



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

# Problème d'implantation de plateformes de logistiques durables en milieu urbain

## THÈSE

Présentée et soutenue le 09/03/2018

Pour l'obtention du

### DOCTORAT de l'Université de Lorraine

(Mention Automatique, Traitement du signal et des images, Génie Informatique)

Par

**Nadia NDHAIEF**

Composition du jury :

<b>Rapporteurs :</b>	Daoud AIT-KADI	Professeur à l'Université Laval au Canada
	Alexandre DOLGUI	Professeur à l'École des Mines de Nantes
<b>Examineurs :</b>	Elyes BENYOUCEF	Professeur à l'Université Aix-Marseille
	Yasmina HANI	Maitre de conférences à l'IUT de Montreuil - Université Paris 8
<b>Directeur de thèse :</b>	Nidhal REZG	Professeur à l'Université de Lorraine
<b>Co-directeurs de thèse :</b>	Olivier BISTORIN	Maitre de conférences à ICN Business School (Nancy)

---



## Résumé

L'environnement urbain est fortement ancré dans la gestion des flux logistiques. La mutualisation de ces différents flux apporte alors une solution qualitative répondant aux critères environnementaux, économiques et sociétaux. Cette thèse propose une approche pour la mise en place des centres de distribution urbains (CDU) en combinant la logistique de distribution avec la logistique inverse (flux montants et flux descendants). L'objectif principal de ces CDU est d'assurer un développement durable dans les villes modernes.

L'hétérogénéité des pratiques de la logistique de distribution et de la logistique inverse constitue le principal verrou scientifique. La mutualisation de ces différents flux apporte alors une solution qualitative et durable dès lors qu'elle répond aux critères attendus : environnementaux, économiques et sociétaux.

Dans un contexte de logistique globale, nous nous sommes basés sur les problèmes de localisation de plateformes HLP « Hub Location Problem » afin de formuler le problème de localisation des CDU selon un critère de maximisation du profit par le choix du meilleur emplacement parmi ceux disponibles. Nous avons calculé les localisations partiellement possibles, tout en garantissant le traitement des flux retournés (collecte, tri, revente) et aussi en tenant compte des coûts socio-environnementaux. Par la suite, nous avons utilisé des outils de résolution du modèle proposé via des algorithmes d'optimisation. L'efficacité de ces algorithmes a été confirmée par un ensemble de jeux de données et de rapports d'analyse d'impacts.

La dynamique liée à la fiabilité des CDU dans l'exécution du service par la prise en compte d'une politique de coordination inter-CDU fait aussi partie de notre étude. Nous nous sommes intéressés à l'aspect de disponibilité pour garantir les livraisons à temps. En effet, l'indisponibilité du système peut être due aux pannes aléatoires, aux actions de maintenance préventive planifiées, etc. Par conséquent, nous présentons une solution qui permet de satisfaire la demande journalière de manière ponctuelle par l'intégration d'une approche collaborative entre les différents sites. Il s'agit d'un modèle d'optimisation de la politique de coordination inter-CDU avec une stratégie de sous-traitance des livraisons en cas d'indisponibilité.

**Mots clés** : Centre de Distribution Urbain, problème de localisation, développement durable, logistique urbaine, optimisation, maintenance.



## Abstract

The urban environment is strongly involved in the management of logistics flows. The pooling of these different flows provides a qualitative solution ensuring environmental, economic and societal criteria. The thesis objectives aim at supporting Urban Distribution Centers (CDU) by combining distribution logistics with reverse logistics (upstream flows and downstream flows), thereby ensuring sustainable development in modern cities.

The heterogeneity of the distribution logistics practices and the reverse logistics define the core of this thesis. Sharing these different flows provides a qualitative and sustainable solution as long as it meets the aforementioned criteria (environment, economy and society). Our approach is based on the Hub Location Problem to formulate the location problem of UDC while maximizing the profit and choosing the best available location. We proceed by identifying potential available locations, while guaranteeing returned flows management (collection, sorting, resale, etc.) and reducing pollution impact. Moreover, we simulate our optimised model with simulation tools using optimization algorithms. The effectiveness of these algorithms are validated based on generated outputs (set of data) inspired by real world scenarios.

Reliability is a part of this work when dealing with UDC deployment. The unavailability of the system may be due to random failures, planned preventive maintenance actions, etc. Therefore, we present a solution supporting daily demands by integrating a collaborative approach between different sites. This approach is based on inter-CDU coordination policy with a strategy of subcontracting deliveries dealing with unavailability.

**Keywords:** Urban Distribution Center, Location Problem, Sustainable Development, Urban logistics, optimization, Reliability.



## Remerciements

Je voudrais exprimer mes sentiments les plus sincères envers les personnes qui sans lesquelles ce travail de thèse n'aurait pas pu voir le jour. Leur aide, accompagnement et soutien m'ont été indispensables afin de pouvoir aboutir aux contributions de ma thèse.

Je voudrais tout d'abord exprimer ma reconnaissance envers tous les membres du jury pour la grande attention qu'ils ont bien voulu porter à mon travail. Je suis très reconnaissante envers Mr Nidhal REZG, mon directeur de thèse, qui m'a encadré et dirigé dans mes recherches tout au long de ces années. Je tiens à lui exprimer mes remerciements et ma gratitude pour ses conseils précieux pendant les moments les plus difficiles de ma thèse, pour sa disponibilité, ses encouragements et pour la confiance qu'il m'a toujours témoignée. Mes remerciements vont également à Mr Olivier BISTORIN, mon co-directeur de thèse, qui m'a encadré et dirigé dans mes recherches tout au long de ces années. Je leur dois ma gratitude pour l'aide compétente qu'il m'a apportée.

Je remercie très sincèrement mes rapporteurs Mr Daoud AIT-KADI et Mr Alexandre DOLGUI pour avoir bien accepté d'être mes rapporteurs et pour avoir bien voulu lire et évaluer mon travail de thèse. Je les remercie pour leurs lectures approfondies de mon mémoire de thèse, pour tout le temps qu'ils m'ont accordé et pour les remarques très constructives qu'ils m'ont données et qui ont été bénéfiques à la réalisation de ce manuscrit. Je remercie également Mr Elyes BENYOUCEF et Mme Yasmina HANI pour leur participation au jury de cette thèse et le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à l'évaluation de mon travail.

Je remercie vivement tous les membres du laboratoire LGIPM, en particulier Zouhour Guiras, pour les encouragements et le soutien reçu durant les trois années.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mes parents, ma sœur et mon frère. Je remercie aussi mon oncle Dhifallah, sa femme Sarra, ma tante Saida et sa famille. Une pensée à mon beau-frère Ali, ma belle-sœur Dorsaf, mes nièces Farah et Samar et mon neveu Zakaria.

Merci aussi à tous mes amis, en particulier Narjess, Emna, Marwa, Meriem et Samia.

Enfin, un remerciement à la personne qui m'a donné le courage, le soutien, l'amour et la confiance pour surmonter les moments difficiles durant ma thèse et qui était à l'écoute et très compréhensif, mon mari.



Je dédie ce travail à mes parents, Zahia et Mohamed, à qui je dois tout.  
À mon mari Khaled, ma sœur Inès et mon frère Béchir.  
À la mémoire de mon grand-père Ali Bousnina qui me manque beaucoup.



## Table des Matières

### **Introduction Générale ..... 19**

### **Chapitre I : État de l'art de la logistique urbaine..... 23**

1	Introduction .....	24
2	Une vue d'ensemble de logistique urbaine .....	24
3	La logistique inverse .....	29
3.1	Les avantages de la logistique inverse .....	30
3.2	Les types de retours .....	30
3.3	Le Problème de Localisation des Installations pour Logistique Inverse .....	32
4	Les modèles de localisation des plateformes (Hub Location Problem) .....	33
4.1	The p-hub median problem .....	35
4.2	Hub location avec coûts fixes : prise en compte d'un coût fixe d'ouverture des plateformes.....	36
4.3	The p-hub center problem .....	37
4.4	Hub covering problem (le problème de recouvrement des plateformes).....	38
5	Centre de distribution urbain : une solution pour le management collectif .....	38
6	Les critères de choix de localisation de plateformes logistiques.....	42
7	Problématique de la thèse.....	44
8	Conclusion.....	45

### **Chapitre II : Mise en équations du problème de localisation des centres de distribution urbains selon des critères de coûts économiques, sociétaux et environnementaux ..... 49**

1	Introduction .....	50
2	Éléments de contexte.....	50
3	Présentation du problème proposé .....	53
3.1	Modélisation mathématique.....	55
3.1.1	Paramètres et variables de décision .....	55
3.1.2	Modélisation de la fonction objective .....	56
3.1.3	Modélisation des contraintes .....	57
4	Exemple et étude de sensibilité .....	59
4.1	Hypothèses .....	59
4.2	Résultats Numériques .....	61
4.3	Discussion .....	65
5	Conclusion.....	65

## **Chapitre III : Optimisation du problème de localisation des centres de distribution urbains..... 69**

1	Introduction .....	70
2	Les problèmes d'optimisation .....	70
2.1	Programmation linéaire (PL) .....	70
1.1	Programmation non linéaire (PNL).....	71
2.1.1	Stratégie de pénalisation des contraintes .....	71
2.1.2	Une stratégie de linéarisation .....	72
3	Les problèmes d'optimisation pour la localisation des CDU .....	73
3.1	État de l'art sur les problèmes de localisation de CDU existants .....	73
3.2	Complexité des PLCDU .....	75
3.3	Les méthodes de résolution des problèmes de localisation.....	76
4	Modèle mathématique .....	77
4.1	Linéarisation des termes non linéaires .....	80
4.1.1	Reformulation de notre modèle mathématique .....	80
4.2	Exemple numérique .....	83
4.2.1	Résolution par l'algorithme Branch & Bound.....	83
4.2.2	Résolution par l'algorithme génétique .....	88
4.2.2.1	Création de l'individu .....	91
4.2.2.2	Génération de la population initiale.....	91
4.2.2.3	Évaluation .....	91
4.2.2.4	Stratégie de sélection .....	92
4.2.2.5	Croisement .....	92
4.2.2.6	Mutation.....	93
4.2.2.7	Résultats.....	93
4.2.3	Amélioration de la solution obtenue par le GA par l'algorithme recuit simulé 95	95
5	Conclusion.....	97

## **Chapitre IV : Contribution à l'efficacité des CDU par la prise en compte de la maintenance et la sous-traitance . 101**

1	Introduction .....	102
2	Plan de distribution corrélé au plan de maintenance pour un CDU 1/N utilisant la stratégie de sous-traitance.....	103
2.1	Paramètres.....	104
2.2	Variables de décisions.....	105
2.3	Le cas affectation simple (1/N).....	105
2.3.1	Modélisation mathématique du plan de distribution en tenant compte de la sous-traitance.....	105
2.3.2	Modélisation du coût de la maintenance .....	106
2.3.3	Exemple numérique.....	109

2.3.3.1	Étape 1 : Plan de distribution et sous-traitance sans tenir compte de la dégradation du CDU .....	109
2.3.3.2	Étape 2 : Plan de maintenance .....	111
2.3.3.3	Étape 3 : Le plan de distribution final utilisant la stratégie de sous-traitance .....	112
2.4	Le cas multi affectations n/N .....	112
2.4.1	Modélisation mathématique du plan de distribution avec sous-traitance.....	113
2.4.2	Résultats numériques .....	114
2.4.2.1	Étape 1 : Plan de distribution et de sous-traitance sans la dégradation du CDU .....	114
2.4.2.2	Étape 2 : Plan de maintenance .....	116
2.4.2.3	Étape 3 : Le plan de distribution finale et de sous-traitance ave la dégradation du CDU .....	116
2.5	Conclusion .....	117
3	Le plan de distribution corrélé à un plan de maintenance pour N/N CDU utilisant la stratégie de sous-traitance.....	118
3.1	Modélisation mathématique du problème.....	119
3.1.1	Paramètres .....	119
3.1.2	Variables de décisions .....	120
3.1.3	Modélisation mathématique de la planification de la distribution en tenant compte de la sous-traitance .....	120
3.1.4	Modélisation mathématique de la stratégie de maintenance .....	121
3.2	Exemple numérique .....	123
3.2.1	Étape 1 : Plan de distribution et de la sous-traitance sans tenir compte de la dégradation du CDU.....	123
3.2.2	Etape 2 : Plan de maintenance .....	126
3.2.3	Étape 3 : Plan de distribution finale utilisant la stratégie de sous-traitance .	129
4	Notre synthèse entre les différents scénarios .....	130
5	Conclusion.....	131

<b>Conclusions &amp; Perspectives.....</b>	<b>133</b>
--	------------

<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>137</b>
--	------------



## Liste des tableaux

Tableau I-1 : Indicateurs économiques proposé(e)s par Morana et al. (2015).....	28
Tableau I-2 : Indicateurs environnementaux proposé(e)s par Morana et al. (2015).....	28
Tableau I-3 : Indicateurs sociaux/sociétaux proposé(e)s par Morana et al. (2015) .....	28
Tableau I-4 : Travaux sur le p-Hub Median Problem avec affectation simple .....	36
Tableau I-5 : Travaux sur le p-Hub Median Problem avec affectation multiple .....	36
Tableau I-6 : Travaux sur le Hub location Problem avec coût fixe .....	37
Tableau II-1 : Évaluation qualitative et quantitative pour chaque UDC potentiel.....	61
Tableau II-2: Nombre de variables dans l'exemple numérique.....	62
Tableau II-3 : Résultat final .....	63
Tableau II-4 : Les résultats des 20 simulations de profits.....	64
Tableau III-1 : Évaluation quantitative des CDU (caractéristiques/site) .....	85
Tableau III-2 : Impact de la variation de k sur les résultats .....	86
Tableau III-3 : Résultat final .....	86
Tableau III-4 : Nombre de variables dans l'exemple numérique .....	86
Tableau III-5. Les résultats des variables de notre modèle mathématique .....	87
Tableau III-6 : Les résultats des 10 simulations de profits .....	88
Tableau III-7 : Le chromosome étudié.....	91
Tableau III-8 : Résultat de l'algorithme génétique .....	94
Tableau III-9 : Comparaison entre les résultats de la méthode B&B et les résultats de l'algorithme génétique.....	95
Tableau IV-1 : Demande de chaque période.....	109
Tableau IV-2 : Taux de livraison disponible du CDU <sub>1</sub> .....	109
Tableau IV-3 : Taux de livraison disponible du CDU <sub>2</sub> .....	109
Tableau IV-4 : Plan de distribution avec capacité maximale.....	110
Tableau IV-5 : Capacité de livraison disponible pour chaque période .....	111
Tableau IV-6 : Capacité de livraison pour chaque période sans actions de maintenance préventives .....	112
Tableau IV-7 : Plan de distribution en tenant compte de la variation de la capacité.....	112
Tableau IV-8 : La demande moyenne de la zone attribuée.....	114
Tableau IV-9 : Capacité disponible pour chaque CDU <sub>1</sub> .....	114
Tableau IV-10 : Capacité disponible pour chaque CDU <sub>2</sub> .....	114

Tableau IV-11 : Capacité disponible pour chaque CDU <sub>3</sub> .....	115
Tableau IV-12 : Coût unitaire de service et d'émission de pollution pour chaque CDU .....	115
Tableau IV-13 : Plan de distribution optimale d'un CDU avec sa capacité maximale.....	115
Tableau IV-14 : Capacité disponible pour chaque période t .....	116
Tableau IV-15 : Plan de distribution en tenant compte de la variation de la capacité .....	117
Tableau IV-16 : Plan de distribution en tenant compte de la variation de la capacité sans tenir compte de la stratégie de sous-traitance.....	117
Tableau IV-17 : Demande de chaque période pour le CDU <sub>1</sub> .....	124
Tableau IV-18 : Demande de chaque période pour le CDU <sub>2</sub> .....	124
Tableau IV-19 : Demande de chaque période pour le CDU <sub>3</sub> .....	124
Tableau IV-20 : Les capacités maximales de chaque CDU .....	124
Tableau IV-21 : Les différents coûts de sous-traitance .....	124
Tableau IV-22 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU <sub>1</sub> .....	125
Tableau IV-23 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU <sub>2</sub> .....	126
Tableau IV-24 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU <sub>3</sub> .....	126
Tableau IV-25 : Taux de livraison disponible pour le CDU <sub>1</sub> pendant chaque période.....	127
Tableau IV-26 : Taux de livraison disponible pour CDU <sub>2</sub> pendant chaque période.....	128
Tableau IV-27 : Taux de livraison disponible pour le CDU <sub>3</sub> pendant chaque période.....	129
Tableau IV-28 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU <sub>1</sub> .....	129
Tableau IV-29 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU <sub>2</sub> .....	129
Tableau IV-30 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU <sub>3</sub> .....	130
Tableau IV-31 : Les caractéristiques de chaque problématique proposée .....	130
Tableau IV-32 : Avantages et inconvénients de chaque scénario .....	131

## Liste des figures

Figure I-1 : Population urbaine et rurale du monde 1950-2050 .....	25
Figure I-2 : Les acteurs de la logistique urbaine .....	25
Figure I-3 : Définition de la logistique inverse proposée par Lamber et Riopel (2003) .....	30
Figure I-4 : Représentation de la logistique inverse.....	31
Figure I-5 : Un réseau de distribution et de collecte par Lu et Bostel (2007) .....	33
Figure I-6 : La typologie des ELUs .....	39
Figure I-7 : La logistique urbaine en 2016 .....	40
Figure I-8 : Le CDU de la Rochelle .....	41
Figure I-9 : Les critères de localisation .....	43
Figure I-10 : Le système proposé .....	45
Figure II-1 : Le système étudié.....	52
Figure II-2 : Problème de localisation des CDU .....	53
Figure II-3 : Définition du Cross-Docking.....	54
Figure II-4 : Le territoire étudié .....	62
Figure II-5 : Résultats numériques .....	63
Figure II-6 : Allure des écarts entre les résultats des profits générés et leurs moyennes.....	64
Figure III-1 : Différence entre un maximum local et un maximum global.....	71
Figure III-2 : Processus de la sélection et localisation des CDU .....	73
Figure III-3 : Problème de localisation des CDU.....	75
Figure III-4 : Arborescence des solutions obtenue par la méthode Branch et Bound.....	83
Figure III-5 : Le territoire étudié .....	84
Figure III-6 : Structure générale d'un algorithme génétique .....	89
Figure III-7 : Présentation d'un chromosome .....	91
Figure III-8 : Le concept du Croisement.....	92
Figure III-9 : Croisement d'un couple de parent .....	93
Figure III-10 : Représentation schématique d'une mutation dans un individu.....	93
Figure III-11 : Comparaison entre la solution trouvée par le RS et une heuristique classique	96
Figure IV-1 : Description du problème général .....	103
Figure IV-2 : La description du problème.....	104
Figure IV-3 : Stratégie de maintenance adoptée .....	107
Figure IV-44 : Coût de la maintenance .....	111

Figure IV-5 : Évolution du coût de la maintenance par rapport au nombre d'actions de maintenances préventives .....	116
Figure IV-6 : Description du problème .....	119
Figure IV-7 : Évolution du coût de la maintenance par rapport au nombre d'actions de maintenances préventives pour le CDU <sub>1</sub> .....	127
Figure IV-8 : Évolution du coût de la maintenance par rapport au nombre d'actions de maintenances préventives pour le CDU <sub>2</sub> .....	128
Figure IV-9 : Évolution du coût de la maintenance par rapport au nombre d'actions de maintenance préventives pour CDU <sub>3</sub> .....	128
figure IV-10:Evolution du temps d'exécution pour la résolution du modèle mathématique de distribution .....	131

# Introduction Générale

**D**urant ces dernières années, la concurrence induite par la mondialisation a rendu les clients de plus en plus exigeants en termes de qualité de service, de réactivité et de flexibilité (Boutary et al. 2016). En plus de ces exigences, ils attachent aussi de l'importance au développement durable. D'un autre côté, la crise financière et la baisse du pouvoir d'achat ont poussé les entreprises à optimiser leurs coûts et à revoir leur organisation. À cela s'ajoute la flambée des prix des matières premières, ainsi que leur raréfaction (PIPAME, 2011).

Dans ce contexte, la logistique a connu des changements stratégiques modifiant l'aspect traditionnel de la chaîne en visant à l'amélioration des relations entre les industriels, mais aussi avec les clients finaux. Généralement, ces modifications consistent à mutualiser des activités et des ressources dans l'objectif de minimiser les traces logistiques (déplacement d'objets tangibles). Cette logistique dite collaborative entre distributeurs, industriels et prestataires logistiques est devenue primordiale (Pan et al., 2010). En effet, la mutualisation des flux est une stratégie émergente d'amélioration de la performance logistique. Le principe de la mutualisation consiste à transférer l'effort de coordination pour massifier les flux d'opérateurs indépendants vers une organisation mutualisée. Cette organisation est conçue pour partager des moyens de transport et des plateformes logistiques utilisés pour servir les mêmes clients.

Au début des années 1990, le transport de marchandise en ville (TMV) n'a cessé de faire l'objet de travaux de recherche de plus en plus nombreux et il y a eu des mutations au niveau de la problématique traitée. La logistique urbaine est un pilotage global incluant : le transport, le stockage, le conditionnement, la gestion des commandes, la gestion des retours, la gestion des emballages et palettes, les livraisons à domicile et l'offre de relais livraison. La logistique urbaine est une nécessité pour le développement économique et social des centres villes car l'exode rural a rempli les villes des pays développés et en voie de développement et cette population importante est prescriptrice d'exigences de plus en plus contraignantes (réduction de la pollution environnementale, sonore, visuelle, tout en disposant d'un accès simple et économique à un maximum de ressources).

La recherche a pour objectif d'améliorer la gestion de la logistique urbaine en enrichissant les connaissances dans ce domaine et en aidant à la prise de décisions par les pouvoirs publics et/ou les opérateurs logistiques délégués pour la maîtrise des flux logistiques sur un espace urbain dédié. En effet, l'amélioration des flux des marchandises et des produits retournés est une des grandes préoccupations des autorités locales. La ville n'est plus considérée comme un milieu qui rassemble les mouvements des personnes, mais aussi celui des marchandises (Gonzalez-Feliu et al., 2013).

La ville représente un lieu d'expression des facteurs économiques générés par des flux de marchandises nécessaires à la société. En raison de nouvelles législations en faveur de la protection de l'environnement et aussi pour des raisons économiques, un nombre croissant d'entreprises prennent désormais en compte les flux inverses, c'est-à-dire l'acheminement des produits retournés (des produits défectueux, des emballages, des retours, etc.) à partir des clients

vers des centres de récupération, au sein de leurs systèmes logistiques. Il est d'utilité publique que chaque ville dispose d'infrastructures qui conviennent d'un point de vue fonctionnel et géographique aux espaces urbains, afin de mieux gérer les flux dans les villes, tout en optimisant l'utilisation des ressources publiques telles que l'espace, l'énergie, etc. Ces infrastructures sont destinées à participer à l'optimisation du transit urbain des marchandises, des produits retournés et des personnes (Gonzalez-Feliu et al., 2013).

L'instauration de centres de distribution urbains (CDU) est la solution la plus fréquemment déployée dans les zones urbaines. Elle consiste à permettre aux transporteurs d'acheminer des colis directement sur une plateforme logistique où ceux-ci reçoivent un traitement complémentaire avant d'être enfin envoyés au client final par un véhicule propre. Ces installations ont en majorité quitté les agglomérations pour s'installer dans les périphéries des villes. Les raisons sont multiples : urbanistiques (impossibilité réglementaire de s'installer), sociétales (rejet d'outils jugés créateurs de nuisances sanitaires, sonores et visuelles) ou encore économiques (coût du foncier prohibitif).

L'objectif de cette thèse est de proposer des solutions d'amélioration pour les Centres de Distribution Urbains (CDU) afin de garantir une viabilité économique, des livraisons à temps, tout en s'engageant dans une démarche de développement durable. Le mémoire de thèse est structuré en quatre chapitres :

- I. Le premier chapitre a pour objectif de présenter l'importance de la logistique urbaine et l'utilité de suivre la démarche de développement durable. Nous nous appuyons sur de nombreux travaux dans la logistique inverse et la localisation des Centres de Distribution Urbains afin d'aboutir sur la présentation de la problématique de la thèse.
- II. Le deuxième chapitre apporte une formulation à la problématique d'implantation des CDU. Dans ce cadre, un modèle mathématique maximisant le profit d'un CDU en choisissant son meilleur emplacement à travers des localisations potentielles et en valorisant les flux de retour (produits retournés et déchets recyclables). Notre modèle tient compte aussi des coûts sociétaux et environnementaux.
- III. Le troisième chapitre a pour objectif d'étendre la problématique traitée dans le chapitre 2 à un nombre de CDU supérieur à 1. Evidemment, la répartition des différents flux logistiques traités par les CDU sera à réaliser et cela passe par l'introduction d'algorithmes issus de la recherche opérationnelle avec une analyse de complexité pour différents cas d'optimisation. Les algorithmes d'optimisation développés dans ce chapitre ont été testés et analysés pour leur qualité de la solution, de leur temps d'exécution ainsi que pour leurs limites d'utilisation.
- IV. Le quatrième chapitre portera les solutions à apporter en cas d'indisponibilité des CDU et la possibilité d'une coopération inter-CDU afin de maintenir et de garantir ainsi le taux de service exigé par les clients. Les indisponibilités des CDU pourront découler d'avaries non attendus et/ou de la mise en œuvre d'actions de maintenance préventive nécessaires au fonctionnement des CDU. Pour cela, une modélisation mixte de la distribution et de la politique de coordination inter-CDU couplée de manière séquentielle à une politique de maintenance des CDU sera proposée et validée à travers des résultats numériques.

## **Chapitre I : État de l'art de la logistique urbaine..... 23**

<u>1</u>	<u>Introduction</u> .....	24
<u>2</u>	<u>Une vue d'ensemble de logistique urbaine</u> .....	24
<u>3</u>	<u>La logistique inverse</u> .....	29
<u>3.1</u>	<u>Les avantages de la logistique inverse</u> .....	30
<u>3.2</u>	<u>Les types de retours</u> .....	30
<u>3.3</u>	<u>Le Problème de Localisation des Installations pour Logistique Inverse</u> .....	32
<u>4</u>	<u>Les modèles de localisation des plateformes (Hub Location Problem)</u> .....	33
<u>4.1</u>	<u>The p-hub median problem</u> .....	35
<u>4.2</u>	<u>Hub location avec coûts fixes : prise en compte d'un coût fixe d'ouverture des plateformes</u> .....	36
<u>4.3</u>	<u>The p-hub center problem</u> .....	37
<u>4.4</u>	<u>Hub covering problem (le problème de recouvrement des plateformes)</u> .....	38
<u>5</u>	<u>Centre de distribution urbain : une solution pour le management collectif</u> .....	38
<u>6</u>	<u>Les critères de choix de localisation de plateformes logistiques</u> .....	42
<u>7</u>	<u>Problématique de la thèse</u> .....	44
<u>8</u>	<u>Conclusion</u> 45	



# Chapitre I : État de l'art de la logistique urbaine

De nos jours, les centres de distribution urbains et la logistique inverse sont les solutions les plus utilisées pour répondre aux problèmes quotidiens rencontrés par le milieu urbain, tels que le bruit, la pollution et les coûts élevés du transport des marchandises en ville. Dans ce chapitre, nous présenterons le déploiement de ces CDU et nous analyserons leurs éventuels problèmes. Pour ce faire, nous avons étudié quelques cas des CDU. À la suite de ce travail, nous pensons que l'intégration des deux domaines (CDU et Logistique inverse) peut créer une valeur ajoutée dans la logistique urbaine et nous remarquons que les problèmes liés aux CDU les plus discutés sont les problèmes de localisation car ils font partie des décisions les plus stratégiques, mais aussi très décisives pour les parties prenantes.

Dans un premier temps, nous allons présenter l'importance de la logistique urbaine et les problèmes qu'elle peut les rencontrer. Mais aussi Nous présenterons également la nécessité pour la logistique urbaine le besoin de s'intégrer dans une démarche de développement durable. Ensuite, nous allons définir la logistique inverse ainsi que son importance et son rôle stratégique sur la chaîne logistique. Par la suite, nous présenterons quelques travaux impliquant les flux inverses et la localisation des infrastructures responsables de ces flux.

Puis, nous décrirons la solution qui permet de faire face aux problèmes engendrés par les flux logistiques en milieu urbains et qui fait l'objet de notre thèse, à savoir l'instauration des CDU pour la livraison en milieu urbain. Par la suite, nous présenterons une revue de littérature des problèmes de localisations des plateformes nommées : *Hub Location Problem*. Enfin, nous évaluerons quelques cas concrets des CDU déjà existants.

## **1 Introduction**

La logistique urbaine recouvre tous les flux logistiques existants dans le milieu urbain, tels que le transport, le stockage, le conditionnement, la gestion des commandes, la gestion des retours, la gestion des emballages et palettes, les livraisons à domicile, les livraisons en point relais. En conséquence, Les travaux et les projets visant à améliorer la logistique urbaine sont une nécessité pour le développement économique et social des centres villes. Par ailleurs, la logistique urbaine a été largement étudiée dans la littérature afin d'aider les donneurs d'ordre à prendre des décisions.

Les Centres de Distribution Urbaine (CDU) et la logistique inverse sont les solutions les plus couramment utilisées pour résoudre les problèmes engendrés par les flux logistiques en milieu urbain, tels que le bruit, la pollution et le coût. L'étude bibliographique a donc porté à la fois sur des thèmes relatifs au sujet de la thèse, notamment les études existantes en matière d'améliorations des flux logistiques des milieux urbains, tout en s'engageant dans une démarche de développement durable, - ainsi que sur des modèles mathématiques portant sur les problèmes de localisation des plateformes et qui prennent en compte la logistique inverse.

Dans cette section, nous introduisons également les définitions de la logistique urbaine, la logistique inverse et le Centre de Distribution Urbaine (CDU) ainsi que les modèles existants afin de soutenir l'intégration des plateformes logistiques dans un système de logistique directe et inverse pour les milieux urbains.

## **2 Une vue d'ensemble de logistique urbaine**

Les flux logistiques en ville représentent un enjeu important pour l'activité économique de la ville, la qualité de vie des résidents, et l'environnement. Ils englobent les flux de consommation (livraisons express, livraisons fréquentes, e-commerce et le marché de la livraison à domicile). Les collectivités locales tentent toujours d'offrir de nouvelles stratégies en vue d'accroître la qualité de vie de leurs citoyens et d'améliorer la compétitivité économique. Ces stratégies permettent également d'améliorer la croissance économique et de réduire les externalités négatives (pollution, congestion, accidents, etc.).

Le nombre de livraisons a beaucoup augmenté ; il est lié à l'accroissement de la demande, l'apparition du commerce électronique, l'émergence de nouveaux modes de livraison (la livraison à domicile, point relais etc.) et la croissance de la population urbaine (voir Figure I-1). Au cours de la dernière décennie, la plupart des citoyens habitant dans les centres villes (Lee, 2014), ce qui génère de nombreux problèmes sont apparus, tels que la congestion, la pollution, les risques quant à la (de) sécurité, etc. On estime que la population urbaine devrait atteindre 70% de la population mondiale en 2050 (Pasternak, A. & Pellissier, 2014).

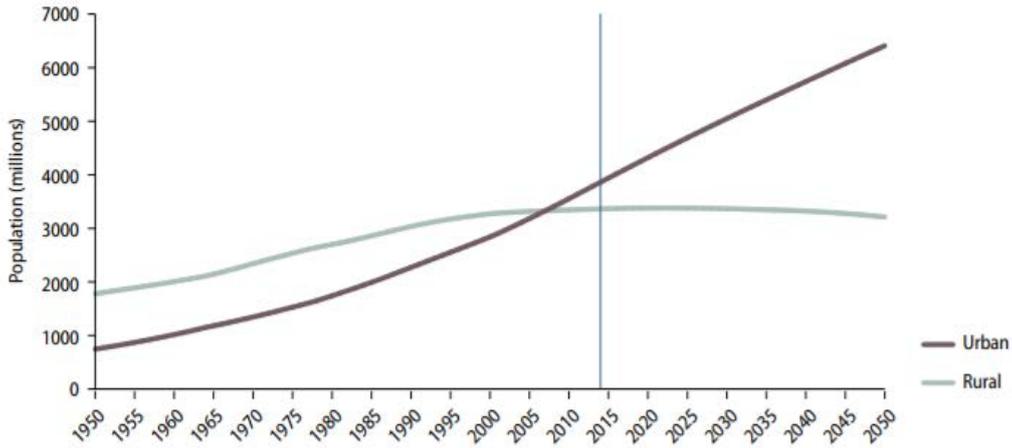


Figure I-1 : Population urbaine et rurale du monde 1950-2050<sup>1</sup>

Cette augmentation va certainement affecter la logistique urbaine et va inciter les acteurs à anticiper des solutions pour faire face à ces enjeux de taille. Ces acteurs peuvent être de natures différentes (Abdelhai et al., 2014) :

- Acteurs économiques, généralement des acteurs privés qui cherchent à maximiser leurs profits, (comme) tels que prestataires logistiques, commerçants, acteurs privés du secteur des transports, points relais, entrepôts, etc.
- Acteurs institutionnels, ceux qui cherchent à améliorer le bien-être collectif, tels que l'état, les collectivités locales, etc.
- Habitants et usagers.

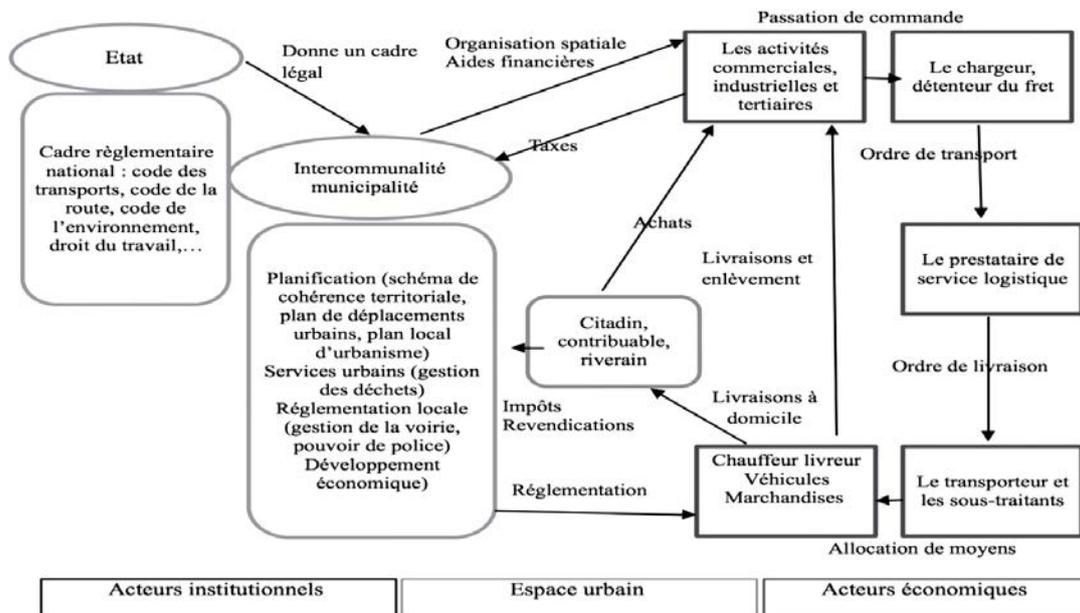


Figure I-2 : Les acteurs de la logistique urbaine<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Source : United Nations (2014)

<sup>2</sup> Source : Cerema (2014)

Ainsi, la ville devient une chaîne logistique multi-acteurs (voir Figure I-2) ayant des objectifs différents, connaissant un flux de marchandises croissant. Tous ces acteurs partagent donc entre eux l'espace urbain, ce qui va générer un conflit d'usage traduit par la congestion et l'encombrement, surtout à certains horaires. En effet, plus d'externalités négatives (congestion, pollution, sécurité etc.) et donc un système de distribution défaillant affecte négativement l'attractivité économique des territoires. Par conséquent, les autorités publiques (élus, techniciens des villes) et privés (logisticiens, opérateurs de transport) doivent prendre les bonnes décisions pour améliorer le fonctionnement de ces flux dans les villes.

La complexité de la chaîne logistique urbaine et la forte croissance de la population urbaine induisent différents enjeux (Abdelhai et al., 2014) :

- Enjeux fonctionnels : La croissance du trafic automobile pour le Transport de Marchandises en Ville (TMV) diminue la disponibilité des places de stationnement dans les voies, car l'infrastructure des villes ne dispose pas d'espaces dédiés pour les transporteurs logistiques. Cependant, le TMV se doit d'être présent dans l'organisation fonctionnelle des infrastructures urbaines.
- Enjeux économiques : La croissance de la population urbaine, l'apparition des nouvelles catégories de livraison (livraison à domicile, livraison au point relais, etc.) et l'e-commerce augmentent la taille du marché du TMV, mais aussi le coût vu qu'il y aura plus de distances parcourues et plus de congestion plus grandes, alors que le nombre de places de stationnement diminue. Donc, une collaboration entre les acteurs économiques et les acteurs institutionnels est nécessaire pour aboutir à l'efficacité économique du TMV.
- Enjeux environnementaux : Le TMV génère des émissions de particules, telles que l'oxyde d'azote  $\text{NO}_x$ , le dioxyde d'azote  $\text{NO}_2$ , les particules fines  $\text{PM}_{10}$  et le gaz à effet de serre. Ces émissions peuvent causer des épidémies de bronchiolite et le doublement du nombre de cas d'allergies. Ainsi, plusieurs enquêtes effectuées dans des villes françaises (Marseille, Dijon et Bordeaux) ont montré que le TMV génère 25% des émissions de  $\text{CO}_2$ , 30% du  $\text{NO}_2$  et 60% des particules fines.

L'e-commerce est un mode d'achat touchant toute la population quel que soit le lieu d'habitation. Il représente de 5% à 10% du chiffre d'affaires pour le commerce de détail dans les pays européens. Mais il représente également de 20% à 40% du nombre total de livraisons. Par contre, ces livraisons sont moins massifiées que les autres livraisons. Les estimations concernant la volumétrie des colis liée à l'achat par internet ont prouvé qu'elle va augmenter de 7% par an. De plus, il y a eu l'apparition d'un nouveau mode d'achat : C'est la livraison instantanée, c'est-à-dire une demande de livraison de 2 heures (parfois dite click and collect) utilisant un service web grand public (Dablanc et al, 2017).

Pour faire face à ces problématiques, plusieurs initiatives et projets de logistique urbaine ont été lancés pour réduire ces externalités négatives (Ambrosini et al., 2004,) (Anderson et al., 2005,) (Guyon et al., 2012). Taniguchi et al. (2001) définissent la logistique urbaine comme étant « le processus d'optimisation complète des livraisons à destination du centre-ville sans pour ainsi pénaliser le développement économique des activités de ces quartiers. ». C'est-à-dire que La logistique urbaine englobe donc toutes les prestations pour aboutir à une gestion

optimisée des flux de marchandises en milieu urbain (Dablanc, 2006). Elle regroupe plusieurs activités, telles que transport, stockage, conditionnement, gestion des commandes, gestion des retours, livraisons à domicile et au point relais, etc. Par conséquent, la logistique urbaine est très complexe à analyser.

Les projets visant l'amélioration ont mis en évidence la mutualisation des flux comme solution la plus pertinente, à savoir partager les ressources nécessaires et les informations entre les différents acteurs de la chaîne logistique pour le transport de marchandises en villes (Samuel Grandval et al, 2016). Dans ce contexte, beaucoup de travaux ont traité la mutualisation des flux et la collaboration entre les parties prenantes de la chaîne logistique en milieu urbain (Chanut et al., 2012).

De nombreux pays européens, Canada, Australie et Japon, ont fait des études sur les livraisons de marchandises en villes parce qu'elles engendrent beaucoup de problèmes dans leurs villes (Visser et al., 1999). Geroliminis et Danganzo (2005) présentent des exemples de projets pour la logistique urbaine durable. Ces projets ont généralement trois objectifs fondamentaux (Gonzalez-Feliu, 2013) :

- Réduire la congestion et améliorer la fluidité du trafic,
- Réduire la pollution et le bruit,
- Minimiser le coût du dernier kilomètre en évitant de pénaliser les activités économiques.

Pour cette raison, une des clés d'entrée privilégiée par les équipes de recherche pour aborder la thématique de la logistique urbaine est le développement durable. La notion de développement durable a été formalisée à l'occasion de la rédaction du rapport Brundtland (ONU, 1987) qui propose de retenir pour définition :

*« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. »*

Cette définition impose alors de mesurer la pertinence de tout système suivant trois axes complémentaires : aspects environnementaux, aspects sociétaux et aspects économiques. Ainsi Morana (2015) a présenté quelques indicateurs s'intégrant dans une démarche de développement durable (voir Tableau I-1, Tableau I-2 & Tableau I-1 ). Elle s'est appuyée sur les travaux de Morana et Gonzalez-Féliu (2015) qui ont présenté ces indicateurs à 25 acteurs de secteurs privés. Par la suite, ces acteurs ont choisi les indicateurs en gras ; mais, dans des perspectives futures, cette liste doit être aussi proposée aux acteurs publics. Quelques-uns de ces indicateurs ont été exploités dans notre thèse.

La livraison des marchandises en ville ou du dernier kilomètre coûte 20 % du coût total de la chaîne logistique (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2016). Elle présente de plus en plus un fardeau pour les transporteurs. La rareté des terrains et le coût élevé entraînent l'éloignement des plateformes logistiques. De nombreuses règles émises pour faire face à cette problématique se basent sur l'interdiction (poids, lieux, etc.) ou sur des restrictions (horaires). C'est en sens que nous avons poursuivi nos travaux, afin de déterminer des solutions logistiques permettant d'assumer les problèmes rencontrés à travers une valorisation raisonnée des flux

issus de la logistique inverse, par la mutualisation des transports (flux direct et inverse), mais aussi à travers la valorisation économique des retours.

Tableau I-1 : Indicateurs économiques proposé(e)s par Morana et al. (2015)

Indicateurs économiques	Acteurs
<b>Taux de service</b>	Acteur privé et acteur public
Coût logistique	Acteur privé
<b>Taux de satisfaction des clients</b>	Acteur privé et acteur public
Nombre de camions	Acteur privé et acteur public
Temps de livraison	Acteur privé
Taux de viabilité économique	Acteur privé
Nombre de livraisons	Acteur privé
<b>Economies réalisées</b>	Acteur privé
Nombre de plateformes	Acteur privé et acteur public
Taux de délais	Acteur privé et consommateur final
Taux de chargement des véhicules	Acteur privé et acteur public
Taux de maintenance	Acteur privé
Nombre de ruptures de charges	Acteur privé
Pertes de temps liées à la congestion	Acteur privé
<b>Coûts opérationnels</b>	Acteur privé
<b>Evolution des clients</b>	Acteur privé
Prix de produits	Acteur privé
Distance moyenne par livraison	Acteur privé

Tableau I-2 : Indicateurs environnementaux proposé(e)s par Morana et al. (2015)

Indicateurs environnementaux	Taux d'émission de GES	Consommation d'énergie	<b>Congestion</b>	Niveau de bruit	Taux de chargement de véhicules	<b>Taux d'émission de la pollution</b>
Acteurs	Acteur privé et acteur public	Acteur privé et acteur public	Acteur privé et acteur public	Acteur public et habitant	Acteur privé et acteur public	Acteur privé et acteur public

Tableau I-3 : Indicateurs sociaux/sociétaux proposé(e)s par Morana et al. (2015)

Indicateurs sociaux/sociétaux	Taux de satisfaction des habitants	Taux de création d'emplois	Taux de réclamation	Taux de rotation du personnel	Taux de satisfaction des employés	<b>Nombre d'emplois créé/détruit/reconverti</b>
Acteurs	Habitant	Acteur privé et acteur public	Acteur privé	Acteur privé et acteur public	Acteur privé	Acteur privé et acteur public

### 3 La logistique inverse

Pour faire face à ces problématiques, nous avons étendu notre travail sur d'autres thématiques afin de déterminer des solutions logistiques pour faire face à ces coûts, notamment par une évaluation rationnelle des flux de logistique inverse. La logistique inverse est un concept émergent, qui gère le flux de retour de matériel, de biens, ou d'équipement du client pour la réutilisation. En effet, elle ajoute des nouvelles fonctionnalités à la chaîne logistique. Elle utilise de nouvelles fonctions et de nouveaux participants, tels que la localisation des entrepôts de la collecte, le test et le tri, ou le centre de récupération. Par la suite, la logistique inverse contribue à assurer les exigences environnementales en récupérant le produit retourné qui pourrait être recyclé plus tard ou retraité. Par conséquent, la logistique inverse peut être la solution pour faire face aux problèmes financiers rencontrés par le centre de distribution urbain. Cela peut être une source de gain financier.

Selon Lu *et al.* (2001), la logistique inverse est née suite au besoin des entreprises pour structurer les retours. De même, Witt (1995) mentionne que la croissance des ventes hors magasin va augmenter dans les prochaines années et il a estimé que 15% de ces achats seront retournés, sachant que le pourcentage de retour varie en fonction de l'industrie. Le sondage de Rogers et Tibben-Lembke (1998) a montré un taux de retour de 2-3% pour les produits domestiques chimiques et jusqu'à 50% pour les revues de publication.

Dans la littérature, le terme de logistique inverse se retrouve sous plusieurs dénominations, telles que : logistique inversée, *reverse logistics*, gestion de la récupération des produits, logistique à rebours, logistique négative, *etc.*

De ce fait, certains auteurs ont proposé une définition générale qui permet de positionner la logistique inverse.

- Thierry *et al.* (1995) l'appellent la gestion de la récupération des produits ("*product recovery management*"), et la définissent comme : "*La gestion des produits, des composants et des matériels usés ou éliminés qui tombent sous la responsabilité de la compagnie manufacturière. L'objectif de la gestion de la récupération des produits et de retirer le maximum de valeur économique raisonnablement possible, tout en réduisant la quantité ultime des déchets.* "
- Beaulieu *et al.* (1999) (qui) définissent le concept de logistique inverse sous le terme de logistique à rebours par : "*un ensemble d'activités de gestion visant la réintroduction d'actifs secondaires dans des filières à valeur ajoutée.*"

D'autres auteurs ont cherché à définir la logistique inverse en se basant sur la définition de la chaîne logistique.

- Rogers et Tibben-Lembke (1999) décrivent le domaine de la logistique inversée, en se basant sur la définition proposée par le « *Council of Logistics Management* », par : « *Le processus de planification, d'implantation et de suivi de l'efficacité, de flux à coût minimum de matières premières, de stocks de produits en cours et de produits finis ainsi que l'information s'y rattachant, du point de consommation au point d'origine en vue d'en récupérer de la valeur ou de les traiter proprement* ».

- Lambert et Riopel (2003) ont analysé diverses définitions de la logistique inversée (voir Figure I-3), tirées de celle de Rogers et Tibben-Lembke (1998), afin de la définir comme : « *Le processus de planification, d'implantation et de contrôle de l'efficacité, de la rentabilité des matières premières, des en-cours de production, des produits finis, et l'information pertinente du point d'utilisation jusqu'au point d'origine, dans le but de reprendre ou générer de la valeur ou pour en disposer de la meilleure façon tout en assurant une utilisation efficace et environnementale des ressources mises en œuvre* ».

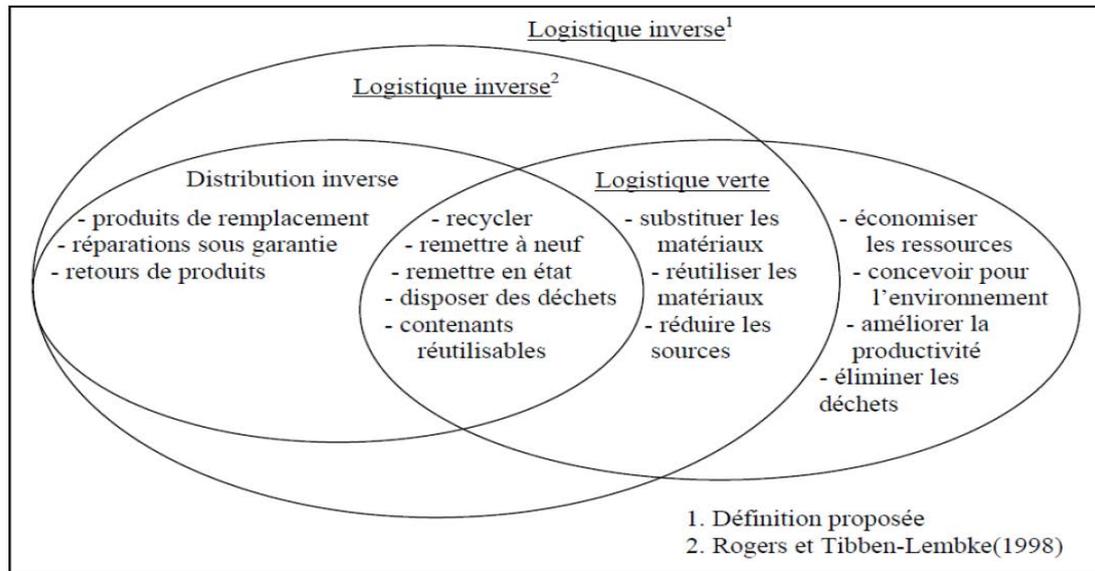


Figure I-3 : Définition de la logistique inversée proposée par Lambert et Riopel (2003)

### 3.1 Les avantages de la logistique inversée

En général et en raison de la présence d'activités de récupération (récupération / réutilisation des produits ou des matériaux utilisés), la logistique inversée impose de nouvelles caractéristiques sur la gestion du système logistique (Dekker R et al., 1999).

Les activités de la logistique inversée peuvent fournir des avantages concurrentiels importants pour les organisations, qui se présentent comme suit :

- Relation à long terme basée sur la confiance avec la clientèle (O'Neil et Chu, 2001) : il s'agit d'attirer les clients par des produits et services qui répondront à leurs besoins et attentes, comme la permission des retours, la possibilité d'échange et de remboursements.
- Organisation respectueuse de l'environnement (Janin, 2000) : pour ce faire, l'organisation peut respecter les contraintes environnementales en favorisant la récupération maximale de valeur des produits retournés, ce qui aide à réduire la consommation des énergies non renouvelables.
- Impact économique : l'intégration des produits récupérés et valorisés ou des pièces de rechange récupérées dans la chaîne d'approvisionnement permet également de réduire les frais, donc de produire à coût moindre.

### 3.2 Les types de retours

Les produits retournés ou récupérés peuvent être dirigés soit vers le producteur d'origine ou vers un autre acteur en vue de leur traitement (voir figure suivante).

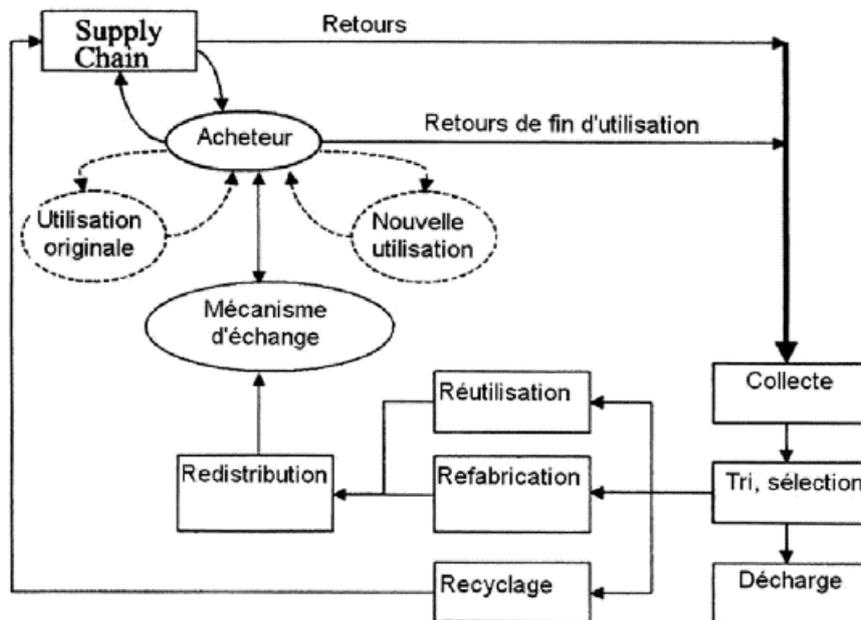


Figure I-4 : Représentation de la logistique inverse<sup>3</sup>

Cependant, il convient de distinguer différents types de retours :

- Les rebuts de production
- Les rejets de production
- Les retours d'emballage
- Les retours de produits sous garantie et rappel (les produits défectueux)
- Les retours en fin de vie
- Les retours commerciaux (location, VPC classique, e-commerce, etc.) et contractuels (presse).

D'autres approches ont été initiées dans le cadre de la « Refabrication », connues sous le terme du « Remanufacturing » et qui s'intéressent à l'optimisation des lots de production par l'intégration des retours issus de la branche logistique. Nous pouvons citer les travaux de Tang et al. (2005), où ils ont intégré les flux inverses dans un système de production et de Remanufacturing pour répondre aux nouvelles réglementations environnementales. Ces flux sont issus des produits retournés par les clients après utilisation. Ils vont être par la suite refabriqués par le système de remanufacturing afin d'être réintégrés dans la chaîne logistique et revendus.

De plus, Chung et al (2008) ainsi que Mitra (2012) ont proposé un plan optimal de production et de réapprovisionnement pour un système de la chaîne logistique en circuit fermé. Ce dernier intègre aussi des produits usés issus des retours de clients allant vers des unités de refabrication et de rénovation. Le système proposé par Chung et al (2008) ainsi est composé de sous-traitants, d'un producteur, des commerçants et d'une unité de recyclage. Behnam et al (2013) et Jian et al (2014) ont étudié l'impact de la taxe carbone sur le même système de la chaîne logistique en boucle fermée.

<sup>3</sup> Source : Fulconis et al. (2009)

Mais aussi, dans l'article d'Atasu et al. (2008), a permis de dégager les avantages économiques d'intégrer les flux inverses à travers un état de littérature des travaux existants. Mais, l'auteur a signalé des problèmes qui n'ont pas été étudiés comme la cannibalisation, la diffusion et de l'évaluation de ces produits refabriqués. D'ailleurs, Rubio et Corominas (2008) ont pu montrer aussi que le système de remanufacturing était compatible avec les modèles de production sur commande et la mise en œuvre d'une stratégie qui combine la fabrication, la récupération partielle et le reconditionnement, tout en générant des avantages économiques et en améliorant la compétitivité.

Quant aux travaux de Gharbi et al (2008), ils ont intégré le système de remanufacturing dans un système de boucle fermée comme une solution pour remplacer le système de production en cas de panne et de compléter la demande. Ainsi, ils ont montré que la solution proposée a pu donner un gain financier par rapport aux problèmes classiques. Kenné et al (2012) ont défini un modèle stochastique de planification de la production d'un système hybride de fabrication et de remanufacturing. Pour ce faire, ils ont considéré deux variables de décision (taux de production des machines de fabrication et de remanufacturing) et deux variables d'état (niveaux de stock de produits fabriqués et remanufacturés). Ainsi, Chun et Aijuan (2013) ont proposé le système hybride, mais en considérant l'incertitude de la qualité des produits. Turki et al (2017) ont présenté un modèle de flux direct pour un système en boucle fermée, composé de deux machines de fabrication et de refabrication, de stock de fabrication, d'entrepôt d'achat, de véhicule de transport et d'inventaire de récupération. Le système proposé prend en compte le retour des produits usagés, en fin de vie sur le marché. Un programme d'optimisation, basé sur un algorithme génétique, est développé pour trouver les résultats des variables de décision.

### **3.3 Le Problème de Localisation des Installations pour Logistique Inverse**

Dans la littérature, il existe plusieurs études sur les problèmes de localisation pour les systèmes de logistique inverse. Bloemhof-Ruwaard et al. (1996) présentent une distribution à deux niveaux et le problème de l'élimination des déchets, dans lequel la demande de produits est donnée par les usines, tandis que les déchets générés par la production sont correctement éliminés dans des unités d'élimination des déchets. Deux types de relaxation, linéaire et de Lagrange, sont destinés à générer des bornes inférieures par rapport au problème. Barros et al. (1998) décrivent un réseau pour le recyclage des déchets de construction et ils proposent un modèle de localisation à deux niveaux pour résoudre le problème de l'emplacement de deux types d'installations intermédiaires. Les auteurs proposent une procédure heuristique pour résoudre le problème, basée sur une relaxation linéaire renforcée par des inégalités valides pour générer une limite inférieure.

Quant à Jayaraman et al. (1999), ils proposent un modèle de programmation mixte en nombres entiers 0-1 pour résoudre le problème de l'emplacement des installations de remise à neuf / distribution et d'optimiser les quantités de reconditionnement, de transbordement et de stockage de produits remis à neuf. D'autre part, Shih (2001) propose un modèle pour s'attaquer à un réseau de recyclage des appareils électriques et des ordinateurs à Taiwan.

Afin de proposer des solutions pour améliorer la gestion des flux en milieu urbain, je me suis concentrée, dans cette thèse, sur les problèmes de localisation des plateformes. Cette discipline connue sous le nom de *hub location problem (HLP)* a été présentée dans plusieurs approches et méthodologies.

Pour un système de remise à neuf, (Lu et Bostel, 2007) supposent qu'il existe quatre types de participants i.e. : les clients, les centres intermédiaires, les centres de remise à neuf et les producteurs (voir Figure I-5). Concernant les clients, il y a des demandes de produits et de produits utilisés prêts à être récupérés. Les centres de retraitement intermédiaires ne sont utilisés que dans la voie inverse et sont responsables de certaines activités essentielles, telles que le nettoyage, le démontage, la vérification et le tri.

Dans un tel système, nous pouvons voir qu'il existe deux types de flux : Un flux (le "reverse" flux) auprès des clients par les centres intermédiaires aux centres de remise à neuf est formé par les produits d'occasion, tandis que l'autre (flux "avant") des centres de remise à neuf ou producteurs, directement aux clients (sans passer par les centres intermédiaires) se compose de produits « nouveaux ».

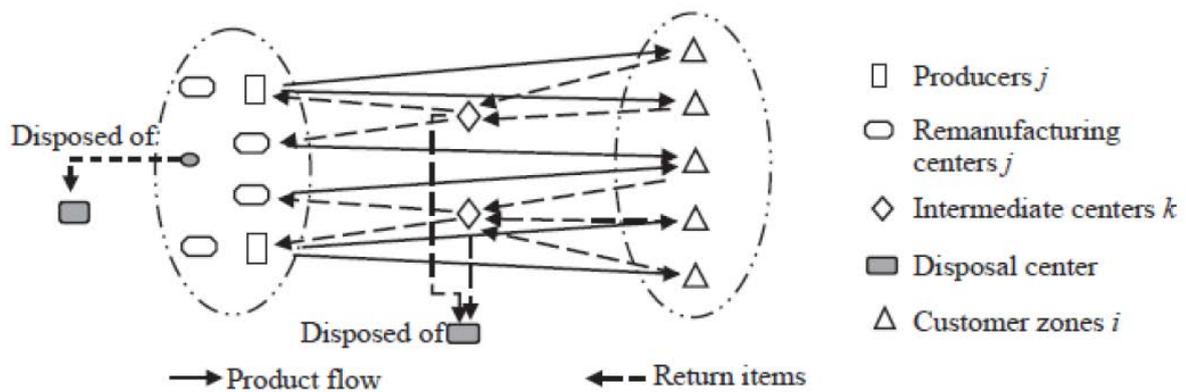


Figure I-5 : Un réseau de distribution et de collecte par Lu et Bostel (2007)

#### 4 Les modèles de localisation des plateformes (Hub Location Problem)

Dans la littérature, beaucoup de travaux ont été menés pour étudier la localisation des centres de distribution en s'inspirant des problèmes connus sous le nom de Facility Location Problem ou Hub Location Problem. Par exemple, Andreas et al. (2005) ont présenté un état de l'art des problèmes de localisation des centres de distribution en se basant sur les problèmes de « Facility Location Problem » et « Hub Location Problem ». Ainsi, ils ont révisé les travaux existants, en particulier les modèles de localisation continue, les modèle de localisation d'un réseau, la programmation mixte en nombres entiers et les domaines d'application. Yang et al (2007) ont modélisé le problème de localisation des centres de distribution logistique parmi une liste de localisations potentielles. Ils ont approfondi leurs travaux en adoptant les algorithmes de recherche taboue, l'algorithme génétique et la logique floue, afin de trouver la meilleure solution. Quant à Zhug et al (2016), ils ont étendu le problème classique de localisation des centres de distribution en intégrant la variabilité et l'incertitude de la demande et ils ont proposé un modèle stochastique pour le cas des centres capacitaires. De même, Tang et al (2016) ont

présenté une étude sur les problèmes de localisation-affectation des centres de distribution régionale dans le cadre d'un réseau de distribution collaboratif dans l'Ouest de la France.

Peu de travaux ont étudié la localisation de centre de distribution urbaine. Nous pouvons citer le modèle multicritère présenté par Awasthi et al (2011) pour choisir la localisation de ces centres. Ils ont ainsi identifié onze critères, tels que : accessibilité, sécurité, coût, impact sur l'environnement, proximité, etc. Quant à Minoz-Villamizar et al. (2013), ils ont intégré le problème des tournées de véhicules aux problèmes de localisation des CDUs. Pour résoudre cette équation, ils ont utilisé un algorithme hybride avec la simulation Monte Carlo et des données réelles. De plus, Rao et al. (2015) ont étudié ces modèles dans une démarche de développement durable. Il y a aussi les travaux de Guyon et al. (2011). Ils se sont intéressés aux problèmes de localisation des plateformes et de dimensionnement, en considérant des critères environnementaux, sociétaux et économiques. Ils ont développé ainsi un simulateur et ils ont appuyé leur travail sur des cas concrets : la messagerie de la ville de Marseille (France).

La localisation des plateformes logistiques est un problème très complexe où beaucoup de modèles mathématiques, méthodes de résolutions ont été proposés. Ainsi, nous pouvons nous inspirer du problème de localisation des plateformes (HLP) qui a été beaucoup étudié dans la littérature (Farahani, 2013). Ce type de modèle peut être appliqué lorsque l'objectif est de déterminer le lieu de l'implantation des plateformes et l'affectation du nœud non hub aux nœuds de la plateforme. Ce genre de problème peut donc être défini comme Allocation-Location Problem (Alumur, 2008).

Le problème classique des HLP est représenté comme suit :

Soit  $G$  un graphe complet  $G = (V, E)$  où  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  est l'ensemble des nœuds. Les éléments de  $V$  représentent des origines, des destinations et des hubs. Le flux entre le nœud  $i$  et le nœud  $j$  est  $w_{ij}$  et la distance du nœud  $i$  au nœud  $j$  est  $d_{ij}$ . L'objectif est de désigner certains de ces sommets en tant que hubs et de minimiser le coût total du flux dans le réseau.

Hub Location Problem (HLP) est relativement une extension des problèmes classiques de Facility Location Problem (FLP).

Les HLPs peuvent être classés suivant :

- Le domaine de solution : Un réseau (dont le domaine de solution des hubs est l'ensemble des nœuds du réseau), discret (dont le domaine de solution des hubs est une série des nœuds particuliers), continu (dont le domaine de solution des hubs est un plan ou une sphère).
- Les critères : Min-Max (minimiser la distance maximale aux sites, où la distance d'un point à des sites est la distance entre le point le plus proche de son site) et Min-Sum (minimiser la somme pondérée des distances à partir d'un ensemble donné d'emplacements de points).
- Le nombre des hubs à localiser : Exogène (à l'origine, le nombre de hubs à localiser est connu), endogène (le nombre de hubs à localiser n'est pas connu, il est déterminé comme solution du problème). De plus, nous pouvons trouver des problèmes de localisation d'un unique hub ou de plusieurs hubs.
- Des hubs avec capacité non limitée et ceux avec des capacités limitées
- Les affectations : simples ou multiples

Le premier auteur qui a travaillé sur des problèmes similaires est Hakimi (1964). Ensuite, Toh and Higgins (1985) ont étudié l'application de ce problème dans les réseaux aériens. Les premiers travaux présentant un modèle mathématique pour les problèmes HLP, ainsi que des résultats, sont ceux d'O'Kelly (1986a, 1986b), (Gelareh et al, 2011).

En ce qui concerne les études les plus importantes dans le domaine des HLP, O'Kelly (1987,1992) a occupé une position clé en développant la première formulation mathématique quadratique pour HLP. Plus tard, Campbell (1994b, 1996) a proposé des formulations mathématiques multiples pour HLP en considérant des fonctions objectives, similaires à celles de plusieurs problèmes classiques de localisation des installations (Facility Location Problem). En outre, Aykin (1994, 1995a, 1995b) et Klincewicz (1991, 1992) ont également joué un rôle important dans ces études. Ensuite, Campbell et O'Kelly (2012) ont récemment discuté des motivations de HLP ainsi que de certaines lacunes dans ce domaine (Farahani et al, 2013).

Il existe plusieurs types de modèles traités dans la littérature.

#### 4.1 The p-hub median problem

L'objectif du problème du *p-hub median* est minimiser le coût de transport total (le temps, la distance, etc.), étant donné les demandes, le flux entre les paires de destination et le nombre de centres à placer. Les travaux qui traitent ce type de problème sont divisés en deux catégories : affectation simple et affectation multiple.

Ainsi, une affectation simple signifie que les clients sont affectés à une seule plateforme donc ils ne peuvent échanger les produits qu'à un seul site. Okelly (1987) est le premier à formuler ce problème. L'objectif est ainsi de minimiser le coût total, par exemple, temps et distance parcourue pour satisfaire les nœuds non hub.

$$\sum_i \sum_j W_{ij} (\sum_k X_{ik} C_{ik} + \sum_m X_{jm} C_{jm} + \alpha \sum_{jm} X_{ik} X_{jm} C_{km})$$

Où  $W_{ij}$  est le flux entre nœud i et nœud j et  $C_{ij}$  est le coût de transport d'une unité entre nœud i et nœud j.  $X_{ik}$  est une variable de décision, elle est égale à 1 si le nœud i est affecté à la plateforme k, 0, sinon. Quant aux contraintes, ce sont les contraintes de conservation des flux, le nombre prédéterminé p de hubs et de l'affectation unique de chaque nœud à un hub. Par la suite, Campbell (1994) modélise le problème du p-hub median par un programme linéaire à variables entières avec des seuils de flux minimaux. Elhedhli et Hu (2005) ont proposé une modélisation de ce type de problèmes avec une fonction de coût non linéaire et une linéarisation en utilisant la relation lagrangienne.

Tableau I-4 : Travaux sur le p-Hub Median Problem avec affectation simple<sup>4</sup>

Year	Authors	Notes
1987	O'Kelly	Quadratic integer program, HEUR1, HEUR2
1990	Aykin	Procedure to find optimal allocations
1991	Klincewicz	Exchange heuristic
1992	Klincewicz	Tabu search and GRASP heuristics
1994b	Campbell	First linear integer formulation
1994	Skorin-Kapov and Skorin-Kapov	Tabu search heuristic
1995	O'Kelly, Skorin-Kapov and Skorin-Kapov	Lower bounding technique
1996	Campbell	MAXFLO and ALLFLO heuristics
1996	Ernst and Krishnamoorthy	New formulation, simulated annealing heuristic, B&B method
1996	O'Kelly, Bryan, Skorin-Kapov and Skorin-Kapov	New formulation for symmetric flow data
1996	Skorin-Kapov, Skorin-Kapov and O'Kelly	New mathematical formulation leading to tight LP relaxation
1996	Smith, Krishnamoorthy and Palaniswami	Modified Hopfield neural network heuristic
1997	Sohn and Park	Two-hub location problem
1998b	Ernst and Krishnamoorthy	Shortest path based B&B algorithm
1998	Pirkul and Schilling	Lagrangian relaxation heuristic
1998	Sohn and Park	New formulation for symmetric cost, and allocation problem
2000	Sohn and Park	Three-hub allocation problem
2001	Abdinnour-Helm	Simulated annealing heuristic
2001	Ebery	New formulations for $p = 2$ and $3$
2005	Elhedhli and Hu	Minimized congestion at hubs

Par ailleurs, chaque point de demande peut échanger les flux avec plusieurs sites dans le cas d'affectation multiple. Le premier à modéliser le problème p-hub median à affectation multiple est Campbell (1992) à travers une programmation linéaire. Ensuite, Klincewicz (1994) avait proposé une procédure duale, pour résoudre un modèle où les flux sont échanger entre les nœuds et les nœuds hubs sont connectés entre eux, dans lequel le nombre de hubs n'était pas restreint. Le même problème a été présenté par Ernst (1996) en assurant la combinaison des flux de plusieurs sources et il ne tient pas compte de la contrainte de capacité. Ainsi, ces hubs agissent comme des centres de consolidation de plusieurs nœuds. Ce type de modèle peut être utilisé dans divers domaines tel que dans le trafic aérien, dans les industries de télécommunications et dans les systèmes de livraisons postales

Tableau I-5 : Travaux sur le p-Hub Median Problem avec affectation multiple<sup>5</sup>

1992	Campbell	First linear integer program
1994b	Campbell	New formulations, flow thresholds, fixed costs
1996	Campbell	Greedy-interchange heuristic
1996	Skorin-Kapov, Skorin-Kapov and O'Kelly	New mathematical formulation leading to tight LP relaxation
1998a	Ernst and Krishnamoorthy	New formulation, B&B method, two heuristics
1998b	Ernst and Krishnamoorthy	Shortest path based B&B algorithm
1999	Sasaki, Suzuki and Drezner	1-stop problem
2004	Boland, Krishnamoorthy, Ernst and Ebery	Preprocessing and tightening constraints

## 4.2 Hub location avec coûts fixes : prise en compte d'un coût fixe d'ouverture des plateformes

Les coûts fixes d'ouverture des hubs sont ignorés dans un problème classique du *p-hub median*. C'est pourquoi, Pour cette raison O'Kelly (1992) a intégré les coûts fixes dans une programmation quadratique du problème *p-hub median* ayant comme variable de décision le nombre de plateformes.

Après, beaucoup de chercheurs se sont intéressés dans ce type de problème en tenant compte de l'affectation simple et en utilisant des heuristiques pour la résolution. Il y a le travail de Abdinnour-Helm (1998) qui a proposé une heuristique combinant des algorithmes hybrides et

<sup>4</sup> Source : Sibel et Kara (2008)

<sup>5</sup> Source : Sibel et Kara (2008)

la méthode recherche taboue. De plus, L'algorithme génétique est utilisé pour déterminer le nombre de localisation des plateformes et l'affectation des points de demande aux sites choisis. Cette solution va être intégrée dans la recherche taboue afin de trouver les localisations optimales.

Par la suite, Topcuoglu et al. (2005) ont proposé aussi une autre heuristique mieux que celle proposée par Abdinnour-Helm (1998) au niveau de la qualité des solutions et du temps de calcul, celle proposée par Abdinnour-Helm. De plus, Chen (2007), quant à lui, a proposé une heuristique hybride basée, cette fois-ci, sur des procédures d'amélioration.

Enfin, Yoon et Current (2008) ont présenté un modèle de programmation linéaire à variables mixtes du problème de la localisation des plateformes. Ils ont considéré que le coût de ce type de réseau doit comprendre trois coûts importants : le coût fixe pour l'implantation d'une plateforme, les coûts fixes et variables pour l'affectation et l'utilisation des arcs.

Tableau I-6 : Travaux sur le Hub location Problem avec coût fixe<sup>6</sup>

Uncapacitated hub location problem	Single Allocation	O'Kelly (1992a) Campbell (1994b) Abdinnour-Helm and Venkataramanan (1998) Abdinnour-Helm (1998) Labbé and Yaman (2004) Topcuoglu et al. (2005) Cunha and Silva (2007) Chen (2007)	Quadratic integer program First linear integer formulation New quadratic formulation, genetic algorithm
	Multiple Allocation	Campbell (1994b) Klincewicz (1996) Mayer and Wagner (2002) Boland et al. (2004) Hamacher et al. (2004) Marín (2005b) Marín et al. (2006) Cánovas et al. (2007)	Hybrid heuristic algorithm Valid and facet defining inequalities Genetic algorithm Hybrid genetic algorithm Hybrid heuristic algorithm First linear integer formulation B&B algorithm B&B algorithm (HubLocator) Preprocessing procedures, tightening constraints Polyhedral study, new formulation Valid inequalities, relax-and-cut algorithm New formulation Heuristic based on dual-ascent technique, best B&B algorithm
Capacitated hub location problem	Single Allocation	Campbell (1994b) Aykin (1994) Aykin (1995a)  Ernst and Krishnamoorthy (1999) Labbé et al. (2005) Costa et al. (2007)	First linear integer formulation New formulation allowing direct connections Formulation with given number of hubs to locate, allows direct connections New formulation, two heuristics, B&B algorithm B&B algorithm New bi-criteria problems minimizing total cost and service time
	Multiple Allocation	Campbell (1994b) Ebery et al. (2000) Sasaki and Fukushima (2003)  Boland et al. (2004) Marín (2005a)	First linear integer formulation New formulation, a heuristic, B&B algorithm Formulation for the 1-stop hub location problem, B&B algorithm Preprocessing procedures, tightening constraints New formulation

### 4.3 The p-hub center problem

Le problème *p-hub center* est un problème de minimax qui est une extension du problème *p-hub center*. En effet, minimax signifie que l'objectif de ce problème est de minimiser la distance maximale qui lie chaque nœud de demande et le site le plus proche. Ce problème contient un réseau où  $G=(V, E)$  un graphe non orienté.  $V$  représente les arêtes et  $E$  les différents nœuds. Les nœuds peuvent être des nœuds de demandes c'est-à-dire des clients et le reste les points qui représentent des hubs. Chaque client est défini par un coût de transport ou bien coût de service, qui est décrite comme une fonction linéaire qui ne diminue pas. Ainsi, l'objectif dans

<sup>6</sup> Source : Sibel et Kara (2008)

ce problème est de localiser  $p$  plateformes sur le réseau où on minimise le coût de transport maximum des clients. Parmi les auteurs qui ont étudié ce problème, Campbell (1994) qui a défini différentes typologies qui peuvent être utilisés pour des affectations simples et multiples comme suit :

- 1) La minimisation du coût maximum pour une paire de nœuds entre hub et client.
- 2) la minimisation du coût maximum de déplacement entre le lieu d'origine à une plateforme ou entre une plateforme à une plateforme ou bien une plateforme à la destination.
- 3) La minimisation du coût maximum de déplacement entre une plateforme et destination.

En outre, Kara et Tansel (2000) ont proposé des modélisations mathématiques linéaires pour des affectations simples. Ils ont résolu le problème via le solveur Cplex avec un temps de calcul plus rapide que celui de Campbell. De plus, ils ont prouvé que le problème combinatoire du p-hub center avec une assignation simple est un problème NP-complet.

Ernst et al (2002) ont présenté une nouvelle modélisation du problème où ils ont défini une nouvelle variable qui définit le coût maximum de la réception et de distribution entre la plateforme et le nœud qui est affecté à la plateforme.

#### **4.4 Hub covering problem (le problème de recouvrement des plateformes)**

Les problèmes de recouvrement consistent à satisfaire les nœuds de demande si la distance qui les sépare de l'entrepôt ne dépasse pas une valeur spécifique qui permet de les servir.

Ainsi, le problème de recouvrement des plateformes est, d'une part, de localiser les plateformes pour couvrir toutes les demandes et, d'autre part, que les coûts d'ouvertures d'une plateforme soient minimisés. Campbell (1994) a développé les premiers modèles du problème de recouvrement à variables mixtes. Par ailleurs, Kara et Tansel (2003), ils ont étudié la complexité de ce problème de recouvrement avec affectation simple et ils ont prouvé que le problème est NP-difficile ; puis ils ont proposé un modèle linéaire. Par la suite, Wagner (2004) a présenté de nouvelles formulations de ce problème avec affectation simple et affectation multiple où le nombre de variables et de contraintes sont moins important que pour le modèle proposé par Kara et Tansel. Cela passe à travers une procédure d'agrégation de certaines contraintes. Ce problème a été résolu via une heuristique étant donné le problème est NP-difficile, cela signifie que l'optimal peut être trouvé avec un temps de calcul assez long. En effet le temps de calcul n'est pas polynomial.

### **5 Centre de distribution urbain : une solution pour le management collectif**

Les espaces logistiques urbains (ELU) sont des infrastructures ponctuelles (dites aussi nodales) destinées au transport des biens ; Ils constituent un ensemble d'équipements logistiques qui ont pour but de perfectionner les mouvements des livraisons des marchandises et leurs relations dans les espaces publiques (voirie, stationnement, lieu à livrer etc.) (Anna TRENTINI et al., 2013). Nous pouvons plusieurs types d'ELU (voir Figure I-6) :

- Les Zones Logistiques Urbaines (ZLU) : Ces zones regroupent plusieurs entreprises de transport sans mutualiser les flux de marchandises, mais qui permettent de rationaliser la flotte de véhicules.

- Les Centres de Distribution Urbains(CDU) : Ces centres sont des plateformes qui fonctionnent en Cross-Docking (c'est-à-dire groupage-dégroupage) généralement ils sont situés à proximité des centres villes. Leurs buts sont d'améliorer la gestion des flux des livraisons à destination du milieu urbain.
- Les Points d'Accueil de Véhicules (PAV) : Ce sont des infrastructures affectées à une partie de la voirie au stationnement de véhicules pour la livraison de marchandises, mais qui peuvent aussi proposer des services complémentaires. Il existe plusieurs sous-catégories. La plus utilisée : les Espaces de Livraison de Proximité (ELP). Ces derniers se présentent sous forme de micro-plateformes logistiques qui combinent une partie de la voirie affectée organisée en zone de stationnement afin de servir au transport de marchandises.
- Les Boîtes Logistiques Urbaines (BLU) : ce sont des petites structures (par exemple les points de retrait), qui peuvent être mobiles ou fixes dans le but d'avoir un lieu de stockage temporaire pour les marchandises afin de mieux gérer les passages des tournées de livraison.

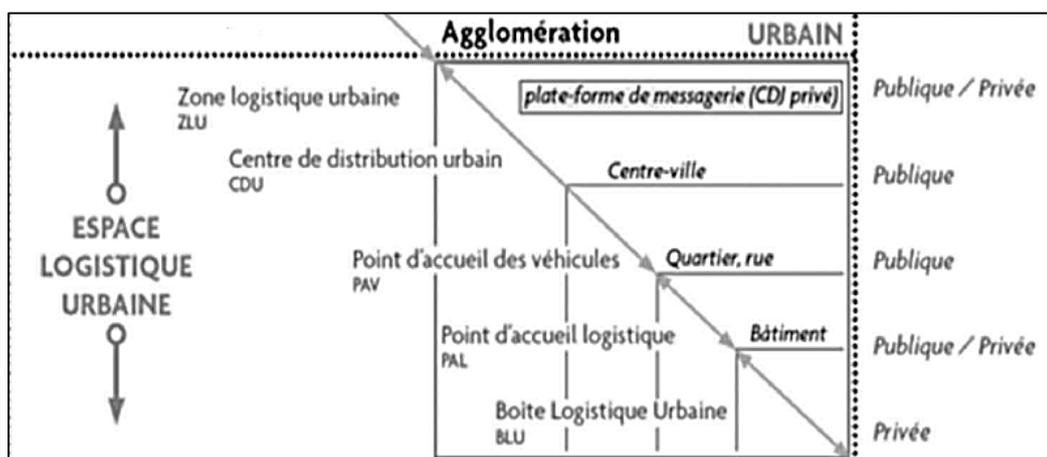


Figure I-6 : La typologie des ELUs <sup>7</sup>

Les principales initiatives s'appuient sur l'instauration des plateformes logistiques ou Centre de distribution Urbain (CDU), notamment en milieu urbain, comme une solution pour faire face à ces impacts négatifs et qui entraînent plus particulièrement des gains environnementaux. Une étude réalisée par Capgemini<sup>8</sup> et le GCI (Global Commerce Initiative), baptisée « 2016 – La chaîne logistique du futur » (voir Figure I-7), annonce que :

« L'architecture de la chaîne logistique du futur repose sur l'anticipation de nouveaux modèles collaboratifs pour la distribution en ville [...] La fusion de différents flux qui convergent vers la ville en une infrastructure unique constituera une grande avancée. »

D'après Browne et al. (2005), il existe trois types de CDU :

- Les CDU privés ou semi-privés naissent à l'initiative d'opérateurs pour leurs opérations internes.

<sup>7</sup> Source : Boudouin (2006)

- Les CDU mutualisés sont en général associés à un service promo et/ou soutenu par les autorités publiques. Leur fonction peut être considérée comme un service public de transport de marchandises.
- Les CDU spécifiques sont associés à des activités particulières. Ils peuvent être de deux types, soit temporaires comme les chantiers, ou permanents comme les ports maritimes.

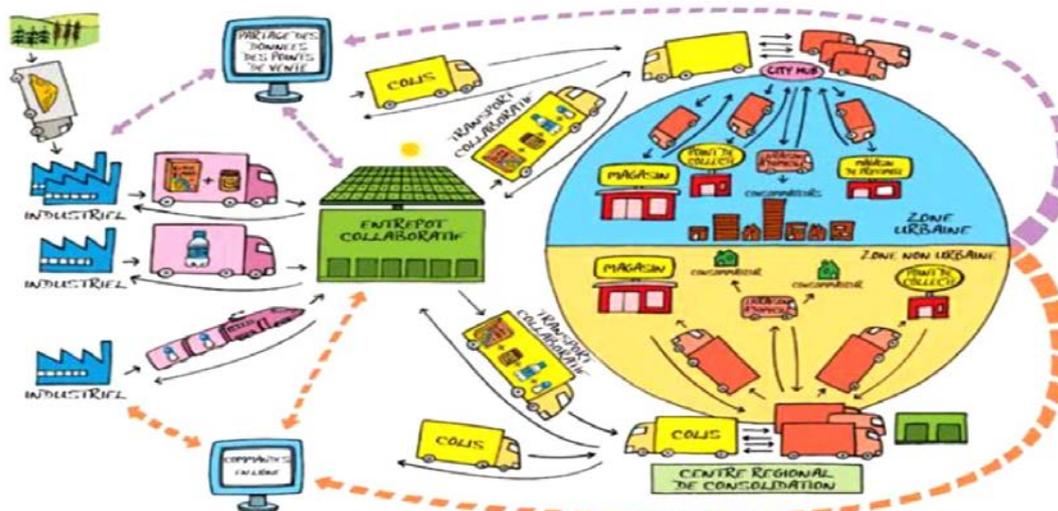


Figure I-7 : La logistique urbaine en 2016<sup>9</sup>

Il s'agit donc d'infrastructures qui proposeront des opérations de transbordement collaboratif. Elles consistent à éviter que les transporteurs acheminent les colis directement par un et un seul transporteur, muni de véhicules adaptés à la logistique urbaine (électriques, gaz naturel, faibles dimensions pour accès difficiles, peu bruyants, etc...). La mutualisation est ainsi naturelle et les transporteurs livrent directement là où sont situées les plateformes logistiques, s'exonérant ainsi de disposer de véhicules adaptés à l'espace urbain et permettant un gain de temps significatif. Ces infrastructures se sont installées à l'extérieur des centres villes pour des raisons réglementaires, sociétales (créateurs de nuisances sanitaires, sonores et visuelles), économiques (le coût du foncier) (Guyon et al, 2011). Les effets de ces structures varient d'une ville à l'autre en raison des différences réglementaires, territoriales, financières, etc. Par exemple, le CDU privé de Chronopost, implanté en 2006 à Paris pour les livraisons effectuées dans le centre-ville de Paris, a connu une réduction importante des impacts écologiques : une réduction de plus de 55 tonnes en CO<sub>2</sub> sur deux ans (Chronopost, 2008).

Par exemple, en Allemagne et en Suisse, les transporteurs ont développé volontairement des coopérations et se sont partagé les zones géographiques de la ville. En Allemagne, 70 projets de City Logistics ont été créés ; où les transporteurs se sont réunis et se sont divisés en fonction des produits à livrer, des zones affectées et de leur emplacement. Mais beaucoup d'autres projets ont été abandonnés, (Fribourg, par exemple) essentiellement pour la non rentabilité économique de ces projets, liés à la réticence des pouvoirs publics à subventionner, mais aussi parce que beaucoup de transporteurs ne veulent pas confier leur fret à un autre prestataire. Parmi les expériences réussies en Allemagne, il y a le City Logistik de Kassel où un transporteur

<sup>9</sup> Source : Capgemini (2008)

« neutre » est employé pour acheminer les livraisons de sept logisticiens/transporteurs. Dans ce cas, les autorités publiques (région de Hesse) ont participé à l'investissement initial à hauteur de 50% (Bonivel, 2005).

En France, la majorité des CDU sont ceux de nature publique. La première expérience est une plateforme pour la livraison urbaine, située à Paris, fondée dans les années 60 et gérée par Sogaris (entreprise privée). Mais cette plateforme n'a duré que deux ans seulement. Ensuite, de nombreux projets CDU ont été étudiés dans les années 90, dans des villes françaises (La Rochelle, Strasbourg, Aix-en-Provence, Toulouse, Montpellier, etc.). La majorité d'entre eux ont échoué. Par exemple, le projet de CDU mutualisé à Aix en Provence, développé par les autorités publiques de la ville en 1990 a été suspendu. De même pour le premier CDU multimodal à Strasbourg, qui utilisait la gare ferroviaire fret SNCF, mais qui a été arrêté en 2002 à cause de la sortie de l'opérateur ferroviaire du projet.

Par contre, Le CDU de la Rochelle est opérationnel depuis 2001 et a été implanté dans un ancien entrepôt, près du centre-ville, afin de livrer 1300 magasins, en utilisant des véhicules électriques. C'est en 1998 que le projet a débuté dans le cadre du projet européen ELCIDIS (Electric City Distribution System) où la communauté de la Rochelle s'est collaborée avec la CCI, à la société du commerce rochelais, à des transporteurs et au programme national de marchandises en ville (PREDIT, 2005). De plus, ce projet a collecté des aides financières auprès de l'Europe et de la ville de la Rochelle. L'objectif était de minimiser la congestion dans les villes due au transport de marchandises en ville. La Communauté D'Agglomération, le Conseil Régional, la CCI et l'ADEME ont également soutenu le projet financièrement ; le point le plus sensible de ce projet étant alors l'équilibre financier difficile à atteindre.

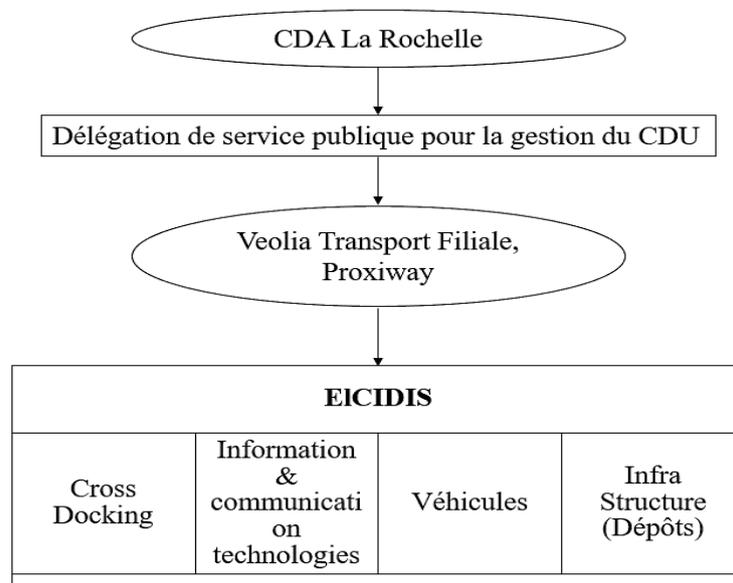


Figure I-8 : Le CDU de la Rochelle<sup>10</sup>

Malheureusement, toutes ces plateformes n'arrivent pas à parvenir à l'équilibre financier.

<sup>10</sup> Source : Guyon et al. (2011)

Néanmoins, l'utilisation de cette solution pour les livraisons urbaines présente beaucoup d'avantages. Elle garantit la rapidité de livraison en utilisant un nombre optimisé de véhicules généralement électriques ; ce qui permet de diminuer le bruit et la congestion dans une zone urbaine. Par ailleurs, il n'y a qu'un seul transporteur dit « neutre ». Cela rend possible de livrer une seule fois par jour le client au lieu de multiplier les livraisons avec autant de transporteurs.

Cependant, ce scénario a un impact économique négatif. Il est très coûteux dans sa mise en œuvre et son fonctionnement. D'une part, il nécessite souvent un investissement important (construction de plateforme, flottes d'équipement). D'autre part, il a des coûts d'exploitation élevés. Les magasins ont une meilleure amélioration de leurs livraisons, mais les commerçants ne sont pas disposés à engager des frais supplémentaires. Les transporteurs, quant à eux, peuvent apprécier d'éviter la livraison dans les zones piétonnes, mais ils sont réticents en raison de la perte de profit, lors de la délégation de cette livraison.

Par la suite, nous allons nous intéresser au thème de notre sujet intitulé : « problème de localisation des centres de distribution urbains » (Hub Location Problem).

## **6 Les critères de choix de localisation de plateformes logistiques**

La création d'un nouveau site consiste d'abord à en évaluer les avantages et inconvénients : avantages de créations d'activités, d'emplois logistiques et des activités attirées par la logistique. Pour les inconvénients, il s'agit principalement des nuisances du transport alimentant le site et des dangers éventuels dus à la consommation d'espace et à l'augmentation du coût du foncier. De plus, il s'agit aussi d'un enjeu de développement économique et de création d'emplois.

Les principaux acteurs du développement du transport de marchandises et de la logistique sont définis comme suit :

- Les utilisateurs des plates-formes logistiques : les chargeurs, transporteurs, prestataires de services,
- Les acteurs politiques et institutionnels,
- Les investisseurs, les promoteurs immobiliers, les aménageurs.

Ainsi le critère de choix de localisation d'une plateforme logistique (voir Figure I-9) dépend des acteurs. Par exemple, pour un responsable d'entreprise, son critère de choix est le niveau de valeur ajoutée de l'activité pour l'entreprise. En ce qui concerne les entreprises logistiques, les critères de choix les plus importants restent la « fiabilité » (le respect du temps de parcours et le respect des horaires de livraison).

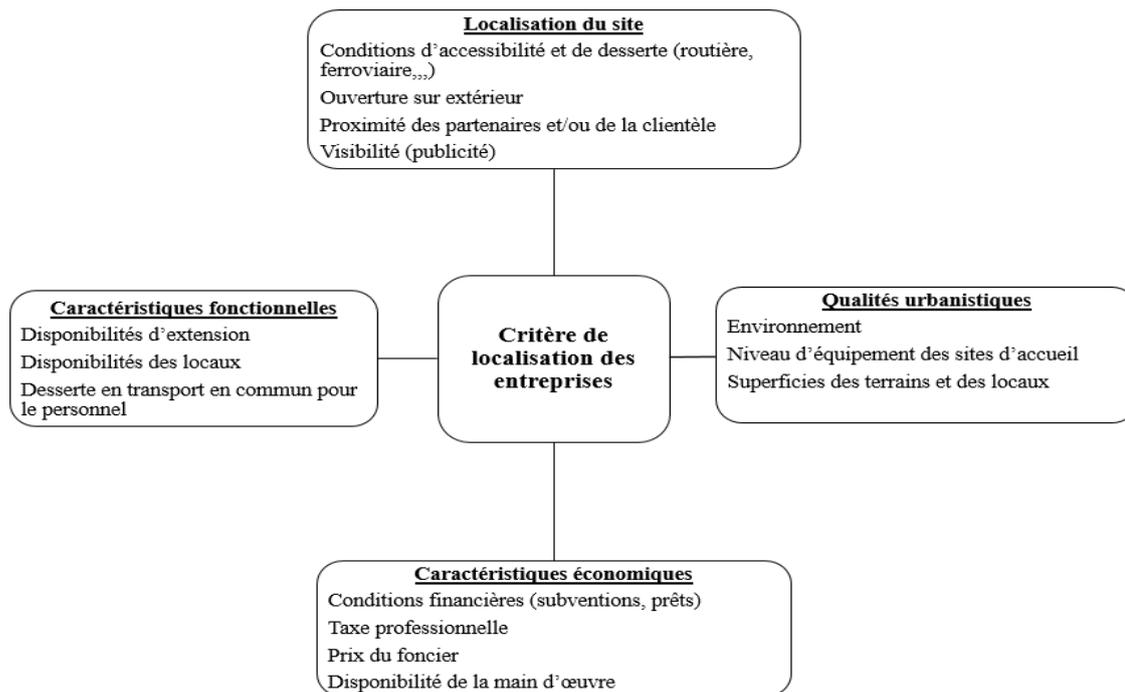


Figure I-9 : Les critères de localisation<sup>11</sup>

Du point de vue de la collectivité, les plateformes logistiques représentent un enjeu en relation avec l'urbanisme et l'aménagement puisqu'elles utilisent un foncier important. Ce dernier est affecté par les flux de poids lourds, qui a des conséquences en matière de desserte (routière, ferrée...), mais aussi de l'environnement. Donc, il est utile de vérifier les atouts des terrains pour accueillir ces centres de distribution.

Or, le choix de l'emplacement affecte l'efficacité de la logistique urbaine et peut même augmenter les coûts. Un choix efficace permettra donc, en fonction de la durée des trajets parcourus, de réduire les externalités négatives et de rendre les villes plus durables (Rao et al., 2015).

L'analyse des expérimentations et des cas d'études a pu dégager trois facteurs succès permettant d'évaluer la viabilité économique des Centres de Distributions Urbains (CDU et/ou ELP) :

- La mise à exécution d'un processus de concertation finalisée, visant à impliquer les principaux acteurs, semble être un élément fondamental en assurant le dialogue entre les opérateurs de transport, la collectivité et les acteurs de la ville.
- La mise en œuvre des restrictions au niveau de l'accès du centre-ville facilite le développement des activités d'un CDU.
- La gestion opérationnelle de la plate-forme doit permettre d'équilibrer financièrement ses activités.

<sup>11</sup> Source : CETE méditerranée (2007)

## 7 Problématique de la thèse

La problématique de localisation des centres de distribution urbains a été présentée dans plusieurs approches, selon différentes méthodologies. En effet, la mutualisation des flux est une stratégie émergente d'amélioration de la performance logistique. Le principe de la mutualisation consiste à transférer l'effort de coordination pour massifier les flux d'opérateurs indépendants vers une organisation mutualisée. Cette organisation est conçue pour partager des moyens de transport et des CDU utilisés pour servir les mêmes clients. Cependant, ces approches n'intègrent pas l'aspect logistique inverse.

De ce fait, nous pensons qu'en intégrant cet aspect de gestion des flux inverses (traitement, récupération optimisée de la valeur, recyclage, tri, etc.) dans le problème de CDU, la décision va être nécessairement être modifiée. Par la suite, un management collaboratif et un gain financier peuvent être atteints.

La prise en compte de l'aspect logistique inverse dans la problématique des CDU complexifie la gestion des flux. En effet, les flux passent à travers le CDU par des tournées de véhicules pour la distribution des livraisons, la collecte des produits retournés, la collecte des emballages, ainsi que la collecte des déchets (voir Figure I-10).

L'installation des CDU est la solution la plus utilisée pour assurer la mutualisation des flux de marchandises et flux inverses et dans ce cadre, nous proposons une approche formelle du problème du CDU répondant aux questions suivantes : Combien de plateformes logistiques doivent être créées, où doivent-elles être localisées et quelle doit être leur taille ? Quelle flotte de véhicules doit être affectée à chaque plateforme ? Comment répartir les véhicules dans les différentes zones de demande ?

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'intégration des différents types de flux par la prise en compte des flux inverses pour la détermination des locations des CDU.

Le chapitre 2 de la thèse présente une formalisation mathématique du problème de localisation des CDU selon un critère de maximisation du profit par un meilleur emplacement. Nous avons calculé les localisations partiellement possibles, tout en garantissant le traitement des flux retournés (collecte, tri, revente) et toute en tenant compte des coûts socio-environnementaux. Une attention particulière a été menée dans le cadre d'un CDU unique afin de vérifier la validation du modèle proposé.

Le chapitre 3 apporte des outils de résolution du modèle proposé via des algorithmes d'optimisation. L'efficacité des algorithmes proposés a été confirmée par un ensemble de jeux de données, issu de la problématique de la location des CDU.

Le dernier chapitre de cette thèse porte sur l'intégration de l'aspect disponibilité du CDU. En effet, nous nous sommes intéressés à la fiabilité des CDU dans l'exécution du service par la prise compte d'une politique de coordination inter-CDU. Il faut, en effet, garantir les livraisons dans les délais, dans le cas où certains CDU sont OUT-OF-SERVICE (OOS). Le Out Of Service est lié à des actions de maintenance rendant indisponible le CDU. Un modèle d'optimisation de la politique de coordination inter-CDU a été proposé.

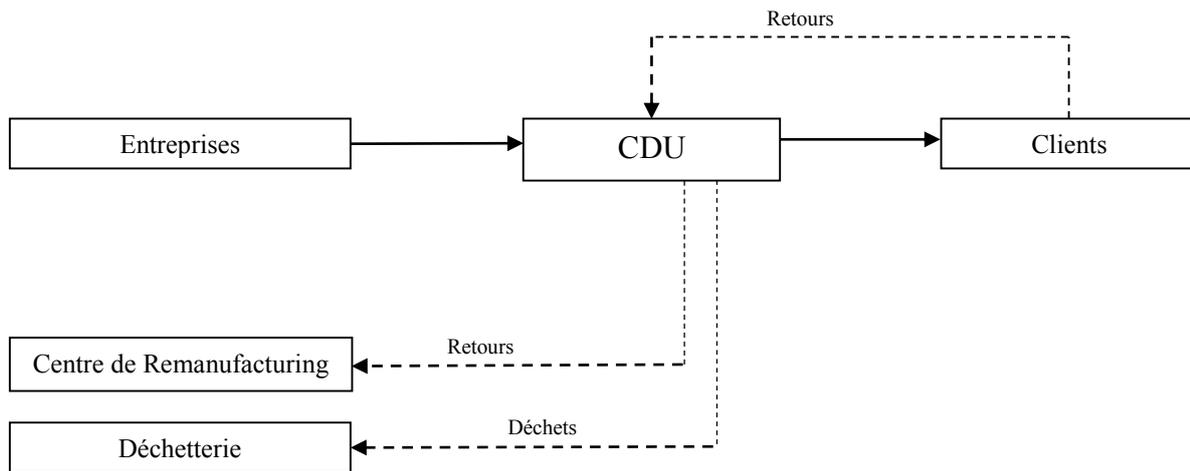


Figure I-10 : Le système proposé

## 8 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous nous sommes intéressés au problème de localisation de plateforme logistique, qui a été présenté dans plusieurs approches, mais y en a un aspect est manquant, c'est celui relatif à la logistique inverse. Or, nous pensons qu'en assurant la gestion des flux de logistique inverse, via la même CDU qui assure les livraisons aux clients, nous pouvons obtenir un gain financier garantissant l'équilibre économique et le management collaboratif.

Nous pensons que comme la problématique de recherche de la localisation des CDU est un sujet intéressant ; Par exemple : l'étude des flux inversés et de l'impact de leurs changements sur les décisions prises pour la localisation. Pour ce faire, nous avons commencé par présenter les deux domaines : Logistique urbaine et Logistique inverse. Ensuite, nous avons décrit quelques modèles de localisation en nous basant sur les problèmes Hub Location Problem. Par la suite, nous avons étudié le centre de distribution urbain comme une solution pouvant faire face aux problématiques des flux logistiques en milieu urbain. Enfin, nous avons décrit la problématique de notre thèse, qui consiste à intégrer les deux flux (directes et inverses) dans le même centre de distribution urbain, en tenant compte des critères socio-environnementaux, afin d'améliorer la situation financière de ces infrastructures.



**Chapitre II : Mise en équations du problème de localisation des centres de distribution urbains selon des critères de coûts économiques, sociétaux et environnementaux ..... 49**

<u>1</u>	<u>Introduction</u> .....	50
<u>2</u>	<u>Éléments de contexte</u> .....	50
<u>3</u>	<u>Présentation du problème proposé</u> .....	53
<u>3.1</u>	<u>Modélisation mathématique</u> .....	55
<u>3.1.1</u>	<u>Paramètres et variables de décision</u> .....	55
<u>3.1.2</u>	<u>Modélisation de la fonction objective</u> .....	56
<u>3.1.3</u>	<u>Modélisation des contraintes</u> .....	57
<u>4</u>	<u>Exemple et étude de sensibilité</u> .....	59
<u>4.1</u>	<u>Hypothèses</u> .....	59
<u>4.2</u>	<u>Résultats Numériques</u> .....	61
<u>4.3</u>	<u>Discussion</u> .....	65
<u>5</u>	<u>Conclusion</u> .....	65



## **Chapitre II : Mise en équations du problème de localisation des centres de distribution urbains selon des critères de coûts économiques, sociétaux et environnementaux**

Le problème étudié consiste à développer un modèle mathématique maximisant le profit de ces centres de distribution urbaine tout en choisissant leur meilleur emplacement à travers des localisations potentielles et en valorisant les flux de retour (produits retournés et déchets recyclables). Notre modèle tient compte aussi des coûts socio-environnementaux.

Dans un premier temps, nous allons décrire notre approche, qui mixe la logistique traditionnelle avec la logistique inverse par le biais d'un centre de distribution urbaine (CDU) ; nous prendrons en compte les acteurs, les flux étudiés, mais aussi les coûts figurant dans notre modèle.

Ensuite, nous allons définir les paramètres et les variables de décision de notre modèle mathématique ainsi que sa fonction objective et ses contraintes. Dans ce cas, les variables de décision sont soit binaires, soit entières positives. Quant aux contraintes et fonctions objectives, elles admettent des termes non linéaires.

Finalement, nous allons évaluer le comportement de notre modèle mathématique à travers un exemple d'étude de cas. L'étude de cas consiste à choisir le meilleur emplacement CDU unique. Les résultats numériques obtenus à travers cet exemple vont nous permettre d'évaluer sa robustesse.

## **1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle de localisation des centres de distribution urbains (CDU) en intégrant les flux directs et inverses dans le but de proposer une amélioration de la stratégie adoptée par ces CDU. Cette réflexion a été le fruit d'une étude réalisée au sein du laboratoire LGIPM (Laboratoire de Génie Industriel, de Production et de Maintenance) de l'Université de Lorraine, en collaboration avec la ville de Metz. Elle vise à améliorer les flux logistiques du centre-ville messin, tout en engageant les acteurs dans une démarche de développement durable. Ce projet s'est étalé sur trois ans et il a permis de proposer une solution plus économique de la distribution et de la collecte des produits ; il a également contribué au décongestionnement tout en minimisant la congestion dans la ville, à l'amélioration de la qualité de vie des résidents et à la réduction des de CO<sub>2</sub> générées par le transport de marchandises.

Le modèle proposé est une extension du modèle de Guyon et al. (2010) et (2011), qui ont présenté un modèle linéaire mixte pour représenter le problème de localisation et de dimensionnement des plateformes logistiques pour la livraison en milieu urbain. Ils ont tenu compte dans leur fonction objective de trois critères décisionnels : économique, environnemental et sociétal. Le modèle se focalise sur un seul type de flux : la messagerie. Afin d'expérimenter ce modèle, ces auteurs ont développé un logiciel de simulation en utilisant les données de la ville de Marseille (France). Cependant, ils n'ont pas intégré les flux inverses venant des commerçants et ils ont traité chaque critère indépendamment.

Dans cette partie, nous allons présenter notre modèle mathématique pour un problème stratégique de la logistique urbaine : la localisation des centres de distribution urbaine (CDU) pour la livraison et la collecte en ville. Pour cela, nous présenterons ce modèle non linéaire à variables entières et binaires, tout en considérant les critères économiques, environnementaux et sociétaux dans une seule fonction objective.

L'objectif principal de notre modèle est de trouver le meilleur emplacement des centres de distribution urbaine (CDU), qui ont la responsabilité de livrer et de collecter les produits retournés et les déchets recyclable ; il s'agit également d'améliorer la situation financière de ces plateformes à travers la valorisation des flux venant de la logistique inverse. Notre fonction objective intègre aussi les trois critères de développement durable (économique, environnemental et sociétal). Par la suite, nous allons évaluer notre modèle par un cas d'étude qui nous servira d'exemple. Dans cet exemple, nous allons nous focaliser sur un problème de localisation d'un seul CDU afin d'évaluer la robustesse de notre modélisation.

## **2 Éléments de contexte**

Le centre-ville de Metz en France présente une zone commerciale piétonne (plus de 500 magasins). Les commerçants reçoivent des livraisons quotidiennes (du lundi au dimanche), ainsi que les résidents du quartier. Le (grand) nombre important de livraisons, le passage régulier des bus urbains et les déplacements des résidents provoquent un grand inconfort dans la zone piétonne (bruit, pollution, congestion) et créent des risques pour les piétons.

L'agence de développement Metz Métropole a mandaté le LGIPM pour une expertise permettant de faire un état des lieux et de proposer des améliorations, optimisant les flux logistiques du centre-ville de Metz.

L'objectif principal est de proposer des solutions qui permettent d'améliorer la mobilité des livraisons, de minimiser la congestion, en réduisant le nombre de véhicules et en réduisant le coût du transport pour la ville de Metz.

L'étude s'est déroulée en quatre étapes :

1. L'étape 1 consiste à faire des observations sur la situation actuelle du centre-ville et en utilisant des questionnaires auprès des commerçants et des transporteurs.
2. L'étape 2 crée une modélisation des flux de données de l'espace piétonnier de Metz.
3. L'étape 3 consiste à simuler et à valider ce modèle à l'aide d'un tableau de bord de gestion.
4. L'étape 4 consiste à proposer et à analyser des solutions (leur comportement) dans le tableau de bord.

La solution qui a retenu le plus d'attention et qui a obtenu les meilleurs indicateurs est celle des plateformes logistiques pour la livraison en milieu urbain, nommées centres de distribution urbaine (CDU). Nous avons testé cette proposition dans le simulateur. Les avantages dégagés par cette proposition sont la diminution des émissions de carbone pour les véhicules, ainsi que la baisse des pics de congestion du matin.

L'utilisation de ces CDUs pour les livraisons urbaines présente plusieurs avantages. Elle garantit une bonne qualité de livraison car nous parvenons à avoir un nombre optimisé de véhicules électriques (moins polluants) pour la livraison, par exemple. Ce dispositif empêche le bruit et la congestion dans les centres villes, mais permet également la mise en place d'un seul rendez-vous par jour au lieu d'une multiplication des livraisons avec plusieurs transporteurs.

Cependant, ce scénario a un impact économique négatif. Il est très coûteux à mettre en œuvre et à faire fonctionner. D'une part, il nécessite souvent un investissement important (construction de plateforme, flottes d'équipement). D'autre part, des coûts d'exploitation élevés ne convainquent pas les parties prenantes d'adopter de telles solutions. Les commerçants concernés ne sont pas disposés à avoir des frais supplémentaires. Les transporteurs peuvent apprécier l'évitement de la livraison dans les zones piétonnes, mais pourraient être réticents en raison de la perte de profits lors de la délégation de cette livraison.

Les projets logistiques dépendent beaucoup du budget public pour faire face à ces dépenses. Dans notre exemple, l'étude du flux logistique à Metz a indiqué que la mise en œuvre de cette solution coûterait environ 820 000 € / an. Pour faire face à ces problèmes, nous avons étendu notre travail à d'autres domaines, afin de trouver des solutions logistiques moins coûteuses, notamment grâce à une valorisation des flux provenant de la logistique inverse.

La logistique inverse est un concept émergent, qui gère le flux de matériel renvoyé, pour la réutilisation, le recyclage ou l'élimination. Elle utilise également la mise en commun des produits de transport et d'évaluation économique renvoyés (boîtes, emballages, remanufacturing).

La logistique inverse ajoute de nouvelles fonctionnalités pour la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Elle utilise de nouvelles fonctions et de nouveaux participants, comme la

collecte, le tri, ou le centre de recyclage. Ensuite, la logistique inverse aide à assurer les exigences environnementales en récupérant le produit retourné qui pourrait être recyclé.

Nous avons mené notre réflexion en nous inspirant de bonnes pratiques d'un autre projet portant sur la collecte des déchets. Le trafic de collecte des déchets a un impact négatif dans le centre-ville de Metz. L'objectif principal est d'identifier les défauts et de suggérer des améliorations. Cette étude de cas nous aidera peut-être à trouver une solution pour faire face au problème financier des CDUs, discuté précédemment. Cela peut se faire en facturant les services aux magasins et aux transporteurs et en vendant des retours aux centres de remanufacturing et aux centres de tri des déchets.

La récupération de ces produits réduira les coûts. Néanmoins, l'intégration du flux inverse dans des CDUs n'est pas une simple tâche. Nous devons tenir compte de nombreuses contraintes liées à l'emplacement des CDUs et à leur taille. Il y a aussi les recommandations de livraison, telles que le nombre et le type de véhicules, leur planification, etc. Ceci pourra être l'objet de nouvelles orientations de recherche, mais dans ces travaux, nous nous concentrons plus particulièrement sur les problèmes de localisation.

Dans la figure ci-dessous, nous expliquons le processus de travail. Une gestion collaborative sera réalisée pour ajouter un gain financier. En ce qui concerne les flux inverses, les produits retournés seront récupérés par des centres de remanufacturing. Pour les déchets recyclables, ils seront vendus au centre de tri des déchets. Nous aurons également comme recettes ; le coût de la collecte, payé par les transporteurs et les commerçants.

Dans notre approche, nous avons basé notre travail sur une logistique directe et inversée en zone urbaine. Le système est composé des CDUs, de clients, de détaillants, de centres de fabrication et de tri des déchets (voir figure II-1). Le client a des demandes de produits, des produits retournés et des déchets recyclables. Le CDU est responsable de la livraison de nouveaux produits et de la collecte des produits retournés et des déchets recyclables. Ainsi, nous pouvons distinguer deux types de flux. D'une part, ces centres fonctionnent en Cross-Docking pour le flux direct, d'autre part, un flux inverse permettra aux concentrateurs de stocker les produits et les déchets retournés.

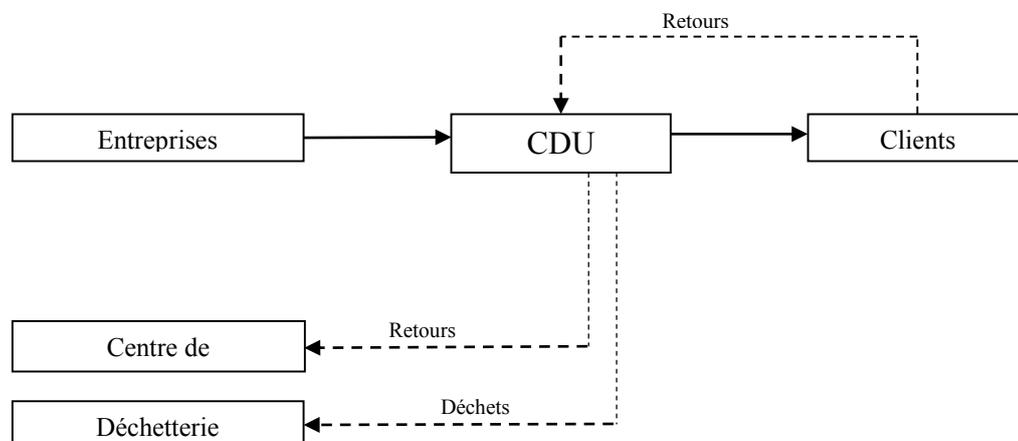


Figure II-1 : Le système étudié

### 3 Présentation du problème proposé

Notre approche repose sur un système de livraison et de collecte des retours et des déchets recyclables en zone urbaine par le biais d'une plateforme nommée centre de distribution urbaine (CDU). Notre système est composé de plusieurs CDU, des zones urbaines, des commerçants, des détaillants, des centres de déchetteries, des centres de Remanufacturing (voir Figure II-2).

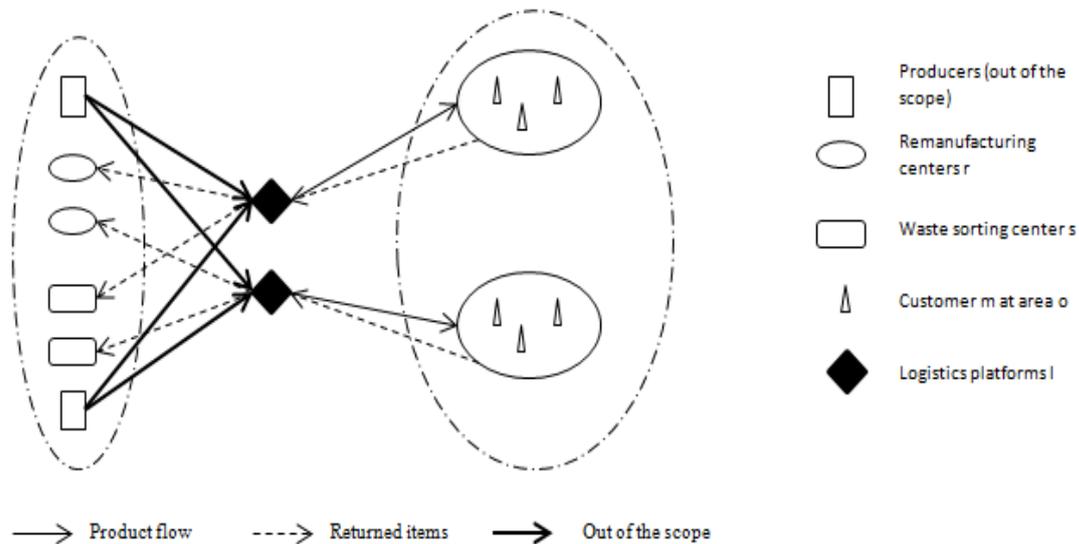


Figure II-2 : Problème de localisation des CDU

#### Centre de Distribution Urbain (CDU)

C'est une plateforme logistique située à proximité d'un espace urbain. Ces centres fonctionnent par Cross-Docking (voir Figure II-3), c'est-à-dire qu'ils présentent une zone de stockage temporaire, par laquelle les produits transitent quelques heures avant d'être réexpédiés vers d'autres destinations. Elle joue un rôle de massification des flux (groupage) et de réorientation en fonction des provenances et des destinations. D'une autre part, les flux inverses seront récupérés par les transporteurs des CDU et ils seront revendus par la suite. Donc, ces flux inverses vont représenter une source de revenus afin d'améliorer la viabilité économique de cette solution.

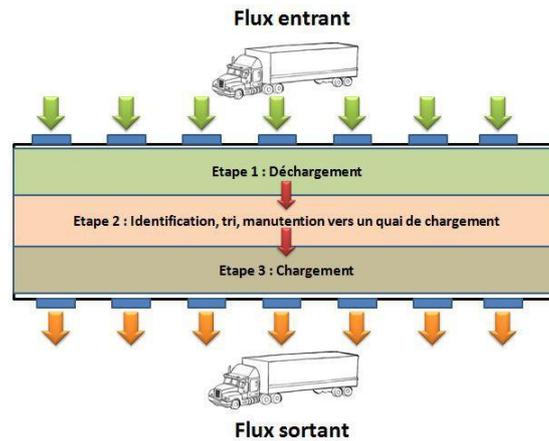


Figure II-3 : Définition du Cross-Docking<sup>12</sup>

### **Zones urbaines**

Chaque zone urbaine est composée d'un certain nombre de commerçants. Chaque commerçant a une demande pour chaque période et pour chaque type de produits. Cette demande est satisfaite par le détaillant et livrée par le CDU affecté. Ainsi à chaque livraison, le commerçant renvoie les produits retournés et les déchets recyclables. Ces produits retournés peuvent être sous forme de produits en fin de vie, produits défectueux ou produits non conformes.

### **Détaillant**

Chaque détaillant satisfait une demande connue d'avance en la livrant aux CDU affectés à la zone concernée. Une fois les demandes des détaillants reçues, les CDU de la ville sont chargés d'assurer la consolidation des flux et de les rediriger vers les clients pour les satisfaire. Les flux entre les CDU et les détaillants ne seront pas traités, nous supposons qu'ils satisferont leurs clients à temps.

### **Les centres de Remanufacturing**

Chaque CDU va vendre les retours collectés au centre de Remanufacturing affecté. Chaque CDU propose un prix de revente différent.

### **Déchetterie**

Chaque CDU va vendre les déchets recyclables collectés au centre de déchetterie affectée. Chaque CDU propose un prix de vente différent.

Notre approche de modélisation vise à optimiser la localisation de ces CDU. À cette fin, ils sont considérés sans capacité limitée, où chaque type de véhicule utilisé pour les tournées de véhicule comporte trois types de capacités : la capacité des produits, la capacité des produits retournés et la capacité des déchets recyclables. En ce qui concerne le domaine de la solution des CDU, il est discret et le nombre de CDU à localiser est exogène (le nombre est principalement spécifié) et il peut être unique ou multiple.

<sup>12</sup> Source : Page web sur la logistique, lien : <http://logistique-pour-tous.fr/cross-docking/>

### 3.1 Modélisation mathématique

Dans cette partie, nous allons procéder à modéliser la problématique pour laquelle nous utilisons des expressions mathématiques, afin de décrire la situation quantitative de notre solution proposée ; pour ce faire, nous faisons intervenir des variables et principalement celle du choix du meilleur emplacement. Nous allons donc présenter les paramètres et les variables, de la modélisation de la fonction objective ainsi que les contraintes.

#### 3.1.1 Paramètres et variables de décision

Dans notre modèle mathématique, nous considérons les notations suivantes

$r \in R$	Indice d'un centre de Remanufacturing. Chaque centre peut communiquer avec les CDU choisis pour récupérer des produits retournés.
$s \in S$	Indice d'un centre de déchetterie. Ainsi, chaque centre de déchetterie peut contacter les CDU choisis afin de récupérer les déchets recyclables.
$t \in T$	Indice de la période. Notre horizon d'étude est égal à T périodes.

Dans notre étude, nous supposons que le milieu urbain est divisé en Z zones. Donc les paramètres liés à chaque zone sont les suivantes

$o \in Z$	Indice d'une zone où chacune va être affectée à un CDU
$m \in N$	Indice du commerçant ( $m \in \{1..N\}$ ) ; nous supposons que chaque zone possède N commerçants
$D_{mot}$	Demande du commerçant m appartenant à la zone o pendant la période t exprimée en nombre de produits à livrer.
$DZ_{ot}$	= 1, si la zone o a au moins une demande pendant la période t, 0 sinon
$YN_{mot}$	Quantité de produits retournés par le commerçant m appartenant à la zone o pendant la période t et transportés à la plateforme l.
$QN_{mot}$	Quantité de déchets recyclables provenant du commerçant m appartenant à la zone o pendant la période t et transportés à la plateforme l.
$longz_o$	Longueur de la zone o en kilomètres
$Cacc_o$	Coût unitaire d'acceptabilité des résidents de la zone o, lié à la congestion (um/période)

Pour différencier entre les différents UDC potentiels, nous avons attribué les paramètres suivants :

$l \in L$	Indice de localisation potentielle d'un CDU. Dans ce cas, nous avons L possibilités maximales d'emplacement de CDU potentiels
$pvs_l$	Prix de revente en um d'une unité de déchets recyclables d'un CDU l. Dans ce cas, chaque CDU potentiel propose un prix de revente différent.
$fs_{ol}$	Frais de collecte des déchets payés par le client appartenant à la zone o au CDU l
$fl_l$	Coût opérationnel du CDU l.
$Cpol_l$	Coût unitaire de pollution générée pour chaque emplacement CDU l pour chaque période
$Caccl$	Coût unitaire d'acceptabilité des résidents associés au CDU l pour chaque période

$\min dis_{ol}$  Distance minimale entre zone o et UDC l en kilomètres

Concernant l'utilisation des véhicules de livraison, les caractéristiques suivantes ont été dégagées :

$CapaN$  Capacité de véhicule en produits neufs  
 $CapaR$  Capacité de véhicule en produits retournés  
 $CapaS$  Capacité de véhicule en déchets recyclables  
 $Ct$  Coût unitaire de transport des livraisons par kilomètre  
 $Cpl$  Cout de pollution par kilomètre

Les variables de notre modèle mathématiques sont :

$$AF_{olt} = \begin{cases} 1 & \text{si la zone o est affectée au CDU potentiel l pendant la période t} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Wf_{rlt} = \begin{cases} 1 & \text{si le centre de Remanufacturing r est affecté au CDU potentiel l pendant la période t} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Xf_{slt} = \begin{cases} 1 & \text{si le centre de déchetterie s est affecté au CDU potentiel l pendant la période t} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$YR_{rlt}$  : Quantité de produits retournés vendue au centre de Remanufacturing r depuis un CDU potentiel l pendant la période t

$QS_{rlt}$  : Quantité de déchets recyclables vendue au centre de déchetterie s depuis un CDU

$NbV_{lt}$  : Nombre de véhicules possédés par le CDU potentiel l

Notre modèle mathématique est un problème d'optimisation en nombres entiers où toutes les variables sont contraintes à ne prendre que des variables entières (variables discrètes et variables binaires).

### 3.1.2 Modélisation de la fonction objective

Comme mentionné précédemment, le but de notre modèle est d'améliorer la situation financière des CDU en choisissant leurs meilleurs emplacements, tout en s'intégrant dans une approche de développement durable. Donc, nous croyons qu'une valorisation des flux venant de la logistique inverse (produits retournés et déchets recyclables) par ces infrastructures va générer un gain financier et une source de revenu. De plus, nous avons choisi de travailler sur les problèmes de localisation car nous pensons que cette décision stratégique impacte le plus l'état de la logistique urbaine et qu'elle représente un choix crucial pour les décideurs avant de démarrer cette activité.

La fonction d'objectif global de notre modèle vise à maximiser le profit de ces CDU en tenant compte des coûts environnementaux et sociétaux. Notre fonction objective est donc composée de trois critères de développement durable : économique, environnemental et sociétal. Elle est

calculée comme une différence entre les revenus générés par l'intégration de la logistique inverse et le coût total des CDU.

Bien que les CDU existent déjà, que leur performance et leur faisabilité ont été bien analysées sur différents critères, tels qu'économique, environnemental et sociétal, il semble qu'aucun modèle, a priori, n'intègre les flux inverses dans les problèmes de localisation de ces infrastructures, en tenant compte des différents critères de développement durable.

Le coût environnemental est présenté par deux types de coûts : coût de pollution fixe, généré par le choix de l'emplacement, coût de pollution fixe à chaque location de véhicule et coût de pollution variable, lié au transport des livraisons par kilomètre. Notre modèle traite également des coûts sociétaux fixes selon deux critères : l'acceptabilité par les citoyens d'un tel emplacement et l'acceptabilité par les citoyens touchés par les mouvements de véhicules.

Nous obtenons des revenus par la somme entre la revente des retours (produits retournés et déchets recyclables (équation 1) et le coût de collecte, payé par les commerçants en raison de la collecte de leurs retours (équation 2).

Le coût total correspond à la somme des coûts fixes, des coûts de transport, des coûts de pollution et des coûts sociétaux. L'équation 3 présente le coût généré par chaque choix de localisation (coût opérationnel, coût de la pollution et coût d'acceptabilité) et par la location d'un véhicule (coût de location et coût de pollution). En ce qui concerne le coût du transport (équation 4), il s'agit du transport des livraisons et du coût de la pollution générée par le transport. Enfin, l'équation 5 calcule le coût d'acceptabilité, généré par le passage du véhicule dans les zones.

$$\max\left(\sum_l^L \sum_r^R \sum_t^T pvr_l YR_{rt} Wf_{rt} + \sum_l^L \sum_s^S \sum_t^T pvs_l QS_{st} Xf_{st}\right) \quad (1)$$

$$+ \sum_l^L \sum_o^Z \sum_t^T \sum_m^N fs_{ol} AF_{olt} YN_{mot}) \quad (2)$$

$$-(T \sum_l^L (fl_l + Cpol_l + Caccl) U_l + (CL + Cap) \sum_l^L \sum_t^T NbV_{lt}) \quad (3)$$

$$+(Ct + Cpl) \sum_l^L \sum_o^Z \sum_t^T (2 \min dis_{ol} + longz_o) AF_{olt} \quad (4)$$

$$+ \sum_l^L \sum_o^Z \sum_t^T Cacc_o AF_{olt}) \quad (5)$$

Dans cette fonction objective, nous cherchons à trouver la/les meilleure(s) localisation(s) des CDU ainsi que les affectations des zones, centre de Remanufacturing et les centres de déchetteries aux CDU, qui maximisent le profit de l'installation de ces infrastructures.

### 3.1.3 Modélisation des contraintes

Le problème ci-dessus nous permet de décider de la meilleure localisation des k CDU en maximisant leur profit, tout en valorisant les flux inverses.

L'équation (6) stipule que k, parmi les L localisations potentielles des UDC, va être ouverte(s).

$$\sum_l^L U_l = k \quad (6)$$

Tandis que l'équation (7) démontre que la zone  $o$ , possédant au minimum une demande de livraison à satisfaire, doit être affectée à un seul CDU, sinon il n'y aura pas d'affectation.

$$\sum_l^L AF_{olt} = DZ_{ot} \quad \forall o \in Z, \forall t \in T \quad (7)$$

En ce qui concerne les équations (8) et (9), nous supposons en outre qu'aucune livraison et retour ne peuvent être effectués par des localisations potentielles non ouvertes.

$$\sum_o^Z AF_{olt} \geq U_l \quad \forall o \in Z, \forall t \in T \quad (8)$$

$$AF_{olt} \leq U_l \quad \forall o \in Z, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (9)$$

Les trois équations (10), (11) et (12) stipulent que les produits, les produits retournés et les déchets recyclables ne doivent pas dépasser les capacités du véhicule alloué à ces catégories de produits. Supposant que le véhicule est caractérisé par trois types de capacités.

$$\sum_o^Z AF_{olt} \times \left( \sum_m^N D_{mot} \right) \leq NBV_{lt} \times CapaN \quad \forall l \in L, \quad (10)$$

$$\forall t \in T$$

$$\sum_o^Z AF_{olt} \times \left( \sum_m^N YN_{mot} \right) \leq NBV_{lt} \times CapaR \quad \forall l \in L, \quad (11)$$

$$\forall t \in T$$

$$\sum_o^Z AF_{olt} \times \left( \sum_m^N QN_{mot} \right) \leq NBV_{lt} \times CapaS \quad \forall l \in L, \quad (12)$$

$$\forall t \in T$$

Les équations (13) et (14) définissent la conservation des flux, c'est-à-dire que les quantités des produits retournés et des déchets recyclables collectés doivent être pleinement transférées respectivement aux centres de Remanufacturing et aux déchetteries.

$$\sum_m^N \sum_o^Z \sum_t^T YN_{mot} = \sum_r^R \sum_l^L \sum_t^T Wf_{rlt} \times YR_{rlt} \quad (13)$$

$$\sum_m^N \sum_o^Z \sum_t^T QN_{mot} = \sum_s^S \sum_l^L \sum_t^T Xf_{slt} \times QS_{slt} \quad (14)$$

Les équations (15) et (16) stipulent que le centre de Remanufacturing et la déchetterie ne peuvent être affectés à un CDU non ouvert.

$$Wf_{rlt} \leq U_l \quad \forall r \in R, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (15)$$

$$Xf_{slt} \leq U_l \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (16)$$

Ainsi, les équations (17), (18), (19) et (20) stipulent que chaque centre de Remanufacturing et centre de déchetterie doivent être affectés à au moins un CDU.

$$\sum_l^L Wf_{rlt} \geq 1 \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (17)$$

$$\sum_r^R Wf_{rlt} \geq U_l \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (18)$$

$$\sum_l^L Xf_{slt} \geq 1 \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (19)$$

$$\sum_s^S Xf_{slt} \geq U_l \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (20)$$

Enfin, les équations (21) et (22) définissent respectivement des variables positives et des variables binaires.

$$YR_{rlt} \geq 0, QS_{rlt} \geq 0, NbV_{lt} \geq 0 \quad (21)$$

$$\forall r \in R, \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T$$

$$U_l, AF_{olt}, Wf_{rlt}, Xf_{slt} \in \{0, 1\} \quad (22)$$

$$\forall r \in R, \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T, \forall o \in Z$$

#### 4 Exemple et étude de sensibilité

Dans cette section, nous traitons notre modèle mathématique. Nous l'évaluons par un exemple simple montrant son comportement. Dans cet exemple, nous allons imposer notre modèle le choix de la meilleure localisation d'un seul CDU, à savoir que  $k$  sera égal à 1 dans la contrainte (6). Dans ce cas, nous allons évaluer l'exactitude et la cohérence de nos résultats afin de valider notre nouvelle approche.

##### 4.1 Hypothèses

Nous visons à identifier le meilleur emplacement d'un UDC parmi quatre possibilités de localisations potentielles. Nous supposons que le milieu urbain est composé d'une seule zone composée de  $N$  commerçants.

De plus, chaque possibilité de localisation est décrite par quatre critères :

- Coût fixe de chaque UDC
- Distance en kilomètres entre chaque UDC et la zone.
- Impact sur l'environnement (pollution), c'est-à-dire l'impact qui aura lieu à cause de cette implantation
- Taux de service, c'est-à-dire le service proposé pour collecter les déchets.

Notre modèle mathématique utilise différentes variables, certaines d'entre elles sont supposées être des éléments uniques en raison du contexte d'exemple (zone urbaine). Enfin, nous considérons que tous les retours seront vendus au centre de Remanufacturing.

Par conséquent, le modèle mathématique se présente comme suit, en tenant compte de ces hypothèses. L'équation (23) définit les revenus obtenus par la somme entre la revente des retours (produits retournés et déchets recyclables et le coût de collecte, payé par les commerçants).

Les équations (26) et (27) présentent le coût total défini par les coûts fixes pour chaque localisation potentielle, les coûts de transport, les coûts des émissions de pollution et le coût sociétal.

$$\max(\sum_r^R \sum_t^T pvr YR_{rt} + \sum_s^S \sum_t^T pvs QS_{st} + \sum_l^L \sum_t^T \sum_m^N fs_l AF_{mlt} YN_{mt}) \quad (23)$$

$$-(T \sum_l^L (fl_l + Cpol_l + Caccl) U_l + (CL + Cap) \sum_t^T NbV_t) \quad (26)$$

$$+(Ct + Cpl) \sum_l^L \sum_t^T (2 \min dis_l + longz) U_l) \quad (27)$$

L'équation (28) stipule le choix d'un seul UDC par L possibilités.

$$\sum_l^L U_l = 1 \quad (28)$$

En ce qui concerne l'équation (29), nous supposons qu'aucune livraison et retour ne peuvent être effectués par des localisations potentielles non ouvertes

$$\sum_l^L AF_{mlt} \leq U_l \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (29)$$

Les trois équations (30), (31) et (32) stipulent que les produits, les produits retournés et les déchets recyclables ne doivent pas dépasser les capacités du véhicule alloué à ces catégories de produits.

$$\sum_m^N AF_{mlt} D_{mt} \leq NBV_t \times CapaN \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (30)$$

$$\sum_m^N AF_{mlt} YN_{mt} \leq NBV_t \times CapaR \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (31)$$

$$\sum_m^N AF_{mlt} QN_{mt} \leq NBV_t \times CapaS \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (32)$$

Les équations (33) et (34) exigent la conservation des flux, c'est-à-dire tous les retours collectés doivent être revendus.

$$\sum_m^N \sum_t^T YN_{mt} = \sum_r^R \sum_t^T YR_{rt} \quad (33)$$

$$\sum_m^N \sum_t^T QN_{mt} = \sum_s^S \sum_t^T QS_{st} \quad (34)$$

Tandis que les équations (35) et (36) définissent respectivement des variables positives et des variables binaires.

$$YR_{rt} \geq 0, QS_{st} \geq 0, NbV_t \geq 0 \quad \forall r \in R, \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (35)$$

$$U_l, AF_{mlt} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L, \forall t \in T, \forall m \in N \quad (36)$$

## 4.2 Résultats Numériques

Pour la simulation, nous utilisons la version FICO Xpress 7.9. L'objectif de l'exemple est de présenter la meilleure localisation potentielle d'un CDU parmi 4 possibilités, sachant que chaque emplacement a des paramètres distincts les uns des autres. Notre modèle nous donnera le meilleur en prenant en compte les exigences, les distances, les émissions de pollution et l'acceptabilité des citoyens.

Après cela, nous donnerons un niveau qualitatif pour chaque paramètre utilisé en décrivant chaque UDC potentiel ci-dessous :

- \*\*\*\*: Excellent
- \*\*\*: Très bien
- \*\*: Bien
- \*: Mal

Selon le Tableau I-1, le troisième UDC offre une meilleure combinaison par rapport aux autres possibilités. Par la suite, nous allons résoudre notre modèle et nous allons vérifier l'adéquation des résultats.

Tableau II-1 : Évaluation qualitative et quantitative pour chaque UDC potentiel

	1		2		3		4	
Coût fixe	133340	****	200000	*	166600	***	133340	****
Cout de pollution par période	1	****	2.5	**	2	***	10	*
Coût lié à l'acceptabilité des riverains	0.1	****	0.5	**	0.3	***	5	*
Distance entre UDC et la zone	4	*	1	***	2	**	0	****
Frais de service	0.3	*	1	****	1	****	0.5	**
Total	14		12		15		12	

À cette fin, nous commençons par générer les coordonnées aléatoires de chaque emplacement commerçant à l'aide de l'outil Microsoft Excel (voir Figure II-4), et nous mesurons les distances euclidiennes entre les commerçants et les CDU potentiels.

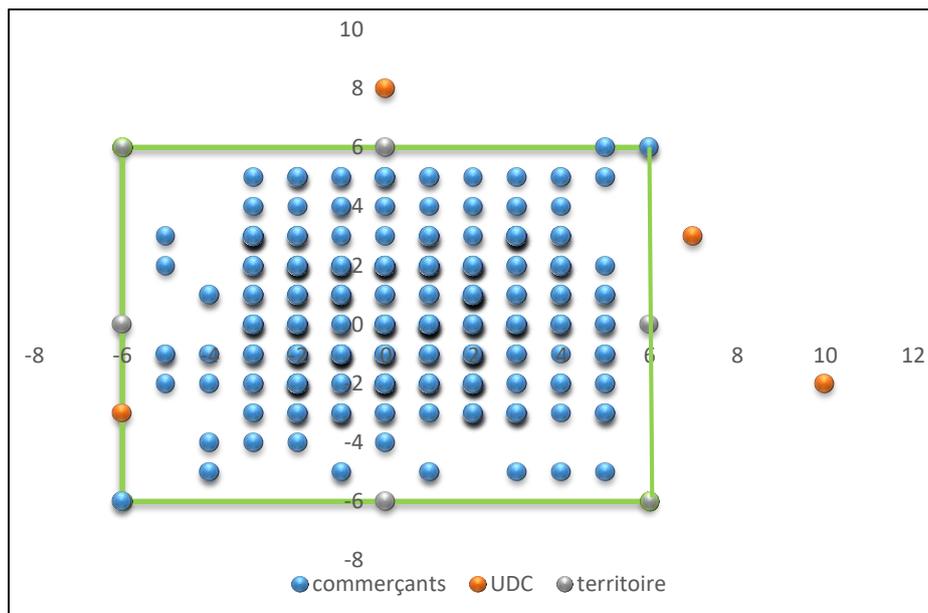


Figure II-4 : Le territoire étudié

Les différents paramètres utilisés sont les suivants :

- Nombre maximal de commerçants = 500 commerçants
- Nombre maximal de périodes = 900 périodes
- Nombre maximal de centres de Remanufacturing = 4 centres
- Nombre de déchetteries = 2 déchetteries
- Coût de transport = 0.3 /km parcourus
- Coût de location d'un véhicule = 10/période
- Coût de pollution, généré par le transport de livraison = 0.01/km parcourus

Ces variables sont nombreuses, elles sont égales à 7904 éléments en raison des différentes possibilités : 900 périodes, 4 emplacements possibles, 4 centres de Remanufacturing, 2 centres de tri des déchets, 400 clients (voir Tableau II-2).

Tableau II-2: Nombre de variables dans l'exemple numérique

Variables	Décision sur la localisation	Nombre de véhicules	Quantité de déchets	Quantité des retours	Affectation des commerçants
Nature	Binaire	Entier	Entier	Entier	Binaire
Nombre d'éléments	4	900	1800	3600	1600
Nombre d'éléments total	7904				

Les solutions, obtenues en utilisant FICO Xpress lié aux paramètres par défaut du solveur, sont présentées dans le Tableau II-3 et dans la Figure II-5. L'algorithme a pu trouver 1 seule solution entière possible et réalisable et il a choisi d'ouvrir le troisième UDC. Le même résultat est produit lors de l'étude qualitative. Nous pouvons donc conclure que notre modèle fonctionne correctement.

Tableau II-3 : Résultat final

Solution	Best bound	Gap	
222847um	222847um	0%	
Choix de localisation			
$U_1=0$	$U_2=0$	$U_3=1$	$U_4=0$
Temps d'exécution			
0.556 secondes			

Les courbes décrivent que le profit augmente proportionnellement avec le nombre de clients et le nombre de périodes. Cela prouve que le modèle fonctionne correctement et que les flux inverses assurent des avantages pour le système ; il génère donc un gain financier. Le but de la figure 5 est de prouver la cohérence du profit avec le nombre de périodes et le nombre de clients. Par conséquent, nous pouvons conclure que notre programme nous donne des valeurs cohérentes. L'intégration du nombre de périodes permettra de distinguer le croisement des courbes indépendamment du nombre de clients où le bénéfice est égal à zéro (nombre de commerçants égale à 192 clients). De plus, chaque simulation nous permet de constater que le troisième CDU est meilleur que les autres possibilités.

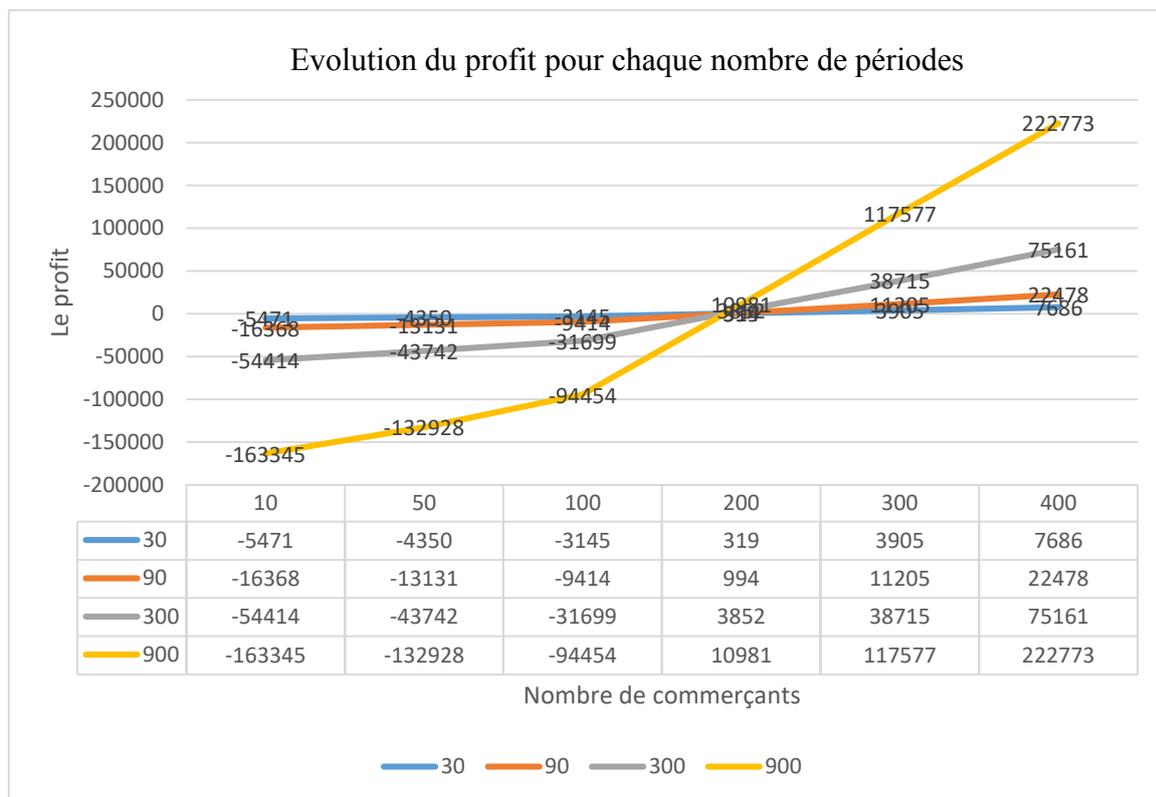


Figure II-5 : Résultats numériques

En outre, afin d'évaluer les impacts de l'aléatoire sur les résultats du modèle, nous avons généré des demandes aléatoires 20 fois pour chaque nombre de commerçants (10, 100 et 400 commerçants) et nous avons observé une grande stabilité en ce qui concerne les résultats, comme indiqué sur le tableau ci-dessous.

Tableau II-4 : Les résultats des 20 simulations de profits

N° de la génération	NC=Nombre de commerçants		
	10	100	400
1	-163430	-93903,4	224225
2	-163439	-9415,5	224229
3	-163412	-93835,2	224196
4	-163414	-93950,2	224204
5	-163426	-93862,6	224227
6	-163395	-93999,1	224170
7	-163422	-94095	224020
8	-163445	-94037,1	224128
9	-163442	-93872,2	224135
10	-163426	-93989,5	224242
11	-163433	-93902	224143
12	-163445	-94118,2	224151
13	-163439	-94066,5	224210
14	-163427	-93967,2	224193
15	-163438	-94008,8	224026
16	-163415	-93942,9	224085
17	-163421	-94024,9	224079
18	-163418	-94036,4	224241
19	-163442	-93908,2	223986
20	-163406	-94107,5	224097
Moyenne	-163426,75	-93989,095	224149,35

Dans la figure suivante, nous présentons l'écart entre chaque résultat et la moyenne sur différentes simulations, faits pour 10, 100 ou 400 commerçants avec 20 générations de

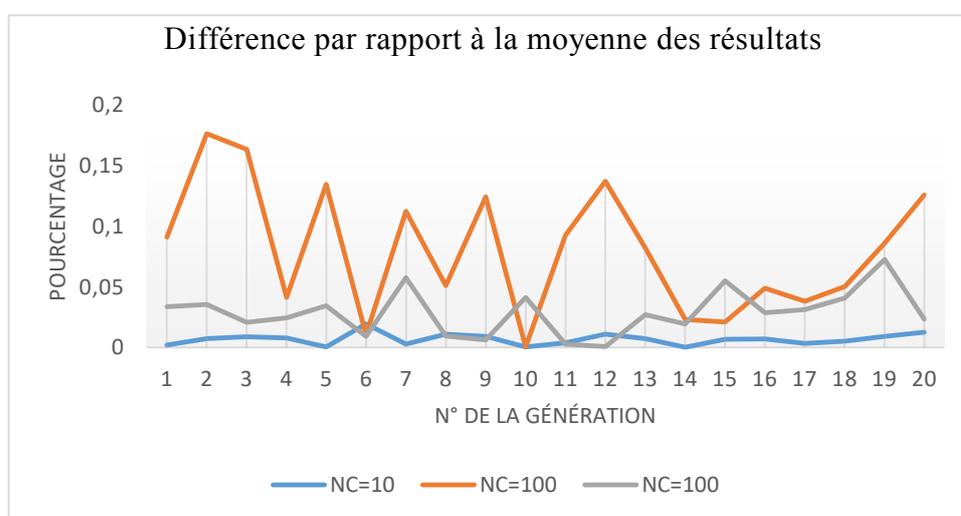


Figure II-6 : Allure des écarts entre les résultats des profits générés et leurs moyennes

demandes. Les écarts sont entre 0.18% et 0.0015%, d'où nous pouvons conclure que les résultats sont quasiment stables.

### **4.3 Discussion**

La gestion des CDU en utilisant des flux directs et inverses semble être la meilleure solution en matière de livraison de marchandises dans le centre-ville. Les flux de livraison et de retour (par exemple, les produits retournés ou les déchets) seront traités par un seul opérateur, suite à un processus normalisé. Par conséquent, ces flux seront optimisés et chaque participant prenant un seul représentant. En outre, les piétons verront la circulation diminuer, avec un processus de collecte des déchets plus organisé. Cela peut être observé en fonction de la diminution du nombre de véhicules, de la sélection du transport écologique et de la gestion d'un tel processus par un seul opérateur. De telles améliorations auront un impact immédiat sur les aspects environnementaux et sociétaux. Du point de vue économique, elles présenteront, cependant, un problème dû au coût opérationnel. Cela peut constituer un fardeau d'investissement pour ces plates-formes. C'est pourquoi nous avons développé ce modèle.

Notre modèle mathématique maximisera les profits en aidant à choisir l'emplacement des CDU et leurs nombres. En outre, en définissant les affectations entre commerçants et CDU, pour convenir de la quantité de livraisons et des frais pour la collecte des déchets, nous encouragerons les parties prenantes à être plus conscientes de l'environnement pour produire moins de déchets.

## **5 Conclusion**

La logistique urbaine est essentielle pour que les villes fonctionnent avec succès et constitue une part importante du trafic urbain. Ce faisant, nous proposons dans ce chapitre un modèle mathématique de localisation des CDU en tenant compte des flux directs et inversés. Dans ce modèle, nous choisissons le meilleur emplacement pour le (les) CDU, ce qui permet de maximiser les bénéfices. Ces bénéfices vont être générés grâce à une valorisation des flux inverses. En outre, nous considérons le coût fixe, le coût du transport en milieu urbain, le coût logistique, le coût de la pollution et le coût d'acceptabilité des résidents. En ce qui concerne les revenus, nous aurons la revente des produits retournés à la nouvelle fabrication et à la vente des déchets recyclables.

Afin d'étudier le comportement de notre modèle, nous avons commencé par le résoudre en choisissant un seul CDU parmi  $L$  possibilités, qui maximise le profit. Par conséquent, nous avons proposé un exemple numérique en tenant compte de ce critère. Cette résolution nous a permis de prouver la cohérence des résultats obtenus, mais aussi d'avoir un gain à partir d'un certain nombre de périodes et nombre de commerçants, ce qui permet de valider notre nouvelle approche.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons la localisation de plusieurs CDU parmi  $L$  possibilités pour maximiser le profit. À cette fin, nous avons résolu le modèle en utilisant deux méthodes. La première consiste à linéariser le modèle pour obtenir un nouveau modèle linéaire et à injecter ce dernier dans un solveur de programmation linéaire, en utilisant la méthode de Branch and Bound. Dans la deuxième méthode, nous utiliserons l'algorithme génétique qui nous permettra d'avoir des résultats raisonnables dans un temps plus intéressant qu'avec la première méthode.



# **Chapitre III : Optimisation du problème de localisation des centres de distribution urbains..... 69**

<u>1</u>	<u>Introduction</u> .....	70
<u>2</u>	<u>Les problèmes d'optimisation</u> .....	70
<u>2.1</u>	<u>Programmation linéaire (PL)</u> .....	70
<u>1.1</u>	<u>Programmation non linéaire (PNL)</u> .....	71
<u>2.1.1</u>	<u>Stratégie de pénalisation des contraintes</u> .....	71
<u>2.1.2</u>	<u>Une stratégie de linéarisation</u> .....	72
<u>3</u>	<u>Les problèmes d'optimisation pour la localisation des CDU</u> .....	73
<u>3.1</u>	<u>État de l'art sur les problèmes de localisation de CDU existants</u> .....	73
<u>3.2</u>	<u>Complexité des PLCDU</u> .....	75
<u>3.3</u>	<u>Les méthodes de résolution des problèmes de localisation</u> .....	76
<u>4</u>	<u>Modèle mathématique</u> .....	77
<u>4.1</u>	<u>Linéarisation des termes non linéaires</u> .....	80
<u>4.1.1</u>	<u>Reformulation de notre modèle mathématique</u> .....	80
<u>4.2</u>	<u>Exemple numérique</u> .....	83
<u>4.2.1</u>	<u>Résolution par l'algorithme Branch &amp; Bound</u> .....	83
<u>4.2.2</u>	<u>Résolution par l'algorithme génétique</u> .....	88
<u>4.2.2.1</u>	<u>Création de l'individu</u> .....	91
<u>4.2.2.2</u>	<u>Génération de la population initiale</u> .....	91
<u>4.2.2.3</u>	<u>Évaluation</u> .....	91
<u>4.2.2.4</u>	<u>Stratégie de sélection</u> .....	92
<u>4.2.2.5</u>	<u>Croisement</u> .....	92
<u>4.2.2.6</u>	<u>Mutation</u> .....	93
<u>4.2.2.7</u>	<u>Résultats</u> .....	93
<u>4.2.3</u>	<u>Amélioration de la solution obtenue par le GA par l'algorithme recuit simulé</u> 95	95
<u>5</u>	<u>Conclusion</u> .....	97



# **Chapitre III : Optimisation du problème de localisation des centres de distribution urbains**

Les CDU et l'intégration de la logistique inverse sont les solutions les plus utilisées dans les zones urbaines pour répondre aux ambitions de réduction du bruit, de la pollution et du coût. L'objectif principal est de rendre ces CDU plus performants en utilisant des fonctionnalités supplémentaires basées sur les flux inverses. Pour ce faire, nous présentons une optimisation du problème de localisation des CDU proposé dans le chapitre 2 en supportant deux types de flux : les livraisons urbaines et la logistique inverse.

Ce modèle vise à améliorer la situation financière des CDU en minimisant leur coût d'exploitation élevé. Cela passe par l'introduction d'algorithmes numériques à des fins d'optimisation, puis la simulation de ce modèle par un exemple numérique aidant à choisir le meilleur emplacement d'un CDU. Enfin, nous montrons l'apport de ce modèle sur le plan économique.

## 1 Introduction

La modélisation mathématique représente un moyen pour définir tout type de problème de décisions sous forme d'un objectif qui rassemble un ensemble de variables ayant entre elles des relations logiques et imposées, connues sous le nom « Contraintes ». Dans chaque problème, l'objectif principal est de trouver des solutions qui permettent d'aboutir à un objectif voulu tout en satisfaisant les contraintes existantes. En conséquence, la recherche de ces solutions sera atteinte par le biais des méthodes d'optimisation de ces modèles. Ces méthodes consistent à chercher un ensemble de valeurs possibles pour chaque variable tout en satisfaisant les contraintes dont une seule solution sera retenue vu qu'elle représente le meilleur.

Généralement, les problèmes d'optimisation consistent à minimiser ou à maximiser une fonction objective. Elles peuvent être difficiles à résoudre. Nous aurons besoin dès lors des outils avancés. Elles peuvent aussi avoir des caractéristiques différentes : variables continues et/ou discrètes, mono-objectif ou multi-objectif, termes linéaires et/ou non linéaires, des paramètres aléatoires et incertains, etc.

Notre modèle mathématique proposé est notamment défini comme un problème non linéaire avec des variables entières. Nous devons donc identifier les différences entre un problème dit linéaire et un problème dit non linéaire. Nous définirons et présenterons alors les techniques utilisées pour optimiser notre problème de localisation des CDU considérant des flux directs et inverses ainsi que les critères économiques, environnementaux et sociétaux.

## 2 Les problèmes d'optimisation

Le but de ce chapitre est d'optimiser notre modèle mathématique. Les problèmes d'optimisation consistent à sélectionner  $n$  variables de décision  $x_1, x_2, \dots, x_n$  d'une région faisable donnée de manière à optimiser (minimiser ou maximiser) une fonction objective donnée.

Il y a deux types de problèmes : un problème linéaire et un problème non linéaire.

- En programmation linéaire (PL), s'il existe une solution optimale, alors il existe un point extrême du polyèdre qui est optimal.
- En programmation non linéaire (PNL), l'optimum peut se trouver n'importe où.

### 2.1 Programmation linéaire (PL)

La programmation linéaire est un problème mathématique qui vise à minimiser ou maximiser une application linéaire de plusieurs variables dite **fonction objective**, ces variables sont reliées par des équations et/inéquations linéaires dites **contraintes**.

Un problème de programmation linéaire peut être formulé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max(ouMin)} \left[ Z(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_i^n c_i x_i \right] \\ \sum_i^n a_{ij} x_i \leq (\text{ou } =) b_j \text{ pour } j = 1 \dots p \end{array} \right.$$

Où  $a_{ij}$ ,  $b_j$ ,  $c_i$  sont des réels et  $x_i$  sont des variables réelles.

### 1.1 Programmation non linéaire (PNL)

La programmation non linéaire (PNL) est une généralisation de la programmation linéaire. Dans un tel problème, la fonction objective et/ou les contraintes sont non linéaires.

En d'autres termes :

$$\begin{array}{l} \text{Minimiser } g(x_1, \dots, x_n) \\ \text{Sous les contraintes suivantes} \\ \left\{ \begin{array}{l} f_1(x_1, \dots, x_n) \geq 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1, \dots, x_n) \geq 0 \end{array} \right. \end{array}$$

Où  $g$ ,  $f_1 \dots$ ,  $f_m$  sont typiquement non linéaires à  $n$  variables.

Un PNL est plus difficile à résoudre qu'un PL. Des méthodes locales sont généralement utilisées pour résoudre ce genre de problème ce qui minimise la vitesse d'exécution. Ces méthodes sont utilisées dans les problèmes d'optimisation en finance, énergie, etc. Généralement, ces méthodes de résolution de PNL peuvent donner un maximum (ou minimum) local sans savoir s'il est global (voir Figure III-1).

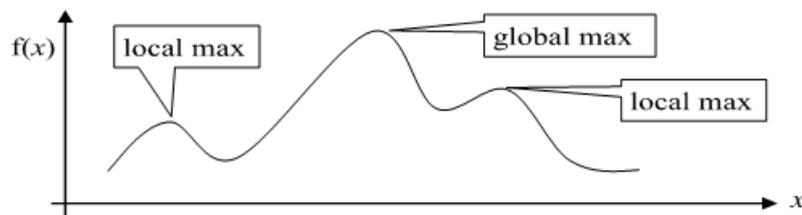


Figure III-1 : Différence entre un maximum local et un maximum global

#### 2.1.1 Stratégie de pénalisation des contraintes

La pénalisation des contraintes consiste à transformer un problème d'optimisation avec contraintes en un problème d'optimisation sans contraintes. Cette transformation permet l'utilisation des algorithmes dédiés à la résolution des problèmes de ce même type. Pour éliminer ces contraintes, il faut les intégrer dans la fonction objective en rajoutant un facteur de pénalisation. Soit le problème suivant :

$$\begin{array}{l} c(x) : \text{les contraintes} \\ \min f(x) \text{ avec } c(x) \geq 0 \end{array}$$

Après transformation le modèle devient :  $\min h(x, \beta) = f(x) + \beta \sum_{i=1}^n P_i(c_i(x))$

### 2.1.2 Une stratégie de linéarisation

Il s'agit de l'ensemble des astuces permettant de transformer un programme non linéaire (PNL) en un programme linéaire (PL). Généralement, ces transformations demandent l'ajout de nombreuses variables supplémentaires. Dans ce qui suit, nous nous intéressons à deux stratégies de linéarisation :

#### **Linéarisation d'une équation contenant un produit de variables binaires**

Pour une fonction objective qui contient un produit de variables de décisions  $x \times y$  où  $x$  et  $y$  sont des variables binaires, nous devons rajouter une variable  $z = x \times y$  et en rajoutant les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} z &\leq x \\ z &\leq y \\ z &\geq x + y - 1 \end{aligned}$$

Les deux premières contraintes assurent que  $z$  doit être égal à 0 si  $x$  ou  $y$  sont égaux à zéro. Pour la dernière contrainte, elle montre que  $z$  doit être égal à 1 si  $x$  et  $y$  sont égaux à 1.

#### **Linéarisation d'une équation contenant un produit de variable binaire et variable continue**

Supposons une équation contenant un produit de variables  $B \times x$ , avec  $B$  une variable continue et  $x$  est une variable binaire. Par la suite nous créons une variable  $z = B \times x$ .

Si  $B$  est borné ( $0 \leq B \leq M$ ), alors nous rajoutons les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} z &\leq M \times x \\ z &\leq B \\ z &\geq B - (1 - x)B \\ z &\geq 0 \end{aligned}$$

Notez que si  $x$  est nulle, la première inégalité garantit que  $z$  sera égal à zéro (la troisième inégalité indique que  $z$  doit être supérieur à un nombre négatif). D'autre part, si  $x$  est égal à 1, la première inégalité garantit que  $z$  est inférieur à  $M$ . La dernière inégalité indique que  $z$  doit être supérieur ou égal à  $B$ , exactement comme nous le voulions.

Si  $B$  est borné ( $L \leq B \leq M$ ), alors nous rajoutons les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} \min\{0, L\} &\leq z \leq M \\ L \times x &\leq z \leq M \times x \\ B - (1 - x)M &\leq z \leq B - (1 - x)L \end{aligned}$$

$$z \leq B + (1 - x)L$$

La première inégalité implique que  $z$  doit être positif et ne dépasse pas la valeur de la borne supérieure de  $B$ . Dans ce cas aussi, si  $x$  est nulle, la deuxième inégalité garantit que  $z$  sera égal à zéro. D'autre part, si  $x$  est égal à 1, la première inégalité garantit que  $z$  est inférieur à  $M$ . Les autres inégalités indiquent le domaine de la nouvelle variable.

### 3 Les problèmes d'optimisation pour la localisation des CDU

La localisation des centres de distribution urbaine (CDU) consiste généralement à sélectionner les meilleurs emplacements à partir des sites potentiels tout en satisfaisant les critères exigés par les parties prenantes ainsi que les contraintes environnementales (voir Figure III-2). De nombreuses méthodes ont été développées pour trouver le meilleur emplacement des CDU étant donnée l'importance et la complexité de cette décision pour les donneurs d'ordre.

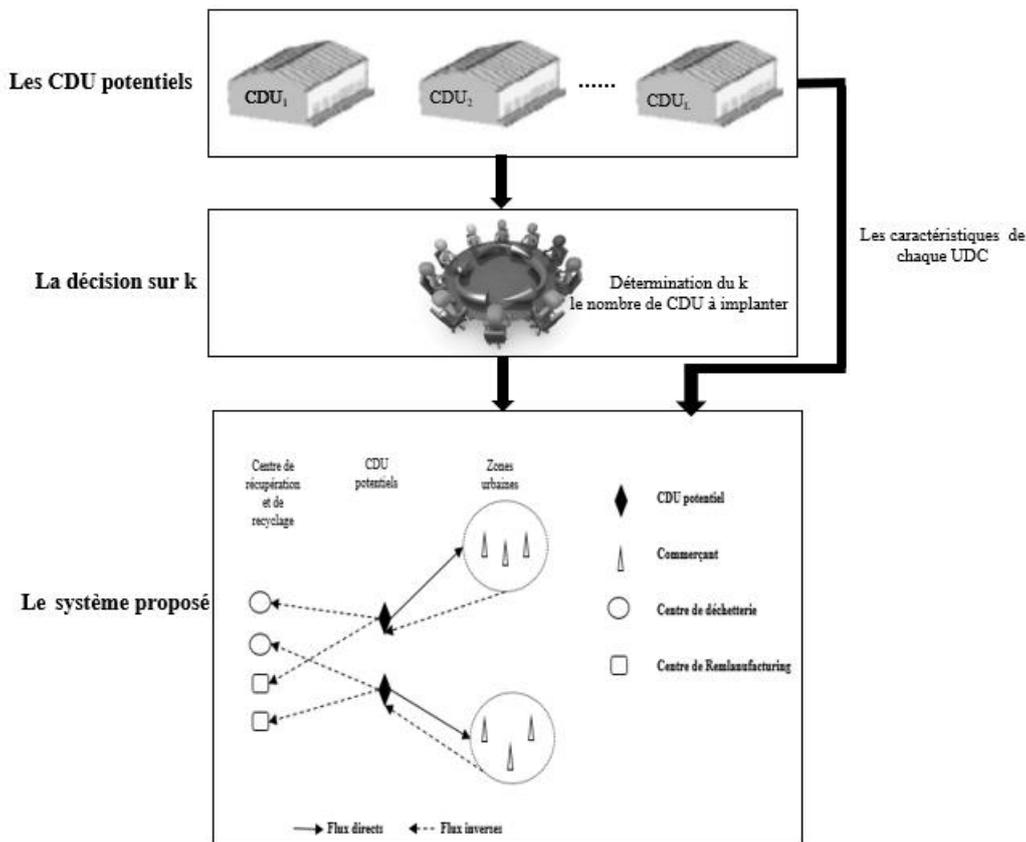


Figure III-2 : Processus de la sélection et localisation des CDU

#### 3.1 État de l'art sur les problèmes de localisation de CDU existants

Dans la littérature, ils ont classé le problème de localisation de CDU selon l'environnement. Il y a deux environnements : incertain et certain. Un environnement certain considère que le problème est déterministe et les paramètres du modèle sont connus et fixes (Crainic et al., 2004), (Guyon et al., 2011) et (Fei et al., 2007). Tandis que pour un environnement incertain les

données et les informations du problème sont des nombres non fixes (Awasthi et al., 2011), (Bouhana et al., 2013) et (Hashim et al., 2014).

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les problèmes de localisation de CDU (PLCDU) selon un environnement certain. Par conséquent, nous allons présenter les travaux et méthodes utilisés pour résoudre ce type de problème.

Guyon et al. (2011) ont proposé un programme linéaire mixte contenant une liste de CDU potentiels ayant des caractéristiques différentes (la situation géographique, la capacité maximale, le coût de la construction, etc.), une liste de points de demande ayant comme caractéristiques leur zone géographique et un catalogue de véhicules définit selon le type d'énergie, le poids total, le coût d'achat, les émissions de polluants, etc. D'un point de vue économique, les auteurs se sont intéressés aux coûts fixes de construction et de la maintenance des plateformes logistiques, au coût fixe de l'achat des véhicules et au coût variable de l'utilisation des véhicules. D'un point de vue environnemental, ils se sont intéressés aux coûts : de la pollution variable causé par les déplacements des véhicules, de pollution variable causée par les CDU et de congestion variable. Le critère social est défini par l'acceptabilité des habitants pour chaque site potentiel et par l'acceptabilité des habitants pour chaque tournée de véhicule à proximité.

Afin d'expérimenter ce modèle, Guyon et al. (2011) ont développé un outil d'aide à la décision capable de créer, calculer et évaluer différents scénarios dans n'importe quelle zone urbaine, en utilisant le logiciel commercial IBM ILOG CPLEX12.1. Ce logiciel contient un module d'optimisation qui permet de choisir le meilleur emplacement des CDU à partir de sites potentiel pour l'implantation de CDU. Par la suite, ils l'ont appliqué sur des données réelles dans le cas de la ville Marseille (France). Les résultats préliminaires trouvés dans ce cas semblent prouver l'intérêt de l'outil et la concordance du modèle.

Fei et al. (2007) ont appliqué l'algorithme génétique dont le but est de choisir un certain nombre de centres de distribution pour minimiser le coût total du transport. Les critères de sélection sont : (1) l'environnement, y compris le climat, la géographie, la pollution ; (2) l'environnement commercial, notamment les caractéristiques du fret, les coûts logistiques et la qualité du service ; (3) la situation de l'infrastructure comme les transports et les institutions publiques et (4) d'autres critères tels que l'utilisation des ressources, les règlements de protection de l'environnement. Par la fonction objective, les auteurs ont voulu minimiser les coûts de transport (du producteur au centre de distribution et du centre de distribution urbain aux clients). Les contraintes incluses dans le modèle sont les suivantes : contraintes liées à la quantité totale de marchandises transportées, à la capacité de distribution du centre et aux exigences du client.

Crainic et al. (2004) présentent une modélisation mathématique qui contient le coût fixe d'ouverture et le coût opérationnel des CDU, le coût du transport des livraisons. Pour valider leur approche, ils ont utilisé l'algorithme Branch & Bound du solveur en injectant des données réelles de la ville de Rome.

Taniguchi et al. (1999) ont proposé une modélisation à deux niveaux qu'ils ont appliquée à la ville de Tokyo. Le niveau supérieur qui décrit la minimisation du coût de transport et du coût d'installation dont l'objectif est de déterminer la taille et la localisation optimale des sites. Le

niveau plus bas décrit l'affectation des entreprises aux CDU choisis mais aussi l'affectation des véhicules pour la livraison urbaine aux CDU. Le problème du niveau supérieur est décrit par une optimisation non linéaire avec des variables discrètes. La résolution de ce type de problème ne permet pas d'obtenir une solution optimale. Pour cette raison que les auteurs ont utilisé une heuristique et ils ont choisis l'algorithme génétique.

### 3.2 Complexité des PLCDU

Comme présenté dans le chapitre I, PLCDU peut être classé comme un cas exceptionnel du problème plus général de l'emplacement des plateformes (Hub location Problem). De ce fait, nous allons nous inspirer de ces problèmes afin de classifier les méthodes de résolutions existantes. De plus, le PLCDU proposé est un problème sans capacité limitée. L'objectif consiste à installer un certain nombre  $k$  de CDU sur un ensemble de sites potentiels et à affecter les zones demande à un CDU choisi tout en déterminant la quantité des flux direct et inverses. Généralement les problèmes de localisation sont décrits dans la littérature comme un problème NP-difficile donc c'est très compliqué de le résoudre en temps polynomial (Cornuéjols, 1983) (Zabihi et al., 2017), (Alumur & Kara, 2008). Quelques travaux ont pu résoudre le problème en temps polynomial mais dès que le nombre de  $k$  augmente, la résolution en temps polynomial devienne difficile. Par exemple, Sohn et Park (1997) ont étudié le problème  $p$ -hub median problem ( $p = 2$ ) à allocation unique. Ils ont montré que ce problème peut être résolu en temps polynomial lorsque les emplacements des plateformes sont fixes. Ils ont fourni une formulation de programmation linéaire pour le problème d'allocation unique avec des emplacements de concentrateur fixes. Le problème d'emplacement de deux plateformes peut être résolu en temps polynomial. Dans une étude suivante, Sohn et Park (1998) ont présenté des méthodes pour trouver des solutions optimales aux problèmes d'allocation avec des plateformes fixes. Une autre étude réalisée par les mêmes auteurs (Sohn et Park, 2000) se concentre sur le problème de l'allocation unique sur un réseau à trois hubs avec des emplacements fixes. Ils ont fourni une formulation mixte. Bien que le problème d'allocation unique dans un système à deux hubs ait un algorithme de temps polynomial, les auteurs ont montré qu'il est NP-difficile dès que le nombre de hubs est de trois.

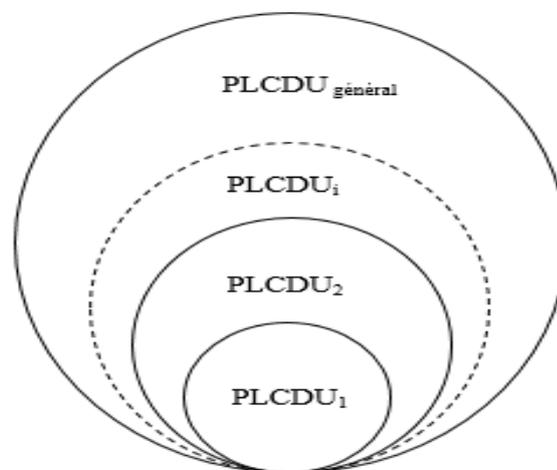


Figure III-3 : Problème de localisation des CDU

En se basant sur ces travaux, nous proposons de présenter le PLCDU proposé avec des déclinaisons en sous-ensembles. Ainsi, chaque sous-espace décrit un cas particulier noté  $PLCDU_i$  (voir Figure III-3). Par conséquent, l'augmentation de nombre de données complexifiera le problème ce qui engendre l'identification des problèmes dit faciles qui se résout en temps polynomial et un problème dit NP-difficile. Nous supposons donc l'augmentation de nombre de CDU à choisir affecte la complexité de notre modèle. Par exemple, nous avons vu dans le chapitre précédent, dans le cas  $k$  est égale à 1, le problème est devenu facile à résoudre. Ainsi,  $i$  correspond au type de problème plus précisément le nombre de CDU à ouvrir.

### **3.3 Les méthodes de résolution des problèmes de localisation**

Les méthodes d'optimisation peuvent être classées en trois catégories : algorithmes exactes, algorithmes heuristiques et algorithmes méta-heuristiques. Ces algorithmes ont connu une croissance spectaculaire ces dernières années avec différents types de HLP (Zabihi et al., 2017), (Farahani et al., 2013) et (Alumur & Kara, 2008). Dans ces travaux, ils ont fait un état de l'art des méthodes de résolution des problèmes HLP existants. Les méthodes exactes sont appliquées pour résoudre de petits problèmes de localisation, les instances plus grandes de PLCDU doivent être résolues par des heuristiques ou des méta-heuristiques. En plus, la plupart des articles dans ce domaine ont considéré des cas de localisation des plateformes sans capacité.

Parmi les méthodes exactes les plus utilisées pour résoudre le problème de localisation des installations sans capacité limité, il y a la méthode de séparation et évaluation dite Branch and Bound qui consiste à résoudre les problèmes linéaires en nombre entiers à base d'arbre de recherche qui contient toutes les solutions admissibles aux problèmes (Puerto et al., 2013), (Puerto et al., 2015) et (Zabihi et al., 2017). Mais aussi, il y a la méthode de décomposition de Benders qui consiste à résoudre des programmes linéaires à variables mixtes en décomposant le problème en sous-problèmes par la relaxation de certaines contraintes (de Camargo et al., 2013) et (O'Kelly et al., 2015). Enfin, plusieurs travaux utilisent un solveur pour la programmation en nombre entiers mixte mixtes (Zarandi et al., 2015) et (Shahabi et al., 2014).

Beaucoup de problème de localisation ne peuvent pas être résolus dans un délai raisonnable. Pour cette raison, des algorithmes heuristiques et méta-heuristiques sont appliqués dans de nombreuses études. Cependant, certaines études utilisent la combinaison des algorithmes évolutifs (EA) avec des opérateurs de recherche locale pour résoudre le problème dans un délai raisonnable. Par conséquent, Abdinnour-Helm et Venkataramanan (1998) ont suggéré un algorithme de Branch & Bound et un algorithme génétique (GA) pour résoudre le problème de localisation des hus sans capacité limité. Pour la même problématique, Aykin (1995) a proposé un algorithme Branch and Bound et un algorithme glouton basé sur un recuit simulé. De plus, une heuristique hybride, basée sur l'AG et la recherche taboue, a été présentée par Abdinnour-Helm (1998). Mais aussi, Topcuoglu et al. (2005) ont proposé une procédure basée sur GA et une heuristique recuit simulé SA (Chen, 2007). Par la suite, Cunha et Silva (2007) ont proposé une heuristique hybride où un GA est appliqué pour déterminer l'emplacement des hubs et un SA est utilisé pour réaffecter les points de demande. Filipovic', Kratica, Tošić' et Dugošija (2009) ont proposé une méthode heuristique inspirée de l'AG aussi. Ils ont également proposé une méthode d'énumération totale exacte pour résoudre la partie d'allocation du problème.

Abyazi-Sani & Ghanbari (2016) ont utilisé une recherche tabou efficace (TS) pour résoudre le problème de localisation de hubs à allocation unique. Pour réduire le temps de calcul, dans la recherche Tabou proposée, certaines nouvelles règles Tabou sont considérées. Rieck, et al., (2014) étudient un problème de localisation-tournée, où les installations de hubs doivent être localisées et les clients avec des demandes de collecte ou de livraison doivent être combinés. En outre, plusieurs processus de transport de marchandises et entre centres sont pris en compte. Donc, ils ont présenté un modèle linéaire en nombre entiers mixtes pour le problème. Ils ont utilisé le solveur CPLEX 12.4 pour résoudre des instances à petite échelle. En outre, une optimisation par un algorithme génétique est introduite pour construire efficacement des solutions pour les instances à moyenne et à grande échelle.

Par la suite nous allons présenter notre modèle mathématique ainsi que les méthodes utilisées pour le résoudre en s'inspirant des travaux décrits ci-dessus.

#### 4 Modèle mathématique

Notre modèle mathématique consiste à choisir les meilleurs emplacements des CDU tout en maximisant le profit de ces infrastructures. Le profit est exprimé comme la différence entre les revenus provenant de la logistique inverse et les différents coûts liés au transport ainsi qu'aux coûts socio-environnementaux.

Dans ce chapitre nous considérons les notations suivantes

$m \in N$	Indice des commerçants
$l \in L$	Indice de localisation potentiel d'un CDU
$r \in R$	Indice d'un centre de Remanufacturing.
$s \in S$	Indice d'un centre de déchetterie
$o \in Z$	Indice d'une zone
$t \in T$	Indice de la période
$D_{mot}$	Demande du commerçant $m$ appartenant à la zone $o$ pendant la période $t$
$DZ_{ot}$	= 1, si la zone $o$ a au moins une demande pendant la période $t$ , 0 sinon
$pvr_l$	Prix de revente d'un produit retourné d'un CDU $l$
$pvs_l$	Prix de revente d'une unité de déchet recyclable d'un CDU $l$
$fs_{ol}$	Frais de collecté payé par le client appartenant à la zone $o$ au CDU $l$
$YN_{mot}$	Quantité de produit retournés du commerçant $m$ appartenant à la zone $o$ pendant la période $t$ transporté à la plateforme $l$ .
$QN_{mot}$	Quantité de déchets recyclables provenant du commerçant $m$ appartenant à la zone $o$ pendant la période $t$ transporté à la plateforme $l$ .
$fl_l$	Coût opérationnel de CDU $l$
$Cpol_l$	Coût de pollution de CDU $l$
$Caccl$	Coût d'acceptabilité des résidents associé à la CDU $l$
$CL$	Coût unitaire de location de véhicule
$Cap$	Coût unitaire de pollution à la location du véhicule

$Ct$	Coût unitaire de transport des livraisons par kilomètre Transportation
$Cpl$	Cout de pollution par kilomètre
$\min dis_{ol}$	Distance minimale entre zone o et UDC l
$longz_o$	Longueur de la zone o
$Cacc_o$	Coût d'acceptabilité des résidents de la zone o lié à la congestion
$CapaN$	Capacité de véhicule en produits neuf
$CapaR$	Capacité de véhicule en produits retournés
$CapaS$	Capacité de véhicule en déchets recyclable

Les variables de notre modèle mathématiques sont :

$$AF_{olt} = \begin{cases} 1 & \text{si la zone o est affectée au CDU potentiel l pendant la période t} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Wf_{rlt} = \begin{cases} 1 & \text{si le centre de Remanufacturing r est affecté au CDU potentiel l pendant la période t} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Xf_{slt} = \begin{cases} 1 & \text{si le centre de déchetterie s est affecté au CDU potentiel l pendant la période t} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$YR_{rlt}$  : Quantité de produits retournés vendue au centre de Remanufacturing r depuis un CDU potentiel l pendant la période t

$QS_{rlt}$  : Quantité de déchets recyclables vendue au centre de déchetterie s depuis un CDU

$NbV_{lt}$  : Nombre de véhicules possédés par le CDU potentiel l

Fonction objective :

$$\max(\sum_l^L \sum_r^R \sum_t^T pvr_l YR_{rlt} Wf_{rlt} + \sum_l^L \sum_s^S \sum_t^T pvs_l QS_{slt} Xf_{slt} \quad (1)$$

$$+ \sum_l^L \sum_o^Z \sum_t^T \sum_m^N fs_{ol} AF_{olt} YN_{mot} \quad (2)$$

$$-(T \sum_l^L (fl_l + Cpol_l + Caccl) U_l + (CL + Cap) \sum_l^L \sum_t^T NbV_{lt} \quad (3)$$

$$+ (Ct + Cpl) \sum_l^L \sum_o^Z \sum_t^T (2 \min dis_{ol} + longz_o) AF_{olt} \quad (4)$$

$$+ \sum_l^L \sum_o^Z \sum_t^T Cacc_o AF_{olt} \quad (5)$$

Contraintes :

$$\sum_l^L U_l = k \quad (6)$$

$$\sum_l^L AF_{olt} = DZ_{ot} \quad \forall o \in Z, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_o^Z AF_{olt} \geq U_l \quad \forall o \in Z, \forall t \in T \quad (8)$$

$$AF_{olt} \leq U_l \quad \forall o \in Z, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_o^Z AF_{olt} \times \left( \sum_m^N D_{mot} \right) \leq NBV_{lt} \times CapaN \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_o^Z AF_{olt} \times \left( \sum_m^N YN_{mot} \right) \leq NBV_{lt} \times CapaR \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_o^Z AF_{olt} \times \left( \sum_m^N QN_{mot} \right) \leq NBV_{lt} \times CapaS \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_m^N \sum_o^Z \sum_t^T YN_{mot} = \sum_r^R \sum_l^L \sum_t^T Wf_{rlt} \times YR_{rlt} \quad (13)$$

$$\sum_m^N \sum_o^Z \sum_t^T QN_{mot} = \sum_s^S \sum_l^L \sum_t^T Xf_{slt} \times QS_{slt} \quad (14)$$

$$Wf_{rlt} \leq U_l \quad \forall r \in R, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (15)$$

$$Xf_{slt} \leq U_l \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (16)$$

$$\sum_l^L Wf_{rlt} \geq 1 \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (17)$$

$$\sum_r^R Wf_{rlt} \geq U_l \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (18)$$

$$\sum_l^L Xf_{slt} \geq 1 \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (19)$$

$$\sum_s^S Xf_{slt} \geq U_l \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (20)$$

$$YR_{rlt} \geq 0, QS_{rlt} \geq 0, NbV_{lt} \geq 0 \quad (21)$$

$$\forall r \in R, \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T$$

$$U_l, AF_{olt}, Wf_{rlt}, Xf_{slt} \in \{0, 1\} \quad (22)$$

$$\forall r \in R, \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T, \forall o \in Z$$

Notre modèle mathématique a des variables binaires et entières avec des termes non linéaires appelés programme non linéaire en nombre entiers. Ces termes apparaissent dans la fonction objective et dans les contraintes créant des problèmes de convexité ce qui donne un modèle non linéaire. Ces termes sont présentés par un produit de deux variables binaires et entières.

$$LN1_{rlt} = Wf_{rlt} \times YR_{rlt}$$

$$LN2_{slt} = Xf_{slt} \times QS_{slt}$$

La programmation linéaire et la programmation en nombre entiers mixtes sont les modèles les plus couramment utilisés par les chercheurs dans les problèmes de localisation de CDU (Guyon et al., 2012), (Agrebi et al., 2015), (Sopha et al., 2016). Il existe aussi un modèle mathématique a été développé par Taniguchi et al., (1999) en utilisant la programmation non linéaire qui vise à identifier la taille et l'emplacement optimaux des terminaux logistiques.

#### 4.1 Linéarisation des termes non linéaires

Nous présentons la première reformulation de notre problème non linéaire dans une programmation linéaire particulière. Ensuite, nous résolvons ce nouveau modèle en utilisant le Solveur Xpress FICO 8.0.

##### 4.1.1 Reformulation de notre modèle mathématique

Les problèmes non linéaires sont généralement difficiles à résoudre. En effet, nous allons reformuler ce PNL pour les transformer en un programme linéaire entier (PL) en ajoutant des variables et des contraintes valides.

Nous effectuons une reformulation de ces termes non linéaires en utilisant des techniques de linéarisation. Tous ces termes de notre modèle sont un produit entre variables binaires et entières et elles apparaissent dans la fonction objective et les contraintes. De plus, les variables entières sont bornées.

Nous trouvons dans les équations suivantes ces termes :

Fonction objective :

$$\sum_{l}^L \sum_{r}^R \sum_{t}^T pvr_l \times YR_{rlt} \times Wf_{rlt} + \sum_{l}^L \sum_{s}^S \sum_{t}^T pvs_l \times QS_{slt} \times Xf_{slt} \quad (1)$$

Contraintes :

$$\sum_{m}^N \sum_{o}^Z \sum_{t}^T YN_{mot} = \sum_{r}^R \sum_{l}^L \sum_{t}^T Wf_{rlt} \times YR_{rlt} \quad (13)$$

$$\sum_{m}^N \sum_{o}^Z \sum_{t}^T QN_{mot} = \sum_{s}^S \sum_{l}^L \sum_{t}^T Xf_{slt} \times QS_{slt} \quad (14)$$

Les termes non linéaires dans notre modèle contiennent des variables binaires  $Wf_{rlt}$  et  $Xf_{slt}$   $YR_{rlt}$  e  $QS_{slt}$  sont des entiers bornés :

$$0 \leq YR_{rlt} \leq \left( \sum_{m}^N \sum_{o}^Z YN_{mot} \right) / R \quad (37)$$

$$0 \leq QS_{slt} \leq \left( \sum_{m}^N \sum_{o}^Z QN_{mot} \right) / S \quad (38)$$

Ensuite, nous ajoutons deux nouvelles variables à notre fonction objective appelée  $LN1_{rlt}$  et  $LN2_{slt}$  qui vont remplacer ces termes dans notre modèle mathématique :

$$LN1_{rlt} = Wf_{rlt} \times YR_{rlt}$$

$$LN2_{slt} = Xf_{slt} \times QS_{slt}$$

D'autres contraintes sont ajoutées pour valider ces nouvelles variables. Pour le premier terme :

$$LN1_{rlt} \leq \left( \sum_m^N \sum_o^Z YN_{mot} \right) / R \times Wf_{rlt} \quad (39)$$

$$LN1_{rlt} \geq 0 \quad (40)$$

$$LN1_{rlt} \leq YR_{rlt} \quad (41)$$

Pour le second terme :

$$LN2_{rlt} \leq \left( \sum_m^N \sum_o^Z QN_{mot} \right) / S \times Xf_{slt} \quad (42)$$

$$LN2_{slt} \geq 0 \quad (43)$$

$$LN2_{slt} \leq QS_{slt} \quad (44)$$

Donc notre modèle mathématique devient comme suit :

Fonction objective :

$$\max \left( \sum_l^L \sum_r^R \sum_t^T pvr_l LN1_{rlt} + \sum_l^L \sum_s^S \sum_t^T pvs_l LN2_{slt} \right) \quad (45)$$

$$+ \sum_l^L \sum_o^Z \sum_t^T \sum_m^N fs_{olt} AF_{olt} YN_{mot} \quad (2)$$

$$- (T \sum_l^L (fl_l + Cpol_l + Caccl) U_l + (CL + Cap) \sum_l^L \sum_t^T NbV_{lt}) \quad (3)$$

$$+ (Ct + Cpl) \sum_l^L \sum_o^Z \sum_t^T (2 \min dis_{ol} + longz_o) AF_{olt} \quad (4)$$

$$+ \sum_l^L \sum_o^Z \sum_t^T Cacc_o AF_{olt} \quad (5)$$

Contraintes :

$$\sum_l^L U_l = k \quad (6)$$

$$\sum_l^L AF_{olt} = DZ_{ot} \quad \forall o \in Z, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_o^Z AF_{olt} \geq U_l \quad \forall o \in Z, \forall t \in T \quad (8)$$

$$AF_{olt} \leq U_l \quad \forall o \in Z, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_o^Z AF_{olt} \times \left( \sum_m^N D_{mot} \right) \leq NBV_{lt} \times CapaN \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_o^Z AF_{olt} \times \left( \sum_m^N YN_{mot} \right) \leq NBV_{lt} \times CapaR \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_o^Z AF_{olt} \times \left( \sum_m^N QN_{mot} \right) \leq NBV_{lt} \times CapaS \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_m^N \sum_o^Z \sum_t^T YN_{mot} = \sum_r^R \sum_l^L \sum_t^T LN1_{rlt} \quad (46)$$

$$\sum_m^N \sum_o^Z \sum_t^T QN_{mot} = \sum_s^S \sum_l^L \sum_t^T LN2_{slt} \quad (47)$$

$$Wf_{rlt} \leq U_l \quad \forall r \in R, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (15)$$

$$Xf_{slt} \leq U_l \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (16)$$

$$\sum_l^L Wf_{rlt} \geq 1 \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (17)$$

$$\sum_r^R Wf_{rlt} \geq U_l \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (18)$$

$$\sum_l^L Xf_{slt} \geq 1 \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (19)$$

$$\sum_s^S Xf_{slt} \geq U_l \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (20)$$

$$YR_{rlt} \geq 0, QS_{rlt} \geq 0, NbV_{lt} \geq 0, \forall r \in R, \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (21)$$

$$U_l, AF_{olt}, Wf_{rlt}, Xf_{slt} \in \{0, 1\}, \forall r \in R, \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T, \forall o \in Z \quad (22)$$

$$LN1_{rlt} \leq \left( \sum_m^N \sum_o^Z YN_{mot} \right) / R \times Wf_{rlt} \quad (39)$$

$$LN1_{rlt} \geq 0 \quad (40)$$

$$LN1_{rlt} \leq YR_{rlt} \quad (41)$$

$$LN2_{rlt} \leq \left( \sum_m^N \sum_o^Z QN_{mot} \right) / S \times Xf_{slt} \quad (42)$$

$$LN2_{slt} \geq 0 \quad (43)$$

$$LN2_{slt} \leq QS_{slt} \quad (44)$$

## 4.2 Exemple numérique

Les problèmes d'optimisation combinatoire sont dans la plupart des cas NP-complets. Ils sont connus par une complexité exponentielle ou factorielle. Pour cette raison, il est difficile d'énumérer toutes les solutions entières possibles et de donner la solution optimale. Beaucoup de méthodes ont été proposées pour résoudre ce type de problème. Il y a les méthodes exactes si le temps de résolution est trop long. Les heuristiques pour chercher rapidement une solution que nous ne pouvons pas savoir si elle optimale.

L'objectif de cette section est de montrer la viabilité économique de notre approche en intégrant les flux inverses dans les problèmes d'implantation des CDU à travers des simulations numériques. Ces résultats vont être obtenus en utilisant une méthode exacte (Branch & Bound) et une méta-heuristique (algorithme génétique).

### 4.2.1 Résolution par l'algorithme Branch & Bound

Le problème à traiter est un problème linéaire en nombre entier. Dans ce cas, l'algorithme de résolution est l'algorithme utilisé est le Branch & Bound.

La méthode de Branch & Bound nommée aussi la méthode de séparation et évaluation mais aussi la méthode arborescente est une méthode exacte d'optimisation. Cette méthode permet d'énumérer toutes les solutions possibles. Elle regroupe l'espace de solutions en sous-ensembles où certains d'entre eux seront éliminés par des calculs de bornes. Elle énumère toutes les solutions réalisables, certaines de manière explicite (des nœuds) et d'autres implicitement d'où le nom de l'algorithme à énumération implicite.

Cet algorithme comporte trois composantes : une règle de séparation (de partitionnement des solutions), une fonction d'évaluation (par rapport aux bornes) et une stratégie d'exploration. Le processus d'exploration consiste à construire une arborescente où toutes les solutions réalisables du problème sont représentées. Cette arborescente contient une racine et des sous-ensembles obtenus successivement par séparation (voir Figure III-4).

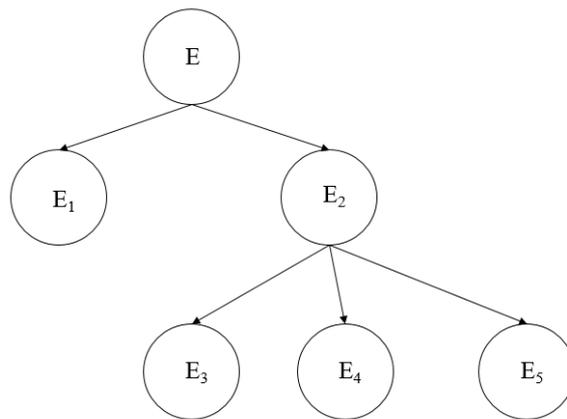


Figure III-4 : Arborescence des solutions obtenue par la méthode Branch et Bound

Cet algorithme a fait ses preuves par le passé et cité dans plusieurs travaux de recherche appliquée. En effet, la résolution des problèmes de localisation des centres de distribution ou des entrepôts « Hub location problem » ou « Facility location problem » a commencé au début

du 20ème siècle en utilisant la méthode du centre de Barycentre simple. Cependant, les problèmes actuels se sont orientés vers l'optimisation de l'ensemble de réseau de distribution pour déterminer la meilleure solution de l'emplacement tout en maximisant le profit en minimisant le coût mais aussi en répondant à la demande. Škrinjar et al (2012) et Freire et al (2016) ont vanté les avantages de la méthode Branch and Bound pour résoudre les problèmes de localisation des hubs. En effet, cet algorithme a été bien utilisé pour les problèmes de localisation des plateformes dits « Hub location problem » ou « Hub and spoke network » Aykin (1994). Dans ce papier, l'auteur a réussi à appliquer cette méthode dans le transport aérien. Il a trouvé la meilleure borne inférieure en utilisant la relaxation dans le cas où les hubs potentiels sont connus en avance.

Ici, le système choisi doit répondre à une demande aléatoire et des retours aléatoires pour 100 clients par zone. Nous considérons 4 zones dans la ville. Le nombre T de périodes est égal à 900 périodes (3 ans). Nous supposons que chaque véhicule possède une capacité de produits à ne pas dépasser.

En ce qui concerne les autres flux, c'est-à-dire les produits retournés et les déchets recyclables, les véhicules sont illimités. Enfin, nous cherchons à trouver les trois meilleurs emplacements parmi cinq possibilités en tenant compte de trois aspects de la durabilité : l'économie, l'environnement et la société.

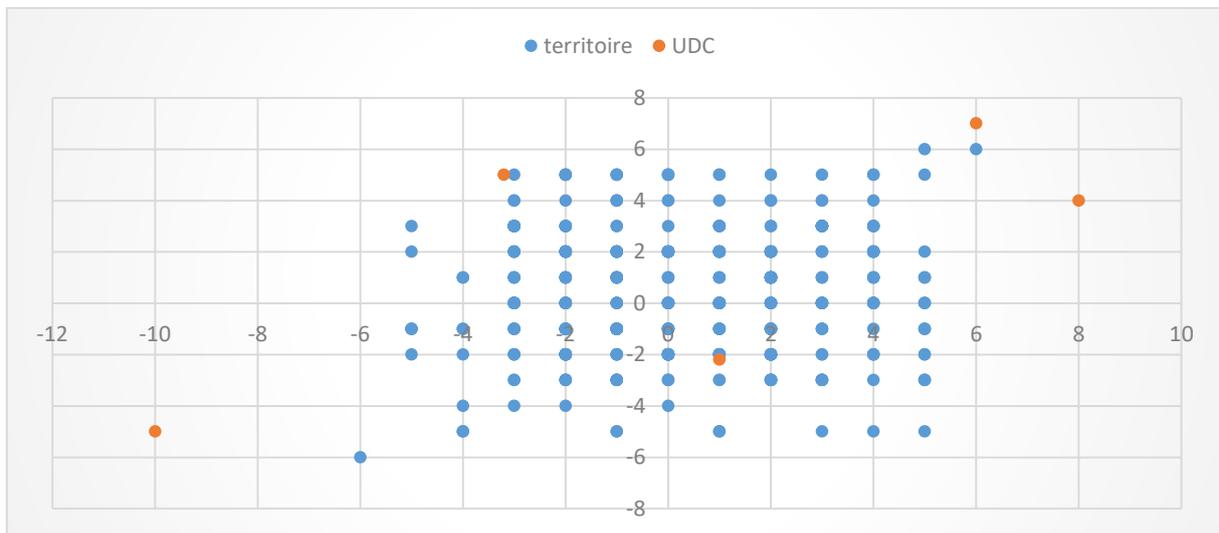


Figure III-5 : Le territoire étudié

Nous définissons les paramètres utilisés dans notre programme FICO Xpress comme suit :

- Coût du transport = 0.3 um/km (um : unité monétaire)
- Coût de location d'un véhicule = 10 um/km
- Capacité d'un véhicule en produits =100 produits
- Coût des émissions de pollution lié à chaque kilomètre parcourues pour transporter les livraisons = 0.01um/km

- Coût des émissions de pollution lié à chaque location de véhicule =1 um
- Prix de revente des déchets recyclable = 2um/produit

Pour notre cas, nous considérons cinq sites comme des sites potentiels pour localiser des plateformes logistiques, quatre centres de remanufacturing et deux centres de tri des déchets. Chaque UDC potentiel a des caractéristiques différentes (voir Tableau III-1). Cette différence est généralement due à l'emplacement. Les caractéristiques sont le prix de vente des retours, le coût fixe, les impacts sur l'environnement et sur la société.

Tableau III-1 : Évaluation quantitative des CDU (caractéristiques/site)

	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5
<b>Prix de revente des retours (um /produit)</b>	10	5	10	5	10
<b>Coût fixe (um)</b>	133340	200000	166600	133340	100000
<b>Coût des émissions de pollution (um /période)</b>	6	1	10	5	2.5
<b>Coût d'acceptabilité (um/période)</b>	5	0.1	0.2	0.2	3.5

Par la suite, nous avons programmé notre modèle mathématique sur le solveur FICO Xpress version 8.0 pour la programmation linéaire en nombres entiers en injectant les paramètres mentionnés ci-dessus. Le solveur a utilisé la méthode Branch and Bound.

Pour ce faire, nous faisons évoluer le nombre de période avant de simuler le programme avec T égale à 900 périodes (3 ans). Nous avons remarqué qu'au-delà de 150 périodes, la méthode de Branch & Bound ne peut plus donner un résultat optimal. Pour cette raison, nous avons décidé d'attendre la simulation afin de recevoir un résultat avec un gap intéressant pour T égale à 900 périodes.

Donc, après un temps d'exécution égal à 67091 secondes, nous avons stoppé la simulation avec un gap de 3,59% car le solveur a passé un temps significatif de 7200 secondes sans que la solution ne soit améliorée. En effet, le solveur a trouvé 79 solutions entières réalisables grâce à cette méthode. Ainsi, la meilleure solution trouvée (voir tableau 2) dans un temps d'exécution égale à 67091 secondes et un gap de 3.59% est égale à égal à 35548 um. Le gap est défini comme la différence en pourcentage entre la meilleure solution choisie et la meilleure borne :

$$\text{Le pourcentage du gap} = 100 \times \left( \frac{\text{meilleure solution} - \text{meilleure borne}}{\text{meilleure borne}} \right)$$

La valeur du profit nous permet de montrer la viabilité économique de cette nouvelle approche. Ainsi, nous remarquons que notre proposition permet non seulement de couvrir les coûts opérationnels mais aussi de dégager un profit. En effet, l'intégration des flux inverses comme source de revenu dégage des avantages socio-environnementaux :

- L'environnement : la mutualisation des flux directs et inverses, la diminution du nombre de véhicules mobilisés pour les tournées et l'utilisation de véhicules moins polluantes.

- La société : la minimisation du nombre d'accidents par la réduction du nombre de véhicules en circulation consacrés à la distribution et la collecte simultanées.
- L'économie : un gain financier par la valorisation économique des flux de retours en le considérant comme source de revenu.

Par la suite, nous évaluons l'impact de la variation de  $k$  sur la qualité des résultats. Donc, nous simulons le programme pour chaque  $k$  allant de 1 à 3 sans changer les valeurs des autres paramètres (voir Tableau III-2). Nous constatons que si  $k = 1$ , nous pouvons garantir la solution optimale. Au-delà de cette valeur l'optimalité devient difficile à obtenir avec un délai raisonnable. Nous avons remarqué aussi que le CDU choisie avec  $k = 1$  reste valable pour  $k = 2$  et 3. De même, pour  $k = 2$ , les deux CDU sont choisies avec  $k = 3$ . Ainsi, nous pouvons constater le bon comportement de notre programme. En effet, notre modèle mathématique permet de classer les UDC. Pour cet exemple, le meilleur CDU est le cinquième site potentiel.

Tableau III-2 : Impact de la variation de  $k$  sur les résultats

<b>k</b>	<b>UDC choisies</b>	<b>Profits</b>	<b>Gap</b>
1	[0 0 0 0 1]	61524.9	0% (optimale)
2	[0 1 0 0 1]	49601.7	3,59%
3	[0 1 1 0 1]	35548.08	3,59%

Toutefois, du point de vue de la performance de la méthode utilisée pour résoudre le modèle mathématique proposé, le temps d'exécution est égal à 67091 secondes ce qui équivaut à environ 19 heures. De ce fait, si nous souhaitons une nouvelle configuration (changer des paramètres d'entrée ou ajouter d'autres critères), nous allons passer à chaque fois 19 heures à attendre la solution. Par conséquent, nous pensons que cet inconvénient pourra générer de la réticence de la part des décideurs qui préfèrent généralement avoir une solution plus rapide, notamment pour permettre un usage de l'outil pour la conduite opérationnelle quotidienne du système de décision. Pour ce faire, nous proposons des améliorations basées sur des heuristiques appropriées (voir section 2.2.2).

Tableau III-3 : Résultat final

<b>Solution</b>	<b>Best Bound</b>	<b>Gap</b>	<b>Temps d'exécution</b>
35548.08	36833.72	3.59%	67091 secondes

Les variables du modèle sont nombreuses, représentant un total de 76505 éléments (liés aux paramètres initiaux : 900 périodes, 5 emplacements, 4 centres de remanufacturing, 2 centres de tri des déchets, 100 clients / zone (voir Tableau III-4). Ainsi, dans ce tableau, nous présentons le nombre d'éléments associés à chaque variable considérée dans notre programme comme la décision de la localisation de chaque possibilité, l'affectation des zones urbaines aux CDU pour chaque période, le nombre de véhicules à louer pour chaque période, l'affectation des déchetteries aux CDU pour chaque période, la quantité de déchets à vendre pour chaque période, l'affectation des centres de remanufacturing au CDU pour chaque période et enfin la quantité des retours à revendre pour chaque période.

Tableau III-4 : Nombre de variables dans l'exemple numérique

	Variables						
	Décision sur la localisation	Affectation des zones	Nombre de véhicules	Affectation des déchetteries	Quantité de déchets	Affectation des centres de remanufacturing	Quantité des retours
Nature	Binaire	Binaire	Entier	Binaire	Entier	Binaire	Entier
Nombre d'élément	5	1800	4500	9000	9000	18000	18000
Nombre d'éléments total	76505						

Ainsi, nous nous sommes limités dans le Tableau III-5 à présenter la décision prise pour chaque CDU potentiel, le nombre minimal et maximal du nombre de véhicules, la quantité de déchets vendue et la quantité de retours par période obtenue pendant l'horizon d'étude qui est égal à 900 périodes.

Selon le Tableau III-5, les CDU 2, 3 et 5 ont été choisis comme les meilleurs qui permettent de dégager le meilleur profit le plus important. Les CDU 2 et 3 représentent les sites qui n'ont pas le coût opérationnel le moins élevé ce qui montre que ce coût n'est pas le seul critère de décision et que notre modèle tient compte de tous les critères injectés dans le modèle (coût de reventes des flux inverses, distance entre CDU et zones, coût environnemental et sociétal). Ainsi l'idée de louer des véhicules plutôt que de les acheter sera bénéfique car nous aurons besoin au maximum de deux véhicules et au minimum d'un seul. En effet, dans le cas d'un achat des deux véhicules, un sera sans activité et engendrera ainsi des charges fixes à payer et pourtant inutiles pour la performance du système.

Tableau III-5. Les résultats des variables de notre modèle mathématique

Indice CDU potentiel	Décision sur la localisation	Nombre de véhicule par période		Quantité de déchet par période		Quantité de retours par période	
		min	max	min	max	min	max
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	2	0	46	0	7
3	1	1	2	0	55	0	14
4	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	2	0	68	0	15

Cette méthode nous a permis de trouver une bonne solution avec un gap intéressant mais le temps d'exécution reste long. Pour cette raison, nous allons utiliser dans une heuristique qui résout notre modèle mathématique en assurant un bon compromis entre la qualité de la solution et son temps d'exécution : il s'agit de de l'algorithme génétique.

Afin d'évaluer les impacts de l'aléatoire sur les résultats du modèle, nous avons généré des demandes aléatoires 10 fois et nous avons observé une grande stabilité en ce qui concerne les valeurs du profit, comme indiqué dans le tableau suivant. Nous pouvons remarquer que la différence des résultats obtenus par rapport à la moyenne ne dépasse pas 1.73%, ce qui représente un pourcentage non significatif.

Tableau III-6 : Les résultats des 10 simulations de profits

N° de la génération	Meilleure solution entière	Différence par rapport à la moyenne en %	Gap
1	35142,81252	0,964749	1,4%
2	34873,38187	1,724026	1,6%
3	34678,33289	2,27369	3,08%
4	35524,64101	0,111274	1,45%
5	35411,89362	0,206457	2,37%
6	35719,57852	0,660624	3,31%
7	36039,63451	1,562567	2,7%
8	35522,83056	0,106172	3,6%
9	35916,81257	1,216445	3,25%
10	36021,63351	1,511839	3,26%
<b>Moyenne</b>		35485,15516	

#### 4.2.2 Résolution par l'algorithme génétique

L'objectif principal des algorithmes génétiques est de trouver une solution approchée à un problème d'optimisation où c'est difficile de résoudre par une méthode exacte avec un temps raisonnable. Cette méthode a été introduite par Holland dans les années 70 pour imiter les phénomènes des êtres humains. Avec Goldberg, l'algorithme génétique a été adopté dans les problèmes d'optimisation (Vallée et al., 2004).

L'algorithme commence par une population de solutions initiales trouvées aléatoirement, chaque solution contient une chaîne de gènes nommés chromosomes. Les étapes principales de l'algorithme génétique sont les suivantes :

1. Population initiale : un ensemble de solutions initiales est sélectionné de manière aléatoire pour former la population initiale.
2. Sélection : la population existante est choisie pour élever une nouvelle génération. Les solutions individuelles sont sélectionnées par une fonction objective.
3. Création de nouveaux individus : Croisement et mutation sont des opérateurs génétiques pour créer de nouveaux individus.
4. Choix de remplacement : Insertion de nouveaux individus dans la population.
5. Terminaison : Ces étapes sont répétées jusqu'à ce qu'une condition de terminaison soit atteinte.

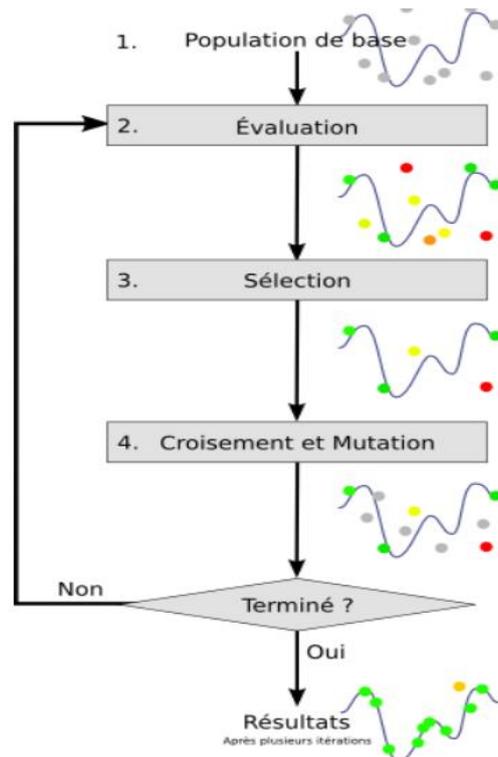


Figure III-6 : Structure générale d'un algorithme génétique<sup>13</sup>

Concernant les problèmes de localisation, beaucoup de travaux ont prouvé l'efficacité de l'algorithme génétique pour les résoudre (Topcuoglu, 2005), (Filipović, 2009) et (Lin, 2012). Parmi les travaux appliqués dans les CDU ayant utilisé l'algorithme génétique, il y a les travaux de Fei et al (2007) qui consiste à trouver le nombre optimal de CDU qui minimise le coût du transport par le coût de l'investissement, le coût fixe et le coût variable.

Afin de minimiser la taille des données, nous avons supprimé le facteur temps et multiplié chaque terme par T. Notre modèle mathématique devient :

Fonction objective :

$$\max(T \sum_l^L \sum_r^R pvr_l YR_{rl} Wf_{rl} + T \sum_l^L \sum_s^S pvs_l QS_{sl} Xf_{sl}) \quad (1)$$

$$+ T \sum_l^L \sum_o^Z \sum_m^N fs_{ol} AF_{ol} YN_{mo}) \quad (2)$$

$$- T (\sum_l^L (f_l + Cpol_l + Caccl) U_l + (CL + Cap) \sum_l^L NbV_l) \quad (3)$$

$$+ (Ct + Cpl) \sum_l^L \sum_o^Z (2 \min dis_{ol} + longz_o) AF_{ol} \quad (4)$$

$$+ \sum_l^L \sum_o^Z Cacc_o AF_{ol}) \quad (5)$$

<sup>13</sup> Source Wikipédia : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme\\_g%C3%A9n%C3%A9tique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_g%C3%A9n%C3%A9tique)

Contraintes :

$$\sum_l^L U_l = k \quad (6)$$

$$\sum_l^L AF_{ol} = DZ_o \quad \forall o \in Z \quad (7)$$

$$\sum_o^Z AF_{ol} \geq U_l \quad \forall o \in Z \quad (8)$$

$$AF_{ol} \leq U_l \quad \forall o \in Z, \forall l \in L \quad (9)$$

$$\sum_o^Z AF_{ol} \times \left( \sum_m^N D_{mo} \right) \leq NBV_l \times CapaN \quad \forall l \in L \quad (10)$$

$$\sum_o^Z AF_{ol} \times \left( \sum_m^N YN_{mo} \right) \leq NBV_l \times CapaR \quad \forall l \in L \quad (11)$$

$$\sum_o^Z AF_{ol} \times \left( \sum_m^N QN_{mo} \right) \leq NBV_l \times CapaS \quad \forall l \in L \quad (12)$$

$$\sum_m^N \sum_o^Z YN_{mo} = \sum_r^R \sum_l^L Wf_{rl} \times YR_{rl} \quad (13)$$

$$\sum_m^N \sum_o^Z QN_{mo} = \sum_s^S \sum_l^L Xf_{sl} \times QS_{sl} \quad (14)$$

$$Wf_{rl} \leq U_l \quad \forall r \in R, \forall l \in L \quad (15)$$

$$Xf_{sl} \leq U_l \quad \forall s \in S, \forall l \in L \quad (16)$$

$$\sum_l^L Wf_{rl} \geq 1 \quad \forall r \in R \quad (17)$$

$$\sum_r^R Wf_{rl} \geq U_l \quad \forall l \in L \quad (18)$$

$$\sum_l^L Xf_{sl} \geq 1 \quad \forall s \in S \quad (19)$$

$$\sum_s^S Xf_{sl} \geq U_l \quad \forall l \in L \quad (20)$$

$$YR_{rl} \geq 0, QS_{rl} \geq 0, NbV_l \geq 0 \quad (21)$$

$$\forall r \in R, \forall s \in S, \forall l \in L$$

$$U_l, AF_{ol}, Wf_{rl}, Xf_{sl} \in \{0,1\} \quad (22)$$

$$\forall r \in R, \forall s \in S, \forall l \in L, \forall o \in Z$$

#### 4.2.2.1 Création de l'individu

La première étape de l'algorithme génétique est de créer l'individu. Chaque individu est composé d'un chromosome (voir Figure III-7) qui représente le point initial pour la recherche où il est généré aléatoirement.

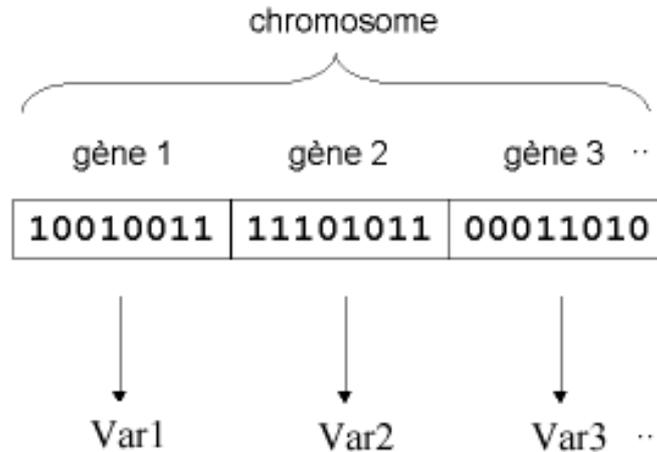


Figure III-7 : Présentation d'un chromosome

Dans notre étude, le chromosome contient sept gènes (voir Tableau III-7). Ces gènes contiennent la valeur de la localisation de chaque CDU potentiel, l'affectation des zones aux CDU, l'affectation des Remanufacturing aux zones, les quantités des retours et le nombre de véhicules. Ces gènes sont de type tableau.

Tableau III-7 : Le chromosome étudié

Affectation des CDU	Affectation des zones	Affectation des centres de Rem	Affectation des centres de Déchetterie	Quantité de produits retournés	Quantité des déchets retournés	Nombre de véhicule
---------------------	-----------------------	--------------------------------	--	--------------------------------	--------------------------------	--------------------

#### 4.2.2.2 Génération de la population initiale

Dans cette deuxième étape, il faut générer une population d'individus de façon itérative où nous allons appliquer les processus de sélection, de croisement et de mutation. De plus, la création des individus de cette population est entièrement aléatoire. Ils ont juste la forme d'une solution potentielle. Par la suite, nous décrivons la fonction dite fitness ou évaluation pour évaluer les individus, supprimer les individus en double et les remplacer. Dans notre programme, nous avons généré une population de 60 individus.

#### 4.2.2.3 Évaluation

La performance de chaque individu va être évaluée à travers la fonction objective. Les valeurs vont être classées et le chromosome qui a la meilleure valeur de la fonction de fitness aura une probabilité très forte d'être retenue quant au chromosome qui a une mauvaise valeur, il aura une probabilité forte d'être éliminé par l'étape suivante « Stratégie de sélection ».

#### 4.2.2.4 Stratégie de sélection

La stratégie de sélection consiste à sélectionner certains individus afin de créer une nouvelle génération. Si  $n$  est le nombre d'individus donc nous devons sélectionner  $n/2$  individus. Cette stratégie permet aux individus de survivre, de se reproduire ou d'être éliminés. Aussi, elle permet de choisir les meilleurs gènes qui vont servir de parents pour l'étape suivante qui est l'étape de croisement des gènes des parents. En effet, nous avons sélectionné 30 meilleurs individus pour servir pendant l'étape de croisement et de mutation.

#### 4.2.2.5 Croisement

La production de nouveaux individus appelée « fils » se déroule lors de l'étape de croisement. Donc, à partir de deux individus dits parents, deux fils vont être formés (voir Figure III-8). Cette production au travers ces deux individus (parents) se fait avec une probabilité  $P_{\text{cross}}$ . En effet, les deux fils vont échanger les gènes des parents donc ils auront des propriétés combinées. Par conséquent, cette étape garantit la diversification des individus de la population.

A partir  $n/2$  individus sélectionnés pendant l'étape précédente, il y aura  $n/4$  couples avec une reproduction pour avoir des descendants qui vont copier et recombinaison les gènes des parents. Ainsi, chaque couple ou parent va subir une opération de croisement définie par des points de croisement choisis de manière aléatoire (probabilité  $P_{\text{cross}}$ ). Ainsi, plus il y a des points de croisement, plus il y aura d'échanges de segments et donc d'échanges de paramètre pour plus de diversité.

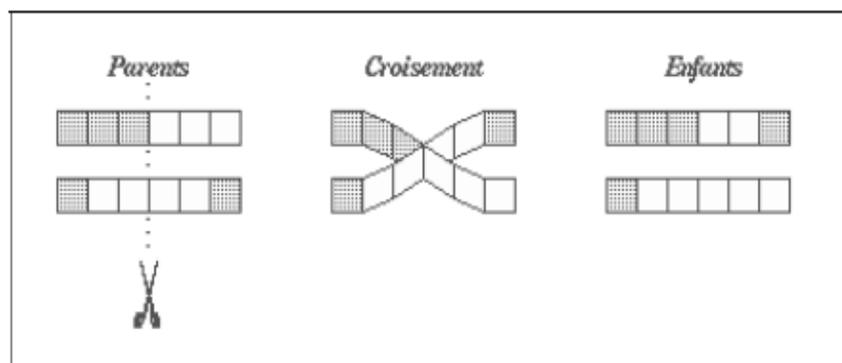


Figure III-8 : Le concept du Croisement<sup>14</sup>

La particularité de notre modèle c'est que les différents gènes dépendent du premier gène qui est la décision de la localisation potentielle des sites. Pour cette raison nous exigeons dans le programme que le croisement et la mutation se fassent entre les chromosomes qui ont le même premier gène.

<sup>14</sup> Source Wikipédia : <http://informatique.coursgratuits.net/methodes-numeriques/algorithmes-genetiques.php>

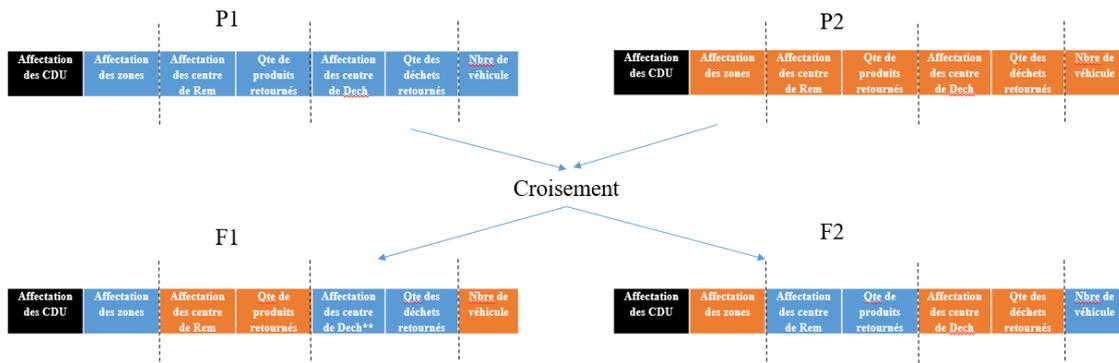


Figure III-9 : Croisement d'un couple de parent

#### 4.2.2.6 Mutation

Cette étape aussi permet d'explorer efficacement l'espace de recherche donc plus de diversification. En outre, il permet de rajouter des sous-espaces de solution réalisables ce qui permet d'assurer une recherche de solution aussi globale que locale et de s'approcher de l'optimum global. Dans notre étude, notre individu a une probabilité ( $P_{mut}$ ) faible, égale à 5% concernant un seul gène qui est le nombre de véhicule.

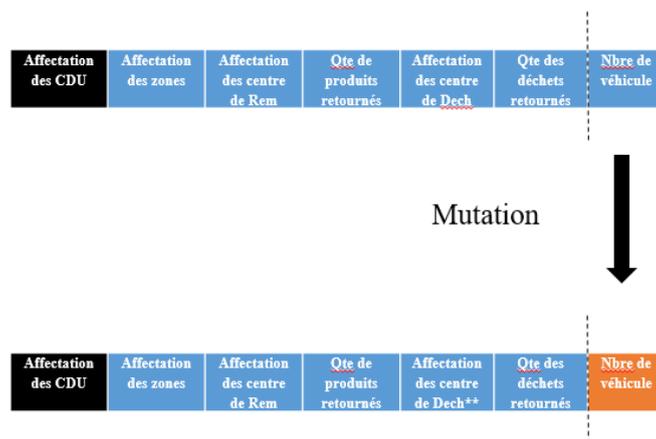


Figure III-10 : Représentation schématique d'une mutation dans un individu

#### 4.2.2.7 Résultats

Dans notre algorithme génétique, nous avons fixé la taille de population initiale égale à 60 individus, quant à la probabilité de croisement dite  $P_{cross}$  elle est égale à 95%. De plus, la probabilité de mutation  $P_{mut}$  est égale à 5% et le nombre de générations (Maxgeneration) est égal à 100 générations.

Voilà la Structure générale de l'algorithme génétique utilisé :

---

```

Size=60; Maxgeneration=100;
Popini=popgeneration(taille); Eoptimal;
For gen=1 to Maxgeneration do
    Popgen=Popgen-1;

```

---

---

$E_{parent} \rightarrow E\_best\_sol(Pop_{gen}, size/2) ;$   
 $E_{cross} \rightarrow Crossover(E_{parent}, P_{mut}) ;$   
 $E_{mut} \rightarrow mutation(E_{parent}, P_{mut}) ;$   
 $Best_{sol} \rightarrow E_{bestsol}(E_{parent} \cup E_{cross} \cup E_{mut}) ;$   
 $E_{optimal} \rightarrow E_{optimal} \cup Bestsol$   
 $Pop_{gen} = E\_best\_sol(E_{parent} \cup E_{cross} \cup E_{mut} \cup E_{optimal}, size/2)$

End ;

---

La meilleure solution obtenue est définie dans le Tableau III-8. Nous calculons alors le gap entre la solution obtenue par l’algorithme génétique et le Branch & Bound (meilleure solution et le best bound).

Tableau III-8 : Résultat de l’algorithme génétique

		Indice UDC				
		1	2	3	4	5
<b>Décision sur la localisation</b>		0	1	1	0	1
<b>Affectation des zones Aux UDC</b>	<b>zone1</b>	0	1	0	0	0
	<b>zone2</b>	0	0	1	0	0
	<b>zone3</b>	0	0	0	0	1
	<b>zone4</b>	0	0	1	0	0
<b>Affectation des centres remanufacturing Aux UDC</b>	<b>Remanufacturing1</b>	0	1	1	0	1
	<b>Remanufacturing2</b>	0	1	1	0	1
	<b>Remanufacturing3</b>	0	1	1	0	1
	<b>Remanufacturing4</b>	0	1	1	0	0
<b>Affectation des déchetteries Aux UDC</b>	<b>Dechetterie1</b>	0	1	0	0	1
	<b>Dechetterie2</b>	0	1	1	0	1
<b>Nombre de véhicules</b>		0	4	5	0	4
<b>Profit (um)</b>		29787,784				
<b>Temps de calcul (secondes)</b>		13,102				

Le gap entre solution obtenue à 100 générations via algorithme génétique et Branch & Bound  
 $= \left( \frac{35548,08 - 29787,784}{35548,08} \right) \times 100 = 16,20\%$

Gap entre solution obtenue à 100 générations et le best Bound de l’algorithme Branch & Bound  
 $= \left( \frac{36833,72 - 29784,784}{36833,72} \right) \times 100 = 19,14\%$

Nous pouvons constater à travers ce gap que la différence est assez importante en termes de résultats. Néanmoins, le programme dégage un profit, ce qui montre pour la deuxième fois la viabilité économique de l'approche proposée à travers la valorisation économique des flux inverses. En outre, nous avons eu des résultats quasiment similaires à travers l'algorithme génétique en comparant avec la méthode Branch & Bound. Ainsi, la décision quant à la localisation des sites potentiels mais aussi le nombre de véhicules global restent sensiblement analogues quelle que soit la méthode utilisée. Par l'algorithme génétique, nous avons obtenu un nombre de véhicules égal au maximum à 5 unités. Quant à la méthode Branch & Bound, si nous établissons la somme du nombre de véhicules de tous les CDU, nous aurons 6 véhicules.

Concernant la performance du temps d'exécution, qui a motivé l'utilisation de cet algorithme, nous calculons le gap en temps entre les deux méthodes utilisées.

Gap en temps par rapports à la première méthode utilisée =

$$\left(\frac{67091-13,102}{67091}\right) \times 100 = 99,98\%$$

En conséquence, le gap en temps est très important. Cela nous permet de démontrer l'utilité de cet algorithme et son adéquation à notre modèle mathématique. Il nous fait gagner beaucoup de temps en ayant un résultat réalisable avec la même décision sur la localisation des CDU. De plus, cette approche confirme un gain financier ce qui valide le bénéfice d'un couplage des flux inverses et des flux de distribution.

Par la suite, nous avons varié le nombre de commerçants par zone afin de comparer les valeurs de profits obtenus par les deux méthodes. D'après le Tableau III-9, nous remarquons alors que la méthode Branch & Bound (B&B) donne toujours un résultat meilleur avec un temps raisonnable. Pour les simulations restantes, B&B donne des résultats avec un gap très intéressant qui ne dépasse pas 3,59% mais avec un temps très long. Dans ces cas, l'algorithme génétique est considéré plus bénéfique pour les décideurs puisque ses résultats sont raisonnables avec un temps très avantageux.

Tableau III-9 : Comparaison entre les résultats de la méthode B&B et les résultats de l'algorithme génétique

<b>Nombre de commerçants par zone</b>	<b>B&amp;B</b>	<b>GA</b>	<b>Gap (%)</b>
20	18615,4 (optimale)	9297,44	50,05511566
25	19192,78(optimale)	6326,29	67,0381779
50	21394,04	13554,67	36,64277528
75	28649,63	19024,84	33,59481431
100	35548,08	29787,784	16,20423944
200	51019.48	47607,57	6,687465258
300	73810,84 (optimale)	66964,43	7,920801335

#### 4.2.3 Amélioration de la solution obtenue par le GA par l'algorithme recuit simulé

Le recuit simulé est une méthode de résolution spécialisée pour les problèmes d'optimisation combinatoire, qui permet de donner de bons résultats avec des temps raisonnables. Elle a été

conçue pour chercher un meilleur résultat à partir des minima ou maxima locaux. Donc la recherche ne s'arrête pas au premier minimum ou maximum trouvé en relançant plusieurs fois l'algorithme ou la solution va être acceptée selon un critère probabiliste. Elle a été introduite par Kirkpatrick et al. (1983) en s'inspirant d'un phénomène physique selon des variations de températures connu sous le nom « recuit » ou on chauffe le métal à une certaine température et puis on diminue la température lentement afin d'obtenir un solide avec une bonne qualité. Et depuis, il a été appliqué dans diverses problèmes de programmation en nombre entiers y compris les problèmes de localisation (Murray & Church, 1996).

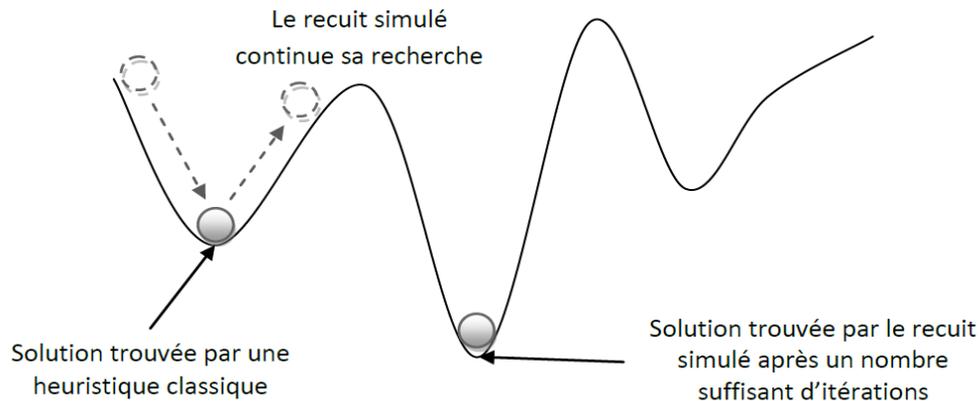


Figure III-11 : Comparaison entre la solution trouvée par le RS et une heuristique classique<sup>15</sup>

Les problèmes de localisation affectation ont tout d'abord été résolu par le RS en 1986 (Murray & Church, 1996). Par ailleurs, Arostegui et al., (2006) ont comparé trois méthodes (algorithme génétique, recuit simulé et la recherche taboue) pour ces problèmes. Ils ont pu remarquer que le RS a pu dégager des résultats similaires à l'algorithme génétique. Mais aussi, Li & Yeh (2005) ont mentionné que l'algorithme génétique a donné des résultats meilleurs que le recuit simulé pour les problèmes de localisation de  $n$  sites d'installations.

L'idée de l'algorithme est d'effectuer un changement avec une probabilité de distribution qui dépend de la qualité des différents voisins, les meilleurs voisins ont une probabilité plus élevée et les moins probables ont une probabilité plus faible. Un paramètre ( $T$ ) appelé la température est utilisé. Lorsque  $T$  est élevé, tous les voisins ont approximativement la même probabilité d'être acceptés.

L'algorithme de recuit simulé est présenté par les étapes suivantes :

- 1- Générer une configuration initiale  $s$  avec une température initiale égale à  $T$ .
- 2- Générer une solution aléatoire au voisinage de la solution actuelle  $s'$ .
- 3- Comparer les deux solutions :

Soit  $\Delta(f) = f(s') - f(s)$  la variation de coût.

Si  $\Delta(f) \geq 0$ , effectuer la transformation :  $s$  devient  $s'$ .

Sinon, accepter la transformation avec la probabilité  $\exp(-\frac{\Delta(f)}{T})$  (i.e. tirer au sort un nombre  $x$  dans  $[0,1]$  avec une loi uniforme et nous acceptons  $x \leq \exp(-\frac{\Delta(f)}{T})$ ).

- 4- Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que la stabilité statistique soit atteinte.

<sup>15</sup> Source : [https://rfia2012.files.wordpress.com/2011/12/amine\\_le\\_recuit\\_simulc3a9.pdf](https://rfia2012.files.wordpress.com/2011/12/amine_le_recuit_simulc3a9.pdf)

5- Diminuer la température et répéter jusqu'à ce que le système soit gelé.

Le recuit simulé est appliqué sur la solution finale obtenue par notre AG afin d'essayer d'améliorer la solution trouvée avec cet heuristique. À cette fin, nous avons choisie de générer des solutions de voisinage en changeant les valeurs du nombre de véhicules de chaque UDC choisie. Par la suite nous avons initialisé  $T$  à 1000 et en diminuant cette valeur ( $T=0.999 \times T$ ). Mais, nous avons constaté que cette méthode n'a pas pu améliorer la solution trouvée.

## **5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons montré la valeur de l'apport de l'intégration des deux domaines : la distribution par les CDU et la logistique inverse. De plus nous nous sommes concentrés sur la localisation des CDU pour maximiser le profit. En premier lieu nous avons essayé d'améliorer notre modèle qui était difficile à résoudre par des méthodes exactes. Nous avons commencé par linéariser ces termes en ajoutant des nouvelles variables et des nouvelles contraintes pour remplacer ces termes non linéaires. Par conséquent notre modèle non linéaire en nombre entiers se transforme en modèle linéaire en nombre entiers. Puis, une résolution de ce dernier avec l'algorithme Branch and Bound sur le solveur Xpress FICO a permis d'obtenir des gains financiers mais en étant lent à l'exécution.

En second lieu, nous avons utilisé un algorithme génétique pour résoudre notre problème qui a permis de donner des résultats avec un temps raisonnable. Ce qui nous a permis d'avoir une solution moins importante que celle avec le Branch and Bound mais avec un gain de temps très important.

Dans le chapitre suivant, nous étudions la stratégie de collaboration entre plusieurs CDU ouverts pendant les périodes de la non-disponibilité afin de satisfaire des demandes aléatoires.



## **Chapitre IV : Contribution à l'efficacité des CDU par la prise en compte de la maintenance et la sous-traitance . 101**

<u>1</u>	<u>Introduction</u> .....	102
<u>2</u>	<u>Plan de distribution corrélé au plan de maintenance pour un CDU 1/N utilisant la stratégie de sous-traitance</u> .....	103
<u>2.1</u>	<u>Paramètres</u> .....	104
<u>2.2</u>	<u>Variables de décisions</u> .....	105
<u>2.3</u>	<u>Le cas affectation simple (1/N)</u> .....	105
<u>2.3.1</u>	<u>Modélisation mathématique du plan de distribution en tenant compte de la sous-traitance</u> .....	105
<u>2.3.2</u>	<u>Modélisation du coût de la maintenance</u> .....	106
<u>2.3.3</u>	<u>Exemple numérique</u> .....	109
<u>2.3.3.1</u>	<u>Étape 1 : Plan de distribution et sous-traitance sans tenir compte de la dégradation du CDU</u> .....	109
<u>2.3.3.2</u>	<u>Étape 2 : Plan de maintenance</u> .....	111
<u>2.3.3.3</u>	<u>Étape 3 : Le plan de distribution final utilisant la stratégie de sous-traitance</u> 112	112
<u>2.4</u>	<u>Le cas multi affectations n/N</u> .....	112
<u>2.4.1</u>	<u>Modélisation mathématique du plan de distribution avec sous-traitance</u> .....	113
<u>2.4.2</u>	<u>Résultats numériques</u> .....	114
<u>2.4.2.1</u>	<u>Étape 1 : Plan de distribution et de sous-traitance sans la dégradation du CDU</u> 114	114
<u>2.4.2.2</u>	<u>Étape 2 : Plan de maintenance</u> .....	116
<u>2.4.2.3</u>	<u>Étape 3 : Le plan de distribution finale et de sous-traitance avec la dégradation du CDU</u> 116	116
<u>2.5</u>	<u>Conclusion</u> .....	117
<u>3</u>	<u>Le plan de distribution corrélé à un plan de maintenance pour N/N CDU utilisant la stratégie de sous-traitance</u> .....	118
<u>3.1</u>	<u>Modélisation mathématique du problème</u> .....	119
<u>3.1.1</u>	<u>Paramètres</u> .....	119
<u>3.1.2</u>	<u>Variables de décisions</u> .....	120
<u>3.1.3</u>	<u>Modélisation mathématique de la planification de la distribution en tenant compte de la sous-traitance</u> .....	120
<u>3.1.4</u>	<u>Modélisation mathématique de la stratégie de maintenance</u> .....	121
<u>3.2</u>	<u>Exemple numérique</u> .....	123
<u>3.2.1</u>	<u>Étape 1 : Plan de distribution et de la sous-traitance sans tenir compte de la dégradation du CDU</u> .....	123
<u>3.2.2</u>	<u>Étape 2 : Plan de maintenance</u> .....	126
<u>3.2.3</u>	<u>Étape 3 : Plan de distribution finale utilisant la stratégie de sous-traitance</u> .	129
<u>4</u>	<u>Notre synthèse entre les différents scénarios</u> .....	130
<u>5</u>	<u>Conclusion</u> .....	131



# **Chapitre IV : Contribution à l'efficacité des CDU par la prise en compte de la maintenance et la sous-traitance**

Dans ce chapitre, nous proposons une solution qui permet de pallier l'indisponibilité des Centres de Distribution Urbains (CDU) à cause de l'incertitude sur la fiabilité de ces infrastructures. En effet, les CDU se doivent de satisfaire les demandes de livraison dans les délais dans les zones urbaines attribuées. Pourtant, ces demandes peuvent ne pas être satisfaites lorsqu'elles dépassent les capacités disponibles de ces infrastructures. Par ailleurs, certains CDU sont indisponibles lorsque leurs capacités à livrer sont affectées par des indisponibilités aléatoires ou des actions de maintenance préventives. Dans ce cas, une partie ou la totalité du site sera hors service : « Out Of Service ».

Le but de ce chapitre est de contribuer à l'efficacité des CDU en termes de la disponibilité et de la satisfaction de la demande dans les délais, par le biais des actions de maintenances préventives ainsi que de la stratégie de collaboration inter-CDU. Pour ce faire, nous envisageons une politique de distribution sur deux plans séquentiels avec un plan de distribution corrélé à un plan de maintenance. Il s'agit d'une stratégie de distribution, sous-traitance et de maintenance de plusieurs CDU pour assurer la disponibilité, afin de garantir les livraisons dans les délais concernant les zones urbaines allouées. Le choix du sous-traitant dépendra des critères économiques, environnementaux et de disponibilité. Pour définir les meilleurs plans de distribution et de maintenance, nous proposons une formulation mathématique à l'aide d'une stratégie de sous-traitance. Ensuite, nous supposons que chaque livraison retardée doit être reportée à la période suivante avec une pénalité à payer. Enfin, nous présentons un exemple numérique illustrant les avantages de notre approche.

## 1 Introduction

La mondialisation a un impact significatif sur les entreprises qui sont confrontées à des défis considérables en matière de performance, d'efficacité et d'économie. Ces entreprises doivent satisfaire la demande à temps, innover, faire des profits, etc. Par ailleurs, le manque de capacité ou la non-disponibilité due à des aléas (pannes, accidents, manque de personnel) les affectent négativement. Une collaboration est nécessaire pour partager les activités, les connaissances et les services.

Dans le chapitre précédent, nous avons supposé que les CDU fonctionnaient avec des paramètres stables et qu'ils étaient capables de satisfaire les demandes dans les délais. Alors qu'en réalité, ce n'est pas toujours le cas étant donné que le fonctionnement des CDU dépend de nombreux composants : véhicules, systèmes d'information, matériels de manutention, etc. En effet, une défaillance d'un composant risque d'impacter leur disponibilité, ce qui réduit la capacité de livraison et donc l'efficacité de ces centres. Par conséquent, nous risquons de trouver des CDU « OUT OF SERVICE ». Donc, une meilleure collaboration entre les différents CDU, combinée à des actions de maintenances préventives permettrait de rendre le système plus efficace et de satisfaire les commerçants. La stratégie de collaboration rend les CDU plus flexibles face aux imprévus comme les indisponibilités aléatoires. Quant aux actions de maintenance préventives, elles augmentent la disponibilité et l'efficacité de ces centres. De plus, ces deux stratégies sont nécessaires à long terme en raison de la croissance de la population urbaine. En effet, environ 70% de la population en Europe vivra dans les zones urbaines en 2050 (Pasternak et Pellissier, 2014). Cette croissance va augmenter le nombre de livraisons et les ressources actuelles ne seront pas en mesure de les satisfaire.

Les CDU confrontés à des problèmes de capacité de diffusion communiquent et se coordonnent avec d'autres CDU pour une aide mutuelle et une collaboration efficace afin de réduire le volume de produits retardés. Ces retards peuvent être causés par demande qui dépasse la somme des capacités de livraisons d'un CDU et/ou par la capacité disponible des autres CDU.

Notre approche est inspirée du travail de Hajej et al. (2014) présentant un plan intégré de production/maintenance/transport avec une stratégie de basculement entre plusieurs sites de production afin de satisfaire les demandes avec un niveau de service élevé. Hajej et al. (2011) proposent la coordination entre le plan de production et le plan de maintenance afin de satisfaire une demande aléatoire. Dans ce cas, le taux de défaillance du système de fabrication dépend du temps et du taux de production. Dellagi et al. (2007) ont développé une stratégie de maintenance intégrant la contrainte de sous-traitance où le système est décrit comme une machine faisant appel à un sous-traitant pour compléter la demande dépassant la capacité disponible. Dellagi et al. (2010) ont étendu leur travail en développant une politique de maintenance intégrée pour un système de production, qui peut appeler plusieurs sous-traitants afin de satisfaire une demande constante.

Dans ce chapitre, nous présentons une planification de distribution et de maintenance basée sur une résolution séquentielle pour obtenir les deux plans pour des CDU utilisant la stratégie de sous-traitance. Ce travail a pour objectif d'intégrer une approche collaborative pour permettre de faire un appel si nécessaire à d'autres CDU à partir de différentes possibilités potentielles pour satisfaire les demandes des clients avec un niveau de service élevé. En outre, le but est de

planifier les actions de maintenance préventives afin d'augmenter la disponibilité de ces centres en tenant compte de leur dégradation.

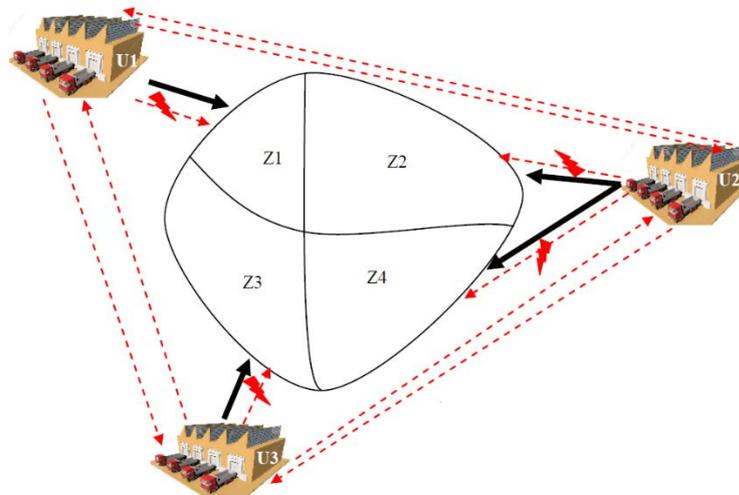


Figure IV-1 : Description du problème général

Afin d'étudier le modèle global, nous allons procéder de façon progressive à l'analyse des cas possibles. Le premier cas concerne un seul CDU pouvant être indisponible et qui va tenter de contacter les autres CDU afin de compléter la demande. Deux possibilités sont envisageables, la première consiste à choisir un seul centre comme sous-traitant ; la deuxième possibilité, il est capable de choisir plusieurs CDU. Par la suite, nous avons étendu ce travail afin d'étudier le problème global avec plusieurs CDU ayant des affectations multiples.

Ainsi, nous présentons un plan de distribution et un plan de maintenance pour un CDU qui doit choisir un seul CDU parmi  $N$  possibilités  $1/N$  comme sous-traitants. Le critère de ce choix est le coût d'un produit à sous-traiter et la capacité égale à la livraison disponible. Par la suite, nous étendons le modèle en intégrant la possibilité de choisir plusieurs CDU comme des sous-traitants  $n/N$  en tenant compte des contraintes et des coûts environnementaux. Finalement, nous proposons un modèle global  $N/N$  pour tous les CDU qui peuvent collaborer entre eux.

## 2 Plan de distribution corrélé au plan de maintenance pour un CDU $1/N$ utilisant la stratégie de sous-traitance

L'idée est de définir un plan de distribution et de maintenance pour un CDU  $1/N$  faisant appel à un autre CDU en cas d'indisponibilité. Nous identifions le montant des livraisons sous-traitées à chaque CDU <sub>$i$</sub>  potentiel(s) ( $i=1\dots N$ ) pendant chaque période  $t$ . Cela peut se produire lorsque la capacité de livraison est insuffisante ou lors d'une période donnant lieu à des actions de maintenance préventives ou correctives.

La demande globale de la zone urbaine affectée et la capacité disponible des autres CDU <sub>$i$</sub>  ( $i=1\dots N$ ) sont supposées connues pour chaque période  $t$ . Une quantité de livraison retardée peut être envisagée dans le cas où la demande dépasse la capacité disponible du CDU concerné et de la capacité disponible des différents CDU. Nous supposons que le site en question subit des indisponibilités aléatoires. Ainsi, une maintenance préventive périodique est effectuée et, en cas

d'indisponibilité, une réparation minimale sera exécutée. La Figure IV-2 décrit la structure de notre approche.

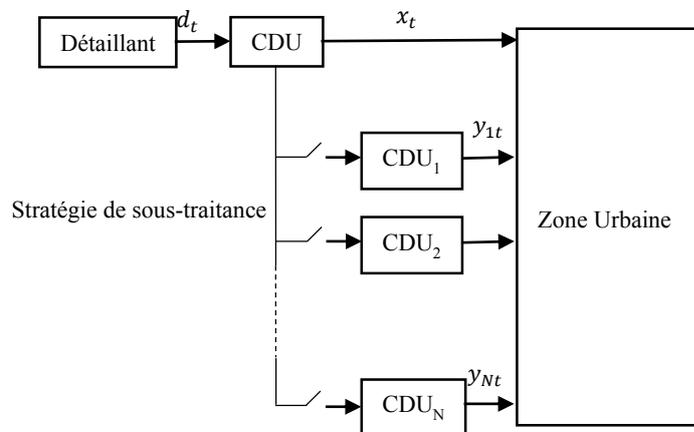


Figure IV-2 : La description du problème

Par la suite, nous proposerons deux modèles mathématiques. Le premier modèle dit aussi 1/N exige qu'un CDU ne peut affecter ses livraisons qu'à un seul CDU parmi N possibilités. Le deuxième dit n/ N modèle permet l'affectation à n centres parmi N possibilités en tenant compte des critères environnementaux.

Nous utilisons un horizon de planification, divisé en H périodes identiques. Chaque période est notée t,  $t = \{1, 2 \dots H\}$ . Les paramètres suivants sont utilisés dans la formulation de notre modèle mathématique.

## 2.1 Paramètres

- $N$  : Nombre global de CDU possibles à sous-traiter,  $(i=1\dots N)$
- $H$  : Nombre de périodes
- $C_t$  : Coût de livraison d'une unité vers la zone affectée
- $C_{tr_i}$  : Coût de sous-traitance d'une unité vers le CDU<sub>i</sub>
- $C_{tp_i}$  : Coût des émissions générées par la sous-traitance d'une unité au CDU<sub>i</sub>
- $C_p$  : Coût d'une unité retardée
- $Y_{it}$  : Capacité disponible de chaque CDU<sub>i</sub> pendant la période t
- $d_t$  : Demande à chaque période t
- $C_{\max}$  : Capacité de livraison maximale du CDU concerné.
- $D_t$  : Somme de la demande et de la livraison retardée pour chaque période t
- $L_p$  : Quantité de produits réduite due à une action de maintenance préventive
- $L_r$  : Quantité de produits réduite due à une réparation minimale
- $M_p$  : Coût de maintenance préventive
- $M_c$  : Coût d'une réparation minimale
- $\Delta t$  : Longueur d'une période de distribution

- $\lambda_t(k)$  : Taux d'indisponibilité pour la période t ( $\forall k \in [0, \Delta t]$ )
- $\lambda_{nt}$  : Nombre moyen d'indisponibilités pour chaque période t
- um : Unité monétaire

## 2.2 Variables de décisions

- $x_t$  : Quantité de livraison transportée du CDU concerné vers la zone urbaine affectée pendant la période t
- $y_{it}$  : Quantité de livraison sous-traitée au CDU<sub>i</sub> pendant la période t
- $Q_t$  : Quantité de produits retardée pour chaque période t
- $AF_{it} = 1$  si CDU<sub>i</sub> est choisi pour assurer une quantité de produits à livrer pendant la période t, 0 sinon
- $N$  : Nombre optimal d'actions de maintenance préventive sur l'horizon H.
- $\zeta_M(x, N)$  : Nombre moyen d'indisponibilité

## 2.3 Le cas affectation simple (1/N)

Nous présentons le premier modèle mathématique qui consiste à formuler le problème de distribution pour un CDU, en tenant compte de ses indisponibilités et en adoptant la stratégie de coordination avec les autres CDU ; cette stratégie est basée sur la sous-traitance des livraisons et la stratégie de maintenance. Le but est ainsi de garantir l'efficacité du système à travers ces deux stratégies.

Nous supposons que le CDU ne peut affecter ses livraisons qu'à un seul CDU parmi N possibilités d'où la notation 1/N. Notre formulation du problème est composée de deux modèles mathématiques : le premier consiste à définir le plan global de distribution, quant au deuxième, il nous permet de déterminer le plan de maintenance qui permet d'améliorer la disponibilité du CDU, mais aussi de calculer les capacités réelles disponibles pour chaque période t.

### 2.3.1 Modélisation mathématique du plan de distribution en tenant compte de la sous-traitance

L'idée est de minimiser le coût de la distribution sur un horizon fini  $[0, H]$ . À chaque période, le CDU concerné peut assumer toutes les livraisons vers un seul site, c'est-à-dire 1/N centre. Dans ce cas, le choix entre les différents CDU dépend de la capacité disponible et du coût de la sous-traitance, qui dépendent eux-mêmes de la distance entre le CDU concerné et le CDU<sub>i</sub> ( $i=1,2,\dots,N$ ). Le but de la stratégie de sous-traitance est de satisfaire un maximum de livraisons à temps et d'assurer une communication entre les CDU et un management collaboratif.

Si la demande à la période t dépasse la capacité totale de CDU et de CDU<sub>i</sub> choisis, la quantité restante sera retardée pour la période suivante. Dans ce cas, une pénalité sera payée pour chaque produit non livré à temps (avec  $Ct < Ctr_i < Cp$ ). Nous supposons que le système de distribution a connu une capacité de livraison nominale exprimée par Ct. Cette capacité varie en fonction des opérations de maintenance.

L'expression du coût global de la distribution en utilisant la stratégie de sous-traitance et une pénalité à payer en cas de non satisfaction de la demande à temps est définie comme suit :

$$Cd = \min \left\{ \sum_t Ct \times x_t + \sum_t \sum_i Ctr_i \times y_{it} \times AF_{it} + \sum_t Cp \times Q_t \right\} \quad (48)$$

La contrainte suivante définit la quantité en produits à livrer par le CDU et ne peut pas dépasser la capacité disponible en livraison pour chaque période :

$$0 \leq x_t \leq C_t \quad \forall t \in H \quad (49)$$

La quantité à sous-traiter ne peut pas dépasser la capacité disponible pour chaque CDU<sub>i</sub> :

$$0 \leq y_{it} \leq Y_{it} \quad \forall t \in H \quad i \in L \quad (50)$$

La valeur de la quantité retardée est :

$$Q_t = \max[0, D_t - x_t - \sum_i y_{it} \times AF_{it}] \quad \forall t \in H \quad (51)$$

L'équation suivante définit la demande dite actualisée. À chaque période nous rajoutons à la demande la quantité reportée :

$$D_{t+1} = d_{t+1} + Q_t \quad \forall t \in H \quad (52)$$

La contrainte suivante définit que le CDU principal peut sous-traiter la quantité restante auprès d'un 1/N CDU possible(s) pour chaque période t :

$$\sum_i AF_{it} \leq 1 \quad \forall t \in H \quad (53)$$

L'équation suivante définit les variables de décisions binaires :

$$AF_{it} \in \{0, 1\} \quad (54)$$

L'équation suivante définit les variables de décisions entières :

$$Q_t, x_t, y_{it} \text{ entiers} \quad (55)$$

### 2.3.2 Modélisation du coût de la maintenance

L'idée est de développer une stratégie de maintenance optimale en considérant la dégradation de la disponibilité de 1/N CDU en fonction du plan de distribution. Afin de connaître les meilleurs intervalles de temps lorsqu'une action de maintenance préventive doit être effectuée, il est important de minimiser le coût total de maintenance.

La stratégie de maintenance adoptée ici est la politique de maintenance préventive avec une réparation minimale en cas d'indisponibilité (voir Figure IV-3). Une maintenance préventive parfaite est effectuée périodiquement et rend le système comme neuf (As good As New). Lorsque le site est indisponible entre deux actions de maintenance préventives successives, seule

une réparation minimale est mise en œuvre. Elle restaure le système au même état qu'avant la panne.

Ici, nous supposons que les temps de réparations et d'actions de maintenance préventives sont négligeables. Pour chaque période  $t$ , nous déterminons la quantité à livrer  $x_t$  dans le plan de distribution optimal. Ainsi, le taux d'indisponibilité est calculé selon cette quantité et il est cumulatif dans le début de chaque intervalle  $[0, \Delta t]$ . A chaque action de maintenance, actions préventives et/ou correctives, il consomme un certain pourcentage de ce taux de distribution. Néanmoins, après les actions de maintenance préventives, le système est rendu comme neuf, ce qui augmentera sa disponibilité ainsi que son efficacité pour garantir le service attendu.

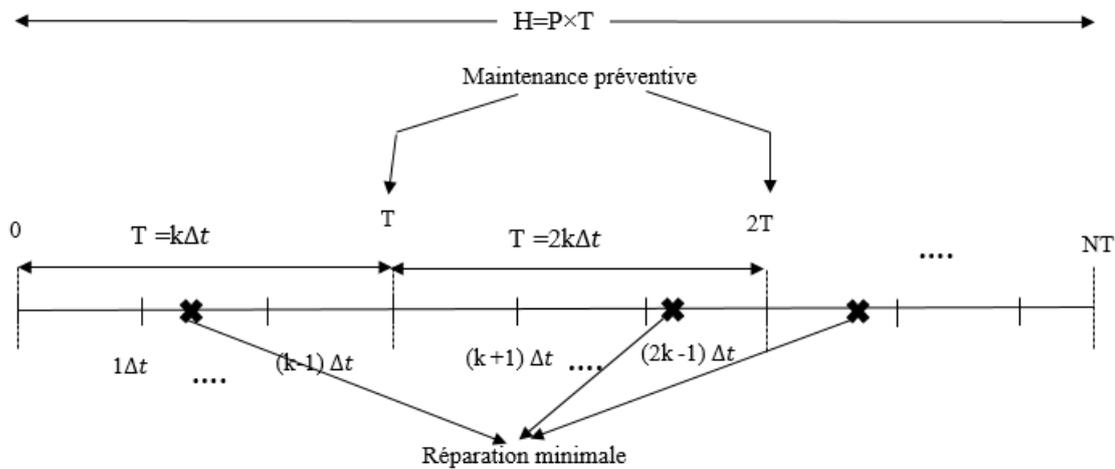


Figure IV-3 : Stratégie de maintenance adoptée

Ainsi, la maintenance préventive et la maintenance corrective consomment respectivement :

$$L_p = a \times C_{max} \text{ et } L_r = b \times C_{max}.$$

L'expression analytique du coût total de la maintenance pour le CDU concerné est exprimée comme suit :

$$C_M(x, P) = M_p \times (P - 1) + M_c \times \zeta_M(x, P) \quad (56)$$

Où  $P \in \{1, 2, 3, \dots\}$  correspond au nombre d'actions de maintenance préventives et  $\zeta_M(x, N)$  correspond au nombre moyen des indisponibilités qui se produisent pendant l'horizon.

Le nombre moyen des indisponibilités dans le cas de cette stratégie de maintenance s'exprime sous des conditions constantes :

$$\varphi(T) = \int_0^T \lambda(t) dt \quad (57)$$

Néanmoins, le taux d'indisponibilité varie au cours du temps et il est cumulatif dans le début de chaque intervalle  $[0, \Delta t]$ . Le nombre moyen d'indisponibilités peut être défini comme suit :

$$\zeta_M(x, P) = \int_0^{\Delta t} \lambda_1(k) dk + \int_0^{\Delta t} \lambda_2(k) dk + \dots + \int_0^{\Delta t} \lambda_t(k) dk \quad (58)$$

D'où le nombre moyen de pannes qui s'exprime comme suit :

$$\zeta_M(x, P) = \sum_{i=1}^t \int_0^{\Delta t} \lambda_i(k) dk \quad (59)$$

De plus, le taux d'indisponibilité du CDU principal augmente à chaque période en raison du plan de distribution. Dans cette partie, nous nous sommes inspirés du travail de Hajej et al. (2011) où l'indisponibilité dans l'intervalle  $k$  varie selon le taux de distribution et il est cumulatif au début de chaque période :

$$\lambda_t(k) = \lambda_{t-1}(\Delta t) + \frac{x_t}{C_{\max}} \lambda_n(k) \quad \forall k \in [0, \Delta t] \quad (60)$$

avec  $\lambda_0(k=0) = \lambda_0$  et  $\Delta \lambda_t(k) = \frac{x_t}{C_{\max}} \lambda_n(k)$  où  $\lambda_n(k)$  est le taux d'indisponibilité nominal qui correspond à une distribution maximale.

La seule variable de décision dans cette politique périodique est le nombre optimal d'actions de maintenance préventives  $P^*$ . Par la suite, nous pouvons déterminer la longueur de la période optimale  $T^*$  avec  $T^* = H/P^*$ .

Par conséquent, le nombre moyen d'indisponibilités en utilisant la formule du taux d'indisponibilité est définie comme suit :

$$\zeta_M(x_t, P) = \sum_{j=0}^{N-1} \left[ \sum_{m=\ln(j \times \frac{T}{\Delta t})+1}^{\ln((j+1) \times \frac{T}{\Delta t})} \int_0^{\Delta t} \lambda_m(k) dk + \int_0^{(j+1) \times T - \ln((j+1) \times \frac{T}{\Delta t}) \times \Delta t} \lambda_{\ln((j+1) \times \frac{T}{\Delta t})+1}(k) dk + \int_{(j+1) \times T}^{\ln((j+1) \times \frac{T}{\Delta t})+1 \times \Delta t} \left( \frac{\ln((j+1) \times \frac{T}{\Delta t})+1}{C_{\max}} \right) \times \lambda_n(k) dk \right] \quad (61)$$

(61)

Nous supposons que chaque action de maintenance corrective et/ou préventive réduit le taux de livraison disponible du CDU. Par conséquent, la capacité disponible en nombre d'unités à livrer pour chaque période est définie comme suit :

Si l'action de maintenance préventive s'effectue à la période  $t$

$$\begin{cases} C_t = C_{\max} - Lp - Lr \times \int_0^{\Delta t} \lambda(u + (t-1-(n-1)k)\Delta t) du \\ Si \quad t = n \times k \quad \forall n = \{1, \dots, P\} \end{cases} \quad (62)$$

Dans d'autre cas,  $C_t$  s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} C_t = C_{\max} - Lr \times \int_0^{\Delta t} \lambda(u + (t-1-(n-1)k)\Delta t) du \\ Si \quad (n-1)k + 1 \leq t \leq n \times k - 1 \quad \forall n = \{1, \dots, P\} \end{cases} \quad (63)$$

### 2.3.3 Exemple numérique

Dans cette section, nous déterminerons un plan de distribution qui tient compte de la possibilité d'externaliser une partie de la demande vers un autre CDU. Nous calculons aussi le nombre optimal d'actions de maintenance ainsi que la capacité disponible pour la livraison. Dans ce cas, une stratégie séquentielle a été adoptée afin de résoudre le problème et elle est définie en 3 étapes :

- Étape 1 : résoudre le modèle mathématique de distribution en tenant compte de la possibilité de sous-traiter en supposant que la capacité disponible est maximale pour chaque période.
- Étape 2 : identifier le nombre optimal des actions de maintenance préventive et calculer la capacité disponible pour chaque période du CDU.
- Étape 3 : Intégrer ces capacités dans le modèle de distribution pour obtenir le plan de distribution final.

#### 2.3.3.1 Étape 1 : Plan de distribution et sous-traitance sans tenir compte de la dégradation du CDU

Nous considérons un CDU qui doit répondre à une demande définie dans le tableau 1. Le coût de transport unitaire est égal à 10 um. Dans cette étape, nous supposons que la capacité maximale de livraison du CDU appelée  $C_{max}$  est égale à 13.

En ce qui concerne la stratégie de sous-traitance, deux CDU sont disponibles pour compléter le service du CDU, si nécessaire. Les capacités disponibles pour chacun d'eux sont présentées dans le Tableau IV-1, Tableau IV-2 et Tableau IV-3. Pour le premier sous-traitant CDU, le coût de service unitaire est égal à 15 um. Pour le second, le coût du service unitaire est égal à 20 um.

Pour un produit reporté à la période suivante, le coût de pénalité est égal à 50 um. Le nombre de périodes H est égal à 8.

Tableau IV-1 : Demande de chaque période

<b>t</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>d<sub>t</sub></b>	15	17	15	15	15	14	16	14

Tableau IV-2 : Taux de livraison disponible du CDU<sub>1</sub>

<b>Y<sub>1,1</sub></b>	<b>Y<sub>1,2</sub></b>	<b>Y<sub>1,3</sub></b>	<b>Y<sub>1,4</sub></b>	<b>Y<sub>1,5</sub></b>	<b>Y<sub>1,6</sub></b>	<b>Y<sub>1,7</sub></b>	<b>Y<sub>1,8</sub></b>
4	5	1	7	2	2	2	3

Tableau IV-3 : Taux de livraison disponible du CDU<sub>2</sub>

<b>Y<sub>2,1</sub></b>	<b>Y<sub>2,2</sub></b>	<b>Y<sub>2,3</sub></b>	<b>Y<sub>2,4</sub></b>	<b>Y<sub>2,5</sub></b>	<b>Y<sub>2,6</sub></b>	<b>Y<sub>2,7</sub></b>	<b>Y<sub>2,8</sub></b>
0	5	3	8	4	6	9	1

Notre modèle mathématique a des variables binaires et entières avec des termes non linéaires. Ces termes apparaissent sur les fonctions objectives et les contraintes créant des problèmes de convexité.

Dans cette section, nous présentons d'abord la reformulation de notre modèle en une programmation linéaire particulière. Ensuite, nous résolvons ce nouveau modèle en utilisant le solveur spécialisé dans la programmation linéaire.

Ainsi, nous faisons une reformulation de ces termes suivant notre modèle. Les termes quadratiques dans nos modèles sont un produit entre des variables binaires et entières. Les variables entières sont bornées par 0 et une valeur maximale. Ces termes apparaissent en bleu dans les fonctions suivantes :

$$Cd = \min \left\{ \sum_t Ct \times x_t + \sum_k \sum_i Ctr_i \times y_{it} \times AF_{it} + \sum_t Cp \times Q_t \right\} \quad (48)$$

$$Q_t = \max[0, D_t - x_t - \sum_i y_{it} \times AF_{it}] \quad (51)$$

$AF_{it}$  est une variable binaire  $y_{it}$  est une variable entière et bornée :

$$0 \leq y_{it} \leq Y_{it} \quad \forall t \in H \quad i \in L$$

Ensuite, nous introduisons une nouvelle variable :

$$B_{it} \leq Y_{it} \times AF_{it} \quad \forall t \in H \quad i \in L \quad (64)$$

En outre, nous avons ajouté d'autres inégalités pour valider la nouvelle variable comme suit :

$$B_{it} \leq Y_{it} \times AF_{it} \quad \forall t \in H \quad i \in L \quad (65)$$

$$B_{it} \geq 0 \quad \forall t \in H \quad i \in L \quad (66)$$

$$B_{it} \leq y_{it} \quad \forall t \in H \quad i \in L \quad (67)$$

Le nouveau problème est appliqué au modèle. Nous avons obtenu les résultats avec un temps d'exécution égale à 1 s. Ils sont présentés dans le Tableau IV-4. Le coût total pour le plan de distribution optimale est égal à 1320 um.

Tableau IV-4 : Plan de distribution avec capacité maximale

<b>Période</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Quantité à livrer</b>	13	13	13	13	13	13	13	13
<b>Affectation au CDU<sub>1</sub></b>	1	1	0	1	1	1	0	1
<b>Quantité à sous-traiter au CDU<sub>1</sub></b>	2	4	0	2	2	1	0	1
<b>Affectation au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	1	0	0	0	1	0

<b>Quantité à sous-traiter au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	2	0	0	0	3	0
<b>Quantité reportée</b>	0	0	0	0	0	0	0	0

### 2.3.3.2 Étape 2 : Plan de maintenance

Dans cet exemple numérique, nous supposons que la disponibilité du système suit une loi de dégradation caractérisée par une distribution de Weibull. Les paramètres d'échelle et de forme de Weibull sont  $\beta = 50$  et  $\alpha = 2$ . Les coûts de maintenance préventive et corrective sont respectivement  $M_p = 220$  um,  $M_c = 1000$  um. Afin de résoudre le coût de maintenance, nous avons utilisé le logiciel MATHEMATICA. La résolution de ce problème s'effectue en incrémentant le nombre d'intervalles de maintenance jusqu'à trouver  $P^*$ .

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** décrit le coût total de maintenance en fonction du nombre d'actions de maintenance préventive. Ainsi le nombre optimal de maintenances préventives  $P^*$  est égal à 2. Ainsi, la période optimale d'intervention  $T^*$  est égale à 4. Le coût total de maintenance est donc égal à 1432 um.

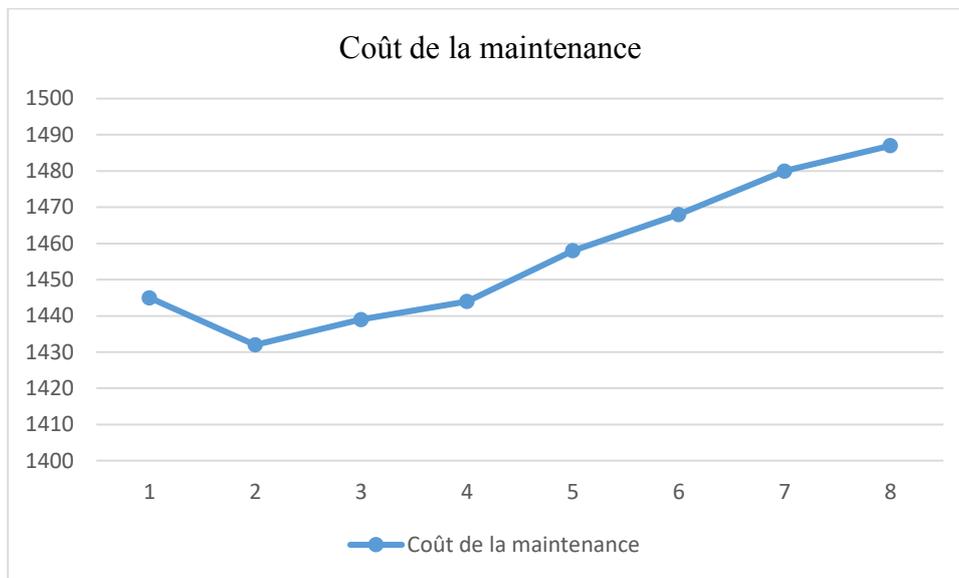


Figure IV-44 : Coût de la maintenance

$L_p$  est égale à 1 unité perdue en cas d'action de maintenance préventive et  $L_r$  est égal à 5 unités définissant les capacités perdues en raison des actions de maintenance. Le Tableau IV-5 montre les capacités de livraisons disponibles pour chaque période en tenant compte des effets des actions de maintenance.

Tableau IV-5 : Capacité de livraison disponible pour chaque période

<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>4</sub></b>	<b>C<sub>5</sub></b>	<b>C<sub>6</sub></b>	<b>C<sub>7</sub></b>	<b>C<sub>8</sub></b>
12	12	12	10	12	12	12	10

Nous remarquons d'après ce tableau que l'action de maintenance préventive augmente la capacité disponible, ce qui rend le centre plus efficace. Plus précisément, la capacité disponible va diminuer encore plus sans ces actions (voir Tableau IV-6).

Tableau IV-6 : Capacité de livraison pour chaque période sans actions de maintenance préventives

C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>
12	12	12	11	11	10	10	9

### 2.3.3.3 Étape 3 : Le plan de distribution final utilisant la stratégie de sous-traitance

Nous injectons les valeurs des capacités disponibles calculées dans l'étape 2 dans notre programme. Les résultats sont détaillés dans le Tableau IV-7. Le coût optimal de transport des livraisons en tenant compte de la stratégie de commutation et des capacités disponibles est égal à 1440 mu.

Tableau IV-7 : Plan de distribution en tenant compte de la variation de la capacité

Période	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Quantité à livrer</b>	12	12	12	10	12	12	12	10
<b>Affectation au CDU<sub>1</sub></b>	1	1	0	1	0	1	0	1
<b>Quantité à sous-traiter au CDU<sub>1</sub></b>	3	5	0	5	0	2	0	3
<b>Affectation au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	1	0	1	0	1	0
<b>Quantité à sous-traiter au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	3	0	3	0	4	0
<b>Quantité reportée</b>	0	0	0	0	0	0	0	1

Nous pouvons remarquer, en fonction des résultats, que la quantité sous-traitée a augmenté. Nous avons eu un seul produit retardé à la dernière période. Ceci est dû à la diminution de la valeur des capacités disponibles. Par conséquent, le coût de distribution des livraisons a augmenté de 120 um. Néanmoins, la non-adoption de la stratégie de la sous-traitance augmentera le coût de distribution, qui sera égal à 7520 um, étant donné que la quantité sous-traitée sera reportée avec des pénalités à payer. Par conséquent, le coût devient 5 fois supérieur au coût de la stratégie de sous-traitance. Afin d'améliorer l'efficacité et la flexibilité d'un CDU, nous allons tenir compte dans la sous-section suivante de la possibilité de sous-traiter à plusieurs CDU.

## 2.4 Le cas multi affectations n/N

Cette partie porte sur la planification de la distribution et le plan de maintenance d'un CDU dans un cadre de collaboration entre les différents sites. Ici, le CDU doit répondre à la demande journalière de chaque commerçant dans une zone urbaine allouée pendant un horizon de distribution fini. Nous supposons qu'il existe un seul type de produit, que la demande est connue à l'avance à chaque période  $t$  et qu'elle peut dépasser le taux de livraison du CDU.

La collaboration aura lieu lorsque le CDU concerné ne pourra pas satisfaire la totalité ou une partie de la demande au cours de la période  $t$ . Cela peut se produire lorsque le taux de distribution est insuffisant ou pendant une période de maintenance préventive ou corrective. Le CDU subit des indisponibilités aléatoires, des réparations et des activités de maintenance. Dans ce cas, il peut appeler plusieurs CDU afin de satisfaire la totalité de la demande. Le sous-traitant peut être  $n$  parmi  $N$  possibilités ( $n/N$ ). Chaque CDU potentiel est identifié par deux coûts : le transport et l'environnement. Une pénalité peut être payée si la demande dépasse la somme de la capacité du CDU principal et du CDU à sous-traiter.

L'horizon de planification est divisé en  $H$  périodes égales. Chaque période est notée  $t$ ,  $t = \{1, 2, \dots, H\}$ .

#### 2.4.1 Modélisation mathématique du plan de distribution avec sous-traitance

L'idée est de minimiser le coût de la distribution, de la sous-traitance et du retard sur un horizon temporel fini  $[0, H]$ . Dans chaque période, il y a trois scénarios. La première stipule que le CDU concerné peut assumer toutes les livraisons. Pour le second scénario, le CDU ne peut pas satisfaire la demande totale et il appellera au moins un CDU c'est-à-dire  $n/N$  avec  $n = \{1, 2, \dots, N\}$  pour compléter ce qui manque. Le troisième scénario décrit le cas où les capacités disponibles du CDU principal et du sous-traitant CDU ne peuvent pas satisfaire la demande totale, et qu'une partie de la demande sera retardée. Dans ce cas, le choix du CDU dépend de la capacité disponible, du coût de la sous-traitance en fonction de la distance entre deux CDU et de l'impact environnemental.

L'objectif de la stratégie de sous-traitance est de satisfaire à temps les demandes des clients et d'éviter les pénalités. Si une partie de la demande ne peut être satisfaite au cours de la période  $t$ , elle doit être reprogrammée pour la période suivante en payant des pénalités. La capacité du CDU principal sera réduite en fonction des opérations de maintenance. L'expression du coût total du transport, le coût de la sous-traitance (coût du transport et de l'environnement) et le coût différé sont exprimés comme suit :

$$C_d = \min \left\{ \sum_t C_t \times x_t + \sum_t \sum_i (C_{tr_i} + C_{tp_i}) \times y_{it} \times AF_{it} + \sum_t C_p \times Q_t \right\} \quad (68)$$

La contrainte suivante définit que la quantité délivrée par le CDU concerné à la zone urbaine allouée à la période  $t$  ne peut pas dépasser la capacité de livraison disponible pour chaque période  $t$ , et elle doit être positive :

$$0 \leq x_t \leq C_t \quad \forall t \in H \quad (69)$$

La quantité sous-traitée au CDU  $i$  dans la période  $t$  ne peut pas dépasser un certain taux de disponibilité dans la période  $t$  :

$$0 \leq y_{it} \leq Y_{it} \quad \forall t \in H \quad i \in N \quad (70)$$

L'équation suivante calcule la quantité reportée à la période  $t+1$  :

$$Q_t = \max[0, D_t - x_t - \sum_i y_{it} \times AF_{it}] \quad \forall t \in H \quad (71)$$

Cette équation détermine la valeur de la demande actualisée dans la période  $t + 1$  comme la somme entre la demande dans la période  $t + 1$  et la quantité de produits retardée dans la période précédente :

$$D_{t+1} = d_{t+1} + Q_t \quad \forall t \in H \quad (72)$$

La contrainte suivante définit que le CDU principal peut sous-traiter ses livraisons avec  $n/N$  avec  $n = \{1, 2, \dots, N\}$  CDU pendant la période  $t$  :

$$\sum_i AF_{it} \leq N \quad \forall t \in H \quad (73)$$

L'équation suivante définit les variables binaires :

$$AF_{it} \in \{0,1\} \quad (74)$$

Cette équation définit des variables entières :

$$Q_t, x_t, y_{it} \text{ integers} \quad (75)$$

#### 2.4.2 Résultats numériques

Afin de définir le meilleur plan de distribution en utilisant la stratégie de sous-traitance et le plan de maintenance optimal, nous allons suivre les mêmes étapes décrites dans l'exemple numérique précédent.

##### 2.4.2.1 Étape 1 : Plan de distribution et de sous-traitance sans la dégradation du CDU

Nous considérons un CDU qui doit répondre à la demande des clients dans une zone urbaine. Les demandes de la zone urbaine attribuée sont indiquées dans le Tableau IV-8. Le coût unitaire par produit est égal à 10 um. À ce stade, nous supposons que ce CDU fonctionne avec la capacité maximale, appelée  $C_{\max} = 20$ . Le nombre de périodes  $H$  est égal à 10.

Tableau IV-8 : La demande moyenne de la zone attribuée

$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$	$d_{10}$
25	17	35	35	22	25	16	20	17	25

En ce qui concerne la stratégie de sous-traitance, trois autres CDU sont disponibles pour compléter le service, si nécessaire. La capacité de livraison disponible pour chacun est présentée dans le Tableau IV-9, Tableau IV-10 et Tableau IV-11.

Tableau IV-9 : Capacité disponible pour chaque CDU<sub>1</sub>

$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$	$Y_{1,3}$	$Y_{1,4}$	$Y_{1,5}$	$Y_{1,6}$	$Y_{1,7}$	$Y_{1,8}$	$Y_{1,9}$	$Y_{1,10}$
4	5	1	7	2	5	2	3	0	1

Tableau IV-10 : Capacité disponible pour chaque CDU<sub>2</sub>

$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$	$Y_{2,3}$	$Y_{2,4}$	$Y_{2,5}$	$Y_{2,6}$	$Y_{2,7}$	$Y_{2,8}$	$Y_{2,9}$	$Y_{2,10}$
0	5	3	8	4	6	9	1	2	0

Tableau IV-11 : Capacité disponible pour chaque CDU<sub>3</sub>

$Y_{3,1}$	$Y_{3,2}$	$Y_{3,3}$	$Y_{3,4}$	$Y_{3,5}$	$Y_{3,6}$	$Y_{3,7}$	$Y_{3,8}$	$Y_{3,9}$	$Y_{3,10}$
7	0	8	0	2	5	3	1	2	2

Le Tableau IV-12 présente le coût unitaire de service et le coût unitaire d'émission de pollution généré pour chaque produit livré par le CDU<sub>i</sub>.

Tableau IV-12 : Coût unitaire de service et d'émission de pollution pour chaque CDU

	CDU <sub>1</sub>	CDU <sub>2</sub>	CDU <sub>3</sub>
<b>Coût unitaire de service</b>	15 mu	20 mu	10 mu
<b>Coût unitaire des émissions de pollution</b>	2 mu	1 mu	4 mu

Le coût de pénalité pour un produit reporté est égal à 50 um. Ici, il coûte plus cher que le coût du sous-traitant. Nous remarquons que notre modèle mathématique contient des variables binaires et entières présentant des termes non linéaires. Ces termes apparaissent sur les fonctions objectives et les contraintes.

Nous présentons quelques modifications de notre modèle mathématique pour linéariser ces termes quadratiques et obtenir une programmation linéaire particulière (LP). Ensuite, nous résolvons notre nouveau modèle en utilisant un solveur spécialisé dans la programmation linéaire.

Nous faisons une reformulation des termes quadratiques en utilisant des techniques de linéarisation. Les termes quadratiques de nos modèles sont un produit de variables binaires et entières. Dans notre cas, les variables entières sont bornées. Par conséquent nous allons utiliser la même reformulation décrite précédemment.

Le nouveau problème est appliqué au modèle, ce qui en fait une programmation linéaire facile à résoudre. Les résultats sont présentés dans le Tableau IV-13. Le solveur a trouvé 4 solutions entières. La meilleure solution entière a un coût total pour le plan de distribution optimal égal à 3047 um.

Tableau IV-13 : Plan de distribution optimale d'un CDU avec sa capacité maximale

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Demande</b>	25	17	35	35	22	25	16	20	17	25
<b>Quantité à distribuer</b>	20	17	20	20	20	20	16	20	17	20
<b>Affectation au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
<b>Quantité à sous-traiter au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	1	7	2	0	0	0	0	1
<b>Affectation au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
<b>Quantité à sous-traiter au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	3	8	1	0	0	0	0	0
<b>Affectation au CDU<sub>3</sub></b>	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1
<b>Quantité à sous-traiter au CDU<sub>3</sub></b>	5	0	8	0	2	5	0	0	0	2
<b>Quantité reportée</b>	0	0	3	3	0	0	0	0	0	2

### 2.4.2.2 Étape 2 : Plan de maintenance

Nous supposons que notre système a une loi de dégradation caractérisée par une distribution de Weibull. Les paramètres d'échelle et de forme de Weibull sont  $\beta = 50$  et  $\alpha = 2$ . Les coûts de maintenance préventive et corrective sont respectivement  $M_p = 220$  mu et  $M_c = 1000$  mu. Afin de résoudre le coût de maintenance, nous utilisons le logiciel MATHEMATICA. La Figure IV-5 illustre le coût total de la maintenance en fonction de chaque nombre d'actions de maintenance préventive. Le nombre optimal d'actions de maintenance préventive  $P^*$  est égal à trois. Ainsi, la période optimale d'intervention  $T^*$  est égale à trois. Par conséquent, le coût total de la politique de maintenance est égal à 1638 um.

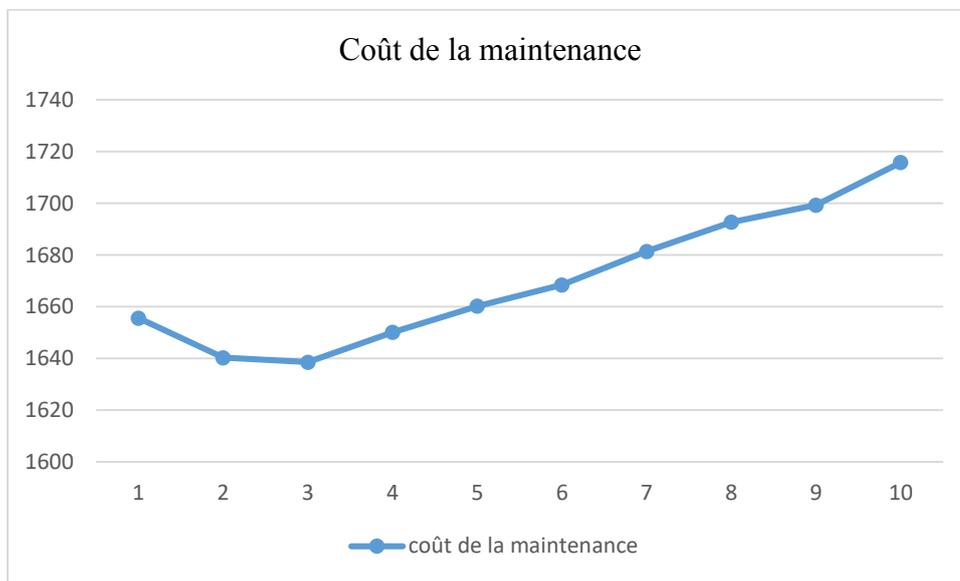


Figure IV-5 : Évolution du coût de la maintenance par rapport au nombre d'actions de maintenances préventives

Considérant alors, soit  $L_p = 1$  et  $L_r = 5$  définissent les capacités perdues par rapport au débit dû respectivement aux actions de maintenances préventives et aux actions de réparations minimales. Le Tableau IV-14 montre la capacité de livraison disponible pour chaque période en tenant compte des effets des actions de maintenance.

Tableau IV-14 : Capacité disponible pour chaque période t

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$
19	18	16	19	18	16	19	18	16	19

### 2.4.2.3 Étape 3 : Le plan de distribution finale et de sous-traitance avec la dégradation du CDU

Nous incorporons les valeurs des capacités disponibles obtenues dans l'étape 2 et nous obtenons les résultats suivants dans le Tableau IV-15. Le coût optimal du transport des

livraisons prenant en compte la stratégie de sous-traitance et les capacités disponibles est égal à 3857 mu.

Tableau IV-15 : Plan de distribution en tenant compte de la variation de la capacité

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Demande</b>	25	17	35	35	22	25	16	20	17	25
<b>Quantité à distribuer</b>	19	17	15	19	18	16	19	18	16	19
<b>Affectation au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1
<b>Quantité à sous-traiter au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	1	7	2	5	0	1	0	1
<b>Affectation au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
<b>Quantité à sous-traiter au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	3	8	4	3	0	0	0	0
<b>Affectation au CDU<sub>3</sub></b>	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1
<b>Quantité à sous-traiter au CDU<sub>3</sub></b>	6	0	8	0	2	5	0	1	1	2
<b>Quantité reportée</b>	0	0	7	8	4	0	0	0	0	3

Nous pouvons remarquer, d'après ces résultats, que la quantité sous-traitée a augmenté et que nous avons plus de quantité retardée dans la période finale. Ceci est dû à la diminution de la valeur des capacités disponibles à cause des pannes et des actions de maintenance. Néanmoins, les actions de maintenance préventive augmentent les capacités disponibles pour le taux de livraison. En conséquence, le coût de la distribution des livraisons a augmenté de 810 mu. Sans utiliser la stratégie de sous-traitance, le coût du transport serait égal à 21.080 selon le Tableau IV-16. Par conséquent, il est plus avantageux sur le plan économique d'adopter la stratégie de sous-traitance avec plusieurs CDU.

Tableau IV-16 : Plan de distribution en tenant compte de la variation de la capacité sans tenir compte de la stratégie de sous-traitance

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Demande</b>	25	17	35	35	22	25	16	20	17	25
<b>Quantité à distribuer</b>	19	17	15	19	18	16	19	18	16	19
<b>Affectation au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Affectation au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Affectation au CDU<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Quantité reportée</b>	6	5	24	40	44	53	50	52	53	59

Notre approche présente des résultats efficaces dans le traitement des variables identifiées. Cependant, ces variables sont limitées en nombre et la croissance des données et des exigences peuvent compliquer la réactivité et l'efficacité de notre modèle mathématique.

## 2.5 Conclusion

Dans cette section, nous avons étudié la stratégie de distribution et la stratégie de maintenance d'un seul CDU qui subit des indisponibilités aléatoires. Afin de satisfaire la demande à chaque période et d'augmenter l'efficacité de ce centre, nous intégrons la stratégie de maintenance et de sous-traitance avec d'autres CDU (1/N ou n/N), lorsque la demande dépasse sa capacité disponible de livraison ou face à des imprévus qui rendent le centre OUT OF SERVICE. Ainsi,

une collaboration avec d'autres CDU et une augmentation de la qualité de service seront réalisées.

Donc, notre approche est basée sur un modèle mathématique pour un plan de distribution avec des critères économiques en utilisant la stratégie de sous-traitance. Et afin d'augmenter la disponibilité de ce CDU, nous avons planifié des actions de maintenances préventives. A cette fin, nous avons commencé par évaluer le cas d'un CDU qui ne peut affecter ses livraisons qu'à un seul CDU, c'est-à-dire  $1/N$ . Le choix va ainsi dépendre du coût de la sous-traitance ainsi que de la capacité disponible. Par la suite, nous avons examiné le même problème en ajoutant la possibilité de collaborer avec plusieurs CDU ( $n/N$ ), en tenant compte des critères environnementaux pour choisir entre eux afin d'améliorer la flexibilité. Ce dernier cas a pu dégager des avantages supplémentaires en minimisant plus les quantités reportées.

La modélisation ainsi que les résultats obtenus nous ont permis d'étudier une partie du problème global  $N/N$  « Mutli CDU & multi affectation ». Par conséquent, nous pouvons maintenant étendre ce modèle en considérant un plan de distribution pour  $N/N$  Centres de Distribution Urbains et une collaboration inter-CDU. Donc toutes les capacités disponibles des  $N/N$  CDU seront des variables. De plus, nous déterminerons leurs nombres optimaux de maintenances préventives pour chaque centre.

### **3 Le plan de distribution corrélé à un plan de maintenance pour $N/N$ CDU utilisant la stratégie de sous-traitance**

Ici, les  $N/N$  CDU doivent aussi répondre à la demande de chaque commerçant dans une zone urbaine allouée pendant un horizon de distribution fini. Nous supposons qu'il existe un seul type de produit, que la demande est connue d'avance à chaque période  $t$  et qu'elle peut dépasser la capacité de livraison de chaque CDU.

La collaboration aura lieu lorsqu'au minimum un CDU ne peut pas satisfaire la totalité ou une partie de la demande au cours de la période  $t$ . L'indisponibilité peut se produire lorsque le taux de distribution est insuffisant ou pendant une période de maintenance préventive ou corrective. Chaque site subit des indisponibilités aléatoires, des réparations et des activités de maintenance. Par conséquent, le site indisponible peut appeler les autres CDU afin de satisfaire la totalité de la demande. Le sous-traitant peut-être parmi  $n/N$  possibilités de CDU. Chaque CDU propose deux coûts : le coût unitaire de transport et le coût unitaire des émissions de pollution. Donc le critère de choix dépend d'un critère économique et d'un critère environnemental. Une pénalité peut être payée si la demande dépasse la somme de la capacité du CDU concerné et les autres CDU.

Dans cette étude, l'horizon de planification est aussi divisé en  $H$  périodes égales. Chaque période est notée  $t$ ,  $t = \{1, 2, \dots, H\}$ . Les paramètres suivants sont utilisés dans la formulation mathématique du modèle. La Figure IV-6 illustre la structure de notre approche.

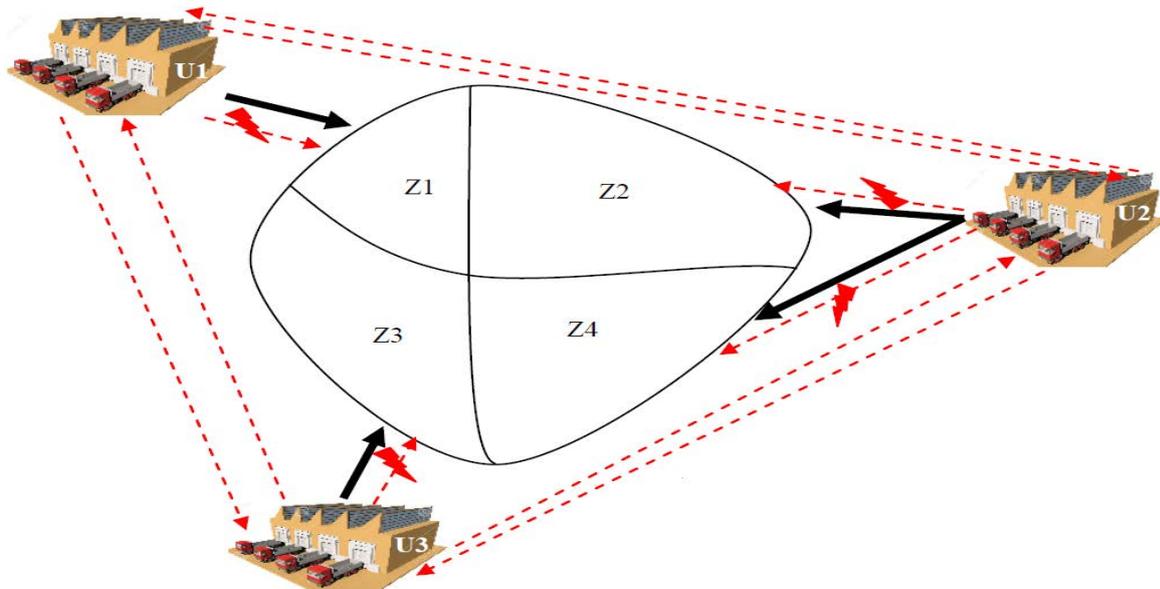


Figure IV-6 : Description du problème

### 3.1 Modélisation mathématique du problème

#### 3.1.1 Paramètres

$N$  : Nombre de CDU,  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$

$H$  : Nombre de périodes

$C_t$  : Coût de transport d'un produit du CDU vers la zone allouée

$C_{tr_{ij}}$  : Coût de sous-traitance d'un produit  $CDU_i$  vers le  $CDU_j$

$C_{p_j}$  : Coût des émissions générées par la sous-traitance d'une unité d'un  $CDU_i$  vers le  $CDU_j$

$C_p$  : Coût d'un produit livré en retard

$Y_{it}$  : Capacité disponible en nombre de produits à livrer de chaque  $CDU_i$  pendant une période  $t$

$d_{it}$  : Demande de  $CDU_i$  pendant chaque période

$C_{i_{max}}$  : Capacité maximale en nombre de produits à livrer du  $CDU_i$

$D_{it}$  : Somme entre la demande de chaque période  $t$  et la quantité retardée à  $(t-1)$  du  $CDU_i$

$Lp_i$  : Quantité de capacité réduite due à une action de maintenance préventive du  $CDU_i$

$Lr_i$  : Quantité de capacité réduite due à une action de maintenance corrective  $CDU_i$

$M_p$  : Coût de maintenance préventive

$M_c$  : Coût de maintenance corrective

$\lambda_{it}(k)$  : Taux d'indisponibilité du  $CDU_i$

$\Delta t$  : Longueur d'une seule période

$\lambda_{in}(t)$  : Taux d'indisponibilité nominale du  $CDU_i$

um : unité monétaire

### 3.1.2 Variables de décisions

$x_{it}$  : Quantité en produits livrées par le CDU<sub>i</sub> pendant la période t

$y_{ijt}$  : Quantité en produits sous-traités par le CDU<sub>i</sub> et livrés par le CDU<sub>j</sub> pendant la période t

$Q_{it}$  : Quantité de produits reportés du CDU<sub>i</sub> pendant la période t

$AF_{ijt} = 1$  si CDU<sub>i</sub> à sous-traiter des livraisons au CDU<sub>j</sub> pendant la période t, 0 sinon

$P_i$  : Nombre optimale des actions de maintenances préventives optimales pour le CDU<sub>i</sub>

$T_i$  : période optimale de l'action de maintenance préventive pour le CDU<sub>i</sub>

$\zeta_{iM}(x, P)$  : Nombre moyen d'indisponibilités pour le CDU<sub>i</sub>

Nous supposons que chaque CDU<sub>i</sub> a une capacité maximale  $C_{\max}$  en nombre de produits à livrer. Néanmoins, il peut être affecté par l'action de maintenance et sera égale à  $C_{it}$  pour chaque période t.

Ainsi, l'objectif est d'identifier le nombre des livraisons  $x_{it}$  transportées depuis le CDU<sub>i</sub> et le nombre des livraisons sous-traitées de CDU<sub>i</sub> vers le CDU<sub>j</sub> ( $y_{ijt}$ ) pendant la période t.

Un retard de livraison  $Q_{it}$  peut être envisagé si la demande dépasse la capacité du CDU<sub>i</sub> concerné et la somme des capacités disponibles des autres CDU. Cette quantité doit être satisfaite à la prochaine période, et la pénalité sera payée pour chaque produit reporté. Par conséquent, la demande  $d_{it}$  dans chaque période sera mise à jour en ajoutant la quantité retardée et sera égale à  $D_{it}$ .

De même, notre modèle tient compte du fait que chaque CDU<sub>i</sub> subit des indisponibilités aléatoires. Une maintenance préventive périodique et une réparation minimale en cas d'indisponibilité seront effectuées. Le but ici est d'identifier le nombre d'actions de maintenance préventive  $P_i$  au cours de l'horizon H pour chaque CDU<sub>i</sub>.

### 3.1.3 Modélisation mathématique de la planification de la distribution en tenant compte de la sous-traitance

L'objectif est de minimiser le coût de la distribution, de la sous-traitance et du retard sur un horizon temporel fini  $[0, H]$  pour tous les CDU.

Par conséquent, il y a trois scénarios possibles :

- Le premier stipule que le CDU<sub>i</sub> ( $i = \{1, 2, \dots, N\}$ ) peut assumer toutes les livraisons.
- Le deuxième scénario, le  $i$  ème site ne peut pas satisfaire la totalité de la demande et appellera au moins un autre CDU<sub>j</sub> ( $j = \{1, 2, \dots, N\}, i \neq j$ ) pour compléter le reste.
- Le troisième scénario aura lieu quand la capacité disponible de CDU<sub>i</sub> et des autres CDU<sub>j</sub> ( $j = \{1, 2, \dots, N\}, i \neq j$ ) affectés ne pourra pas satisfaire la totalité de la demande, et qu'une partie de la demande sera reprogrammée pour la période suivante et qu'il y aura des pénalités à payer.

Par ailleurs, le choix de CDU<sub>j</sub> ( $j = \{1, 2, \dots, N\}, i \neq j$ ) dépendra de la capacité disponible, du coût de la sous-traitance et de l'impact environnemental.

L'expression du coût total de la distribution du transport est exprimée comme suit :

$$C_d = \min \left\{ \sum_t \sum_i C_t \times x_{it} + \sum_t \sum_i \sum_j (C_{tr_{ij}} + C_{p_{ij}}) \times y_{ijt} \times AF_{ijt} + \sum_t \sum_i C_p \times Q_{it} \right\} \quad (76)$$

La contrainte suivante définit que la quantité délivrée par le CDU<sub>i</sub> à la zone urbaine allouée à la période t ne peut pas dépasser la capacité de livraison disponible pour chaque période t, et qu'elle doit être positive.

$$0 \leq x_{it} \leq C_{it} \quad \forall t \in H, \forall i \in N \quad (77)$$

L'équation suivante calcule la quantité reportée pour le CDU<sub>i</sub> comme la différence entre la demande pendant la période t et les capacités en livraison restante du CDU<sub>i</sub> et les autres CDU<sub>j</sub> affectés.

$$Q_{it} = \max[0, D_{it} - x_{it} - \sum_j y_{ijt} \times AF_{ijt}] \quad \forall i \in N, \forall t \in H \quad (78)$$

Cette équation donne la valeur de la demande actualisée dans la période t + 1 comme la somme entre la demande dans la période t + 1 et le produit retardé dans la période précédente.

$$D_{i,t+1} = d_{i,t+1} + Q_{i,t} \quad \forall t \in H, \forall i \in N \quad (79)$$

Par la suite, la capacité disponible après la satisfaction de la livraison sera calculée comme suit :

$$Y_{it} = \max[0, C_{i_{\max}} - D_{it}] \quad \forall t \in H, i \in N$$

La quantité sous-traitée pour le CDU<sub>j</sub> dans la période t ne peut pas dépasser un certain seuil de disponibilité dans la période t.

$$0 \leq \sum_i AF_{ijt} \times y_{ijt} \leq Y_{jt} \quad \forall t \in H, i \in N, j \in N, i \neq j \quad (80)$$

La contrainte suivante définit que chaque CDU<sub>i</sub> principal peut sous-traiter ses livraisons avec d'autres CDU<sub>j</sub> au plus N/N avec  $i \neq j$  pendant chaque période t.

$$\sum_j AF_{ijt} \leq N \quad \forall t \in H, \forall i \in N \quad (81)$$

Cette équation définit les variables binaires :

$$AF_{ijt} \in \{0, 1\} \quad (82)$$

Cette équation définit des variables entières :

$$Q_{it}, x_{it}, y_{ijt} \text{ entiers} \quad (83)$$

### 3.1.4 Modélisation mathématique de la stratégie de maintenance

L'idée est ainsi de développer une stratégie de maintenance optimale en considérant la dégradation de la disponibilité pour les N/N CDU en fonction du plan de distribution définit ci-dessus. L'objectif est de déterminer le nombre optimal d'actions de maintenance préventive tout en minimisant le coût total de maintenance. La connaissance de ce nombre nous permet de déduire les capacités disponibles pour chaque période t.

La stratégie de maintenance adoptée ici est la politique de maintenance préventive avec une réparation minimale en cas d'indisponibilité. Une maintenance préventive parfaite est effectuée périodiquement et rend le système comme neuf "As good As New". Lorsque le site est indisponible entre deux actions de maintenance préventives successives, seule une réparation minimale est mise en œuvre, qui restaure le système au même état qu'avant la panne.

Ici, nous supposons que les temps de réparations et d'actions de maintenance préventives sont négligeables. Pour chaque période  $t$ , nous déterminons la quantité à livrer  $x_{it}$  dans le plan de distribution optimale. Ainsi, le taux d'indisponibilité est calculé selon cette quantité et cette dernière est cumulative dans le début de chaque intervalle  $[0, \Delta t]$ . A chaque action de maintenance, actions préventives et/ou correctives, il est consommé un certain pourcentage de ce taux de distribution. Ainsi, la maintenance préventive et la maintenance corrective consomment respectivement :

$$Lp_i = a \times C_{i\max} \text{ et } Lr_i = b \times C_{i\max}.$$

L'expression analytique du coût total de la maintenance pour chaque CDU <sub>$i$</sub>  est exprimée comme suit :

$$C_{iM}(x_i, P_i) = M_p \times (P_i - 1) + M_c \times \zeta_{iM}(x_i, P_i) \quad (84)$$

où  $P_i \in \{1, 2, 3, \dots\}$  correspond au nombre d'actions de maintenances préventives du CDU <sub>$i$</sub>  et  $\zeta_{iM}(x_i, P_i)$  correspond au nombre moyen des indisponibilités du CDU <sub>$i$</sub>  qui se produisent pendant l'horizon.

D'où le nombre moyen de pannes qui s'exprime comme suit :

$$\zeta_{iM}(x_i, P_i) = \sum_{j=1}^t \int_0^{\Delta t} \lambda_{ij}(k) dk \quad (85)$$

De plus, le taux d'indisponibilité du CDU principal augmente à chaque période en raison du plan de distribution. Dans cette partie, nous nous sommes inspirés du travail de Hajej et al. (2011) où l'indisponibilité dans l'intervalle  $k$  varie selon le taux de distribution et il est cumulatif au début de chaque période :

$$\lambda_{it}(k) = \lambda_{i,t-1}(\Delta t) + \frac{x_{it}}{C_{i\max}} \lambda_{in}(k) \quad \forall k \in [0, \Delta t], \forall i \in [1, N] \quad (86)$$

avec  $\lambda_{i0}(k=0) = \lambda_0$  et  $\Delta \lambda_{it}(k) = \frac{x_{it}}{C_{i\max}} \lambda_{in}(k)$  où  $\lambda_{in}(k)$  est le taux d'indisponibilité

nominale correspondent à une distribution maximale.

La seule variable de décision dans cette politique périodique est le nombre optimal d'actions de maintenance préventive  $P_i^*$ . Par la suite, nous pouvons déterminer la longueur de la période optimale  $T_i^*$  avec  $T_i^* = H/P_i^*$ .

Par conséquent, le nombre moyen d'indisponibilités, en utilisant la formule du taux d'indisponibilité, est :

$$\zeta_{iM}(x_{it}, P_i) = \sum_{j=0}^{P_i-1} \left[ \sum_{m=\ln\left(\frac{j \times T_i}{\Delta t}\right)+1}^{\ln\left(\frac{(j+1) \times T_i}{\Delta t}\right)} \int_0^{\Delta t} \lambda_{im}(k) dk + \int_0^{(j+1) \times T_i - \ln\left(\frac{(j+1) \times T_i}{\Delta t}\right) \times \Delta t} \lambda_{i, \ln\left(\frac{(j+1) \times T_i}{\Delta t}\right)+1}(k) dk + \int_{(j+1) \times T_i}^{\ln\left(\frac{(j+1) \times T_i}{\Delta t}\right)+1} \times \Delta t \frac{\left(\ln\left(\frac{(j+1) \times T_i}{\Delta t}\right)+1\right)}{C_{i, \max}} \times \lambda_n(k) dk \right] \quad (87)$$

(87)

Nous supposons que chaque action de maintenance corrective et/ou préventive réduit le taux de livraison disponible du CDU. Par conséquent, la capacité disponible en nombre d'unités à livrer pour chaque période est définie comme suit :

Si l'action de maintenance préventive s'effectue à la période t

$$\begin{cases} C_{it} = C_{i, \max} - Lp_i - Lr_i \times \int_0^{\Delta t} \lambda_i(u + (t-1 - (n-1)k)\Delta t) du \\ Si \quad t = n \times k \quad \forall n = \{1, \dots, P_i\} \end{cases} \quad (88)$$

Dans d'autre cas,  $C_t$  s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} C_{it} = C_{i, \max} - Lr_i \times \int_0^{\Delta t} \lambda_i(u + (t-1 - (n-1)k)\Delta t) du \\ Si \quad (n-1)k + 1 \leq t \leq n \times k - 1 \quad \forall n = \{1, \dots, P_i\} \end{cases} \quad (89)$$

### 3.2 Exemple numérique

Dans cette section, nous déterminerons un plan de distribution en tenant compte de la possibilité d'externaliser la totalité et / ou une partie de la demande vers d'autres CDU. Nous calculons aussi le nombre optimal d'actions de maintenance ainsi que la capacité disponible pour la livraison de chaque site. Nous adoptons la même stratégie séquentielle utilisée précédemment pour résoudre le problème par étape :

- Étape 1 : Résoudre le modèle mathématique de distribution globale pour tous les CDU en tenant compte de la possibilité de sous-traiter et en supposant que la capacité disponible est maximale pour chaque période et pour chaque CDU.
- Étape 2 : Identifier le nombre optimal des actions de maintenances préventives et calculer la capacité disponible pour chaque période et pour chaque CDU.
- Étape 3 : Intégrer ces capacités dans le modèle de distribution pour obtenir le plan final de distribution globale.

#### 3.2.1 Étape 1 : Plan de distribution et de la sous-traitance sans tenir compte de la dégradation du CDU

Nous considérons trois CDU qui doivent répondre à une demande définie dans le Tableau IV-17 pour le CDU<sub>1</sub>, dans le Tableau IV-18 pour le CDU<sub>2</sub> et dans le Tableau IV-19 pour le CDU<sub>3</sub>.

Tableau IV-17 : Demande de chaque période pour le CDU<sub>1</sub>

<b>t</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>d<sub>t</sub></b>	25	17	35	35	22	25	16	20	17	25

Tableau IV-18 : Demande de chaque période pour le CDU<sub>2</sub>

<b>t</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>d<sub>t</sub></b>	20	17	15	13	22	25	14	10	17	13

Tableau IV-19 : Demande de chaque période pour le CDU<sub>3</sub>

<b>t</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>d<sub>t</sub></b>	12	15	15	15	17	13	14	18	20	12

Le coût de transport unitaire est égal à 10 um. Dans cette étape, la capacité maximale de livraison pour chaque site est décrite dans le Tableau IV-20.

Tableau IV-20 : Les capacités maximales de chaque CDU

<b>CDU<sub>1</sub></b>	<b>CDU<sub>2</sub></b>	<b>CDU<sub>3</sub></b>
25	20	15

En ce qui concerne la stratégie de sous-traitance, chaque CDU a la possibilité de sous-traiter à deux autres CDU pour compléter le service, si nécessaire. Ainsi, nous identifions les coûts de sous-traitance du CDU<sub>i</sub> ( $i = \{1, 2, \dots, N\}$ ) vers le CDU<sub>j</sub> ( $j = \{1, 2, \dots, N\}, i \neq j$ ) dans le Tableau IV-21.

Tableau IV-21 : Les différents coûts de sous-traitance

	<b>CDU<sub>1</sub></b>	<b>CDU<sub>2</sub></b>	<b>CDU<sub>3</sub></b>
<b>CDU<sub>1</sub></b>	0	20	35
<b>CDU<sub>2</sub></b>	20	0	35
<b>CDU<sub>3</sub></b>	20	35	0

Pour un produit reporté à la période suivante, le coût de pénalité est égal à 50 um. Le nombre de périodes H est égal à 10.

Notre modèle mathématique contient des produits de variables de décisions binaires et entières, ce qui rend le programme est non linéaire. Ces termes apparaissent sur les fonctions objectives et les contraintes. Ainsi, nous présentons d'abord la reformulation de notre modèle en une programmation linéaire particulière. Ensuite, nous résolvons ce nouveau modèle en utilisant le solveur spécialisé dans la programmation linéaire. Ces termes apparaissent en bleu dans les fonctions suivantes :

$$Cd = \min \left\{ \sum_t \sum_i Ct \times x_{it} + \sum_t \sum_i \sum_j (Ctr_{ij} + Cp_{ij}) \times y_{ijt} \times AF_{ijt} + \sum_t \sum_i Cp \times Q_{it} \right\} \quad (76)$$

$$Q_{it} = \max[0, D_{it} - x_{it} - \sum_j y_{ijt} \times AF_{ijt}] \quad (78)$$

$$0 \leq \sum_i y_{ijt} \times AF_{ijt} \leq Y_{jt} \quad \forall t \in H, i \in N, j \in N, i \neq j \quad (80)$$

$AF_{ijt}$  est une variable binaire  $y_{ijt}$  est une variable entière et bornée :

$$0 \leq y_{ijt} \leq Y_{jt} \quad \forall t \in H \quad i \in L$$

Ensuite, nous introduisons une nouvelle variable :

$$B_{ijt} = y_{ijt} \times AF_{ijt} \quad \forall t \in H \quad i \in L$$

En outre, nous avons ajouté d'autres inégalités pour valider la nouvelle variable comme suit :

$$B_{ijt} \leq Y_{jt} \times AF_{ijt} \quad \forall t \in H \quad i \in L \quad (90)$$

$$B_{ijt} \geq 0 \quad \forall t \in H \quad i \in L \quad (91)$$

$$B_{ijt} \leq y_{ijt} \quad \forall t \in H \quad i \in L \quad (92)$$

Maintenant, le nouveau problème est appliqué au programme, ce qui en fait une programmation linéaire facile à résoudre. Les résultats sont présentés dans le Tableau IV-22, le Tableau IV-23 et le Tableau IV-24. Le solveur a trouvé 5 solutions entières. La meilleure solution entière a un coût total pour le plan global de distribution optimale égal à 7170 um.

Le Tableau IV-22 indique le plan de distribution d'affectation et les quantités reportées pour le CDU<sub>1</sub>.

Tableau IV-22 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU<sub>1</sub>

CDU <sub>1</sub>										
<b>Demande</b>	25	17	35	35	22	25	16	20	17	25
<b>Plan de distribution</b>	25	17	25	25	25	25	19	20	17	25
<b>Affectation au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	5	7	0	0	0	0	0	0
<b>Affectation au CDU<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<b>Quantité reportée</b>	0	0	5	8	5	3	0	0	0	0

Le Tableau IV-23 indique le plan de distribution d'affectation et les quantités reportées pour le CDU<sub>2</sub>.

Tableau IV-23 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU<sub>2</sub>

CDU <sub>2</sub>										
<b>Demande</b>	20	17	15	13	22	25	14	10	17	13
<b>Plan de distribution</b>	20	17	15	13	20	20	17	10	17	13
<b>Affectation au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
<b>Affectation au CDU<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<b>Quantité reportée</b>	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0

Le Tableau IV-24 indique le plan de distribution d'affectation et les quantités reportées pour le CDU<sub>3</sub>.

Tableau IV-24 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU<sub>3</sub>

CDU <sub>3</sub>										
<b>Demande</b>	12	15	15	15	17	13	14	18	20	12
<b>Plan de distribution</b>	12	15	15	15	15	13	14	15	15	12
<b>Affectation au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	0	0	2	0	0	3	5	0
<b>Affectation au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Quantité reportée</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nous pouvons remarquer que l'adoption de la stratégie de sous-traitance nous a permis d'éviter le report de quelques livraisons. Pour cette raison, nous avons simulé notre programme sans intégrer la sous-traitance et nous avons obtenu un coût plus élevé qui est égale à 10640 um, ce qui montre l'apport de cette stratégie.

### 3.2.2 Etape 2 : Plan de maintenance

Dans cet exemple numérique, nous supposons que la disponibilité de chaque système suit une loi de dégradation caractérisée par une distribution de Weibull. Les paramètres d'échelle et de forme de Weibull sont  $\beta = 50$  et  $\alpha = 2$ . Les coûts de maintenance préventive et corrective sont respectivement  $M_p = 220$  um,  $M_c = 1000$  um. Afin de résoudre le coût de maintenance, nous avons utilisé le logiciel MATHEMATICA. La résolution de cette politique périodique adoptée s'effectue en incrémentant le nombre d'intervalles de maintenance jusqu'à trouver  $P_i^*$ .

#### Les résultats obtenus pour le CDU<sub>1</sub>

La Figure IV-7 décrit le coût total de maintenance en fonction du nombre d'actions de maintenance préventive pour le CDU<sub>1</sub>. Nous concluons que le nombre optimal de maintenances préventives  $P$  est égal à 3. Ainsi, la période optimale d'intervention  $T^*$  est égale à 3. Le coût total de maintenance est donc égal à 1637 um.

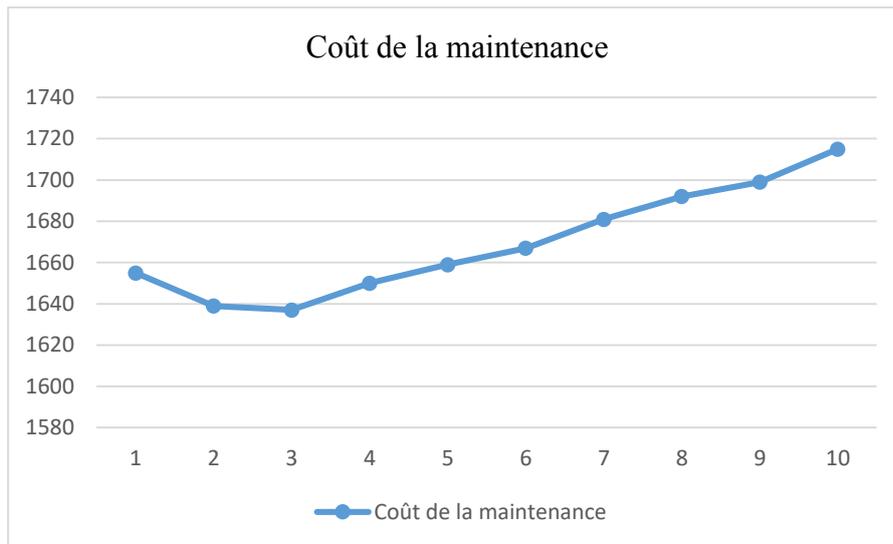


Figure IV-7 : Évolution du coût de la maintenance par rapport au nombre d'actions de maintenances préventives pour le CDU<sub>1</sub>

Lp est égal à 3 unités perdues en cas d'action de maintenance préventive et Lr est égal à 7 unités définissant les capacités perdues en raison des actions de maintenance. Le Tableau IV-25 montre les capacités de livraisons disponibles pour chaque période en tenant compte des effets des actions de maintenance.

Tableau IV-25 : Taux de livraison disponible pour le CDU<sub>1</sub> pendant chaque période

C <sub>1,1</sub>	C <sub>1,2</sub>	C <sub>1,3</sub>	C <sub>1,4</sub>	C <sub>1,5</sub>	C <sub>1,6</sub>	C <sub>1,7</sub>	C <sub>1,8</sub>	C <sub>1,9</sub>	C <sub>1,10</sub>
25	23	19	25	24	20	25	25	21	25

### Les résultats obtenus pour le CDU<sub>2</sub>

La Figure IV-8 décrit le coût total de maintenance en fonction du nombre d'actions de maintenance préventive pour le CDU<sub>2</sub>. Nous concluons que le nombre optimal de maintenances préventives P est égal à 2. Ainsi, la période optimale d'intervention T\* est égale à 5. Le coût total de maintenance est donc égal à 1629 um.

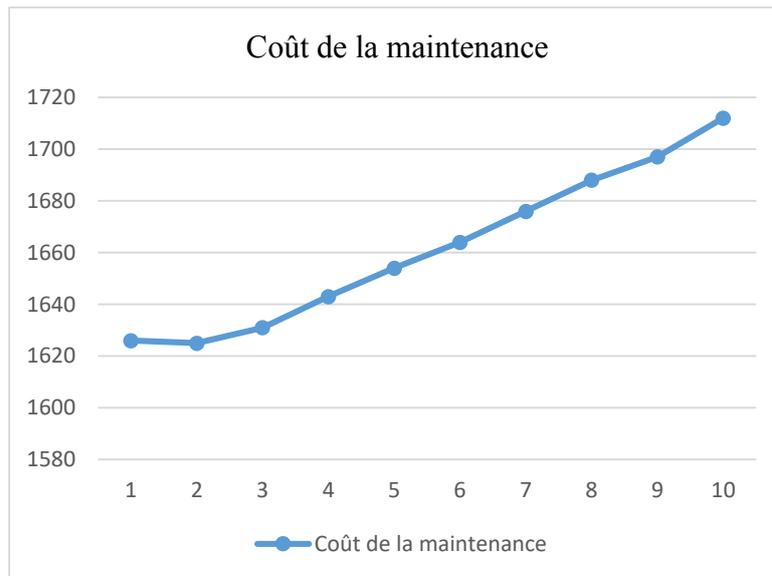


Figure IV-8 : Évolution du coût de la maintenance par rapport au nombre d'actions de maintenances préventives pour le CDU<sub>2</sub>

Lp est égale à 2 unités perdues en cas d'action de maintenance préventive et Lr est égale à 5 unités définissant les capacités perdues en raison des actions de maintenance. Le Tableau IV-26 montre les capacités de livraisons disponibles pour chaque période en tenant compte des effets des actions de maintenance.

Tableau IV-26 : Taux de livraison disponible pour CDU<sub>2</sub> pendant chaque période

C <sub>2,1</sub>	C <sub>2,2</sub>	C <sub>2,3</sub>	C <sub>2,4</sub>	C <sub>2,5</sub>	C <sub>2,6</sub>	C <sub>2,7</sub>	C <sub>2,8</sub>	C <sub>2,9</sub>	C <sub>2,10</sub>
20	19	18	17	11	20	20	19	19	13

### Les résultats obtenus pour CDU<sub>3</sub>

La Figure IV-9 décrit le coût total de maintenance en fonction du nombre d'actions de maintenance préventive pour le CDU<sub>3</sub>. Nous concluons que le nombre optimal de maintenance préventive P\* est égal à 2. Ainsi, la période optimale d'intervention T\* est égale à 5. Le coût total de maintenance est donc égal à 1625um.

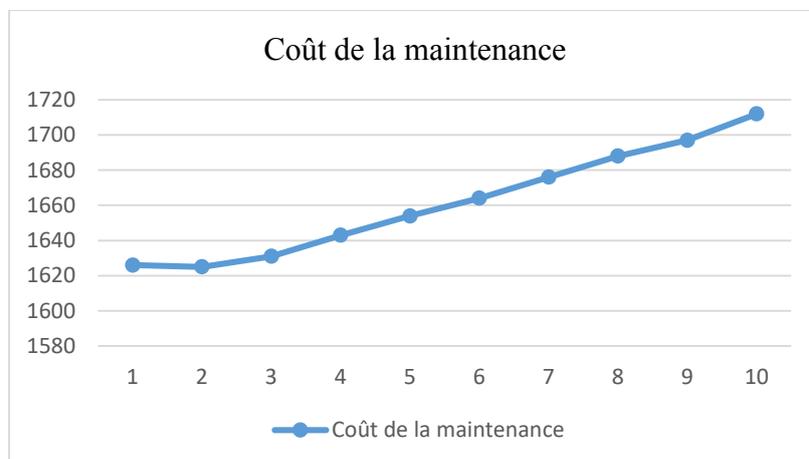


Figure IV-9 : Évolution du coût de la maintenance par rapport au nombre d'actions de maintenance préventives pour CDU<sub>3</sub>

Lp est égale à 1 unité perdue en cas d'action de maintenance préventive et Lr est égale à 3 unités définissant les capacités perdues en raison des actions de maintenance. Le Tableau IV-27 montre les capacités de livraisons disponibles pour chaque période en tenant compte des effets des actions de maintenance.

Tableau IV-27 : Taux de livraison disponible pour le CDU<sub>3</sub> pendant chaque période

C <sub>3,1</sub>	C <sub>3,2</sub>	C <sub>3,3</sub>	C <sub>3,4</sub>	C <sub>3,5</sub>	C <sub>3,6</sub>	C <sub>3,7</sub>	C <sub>3,8</sub>	C <sub>3,9</sub>	C <sub>3,10</sub>
15	14	13	12	8	15	15	14	14	10

### 3.2.3 Étape 3 : Plan de distribution finale utilisant la stratégie de sous-traitance

Nous injectons les valeurs des capacités disponibles calculées dans l'étape 2 dans notre programme. Les résultats sont détaillés dans les tableaux Tableau IV-28, Tableau IV-29 & Tableau IV-30. Le coût optimal de transport des livraisons en tenant compte de la stratégie de commutation et des capacités disponibles est égal à 16980 um.

Le tableau ci-dessous indique le plan de distribution d'affectation et les quantités reportées pour le CDU<sub>1</sub>.

Tableau IV-28 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU1

CDU <sub>1</sub>										
<b>Demande</b>	25	17	35	35	22	25	16	20	17	25
<b>Plan de distribution</b>	25	17	19	25	24	20	25	24	17	25
<b>Affectation au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	3	4	0	0	6	0	0	0
<b>Affectation au CDU<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0
<b>Quantité reportée</b>	0	0	13	19	17	20	4	0	0	0

Le tableau ci-dessous indique le plan de distribution d'affectation et les quantités reportées pour le CDU<sub>2</sub>.

Tableau IV-29 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU2

CDU <sub>2</sub>										
<b>Demande</b>	20	17	15	13	22	25	14	10	17	13
<b>Plan de distribution</b>	20	17	15	13	11	20	20	10	17	13
<b>Affectation au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>1</sub></b>	0	0	0	0	2	0	6	0	0	0
<b>Affectation au CDU<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<b>Quantité reportée</b>	0	0	0	0	9	12	0	0	0	0

Le tableau ci-dessous indique le plan de distribution d'affectation et les quantités reportées pour le CDU<sub>3</sub>.

Tableau IV-30 : Plan de distribution avec capacité maximale du CDU3

CDU <sub>3</sub>										
<b>Demande</b>	12	15	15	15	17	13	14	18	20	12
<b>Plan de distribution</b>	12	14	13	12	8	15	15	14	14	10
<b>Affectation au CDU<sub>1</sub></b>	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>1</sub></b>	0	1	0	0	2	0	4	4	4	0
<b>Affectation au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Quantité sous-traitée au CDU<sub>2</sub></b>	0	0	2	3	0	0	0	0	2	0
<b>Quantité reportée</b>	0	0	0	0	7	5	0	0	0	2

Nous pouvons remarquer, en fonction des résultats, que la quantité sous-traitée a augmenté. Ceci est dû à la diminution de la valeur des capacités disponibles. Par conséquent, le coût de distribution des livraisons a doublé. Néanmoins, la non-adoption de la stratégie de la sous-traitance augmentera le coût de distribution qui sera égal à 35390 um, étant donné que la quantité sous-traitée sera reportée avec des pénalités à payer. Par conséquent, le coût devient 3 fois supérieur au coût de la stratégie de sous-traitance.

#### 4 Notre synthèse entre les différents scénarios

Dans ce chapitre, nous avons étudié trois scénarios. Le premier consiste à proposer un plan de distribution assorti à un plan de maintenance dans le cadre d'un seul CDU qui peut assurer les livraisons d'un autre CDU en cas de son indisponibilité. Il s'agit du scénario « 1/N ». Dans le deuxième scénario, nous avons étendu le précédent scénario au « m/N » ce qui permettra à un CDU de collaborer avec plusieurs CDU pour plus de flexibilité en le définissant comme le problème « m/N ». Avec le troisième scénario, nous avons étudié le problème global dit « N/N » qui consiste à traiter plusieurs CDU qui peuvent collaborer entre eux tout en tenant compte de leurs indisponibilités.

Ces trois scénarios peuvent être classés selon quatre critères (voir Tableau IV-31):

- Caractéristique 1 : Nombre de combinaisons possibles entre les différents CDU.
- Caractéristique 2 : Nombre de variables de décisions dans le modèle mathématique de distribution sachant que N est le nombre de CDU et H est le nombre de périodes.
- Caractéristique 3 : Temps d'exécution pour résoudre le modèle mathématique final pour le cas (N=3) et (N=4).

Tableau IV-31 : Les caractéristiques de chaque problématique proposée

Scénario	Caractéristique 1	Caractéristique 2	Caractéristique 3(N=3)	Caractéristique 3 (N=4)
1/N	N-1	2H×(N+1)	0,2 secondes	0,3 secondes
m/N	$\frac{(N-m)!}{m!}$	2H×(N+1)	0,3 secondes	0,4 secondes
N/N	$\frac{(N-m)!}{m!}$	2HN×(N+1)	0,4 secondes	0,6 secondes

D'après la figure nous constatons que le temps d'exécution augmente linéairement par rapport au nombre de CDU traité. Le problème est ainsi résolu en temps polynomial.

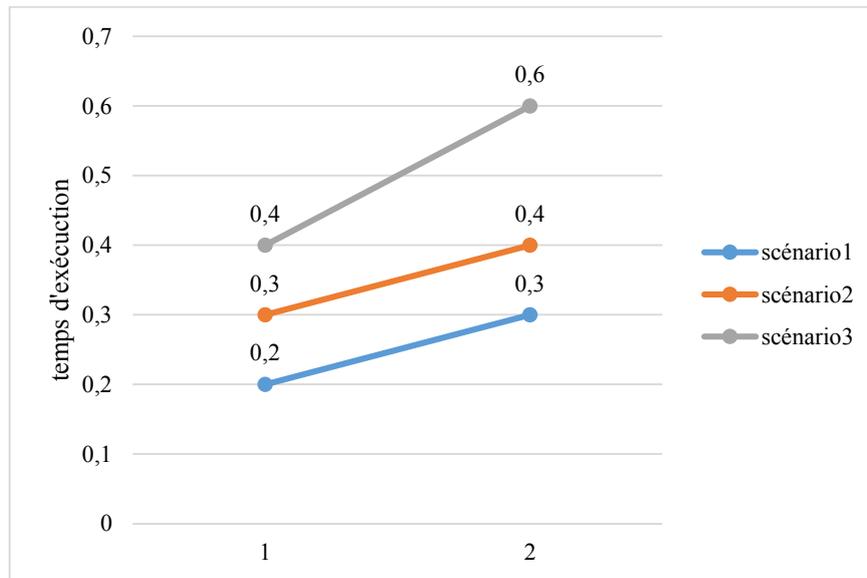


figure IV-10:Evolution du temps d'exécution pour la résolution du modèle mathématique de distribution.

Le tableau Tableau IV-32 identifie les avantages et inconvénients de chaque problématique.

Tableau IV-32 : Avantages et inconvénients de chaque scénario

Scénario	Avantages	Inconvénients
1/N	Moins de flux logistiques à gérer avec les autres CDU. Elle garantit une collaboration partielle.	Moins de flexibilité et donc plus de quantités reportées.
m/N	Moins de report que le premier scénario. Plus de flexibilité.	Plus de sous-traitants à gérer en même temps.
N/N	Plus de communication et collaboration. Plus efficace que les scénarios 1 & 2. Plus de flexibilité que le premier scénario.	Un scénario plus complexe à traiter (plus de combinaison et plus de variables de décisions).

## 5 Conclusion

Nous avons présenté une planification de la distribution des CDU sachant que chaque site subit des indisponibilités aléatoires impactant la capacité de livraison. Afin de rendre ces CDU plus efficaces en termes de disponibilité dans chaque période, nous présentons une approche collaborative intégrant la possibilité pour les N/N CDU de communiquer entre eux et d'adopter une stratégie de sous-traitance inter-CDU, lorsque la demande dépasse la capacité disponible. Des actions de maintenances préventives ont aussi été planifiées afin d'augmenter la capacité de livraisons.

Notre approche est basée sur un modèle mathématique pour un plan de distribution avec des critères économiques et environnementaux. Les modèles mathématiques proposés considèrent également les capacités disponibles et les contraintes d'affectation. Le choix de CDU à sous-

traiter dépend du coût du service, du coût environnemental et des capacités disponibles. Pour la stratégie de maintenance, une réparation minimale et une action de maintenance préventive périodique parfaite sont effectuées. Ces actions de maintenance réduisent les capacités disponibles de livraison du CDU rendant une partie ou la totalité du système inactif ou OUT-OF-SERVICE. De plus, la maintenance préventive rend le système plus efficient. Tout d'abord, nous avons formalisé le problème pour un seul CDU, à savoir le problème 1/N pouvant communiquer avec d'autres CDU, afin de compléter la demande, en cas de besoin. Pour (cette fin), nous avons étudié deux cas. Le premier cas consiste à sous-traiter à 1/N CDU, c'est-à-dire en mono affectation. Quant au deuxième cas, nous avons adopté le cas de multi affectations  $n/N$ , en tenant compte aussi des critères environnementaux. Ensuite, nous avons étendu le travail, pour étudier le cas de plusieurs CDU, (le cas N/N), qui peuvent communiquer entre eux afin de collaborer et minimiser les reports des livraisons.

Un exemple numérique a été proposé afin de déterminer les plans de distribution optimale et le nombre optimal d'actions de maintenances préventives, en calculant la capacité disponible dans chaque période. Enfin, en utilisant ces résultats, nous obtenons le plan de distribution optimale en tenant compte des capacités disponibles. En outre, les résultats numériques ont permis de prouver l'apport de la stratégie de collaboration inter-CDU, tout en tenant compte de la variabilité de la disponibilité de ces sites.

Dans les travaux futurs, nous introduirons la complexité temporelle de notre modèle mathématique pour résoudre des problèmes de taille plus importante. De plus, nous pourrions résoudre cette problématique en temps réel(s) avec des paramètres incertains, en prenant des méthodes dynamiques qui utilisent des objets connectés, tels que la méthode multi agents.

# Conclusions & Perspectives

## Conclusion générale

Dans le domaine de la logistique urbaine, la mutualisation des flux est une stratégie émergente d'amélioration de la performance. Le principe de la mutualisation consiste à transférer l'effort de coordination pour massifier les flux d'opérateurs indépendants vers une organisation mutualisée. Cette organisation est conçue pour partager des moyens de transport afin de gérer les livraisons et les flux inverses (collecte ménagère, retour fournisseurs, enlèvements pour expédition, etc...), et des CDU utilisés pour servir les différentes parties prenantes, telles que les commerçants, les clients, les institutions publiques, etc.

Notre contribution se situe au niveau de la gestion des flux. En effet, des approches et des solutions techniques existent déjà sur le marché, mais un aspect est souvent ignoré ou faiblement considéré : la logistique inverse. Nous pensons que l'intégration de cet aspect de gestion des flux inverses dans les CDU amènera un management collaboratif plus optimisé, au-delà d'un simple gain financier. Par exemple, les flux de livraison et de retour seront traités par un seul opérateur. En outre, les piétons verront la circulation diminuer, avec un processus de collecte des déchets plus organisé. Cela peut être observé en fonction de la diminution du nombre de véhicules, de la sélection du transport écologique et de la gestion via un seul processus normalisé.

De telles améliorations auront un impact économique sur les coûts opérationnels. Notre objectif est donc d'optimiser ces coûts via un modèle mathématique pour maximiser les profits en aidant à choisir l'emplacement des CDU et leur nombre. En outre, en définissant les affectations entre commerçants et CDU, pour convenir de la quantité de livraisons et des frais pour la collecte des déchets, nous encouragerons les parties prenantes à être plus conscientes de l'environnement pour produire moins de déchets et autres externalités négatives pour le territoire (pollutions sonore et visuelle, par exemple).

La prise en compte de la logistique inverse dans la problématique des CDU complexifie la gestion des flux. En effet, les flux passent à travers le CDU par des tournées de véhicules pour la distribution des livraisons, la collecte des produits retournés, la collecte des emballages, ainsi que la collecte des déchets. Pour cerner ce problème, nous avons construit le périmètre de notre approche autour des questions suivantes : Combien de plateformes logistiques doivent être créées, où doivent-elles être localisées et quelle doit être leur taille ? Quelle flotte de véhicules doit être affectée à chaque plateforme ? Comment répartir les véhicules dans les différentes zones de demande ?

Trois apports ont défini notre contribution de thèse. Le premier apport est le modèle mathématique que nous avons formalisé autour du problème de localisation des CDU selon un critère de maximisation du profit par une meilleure localisation géographique. Nous avons développé un algorithme permettant le choix d'un emplacement optimal parmi ceux disponibles (infrastructures, foncier, accès aux voies de communication, etc...), tout en garantissant le traitement des flux retournés (collecte, tri, revente), ce qui permet de maximiser les bénéfices

en grande partie générés à travers la valorisation des flux inverses. Les bénéfices calculés le sont en intégrant tous les coûts directs et indirects, à savoir : le coût fixe d'exploitation des CDU, le coût du transport en milieu urbain, le coût logistique, le coût de la pollution et le coût d'acceptabilité des résidents. En ce qui concerne les revenus, sont pris en compte la revente des produits retournés vers le distributeur ou le reconditionnement, ainsi que la vente des déchets recyclables.

Afin d'étudier le comportement de notre modèle, et valider sa capacité à résoudre la problématique, la première étape de nos travaux a été d'inviter le modèle à choisir un seul CDU parmi L possibilités afin de maximiser le profit. Un exemple numérique a ainsi été créé puis décliné afin de déterminer la sensibilité du modèle. Cette résolution nous a permis de prouver la cohérence des résultats obtenus, mais aussi de démontrer qu'un gain est possible à partir d'un certain nombre de périodes et d'un certain nombre de commerçants. Ces résultats valident la viabilité économique de l'intégration des flux logistiques inverses dans la logistique de distribution urbaine.

Le deuxième apport de nos travaux consiste en l'intégration de la possibilité d'utiliser plusieurs CDU et ainsi de segmenter les flux. Là encore, à partir de localisations pré-établies, il conviendra de déterminer quels sont les CDU à opérer et quels flux confier à chacun. La complexité de la problématique ainsi mise en place nous a conduit à linéariser notre modèle mathématique. Nous avons commencé par remplacer ses termes non linéaires en ajoutant des nouvelles variables et des nouvelles contraintes. En premier lieu, nous avons utilisé une résolution avec l'algorithme Branch & Bound sur le solveur pour obtenir des gains financiers, mais cette option s'est révélée lente dans l'exécution. Afin de réduire les temps de calcul tout en cherchant à obtenir une finesse de résultats identique, nous avons adopté une autre méthode basée sur l'algorithme génétique qui nous a permis d'avoir des résultats raisonnables dans un temps plus intéressant qu'avec la première méthode.

Le troisième et dernier apport de notre contribution porte sur la stratégie de collaboration entre plusieurs CDU ouverts pendant des périodes de non-disponibilité, afin de satisfaire des demandes aléatoires. Nous avons présenté une planification de la distribution des CDU sachant que chaque site subit des indisponibilités aléatoires impactant la capacité de livraison. Afin de rendre ces CDU plus efficaces en termes de disponibilité dans chaque période, nous avons présenté une approche collaborative assurant la possibilité pour plusieurs CDU de communiquer entre eux et d'adopter une stratégie de sous-traitance lorsque la demande dépasse la capacité disponible. Des actions de maintenance préventive ont aussi été planifiées afin d'augmenter la capacité de livraisons.

Le choix d'un report de flux vers un CDU, dans le cadre de la sous-traitance, dépend du coût du service, du coût environnemental et des capacités disponibles. Pour la stratégie de maintenance, une réparation minimale et une action de maintenance préventive périodique parfaite sont effectuées. Ces actions de maintenance réduisent les capacités disponibles de livraison du CDU rendant une partie ou la totalité du système inactif ou OUT-OF-SERVICE. Toutefois, la maintenance préventive rend le système plus efficace. Un exemple numérique a été proposé afin de déterminer les plans de distribution optimaux ainsi que la périodicité optimale des actions de maintenance préventive, en calculant la capacité disponible résultante

pour chaque CDU à chaque période. A partir de ces résultats, nous avons obtenu le plan de distribution optimal en tenant compte des capacités disponibles. En outre, les résultats numériques ont permis de prouver l'apport de la stratégie de collaboration inter-CDU, tout en tenant compte de la variabilité de la disponibilité de ces sites.

### **Perspectives**

Notre approche et les contributions présentées débouchent sur plusieurs perspectives. La première perspective concerne l'optimisation de la localisation des différents sites et des tournées des véhicules en tenant compte des types de véhicule utilisés et des critères socio-environnementaux. Il s'agit de déterminer les tournées d'une flotte de véhicules par type afin de livrer une liste de clients, ou de réaliser des tournées d'intervention (maintenance, réparation, contrôles) ou de visites (visites médicales, commerciales, etc.). Le but est de minimiser les flux dans le milieu urbain.

Par ailleurs, il serait pertinent d'étudier le problème de localisation des CDU (PLCDU) avec multi-produits où la demande et l'arrivée des approvisionnements sont incertaines, car dues aux flux de l'e-commerce ; nous pourrions ainsi disposer d'un outil de pilotage dynamique, se détachant de la spécification pour basculer dans l'opérationnel.

Cette même perspective s'articule autour de l'étude détaillée de la complexité temporelle de notre modèle mathématique pour résoudre des problèmes plus grands et plus complexes. Nous pourrions résoudre cette problématique en temps réel(s) avec des paramètres incertains, en prenant des méthodes dynamiques qui utilisent des objets connectés, tels que la méthode multi-agents. Son intérêt réside dans sa capacité de modéliser les différents comportements des entités élémentaires composant l'environnement urbain. La méthode multi-agents va permettre d'offrir la possibilité de créer un monde artificiel à partir de théories, de lois et d'hypothèses, qui permet d'observer puis gérer le comportement des flux à travers les différents paramètres du modèle soumis à des variations. Un autre aspect important est le temps qui est directement intégré sous la forme d'une horloge qui rythme les séquences d'actions des agents, favorisant ainsi des modèles essentiellement d'interactions.

Alors que la logistique urbaine se développe afin d'introduire une plus grande viabilité dans les espaces urbains, nos travaux ouvrent sur de nombreuses perspectives afin de doter les décideurs d'outils prospectifs de redéfinition de la logistique au cœur des villes, mais également, à court terme, d'outils de conduite opérationnelle afin de faire face aux aléas à horizons courts, tels que la société actuelle nous les soumet par des modes de consommation très volatiles et dynamiques.



# Références bibliographiques

- (Abdelai et al., 2014) Abdelhai, L., Malhéné, N., & Gonzalez-Feliu, J. (2014). Logistique urbaine durable : le CDU, un point de convergence entre les différents acteurs. In 1ère conférence internationale sur les Systèmes Industriels et Logistiques, SIL 2014.
- (Alumur & Kara, 2008) Alumur, S., & Kara, B. Y. (2008). Network hub location problems: The state of the art. *European journal of operational research*, 190(1), 1-21.
- (Alumur et al., 2012) Alumur, S. A., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2012). Hub location under uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(4), 529-543.
- (Aghezzaf et al., 2007) Aghezzaf, E. H., Jamali, M. A., & Ait-Kadi, D. (2007). An integrated production and preventive maintenance planning model. *European journal of operational research*, 181(2), 679-685.
- (Arostegui et al., 2006) Arostegui, M. A., Kadipasaoglu, S. N., & Khumawala, B. M. (2006). An empirical comparison of tabu search, simulated annealing, and genetic algorithms for facilities location problems. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 742-754.
- (Atasu et al., 2008) Atasu, A., Guide, V. D. R., & Wassenhove, L. N. (2008). Product reuse economics in closed-loop supply chain research. *Production and Operations Management*, 17(5), 483-496.
- (Awasthi et al., 2011) Awasthi, A., Chauhan, S. S., & Goyal, S. K. (2011). A multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(1), 98-109.
- (Aykin, 1994) Aykin, T. (1994). Lagrangian relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem. *European Journal of Operational Research*, 79, 501–523.
- (Bistorin et al., 2015) Bistorin, O., Ndhaief, N., & Rezg, N. (2015). Logistique urbaine : Apports de la modélisation et de la simulation à travers le cas du plateau piétonnier de la ville de Metz (No. hal-01507871).
- (Boudouin, 2006) Boudouin, D. (2006). Les espaces logistiques urbains – Guide méthodologique. Paris : La documentation française.
- (Browne et al., 2005) Browne M., Sweet M., Woodburn A., Allen J. (2005), Urban freight consolidation centres, Final Report for the Department for transport. 2 November 2005.
- (Boniver et al., 2005) Boniver, V., Daxhelet, D., De Coninck, S., & De Keersmaecker, M. (2005). Protocole de Kyoto : Aménagement du territoire, mobilité et urbanisme.
- (Bouhana et al., 2013) Bouhana, A., Chabchoub, H., Abed, M., & Fekih, A. (2013, May). A multi-criteria decision making approach based on fuzzy theory and fuzzy preference relations for urban distribution centers' location selection under uncertain environments. In *Advanced Logistics and Transport (ICALT), 2013 International Conference on* (pp. 556-561). IEEE.

- (Boutary et al., 2016) Boutary, M., Monnoyer, M. C., & St-Pierre, J. (2016). Les PME à l'ère de la mondialisation : démystifier la délocalisation et la multi localisation. PUQ.
- (Campbell, 1994) Campbell, J. F. (1994). A survey of network hub location. *Studies in Locational Analysis*, 6, 31-49.
- (Cerema, 2014) Cerema (2014), La logistique urbaine – Connaître et agir, Collection Références, les éditions du CERTU.
- (Chanut et al., 2012) Chanut, O., Paché, G., & Wagenhausen, F. (2012). Logistique urbaine : refonder les logiques d'intermédiation. *Management & Avenir*, (1), 186-207.
- (Chouinard, 2003) Chouinard, M. (2003) Système organisationnel et architecture d'un support d'information pour l'intégration des activités de logistique inversée au sein d'un centre de réadaptation [ressource électronique]. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec.
- (Chu et al., 2009) Chu, C., Ghaffari, A., & Mousseau, V. (2009). Le Global sourcing : la localisation des entrepôts. Mémoire Thématique.
- (Chronopost, 2008) Chronopost : plus de livraisons vertes dans le centre de Paris, Communiqué de presse du 9 décembre 2008, Paris
- (Crainic et al., 2009) Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009). Models for evaluating and planning city logistics systems. *Transportation science*, 43(4), 432-454.
- (Dablanc et al., 2017) Dablanc, L., Savy, M., Veltz, P., Culoz, A., & Vincent, M. (2017). Des marchandises dans la ville : Un enjeu social, environnemental et économique majeur (Doctoral dissertation, IFSTTAR-Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux).
- Decision No. 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 Living Well, Within the Limits of Our Planet.
- (Dellagi et al., 2007) Dellagi, S., Rezg, N., & Xie, X. (2007). Preventive maintenance of manufacturing systems under environmental constraints. *International Journal of Production Research*, 45(5), 1233-1254.
- (Dellagi et al., 2010) Dellagi, S., Rezg, N., & Gharbi, A. (2010). Optimal maintenance/production policy for a manufacturing system subjected to random failure and calling upon several subcontractors. *International journal of management science and engineering management*, 5(4), 261-267.
- (Duan et al., 2015) Duan, H., Li, P., & Yu, Y. (2015). A predator-prey particle swarm optimization approach to multiple UCAV air combat modeled by dynamic game theory. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2(1), 11-18.
- (Elhedhli & Hu, 2005) Elhedhli, S., & Hu, F. X. (2005). Hub-and-spoke network design with congestion. *Computers & Operations Research*, 32 (6), 1615-1632.

(European Commission, 2014) European Commission (2014). “Living Well, Within the Limits of Our Planet”. 7th EAP—The New General Union Environment Action Programme to 2020; European Commission: Brussels, Belgium.

(Fao, 2008) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): European Union, communication division. (2008). The state of food and agriculture.

(Farahani et al., 2013) Farahani, R. Z., Hekmatfar, M., Arabani, A. B., & Nikbakhsh, E. (2013). Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. *Computers & Industrial Engineering*, 64(4), 1096-1109.

(Fei et al., 2007) Fei, C., Yan, C., & Li-wei, Z. (2007). Model for selecting location of logistics distribution center. In *Grey Systems and Intelligent Services, 2007. GSIS 2007. IEEE International Conference on* (pp. 1208-1211). IEEE.

(Filipović et al., 2009) Filipović, V., Kratica, J., Tošić, D., & Dugošija, D. (2009). GA inspired heuristic for uncapacitated single allocation hub location problem. *Applications of Soft Computing*, 149-158

(Freire et al., 2016) Freire, A. S., Moreno, E., & Yushimito, W. F. (2016). A branch-and-bound algorithm for the maximum capture problem with random utilities. *European Journal of Operational Research*, 252(1), 204-212.

(Fulconis et al., 2009) Fulconis, F., Monnet, M. & Paché, G. (2009). Le prestataire de services logistiques, acteur clé du système de logistique inversée. *Management & Avenir*, 24,(4), 83-102. doi:10.3917/mav.024.0083.

(Gelareh & Nickel, 2011) Gelareh, S., & Nickel, S. (2011). Hub location problems in transportation networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 1092-1111.

(Gonzalez-Feliu, 2013) Gonzalez-Feliu, J. (2013). Modèles et méthodes pour la logistique urbaine : les problèmes de tournées de véhicules à deux échelons. Mémoire de thèse à Politecnico di Torino, Turin, Italie.

(Grandval & Nimtrakool, 2016) Grandval, S. & Nimtrakool, K. (2016). Les antécédents de l’émérgence de Centres de Distribution Urbaine (CDU) : le cas de Bristol-Bath. *RIODD 2016*, Saint-Etienne, France.

(Guyon et al., 2011) Guyon, O., Absi, N., Feillet, D. (2011). Localisation de plateformes logistiques en milieu urbain. In 12ème congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision.

(Hajej et al., 2014) Hajej, Z., Rezg, N. & Cormier, G. (2014) . Integrated transportation and maintenance problem. In *Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2014 IEEE 11th International Conference on* (pp. 474-479). IEEE.

(Hajej et al., 2009) Hajej, Z., Dellagi, S. & Rezg, N. (2009). An optimal production/maintenance planning under stochastic random demand, service level and failure

rate. In *Automation Science and Engineering, 2009. CASE 2009. IEEE International Conference on* (pp. 292-297). IEEE.

(Hajej et al., 2011) Hajej, Z., Dellagi, S. & Rezg, N. (2011). Optimal integrated maintenance/production policy for randomly failing systems with variable failure rate. *International Journal of Production Research*, 49(19), 5695-5712.

(Hashim et al., 2014) Hashim, M., Yao, L., Nadeem, A. H., Nazim, M., & Nazam, M. (2014). Logistics distribution centers location problem under fuzzy environment. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Management Science and Engineering Management* (pp. 927-939). Springer, Berlin, Heidelberg.

(Klose & Drexl, 2005) Klose, A., & Drexl, A. (2005). Facility location models for distribution system design. *European journal of operational research*, 162(1), 4-29.

(Kokkinaki et al., 2001) Kokkinaki, A. I., Dekker, R., de Koster, R., & Pappis, C. (2001). From e-trash to e-treasure: how value can be created by the new e-business models for reverse logistics (No. EI 2000-32/A).

(Lambert & Riopel, 2003) Lambert, S. & Riopel, D. (2003). *Logistique inverse : revue de littérature*.

(Li & Yeh, 2005) Li, X., & Yeh, A. G. O. (2005). Integration of genetic algorithms and GIS for optimal location search. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(5), 581-601.

(Lin et al., 2012) Lin, C. C., Lin, J. Y., & Chen, Y. C. (2012). The capacitated p-hub median problem with integral constraints: An application to a Chinese air cargo network. *Applied Mathematical Modelling*, 36(6), 2777-2787.

(Lu & Bostel, 2007) Lu, Z., & Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research*, 34(2), 299-323.

(Marcucci & Danielis, 2008) Marcucci, E., & Danielis, R. (2008). The potential demand for a urban freight consolidation centre. *Transportation*, 35(2), 269-284.

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2016). *La logistique tour d'horizon*. Salon SITL.

(Morana, 2015) Morana, J. (2015). La logistique urbaine durable de demain. *Logistique & Management*, 23(2), 7-19.

(Munoz-Villamizar et al., 2013) Munoz-Villamizar, A., Montoya-Torres, J. R., Juan, A. A., & Caceres-Cruz, J. (2013). A simulation-based algorithm for the integrated location and routing problem in urban logistics. In *Simulation Conference (WSC), 2013 Winter* (pp. 2032-2041). IEEE.

(Murray & Church, 1996) Murray, A. T., & Church, R. L. (1996). Applying simulated annealing to location-planning models. *Journal of Heuristics*, 2(1), 31-53.

- (Ndhaief et al., 2015) Ndhaief, N., Bistorin, O., & Rezg, N. (2015). Problem analysis of logistic platform based on combined forward and reverse flows: A case study. In *Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015 International Conference on* (pp. 568-573). IEEE.
- (O'Kelly, 1987) O'Kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32 (3), 393-404
- (Panero et al., 2011) Panero, M. A., SHin, H. S., & Lopez, D. P. (2011). Urban distribution centers—A Means to reducing freight vehicle miles traveled (No. C-08-23).
- (Pasternak et al., 2014) Pasternak, A. & Pellissier, J. (2014). Chapitre 27. Transport et logistique : enjeux territoriaux et rôle des autorités locales et régionales. Dans *MediTERRA 2014 : Logistique et commerce agro-alimentaires. Un défi pour la Méditerranée* (pp. 485-501). Paris : Presses de Sciences Po (P.F.N.S.P.).
- (Rao et al., 2015) Rao, C., Goh, M., Zhao, Y., & Zheng, J. (2015). Location selection of city logistics centers under sustainability. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 36, 29-44.
- (Škrinjar et al., 2012) Škrinjar, J. P., Rogić, K., & Stanković, R. (2012). Location of urban logistic terminals as hub location problem. *PROMET-Traffic&Transportation*, 24(5), 433-440.
- (Taniguchi et al., 1999) Taniguchi, E., Noritake, M., Yamada, T., & Izumitani, T. (1999). Optimal size and location planning of public logistics terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 35(3), 207-222.
- (Taniguchi, 2012) Taniguchi, E. (2012, May). Concept and best practices of city logistics. In *International Transport Forum*.
- (Tian et al., 2016) Tian, G., Ren, Y., & Zhou, M. (2016). Dual-objective scheduling of rescue vehicles to distinguish forest fires via differential evolution and particle swarm optimization combined algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(11), 3009-3021.
- (Topcuoglu et al., 2005) Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M., & Yilmaz, G. (2005). Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms. *Computers & Operations Research*, 32(4), 967-984.
- (Turki et al., 2012) Turki, S, Hajej, Z., & Rezg, N. (2012). Impact of delivery time on optimal production/delivery/maintenance planning. In *Automation Science and Engineering (CASE), 2012 IEEE International Conference on* (pp. 335-340). IEEE.
- (United Nations, 2014) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014). *World Urbanization Prospects : The 2014 Revision, Highlights* (ST/ESA/SER.A/352).
- (Vallée & Yildizoğlu, 2004) Vallée, T., & Yildizoğlu, M. (2004). Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie. *Revue d'économie politique*, 711-745.

(Tian et al., 2016) Tian, G., Ren, Y., & Zhou, M. (2016). Dual-objective scheduling of rescue vehicles to distinguish forest fires via differential evolution and particle swarm optimization combined algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(11), 3009-3021.

(Yang et al., 2007) Yang, L., Ji, X., Gao, Z., & Li, K. (2007). Logistics distribution centers location problem and algorithm under fuzzy environment. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 208(2), 303-315.

(Zabihi & Gharakhani, 2018) Zabihi, A., & Gharakhani, M. (2018). A literature survey of HUB location problems and methods with emphasis on the marine transportations. *Uncertain Supply Chain Management*, 6(1), 91-116.

