la supply chain. L'objectif le plus courant est la recherche des emplacements sur lesquelles installer des entrepôts ou des usines, afin de minimiser les coûts opérationnels ou de logistique.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous focaliserons sur la formulation employée pour représenter les coûts liés à l'activité de transport, et sur l'influence de leur comptabilisation sur la solution fournie par le modèle mathématique. Pour ce faire, ce rapport débutera par un chapitre centré sur l'étude bibliographique, permettant dans un premier temps de définir de façon plus approfondie ce que sont la supply chain et le supply chain management. Nous aborderons ensuite le supply chain network design, qui constitue la composante du supply chain management s'occupant entre autre des problèmes de localisation d'installations. Nous exposerons ensuite les principaux types de modèles mathématiques utilisés dans le cadre de problèmes de localisation d'installations, et présenterons quelques modèles existants dans la littérature spécialisée. Cela

nous permettra ainsi d'étudier et de discuter la formulation employée par ces types de modèles pour décrire les coûts de transport.

Le chapitre suivant présentera notre proposition de formulation des coûts de transport. Celle-ci fera appel à une version modifiée du modèle communément appelé "Uncapacitated Facility Localisation Problem" et fera apparaître un terme relatif à la capacité de chargement des camions. Nous justifierons également la formulation que nous proposons pour représenter les coûts de transport.

Le chapitre 4 va nous permettre d'expliquer la méthodologie que nous avons employé pour effectuer les 1890 expériences numériques réalisées. Celle-ci nous a permis de réaliser rapidement les expériences numériques et d'analyser les résultats, tout en réduisant le nombre d'interventions nécessaires de notre part.

Le chapitre 5 présentera quant à lui l'analyse des résultats. Nous étudierons l'influence de l'utilisation et de la variation du taux de chargement des camions sur les différentes solutions. Pour ce faire, nous nous pencherons sur les changements induits par cette évolution du taux de chargements sur le nombre et la localisation d'entrepôts, ainsi que sur les coûts totaux. Nous étudierons également l'influence de la capacité de chargement des camions, des coûts fixes liés à l'ouverture d'entrepôts et de la distance parcourue en considérant des régions de tailles différentes.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale et par évoquer les perspectives suite au travail effectué.

Chapitre 2

État de l'art

Sommaire

2.1 Supply chain	3
2.2 Supply chain management	5
2.3 Supply chain network design	8

Afin de contextualiser correctement la problématique étudiée dans ce mémoire, il semble incontournable d'introduire au préalable les notions de supply chain, de supply chain management et de network design. Nous en présenterons plusieurs aspects tels que les principes et les objectifs, dans le but de mettre en évidence l'importance que revêtent ces composantes dans les entreprises actuelles. En effet, le supply chain management et le network design constituent des éléments clés du management qui s'enracinent au sein de la stratégie globale.

Dans un second temps, nous nous intéresserons aux recherches scientifiques effectuées dans le domaine particulièrement prolifique du network design. Pour ce faire, nous présenterons une brève taxonomie des principaux types de modèles existants. Nous exposerons également de manière plus détaillée quelques modèles parmi les innombrables existants.

2.1 Supply chain

Le terme supply chain management, ou gestion de la chaîne logistique en français désigne un concept qui a été défini à de multiples reprises et de plusieurs façons différentes à travers la littérature spécialisée. Cela ne rend donc pas sa compréhension aisée, et conduit d'ailleurs à une mauvaise mise en pratique de celui-ci dans certains cas.

Cependant, avant de s'intéresser plus en détails au supply chain management, il apparaît opportun d'ex-

plier en amont le concept de supply chain, ainsi que ses implications.

2.1.1 Définition de la supply chain

Parmi les nombreuses définitions existantes du terme supply chain, nous pouvons citer celle de Ganeshan et Harrison [7] : "*La chaîne logistique se caractérise par un réseau d'entreprises, oeuvrant ensemble de manière directe ou indirecte, dans le but d'assurer les fonctions de procuration de matière première, de transformation de cette matière en produits semi-finis, ou en produits finis, de transport et de distribution des produits semi-finis aux maillons suivants de la chaîne logistique et des produits finis aux différents consommateurs, permettant ainsi de répondre à leurs besoins.*"

Il est important de noter que cette notion de chaîne logistique s'applique aussi bien pour des produits que pour des services. Ainsi, les producteurs, fabricants, assembleurs, monteurs, transporteurs, distributeurs, mais aussi clients sont des acteurs au sein de cette chaîne logistique.

Il est également nécessaire de préciser la nuance existant entre chaîne logistique et logistique à proprement parlé. Contrairement à la chaîne logistique qui fait appel à la notion de réseau d'entreprises, la logistique ne fait généralement écho qu'aux activités qui sont mises en place dans les limites d'une entreprise de la chaîne. La logistique est donc une part de la supply chain, et se focalise principalement sur l'ensemble des opérations physiques. De plus, il est important de ne pas confondre avec la gestion des opérations qui elle regroupe l'ensemble des processus, ainsi que les opérations élémentaires qui les composent, ayant pour but de transformer des flux d'entrée en flux de sortie. La gestion des opérations est donc un concept générique qui ne s'applique donc pas uniquement à la logistique. [8]

Comme illustré sur les figures 2.1, 2.2 et 2.3 ci-dessous, il est possible de différencier trois grandes familles de chaînes logistiques, classées selon leur degré de complexité. Ainsi dans le cas le plus simple, l'entreprise échange avec les clients et les fournisseurs en amont et en aval au travers de flux de produits, de services, financiers et d'information. C'est ce que l'on appelle la chaîne logistique directe.



FIGURE 2.1 – Chaîne logistique directe [1]

La chaîne peut naturellement se complexifier lorsque des intermédiaires apparaissent. On parlera alors dans ce cas de chaîne élargie.



FIGURE 2.2 – Chaîne logistique élargie [1]

Le terme chaîne globale sera quant à lui utilisé par exemple lorsque des prestataires de services financiers sont pris en considération pour assurer le financement des différentes activités des entreprises et fournisseurs, ou encore les sociétés d'études de marché qui permettent de fournir des informations aux entreprises sur le client final du produit ou du service.

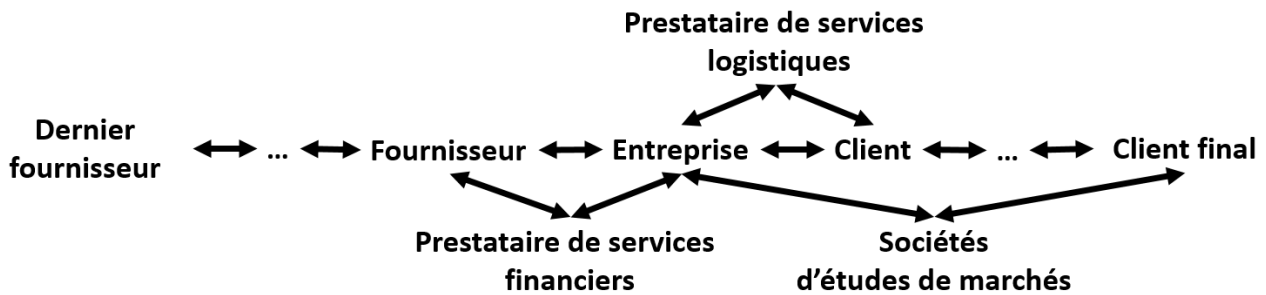


FIGURE 2.3 – Chaîne logistique globale [1]

Par ailleurs, une entreprise figurant dans une chaîne logistique peut également se retrouver dans une autre chaîne logistique, et ce, à un poste différent. On comprend ainsi mieux pourquoi il n'est pas toujours chose aisée que d'appréhender ce type de réseaux. Le pilotage de ces flux de matériaux et d'information inter-organisationnel s'avère donc indispensable pour atteindre l'objectif commun de création de valeur.

2.2 Supply chain management

2.2.1 Origine et développement du supply chain management

Le terme supply chain management est apparu dans la littérature spécialisée à partir des années 1980-1990. Toutefois, dès 1958, Jay W Forrester évoquait déjà dans son ouvrage "*Industrial Dynamics : A Major Breakthrough for Decision Makers*", l'importance qu'occupe la bonne compréhension des interactions entre les flux d'information, de main-d'oeuvre et de biens d'équipements, dans la réussite de l'entreprise [1]. Cette vision se révèle être extrêmement novatrice pour l'époque. A l'origine, dans les années 1940 et 1950, le supply chain management ne possédait pas les dimensions transversales (entre fonctions de l'entreprise) et coopératives (entre entreprises) d'aujourd'hui. L'accent était davantage mis sur la logistique, et les principales recherches de l'époque étaient centrées sur l'amélioration des processus de manutentions, ainsi que sur l'amélioration de l'utilisation de l'espace et les aménagements des entrepôts. Cela aboutit ainsi à la définition d'une "charge

unitaire", matérialisée par la palette. Dans les années 1950, ce concept de charge unitaire a continué à se développer, donnant naissance au container, très largement utilisé dans le cadre du transport intermodal entre navires, trains et camions qui se développe également à l'époque.

Les années 1980 ont amené une importante révolution qui a marqué réellement l'avènement du supply chain management, avec l'arrivée massive des ordinateurs au sein des entreprises. Ceux-ci ont permis d'introduire de nouvelles technologies, améliorant ainsi par exemple la planification logistique et la technologie d'exécution par l'intermédiaire de nouveaux algorithmes d'optimisation permettant de résoudre des problèmes jusqu'alors insolubles. Toutes ces nouveautés ont permis de mieux faire comprendre le poids économique et stratégique, ainsi que la complexité que pouvait représenter une chaîne logistique au sein d'une organisation. Cela a par la même occasion mis en évidence les possibilités d'améliorations dans le domaine. Le développement de la gestion de la chaîne logistique s'est poursuivi dans les années 1990 avec l'arrivée des systèmes de planification des ressources de l'entreprise, également appelés ERP. Ces derniers permettent de tirer pleinement profit des bases de données présentes au sein des entreprises, de les faire communiquer et ainsi accéder à une gestion du flux d'information, composante élémentaire du supply chain management.

Par la suite, la mondialisation a continué à contribuer à la reconnaissance générale du supply chain management, ainsi qu'à la nécessité d'établir des stratégies propres à ce domaine managérial, afin de faire face à des chaînes toujours plus complexes. Ces stratégies permirent alors de pleinement définir et distinguer chaîne logistique et logistique [9].

Depuis lors, la technologie a continué à évoluer, notamment dans le domaine de la communication et du partage de l'information, via les systèmes d'information logistiques. Ces progrès peuvent amener une nouvelle valeur ajoutée particulièrement élevée, et ce au sein du modèle de l'entreprise connectée ou industrie 4.0 (en référence à la 4e révolution, terme utilisé pour exprimer le passage de l'usine traditionnelle à l'usine moderne), en permettant des interactions entre machines ou postes de travail pour accroître davantage l'efficacité [10].

2.2.2 Principe du supply chain management

Michael Hugo définit dans son livre "*Essentials of Supply chain management*" [7] le supply chain management comme étant "*la coordination des activités de production, d'inventaire, de localisation et de transports parmi l'ensemble des acteurs de la supply chain dans le but d'obtenir la combinaison parfaite entre réactivité et efficacité pour un marché donné*". Cette définition met donc en exergue la dimension systémique du supply chain management, et ce en raison de la structure de la chaîne logistique. En effet, il est important de la considérer comme un ensemble unique et non pas comme une simple imbrication de différents éléments, avec chacun affecté à une activité précise. La performance de chaque maillon de la chaîne aura donc des répercussions directes, mais également indirectes sur la performance des autres acteurs, et donc par extension sur la performance de la chaîne globale [1].

Cette conception holistique affecte donc de nombreuses activités telles que la logistique traditionnelle, mais

également le marketing, la finance, le service client, la recherche et développement, etc. Ainsi, ces activités doivent être gérées et coordonnées aussi bien d'un point de vue inter-fonctionnel (entre les départements de l'entreprise) que d'un point de vue inter-organisationnel (entre les différentes entreprises et prestataires actifs au sein de la chaîne logistique). Il sera alors possible de synchroniser et de faire converger les capacités opérationnelles, par l'intermédiaire des flux d'information, dans le but d'établir un cadre permettant de répondre efficacement à la demande du client [1].

Il est évident que tout cela ne sera possible que grâce à la mise en place :

- d'un partage mutuel d'information entre les différents acteurs de la chaîne. Cela est primordial pour la planification et la surveillance des processus. Ce partage d'information permet par exemple une meilleure gestion et prévision des stocks. Cela pourrait s'avérer être très utile pour des produits saisonniers, voire même pour des actions marketing.
- d'une forte coopération entre les partenaires, passant par le partage mutuel des risques et des récompenses. Cela aura pour effet d'optimiser la gestion, de s'accorder sur le pilotage des processus, ainsi que d'accroître l'engagement des acteurs au sein de la chaîne logistique. In fine, des relations à long terme pourront ainsi être nouées entre les acteurs, renforçant leur désir de servir au mieux les clients.

2.2.3 Stratégie et objectifs

Comme exposé dans la section précédente, chaque supply chain possède certaines spécificités et fait face à des challenges qui lui sont propres. Afin de servir au mieux les clients, le management de la supply chain s'articule autour des 5 pôles d'activités cités dans la définition de M. Hugo. La mise en place d'une stratégie pour la supply chain, basée sur celle de l'entreprise, devra donc répondre à des questions fondamentales pour chacun de ces 5 domaines [7] :

- Production : Quel est le besoin du marché visé en terme de produits? Quelles sont les quantités nécessaires pour chaque produit? Quand doivent-ils être disponibles pour les clients? Répondre à ces questions nécessite donc la préparation d'un planning de production "haut niveau", prenant en compte les capacités en terme de charge de travail et d'infrastructure, l'organisation de la maintenance des équipements, et l'aspect contrôle qualité.
- Inventaire : Quels sont les éléments à stocker? A quel niveau de la chaîne? De quel stock avons-nous besoin en terme de matières premières, semi-finis ou produits finis? Un compromis en termes de stocks devra être trouvé afin d'une part faire face à l'incertitude inhérente à la demande et à l'approvisionnement, et d'autre part de minimiser les coûts liés au stockage.
- Localisation : Où doit-être localisée la production? Qu'en est-il des stocks? Faut-il construire de nouvelles installations ou pouvons-nous utiliser des infrastructures existantes? La réponse à ces questions aura donc un impact direct sur le chemin suivi par les différents flux de matières pour arriver au client final.

- Transport : Comment effectuer le transport des flux de matières d'un maillon de la chaîne vers un autre? Différents moyens de transport peuvent naturellement être envisagés, chacun impliquant des coûts et des délais ayant des conséquences directes sur les autres pôles d'activités tel que l'inventaire.
- Information : Quel type de données devons-nous collecter? Quelle quantité d'information devons-nous partager? Les informations disponibles joueront un rôle crucial dans le processus de prise de décisions. Il paraît donc évident que celles-ci devront être de qualité et actualisées sur base régulière.

De la stratégie de la supply chain en découleront ses objectifs, établis de manière à contribuer à la création d'avantages concurrentiels à l'entreprise. Ces objectifs peuvent être multiples, et parfois antagonistes. Si par exemple, la compagnie souhaite présenter un service client très réactif, cela nécessite par exemple des stocks élevés, ce qui va à l'encontre de l'efficacité opérationnelle qui favorisera davantage des stocks plus faibles dans le but de mieux gérer les coûts. A nouveau, la vision globale de l'ensemble de la chaîne logiste s'avère primordiale, puisque c'est cette dernière qui permettra de contre balancer les différents objectifs, afin d'être en phase avec la stratégie élaborée.

Afin d'assurer l'atteinte des objectifs fixés, la définition de critères de performance constitue également une étape primordiale au cours de l'analyse de la chaîne logistique. La mesure de la performance peut se faire sur base de critères multiples et variés afin d'évaluer l'efficacité et l'efficience de l'ensemble du système existant, mais également de le situer par rapport à la concurrence au travers de benchmarks. Il est donc aisé de comprendre l'importance de ces critères puisque ceux-ci seront utilisés à la base même du développement de la supply chain et influenceront donc l'orientation que prendra celle-ci lorsque le gestionnaire sera amené à faire des choix.

2.3 Supply chain network design

2.3.1 Définition

Au cours de l'établissement de la stratégie de la supply chain, l'équipe en charge de son élaboration est amenée à se pencher sur la problématique de la localisation. Déterminer correctement l'emplacement de la production, des stocks, des sous-traitants, choisir de construire ou non des nouvelles infrastructures n'est pas chose aisée, mais s'avère pourtant déterminant pour la gestion des flux de matière ainsi que l'efficacité de l'ensemble de la chaîne logistique. En effet, selon les experts [11], 80% des coûts de la supply chain sont directement issus de la localisation des installations et la détermination du flux optimal de matières entre celles-ci. Cela explique pourquoi l'accent doit être mis sur cette discipline du management de la supply chain management nommée le supply chain network design. Celle-ci a donc pour vocation de déterminer la localisation optimale des infrastructures présentes tout au long de la chaîne logistique, ainsi que leur taille et le flux de matières de matières qui y transite.

2.3.2 Les étapes d'un projet de supply chain network design

Afin de fournir des réponses concrètes aux questions liées à la problématique de la localisation des infrastructures pendant la phase de définition ou de révision de la stratégie d'entreprise, le recours à un projet de supply chain network design se révèle être la solution la plus adéquate. Comme n'importe quel autre type de projets, celui-ci se découpe en différentes phases comme illustré à la figure 2.4.



FIGURE 2.4 – Étapes d'un projet de supply chain network design [2]

2.3.2.1 Définition du projet

Comme pour n'importe quel projet, celui-ci démarre naturellement par sa définition. Étant donnée la complexité du design d'un réseau de supply chain, il est important de correctement mettre le projet dans son contexte, qui peut se justifier par exemple par l'apparition de nouvelles opportunités ou bien de nouveaux risques. Cela permettra ainsi de clarifier l'envergure du projet, ainsi que ses objectifs. Ces derniers peuvent être multiples et variés. En effet, le projet peut être guidé par une volonté de réduction des coûts opérationnels, ou par un besoin d'actualisation de la chaîne logistique en mettant l'accent sur le service client, notamment à cause du changement de comportement des consommateurs se tournant toujours plus vers le e-commerce. Il est également possible que le projet soit directement lié à des risques externes à l'entreprise, telles que des instabilités politiques, ou l'apparition de nouvelles normes ou taxes. Le but de ce genre de projet sera alors une analyse des coûts disruptifs liés à la délocalisation de certaines infrastructures et l'optimisation de nouveaux flux de matières et d'information. Cette première étape se conclut généralement par la mise en place d'une équipe projet et d'un plan exposant le timing et les moyens mis en oeuvre en matière de ressources financières et humaines.

2.3.2.2 Analyse

Une fois la phase de définition terminée, l'analyse détaillée de la problématique peut alors commencer. Cette étape requiert une importante collecte d'informations afin d'une part dresser un bilan correct de la situation actuelle et des prévisions, et d'autre part alimenter la recherche de nouvelles solutions dans les étapes suivantes du projet. Cet important labeur passe donc par la récolte de très nombreuses données à la fois quantitatives et qualitatives. Il paraît évident que les données quantitatives qui seront collectées auront trait aux caractéristiques des produits, les coûts des activités, la demande des clients, leur localisation, les prévisions pour les périodes à venir, les taxes, etc. Cela offrira à l'équipe projet non seulement une meilleure compréhension de la chaîne logistique existante, mais servira également de base pour l'étude de nouvelles solu-

tions qui pourraient être mises en place, via la collecte de données nouvelles. Celles-ci permettront d'explorer de nouvelles possibilités.

Il ne faut également pas perdre de vue que toutes ces données ne seront pas toujours exactes étant donné l'incertitude qui règne par exemple sur la demande, les actions des concurrents ou encore la fluctuation des coûts de transport tributaires du prix du baril de pétrole. Un compromis devra donc parfois être trouvé dans certains cas.

Concernant les données qualitatives, elles constituent donc des informations non associées à des valeurs, mais qui doivent également entrer en ligne de compte. Des exemples typiques de données qualitatives sont :

- la stratégie de l'entreprise qui pourrait davantage valoriser le service client, et ce parfois à n'importe quel prix.
- la disposition au changement, qui pourrait par exemple mettre à mal un projet de réduction des coûts car une solution ne nécessitant que peu de changements pourrait être préférée à une autre pourtant plus efficace, mais requérant des changements plus radicaux. Étant donné le caractère inter-fonctionnel et inter-organisationnel des projets de supply chain, il peut s'avérer judicieux dans certains cas de dresser la cartographie des acteurs impliqués dans le projet. L'efficacité d'un tel projet de transformation peut en dépendre [2].
- la visibilité médiatique de la marque et de l'entreprise. En effet, il est important de ne pas négliger l'impact que pourraient avoir certaines décisions sur la perception des personnes à propos de l'entreprise.
- les relations établies avec certains partenaires impliqués dans la supply chain. Étant donné que l'efficacité de chaque maillon a un impact sur celle des autres et par extension sur l'efficacité de l'ensemble de la chaîne logistique, il est important de considérer les répercussions que peuvent avoir le démarrage de nouvelles collaborations avec des autres partenaires. En effet, il n'est pas toujours possible de travailler dans certains pays, certaines régions avec des partenaires de longue date. Il ne faut donc pas négliger pas cet aspect si l'on étudie la possibilité de délocalisation d'infrastructures.

Il existe bien sûr de nombreuses autres données qualitatives qui varient en fonction de l'objectif du projet. L'important est de toutes les identifier correctement puisqu'elles peuvent être décisives au moment de choisir la solution à implémenter.

Réunir ces données nécessitera l'implication de différentes équipes et départements tels que la production, le marketing, la logistique, et autres partenaires ou prestataires.

2.3.2.3 Design des solutions

L'étape suivante du projet consiste en la modélisation de la chaîne logistique, nécessitant parfois le recours à des hypothèses simplificatrices. Ce modèle mathématique pourra alors être utilisé par des méthodes d'optimisation générant ainsi de nouvelles solutions, et ce à l'aide de l'ensemble des données rassemblées au préalable. Par ailleurs, la validation du modèle pourra être effectuée à l'aide des données décrivant la

situation actuelle. Pour ce faire, il suffira d'imposer la solution aux méthodes d'optimisation et de s'assurer de la concordance entre les résultats fournis avec la réalité.

L'objet de l'optimisation dépendra naturellement de l'objectif du projet. Si par exemple le but visé est une réduction des coûts, il sera alors possible de déterminer l'emplacement optimal des infrastructures ainsi que les flux de matières. Pour les entreprises désirant améliorer leur service client, la méthode d'optimisation fournira la localisation des entrepôts assurant que la plupart des clients soit située dans un rayon défini autour de ces entrepôts.

Au cours de cette étape, il est important de s'accorder sur la définition du terme "client" [11]. En effet, dans le cadre de supply chain étudiée, les clients peuvent désigner :

- les différents magasins appartenant à l'entreprise, qui diffèrent donc des clients finaux.
- les clients finaux effectuant leurs achats en ligne.
- des entreprises achetant des produits directement à d'autres entreprises. Ces dernières sont alors un maillon de la supply chain du client.
- Une zone d'embarcation aérienne ou navale, lorsque les produits sont exportés et que l'implication de l'entreprise s'arrête lorsque ceux-ci quittent le pays.

Afin de s'assurer de la robustesse des solutions fournies après optimisation, une analyse de sensibilité peut être effectuée. Celle-ci visera donc à vérifier que la solution est toujours valable si certains paramètres venaient à être modifiés, afin de par exemple simuler l'incertitude relative aux prévisions de demandes des clients. Il se pourrait en effet qu'apparaissent de grosses variations dans la solution optimale fournie dans ce genre de situations. Cette étude de la robustesse permet ainsi d'effectuer un premier tri parmi les solutions possibles et d'envisager plusieurs scénarios quant à l'évolution de l'environnement. L'aspect "modélisation" des projets de supply chain sera davantage détaillé par la suite.

2.3.2.4 Décision de la solution

La tâche suivante de l'équipe projet réside en l'étude de l'ensemble des solutions générées, afin de retenir celle qui sera implémentée par la suite. Pour y parvenir, il est important de bien comprendre les résultats et de les interpréter correctement. En effet, une solution pourrait sembler particulièrement intéressante de prime abord, mais se révéler ne pas être par exemple en adéquation avec la stratégie de l'entreprise ou encore s'avérer être trop risquée par rapport à la plus-value espérée. Il est également possible que les solutions fournies par les méthodes d'optimisation doivent être quelque peu ajustées aux réalités du terrain.

Pour aider à choisir la solution à retenir, il importe de définir des critères, basés à la fois sur l'objectif du projet et sur les données quantitatives et qualitatives. La communication aux dirigeants de la solution choisie doit être accompagnée d'explications détaillées, permettant à ceux-ci de se projeter et de s'imprégner des changements proposés.

2.3.2.5 Mise en oeuvre

Une fois la solution approuvée par la direction, la mise en oeuvre peut alors démarrer. Cette étape consiste donc en la concrétisation d'un concept étudié par l'équipe projet. Sa réussite passera par la définition au préalable d'un plan d'action clair et compris par les équipes opérationnelles, ainsi que par un suivi rigoureux des changements à opérer. La gestion de l'information auprès des différents acteurs aura donc un rôle clé à jouer dans leur mobilisation et leur engagement pour cette dernière étape d'un projet très souvent complexe et de longue haleine.

2.3.3 Types de modèles utilisés dans le cadre du supply chain network design

Revenons à présent sur l'aspect modélisation d'un projet de supply chain network design. Au cours du projet, l'équipe sera donc amenée à modéliser la chaîne logistique qui est à l'étude. En fonction de ses caractéristiques, le recours à un type de modèle pourra être plus approprié que les autres. Comme illustré à la figure 2.5, les principaux modèles utilisés pour des problématiques de localisation d'infrastructures peuvent être classifiés selon 4 grandes catégories [3].

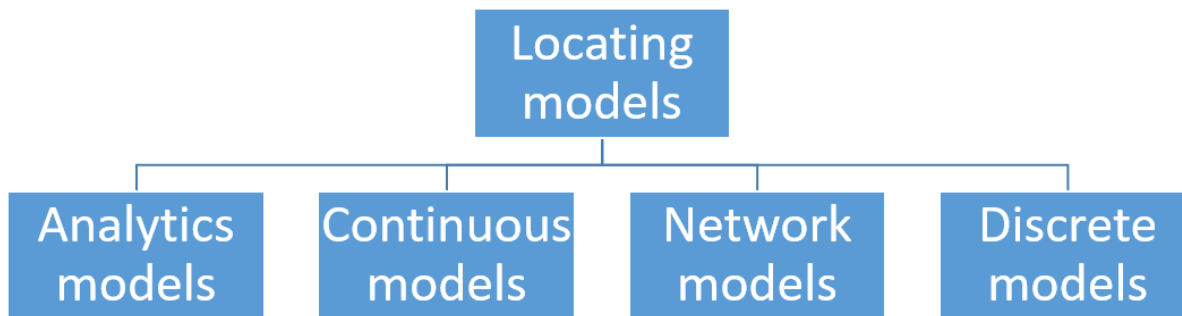


FIGURE 2.5 – Types de modèles de localisation [3]

2.3.3.1 Les modèles analytiques

Les modèles analytiques se basent sur l'hypothèse que la demande d'une zone définie suit une distribution particulière (par exemple uniforme). L'emplacement des infrastructures à localiser peut être à n'importe quel endroit de la zone définie, il n'y a aucune restriction au sein de celle-ci. Ces modèles peuvent, comme leur nom l'indique, être résolus de manière analytique. Ces modèles sont généralement réservés à des applications spécifiques.

Parmi les modèles existants dans la littérature nous pouvons détailler à titre d'exemple l'étude de Bouchery et Fransoo [12]. Ceux-ci ont développé un modèle analytique utilisé dans le cadre d'une étude de la dynamique du transport intermodal en prenant en compte l'aspect économique, environnemental et "le changement de mode". La finalité du modèle réside en la localisation d'un terminal minimisant les coûts et les émissions de

CO_2 , tout en optimisant le transport intermodal. Le modèle considère une région rectangulaire, de surface A_i dans laquelle les produits placés dans des containers (qui constituent donc l'unité utilisée par la suite) arrivent par un port dont la position est déterminée. La demande, notée ρ , est considérée comme uniforme pour l'ensemble de la région. En cas de transport intermodal, la marchandise est acheminée vers le terminal à localiser pour ensuite être livrée à la destination finale par camion.

Le modèle introduit les équations suivantes pour les coûts de transport et les émissions de CO_2 dans le cadre d'un envoi direct du camion vers le client à partir du port :

$$Z_{0,i}^{DS} = \delta_{0,i} \cdot \rho \cdot A_i \cdot Z_1 \quad (2.1)$$

$$E_{0,i}^{DS} = \delta_{0,i} \cdot \rho \cdot A_i \cdot E_1 \quad (2.2)$$

Avec :

- Z_1 et $Z_{0,i}^{DS}$, respectivement le coût de transport (exprimé en $\frac{\text{€}}{\text{container} \cdot \text{km}}$) et le coût total associé au transport direct par camion pour répondre à la demande de la région i .
- $\delta_{0,i}$ et A_i , respectivement la distance entre le port et la région i et la surface de la région i .
- E_1 et $E_{0,i}^{DS}$, respectivement les émissions de carbone associées au transport par camion (exprimées en $\frac{\text{kgCO}_2}{\text{container} \cdot \text{km}}$) et l'ensemble des émissions de carbone issu du transport des containers par camion pour répondre à la demande de la région i .

Dans le cas d'un transport intermodal, les containers sont d'abord acheminés par train jusqu'à un terminal T et sont ensuite envoyés par camions aux clients de la région i . Les équations (2.1) et (2.2) deviennent alors :

$$Z_{0,i}^{IT} = \delta_{0,T} \cdot (ZF_2 + \rho \cdot A_i \cdot Z_2) + \delta_{T,i} \cdot \rho \cdot A_i \cdot Z_1 \quad (2.3)$$

$$E_{0,i}^{IT} = \delta_{0,T} \cdot (EF_2 + \rho \cdot A_i \cdot E_2) + \delta_{T,i} \cdot \rho \cdot A_i \cdot E_1 \quad (2.4)$$

Les équations (2.3) et (2.4) font apparaître les termes :

- ZF_2 et Z_2 , respectivement le coût fixe lié au transport pour un train à vide et le coût de transport des containers par train, assimilable à "un coût marginal" dans ce cas.
- EF_2 et E_2 , respectivement "l'émission fixe" de CO_2 liée au transport par train et l'émission de carbone associée au transport d'un container sur une distance de 1 km en train.

À la suite de plusieurs développements mathématiques, il est possible d'obtenir l'expression mathématique renseignant l'emplacement optimal du terminal selon que l'on souhaite minimiser les coûts de transport, les émissions de CO_2 ou encore maximiser l'usage du transport intermodal. Grâce à cela, les auteurs ont ainsi pu dégager des pistes managériales concernant l'interaction entre optimisation des coûts, des émissions de CO_2 et transport intermodal.

2.3.3.2 Les modèles continus

Les modèles continus permettent également la localisation des installations en n'importe quel endroit de la région considérée, mais se distinguent toutefois des modèles analytiques par une autre structure de la demande des clients. En effet, celle-ci est considérée comme étant discrète et n'est donc plus que centralisée en certains points de la carte. Le calcul de la distance entre les clients et les infrastructures devient alors nécessaire contrairement aux modèles analytiques. Cette catégorie de modèles nécessite l'usage de méthodes numériques lorsqu'ils sont utilisés dans problèmes d'optimisation.

2.3.3.3 Les modèles de type réseau

Les modèles de type réseau se basent sur l'utilisation de structures composées de noeuds reliés entre eux par des arcs, similaire à une structure en arbre. Alors que les clients sont généralement localisés aux différents noeuds, les installations quant à elles, peuvent être positionnées à n'importe quel emplacement du réseau. Tout comme les modèles continus, l'utilisation de méthodes numériques est nécessaire pour les résoudre.

2.3.3.4 Les modèles discrets

Très similaires aux modèles de type réseau, les modèles discrets se distinguent cependant de ceux-ci par deux aspects. Le premier est lié la localisation possible des différentes installations. En effet, celle-ci est limitée à un ensemble de positions prédéfinies. La seconde différence majeure réside en la définition de la distance entre les noeuds dans les modèles discrets. Celle-ci peut être complètement arbitraire contrairement aux modèles réseau. Toutefois, il est commun de voir les modèles utiliser les distances euclidienne ou de Manhattan.

Étant donnée la grande diversité de modèles discrets développés, il est possible de les classer en différentes familles. Toutefois, dans la littérature spécialisée, la taxonomie des modèles discrets peut varier selon les auteurs(par exemple [3], [13],ou encore [14]). L'une d'entre elle, proposée par Owen et Daskin [4] est illustrée à la figure 2.6, et identifie donc 3 catégories : les modèles statiques et déterministes, les modèles dynamiques et les modèles stochastiques.

Par ailleurs, les modèles au sein de chacune des familles représentées à la figure 2.6 possèdent également de nombreuses variantes. Parmi les principales, nous pouvons citer :

- les modèles prenant en compte une limite en terme de capacité d'entrepôts ou d'usine et ceux n'imposant aucune limite.
- les modèles ne considérant qu'un seul type de produit et ceux tenant compte de plusieurs flux de produits différents au sein de la supply chain.
- Les modèles ne représentant que les flux entre les clients et les entrepôts, et les modèles "multi-niveaux"

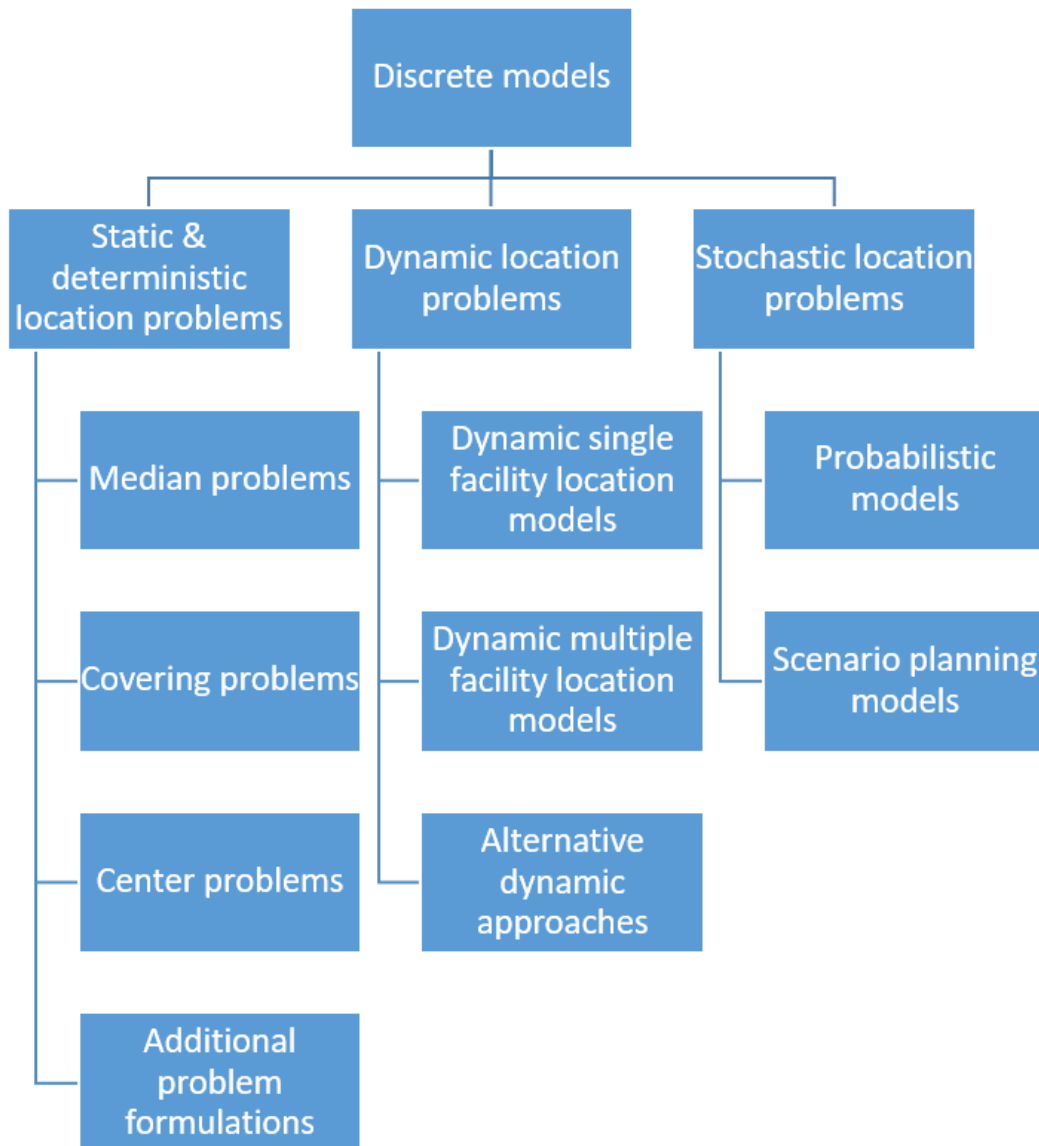


FIGURE 2.6 – Types de modèles discrets [4]

représentant également les maillons antérieurs de la supply chain. Ces derniers peuvent par exemple être d'autres entrepôts (utilisés pour la consolidation des produits, le transport intermodal, etc.), des usines, etc.

- les modèles avec un seul point d'approvisionnement et ceux considérant différentes provenances pour les produits.
- les modèles ayant un seul objectif et ceux visant à optimiser plusieurs critères simultanément.

2.3.3.4.a Modèles statiques et déterministes

Les modèles statiques et déterministes sont les plus représentés dans la littérature ([15]). Ils sont qualifiés comme tel car les variables du modèle n'évoluent pas de façon aléatoire et seul un horizon temporel est

considéré.

Ces modèles peuvent être employés pour résoudre divers types de problèmes. Il est par exemple possible de les utiliser afin de localiser de façon optimale des installations de telle sorte à minimiser la distance pondérée par la demande, entre chaque installation et les clients qu'elle dessert (median problem).

Dans le cas où il ne serait pas possible de répondre à l'entière de la demande en raison d'un nombre restreint d'entrepôts, leur emplacement peut être déterminé de manière à maximiser la demande qu'ils seront en mesure de couvrir (covering problem). Ce type de problème est également utilisé dans le domaine public lorsqu'il faut par exemple déterminer l'emplacement de services de secours, dans le but de maximiser leur rayon d'intervention pour une durée de déplacement déterminée.

D'autres modèles statiques sont également utilisés dans le but de minimiser la distance maximum à parcourir entre les entrepôts (dont le nombre est généralement fixé) et les clients, tout en satisfaisant l'entière de la demande des clients (P-centre). Dans le but d'illustrer les modèles statiques et déterministes, nous allons présenter deux modèles issus de la littérature.

Le premier est celui utilisé par Schuster Puga et Tancrez [16]. Celui-ci est employé avec un algorithme heuristique dans le but de résoudre un problème d'optimisation de localisation d'entrepôts, tout en déterminant également les stocks et les flux de matière circulant entre l'usine centrale, les entrepôts et les revendeurs (qui constituent donc les "clients" dans cette supply chain). Le modèle peut également être qualifié de modèle à 2 niveaux, puisqu'il considère non seulement l'acheminement de produits entre les entrepôts et les revendeurs, mais aussi l'envoi de produits depuis une usine, qualifiée de "centrale", vers les différents entrepôts. Enfin, un seul type de produit est considéré et le modèle autorise que les revendeurs soient fournis par plusieurs entrepôts.

Par ailleurs, ce modèle présente la spécificité de considérer une structure pour les coûts de transport par camions et non pas par unité. La capacité de ces derniers est également prise en compte.

Le modèle présenté ci-après utilise les notations suivantes :

1. *Indexes* :

- $r \in \{1, \dots, n_r\}$ est utilisé pour les revendeurs,
- $d \in \{1, \dots, n_d\}$ est utilisé pour l'emplacement potentiel des entrepôts.

2. *Paramètres* :

- O_r^d , le coût de transport pour un véhicule en partance de l'entrepôt d allant vers un client r , en euro par véhicule,
- K_d , le coût fixe à l'entrepôt d lié au placement d'une commande à l'usine centrale, en euro par commande,
- F_d , le coût fixe lié à l'ouverture de l'entrepôt d , en euros par période,
- h_r , le coût d'inventaire unitaire chez le revendeur r , en euro par (produit . période),

- H_d , le coût d'inventaire unitaire à l'entrepôt d , en euro par (produit . période),
- z_α , le nombre d'écart-types par rapport à la moyenne, pour une distribution normale, associé à un niveau de service α ,
- LT_r^d , le délai de livraison entre l'entrepôt d et le revendeur r , exprimé en période,
- LT_d , le délai de livraison entre l'usine centrale et l'entrepôt d , exprimé en période,
- μ_r , la demande moyenne du revendeur r , en produits par période,
- σ_r , l'écart-type de la demande du revendeur r , en produits par période,
- C_d^r , la capacité des véhicules transportant les produits de l'entrepôt d vers le revendeur r , exprimé en produits par véhicule.

3. Variables décisionnelles :

- λ_r^d , le flux de production, provenant de l'entrepôt d et acheminé vers le revendeur r , en produits par période,
- q_r^d , le volume de produits en provenance de l'entrepôt d et expédié vers le revendeur r , exprimé en produits par véhicule,
- Q_d , la taille de la commande passée par l'entrepôt d auprès de l'usine centrale, exprimé en produits,
- Λ_d , le flux de produits passant par l'entrepôt d , en produits par période,
- $\bar{\sigma}_d$, l'écart-type du flux de produits passant par l'entrepôt d , exprimé en produits par période.

Le modèle continu et non-linéaire se formule comme suit :

$$\min \sum_{d,r} O_r^d \cdot \frac{\lambda_r^d}{q_r^d} \quad (2.5)$$

$$+ \sum_r h_r \cdot \left(\sum_d \frac{\lambda_r^d}{\mu_r} \cdot \frac{q_r^d}{2} \right) \quad (2.6)$$

$$+ \sum_{d,\Lambda_d>0} F_d \cdot \frac{\sum_r \lambda_r^d}{\Lambda_d} \quad (2.7)$$

$$+ \sum_{d,\Lambda_d>0} \sqrt{\frac{2 \cdot H_d \cdot K_d}{\Lambda_d}} \cdot \sum_r \lambda_r^d \quad (2.8)$$

$$+ \sum_{d,\Lambda_d>0} H_d \cdot z_\alpha \cdot \bar{\sigma}_r \cdot \sqrt{LT_d} \cdot \frac{\sum_r \lambda_r^d}{\Lambda_d} \quad (2.9)$$

$$+ \sum_r h_r \cdot z_\alpha \cdot \sigma_r \cdot \left(\sum_d \frac{\sum_r \lambda_r^d}{\Lambda_d} \cdot \sqrt{LT_r^d} \right) \quad (2.10)$$

tel que :

$$\sum_r \lambda_r^d = \Lambda_d \quad \forall d \quad (2.11)$$

$$\sqrt{\sum_{r, \lambda_r^d} \sigma_r^2} = \bar{\sigma}_d \quad \forall d \quad (2.12)$$

$$\sum_d \lambda_r^d = \mu_r \quad \forall r \quad (2.13)$$

$$\lambda_r^d, \Lambda_d, \sigma_d \geq 0 \quad \forall r, d. \quad (2.14)$$

$$(2.15)$$

L'objectif poursuivi par le modèle est donc de minimiser les différents coûts, survenant à chaque période, liés aux :

- activités de transport de marchandise, modélisées par (2.5). Le coût associé au transport de marchandises est donc calculé en multipliant au coût par véhicule, le nombre de camions utilisés pour les envois de marchandises aux différents revendeurs par période (exprimé à l'aide du rapport entre le nombre de produits expédiés aux revendeurs à chaque période et le nombre de produits expédiés par véhicule).
- activités d'inventaire chez les revendeurs, représentées par (2.6), et faisant donc intervenir dans son expression, le coût d'inventaire unitaire chez le revendeur h_r , multiplié par le niveau de stock moyen chez le revendeur.
- activités de stockage dans les entrepôts et aux coûts des commandes passées auprès de l'usine "centrale", définies par (2.8), et faisant intervenir le coût de stockage unitaire multiplié par le niveau de stock moyen, ainsi que le coût de commande unitaire multiplié par le nombre de commandes passées par période.
- frais liés à l'ouverture d'entrepôts, exprimés à l'aide de (2.7) et qui présentent la particularité d'utiliser le rapport $\frac{\sum_r \lambda_r^d}{\Lambda_d}$, remplaçant l'utilisation d'une variable binaire. En effet, ce rapport sera égal à 1 uniquement lorsque des produits transiteront par l'entrepôt d , ce qui permettra alors de comptabiliser les coûts fixes d'ouverture $F_{d\uparrow}$, exprimés en euro par période, et ce, pour l'entrepôt d .
- détentions de stocks qualifiés de "tampons", tenant compte des incertitudes inhérentes à la demande, et illustrées côté entrepôts par (2.9) et côté revendeurs par (2.10). Ces stocks de sécurité sont utilisés pour répondre à la demande pendant les périodes de réapprovisionnement.

Enfin, les différentes contraintes du modèles permettent de définir les variables auxiliaires ((2.11), (2.12)), de s'assurer que la demande de chaque revendeur sera satisfaite ((2.13)) et d'empêcher l'algorithme heuristique de fournir des valeurs négatives pour les 3 variables de décision λ_r^d, Λ_d et σ_d ((2.14)).

A présent, considérons un second modèle statique déterministe. Celui de Pirkul et Jayaraman [17] permet de localiser des manufactures et des entrepôts, afin de minimiser les coûts opérationnels de cette supply chain à deux niveaux. En outre, ce modèle prend en compte la capacité des usines et des entrepôts, ainsi que plusieurs types de produits différents. Résoudre le modèle permet donc également de fournir les flux optimaux

pour les différents produits, tout en considérant les contraintes en terme de capacité. Enfin, les auteurs font l'hypothèse que la demande des clients et leur localisation sont connues.

Le modèle a recours aux notations suivantes :

1. *Indexes* :

- $i \in I$ est utilisé les clients,
- $j \in J$ est utilisé pour l'emplacement potentiel pour entrepôts,
- $k \in K$ est utilisé pour l'emplacement potentiel des usines,
- $l \in L$ est utilisé pour les différents types de produits.

2. *Paramètres* :

- W_j , la capacité totale de l'entrepôt j ,
- D_k , la capacité totale de production de l'usine k ,
- q_l , la capacité de production des usines pour le produit l ,
- g_j , le coût fixe pour ouvrir et opérer un entrepôt j ,
- f_k , le coût fixe pour ouvrir et opérer une usine k ,
- a_{il} , la demande du client i pour le produit l ,
- C_{ijl} , le coût variable pour acheminer un produit l de l'entrepôt j au client i ,
- T_{jkl} , le coût variable pour acheminer un produit l de l'usine k à l'entrepôt j ,
- s_l , la capacité de traitement associée au produit l que peuvent gérer les entrepôts,
- W , le nombre maximum d'entrepôts qui peuvent être ouverts,
- P , le nombre maximum d'usines qui peuvent être ouvertes.

3. *Variables de décisions* :

- X_{ijl} , la quantité de produits l distribuée au client i par l'entrepôt j ,
- Y_{jkl} , la quantité de produits l envoyée depuis l'usine k à l'entrepôt j ,
- Z_j , la variable binaire indiquant si l'entrepôt j est ouvert ou non,
- P_k , la variable binaire indiquant si l'usine k est ouverte ou non.

Le modèle de Pirkul et Jayaraman se formule de la façon suivante :

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j \sum_l C_{ijl} \cdot X_{ijl} + \sum_j \sum_k \sum_l T_{jkl} \cdot Y_{jkl} + \sum_k f_k \cdot P_k + \sum_j g_j \cdot Z_j \quad (2.16)$$

tel que :

$$\sum_j X_{ijl} = a_{il}; \quad \forall i \in I, \forall l \in L; \quad (2.17)$$

$$\sum_i \sum_l s_l \cdot X_{ijl} \leq Z_j \cdot W_j; \quad \forall j \in J; \quad (2.18)$$

$$\sum_j Z_j \leq W; \quad (2.19)$$

$$\sum_i X_{ijl} \leq \sum_k Y_{jkl}; \quad \forall j \in J, \forall l \in L; \quad (2.20)$$

$$\sum_j \sum_l q_l \cdot Y_{jkl} \leq D_k \cdot P_k; \quad \forall k \in K; \quad (2.21)$$

$$\sum_k P_k \leq P; \quad (2.22)$$

$$P_k, Z_j = \{0, 1\}; \quad \forall j \in J, \forall k \in K; \quad (2.23)$$

$$X_{ijl}, Y_{jkl} \geq 0; \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall l \in L; \quad (2.24)$$

L'équation (2.16) fait apparaître les différentes contributions des coûts opérationnels que le modèle cherche à minimiser. Nous retrouvons ainsi respectivement :

- la somme de l'ensemble des frais de transport entre les clients i et les entrepôts j pour l'ensemble des produits l ,
- la somme de l'ensemble des frais de transport entre les entrepôts j et les usines k pour l'ensemble des produits l ,
- les coûts fixes associés à l'ouverture et aux activités de l'ensemble des usines k ,
- les coûts fixes associés à l'ouverture et aux activités de l'ensemble des entrepôts j .

Les équations suivantes constituent donc les contraintes du modèle. Nous avons ainsi :

- l'équation (2.17), qui permet de s'assurer que la demande de chaque client est satisfaite,
- l'équation (2.18), qui assure que la demande satisfaite par l'entrepôt j pour l'ensemble des produits l ne dépasse pas la capacité totale de celui-ci,
- l'équation (2.19), qui restreint le nombre maximum d'entrepôts ouverts à W ,
- l'équation (2.20), qui empêche que chaque entrepôt j n'envoie plus de produit que ce qu'il n'a reçu des différentes usines k , et ce pour chacun des produits l ,
- l'équation (2.21), qui veille à ce que la production des produits l de chaque usine k ne dépasse pas la capacité totale de celle-ci,

- l'équation (2.22), qui limite le nombre maximum d'usines ouvertes à P ,
- l'équation (2.23), qui impose que les variables P_k et Z_j soient de type binaire puisque celles-ci définissent si les usines ou entrepôts sont ouverts ou non,
- l'équation (2.24), qui garantit que le modèle ne fournira pas de solutions négatives concernant les flux de produits entre les usines et entrepôts, ainsi que ceux entre les entrepôts et les clients.

Enfin, les auteurs proposent un algorithme heuristique pour résoudre ce problème de localisation d'installations. La procédure utilise la relaxation Lagrangienne afin de simplifier au préalable les contraintes difficiles et itère jusqu'à obtenir une solution satisfaisante ou lorsque le nombre d'itération limite sera atteint.

2.3.3.4.b Modèles dynamiques

Contrairement aux modèles statiques, les modèles dynamiques considèrent plusieurs horizons temporels. Ces modèles plus complexes permettent ainsi de considérer l'évolution au cours du temps de certains paramètres, comme la demande dont le volume ou l'emplacement pourraient changer. L'objectif poursuivi avec ces modèles est donc de pouvoir adapter la configuration de la supply chain en fonction de ces paramètres évolutifs et ainsi la rendre plus robuste. La volonté de rendre la supply chain plus "résistante" se justifie par les coûts importants liés à la modification de sa structure (agrandissement d'entrepôts, relocalisation de ceux-ci, ...). Par conséquent la solution se doit d'être "durable".

Comme pour les autres types de modèles, de nombreuses variantes de modèles dynamiques existent. Certains modèles vont par exemple être utilisés pour localiser un seul entrepôt, alors que d'autres vont considérer des chaînes logistiques à plusieurs niveaux. Des modèles plus complexes encore vont même jusqu'à inclure une dimension stochastique supplémentaire.

Enfin, l'emploi de modèles dynamiques nécessite de posséder énormément de données, ce qui rend leur mise en oeuvre difficile. Cela explique pourquoi ceux-ci sont donc moins répandus dans la littérature, au profit des modèles statiques.

2.3.3.4.c Modèles stochastiques

Contrairement aux types de modèles précédents, les modèles stochastiques ne considèrent l'ensemble des variables comme étant connues et fixes. Ceux-ci prennent en considération dans leur formulation la nature incertaine de paramètres tels que la localisation de la demande, l'emplacement des clients, les temps de trajet, etc. Tout comme les modèles dynamiques, les modèles stochastiques nécessitent une importante quantité de données quantitatives et qualitatives, afin de les mettre en oeuvre. Leur utilisation se justifie également par la volonté de mettre en place des solutions considérées comme plus robustes.

Il existe deux grandes approches différentes au sein des modèles stochastiques pour représenter des variables aléatoires. La première approche utilise des distributions de probabilités pour modéliser les variables

aléatoires. Celles-ci sont alors intégrées dans des modèles dans la formulation ressemble à celles des modèles décrits aux sections précédentes.

Le seconde approche dépeint le caractère aléatoire de certaines variables en établissant différents scénarios possibles concernant leur évolution. L'objectif sera alors de trouver une solution s'accommodant aux mieux avec l'ensemble des scénarios. Cette solution permet donc d'appréhender au mieux les changements possibles de l'environnement dans lequel l'entreprise évolue, et ainsi apporter des réponses adaptées. La qualité de la solution fournie par le modèle sera donc tributaire de la qualité des scénarios considérés. Les différents futurs plausibles sont généralement dérivés de l'état actuel de l'environnement, tout en considérant les évènements majeurs potentiels de celui-ci.

Pour illustrer les modèles stochastiques, nous avons décidé de présenter celui développé par Aghezaff [18]. L'auteur expose dans un premier temps la formulation d'un modèle de type déterministe, constitué de plusieurs niveaux (usine - entrepôts - clients), autorisant les envois de produits entre entrepôts, et ne considérant qu'un seul type de produit. Celui sera utilisé dans un second temps pour en construire une mouture stochastique.

Par ailleurs, ce modèle présente la particularité d'être à la fois stochastique et dynamique. En effet, il considère plusieurs horizons temporels, et pour chacun d'eux, différents scénarios ont été établis. Ces derniers sont utilisés pour caractériser la nature incertaine de la demande. Celle-ci constitue le seul paramètre aléatoire du modèle, le reste étant supposé connu.

Ce modèle est utilisé afin de résoudre un problème de localisation d'entrepôts, dans le cadre donc d'une demande incertaine. De plus, il permet l'optimisation d'un programme stratégique d'expansion des usines visant ainsi à accroître leur capacité.

L'auteur a recours aux notations suivantes pour la formulation de son modèle :

1. *Indexes* :

- $t \in T$, est utilisé pour les différentes périodes étudiées ;
- $i \in I$, est utilisé pour designer l'ensemble des entreprises "candidates" au programme d'expansion de leur capacité,
- $j \in J$, est utilisé les différents emplacements possibles des entrepôts à localiser,
- $k \in K$, est utilisé pour les différents marchés à satisfaire,
- $s \in PS$, est utilisé pour les différents scénarios possibles.

2. *Paramètres* :

- α_i^t , le coût fixe actualisé pour étendre la capacité de l'entreprise i à la période t ,
- β_i^t , le coût variable actualisé pour étendre la capacité de l'entreprise i à la période t ,
- ψ_j^t , le coût fixe pour opérer l'entrepôt j au cours de la période t ,

- $\varphi_{jj'}^t$, le coût de transfert de produits de l'entrepôt j à l'entrepôt j' à la fin de la période t dans le cas où $j \neq j'$, ou le coût de détention des stocks dans le cas où $j = j'$,
- γ_{ij}^t , le coût de transport de l'entreprise i à l'entrepôt j au cours de la période t ,
- δ_{jk}^t , le coût de transport de l'entrepôt j au marché k au cours de la période t ,
- ν_i^0 , la capacité initiale de l'entreprise i au début de l'horizon de planification,
- m_i^t , l'extension de capacité maximale de l'entreprise i au cours de la période t ,
- k_j^t , la capacité de l'entrepôt j au cours de la période t ,
- d_k^t , la demande du marché k au cours de la période t (présumée discrète et stochastique)
- e_i^{ts} , la "variable d'erreur" indiquant un éventuel manque de capacité pour l'entreprise i , au cours de la période t , dans le cas du scénario s ,
- ε_j^{ts} , la "variable d'erreur" indiquant un éventuel manque de capacité pour l'entrepôt j , au cours de la période t , dans le cas du scénario s ,
- ω_1 , le coût unitaire en cas de capacité insuffisante pour les entreprises,
- ω_2 , le coût unitaire en cas de capacité insuffisante pour les entrepôts,
- ξ_s , la fonction objectif pour le scénario s ,
- p_s , la probabilité d'occurrence du scénario s .

3. Variables décisionnelles :

- x_i^t , la variable de décision binaire qui vaut 1 si la capacité de l'entreprise i est agrandie au cours de la période t , et qui vaut 0 sinon,
- u_i^t , le niveau d'expansion de la capacité de l'entreprise i au cours de la période t ,
- y_j^t , la variable de décision binaire qui vaut 1 si l'entrepôt j est en activité au cours de la période t , et qui vaut 0 sinon,
- v_{ij}^{ts} , la proportion de capacité disponible à l'entreprise i et assigné à l'entrepôt j au cours de la période t , et pour le scénario s ,
- w_{jk}^{ts} , la proportion de demande du marché k satisfaite par l'entrepôt j au cours de la période t , et pour le scénario s ,
- $f_{jj'}^{ts}$, la quantité de produits transférée de l'entrepôt j à l'entrepôt j' à la fin de la période t , et pour le scénario s .

La version stochastique du modèle d'Aghezaff s'énonce de la façon suivante :

$$\text{Min } Z_R = \sum_{s \in PS} p_s \cdot (\xi_s + \omega_1 \cdot \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} e_i^{ts} + \omega_2 \cdot \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \xi_j^{ts}) \quad (2.25)$$

Avec :

$$\varepsilon_s = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} (\alpha_i^t \cdot x_i^t + \beta_i^t \cdot u_i^t + \sum_{j \in J} \gamma_{ij}^t \cdot v_{ij}^{ts}) \quad (2.26)$$

$$+ \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (\psi_j^t \cdot y_j^t + \sum_{j' \in J} \varphi_{jj'}^t \cdot f_{jj'}^{ts} + \sum_{k \in K} \delta_{jk}^t \cdot w_{jk}^{ts}) \quad (2.27)$$

Tel que :

$$\sum_{j \in J} v_{ij}^{ts} - \sum_{\tau=1}^t u_i^\tau - e_i^{ts} \leq v_i^0; \quad \forall i, t, s \quad (2.28)$$

$$u_i^t - m_i^t \cdot x_i^t \leq 0; \quad \forall i, t \quad (2.29)$$

$$\sum_{i \in I} v_{ij}^{ts} + \sum_{j' \in J} f_{j'j}^{t-l,s} - \sum_{k \in K} w_{jk}^{ts} - \sum_{j' \in J} f_{jj'}^{ts} = 0; \quad \forall j, t, s \quad (2.30)$$

$$\sum_{k \in K} w_{jk}^{ts} + \sum_{j' \in J} f_{jj'}^{ts} - k_j^t \cdot y_j^t - \epsilon_j^{ts} \leq 0; \quad \forall j, t, s \quad (2.31)$$

$$\sum_{k \in K} w_{jk}^{ts} = d_k^{ts}; \quad \forall j, t, s \quad (2.32)$$

$$u_i^t, v_{ij}^{ts}, f_{jj'}^{ts}, w_{jk}^{ts}, e_i^{ts}, \epsilon_j^{ts} \geq 0 \quad x_i^t, y_j^t \in \{0, 1\} \quad i, j, j', k, t, s \quad (2.33)$$

Le coût total Z_R à minimiser pour les différents scénarios s (2.25) fait intervenir dans sa formulation, la somme des coûts provenant de la fonction objectif ξ_s , et des coûts liés aux manques de capacité pour les entreprises et les entrepôts. Cette somme est pondérée par la probabilité d'occurrence des scénarios.

Les coûts liés aux manques de capacité peuvent être assimilés à un manque à gagner ou encore à des pénalités. Celles-ci permettent de tenir de compte du non respect des contraintes du modèle pour l'ensemble des scénarios s . En effet, il est peu probable que la solution fournie par l'algorithme reste à la fois optimale et faisable pour chaque scénario s .

Quant à la fonction objectif ξ_s , celle-ci se compose de l'ensemble des coûts survenant du côté des entreprises (2.26) et de l'ensemble des coûts survenant du côté des entrepôts (2.27). Dans l'équation (2.26), nous pouvons donc identifier respectivement les coûts fixes pour étendre une entreprise i , les coûts variables liés à l'extension de l'entreprise i et les frais de transport pour l'envoi de produits de l'entreprise i à l'entrepôt j . L'équation (2.27) est formée respectivement des coûts d'opération de l'entrepôt j , des frais de transferts de produits entre entrepôts ou de stockage, et des coûts de transport pour acheminer les produits des entrepôts aux différents marchés.

Concernant les contraintes du modèle pour chacune des périodes t , nous retrouvons :

- l'équation (2.28), qui assure que la capacité initiale de chaque entreprise, augmentée de l'ensemble des extensions de capacité décidées pour celle-ci, soit suffisante pour couvrir la quantité de produits livrée aux entrepôts,
- l'équation (2.29), qui assure que l'extension de capacité décidée pour l'entreprise n'excède pas la limite autorisée,
- l'équation (2.30), qui assure que la quantité de produits sortant de l'entrepôt n'excède pas la quantité de produits livrée à l'entrepôt,
- l'équation (2.31), qui assure que le flux de produits sortant de l'entrepôt n'excède pas sa capacité,
- l'équation (2.32), qui assure que la demande de chacun des marchands soit satisfaite,
- l'équation (2.33), qui assure que la solution fournie par l'algorithme d'optimisation respecte la nature des variables.

Enfin, pour résoudre le modèle, Aghezaff présente le développement d'un algorithme basé sur la relaxation Lagrangienne. Celle-ci va alors décomposer le modèle en deux sous problèmes, le premier étant similaire à la version déterministe du modèle pour chaque scénario, et le second servant à déterminer la localisation des entrepôts et les extensions des entreprises.

2.3.4 Zoom sur les coûts de transport

A présent que nous avons décrit brièvement les principaux types de modèles de localisation rencontrés en supply chain network design, focalisons-nous un instant sur leur formulation des coûts de transport. Les quatre modèles présentés aux sections précédentes les ont exprimés de la façon suivante :

- le modèle analytique de Bouchery et Fransoo [12] exprime les coûts de transport comme étant un coût par container,
- le modèle déterministe de Schuster Puga et Tancrez [16], décrit les coûts de transport comme étant un coût par camion,
- le modèle déterministe de Pirkul et Jayaraman [17], ainsi que le modèle stochastique d'Aghezaff [18], représentent les coûts de transport comme étant un coût par unité.

A l'exception du modèle de Schuster Puga et Tancrez [16], nous remarquons donc que les autres modèles partagent une définition commune des coûts de transport. Seule la définition de l'unité transportée varie quelque peu (container ou produit).

Bravo et Vidal [19] ont dressé ce même constat dans leur revue de la littérature centrée sur la représentation mathématique des frais de transport dans les problèmes de localisation en supply chain network design. En effet, les auteurs remarquent que les coûts de transport sont généralement exprimés comme un coût par unité expédiée ou comme un coût par km parcouru. Il est très rare de trouver des modèles considérant des coûts par véhicule, ainsi que leur capacité de chargement.

De plus, peu d'articles scientifiques prennent également en considération le poids ou le volume des éléments transportés, et il est encore plus rare de trouver des modèles qui tiennent compte des deux simultanément. Pourtant, ces caractéristiques constituent en pratique un des éléments majeurs dans le calcul des frais de transport, notamment lorsque l'on fait appel à une société externe de transport. Le poids aura également un impact sur la consommation de carburant, élément qui est parfois intégré dans la comptabilisation des coûts de transport.

Par ailleurs, la majorité des modèles de la littérature poursuivent l'objectif de minimiser les coûts, délaissant au passage l'aspect service client. De plus très peu de modèles cherchent à maximiser le profit plutôt que de réduire les frais opérationnels. Afin d'optimiser ces derniers, les modèles visent généralement à obtenir le meilleur compromis entre coûts liés aux entrepôts et coûts de transport. Leur contribution respective dans les coûts totaux de la supply chain était de l'ordre 33% et 64% aux USA en 2011 [19]. Selon les auteurs, il serait logique de penser qu'une augmentation de la capacité des camions impliquerait un accroissement de la taille des stocks. Toutefois, une capacité de transport plus importante aurait pour conséquence de réduire la fréquence des envois et ainsi de diminuer l'importance des coûts de transport. Il serait donc intéressant de voir ce qu'il adviendrait des coûts de stockage, ainsi que des coûts totaux dans ce cas.

Sur base de l'ensemble des constatations effectuées, plusieurs questions apparaissent après cette revue de la littérature :

- Quel serait l'impact d'une formulation différente, et plus "complète" des coûts de transport sur la localisation des installations ? Quel en serait l'impact sur les flux de matière dans la chaîne logistique ? Quel est également l'impact sur les coûts totaux ?
- Quel serait l'impact d'une variation de la capacité des camions sur la solution optimale en termes de localisation d'installations, et coût totaux ? Quel serait l'impact de ne pas exploiter l'entièreté de la capacité de charge des camions ?
- Quel serait l'impact d'une augmentation des coûts de stockage sur les coûts de transport formulés différemment et l'emplacement des installations ?
- Quel serait les conséquences d'une augmentation de la distance parcourue par les camions dans le cas d'une modification de la formulation des frais de transport ?

Toutes ces questions ont donc motivé l'analyse exposée dans les chapitres suivants. Pour ce faire, une modification du modèle discret le plus couramment utilisé pour les problèmes de localisation d'installations, a été employée.

Chapitre 3

Présentation du modèle

Sommaire

3.1	Uncapacited Facility Location Problem	27
3.2	Décomposition du terme $C_{i,j}$ du <i>UFLP</i>	28
3.3	Motivations de l'extension	29

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps exposer le modèle discret usuel de localisation d'installations. Dans un second temps, nous présenterons la modification apportée à celui-ci. Celle-ci a été utilisée pour réaliser les différentes expériences numériques détaillées par la suite. Enfin, nous expliquerons pourquoi nous avons opté pour cette modification.

3.1 Uncapacited Facility Location Problem

Dans l'optique de clairement illustrer l'impact qu'à la manière de comptabiliser les coûts de transports sur le design d'un réseau, nous sommes repartis du modèle standard de localisation d'installations. Celui-ci, couramment appelé "*Uncapacited Facility Location Problem (UFLP)*" dans la littérature, est un modèle discret de type statique et déterministe. Il émet donc l'hypothèse que les clients se retrouvent aux différents noeuds du réseau, tout comme l'ensemble des emplacements potentiels pour les installations à localiser. Étant donnée sa nature, les paramètres du modèle sont tous considérés comme étant connus.

De plus, comme son nom l'indique, le *UFLP* ne considère pas la capacité des installations. Nous ne considérerons également qu'un seul produit est traité dans la chaîne logistique.

Nous aurons recours aux notations suivantes pour le modèle :

1. *Indexes* :

- $i \in I$ est utilisé pour désigner l'ensemble des emplacements potentiels des installations i ,

- $j \in J$ est utilisé pour désigner l'ensemble des clients j .

2. Paramètres :

- C_{ij} symbolise le coût variable total afin que l'entrepôt i puisse répondre à la demande du client j . Ces coûts variables sont supposés être une fonction linéaire de la quantité envoyée de produits par l'entrepôt i au client j . Il s'agit d'un coût par unité transportée multiplié par le nombre d'unité pour satisfaire la demande du client. Par conséquent les économies d'échelle ne sont donc pas prises en compte.
- F_i représente les coûts fixes pour ouvrir l'entrepôt i .

3. Variables décisionnelles :

- y_{ij} désigne la variable binaire égale à 1 si l'entrepôt i dessert le client j et qui vaut 0 sinon,
- x_i constitue la variable binaire valant 1 si l'entrepôt i est ouvert et valant 0 sinon.

Le *UFLP* s'énonce de la façon suivante :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{i,j} \cdot y_{i,j} + \sum_{i=1}^n F_i \cdot x_i \quad (3.1)$$

Tel que :

$$\sum_{i \in I} y_{i,j} = 1; \quad \forall j \in J \quad (3.2)$$

$$y_{i,j} \leq x_i; \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.3)$$

$$y_{i,j} \in \{0, 1\}; \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.4)$$

$$x_i \in \{0, 1\}; \quad \forall i \in I \quad (3.5)$$

Tout comme pour la majorité des modèles employés dans les problèmes de localisation d'installations, l'objectif poursuivi est de minimiser l'ensemble des coûts opérationnels. Pour y parvenir, la solution du modèle renseignera donc sur les entrepôts à ouvrir, ainsi que sur les clients qu'ils doivent desservir.

Le *UFLP* est soumis à quatre contraintes à respecter. La contrainte (3.2) permet de s'assurer que la demande de chaque client soit satisfaite, et ce par un seul entrepôt. L'équation (3.3) empêche qu'un client ne soit fourni par un entrepôt non ouvert. Enfin, les contraintes (3.4) et (3.5) obligent le modèle à respecter la nature binaire des variables décisionnelles.

3.2 Décomposition du terme $C_{i,j}$ du *UFLP*

La modification apportée au modèle présenté à la section 3.1 porte donc sur le terme C_{ij} relatif aux coûts de transports. Nous avons procédé à une décomposition de celui-ci dans le but de faire apparaître des termes

relatifs à la capacité des camions, ainsi qu'à leur taux de remplissage. Il est important de noter que seul le transport de marchandises par camion sera considéré par la suite. Les autres hypothèses restent identiques.

Pour cette "variante" du modèle, les notations précédemment employées restent d'actualité. Ainsi, les indexes i et j sont toujours relatifs aux entrepôts et aux clients. Le paramètre F_i et les variables de décision y_{ij} et x_i restent quant à eux inchangés. Enfin, les nouveaux paramètres introduits suite à cette décomposition sont :

- a , qui représente le coût de transport pour un camion parcourant 1 km (en $\frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{camion}}$),
- $\delta_{i,j}$, qui désigne la distance séparant l'entrepôt i du client j ,
- d_j , qui symbolise la demande du client j ,
- τ , qui est le taux de remplissage des camions,
- T , qui désigne la capacité (en terme de produit) des camions.

Le terme $C_{i,j}$ a donc été décomposé de la façon suivante :

$$C_{i,j} = a \cdot \delta_{i,j} \cdot \frac{d_j}{\tau \cdot T}; \quad (3.6)$$

La nouvelle version de la fonction objective s'écrit donc :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a \cdot \delta_{i,j} \cdot \frac{d_j}{\tau \cdot T} \cdot y_{i,j} + \sum_{i=1}^n F_i \cdot x_i \quad (3.7)$$

L'objectif du modèle reste donc de minimiser l'ensemble des coûts opérationnels, aux sein desquels figurent toujours les coûts de transport et les coûts fixes d'ouverture. La solution du modèle précisera comme précédemment les entrepôts à ouvrir, ainsi leur affectation en terme de clients. Enfin, les contraintes sont inchangées par rapport au modèle classique.

3.3 Motivations de l'extension

Cette modification apportée au modèle standard peut se justifier par plusieurs raisons. Tout d'abord, le fait d'introduire le taux de remplissage permet d'intégrer des considérations plus "physique", tels que le poids ou les dimensions des produits à transporter. A titre d'exemple, dans le cas d'un transport de marchandise liquide, le taux de chargement pourrait être formulé de la façon suivante :

$$\tau = \frac{\text{Poids du chargement}}{\text{Charge utile maximale}} \quad (3.8)$$

Cela permettrait donc par exemple d'incorporer la consommation de carburant dans la structure des coûts de transport, étant donné que celle-ci pourrait être formulée comme une fonction de cette définition du taux de remplissage qui fait intervenir le poids de la marchandise.

Ensuite, l'optimisation du taux de remplissage des camions constitue un des leviers majeurs dans l'optimisation générale de l'activité de transport [6]. La compétitivité de celle-ci en dépend puisque, plus le taux de remplissage sera élevé, plus le coût par "unité" transportée diminuera. Toutefois la capacité d'un camion n'est pas toujours exploitée à son maximum. Un camion de taille adéquate peut ne pas être toujours disponible au moment de transporter de la marchandise, engendrant ainsi une sous-utilisation de sa capacité. En outre, la gestion de ce taux de remplissage varie en fonction des caractéristiques du transporteur. En effet, la probabilité de sous-exploiter la capacité des véhicules est plus importante pour les entreprises transportant leurs propres marchandises que pour les transporteurs pour compte d'autrui. En effet, ces derniers, dont le transport est l'activité principale, feront plus d'effort pour optimiser le taux de remplissage [20].

Par ailleurs, considérer simplement un coût de transport unité sous-entend que la capacité des camions est toujours à son maximum, ce qui est loin d'être le cas en réalité. En effet, comme le prouvent les statistiques de 2016 au Royaume-Uni [21], le taux de chargement moyen mesuré s'élevait à seulement 68%. De plus, comme le montre la figure 3.1, les taux de chargement des quelques pays européens représentés dans l'étude [5] est également loin d'atteindre les 100%.

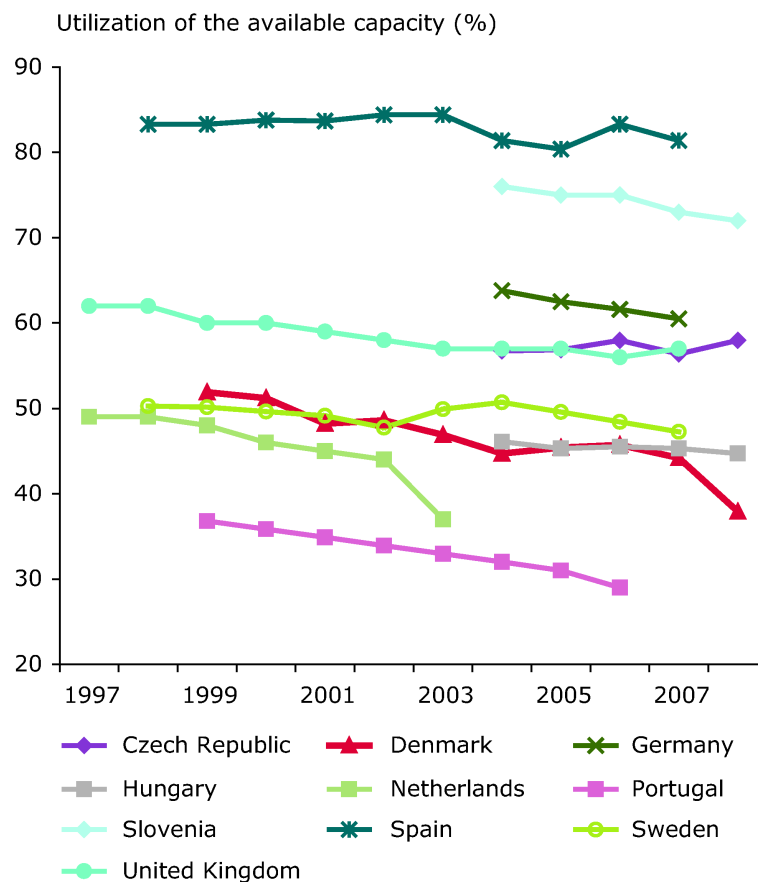


FIGURE 3.1 – Taux de remplissage moyen de quelques pays européen [5]

Enfin, comme l'illustre la figure 3.2, le taux de remplissage d'un camion ne reste pas constant au cours de l'entièreté de ses déplacements. Considérer un taux de remplissage moyen permet donc de mieux représenter la réalité du terrain. De plus, ce taux de remplissage peut également varier en fonction de la structure de la supply chain. Un lien fort existe donc entre ces deux éléments.

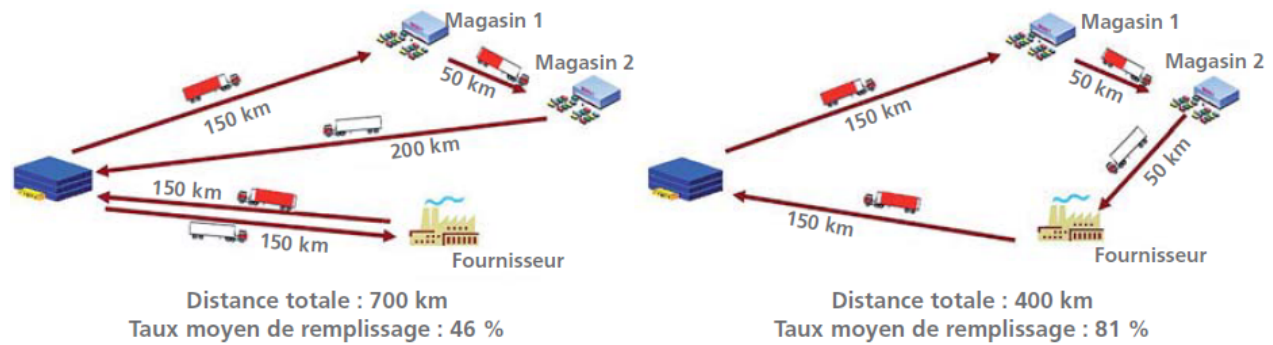


FIGURE 3.2 – Types de modèles de localisation [6]

Chapitre 4

Méthodologie employée

Sommaire

4.1 Paramètres du modèle et hypothèses	32
4.2 Réalisation des expériences numériques	34

A présent que la nouvelle version du modèle a été introduite, nous allons maintenant détailler la méthodologie employée pour réaliser les expériences numériques. Nous commencerons par exposer les valeurs considérées pour les différents paramètres du modèles, ainsi que les hypothèses utilisées. Ensuite, nous décrirons les outils et la procédure auxquels nous avons eu recours.

4.1 Paramètres du modèle et hypothèses

Tout d'abord, les expériences numériques ne se basent pas sur un cas réel. Nous avons considéré que les clients sont positionnés au coeur d'une région carrée et que les emplacements potentiels des différents entrepôts se situent aux mêmes endroits que les clients. Le nombre de clients présents s'élève à 100, et 3 régions ayant respectivement pour taille M 200x200 km, 500x500 km et 1000x1000 km ont utilisées pour les expériences. Cela permettra ainsi de voir l'influence de la distance sur la solution. Pour chacune des 3 tailles, nous avons généré 10 fois de manière aléatoire la position de chacun de clients. 30 cartes différentes ont donc été ainsi créées afin d'obtenir des résultats plus généraux.

Ensuite, concernant les paramètres du modèle, nous avons défini leurs valeurs de la manière suivante :

- a , qui représente le coût de transport pour un camion parcourant 1 km, sera considéré comme un paramètre fixe pour l'ensemble des expériences réalisées. Sa valeur est de 1 €/(km.camion).
- $\delta_{i,j}$, qui désigne la distance séparant l'entrepôt i du client j , sera calculée. Étant donnée l'hypothèse concernant l'emplacement potentiels des entrepôts, il suffira simplement de définir la matrice des dis-

tances entre les différents clients.

- d_j , qui symbolise la demande du client j , sera comprise entre 50 et 150 unités. Cet intervalle sera d'application pour l'ensemble des expériences.
- τ , qui est le taux de remplissage des camions, variera entre 0.4 et 1, par pas de 0.1. Nous pourrions ainsi voir l'évolution de l'impact de ce paramètre sur la solution du modèle.
- T , qui désigne la capacité des camions, possédera 3 valeurs différentes, à savoir 10, 20, et 50. Cela signifie donc que les camions pourront transporter au maximum 50 unités et qu'étant donnée la demande possible, plusieurs aller-retours seront nécessaires pour la satisfaire. Nous pourrions ainsi étudier l'influence de la capacité de chargement sur les coûts, et la structure opérationnelle. Il est important de noter que nous considérerons une flotte de véhicule homogène et que par conséquent les capacités ne seront pas mélangées.
- F_i , qui représente les coûts fixes d'ouverture de l'entrepôt i , pourra avoir également 3 valeurs différentes, non mélangées (le coût fixe sera donc le même pour chaque entrepôt). Celles-ci valent 3600, 6200 et 8700 €. La façon dont ces valeurs ont été établies sera détaillée au chapitre suivant. Enfin, tout comme le taux de remplissage et la capacité de chargement, l'influence du coût fixe d'ouverture sera étudié au travers des différentes expériences numériques.

La table 4.1 ci-dessous résume les valeurs des différents paramètres :

Paramètre	Valeur	Unité
a	1	$\frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{camion}}$
δ_{ij}	à calculer	km
d_j	[50, ... ,150]	unité
τ	[0.4, ... ,1]	/
T	[10 ; 20 ; 50]	unité
F_i	[3600 ; 6200 ; 8700]	€
M	[200 ; 500 ; 1000]	km

TABLE 4.1 – Valeurs des paramètres du modèle

Enfin sur base du nombre de cartes générés, des hypothèses considérées et des valeurs choisies pour les différents paramètres, nous pouvons calculer le nombre d'expériences numériques à réaliser. Nous avons donc 30 cartes, pour lesquelles nous voulons étudier l'influence du taux de remplissage, de la capacité des camions et des coûts fixes d'ouverture. Ces paramètres possédant respectivement 7, 3, et 3 valeurs différentes, nous avons ainsi $30 \times 7 \times 3 \times 3 = 1890$ expériences numériques à réaliser.

4.2 Réalisation des expériences numériques

Afin de réaliser les nombreuses expériences numériques de manière efficace, nous avons utilisé la méthodologie représentée à la figure 4.1. Ainsi, nous avons employé Microsoft Excel, Fico Xpress IVE, et Octave, et nous avons mis en place des "interactions" entre ces différents programmes. Les données et quelques paramètres du modèle figurent dans un classeur Excel qui sont utilisés par le logiciel Fico Xpress IVE. Ce dernier écrit par la suite la solution dans la classeur Excel contenant les données. Celles-ci sont ensuite exploitées par Octave qui est employé pour analyser les résultats et tracer les différents graphes.

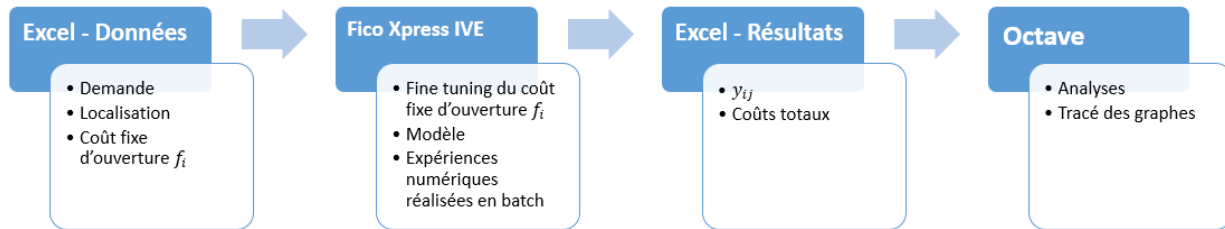


FIGURE 4.1 – Méthodologie employée

4.2.1 Excel - Données

Pour effectuer les expériences numériques, nous avons utilisé des classeurs Excel pour stocker les données nécessaires pour le modèle. Ceux-ci sont organisés de la façon suivante :

- la 1ère feuille reprend la demande des 100 clients,
- la 2e feuille renseigne la position des clients sur la carte en fournissant l'abscisse et l'ordonnée,
- la 3e feuille fournit la valeur des coûts fixes d'ouverture pour chacun des entrepôts f_i (inclure ce paramètre a permis aux cours de tests préliminaires de fixer des coûts différents pour l'ouverture des différents entrepôts),
- la 4e feuille est utilisée pour représenter la carte avec la position des différents clients dessus, un graphique représentant la demande de chaque client, et un graphique relatif aux coûts fixes d'ouverture f_i , comme représentés aux figures 4.2, 4.3 et 4.4. Cette feuille permet de faire une vérification visuelle rapide de la validité des données.

Afin de réaliser les 1890 expériences numériques, nous avons préparé 3 (pour les tailles de cartes différentes) x 10 (pour les 10 instances différentes pour chacune des cartes) x 3 (pour les valeurs de coûts fixes d'ouverture) x 3 (pour les valeurs de capacité de chargement des camions) = 270 classeurs Excel différents. Pour les répertorier de façon simple, nous avons eu recours au système de dénomination dont un exemple est illustré ci-dessous :

$$M1000 - F3600 - T10 - 1$$

M1000 est relatif à la taille de carte, F3600 à la valeur du coût fixe d'ouverture d'un entrepôt, T10 à la

capacité de chargement et 1 au numéro d'instance pour les 3 paramètres précités.

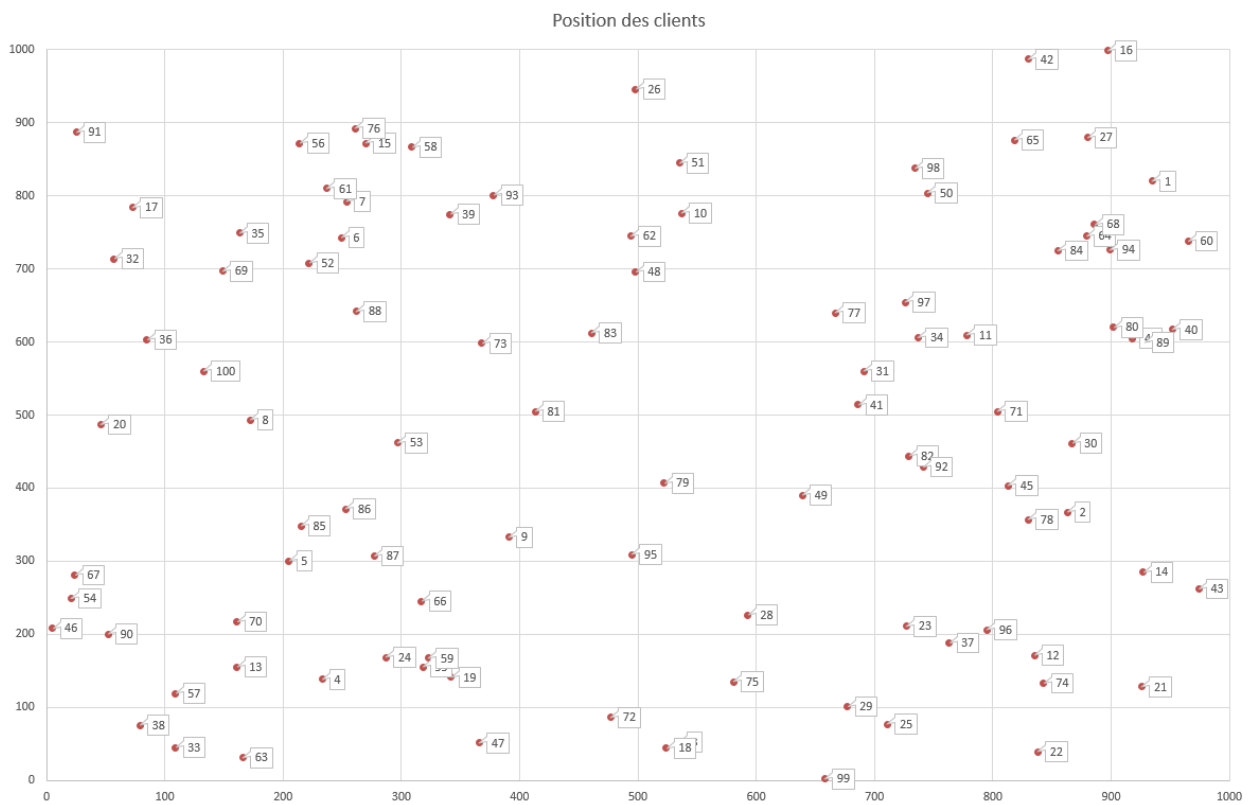


FIGURE 4.2 – Localisation des clients

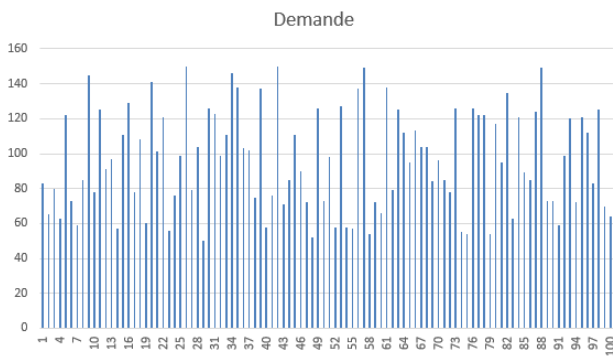


FIGURE 4.3 – Demande des clients



FIGURE 4.4 – Coûts fixes d'ouverture f_i

4.2.2 Fico Xpress IVE

Pour résoudre notre problème d'optimisation, nous avons eu recours au logiciel Fico Xpress IVE. Celui-ci s'utilise dans le cadre de la modélisation, de l'optimisation linéaire, et de l'optimisation linéaire en nombre entiers grâce à son solveur qui a recours à des méthodes telles que le "branch and bound" ou les simplexes. Ce programme présente l'avantage d'être simple à utiliser et de pouvoir utiliser des données issues de tableurs

ou de bases de données. Cette fonctionnalité nous ainsi permis d'utiliser Fico Xpress IVE en association avec Excel pour non seulement lire les données nécessaires au modèle, mais aussi pour y exporter la solution du problème afin de les exploiter plus facilement par la suite.

Par ailleurs, pour réduire le nombre d'interventions nécessaires pour réaliser l'ensemble des expériences numériques, nous avons implémenté dans le code des boucles permettant de faire varier le taux de remplissage et de réaliser l'optimisation pour chacune des 10 instances à la suite. Lorsque le code est exécuté, celui-ci met approximativement 6 minutes et 35 secondes pour effectuer 70 expériences numériques (soit un peu plus 5.6 secondes par expérience) pour lesquelles la solution optimale est trouvée à chaque fois.

Enfin, Fico Xpress Ive a également été utilisé pour déterminer les 3 valeurs du paramètre F_i . Pour ce faire, nous avons considéré, de manière arbitraire, un taux de remplissage τ de 0.8. Nous avons ensuite cherché par "essai-erreur" une première valeur pour F de sorte que la solution fournie Fico ouvre 10 à 12 entrepôts dans le cas où la capacité des camions est la plus petite ($T = 10$) et lorsque la région est la plus grande ($M = 1000\text{km}$). Cette première valeur constitue ainsi notre "borne inférieure" pour le paramètre F . En effet, les hypothèses incitent à des coûts fixes d'ouverture faibles vu qu'un grand nombre d'entrepôts seront ouverts (plus ou moins 1 entrepôt pour 10 clients). Nous avons abouti à une première valeur pour F égale à 3600€ . Nous avons ensuite cherché une "borne supérieure" pour F . Nous avons alors de nouveau considéré un taux de remplissage de 0.8, une taille de 200 km pour la région, et une capacité de chargement maximum pour les camions ($T = 50$). Nous avons de nouveau procédé par essai-erreur pour déterminer cette seconde valeur de F de sorte à ce que la solution du problème ouvre 1 ou 2 entrepôts, ce qui signifie donc des coûts fixes d'ouvertures élevés. Nous sommes ainsi arrivés à une seconde valeur de 8700 € . La troisième valeur des coûts fixes d'ouverture, et par conséquent la valeur intermédiaire, a été établie en faisant la moyenne des deux autres valeurs. Nous avons ainsi obtenu 6200€ pour cette moyenne.

4.2.3 Excel - Résultats

Lorsque Fico Xpress IVE a déterminé la solution du problème d'optimisation, celui-ci exporte la solution dans le fichier Excel contenant à la base les données nécessaires au modèle. Pour chacune des instances, les résultats sont écrits sur la feuille 5 du classeur, sous la forme d'un tableau de dimensions 70000 x 4 comme illustré à la figure 4.5 pour la variable y_{ij} . La première colonne reprend l'ensemble des emplacements possibles pour les entrepôts, qui rappelons-le est aussi l'emplacement des 100 clients à desservir. La seconde colonne correspond ainsi à ces derniers. La 3e colonne quant elle est relative au taux de remplissage τ des camions. Les chiffres de 1 à 7 désignent donc celui-ci, avec 1 correspondant donc à la valeur de 0.4 et 7 à la valeur de τ égale à 1.

Les coûts totaux à minimiser sont également exportés sur la 6e feuille du fichier Excel, sous la forme d'un tableau de dimensions 7 x 2, avec chaque ligne relative à une valeur de taux de remplissage.

1	1	1	0
1	1	2	0
1	1	3	0
1	1	4	0
1	1	5	0
1	1	6	0
1	1	7	0
1	2	1	0
1	2	2	0
1	2	3	0
1	2	4	0
1	2	5	0
1	2	6	0
1	2	7	0
1	3	1	0
1	3	2	0
1	3	3	0
1	3	4	0
1	3	5	0
1	3	6	0
1	3	7	0

FIGURE 4.5 – Demande des clients

4.2.4 Octave

Étant donné le grand nombre de résultats à analyser (plus de 18 900 000 lignes pour l'ensemble des tableaux), nous avons décidé d'avoir recours à Octave, qui est un logiciel libre de calcul numérique proche de Matlab. Ainsi, nous avons écrit 3 scripts différents :

- Le premier script permet d'exploiter le tableau des y_{ij} illustré à la figure 4.5, et de générer des graphes tels que ceux illustrés ci-dessous. Ils permettent ainsi de directement visualiser les différents entrepôts qui ont été ouverts, ainsi que les clients qu'ils desservent, afin de minimiser le coûts opérationnels. Cela présente également l'avantage de pouvoir observer directement l'évolution du nombre d'entrepôts, leur localisation, et leur affectation en fonction du taux de remplissage des camions τ , pour une carte, une valeur de F et une capacité de chargement T déterminés. Un exemple complet est illustré aux figures 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, et 4.12. Le script a permis de tracer ces graphes pour l'ensemble des expériences numériques réalisées, et ce "par lot" de 70 graphes (10 instances x 7 valeurs de taux de remplissage).
- Le second script a été réalisé dans le but d'analyser l'impact des paramètres τ , F , et T sur les coûts opérationnels. Le code écrit permet d'analyser en une seule fois l'ensemble des données pour une taille de région définie. Les résultats sont ensuite exportés sous forme de graphes qui seront présentés en détails au chapitre suivant.
- Le troisième script est quant à lui très similaire au 2e script, et est utilisé pour analyser l'influence des mêmes paramètres τ , F et T sur le nombre d'entrepôts ouverts. Pour ce faire, un algorithme extrait du tableau de variables décisionnelles y_{ij} , les autres variables décisionnelles x_i , afin de les étudier. Le code de ce script permet également de traiter en une fois l'ensemble des données pour une taille de région définie et d'exporter les résultats sous format graphique. Ceux-ci seront également exposés en détails au chapitre suivant.

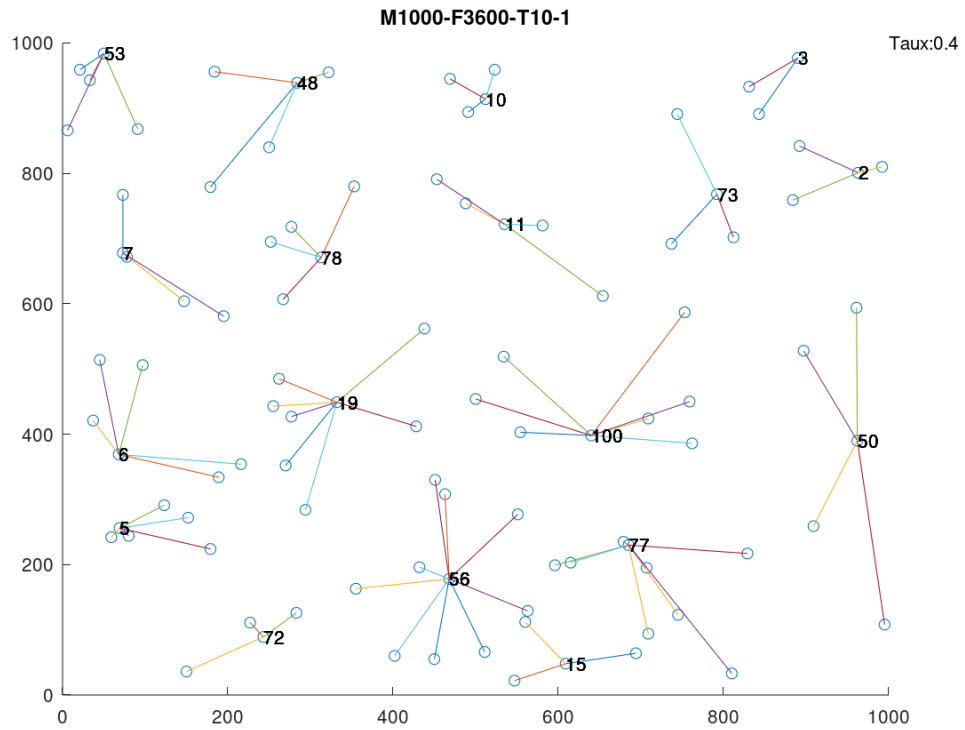


FIGURE 4.6 – Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.4

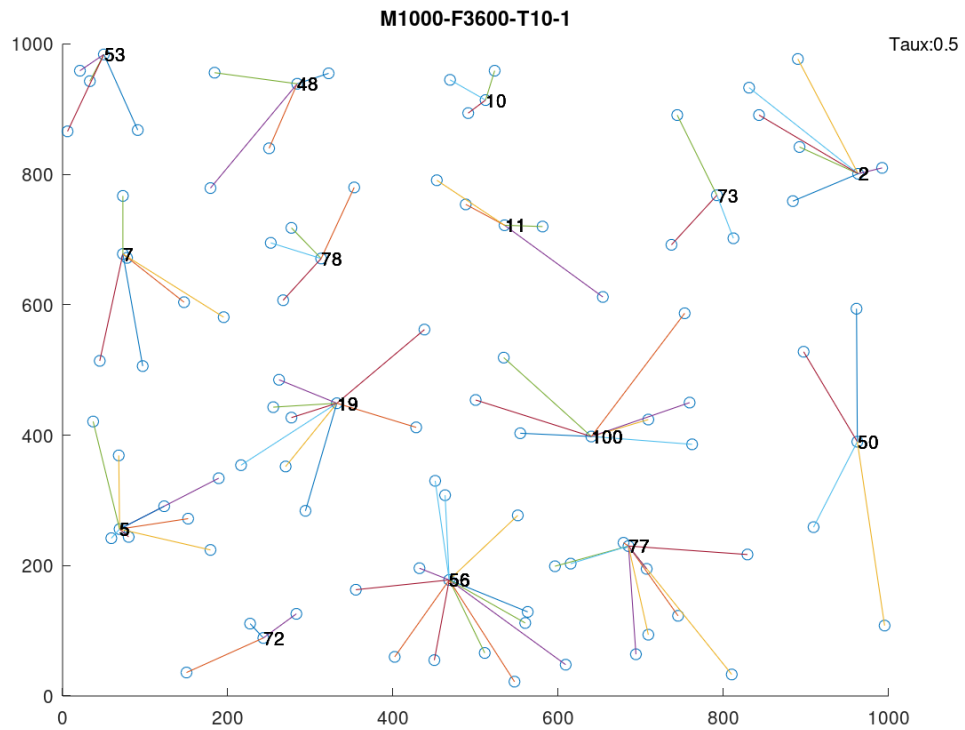


FIGURE 4.7 – Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.5

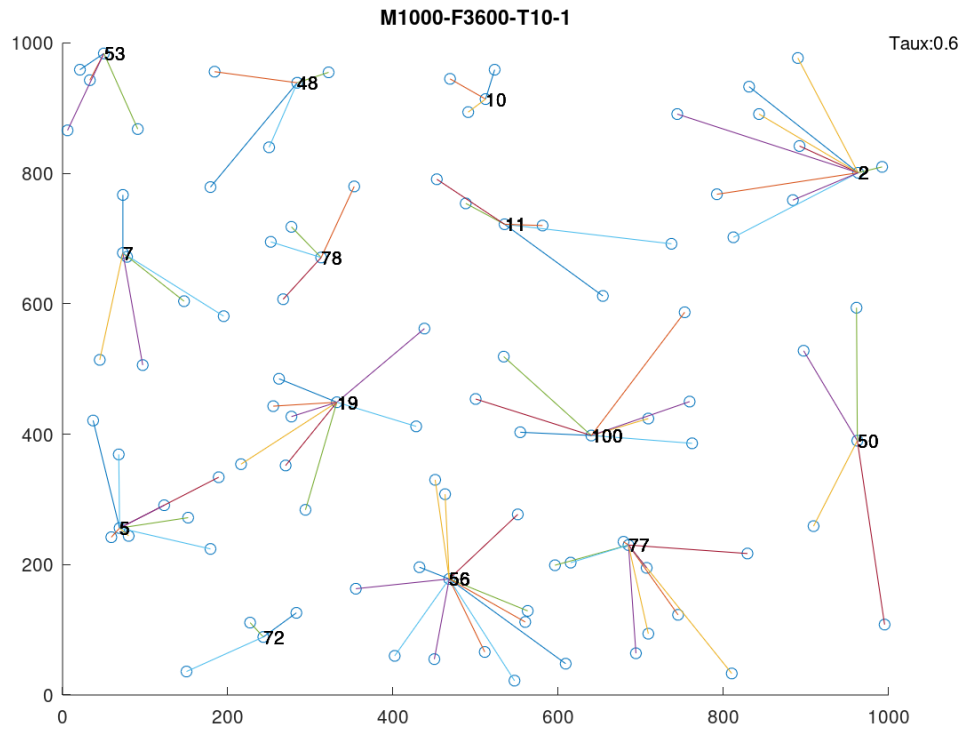


FIGURE 4.8 – Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.6

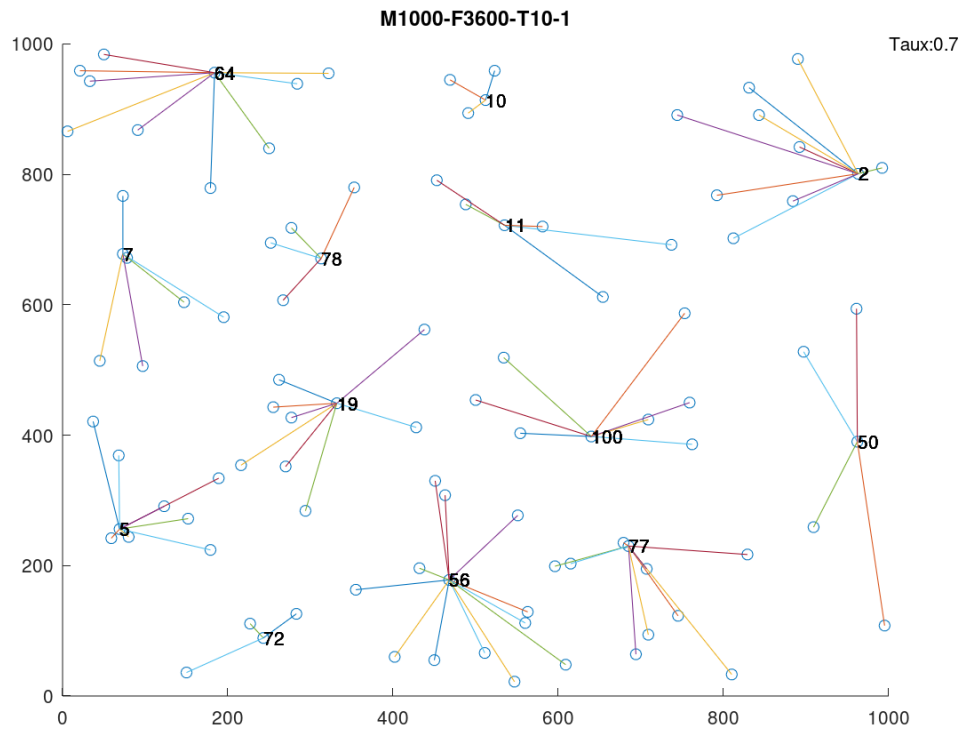


FIGURE 4.9 – Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.7

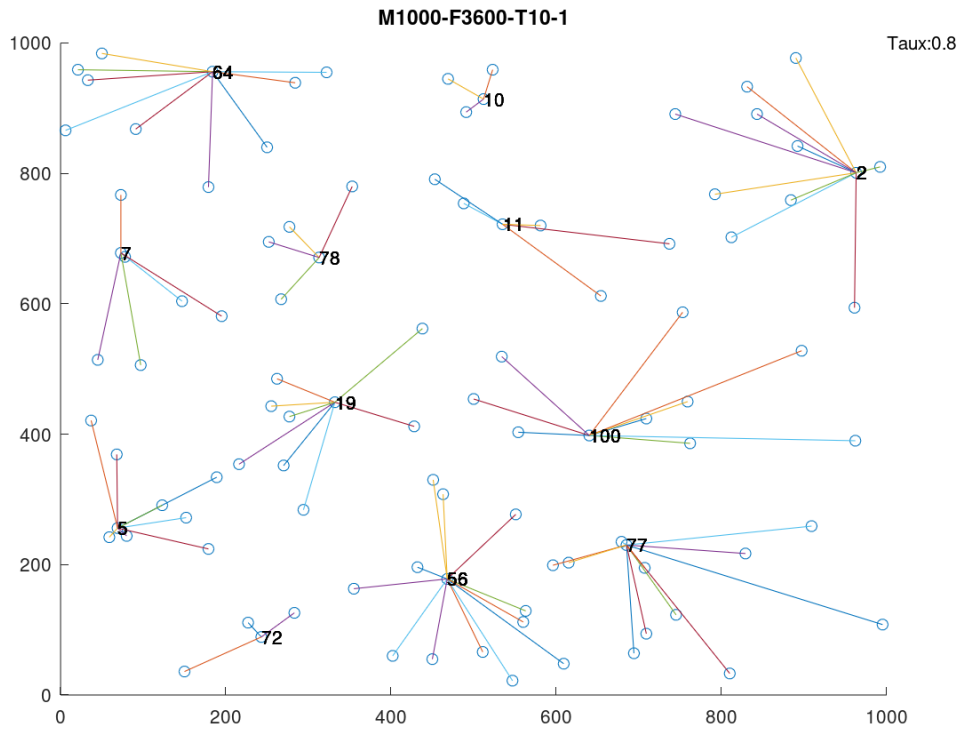


FIGURE 4.10 – Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.8

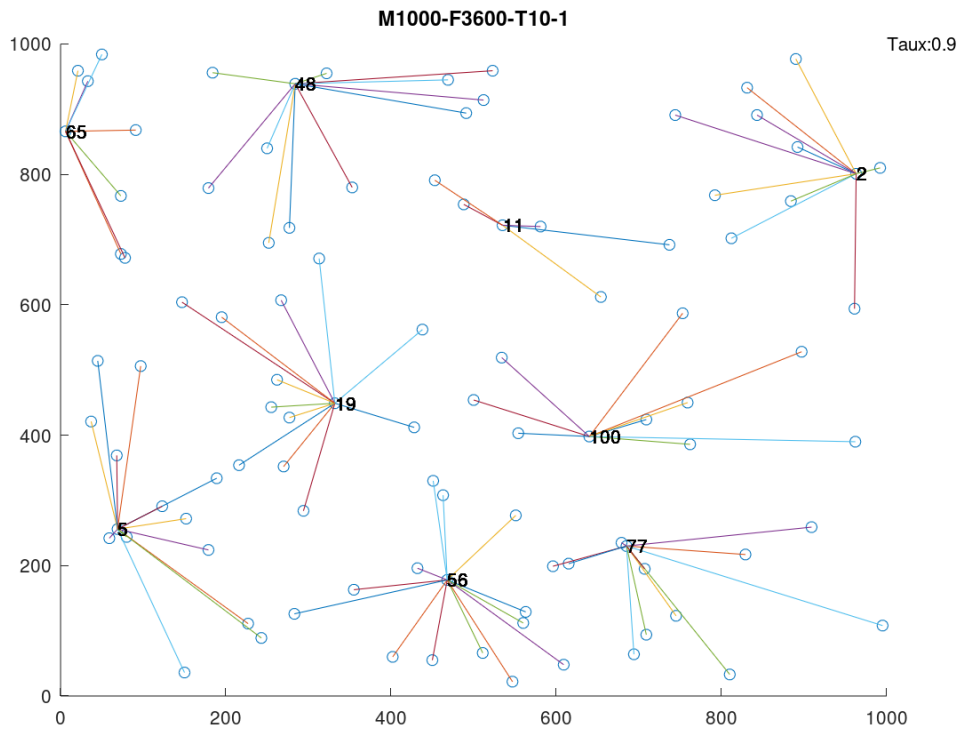


FIGURE 4.11 – Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 0.9

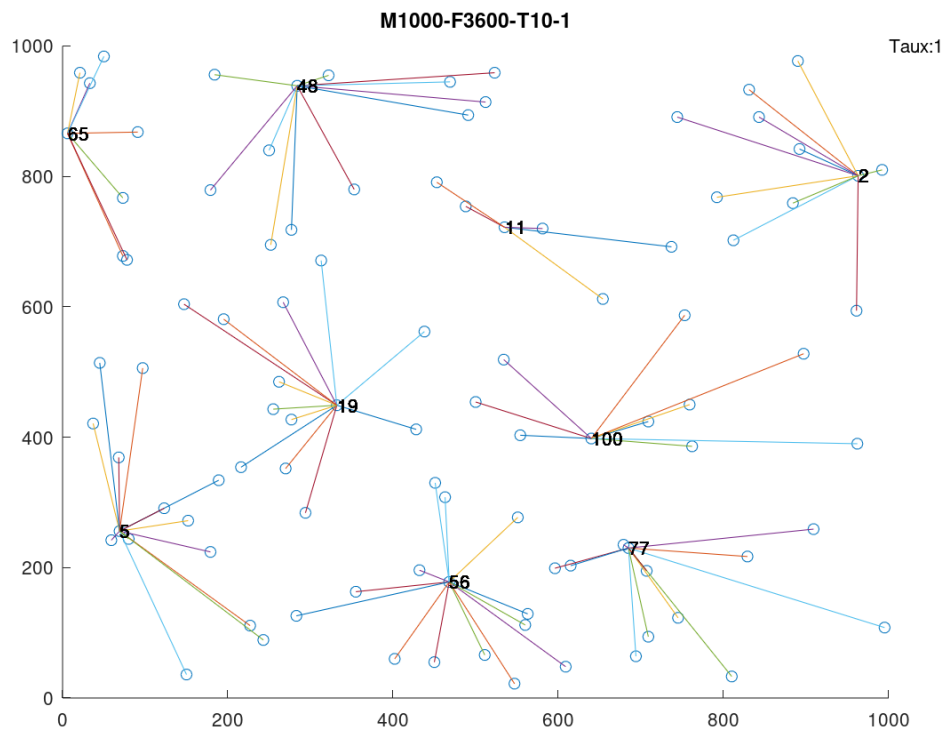


FIGURE 4.12 – Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 1

Chapitre 5

Analyse et discussion des résultats

Sommaire

5.1	Analyse de l'évolution du nombre d'entrepôts, de leur localisation et de leur affectation	42
5.2	Analyse de la variation des coûts opérations, de transports et de stockage . .	50
5.3	Discussion des résultats et recommandations	55

Dans ce chapitre nous exposerons et analyserons les résultats obtenus à l'aide de la méthodologie décrite au chapitre précédent. Nous discuterons ainsi de l'influence du taux de remplissage τ des camions, et ce pour les différentes valeurs de capacité de chargement T de ceux-ci, de coûts fixes d'ouverture F , et de taille de région M considérées à la section 4.1. Rappelons que nous étudions l'impact de ce paramètre principal suite à la modification de la formulation des coûts de transports dans la modélisation du problème de localisation d'installations à capacité non limitée.

Les analyses seront divisées en deux grandes parties. La première s'attardera sur l'évolution de la localisation des entrepôts, leur nombre, et leur affectation. La seconde s'intéressera à l'aspect financier, afin de comprendre l'effet de τ sur les coûts opérationnels.

Enfin, nous essaierons de dégager des conclusions sous forme de recommandations à prendre en considération au cours d'un projet de localisation d'installations.

5.1 Analyse de l'évolution du nombre d'entrepôts, de leur localisation et de leur affectation

A l'aide de l'ensemble des graphes similaires à ceux présentés à la sous-section 4.2.4, nous avons pu observer le nombre d'entrepôts, leur emplacement et leur affectation en termes de clients pour chacune des

expériences numériques réalisées. Ceux-ci nous ont permis d'obtenir une vue de détail de la situation pour chacune des cartes. Les autres graphiques, générés à l'aide du 3e script développé, nous ont permis quant à eux d'avoir une vision plus globale. Tout cela nous a donc aidé à comprendre les répercussions que peuvent avoir les différentes valeurs de τ , F , T , et M sur le réseau de distribution. Celles-ci sont détaillées aux sous-sections ci-après.

5.1.1 Influence du taux de remplissage

De manière générale, nous pouvons remarquer que l'influence du taux de remplissage est similaire pour l'ensemble des résultats. Cela est donc valable pour toutes les combinaisons M , T et F . Ainsi, plus le taux de remplissage est élevé, moins le nombre d'entrepôts nécessaire est important, comme l'illustrent les figures 5.1, 5.2, et 5.3. Davantage de figures sont disponibles dans l'annexe B. Cette première observation nous permet donc de dire que pour des faibles taux de remplissage, le modèle préférera donc multiplier les entrepôts afin de réduire l'envoi de camions peu chargés. Cela nous amène à penser, à ce stade, que les coûts de transports restent prédominants parmi les coûts opérationnels.

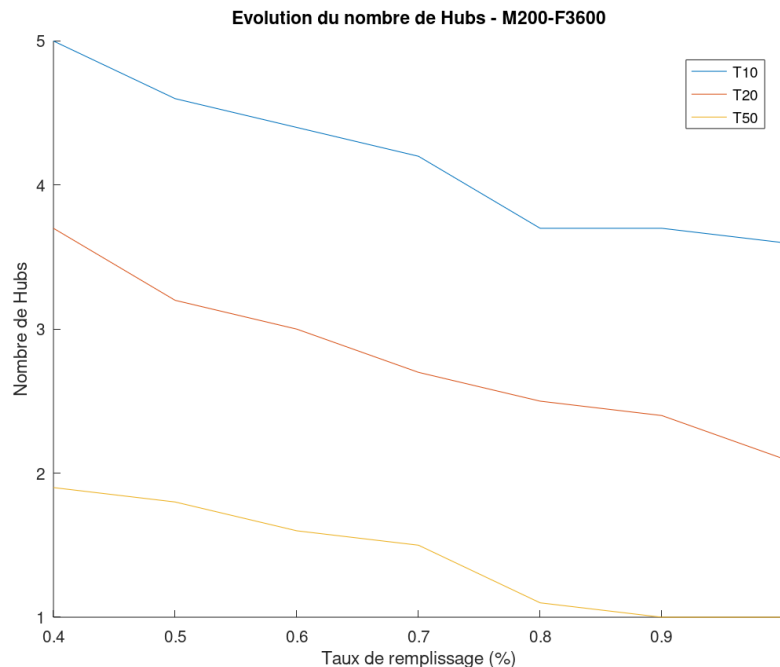


FIGURE 5.1 – Évolution du nombre d'entrepôts - M200-F3600

La table 5.1 présente une synthèse de l'évolution du nombre moyen d'entrepôts pour des taux de remplissage τ valant 0.4, 0.7, 0.8 et 1. Nous apercevons, entre les valeurs extrêmes de τ , une variation moyenne d'environ 66% du nombre d'entrepôts. Toutefois cette différence diminue quelque peu lorsque l'on étudie les taux de 0.7 et 0.8. En effet, le nombre d'entrepôts augmente en moyenne de 25% et 14.3 % lorsque τ passe respectivement de 1 à 0.7 et de 1 à 0.8. Enfin, si la valeur du taux passe de 0.8 à 0.7, la différence s'élève

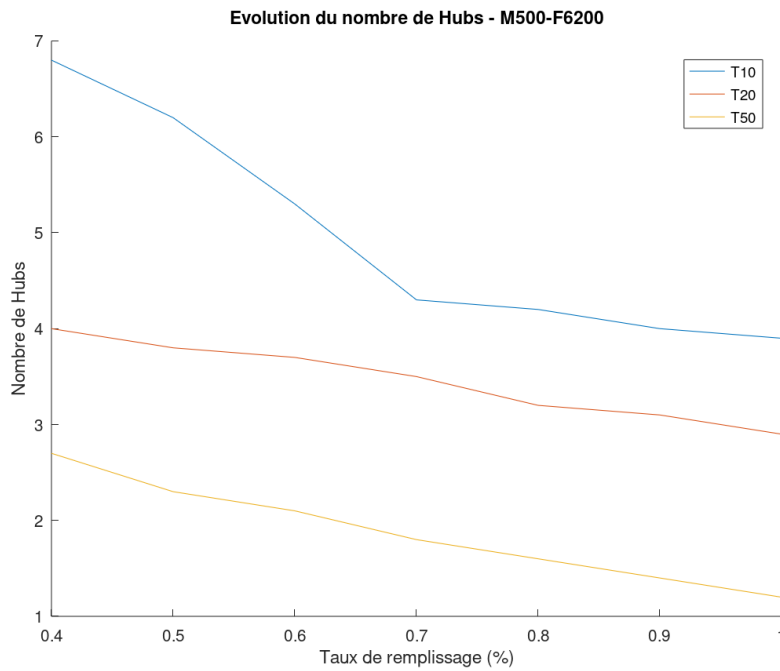


FIGURE 5.2 – Évolution du nombre d’entrepôts - M500-F6200

alors à 9.3%.

	T10				T20				T50			
	Taux 0.4	Taux 0.7	Taux 0.8	Taux 1	Taux 0.4	Taux 0.7	Taux 0.8	Taux 1	Taux 0.4	Taux 0.7	Taux 0.8	Taux 1
M200 F3600	5	4.2	3.7	3.6	3.7	2.7	2.5	2.1	1.9	1.5	1.1	1
M200 F6200	3.8	3.1	2.7	2.4	2.5	1.8	1.8	1.5	1.3	1	1	1
M200 F8700	3.2	2.4	2.3	1.8	2	1.5	1.3	1	1	1	1	1
M500 F3600	9,8	7,2	6,8	5,8	6,3	4,1	4	3,7	3,7	2,8	2,5	2,2
M500 F6200	6,8	4,3	4,2	3,9	4	3,5	3,2	2,9	2,7	1,8	1,6	1,2
M500 F8700	5,3	3,9	3,7	3,1	3,7	2,9	2,7	2,3	2,1	1,2	1	1
M1000 F3600	17	11.8	10.9	9	9.5	6.9	6.3	5.6	5.2	3.9	3.7	3.6
M1000 F6200	11.2	7.2	7	6	6.6	4.8	4.3	4	3.7	3.1	2.8	2.2
M1000 F8700	8,1	5,9	5,6	5	5,2	3,9	3,7	3,6	3,2	2,2	1,9	1,6

TABLE 5.1 – Évolution du nombre d’entrepôts pour différentes valeurs de taux

Cependant, la variation de taux de remplissage n’a pas simplement pour effet de modifier le nombre d’entrepôts ouverts. En effet, nous avons pu voir qu’en fonction de la valeur τ , certains entrepôts pouvaient être fermés au profit d’un nouvel entrepôt qui n’était pas ouvert avant. La table 5.2 résume ainsi pour chacune des configurations possibles des paramètres M , F , et T le nombre de fois où, sur les 10 instances, au moins un nouvel entrepôt était ouvert à un endroit différent.

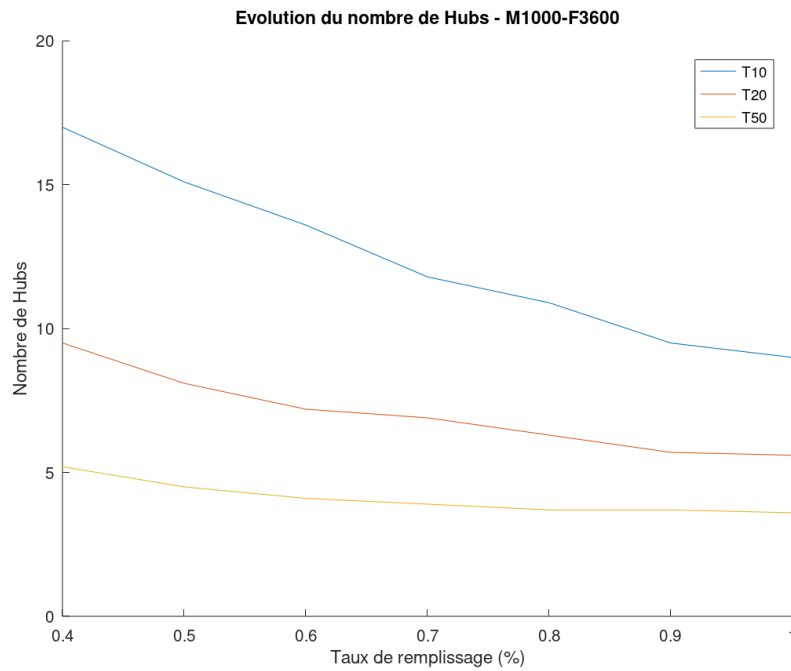


FIGURE 5.3 – Évolution du nombre d’entrepôts - M1000-F3600

	T10	T20	T50
F3600	4/10	6/10	3/10
M200	F6200 5/10	5/10	1/10
	F8700 7/10	3/10	0/10
F3600	6/10	5/10	4/10
M500	F6200 6/10	4/10	8/10
	F8700 3/10	4/10	4/10
F3600	9/10	7/10	4/10
M1000	F6200 7/10	4/10	7/10
	F8700 5/10	1/10	8/10

TABLE 5.2 – Nombre de cas pour lesquels des entrepôts disparaissent et au moins un nouveau apparaît

Nous pouvons voir dans la table 5.2 que dans de très nombreux cas, la solution optimale fait intervenir des entrepôts différents lorsque le taux de remplissage change. Ce phénomène a été constaté aussi bien pour des faibles taux de remplissage (par exemple lorsque le taux passe de 0,6 à 0,5), que pour des taux de remplissage plus important (par exemple lorsque le taux diminue de 0,9 à 0,8). En effet, les figures 4.10 et 4.11 permettent d’observer que le passage de τ de 0,9 à 0,8 a pour effet la fermeture de l’entrepôt numéro 48 au profit de l’ouverture des entrepôts 84 et 10.

En conclusion, le paramètre τ joue un rôle très important dans la configuration du réseau étudié. En effet, le nombre d'entrepôts et leur emplacement, et indirectement leur affectation, changent en fonction de fonction de ce taux de chargement. Ainsi considérer que les camions sont constamment utilisés à leur pleine capacité entraînera donc une divergence qui pourrait s'avérer être importante, entre la solution proposée par le modèle et la solution qui aurait dû être implémentée en réalité pour être optimale. Sous-estimer le taux de remplissage aura également pour conséquence de conduire à une solution proposant plus d'entrepôts, mal situés, que nécessaire. Tout cela aura également des répercussions sur les coûts opérationnels qui seront alors plus élevés.

5.1.2 Influence de la capacité de chargement des camions

Comme nous pouvons le voir aux figures 5.1, 5.2, et 5.3, la capacité de chargement des camions influence également le nombre d'entrepôts nécessaires pour satisfaire la demande de l'ensemble des clients. Cette variation du nombre d'entrepôts peut s'avérer être importante dans certains cas, pour une même valeur de M , de F et de τ . En effet, de manière globale (toutes valeurs de τ , M , et F confondues) nous avons expérimenté des écarts de l'ordre de 35,5% lorsque la capacité minimale de 10 est multipliée par 2, et d'environ 63.7% lorsque la capacité passe de 10 à 50. La diminution du nombre d'entrepôts ouverts lorsque la capacité passe de 20 à 50 s'élève quant à elle à presque 42.9%. Plus de résultats sont visibles dans l'annexe B.1.

5.1.3 Influence des coûts fixes d'ouverture

Concernant les coûts fixes d'ouverture d'entrepôts F , des conclusions similaires à celles concernant T peuvent être tirées. Ainsi comme le montrent les figures 5.4, 5.5 et B.11, des coûts fixes plus élevés inciteront le modèle à proposer une solution avec moins d'entrepôts ouverts, à τ , M et T équivalents. En moyenne, lorsque F passe de 3600€ à 6200€ nous pouvons constater une réduction de l'ordre de 29,2% du nombre d'entrepôts ouverts et une diminution de 23.9% entre des coûts de 6200€ et 8700€. La variation est de l'ordre de 45.7% en termes d'entrepôts ouverts entre les deux valeurs extrêmes de F considérées. Ces constatations nous amènent donc à considérer que les coûts d'ouverture ont un impact moins grand que la capacité des camions. Enfin, les figures non exposées dans cette sous-section se retrouvent dans l'annexe B.2.

5.1.4 Influence de la taille de la région

Terminons cette première partie de l'analyse en nous penchant à présent sur l'influence que joue le paramètre M sur le réseau d'entrepôts. Comme le révèlent les figures 5.7, 5.8, et 5.9, une augmentation de la taille de la région considérée, et par conséquent une majoration potentielle de la distance à parcourir entre les entrepôts et les clients, engendre une hausse du nombre d'entrepôts nécessaires. Cela révèle donc une fois de plus la tendance à vouloir "contenir" les coûts de transports puisque ceux-ci sont proportionnelles à

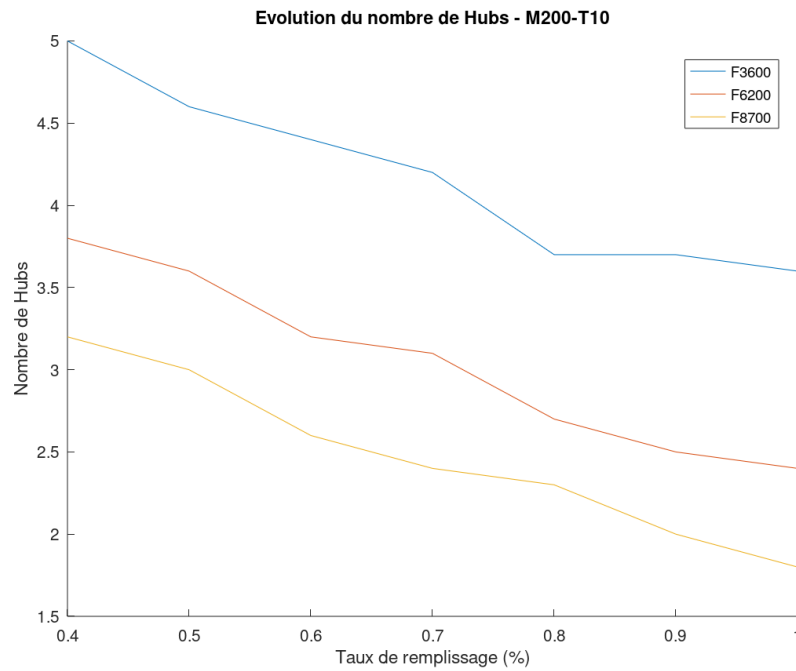


FIGURE 5.4 – Évolution du nombre d'entrepôts - M200-T10

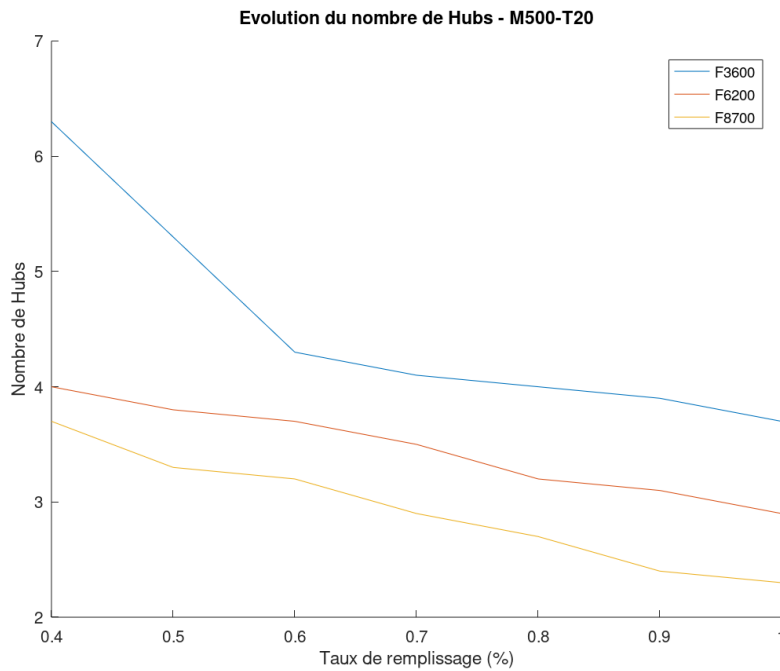


FIGURE 5.5 – Évolution du nombre d'entrepôts - M500-T20

la distance parcourue. Pour l'ensemble des configurations possibles pour F , T et τ , nous avons pu observer un écart moyen de l'ordre de 74.3% entre des régions pour lesquelles M valent 200 km et 500 km. Celui-ci s'élève à 56% lorsque que nous comparons des régions de "500km" et "1000km". Enfin lorsque nous étudions cette différence pour les deux valeurs extrêmes pour M , celle-ci est de 169.7%. Ces trois valeurs moyennes

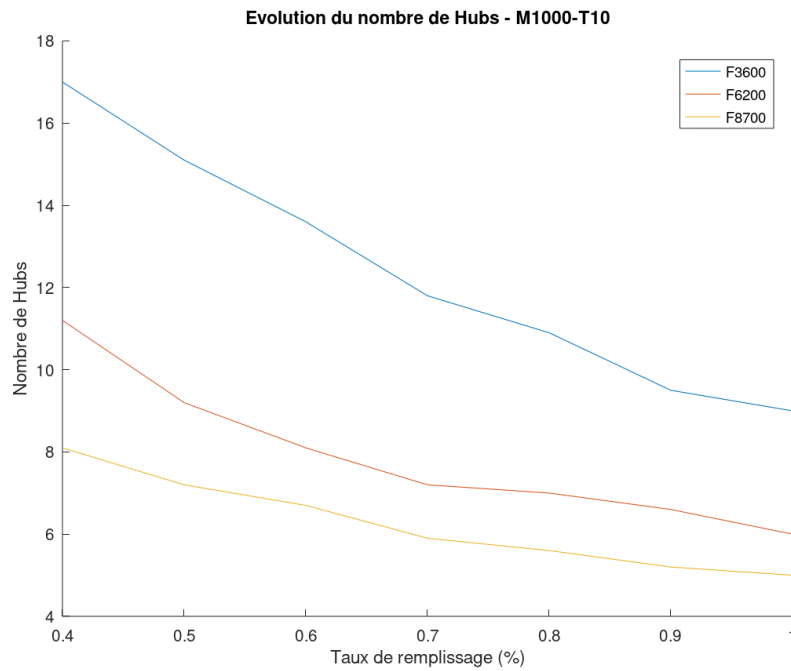


FIGURE 5.6 – Évolution du nombre d’entrepôts - M1000-T10

sont relativement semblables pour chacun des taux de remplissage, signifiant ainsi que l’influence de M est identique pour chacun d’eux. Des résultats complémentaires peuvent être consultés à l’annexe B.3.

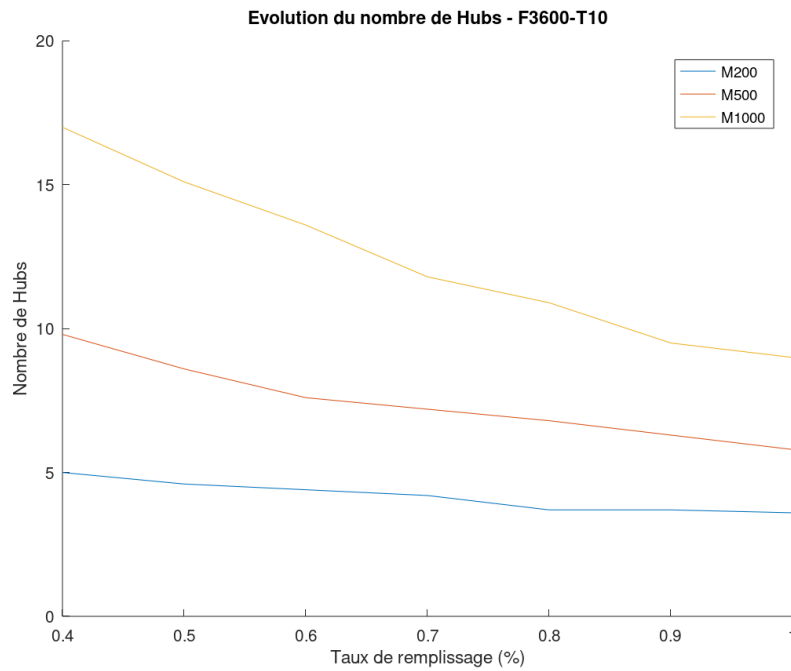


FIGURE 5.7 – Évolution du nombre d’entrepôts - F3600-T10

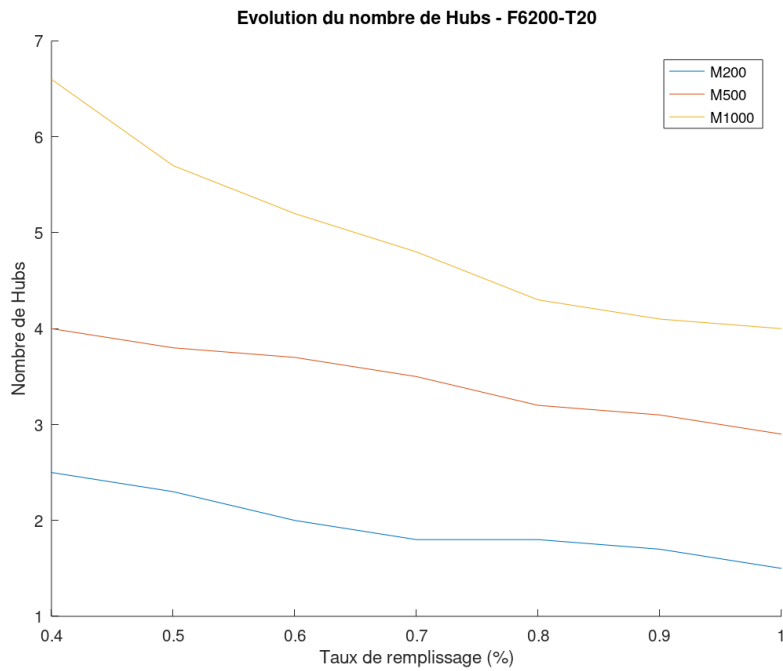


FIGURE 5.8 – Évolution du nombre d'entrepôts - F6200-T20

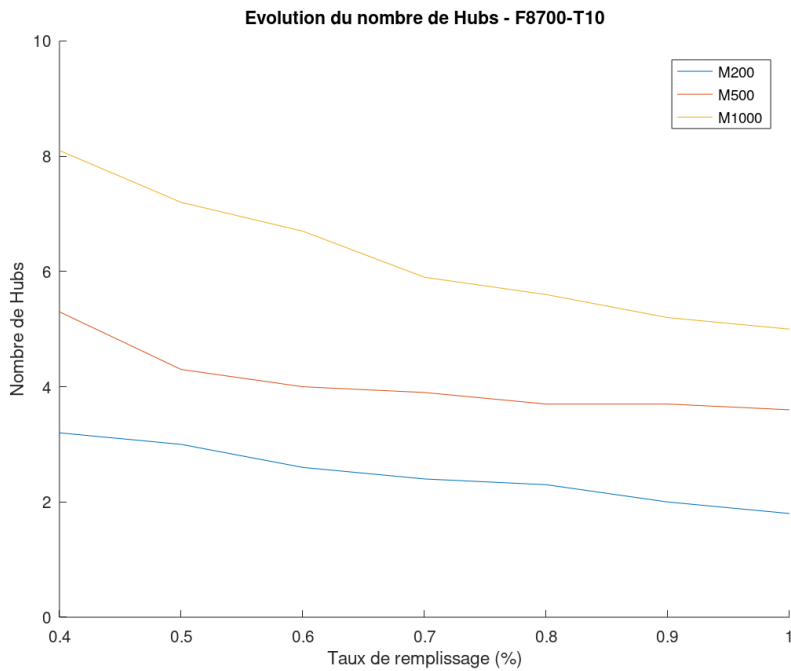


FIGURE 5.9 – Évolution du nombre d'entrepôts - F8700-T10

5.2 Analyse de la variation des coûts opérations, de transports et de stockage

Nous allons à présent étudier les coûts opérationnels, dans le but de comprendre comment ceux-ci évoluent lorsqu'ils sont soumis à des changements de taux de remplissage, de capacité de chargement des camions, de distances parcourues, et de coûts fixes d'ouverture pour les entrepôts. Comme précédemment, nous allons passer en revue chacun des paramètres séparément. Nous nous intéresserons également à l'importance que représentent les coûts de transports au sein des coûts opérationnels que le modèle cherche à minimiser.

5.2.1 Influence du taux de remplissage

Les figures 5.10, 5.11, et 5.12 permettent de se rendre compte de l'évolution des coûts totaux lorsque le taux de remplissage varie de 0.4 à 1, pour l'ensemble des configurations possibles pour les paramètres F , M et T . Comme attendu (étant données les constatations faites à la section précédente), le coût total diminue lorsque le taux de remplissage augmente. L'allure des courbes est similaire pour l'ensemble des trois régions étudiées, et par conséquent l'influence de τ est "la même" pour l'ensemble des régions considérées. Le tableau 5.3 reprend les valeurs des coûts totaux pour des valeurs de τ valant 0.4, 0.7, 0.8, et 1.

		T10				T20				T50			
		Taux 0.4	Taux 0.7	Taux 0.8	Taux 1	Taux 0.4	Taux 0.7	Taux 0.8	Taux 1	Taux 0.4	Taux 0.7	Taux 0.8	Taux 1
M200	F3600	55616	40867	37872	33386	35417	26423	24525	21614	19887	14737	13645	11819
	F6200	67106	49931	46433	40900	43446	32130	29800	26275	24221	17501	16245	14419
	F8700	76072	56657	52618	46162	49122	36391	33756	29248	26782	20001	18745	16919
M500	F3600	100900	74156	68683	60286	121730	89210	82231	71823	136950	99440	92097	81161
	F6200	64141	46724	43142	37827	76535	56573	52584	46502	86106	64448	59959	52880
	F8700	34886	26124	24296	21422	42998	31949	29564	25732	48840	35591	32611	28263
M1000	F3600	156830	117400	108900	95476	192890	141150	130360	114020	216640	157810	145790	127580
	F6200	101720	74111	68518	59872	121540	88791	82041	71832	135870	99462	92083	81147
	F8700	54971	40253	37277	32891	66063	49325	45938	40450	75091	56003	51781	44999

TABLE 5.3 – Évolution du coût total différentes valeurs de taux

Entre les deux valeurs extrêmes de τ , une augmentation moyenne de 66.6% a été observée. Ce chiffre est pratiquement semblable à celui-ci concernant l'accroissement du nombre d'entrepôts (66%). Il en est de même lorsque nous comparons les coûts pour les valeurs de τ de 0.7 et 0.8. En effet, la différence en terme de coûts opérationnels s'élève à 7.9%, 22.9%, et 13.9%, lorsque le taux de remplissage passe respectivement de 0.8 à 0.7, de 1 à 0.7, et de 1 à 0.8. (Pour rappel, pour des mêmes valeurs de τ , les réductions du nombre d'entrepôts étaient de 9.3%, 25%, et 14.3%). Nous pouvons donc penser que la proportion des coûts de transports et des coûts d'entrepôts reste relativement constante étant donnée cette évolution conjointe du nombre d'entrepôts

et des coûts totaux.

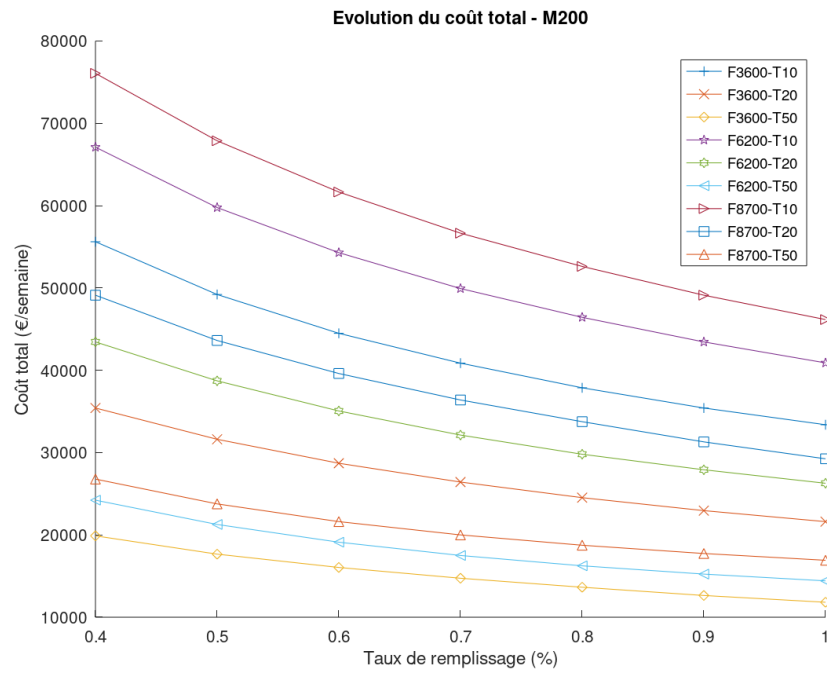


FIGURE 5.10 – Évolution du coût total - M200

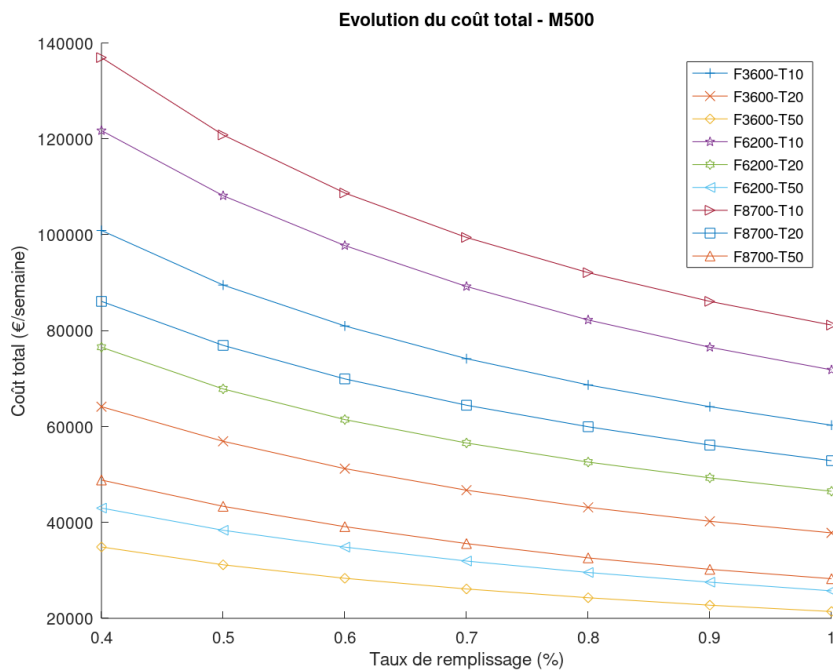


FIGURE 5.11 – Évolution du coût total - M500

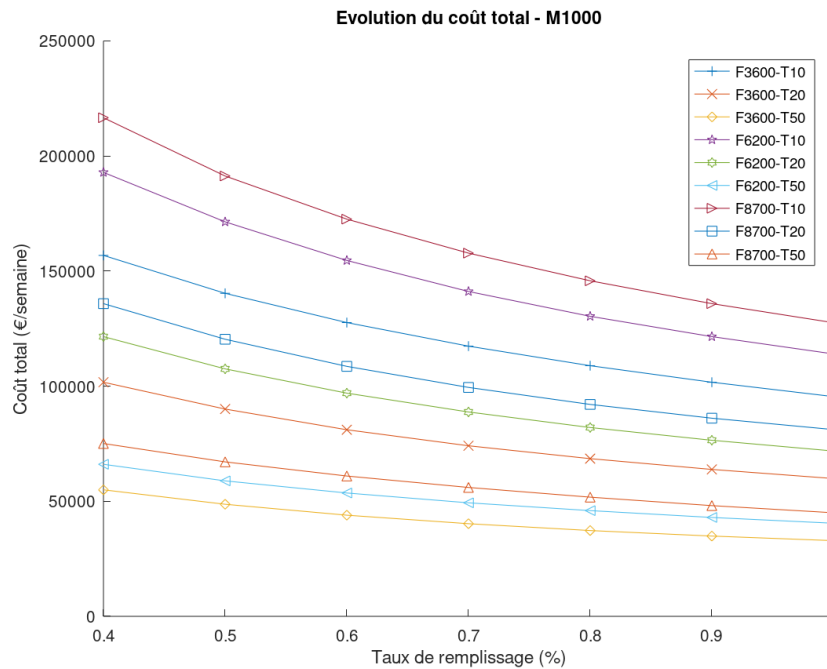


FIGURE 5.12 – Évolution du coût total - M1000

5.2.2 Influence de la capacité de chargement des camions

Concernant la capacité de chargement T , son influence sur les coûts est illustrée à la figure C.12. Nous pouvons remarquer qu’une plus grande capacité va naturellement engendrer une réduction des coûts. Celle-ci peut s’avérer être importante. En effet, les coûts régressent en moyenne de 36.3%, 44.6%, et 64.7%, lorsque la capacité passe respectivement de 10 à 20, de 20 à 50, et de 10 à 50. Notons que ces écarts de coûts pour des capacités différentes restent constantes pour toutes les valeurs de τ . Ces remarques sont valables pour les différentes tailles de régions M et les différentes valeurs de coûts d’ouverture F . Les autres résultants peuvent être consultés à l’annexe C.2.

5.2.3 Influence des coûts fixes d’ouverture

L’incidence des frais d’ouverture F sur les coûts opérationnels s’avère moins importante que celle de la capacité de chargement des camions. En effet, comme nous pouvons le voir sur le graphique 5.14, les trois courbes sont moins espacées que sur le graphique C.12. Nous avons mesuré une variation des coûts totaux de l’ordre 21.1% lorsque les coûts fixes passe de 3600€ à 6200€. Une augmentation de 12.7% a été relevée pour un passage des coûts fixes de 6200€ à 8700€. Enfin, entre les valeurs extrêmes de F , la hausse des coûts totaux est de plus ou moins 36.5%. Le coût d’ouverture a donc une influence plus réduite, et tout comme pour comme la capacité de chargement, les pourcentages énoncés restent identiques pour les différentes valeurs de τ .

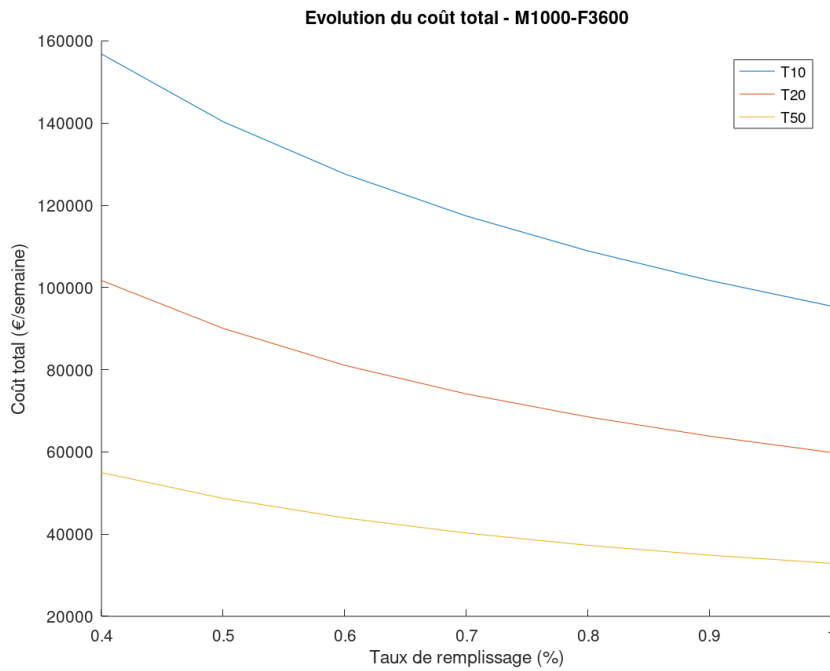


FIGURE 5.13 – Évolution du coût total - M1000-F3600

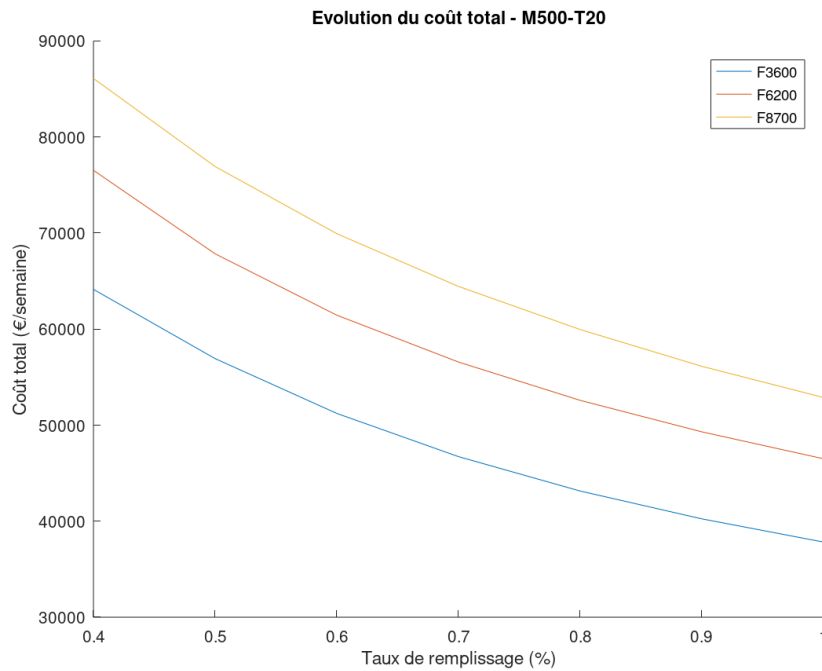


FIGURE 5.14 – Évolution du coût total - M1000-T20

5.2.4 Influence de la taille de la région

Tout comme pour la structure du réseau, la taille de la région a une grande importance concernant les coûts. En effet, à taux de remplissage, coût fixe d'ouverture et capacité de chargement équivalents, les coûts

opérationnels connaissent une augmentation de 78.1% lorsque M passe de 200km à 500km. La différence est un peu moins prononcée quand nous comparons les coûts totaux pour de valeurs de M égales à 500km et 1000km, puisque celle-ci s'élève à 56.8%. Si nous comparons les valeurs limites de M , nous obtenons alors un écart de l'ordre de 179.2%. La figure 5.15 nous montre que les écarts entre chaque courbes restent constants, ce qui signifie donc que les variations pour les trois valeurs de M sont identiques pour chaque taux de remplissage. Notons que ces résultats sont à nouveau cohérents avec ceux présentés dans l'analyse du réseau d'entrepôts.

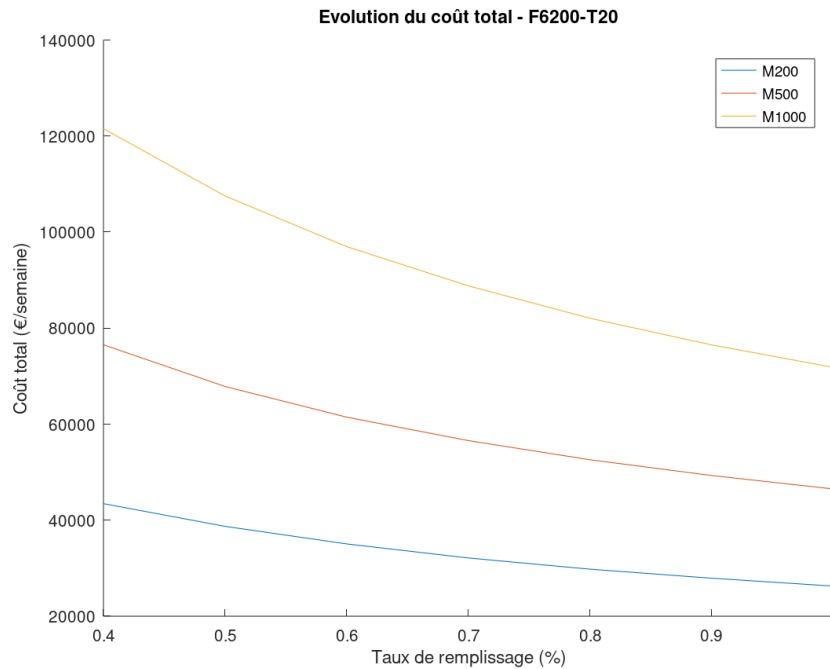


FIGURE 5.15 – Évolution du coût total - F6200-T20

5.2.5 Contribution des coûts de transport

Intéressons-nous à présent à la part que représentent les coûts de transports au sein des coûts opérationnels dans le but d'observer leur évolution en fonction du taux de remplissage, et ce pour l'ensemble des combinaisons des autres paramètres considérés. La figure 5.16 illustre l'une d'entre elles. Nous pouvons ainsi constater sur le graphique que les frais liés à l'envoi de produits restent bien prépondérants au sein des coûts totaux. Nous pouvons également remarquer les trois courbes suivent une même tendance lorsque la valeur du taux de remplissage évolue. Les coûts de transport et les coûts liés aux entrepôts évoluent conjointement, signifiant ainsi que le modèle ne va pas faire évoluer différemment ces deux composantes des coûts lorsque τ change.

Ce constat nous amène donc à affirmer que le ratio entre les coûts de transport et les coûts totaux reste relativement constant. Dans le cas de notre exemple présenté à la figure 5.16, celui-ci s'élève à 64.2%. La

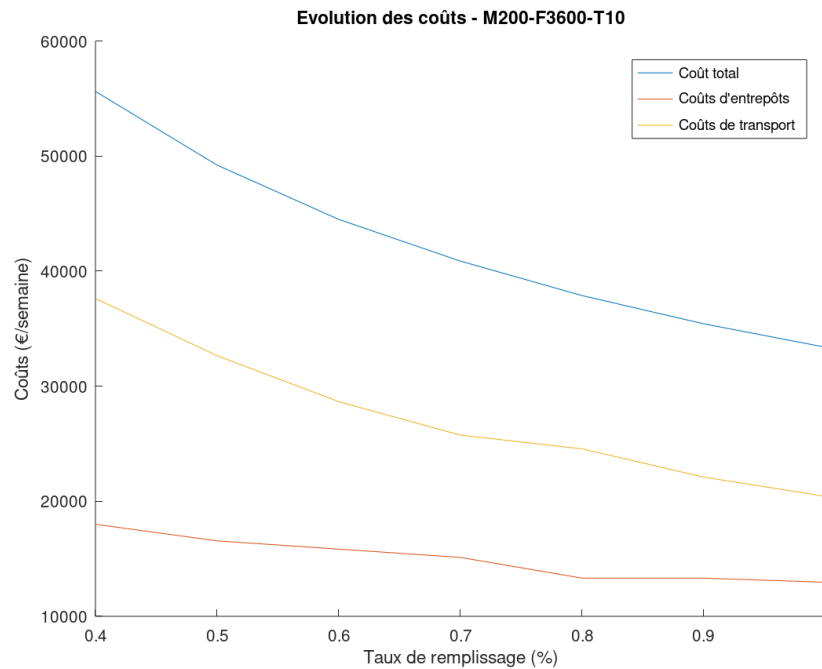


FIGURE 5.16 – Évolution des coûts totaux, de transport et d'entrepôts - M200-F3600-T10

moyenne globale vaut quant à elle 64.7%. Cette valeur est identique à celle avancée par Bravo et Vidal dans leur article [19]. Cela nous conforte donc ainsi dans les valeurs choisies pour F puisque celles-ci nous permettent d'obtenir un ratio similaire à celui observé dans la réalité.

5.3 Discussion des résultats et recommandations

Le tableau 5.4 reprend l'ensemble des résultats exposés jusqu'à présent. Comme nous avons ainsi pu le constater, le taux de remplissage joue un rôle important aussi bien dans la structure du réseau d'entrepôts que dans les coûts opérationnels. En effet, au niveau de la structure, nous avons pu voir que le nombre d'entrepôts ouverts dans le cas de la solution optimale augmente lorsque le taux de remplissage diminue. De plus, les entrepôts ouverts ne sont pas toujours les mêmes suivant la valeur de τ comme nous l'a montré la table 5.2. Par conséquent, considérer que les camions sont utilisés constamment au maximum de leur capacité engendrera une divergence entre la situation réelle et la solution optimale, avec pour conséquence un nombre insuffisant d'entrepôts, dont certains pourraient être de surcroît mal positionnés. A titre d'exemple, les résultats des expériences numériques ont montré une augmentation de 25 % du nombre d'entrepôts lorsque τ passe de 1 à 0.7. Cette variation peut donc s'avérer importante puisque le nombre d'entrepôts manquants devra alors être compensé par une augmentation de la distance parcourue pour les envois de marchandises pour satisfaire la demande de l'ensemble des clients.

En outre, comme exposé à la figure 3.1, les taux de remplissage effectifs en Europe sont bien plus faibles

que 100%. Cela peut s'avérer être particulièrement vrai dans le cas où l'entreprise s'occupe directement de l'envoi de sa propre marchandise. En effet, nous avons déjà évoqué précédemment, pour ce cas de figure, la probabilité plus importante de ne pas exploiter pleinement la capacité des camions. En effet, en comparaison avec un transporteur, moins d'efforts seront mis en oeuvre pour remplir les camions. Cela nous conforte donc dans l'idée de ne considérer pas uniquement un taux de chargement maximal dans les modèles mathématiques, lorsque l'activité de transport est directement intégrée dans la chaîne logistique.

Du point de vue financier, rappelons que 80% des coûts de la supply chain sont issus de la localisation des installations [11] et dans la détermination des flux optimaux matières circulant tout le long de la chaîne. Toutefois, considérer systématiquement un taux de remplissage maximal, surestimé par rapport à la réalité, présentera le risque de conduire à mettre en oeuvre un réseau d'installations non optimal et donc in fine plus onéreux.

Par ailleurs, les expériences numériques nous ont par exemple montré que lorsque le taux de remplissage passe de 1 à 0.8, une majoration des coûts de près de 14% est à prévoir entre les solutions optimales. Une diminution de 10% de la valeur de τ engendre quant à elle une augmentation de l'ordre 8%. Dans le cas de vastes chaînes logistiques, de telles variations peuvent rapidement impliquer d'importantes sommes d'argent, et pouvant provoquer également de grosses divergences entre la solution calculée, et la réalité.

Également, il ne faut pas perdre de vue qu'une estimation correcte du taux de remplissage nécessitera de prendre en compte les considérations physiques des produits transportés. Des produits volumineux pourraient par exemple rendre impossible l'utilisation complète de la capacité de charge des camions.

	Influence sur le nombre de hubs				Influence sur les coûts opérationnels			
	$\tau : 1 \rightarrow 0.4$	$\tau : 0.8 \rightarrow 0.7$	$\tau : 1 \rightarrow 0.7$	$\tau : 1 \rightarrow 0.8$	$\tau : 1 \rightarrow 0.4$	$\tau : 0.8 \rightarrow 0.7$	$\tau : 1 \rightarrow 0.7$	$\tau : 1 \rightarrow 0.8$
Influence de τ	66%	9.3%	25%	14.3%	66.6%	7.9%	22.9%	13.9%
	$T10 \rightarrow T20$	$T20 \rightarrow T50$	$T10 \rightarrow T50$	$\tau : 1 \rightarrow 0.4$	$T10 \rightarrow T20$	$T20 \rightarrow T50$	$T10 \rightarrow T50$	$\tau : 1 \rightarrow 0.4$
Influence de T	35.5%	42.9%	63.7%	Constant	36.3%	44.6%	64.7%	Constant
	$F3600 \rightarrow F6200$	$F6200 \rightarrow F8700$	$F3600 \rightarrow F8700$	$\tau : 1 \rightarrow 0.4$	$F3600 \rightarrow F6200$	$F6200 \rightarrow F8700$	$F3600 \rightarrow F8700$	$\tau : 1 \rightarrow 0.4$
Influence de F	29.2%	23.9%	45.7%	Constant	21.1%	12.7%	36.5%	Constant
	$M200 \rightarrow M500$	$M500 \rightarrow M1000$	$M200 \rightarrow M1000$	$\tau : 1 \rightarrow 0.4$	$M200 \rightarrow M500$	$M500 \rightarrow M1000$	$M200 \rightarrow M1000$	$\tau : 1 \rightarrow 0.4$
Influence de M	74.3%	56%	169.7%	Constant	78.1%	56.8%	179.2%	Constant

TABLE 5.4 – Synthèse des résultats

Concernant la capacité des camions T , plus celle-ci est élevée, plus les coûts opérationnels et le nombre d'entrepôts nécessaires sont réduits. Cela permettra ainsi d'éviter de multiplier les trajets nécessaires pour satisfaire la demande des clients. Nous avons d'ailleurs constaté en moyenne que de passer d'une capacité de 10 à 20 unités permettait de réduire à la fois les nombres d'entrepôts ouverts et les coûts de l'ordre 36%. Augmenter la capacité de chargement de la flotte de véhicules pourrait donc constituer un moyen de réaliser des économies. Toutefois, avec une augmentation de la capacité des camions vient également le risque de ne

pas l'exploiter à son maximum. De plus, il est important de noter que nous avons également considéré un même coût de $1 \frac{\text{€}}{\text{km.camion}}$ pour l'ensemble des valeurs considérées pour T . Cette hypothèse pourrait s'avérer être trop simplificatrice en comparaison avec la réalité.

Au sujet des frais fixes d'ouverture F , ceux-ci n'influencent que sur le nombre d'entrepôts, puisqu'ils n'interviennent dans l'expression des coûts de transport. Naturellement, nous avons pu constater qu'à valeurs de M , T , et τ équivalents, le nombre d'entrepôts ouverts diminuaient lorsque ces frais augmentaient. Étant donné également que ce paramètre dépendra essentiellement des caractéristiques liés à la région étudiée, peu de marges de manoeuvre sont possibles. Le modèle visera donc à optimiser le nombre d'entrepôts nécessaires afin d'optimiser la distance à parcourir pour desservir les clients.

En ce qui concerne la taille de la région, et par conséquent les distances parcourues, celles-ci ont une très grosse influence sur les coûts opérationnels et le nombre d'entrepôts ouverts. En effet, comme le révèle le tableau 5.4, le paramètre M est celui qui entraîne les plus grandes variations en terme de résultats. Il sera donc nécessaire de veiller à ce que suffisamment d'entrepôts soient ouverts pour éviter de trop grosses augmentations des coûts de transport. Pour s'assurer que cela soit bien le cas en réalité, nous pourrions imaginer tirer profit du constat dressé à la sous-section 5.2.5. En effet, nous avons pu nous apercevoir qu'en moyenne, pour la solution optimale fournie par le modèle, les coûts de transport représentent 64.7% des coûts totaux. Ainsi une divergence par rapport à ce ratio pourrait être signe que la solution en place s'écarte de la solution optimale.

Enfin, étant donnée l'importance des coûts pouvant subvenir dans le cadre de grande régions à couvrir, il sera opportun de veiller à tirer au maximum profit de la capacité de chargement des véhicules. Pour ce faire, des solutions peuvent être mises en place, tel que le recours à des camions équipés de double plancher comme illustré à la figure 5.17 [6]. La mise en place de ce genre de solution requiert une concertation entre les différents acteurs présents dans la supply chain, rappelant ainsi au passage son caractère inter-fonctionnel et inter-organisationnel.



FIGURE 5.17 – Camion à double plancher

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Ce mémoire avait pour objet le problème de localisation d'installations et plus particulièrement l'influence de la comptabilisation des coûts de transport. Ce travail s'inscrit donc dans le domaine prolifique du supply chain network design et de la recherche opérationnelle.

Nous avons débuté ce travail par une étude bibliographique, et ce afin de mettre dans son contexte la problématique de ce mémoire. Nous avons ainsi tout d'abord défini ce que sont la supply chain et le supply chain management. Cela nous a permis de mieux de comprendre les enjeux de ceux-ci. Nous avons ensuite présenté le supply chain network design qui constitue une des composantes du supply chain management. Celle-ci s'intéresse notamment à la problématique de localisation d'installations. Nous nous sommes intéressés au déroulement d'un projet de supply chain network design, dont l'une des étapes fait appel à des modèles mathématiques pour représenter la chaîne logistique. Nous nous sommes alors penchés sur les types de modèles les plus utilisés dans des problèmes de localisation d'installations, et avons présentés des modèles issus de la littérature spécialisée. Nous nous sommes alors ensuite focalisés sur la formulation des coûts de transport utilisée par ces différents modèles. Cela a permis de mettre en évidence que ceux-ci considèrent majoritairement pour les frais de transport, un "simple" coût par unité transportée. Cela présente le désavantage de ne pas considérer les caractéristiques physiques des produits transportés et suppose donc que les camions utilisés pour acheminer la marchandise sont toujours utilisés à leur pleine capacité. Comme nous l'avons montré, études à l'appui, cela est loin d'être le cas dans la réalité.

Dans un second temps, nous avons donc apporté une modification au modèle standard, communément appelé "Uncapacited Facility Location Problem". Celle-ci a pour but de faire apparaître un terme relatif à la capacité de chargement des camions, afin de proposer une solution aux "problèmes" constatés au chapitre précédent en matière de formulation des coûts de transport.

Suite à cela, nous avons ensuite abordé la méthodologie employée pour réaliser les 1890 expériences numériques. Celle-ci fait intervenir des interactions entre Excel, Fico Xpress, et Octave, afin de préparer les données

nécessaires, de réaliser les expériences numériques en batch, et de tracer de manière quasi automatique, à l'aide de plusieurs scripts, les différents graphiques utilisés pour l'analyse des résultats.

Enfin, nous avons exposé, dans le chapitre 5 de ce mémoire, les analyses des différents résultats. Celles-ci ont permis de mettre en évidence les importantes variations en matière de nombre d'entrepôts nécessaires lorsque que nous faisons évoluer la valeur du taux de chargement. Nous avons également constaté (à l'aide des résultats tracés sous forme de cartes) que non seulement le nombre d'entrepôts varie avec τ , mais également la localisation des entrepôts dans la solution optimale proposée par le modèle. En effet, dans de nombreux cas, des entrepôts ont été fermés au profit de l'ouverture d'un nouvel entrepôt non ouvert auparavant lorsque τ évolue de 10%, et ce aussi bien pour des faibles valeurs de taux de remplissage que pour des valeurs élevées. Cela engendre donc ainsi une modification de la structure du réseau d'entrepôts. Nous avons remarqué une évolution similaire en matière des coûts opérationnels. Ainsi, plus le taux de remplissage des camions était faible, plus les coût totaux étaient élevés. Cela peut s'expliquer par l'obligation d'effectuer plus de trajets pour satisfaire l'entièreté de la demande des clients comme l'impose le modèle. La valeur considérée pour le taux de remplissage joue donc un rôle important dans la solution renseignée par le modèle.

En plus du taux de chargement, nous avons également étudié l'influence de la capacité des camions T , des coûts fixes d'ouvertures d'entrepôt F , et de la taille de la région étudiée M , sur la solution fournie par le modèle. Nous avons pu constater que le paramètre M est celui-ci parmi les trois cités, qui a l'influence la plus grande. En effet, les coûts peuvent augmenter de pratiquement 180% lorsque M passe de 200 km à 1000km, à T , F et τ équivalents.

Pour conclure, une suite envisageable à ce mémoire serait de le combiner avec des modèles plus sophistiqués afin de constater l'évolution des solutions générées dans ce cas de figure.

Bibliographie

- [1] John T Mentzer ; William Dewitt ; James S. Keebler ; Soohong Min ; Nancy W. Nix ; Carlo D. Smith ; Zach G. Zacharia. Définir le supply chain management. *Logistique & Management*, 9, 2001.
- [2] Alain Perrot ; Philippe Villemus. *La boîte à outils de la Supply Chain*. Dunod, 2015.
- [3] Mark S. Daskin. What you should know about location modeling. *Wiley InterScience*, 2008.
- [4] Susan Hessen Owen ; Mark S. Daskin. Strategic facility location : A review. *European journal of operational research*, 1998.
- [5] European Environment Agency. Load factors for freight transport. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/load-factors-for-freight-transport/load-factors-for-freight-transport-1>.
- [6] Yvan Salamon ; Eric Thomann ; Isabelle Hautant. Les leviers de l'optimisation du transport. *Supply chain magazine*, (39) :110 – 114, 2009.
- [7] Michael H. Hugos. *Essentials of Supply Chain Management, 3rd Edition*. Wiley, 2011.
- [8] Albert David Philippe-Pierre Dornier Pierre Desmet Maryse Dubouloy Pierre Dussauge Jérôme Duval-Hamel Marc Filser André Fourçans Frédéric Fréry Pierre-Yves Gomez Dominique Jacquet Jean-Noël Kapferer Jean-Marc Lehu François Lenglard Valérie Moatti Thierry Picq Maurice Pillet Nicolas Prat Pierre Romelaer Christophe Roux-Dufort et Véronique Tran Marc Bertonèche, Charles-Henri d'Arcimoles. *MBA, L'essentiel du management par les meilleures professeurs*. Editions Eyrolles, 2014.
- [9] Adam Robinson. The evolution and history of supply chain management. <http://cerasis.com/2015/01/23/history-of-supply-chain-management/>.
- [10] Alexandra Moraru. Supply chain et usine du futur, la nécessaire efficacité opérationnelle. <http://www.jacquesraud-consulting.com/fr/supply-chain-et-usine-du-futur-la-necessaire-efficacite-operationnelle/>.
- [11] Michael Watson ; Sara Lewis ; Peter Cacioppi ; Jay Jayaraman. *Supply Chain Network Design : Applying optimization and analytics to the global supply chain*. Pearson FT Press, 2012.
- [12] Yann Bouchery ; Jan Fransoo. Cost, carbon emissions and modal shift in intermodal network. *Int. J. Production Economics*, 2014.

- [13] Andreas Klose ; Andreas Drexl. Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 2004.
- [14] Benita M. Beamon. Supply chain design and analysis : Models and methods. *International journal of production economics*, 1998.
- [15] M.T. Melo ; S. Nickel ; F. Saldanha da Gama. Facility location and supply chain management - a review. *European Journal of Operational Research*, 2008.
- [16] Matias Schuster Puga ; Jean-Sébastien Tancrez. A heuristic algorithm for solving large location-inventory problems with demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 2016.
- [17] Hasan Pirkul ; Vaidyanathan Jayaraman. A multi-commodity, multi-plant, capacited facility location problem : Formulation and efficient heuristic solution. *Computers and Operations research*, 25(10) :869–878, 1998.
- [18] E. Aghezzaf. Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands. *Journal of Operational Research Society*, 2004.
- [19] Juan José Bravo ; Carlos Julio Vidal. Freight transportation function in supply chain optimization models : A critical review of recent trends. *Expert systems with applications*, 2013.
- [20] Philippe Barla ; Denis Bolduc ; Nathalie Boucher ; Jonathan Watters. *Analyse économétrique du taux de chargement des camions se déplaçant au Québec*. Socioéconomie des transports. Etudes et recherches en transport, 2006.
- [21] James Gallucci. Domestic road freight statistics, united kingdom 2016. *Department for Transport*, 2017.
- [22] Anne Gratacap ; Pierre Médan. *Management de la production : Concept, Méthodes et cas*. Dunod, 2009.
- [23] Christelle Guéret ; Christian Prins ; Marc Sevaux. *Applications of optimization with Xpress-MP*. Dash Optimization Ltd., 2007.
- [24] Vedat Verter. Uncapacited and capacited facility location problems. *Foundations of Location Analysis*, pages 25 – 37, 2011.
- [25] Jean-Sébastien Tancrez ; Jean-Charles Lange ; Pierre Semal. A location-inventory model for large three-level supply chains. *Transportation Research Part E*, 2011.
- [26] Sanjay Melkote ; Mark S. Daskin. Capacited facility location/network design problems. *European Journal of Operational Research*, 1999.
- [27] Erlenkotter D. A dual-based procedure for uncapacitated facility location. *Oper Res*, 1978.
- [28] Kuehn ; Hamburger. A heuristic program for locating warehouses. *A*, 1963.
- [29] What is logistics and supply chain management definition? <http://www.supplychainopz.com/2012/04/what-is-logistics-and-supply-chain-management.html>.
- [30] Joannès Vermorel. Quantité économique de commande (eoq), définition et formule. <https://www.lokad.com/fr/definition-et-formule-eoq-taille-lot-%C3%A9conomique>.

Annexe A

Cartes

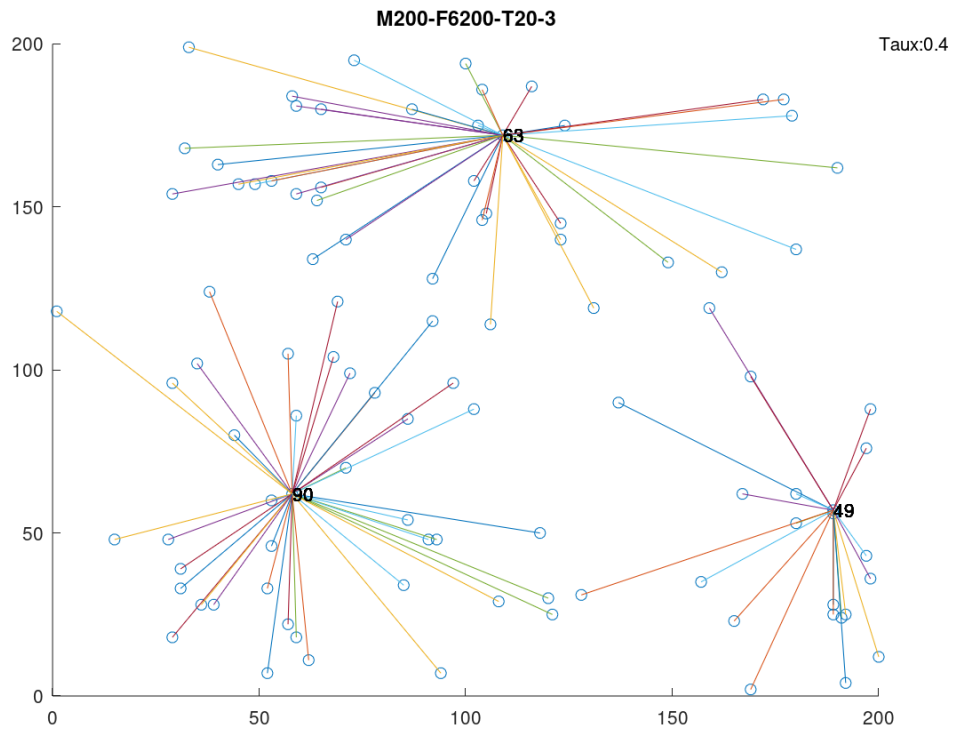


FIGURE A.1 – M200-F6200-T20

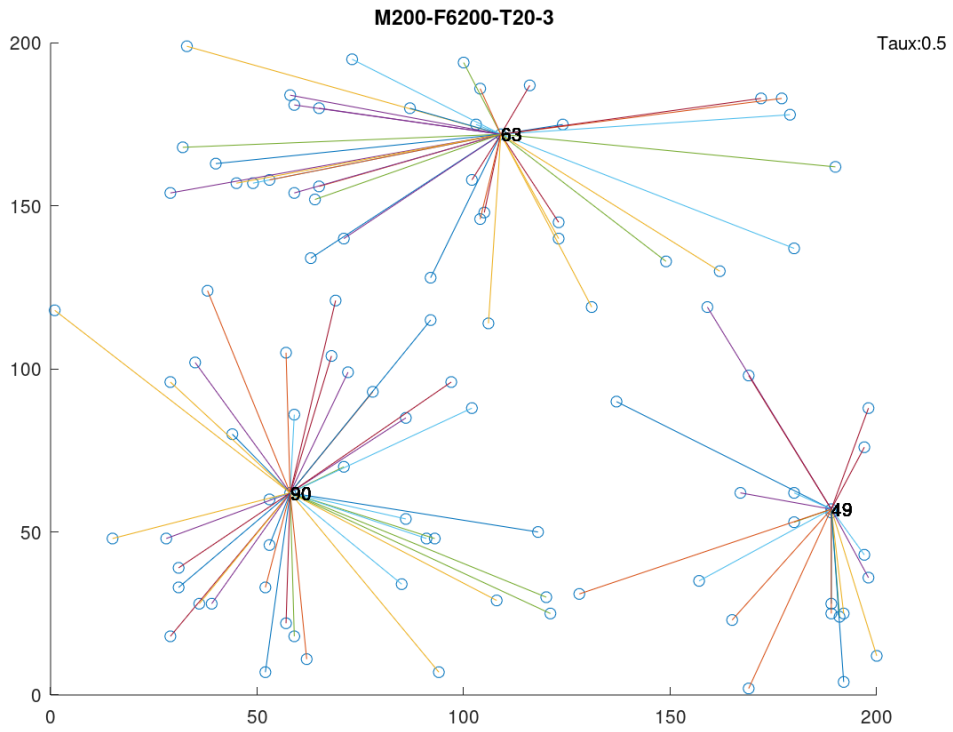


FIGURE A.2 – M200-F6200-T20

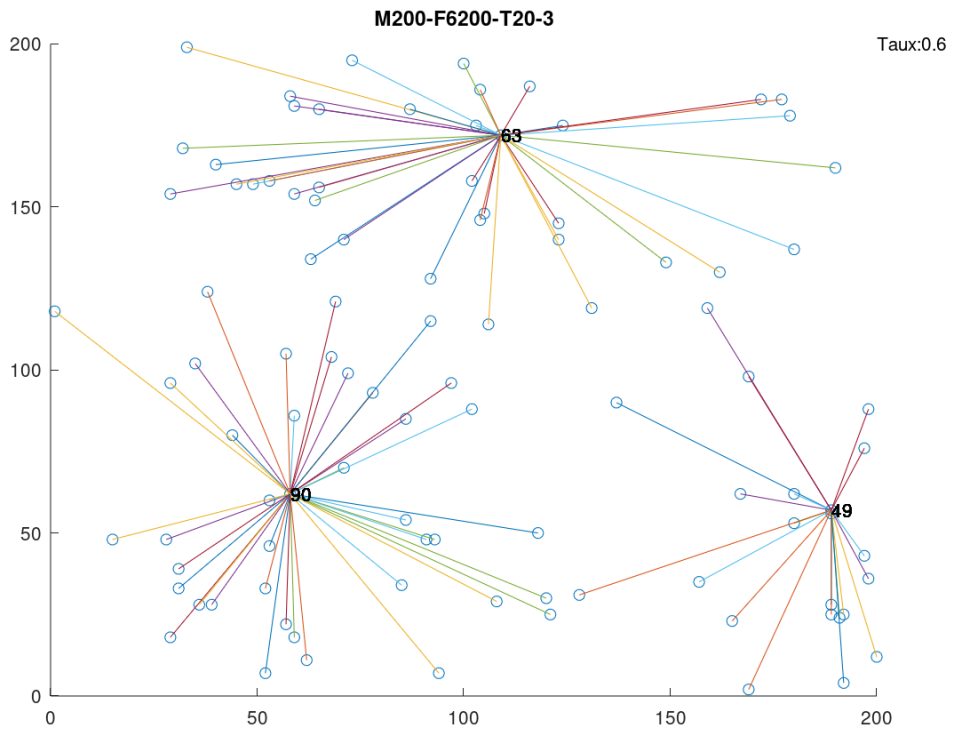


FIGURE A.3 – M200-F6200-T20

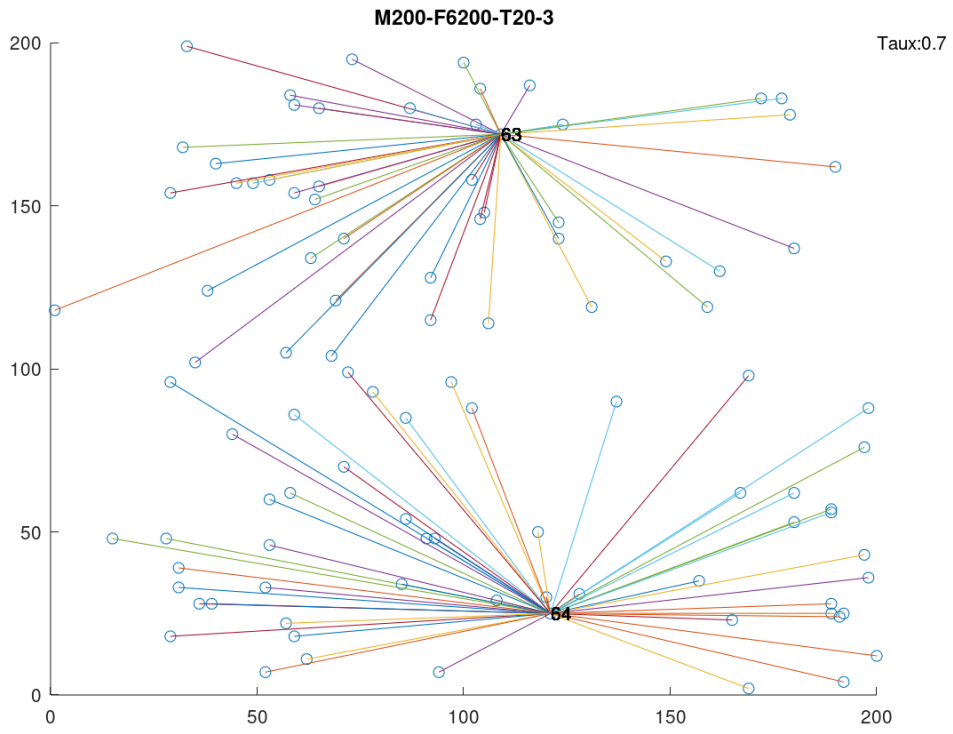


FIGURE A.4 – M200-F6200-T20

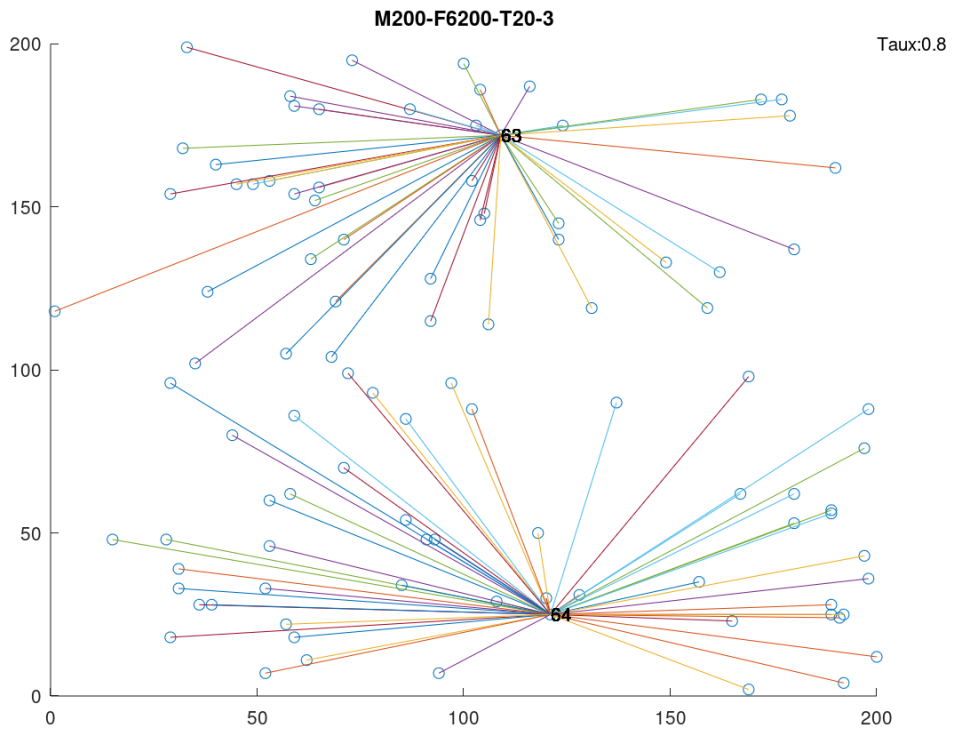


FIGURE A.5 – M200-F6200-T20

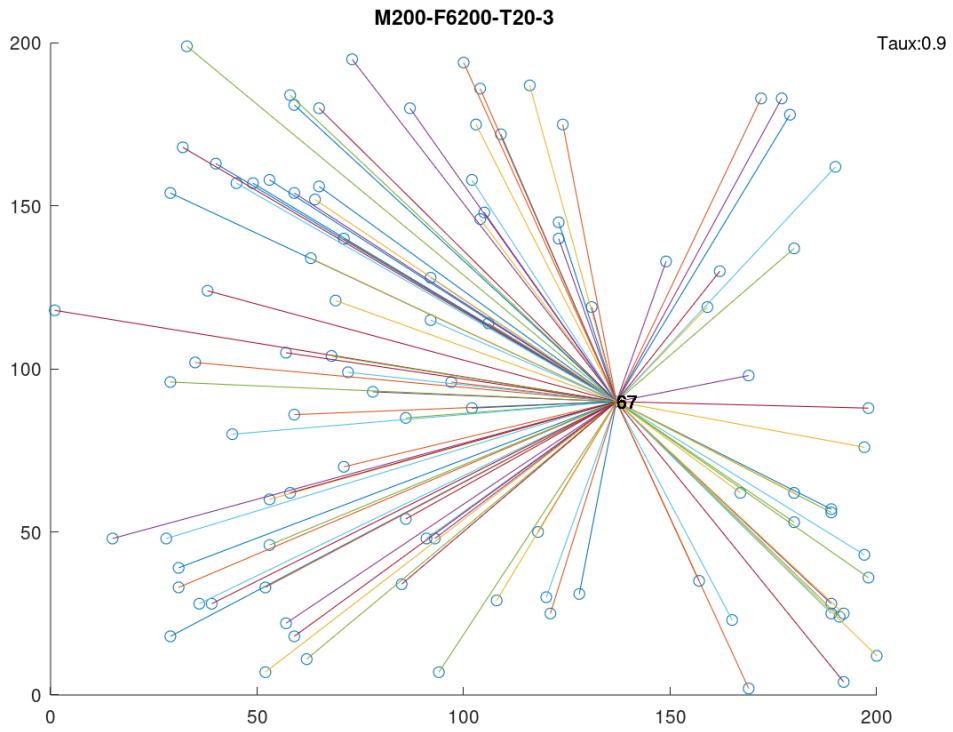


FIGURE A.6 – M200-F620-T200

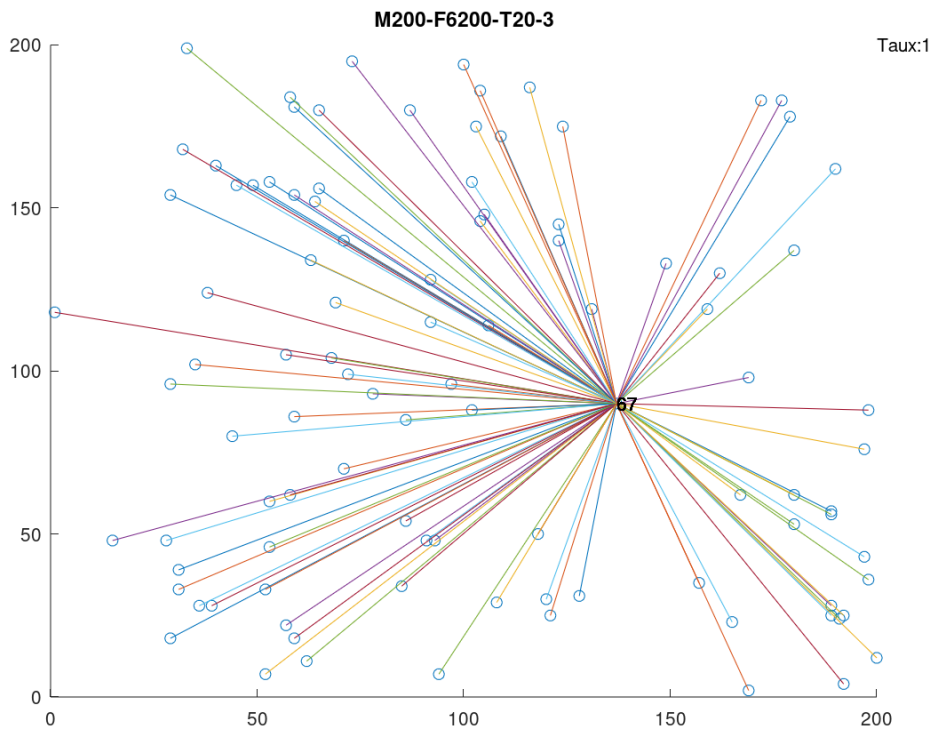


FIGURE A.7 – M200-F6200-T20

Annexe B

Analyses hub

B.1 Influence de la capacité de chargement

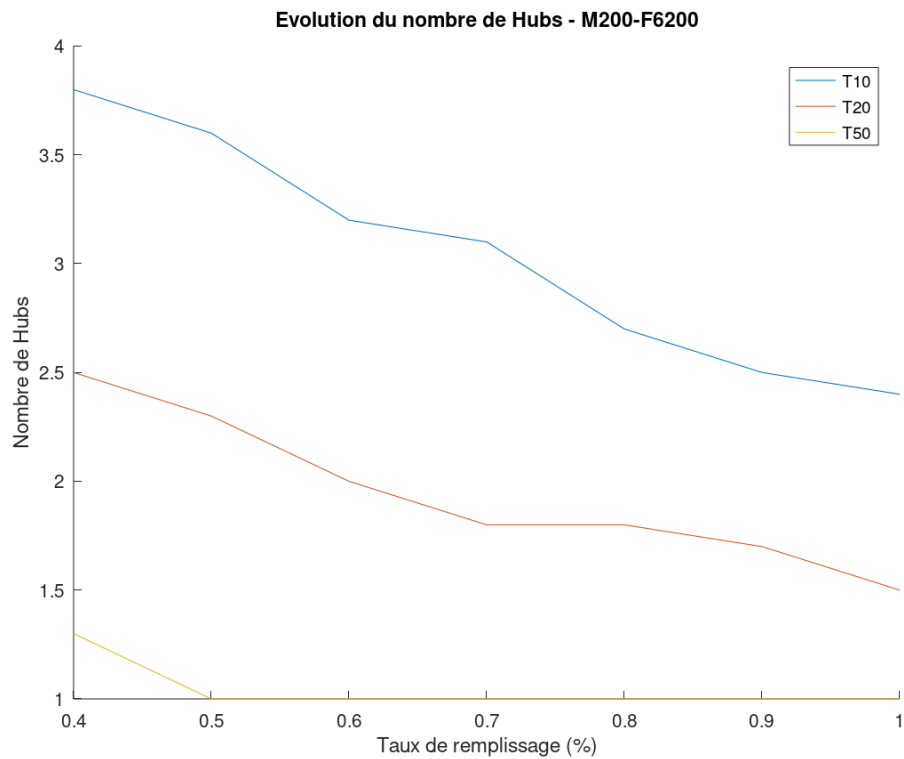


FIGURE B.1 – Évolution du nombre d'entrepôts - M200-F6200

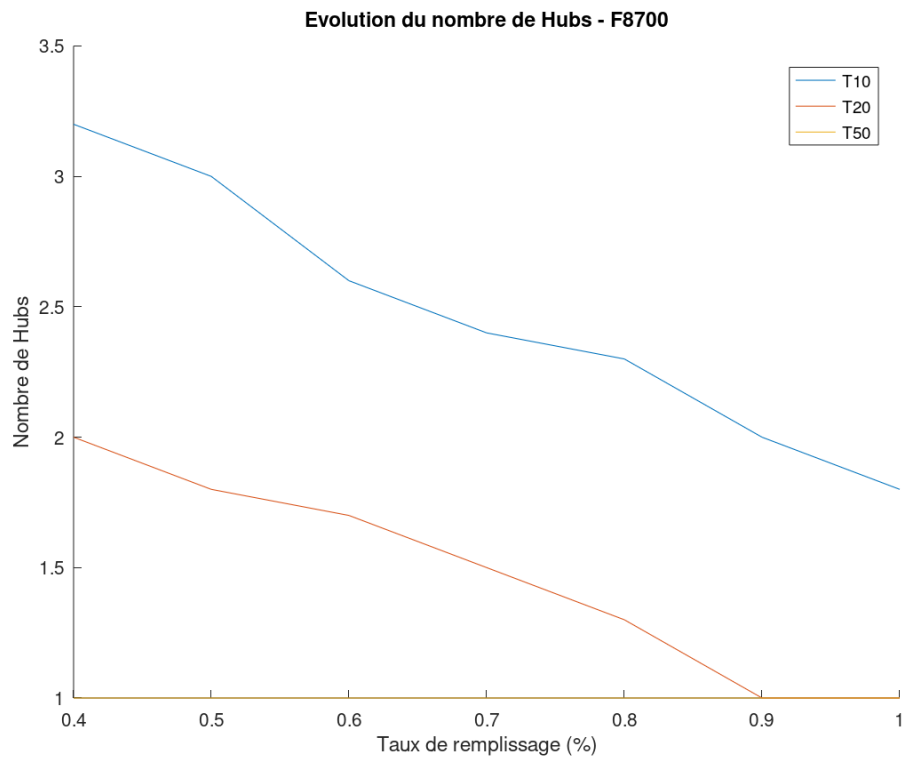


FIGURE B.2 – Évolution du nombre d'entrepôts - M200-F8700

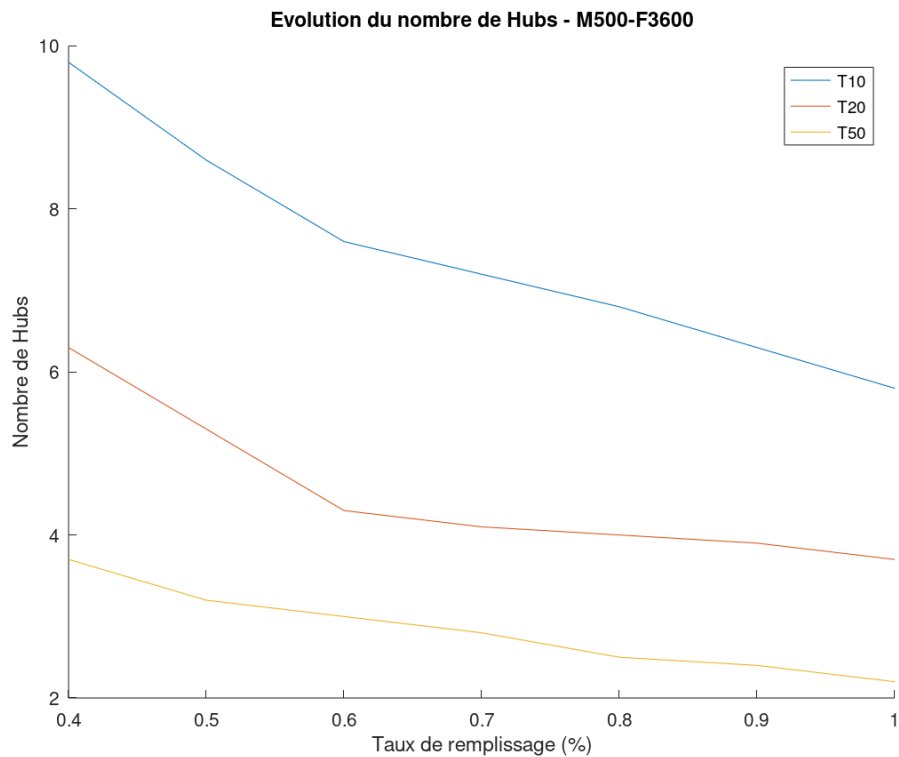


FIGURE B.3 – Évolution du nombre d'entrepôts - M500-F3600

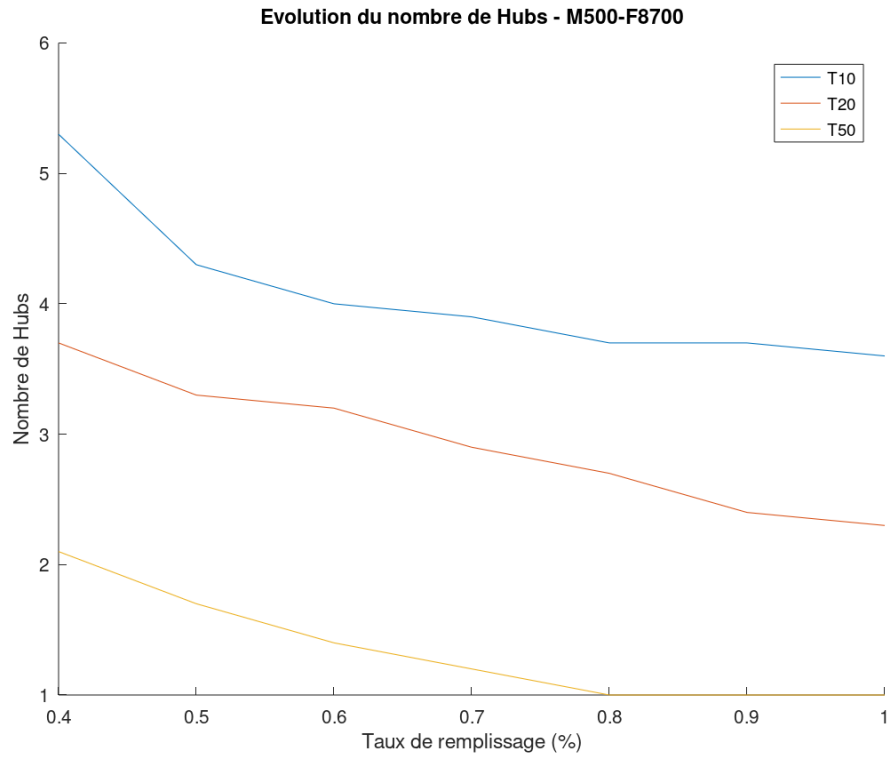


FIGURE B.4 – Localisation et affectation des entrepôts - Taux : 1

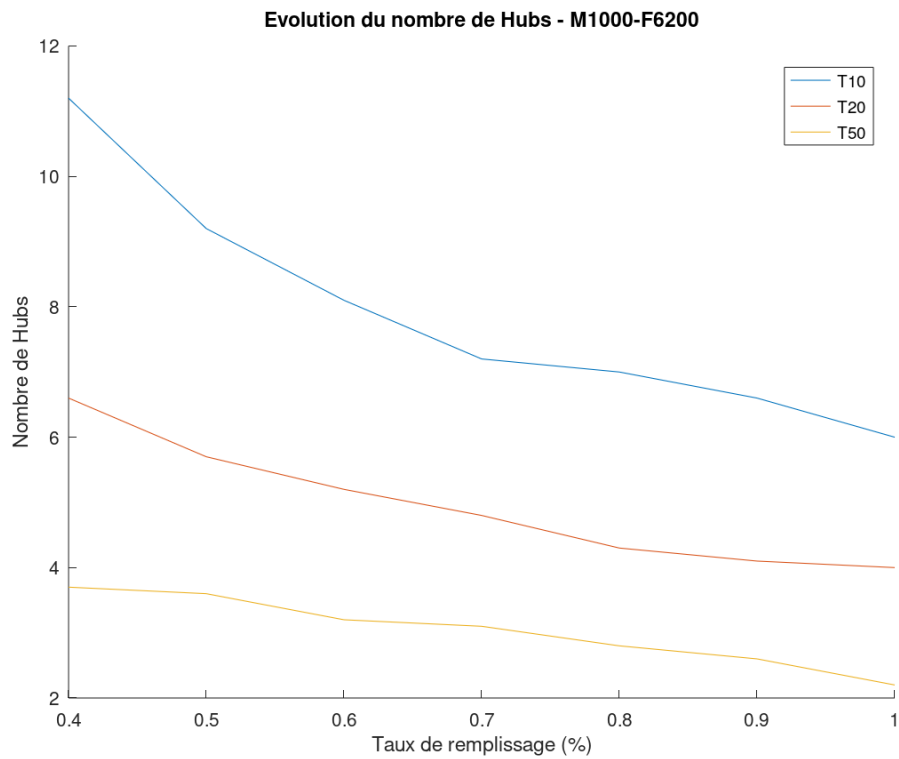


FIGURE B.5 – Évolution du nombre d'entrepôts - M1000-F6200

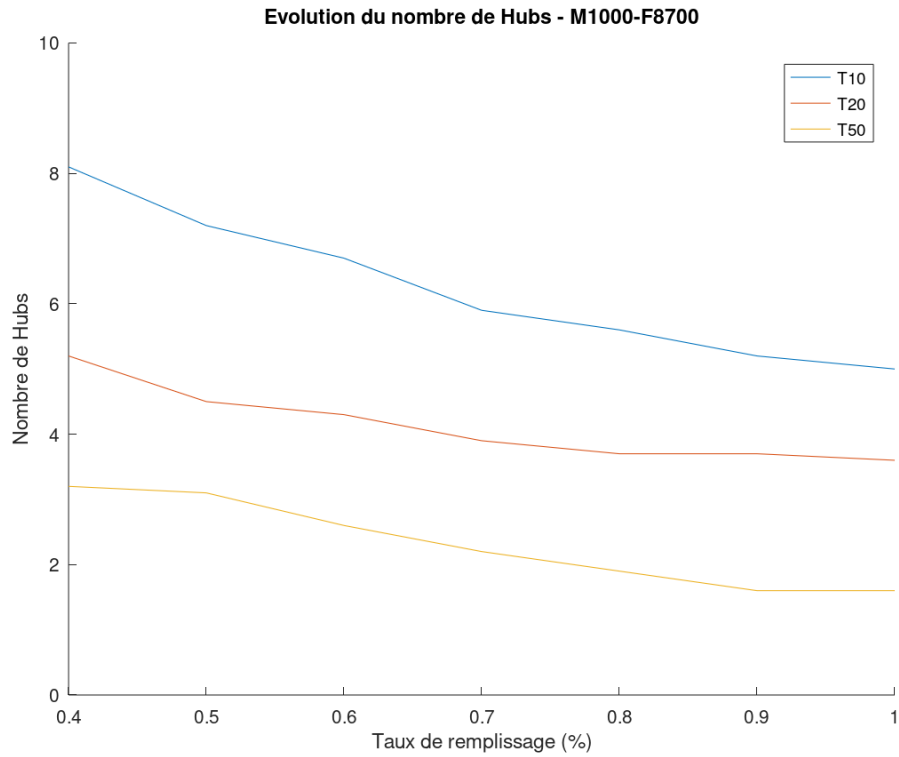


FIGURE B.6 – Évolution du nombre d'entrepôts - M1000-F6200

B.2 Influence des coûts fixes d'ouverture

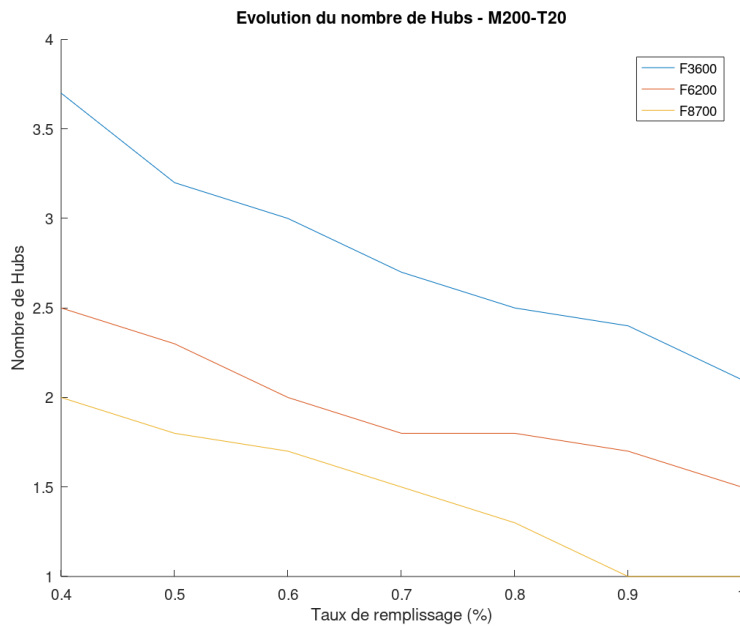


FIGURE B.7 – Évolution du nombre d'entrepôts - M200-T20

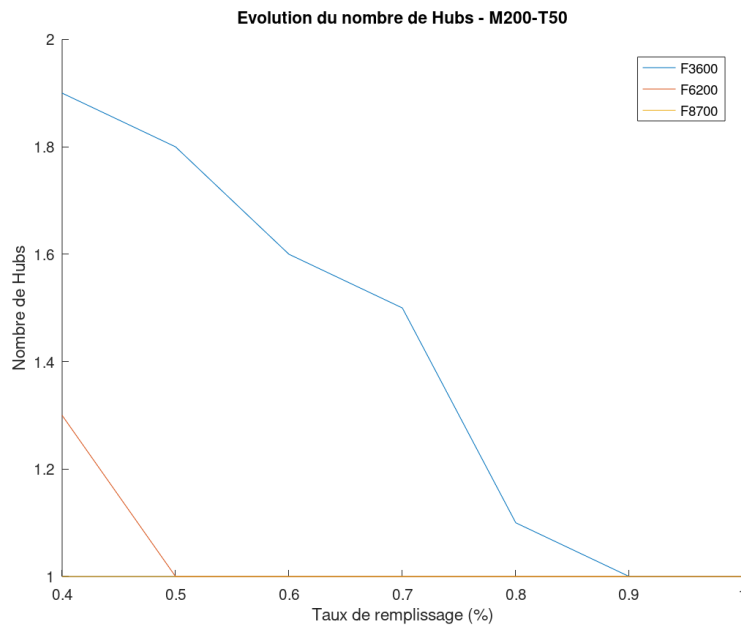


FIGURE B.8 – Évolution du nombre d'entrepôts - M200-T50

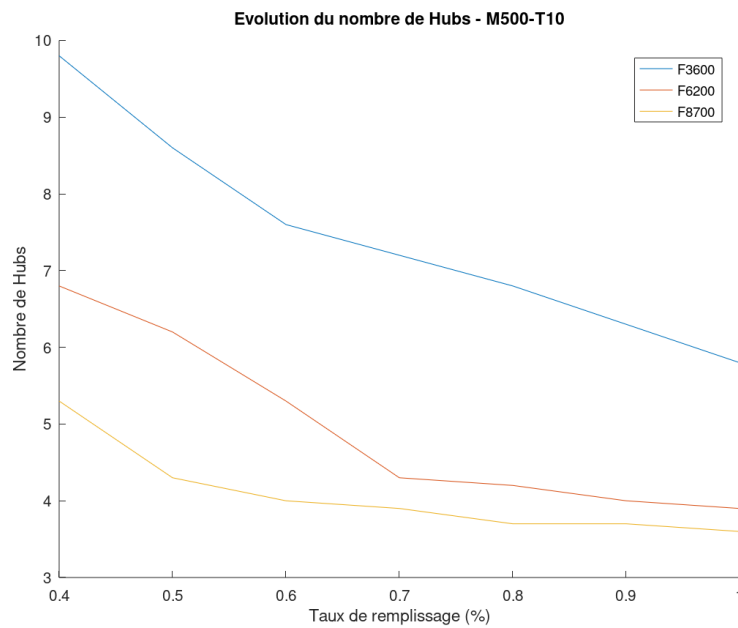


FIGURE B.9 – Évolution du nombre d'entrepôts - M500-T10

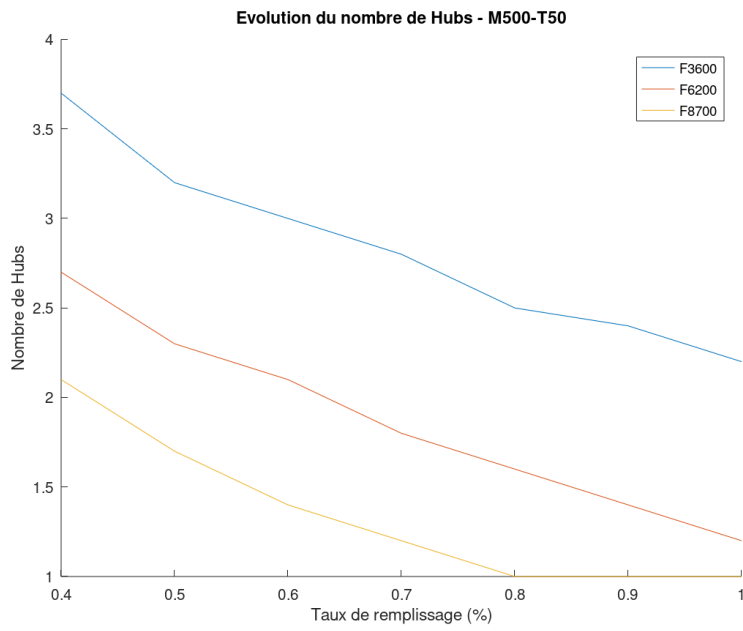


FIGURE B.10 – Évolution du nombre d'entrepôts - M500-T50

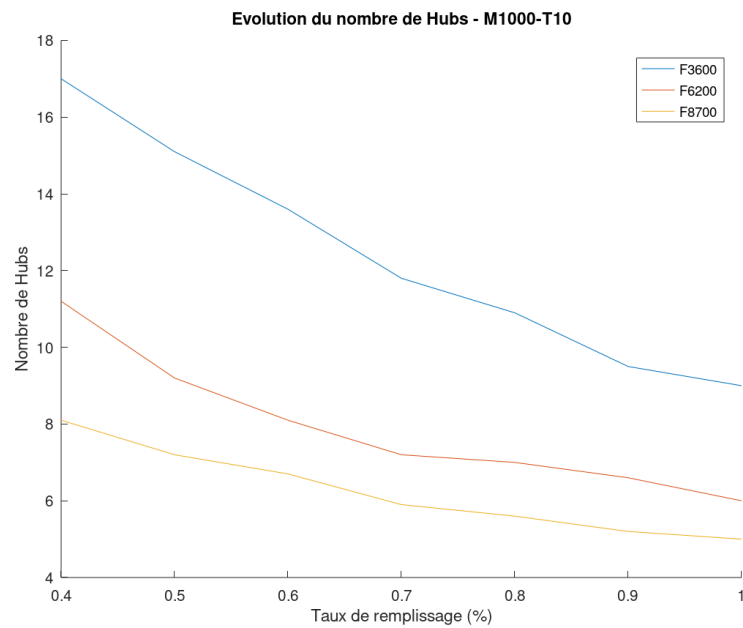


FIGURE B.11 – Évolution du nombre d'entrepôts - M1000-T10

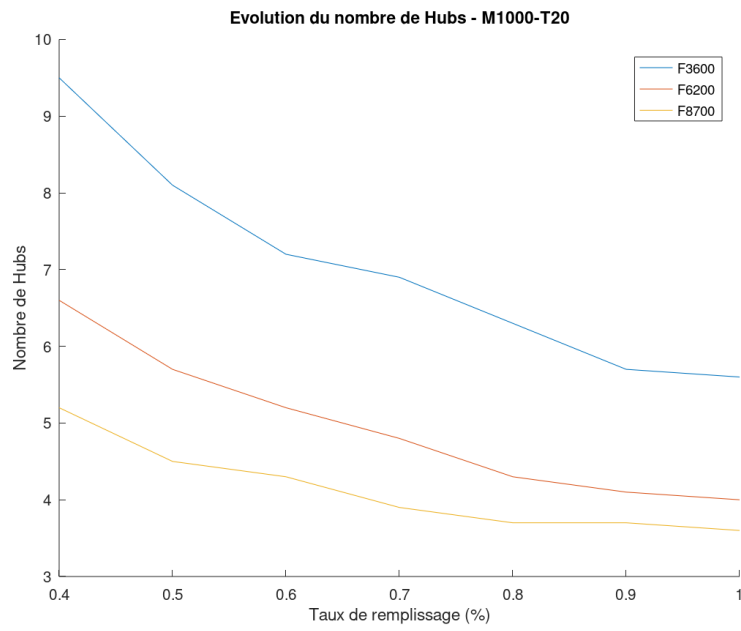


FIGURE B.12 – Évolution du nombre d'entrepôts - M1000-T20

B.3 Influence de la taille de la carte

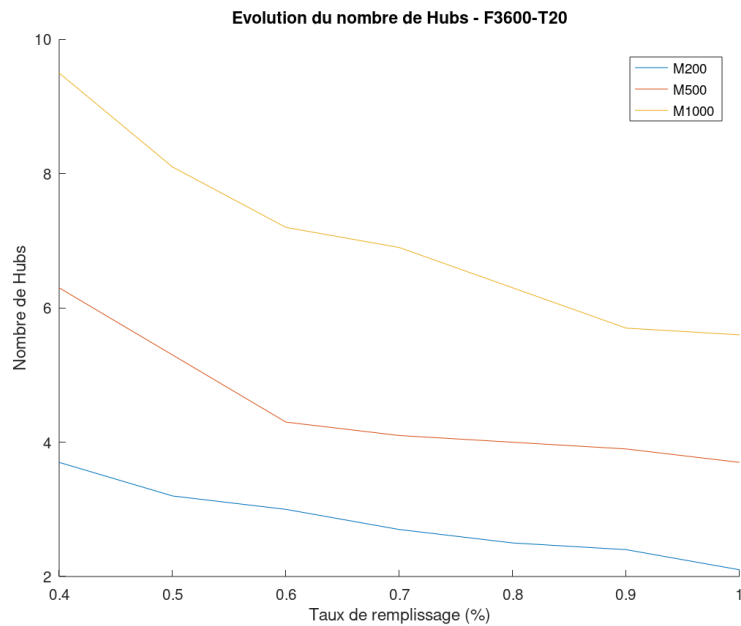


FIGURE B.13 – Évolution du nombre d'entrepôts - F3600-T20

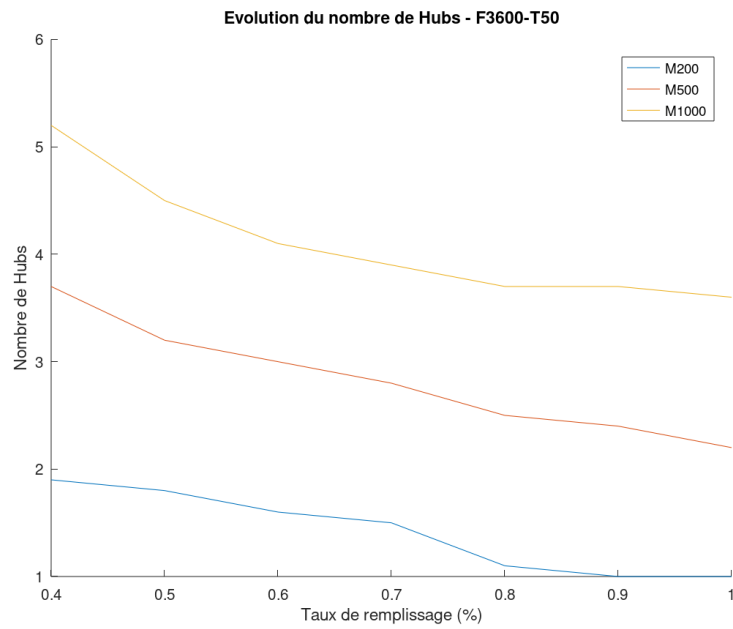


FIGURE B.14 – Évolution du nombre d'entrepôts - F3600-T50

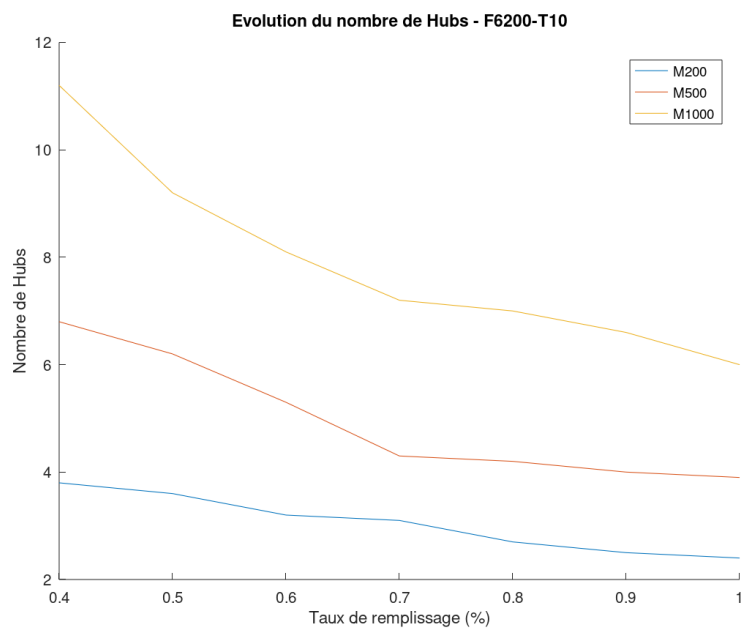


FIGURE B.15 – Évolution du nombre d'entrepôts - F6200-T10

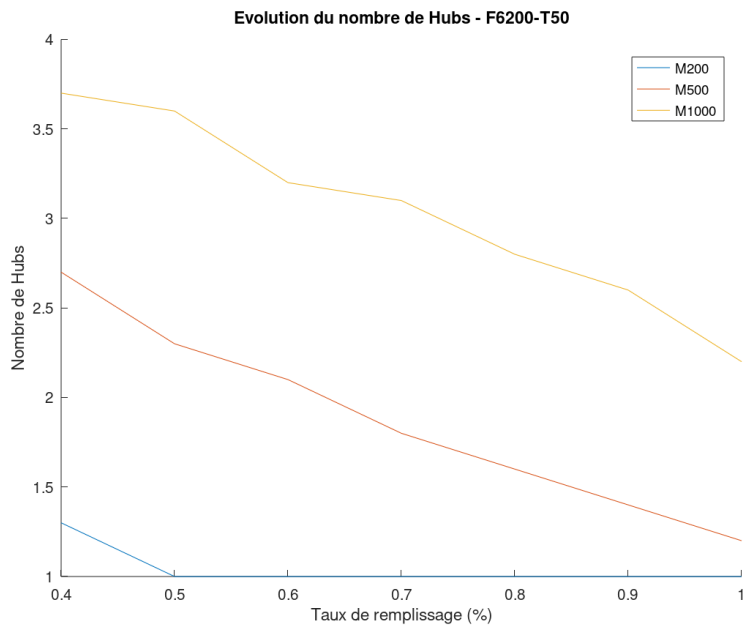


FIGURE B.16 – Évolution du nombre d'entrepôts - F6200-T50

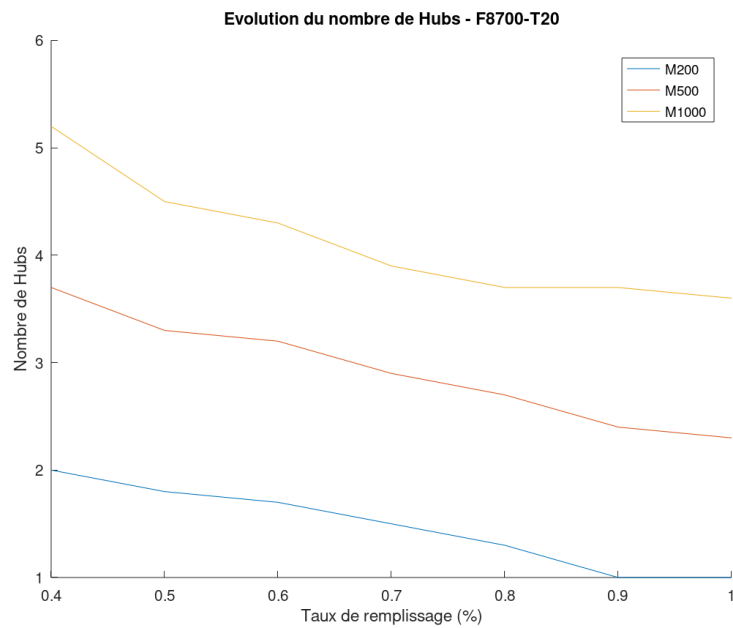


FIGURE B.17 – Évolution du nombre d'entrepôts - F8700-T20

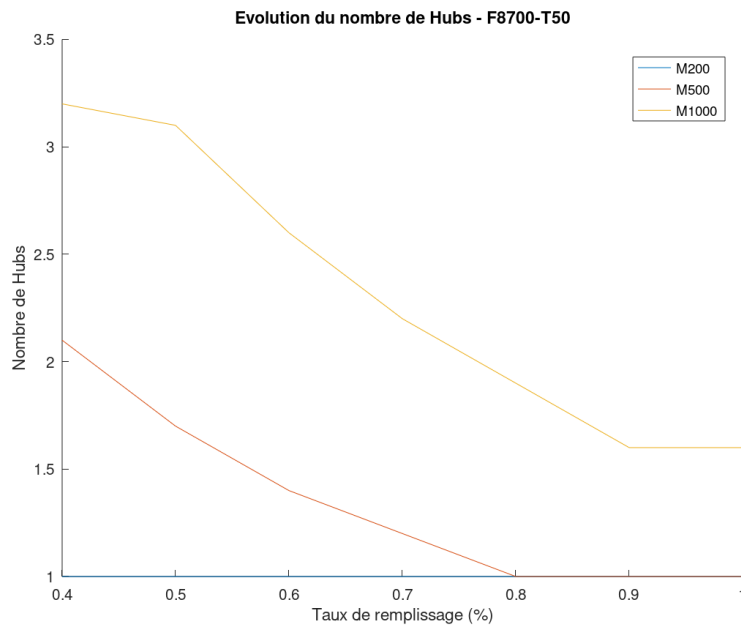


FIGURE B.18 – Évolution du nombre d'entrepôts - F8700-T50

Annexe C

Analyses cost

C.1 Influence du taux de remplissage

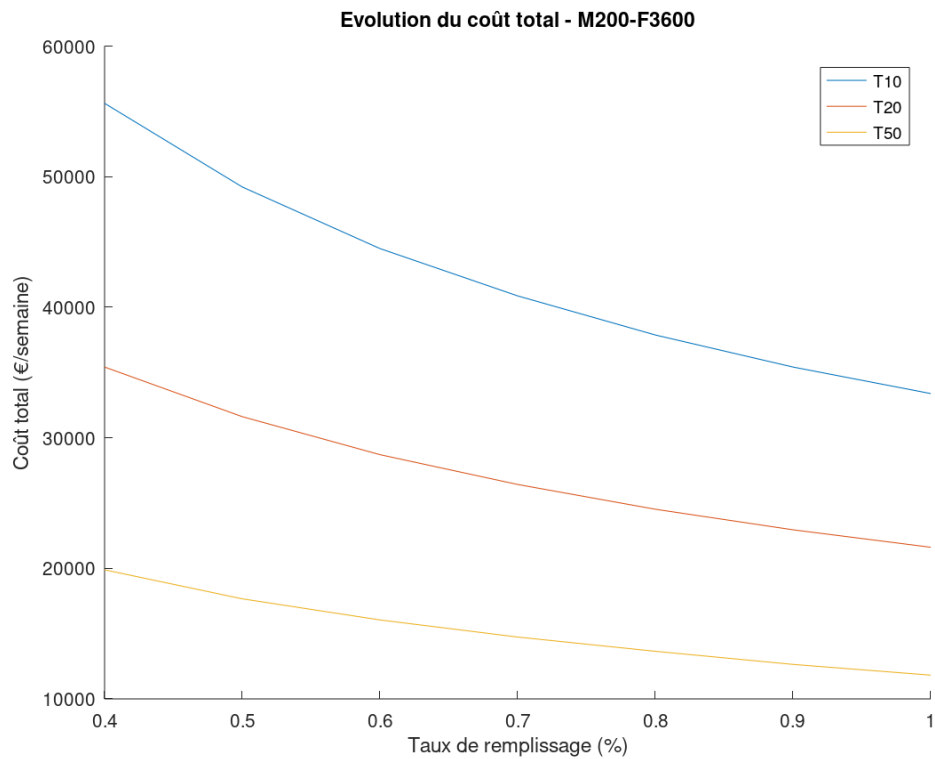


FIGURE C.1 – Évolution du coût total - M200-F3600

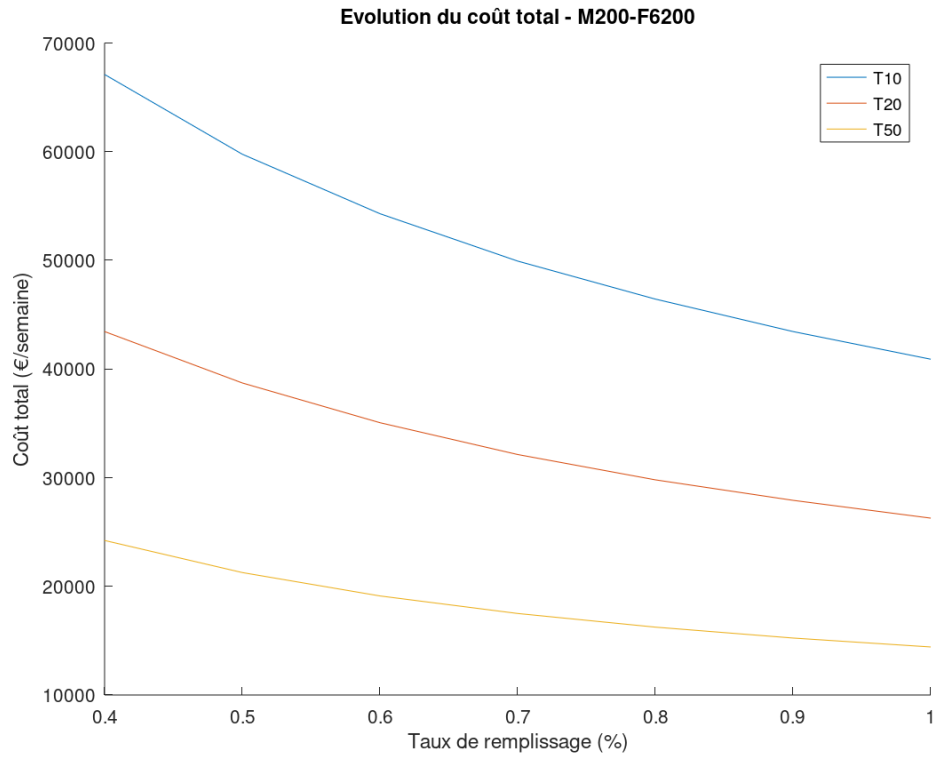


FIGURE C.2 – Évolution du coût total - M200-F6200

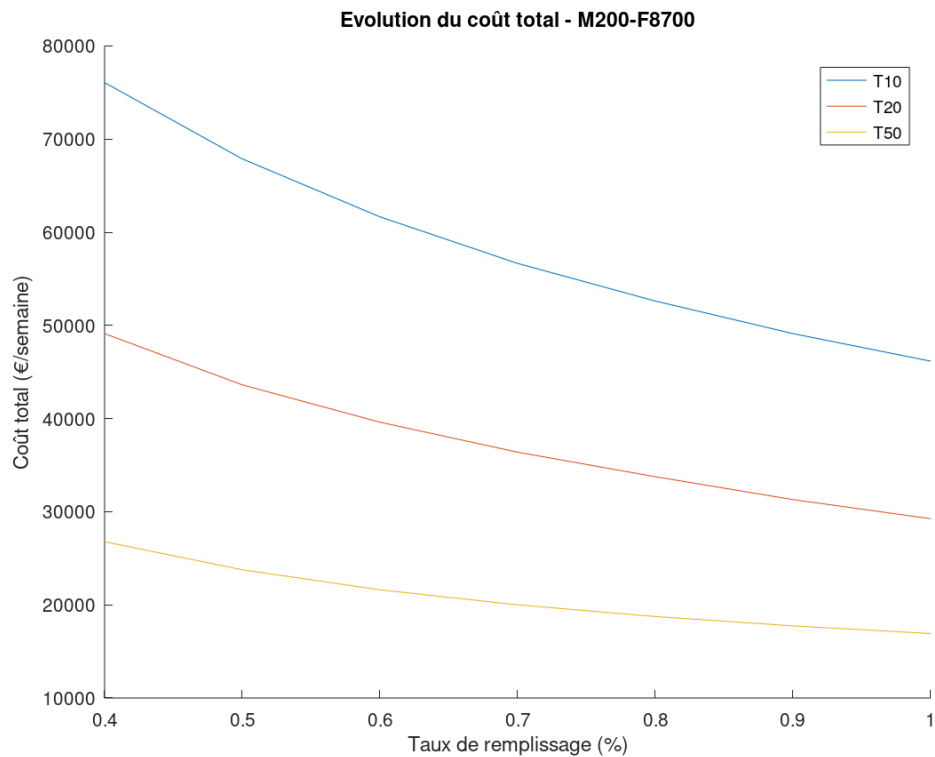


FIGURE C.3 – Évolution du coût total - M200-F8700

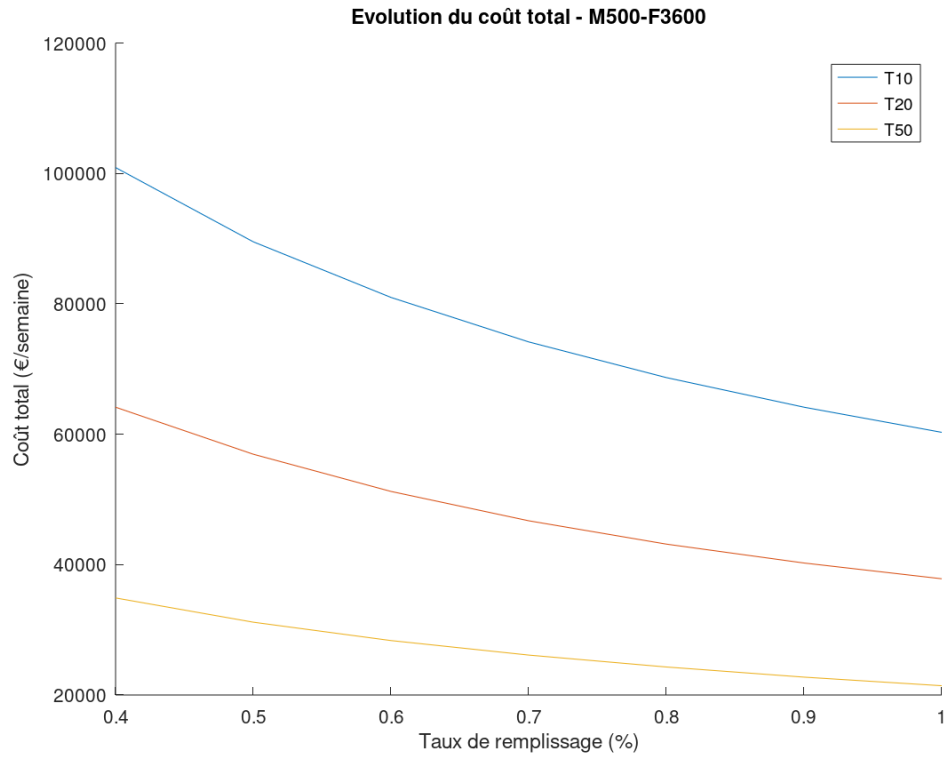


FIGURE C.4 – Évolution du coût total - M500-F3600

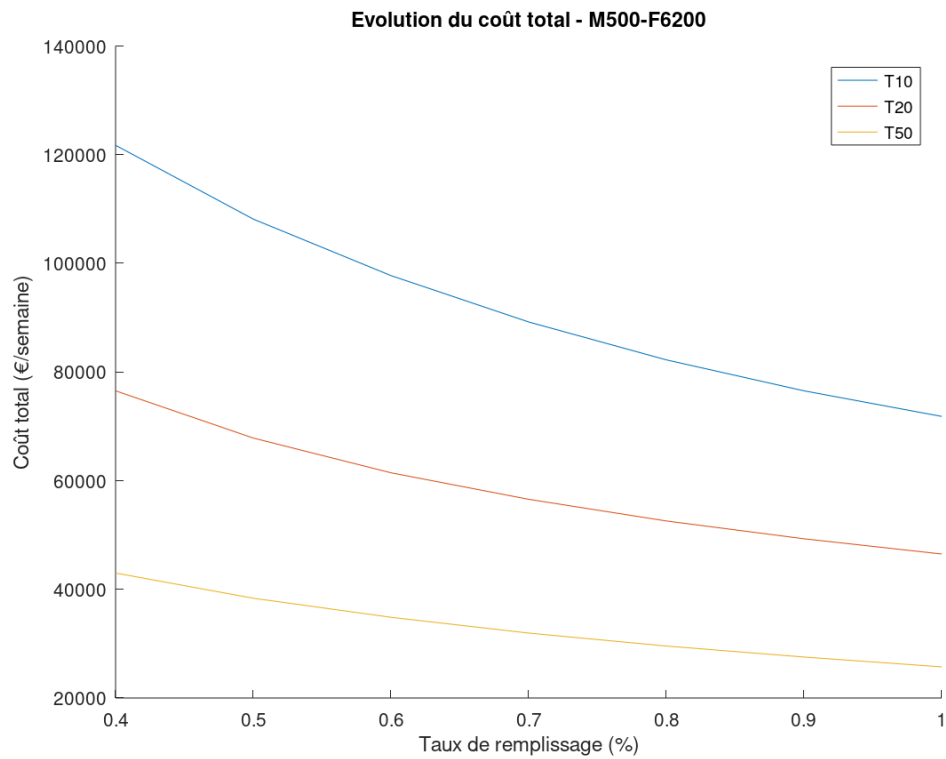


FIGURE C.5 – Évolution du coût total - M500-F6200

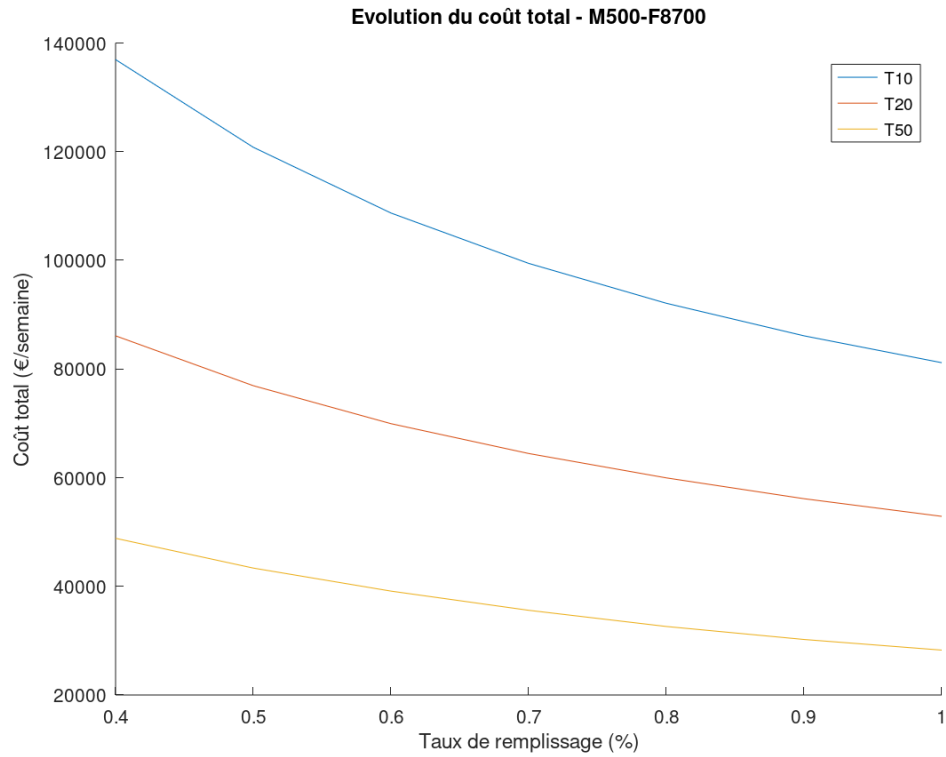


FIGURE C.6 – Évolution du coût total - M500-F8700

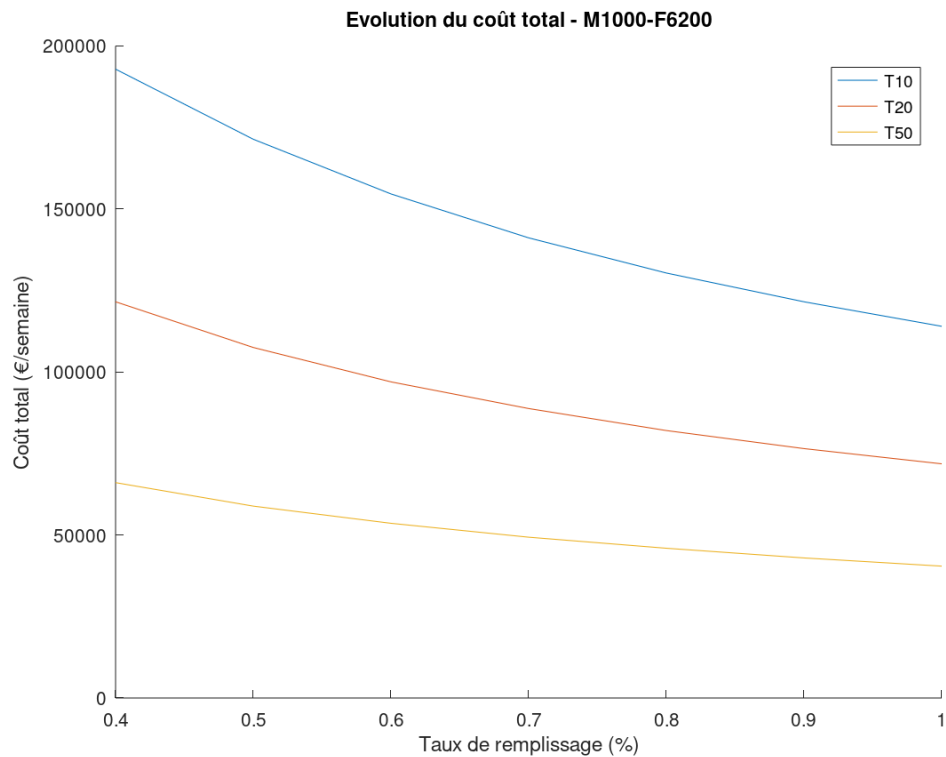


FIGURE C.7 – Évolution du coût total - M1000-F6200

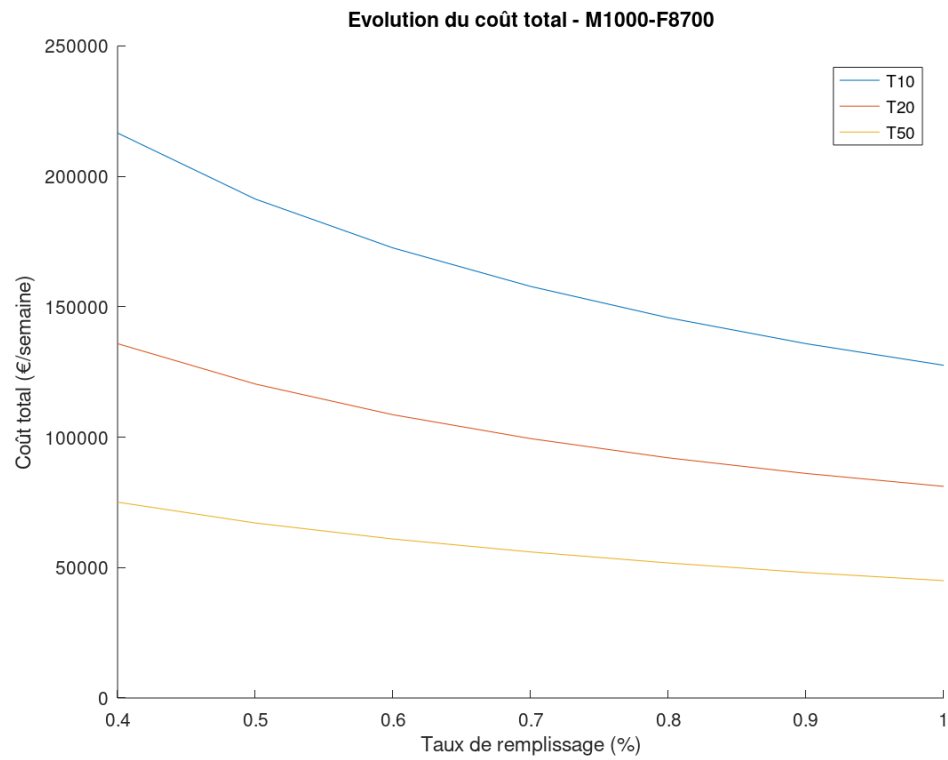


FIGURE C.8 – *Évolution du coût total - M1000-F8700*

C.2 Influence de la capacité de chargement

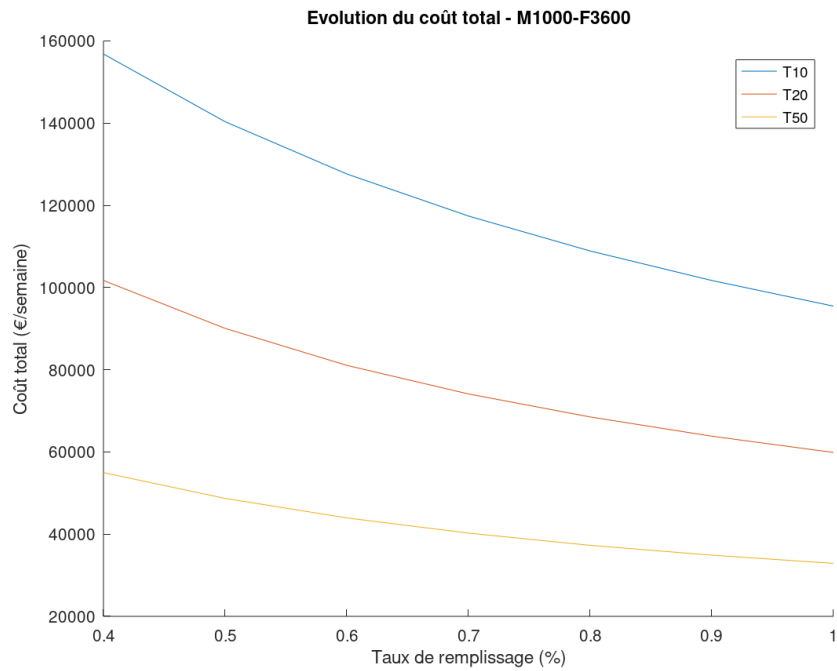


FIGURE C.9 – Évolution du coût total - M1000-F3600

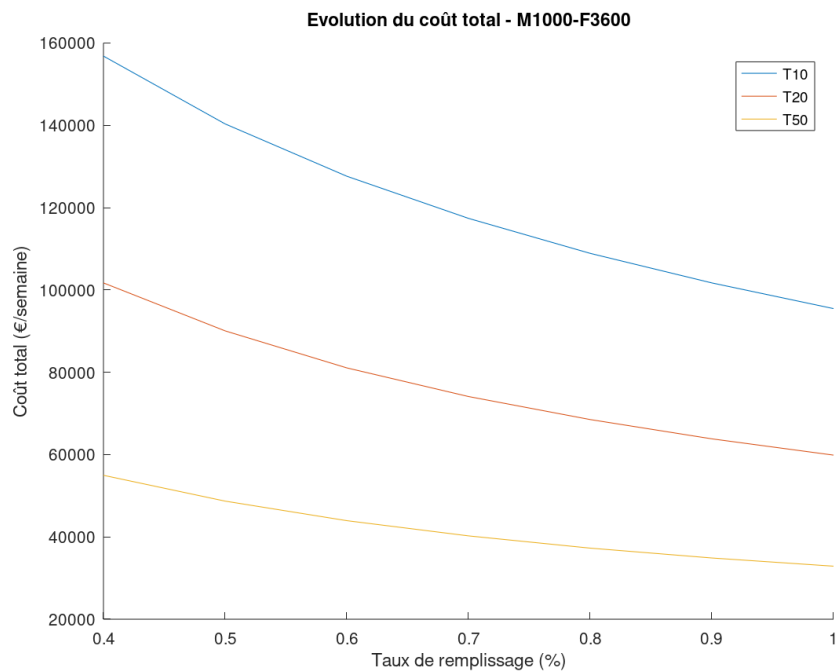


FIGURE C.10 – Évolution du coût total - M1000-F3600

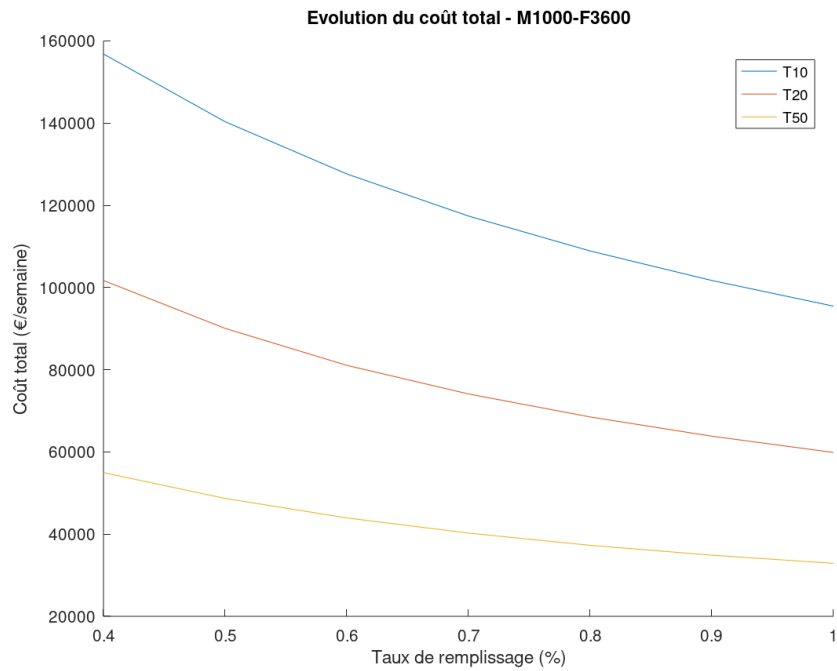


FIGURE C.11 – Évolution du coût total - M1000-F3600

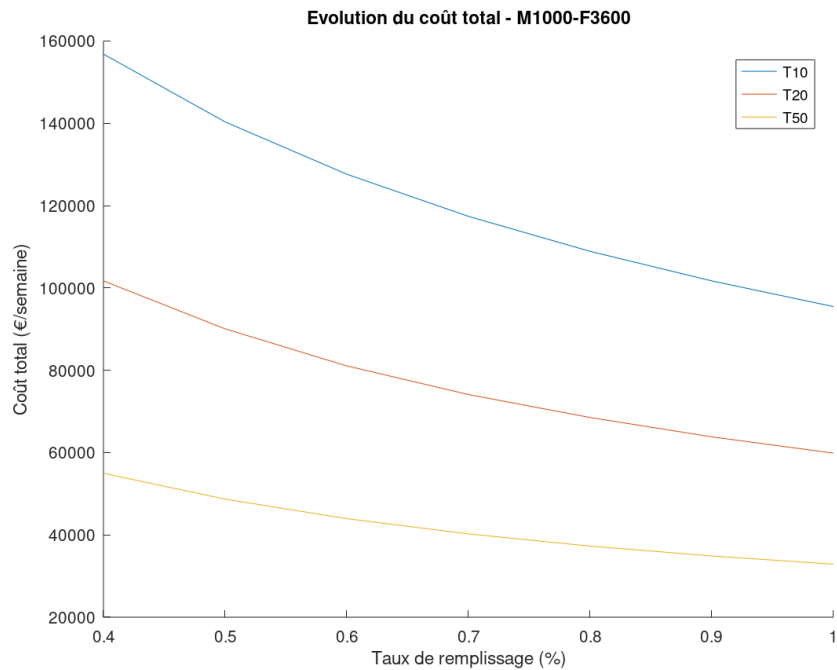


FIGURE C.12 – Évolution du coût total - M1000-F3600

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Louvain School of Management

Chaussée de Binche 151, 7000 Mons, Belgique | www.uclouvain.be/lsm